



船舶による大気汚染の防止

第 2 回 IMO GHG 調査報告 2009

IMO GHG 調査報告 2000 の改訂版

Phase 1 及び Phase 2 の範囲にわたる最終報告

事務局による表書き

概要

要旨：	この表書きの付属文書 (Annex) は、船舶による温室効果ガス排出に関する 2000 年の調査報告を見直した結果を詳細に報告するものであり、「第 2 回 IMO GHG 調査報告 2009」と命名された。
戦略方針：	7.3
ハイレベルな対策：	7.3.1
期待される成果：	7.3.1.3
必要な措置：	第 6 項
関連文書：	MEPC 45/8; MEPC 55/23; MEPC 56/23; MEPC 57/4/18 及び Add.1 MEPC 57/21; MEPC 58/4/2; MEPC 58/4/4 及び MEPC 59/4/7

背景

- 1 国際海運による温室効果ガス排出に関する 1 回目の IMO 調査報告は、1997 年 9 月に IMO 本部で開催された「大気汚染に関する外交会議」の要請を受けて委託された。その会議は、国際海運に関連する大気汚染問題を検討するため、より具体的には MARPOL 条約に対する 1997 年議定書 (Annex VI: 船舶による大気汚染を防止するための規則) を採択するために IMO が招集したものである。船舶からの温室効果ガス排出に関する第 1 回 IMO 調査報告は 1996 年当時の数値を使用し、文書 MEPC 45/8 として 2000 年に発行された。

2000 年 IMO GHG 調査報告の見直し

- 2 MEPC 55 では 2000 IMO GHG 調査報告は全般的な見直しをおこなうべきとの合意に達し、MEPC 56 でこの作業の検討項目 (Terms of Reference) について合意した。見直し作業の進捗は MEPC 57 (MEPC 57/4/18 及び Add. 10) 及び MEPC 58 (MEPC 58/42) で報告された。見直し作業の最終進捗報告は文書 MEPC 59/4/4 を参照されたい。
- 3 この見直し作業に伴い設立された運営委員会 (Steering Committee) は、「IMO GHG 調査報告 2000」の改訂版を「第 2 回 IMO GHG 調査報告 2009」と命名することに決めた。

委員会に対する報告

- 4 Phase 1 の見直し結果は第 58 回総会で報告された。MEPC 58 では、調査報告の見直し作業を委託された国際コンソーシアムのコーディネータを務める MARINTEK の Dr. Buhaug からプレゼンを受けた。その席で同博士は「船舶による温室効果ガス排出に関する IMO 調査報告 2000」の Phase 1 の見直し結果が掲載された文書 MEPC 58/4/4 (要約) 及び MEPC 58/INF.6 (詳細報告) 中の主な調査結果について要旨を報告した (文書 MEPC 58/23 の 4.23 項を参照)。
- 5 「第 2 回 IMO GHG 調査報告 2009」(Phase 1 に加えて Phase 2 も含む) の報告全文は、この文書の付属文書 (Annex) としてまとめられた。要旨は文書 MEPC 59/4/7 を参照されたい。

委員会に対する要請事項

- 6 委員会は、添付の付属文書「第 2 回 IMO GHG 調査報告 2009」を、船舶による温室効果ガス排出問題に対して今後検討を加える上でのベースとして位置付けるよう要請を受けた。

ANNEX



The International Maritime Organization (IMO)

世界海事機構 (IMO)

(第 2 回 IMO GHG 調査報告 2009)

免責事項

この調査報告書は、その発行日時点から、全てあるいは一部において、提出先である IMO の審議を受けるものである。

この調査報告書に引用した見解及び結論は、それを執筆した科学者の見解及び結論である。



第 2 回 IMO GHG 調査報告 2009

2009 年 4 月 9 日

IMO の要請を受けて以下の機関が作成した。

- マリンテック (MARINTEK) (ノルウェー)
- CE デルフト (CE Delft) (オランダ)
- 大連海事大学 (中国)
- ドイツ航空宇宙センター (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V.: DLR) (ドイツ)
- ノルウェー船級協会 (DNV) (ノルウェー)
- 環境エネルギー協会 (Energy and Environmental Research Associates: EERA) (米国)
- ロイド船級協会・フェアプレイ研究所 (Lloyd's Register – Fairplay Research) (スウェーデン)
- マンチェスターメトロポリタン大学 (英国)
- 木浦国立海洋大学 (MNMU) (韓国)
- 海上技術安全研究所 (NMRI) (日本)
- 海洋政策研究財団 (OPRF) (日本)



CE Delft



DLR



DNV



Manchester
Metropolitan
University



NMRI



序文

船舶による温室効果ガス排出に関する今回の調査報告は、2000年にIMOが発行した *Study of Greenhouse Gas Emissions from Ships* を見直すものとして委託された。この改訂調査報告書は、IMOに代わってMARINTEKが主宰する国際コンソーシアムが作成した。作業は以下の機関との連携によって実施した：

CE デルフト、大連海事大学、ドイツ航空宇宙センタ、ノルウェー船級協会、環境エネルギー研究協会（EERA）、ロイド船級協会、マンチェスタメトロポリタン大学、木浦国立海洋大学（MNMU）、日本国海上技術安全研究所、海洋政策研究財団（OPRF）

以下のメンバーが本調査報告書の主たる寄稿者である：

Oyvind Buhang（主宰者）、James J. Corbett（「排出量及びシナリオ」に関するグループリーダー）、Veronika Eyring（「気候変動影響」に関するグループリーダー）
（*以下個人名の転記は省略）

取り組みの過程で調査チームは、国際エネルギー機関（IEA）、バルチック国際海運協議会（BIMCO）、国際独立タンカー船主協会（INTERTANKO）、オーストラリア政府、ギリシャ政府、IMO事務局などから情報及び助言の提供を受けた。

この調査報告の主たる目的は以下の課題について定量評価することである： (1) 国際海運による現状及び将来の排出量、(2) 技術および政策によるこれら排出量の削減ポテンシャル (3) これらの排出による気候変動への影響

作業は2段階で実施した。対象とする範囲の一部のみを扱ったPhase 1の結果はMEPC 58/INF.6で報告した。今回の調査報告書は見直し作業の全範囲を対象とするものであり、Phase 1の報告書を修正するとともにそれに優先するものである。

この報告書で引用した見解及び結論は、それを執筆した科学者の見解及び結論である。

推奨引用文献：Second IMO GHG study 2009; International Maritime Organization (IMO) London, UK, April 2009; Buhaug, Ø.; Corbett, J.J.; Endresen, Ø.; Eyring, V.; Faber, J.; Hanayama, S.; Lee, D.S.; Lee, D.; Lindstad, H.; Markowska, A.Z.; Mjelde, A.; Nelissen, D.; Nilsen, J.; Pålsson, C.; Winebrake, J.J.; Wu, W.-Q.; Yoshida, K.

略語リスト

- ACS (Air cavity system) : 空気腔システム
AGWP (Absolute global warming potential) : 絶対地球温暖化係数
AIS (Automatic identification system) : 船舶自動識別装置
AFFR (Aquaous film-forming foams) : 水成膜泡
AMVER (Automated Mutual-assistance Vessel Rescue System) : 自動相互船舶救助制度
BC (Black Carbon) : 黒色炭素
CBA (Cost-benefit analysis) : 費用効果分析
CDM (Clean development mecahanism) : クリーン開発メカニズム
CFC (Chlorofluorocarbons) : クロロフルオロカーボン
CFD (Computational fluid dynamics) : 数値流体力学
CH4 (Methane) : メタン
CO (Carbon monoxide) : 一酸化炭素
CO₂ (Carbon dioxide) : 二酸化炭素
COADS (Comprehehensive Ocean-Atmosphere Data Set) : 統合海洋気象データセット
CORINAIR (Core Inventory of Air Emissions – Programme to establish an inventory of emissions of air pollutants in Europe) : 大気排出物コアインベントリ (ヨーロッパにおける大気汚染物質排出インベントリ作成計画)
ECA (Emission Control Area) : 排出規制海域
EEDI (Energy Efficiency Design Index) : エネルギー効率設計指標
EEOI (Energy Efficiency Operation Index) : エネルギー効率運航指標
EJ (Exajoule) (10¹⁹ joules) : 10¹⁹ ジュール
EIA (United States Energy Information Administration) : 米国エネルギー情報局
EGR (Exhaust gas recirculation) (NOx reduction technology) : 排ガス循環 (NOx 削減技術)
EU ETS (European Union Emissions Trading Scheme) : EU 排出権取引制度
FAME (Fatty Acid Methyl Ester) (a type of bio-diesel) : 脂肪酸メチルエステル (バイオディーゼルの一種)
FTD (Fischer-Tropsch diesel (a type of synthetic diesel) : フィッシャー・トロプシュディーゼル (合成ディーゼルの一種)
GCM (Global climate model) : 全球気候モデル
GDP (Gross Domestic product) : 国内総生産
GHG (Greenhouse gas) : 温室効果ガス
GT (Gross tonnage) : 総トン
GTP (Global temperature change potential) : 地球温度変化係数
GWP (Global warming potential) : 地球温暖化係数
HFC (Hydrochlorofluorocarbons) : ハイドロフルオロカーボン
HFO (Heavy fuel oil) : 重油
HVAC (Heat, ventilation and air conditioning) : 加熱・換気・空調
ICF (International Compensation Fund for GHG emission from ships) : 船舶による GHG 排出に対する国際補償基金
IEA (International Energy Agency) : 国際エネルギー機関
IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) : 気候変動に関する政府間パネル

ISO (International Organization for Standardization) : 国際標準化機構
LNG (Liquefied natural gas) : 液化天然ガス
LRFPR (Lloyd's Register – Fairplay Research) : ロイド船級協会・フェアプレイ研究所
LRIT (Long range identification and tracking system) : 船舶長距離識別追跡システム
MARPOL (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships) : 船舶による汚染防止のための国際条約
MCFC (Molten carbonate fuel cell) : 熔融炭酸塩型燃料電池
MCR (Maximum continuous rating) : 最大連続定格
MDO (Marine diesel oil) (distillate marine fuel with possible residual fuel traces) : 船用ディーゼル油 (少量の残渣含有可とされる船用留出燃料)
MEPC (Marine Environment Protection Committee) : 海洋環境保護委員会
METS (Marine emissions trading scheme) : 海上排出量取引制度
MGO (Marine gas oil) : 船用ガス油
MSD (Medium speed diesel) : 中速ディーゼル
NOx (Nitrogen Oxides) : 窒素酸化物
HMVOC (Non-methane volatile organic compounds) : 非メタン揮発性有機化合物
NSV (Net standard volume) : ネット標準体積
O3 (Ozone) : オゾン
OECD (Organization for Economic Co-operation and Development) : 経済協力開発機構
OPRF (Ocean Policy Research Foundation) : 海洋政策研究財団
PAC (Polycyclic aromatic hydrocarbone) : 多環芳香族炭化水素
PFOS (Parfluorooctane sulphonates) : ペルフルオロオクタンスルホン酸
PM (Particulate matter/material) : 粒子状物質/物体
PM10 (Particulate matter/material with aerodynamic diameter 10 micrometres or less) : 10μ以下の空気力学的直径を持った粒子状物質/物体
POM (Particulate organic matter/material) : 粒子状有機物質/物体
RF (Radiative forcing) : 放射強制力
RPM (Revolutions per minute) : RPM(毎分回転数)
RTOC (Refrigeration, Air conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee) : 冷凍・空調・ヒートポンプ技術選定委員会
SCR (Selective catalytic reduction) : 選択触媒還元
SECA (Sox Emission Control Area) : SOx 排出規制特定海域
SEMP (Ship efficiency management plan) : 船舶効率管理計画
SF6 (Sulphur hexafluoride) : 六フッ化硫黄
SFOC (Specific fuel oil consumption) : 燃料消費率
Sox (Sulphur oxides) : 硫黄酸化物
SOFC (Solid oxide fuel cell) : 固体酸化物型燃料電池
SRES (Special Reort on Emission Scenarios (IPCC) 排出量シナリオに関する特別報告
SSD (Slow speed diesel) : 低速ディーゼル
TDC (Top dead centre) : 上死点
TEU (Twenty foot equivalent unit) : TEU(20 フィートコンテナ換算)
UNCTAD (United Nations Conference on Trade and Development) : 国連貿易開発会議
UNEP (United Nations Environment Programme) : 国連環境計画

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) : 気候変動に関する
国連枠組み条約

VOC (Volatile organic compounds) : 揮発性有機化合物

定義

国際海運 (International shipping)	異なる国の港間の海運で「国内海運」の対語。軍艦及び漁船は含まない。この定義では、同一船舶が「国際海運」と「国内海運」の両方に従事する場 合が起こり得る。これは IPCC 2006 ガイドラインとも整合する。
国内海運 (Domestic shipping)	同一国内の港間の海運で「国際海運」の対語。軍艦及び漁船は含まない。この定義では同一船舶が「国際海運」と「国内海運」の両方に従事する場 合が起こり得る。これは IPCC 2006 ガイドラインとも整合する。
沿岸海運 (Coastwise shipping)	主に海岸線あるいは海域境界線に沿った貨物の輸送及び海運活動を指し (旅客船、フェリー、オフショア船など)「外航海運」の対語。この区別 はシナリオのモデル化のために設けたもので船種によって決まる。すなわ ち船舶は「沿岸航行船」または「外洋航行船」のいずれかに該当する。
外航海運 (Oscean-going shipping)	これもシナリオのモデル化で使われる用語で、外洋を航行しながら貿易に 従事する大型貨物船が該当する。
全ての海運 (Total shipping)	本報告書においては、「国際海運」、「国内海運」に「漁船」を加えたもの として定義する。軍艦は含まない。

目次

第 1 章 要旨	10
第 2 章 海運及びその法体系の概要	21
第 3 章 1990 年から 2007 年までの、海運からのGHG排出量	37
第 4 章 MARPOL Annex VI の実施により達成された排出削減	56
第 5 章 排出削減に対する技術ポテンシャルび運航ポテンシャル	64
第 6 章 GHG及び関連物質削減のための施策オプション	86
第 7 章 国際海運による排出量の将来シナリオ	127
第 8 章 気候影響	160
第 9 章 船舶からのCO ₂ 排出量と他の輸送モードからの排出量との比較	183
Appendix 1 国際海運による 2007 年燃料消費量の推定	194

第1章 要旨

結論

- 2007年の海運によるCO₂排出量を1,046百万トンと推定した。これは同年の地球全体排出量の3.3%に相当する。国際海運による排出量は870百万トンと推定され、地球全体排出量の約2.7%になる。
- 船舶による主要な排出源は排気ガスである。船舶が排出するGHGの内、もっとも重要度の高いものは二酸化炭素である。排出量及び地球温暖化係数の観点からは、船舶が排出するその他のGHGの重要度は低い。
- 中期の排出シナリオによると、排出規制策が実施されない場合、海運活動が拡大成長するため船舶による排出量は2050年までに（2007年比で）150%から250%増加する。
- 技術的な対策及び運航面の対策によって相当量のGHG排出量が削減可能であることを確認した。両方の対策を実施することによって効率が改善され、排出量を現状レベルよりも25%から75%削減できる可能性がある。第5章で述べるように、財政面以外の障害によりその意欲が削がれる場合もあるが、これら対策の多くは費用効果が高いように思える。
- 船舶によるGHG排出量を削減する多くの施策が考えられる。本報告書では、今日のIMOの課題を解決するための選択肢（オプション）を分析した。その結果、市場原理に基づく施策が、費用効果及び環境効果が高い施策であることを発見した。このような施策によって対象となるGHGの排出を大幅に抑制するとともに、海運部門における技術対策及び運航対策の活用を促進し、さらには他部門の排出量を相殺することも可能となる。新造船に対してエネルギー効率設計指標の順守を義務付ける施策は、新造船の設計効率の改善に対するインセンティブを与えることになり費用効果の高い解決法である。しかしながら、その適用が新造船に限定され、さらにインセンティブの対象が設計面での改善のみで運航面での改善には及ばないため、地球環境への効果は限定的なものとなる。
- 一般的に海運は他の輸送手段に比べてエネルギー効率が低いとみなされてきた。しかし、海運のすべての形態が他の輸送手段よりも効率的とは言えない。
- 海運によるCO₂排出は、放射強制力（気候変動の測定基準）のプラスサイドに作用し、長期的な地球温暖化の一因となる。短期的には、海運による地球平均の放射強制力はマイナスであり逆温暖効果を意味するが、局地的な温暖化やその他の気候変動の兆候が見られる可能性もある。長期的には、CO₂の持続的な影響はいかなる短期的な冷却効果よりも強いため、海運による排出も結果として温暖化の方向に作用する。
- 2100年までに気候変動を産業化以前のレベルよりも2°C以内の温度上昇に抑えると

して、さらに海運による排出量が本報告中のシナリオに沿って推移する場合、2050年の海運による推定排出量は、50%の成功率で（2100年までに）気候安定化を達成するために必要なその時点における地球全体のCO₂総排出量の12%から18%を占めることとなる。

背景

- 1.1 IMOが開催した1997年MARPOL会議（1997年9月）において「船舶によるCO₂排出」に関する決議8が採択された。IMOにとってこの決議の採択が、地球全体のGHG排出インベントリの一部として「船舶によるGHG排出量と全体に占める割合」を明確にするための調査を実施するまさにきっかけとなった。この決議のフォローアップとして「船舶によるGHG排出に関するIMO調査報告」が完成し2000年6月のMEPC第45回総会（MEPC 45）で報告された。
- 1.2 MEPC 55（2006年10月）において決議A.963(23)に対するフォローアップと、今後の対策決定の基礎データを与えてそれを支援するため、2000年発行の「船舶によるGHG排出に関するIMO調査報告」を見直すことが合意された。MEPC 56（2007年7月）は旧報告書の見直し作業の「検討項目」（Terms of Reference）を採択するとともに、報告書の改訂版を「第2回IMO GHG調査報告2009」と命名した。この改訂報告書は、その序文の中で述べたように国際コンソーシアムが作成した。

調査報告対象及び構成

- 1.3 「検討項目」に示されたように、今回の調査報告は国際海運による現状と将来の排出量を推定するものである。「国際海運」は、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が策定したガイドラインに沿って定義した。ガイドラインでは、海上の航行による排出は二つの主要カテゴリ、すなわち「国内」と「国際」に区分され、「国際海上航行」とは異なる国の港間の航行と定義されている。国内海運及び漁船の排出量も含む総排出量の推定も今回の報告の対象である。
- 1.4 この調査報告は「検討項目」で指定された温室効果ガス（CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆）及びその他の関連物質（NO_x, NMVOC, CO, PM, SO_x）を対象とする。
- 1.5 この調査報告は以下の主要部分で構成される。
 - .1 海運による温室効果ガス及び関連物質の年間排出インベントリ（1990年－2007年）（第3章）
 - .2 MARPOL Annex VIの実施による海運排出量の削減効果の分析（第4章）
 - .3 排出削減のための技術対策及び運航対策の分析（第5章）
 - .4 排出削減のための施策オプションの分析（第6章）
 - .5 国際海運による排出量の将来シナリオ（第7章）
 - .6 海運による排出が地球温暖化に及ぼす影響の分析（第8章）
 - .7 海運輸送のエネルギー効率及びCO₂効率の他の輸送形態との比較（第9章）

1990年から2007年の排出量

- 1.6 この調査報告における分析によって、海運による GHG 排出量に対し排ガスが支配的な排出源であることが分かった。また原油の輸送に伴う冷媒の漏れあるいは揮発性有機化合物の放出による排出量を求めた。その他の排出源として、消火設備の試験及びメンテナンスによる排出のような種々の排出源が挙げられるが、これらはこの調査報告では詳細検討及び定量化はおこなわなかった。
- 1.7 国際海運の排ガスによる排出量の算定には、初めに国際海運の総燃料消費量を求めるという手法を用いた。求めた燃料消費量に対して対象とする汚染物質の排出係数を掛けてその排出量を求めた。
- 1.8 2007年の燃料消費量は、活動基準 (activity-based) 法によって算定した。これは2000年発行の1回目の「船舶による温室効果ガス排出に関するIMO調査報告」とは異なる算定手法である。今回は燃料統計を使った。今回の検討結果によると、国際燃料統計では燃料消費量が過少に報告される傾向にあると思われる。活動基準による算定では燃料統計データによる算定との間に約30%の差を生じた。
- 1.9 CORINAIR及びIPCC発行のガイドブックの排出係数を、NO_xを除くすべての排出量の推定に使用した。NO_xに関してはMARPOL Annex VIのNO_x規制の影響を加味した調整を加えた。冷媒排出量の値は2006年国連環境プログラム (UNEP) の輸送に伴う冷媒排出量の推定値を引用した。原油からのVOC排出は複数のデータソースを参考にして推定した。
- 1.10 船舶排ガスによる総排出量の内、国際海運による排出量の比率は、2007年の海運による総燃料消費の推定値と国内海運による燃料消費の統計値から求めた。1990年から2007年までの排出量推移は、船舶活動量がFearnresearch発表の海上輸送に関するデータに比例するものとして作成した。2007年のGHG排出量の算定結果を表1-1に示す。SF₆及びPFCの排出量はネグリジブルと考え、定量化しなかった。海運によるCO₂排出量と地球全体の総排出量の比較を図1-1に示す。

表 1-1 海運による GHG 排出量*のまとめ (2007年)

	International shipping	Total shipping	
	million tonnes	million tonnes	CO ₂ equivalent
CO ₂	870	1046	1046
CH ₄	Not determined*	0.24	6
N ₂ O	0.02	0.03	9
HFC	Not determined*	0.0004	≤ 6

* 国内海運、国際海運への分割は不可能

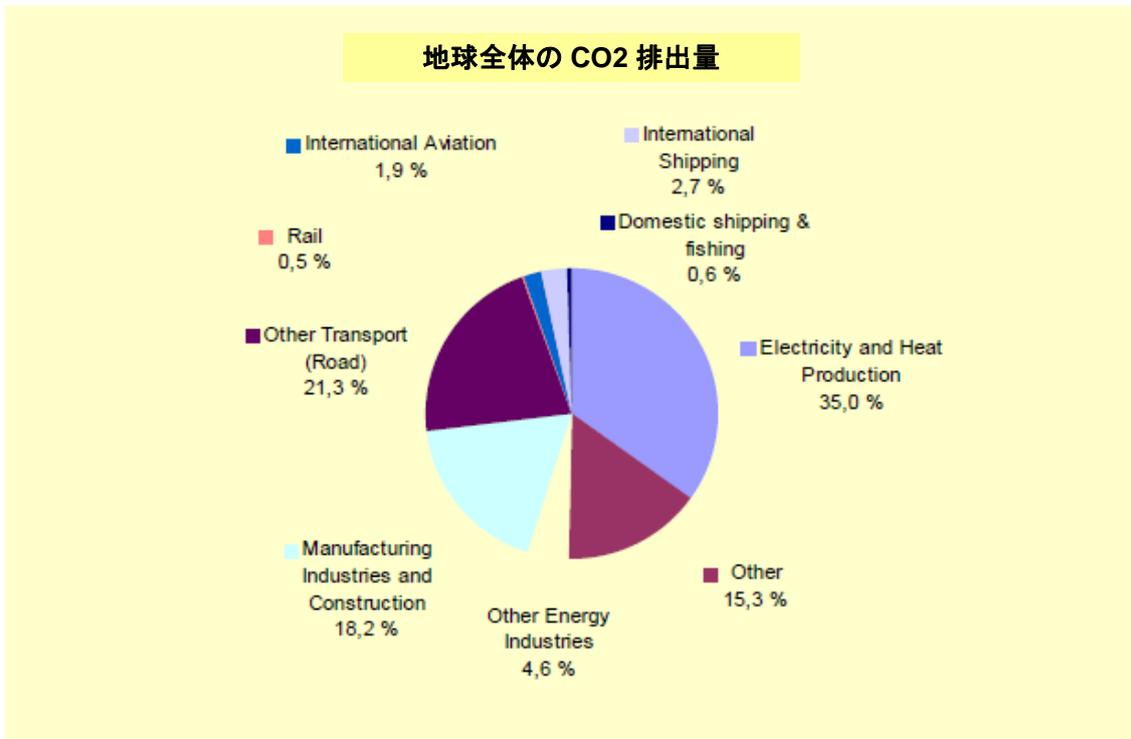


図 1-1 地球全体の排出量と比較した海運による CO₂ 排出量

MARPOL Annex VI の実施による排出削減効果

1.11 MARPOL Annex VI で規定されたことによる排出削減効果を定量評価した。

1.12 モントリオール議定書及び MARPOL Annex VI などいくつかの国際的な合意の結果、船舶によるオゾン層破壊物質（ODSs）の排出削減が達成されつつある。これらの排出削減量を、UNEP 冷凍・空調・ヒートポンプ技術選定委員会（RTOC）発行の 1998 年報告及び 2006 年報告の数値に基づいて算定した。2006 年 RTOC 報告の基準年は 2003 年である。1998 年報告における基準年は不明であるが、以下のような数字が示されている。

.1	CFC	—	735 トン削減	(98%)
.2	HCFC	—	10,900 トン削減	(78%)
.3	HFC	—	415 トン増加	(315%)

1.13 HFC は CFC 及び HCFC の代用品として使用されるため排出量が増加した。

1.14 NO_x 排出量に関しては、規制前の（Tier 0）エンジンと比較して規制後（Tier 1）のエンジンでは消費燃料トン当たり約 12–14%の排出削減が確認された。2007 年時点で、世界船腹が搭載するエンジン出力の約 40%が 2000 年 1 月 1 日以降に建造され、従って Tier 1 に適合していると想定される。2007 年の国際海運による NO_x 排出量のネッ

ト削減量は、規制がない場合をベースとして約 6%である。ただし、国際海運による NOx 排出量そのものの算定結果は 2000 年の 16 百万トンから 2007 年の 20 百万トンに増加した。

- 1.15 SOx 排出量の削減は、二カ所の SOx 排出規制特定海域（SECA）が完全に効力を持った最初の年となる 2008 年について算定した。SECA 有りの場合あるいは規制無しの場合の仮想シナリオの場合にそれぞれ使用される燃料中の平均硫黄含有量など一連の前提によれば、SECA 域内では海運による硫黄酸化物の排出量が約 42%減少したと推定される。
- 1.16 VOC の排出削減量は定量化しなかった。MARPOL Annex VI 規定 15 によるもっとも具体的な対策が VOC 戻り配管設置の標準化であり、タンカーはその戻り配管を経由して積荷中に VOC を陸に排出することが可能となった。使用頻度はまちまちであるが、いまやほとんどのタンカーがこの機能を備えている。

排出削減のための技術的対策及び運航面の対策

- 1.17 船舶設計あるいは運航方法の変更によってエネルギー効率の向上並びに排出削減を図る種々のオプションについて検証した。これらオプションの CO₂ 排出削減ポテンシャルの全体評価を表 1-2 に示す。CO₂ 排出削減の第一歩はエネルギー効率の改善であり、この削減ポテンシャルは一般的に船舶排ガスによるすべての排出に適用される。

表 1-2 周知の技術対策及び運航対策による海運からの CO₂ 排出削減ポテンシャルの評価

DESIGN (New ships)	Saving of CO ₂ tonne-mile	Combined	Combined
Concept, speed & capability	2% to 50% ⁺	10% to 50% ⁺	25% to 75% ⁺
Hull and superstructure	2% to 20%		
Power and propulsion systems	5% to 15%		
Low-carbon fuels	5% to 15%*		
Renewable energy	1% to 10%		
Exhaust gas CO ₂ reduction	0%		
OPERATION (All ships)			
Fleet management, logistics & incentives	5% to 50% ⁺	10% to 50% ⁺	
Voyage optimization	1% to 10%		
Energy management	1% to 10%		

* このレベルの削減達成には運航速度の低下が必要となる。

* LNG を使用した場合の CO₂ 換算量

- 1.18 削減可能なかなりの部分が現状でもコスト効率が高いと思われる。しかし第 5 章で述べるように財政面以外の障壁のため、対策によってはその導入が制限される場合もある。
- 1.19 再生可能エネルギーは、太陽光発電による電力及び風力による推力などの形での利用が考えられる。ただし風力や太陽光はその強さ及びピーク値が変動する。そのため部

分的な代替エネルギー源としてであれば技術的には実現可能である。

- 1.20 CO₂は海運が排出する GHG の内でもっとも重要度の高い物質であり、これと比べればその他の GHG の排出削減から得られる恩恵は少ない。
- 1.21 ライフサイクル CO₂ 排出量の少ない燃料として、バイオ燃料や液化天然ガス (LNG) が挙げられる。船舶でのバイオ燃料の使用は技術的には可能だが、第一世代バイオ燃料の使用はいくつかの技術課題があり、出力ロスやリスクが増える危険性がある (フィルタの詰まりなど)。それでも近い将来の大々的な採用を控えさせる入手面での制約あるいは高コストといった問題がこれらの課題に影を投げかけている。LNG の場合は、とりわけ LNG が入手しやすい ECA 域内の貿易に関係する船舶にとっては、経済面での魅力が出てくるはずだ。
- 1.22 排ガス中の汚染物質として排出されるその他の関連物質 (NO_x, SO_x, PM, CO, NMVOC) の量は、海運のエネルギー効率の改善によって減少する。改訂 Annex VI の実施により期待される長期的な排出削減量を表 1-3 に示す。排出規制海域の対象範囲の増加及び拡大によって、相当量の排出削減が期待される。

表 1-3 改訂 MARPOL Annex VI による排出削減量の長期見通し

	Global	ECA
NO _x (g/kW·h)	15–20%	80%
SO _x * (g/kW·h)	80%	96%
PM (mass) [†] (g/kW·h)	73%	83%

* 2.7%硫黄含有燃料の場合の削減量

+ 燃料組成の変更によって期待される PM の削減量

- 1.23 (硫黄) 排出規制海域 (S・ECA) によって将来この海域で使用される燃料の最大硫黄含有率が 0.1%に制約される。これは自動車用ディーゼル燃料のレベル (10 ppm、0.001 %) の未だ 100 倍の値であるが、今日の残留燃料中の平均硫黄含有率 2.7%からは大幅な改善である。表 1-3 に示した ECA レベルをはるかに超える排出削減を達成するためには、より厳格な燃料品質要件の設定が必要となる。

排出削減のための施策オプション

- 1.24 船舶による GHG 排出量の削減に利用可能な多くの技術対策及び運航対策を検証した。ただし、対策の実施をサポートする施策を確立しなければ、実行に移されない可能性がある。船舶による GHG 排出量の削減のための施策は実現性の高いものが多い。この調査報告書はそれらオプションの全体観を包括的に把握し、続いて現状の IMO の課題に関連するオプションを詳細に分析した。これらのオプションには以下のようなものがある。

- .1 新造船に対するエネルギー効率設計指標（EEDI）による強制的な制約
- .2 新造船の EEDI の強制的あるいは任意の報告
- .3 エネルギー効率運航指標（EEOI）の強制的あるいは任意の報告
- .4 船舶効率管理計画（SEMP）の強制的あるいは任意の活用
- .5 不順守に対する罰則を伴う EEOI 数値による強制的な制約
- .6 海上排出量取引制度（METS）
- .7 船用燃料油に関する課徴金によって資金調達する一種の国際補償基金（ICF）

1.25 先の MEPC 57 では、船舶 GHG 排出に関して一貫性を持った包括的な将来の IMO 規制枠組みのための判定基準が決定された。今回のオプション分析はこの判定基準に基づくものであり、現在 IMO で検討対象とされている各オプションに対して以下の定性的な結論を導き出した。

- .1 新造船に対するエネルギー効率設計指標（EEDI）による強制力を持つ制約は、新造船の設計効率の改善に対する強いインセンティブとなり費用効果の高い解決法と思われる。EEDI の一番の限界は、船舶設計のみを対象とすることである。すなわち運航面での対策が考慮されていないため環境面の効果も限定される。新造船にのみ適用されるという意味でもその効果は限定的なものとなる。
- .2 EEDI あるいは EEOI の強制的もしくは任意の報告それ自身には環境面での効果はない。むしろ環境的な有効性及び費用効果は、その情報活用のために設定されるインセンティブスキームに依存すると思われる。多くのインセンティブスキームが考えられるが、その評価はこの調査報告の対象外である。
- .3 船舶効率管理計画（SEMP）は、費用効果の高い排出削減対策への関心を高める現実的な手段である。ただしこの手段は排出削減を求めておらず、その有効性は、費用効果の高い排出削減対策（例えば、省燃料効果が投資額や運航費用を超えるような対策）の利用のしやすさによって変わる。また「これまでどおり」の状況を打破するような技術革新や研究開発の刺激策になるものでもない。
- .4 EEOI による強制的な制約は、すべての輸送に携わっている船舶の排出量削減に強いインセンティブを与える費用効果の高い解決法と思われる。それは技術対策及び運航対策の両面に対するインセンティブになる。ただしこのオプションは、運航効率ベースラインを設定して常に更新することの困難さ、あるいは目標設定の困難さによる技術的なハードルが非常に高い。
- .5 海上排出量取引制度（METS）及び船舶による GHG 排出に対する国際補償基金（ICF）制度の両者ともに、環境面での大きな効果が期待される費用効果の高い施策手段である。大量の排出量がその対象となり、海運部門に関連するすべての対策の実行を促進する。さらに他の部門の排出量と相殺することも可能となる。これらの手段は、運航技術及び船舶設計の両面の技術革新に対して強いインセンティブを与える。
- .6 METS の環境面の効果はその制度設計の不可欠な要素であり、必然的に成果が得られると期待される。対照的に ICF の環境面の効果は、他のセクターから余った排出権を購入する際に提供される基金の比率をどうするか判断によって左右される。費用効果、技術革新に対するインセンティブ、実施の可能性に関しては、両施策手段ともに差がないように思われる。

国際海運による排出量の将来シナリオ

1.26 国際海運による将来の CO₂ 排出量を比較的単純なモデルを使って算定した。そのモデルはよく知られたシナリオ実践手法に従って作成したもので、表 1-4 に示すような影響度が高いパラメータを厳選して取り込んだ。

表 1-4 シナリオ分析に使用した主要変数

区分	変数	関連する要素
経済性	海上輸送需要 (トン・マイル/年)	人口、世界全体及び地域の経済成長、モーダルシフト、セクター別需要の変化
輸送効率	輸送効率 (MJ/トン・マイル) — 船隊の構成、船舶技術、運航によって決まる	船舶設計、推進方法の進歩、運航速度、目的は別にあるが結果的に GHG 排出に影響する諸規則
エネルギー	海運が使用する燃料の炭素含有率 (燃料エネルギーC/MJ 当たりのグラム)	燃料のコストおよび入手性 (例えば、残留燃料、蒸留出燃料、バイオ燃料、その他の燃料)

1.27 この調査報告では、カーボン排出量をシナリオの重要なパラメータと位置付けてモデル化した。他の汚染物質の排出量はエネルギー消費量及び MARPOL 規制内容に基づいて推定した。今回のシナリオは、排出量シナリオに関する特別報告 (SRES) の中で気候変動に関する政府間パネル (IPCC) が策定した地球規模の開発枠組みとその実行計画をベースとして作成した。

1.28 経済成長と貿易の歴史的な相関性並びに貿易の地域間シフト、リサイクルの拡大、新たな輸送回廊などを考慮したハイブリッドな手法を採用し、特に輸送に対する将来の需要予測を引き出した。

1.29 CO₂ あるいは燃料効率に関する規制は想定していない。時間経過による効率の改善については、将来の技術的可能性よりも各シナリオ中での費用効果が高い改善を反映させた。

1.30 将来の燃料使用量については、エネルギーの入手性の観点から海運業では 2050 年まで油ベースの燃料の使用が継続されるという SRES シナリオ中の予測に基づいて仮定した。このシナリオ中では GHG 排出に対する規制を設けていないが、石油ベース燃料からの転換を経済的な要素によって奨励する必要がでてくるであろう。使用する燃料に対する MARPOL Annex VI の影響は考慮に入れた。

1.31 シナリオでは 2007 年から 2050 年までをモデル化した。主なシナリオは IPCC の排出シナリオに関する特別報告 (SRES) の用語に従って A1FI、A1B、A1T、A2、B1 及び B2 と名付けた。これらのシナリオは二つの大きな動向、すなわち(1) グローバル化 vs 地域化 (2) 環境的な価値 vs 経済的な価値、を考慮しながら想定した世界人口、世界経済、土地利用、農業などの違いによって特色づけられる。各シナリオの背景は本報告書の第 7 章で検討する。

1.32 CO₂ 排出量の年間増加率は、ベースシナリオでは 1.9 から 2.7%、極端なシナリオでは各々5.2%の増加から 0.8%の減少と算定されている。排出量の増加は海上輸送が増加するとの予測に起因するものである。排出量がもっとも少ないシナリオでは、2050 年には 2007 年比で CO₂ 排出の減少が見られる。各シナリオによる算定結果を図 1-2 に示す。

国際海運による CO₂ 排出予測

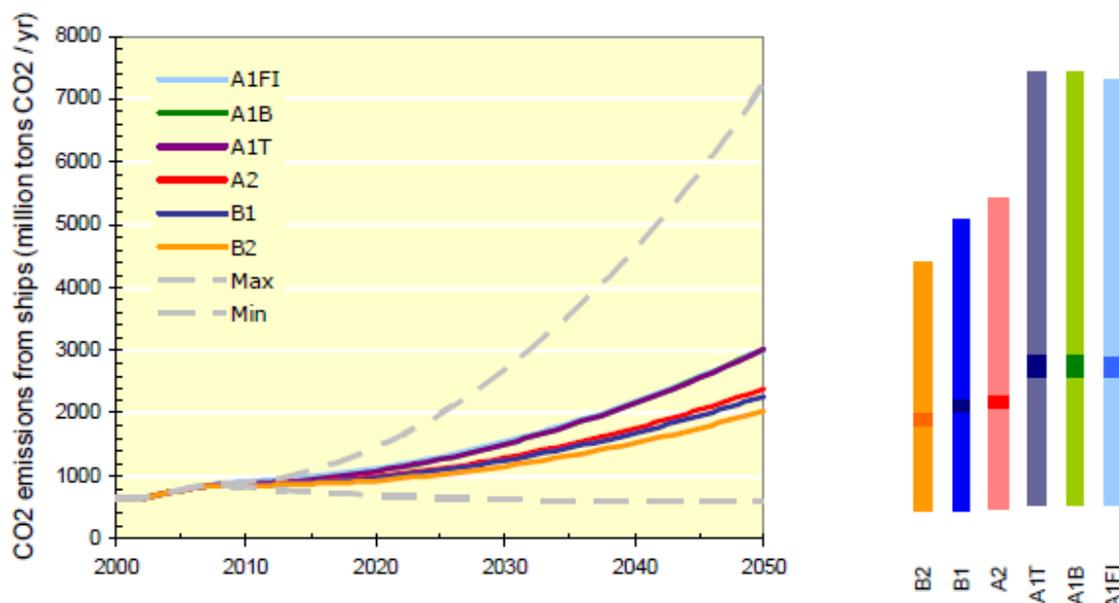


図 1-2 国際海運による排出量推移。右側の棒は各シナリオの中の結果のばらつき範囲を示す。

気候への影響

1.33 最先端のモデルを使用するとともに関連する他の研究とも参照及び比較をしながら船舶による排出の気候影響を詳細に分析した。国際海運による GHG 排出は、大気組成、人間の健康、気候に重大な影響を与えることになる。検討結果を以下に要約する。

- .1 CO₂ のような十分に混合した GHG の増加によって放射強制力* (RF) がプラスになり、持続的な地球温暖化をもたらす。
- .2 2007 年には海運が排出する CO₂ による RF は 49 mW m⁻² であると計算され、2005 年に人為的に排出された CO₂ によるトータル RF の約 2.8% に相当する。
- .3 2050 年シナリオでは海運が排出する CO₂ による RF の範囲は 99 mW m⁻² から 122 mW m⁻² の間と計算され、その最小/最大不確かさ範囲 (シナリオからの) は

* 地球の平均放射強制力と地球の平均表面温度変化の間にはほぼ線形な関係が存在するため、異なる発生源の気候に対する影響を定量化する共通の基準として「放射強制力」(RF) (単位: w/m²) が使われる。RF とは、産業化以前の時代以降に生じた地球と大気間のエネルギーバランスの変化量をいう。例えば CO₂ のような温室効果ガスの増加によって大気がプラスの放射強制力を受ける場合、大気は放射の平衡状態を維持しようとして大気温度が上昇する。

68 mW m⁻² 及び 152 mW m⁻² となる。

- .4 海運による 2007 年のトータル RF は-110 mW m⁻² と算定した。ただし間接効果のいくぶん不確かな推定によって大きく変動し (-116 mW m⁻²)、さらに船舶からの排出に関しては計算しなかった黒色炭素と雪との干渉によって生じる可能性があるプラスの放射強制力は含まない。ここで、CO₂ が長期にわたって大気中に残り、排出後も長く温暖化に加担することを強調したい。この現象を、2007 年以前の海運による排出量の残存効果が温度を下げる方向の作用から上げる方向の作用に変わっていく様子を示すことによって証明した。対照的に硫酸塩は大気中の滞留時間がわずか 10 日間程度で、硫酸塩に対する気候の反応持続時間は 10 年間のオーダーである。一方 CO₂ のそれは数世紀から数千年のオーダーとなる。
- .5 放射強制力及びそれによる温度変化に関してここでは地球平均の簡単な計算結果を示したが、文献に報告された他の研究結果とも一致した。それらの研究でも強調されたように、地球平均温度の変化は気候変動の一次指標に過ぎない。ここに示した計算結果によって、船舶に起因する放射強制力が複雑な空間構造を持つことが分かった。さらには局地的なマイナスの RF の影響によって局地的な温度はさほど変化しなくても、降水量が著しく変化するととの研究結果が、間接的な量り強制の効果に関するより全般的な他の研究から提示された例もある。例えマイナスの RF の影響によるものであっても、降水量のそのような変化は気候変動の一因となる。これは複雑な問題であり、この観点からの更なる検討が必要である。
- .6 船舶による NO_x、SO₂、PM の排出を抑制することは、空気性状、酸性化、富栄養化などに好ましい影響を与える一方で、地球温暖化の防止には全ての発生源（船舶やその他の輸送形態）から排出される CO₂ の削減が求められる。CO₂ 排出削減技術の進展に合わせて、よりクリーンな燃焼あるいはよりクリーンな燃料への転換が進むであろう。
- .7 気候安定化には将来的な地球全体の CO₂ 排出量の大幅削減が必要である。今回の作業で算定した 2050 年の海運による推定排出量は、SRES の気候非介入方針の前提に基づくものであるが、WRE450 安定化シナリオ排出量の 12% から 18% を占める。ここで WRE450 安定化シナリオ排出量とは、地球の平均温度上昇を 50% 以上の確率で 2°C 以内に抑えようとした場合の 2050 年における地球全体の CO₂ 許容総排出量シナリオに合致する。

船舶輸送による排出量と他の輸送形態による排出量の比較

- 1.34. 実際の運転データ、輸送統計、その他情報を使って、種々の輸送形態による CO₂ 効率の範囲を推定した。船舶の CO₂ 効率と他の輸送形態との比較を図 3-1 に示す。効率は ton-km あたりの CO₂ 質量で表わすが、ここでの CO₂ 質量とは輸送活動による総排出量を示し、ton-km は実行される総輸送仕事量を示す。図中に描かれた範囲が各々の標準的な平均範囲を示す。この図は観測された効率の最大値（あるいは最小値）を示すものではない。

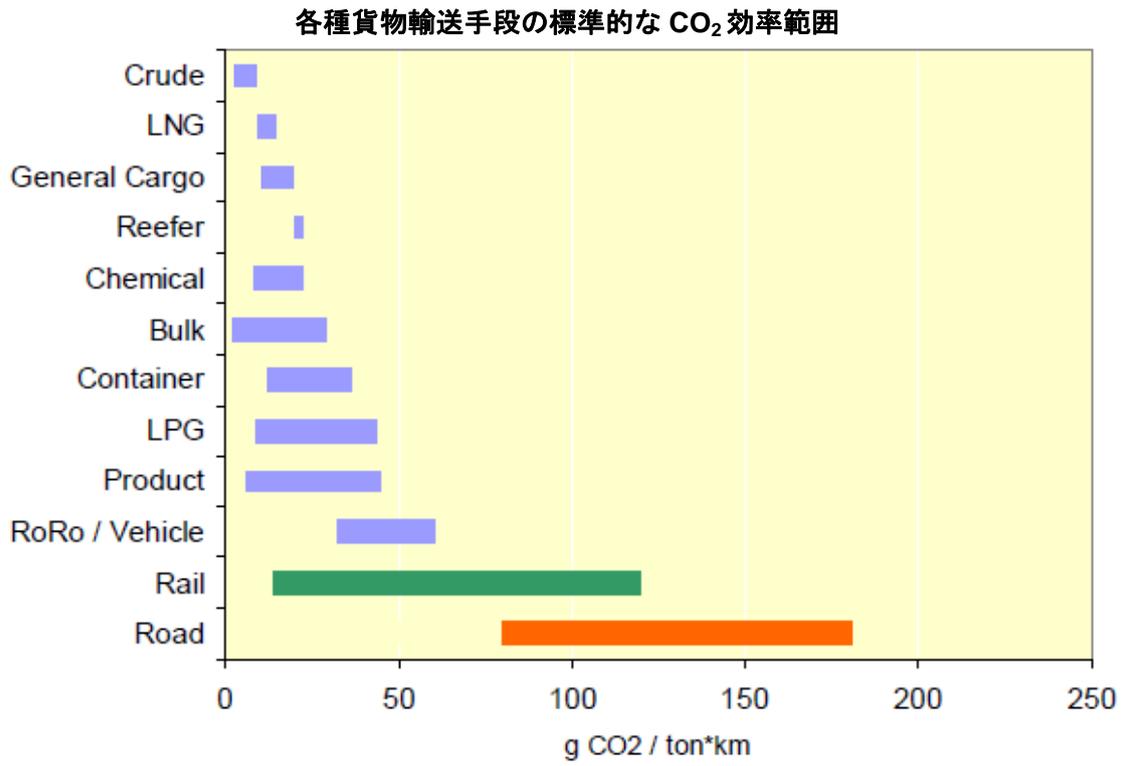


図 1-3 標準的な CO₂ 効率範囲の船舶輸送と鉄道輸送、トラック輸送との比較

第2章 海運及びその法体系の概要

2.1 この章では海運業界の構造と法体系について概説する。特に海運活動の現状並びにそれによる排出量と関連があり、排出量の将来シナリオの作成にも不可欠な予備知識を提供している。

海上貿易及び経済への貢献

2.2 海運による汚染物質の排出量は世界経済に牽引される海運活動と関係がある。従って海上輸送及びその他の海運活動のメカニズムを理解することが、排出インベントリ及びその動向を整理するうえで不可欠である。

2.3 UNCTAD^[2]によれば、体積比で世界の貿易量の約80%が海上経由で輸送される。海上輸送に対する需要は、経済成長と密接に関連している。海運業の活動量は、輸送された荷物の量に輸送の平均距離を掛けたトン・マイルで表される。各種貨物の輸送量を図2-1に示すが、これは2007 ISL 統計年鑑^[1]に掲載されたFearnleysの統計データに基づくものである。貿易及び海運に関する詳細の報告書が毎年UNCTAD^[2]から発行されている。

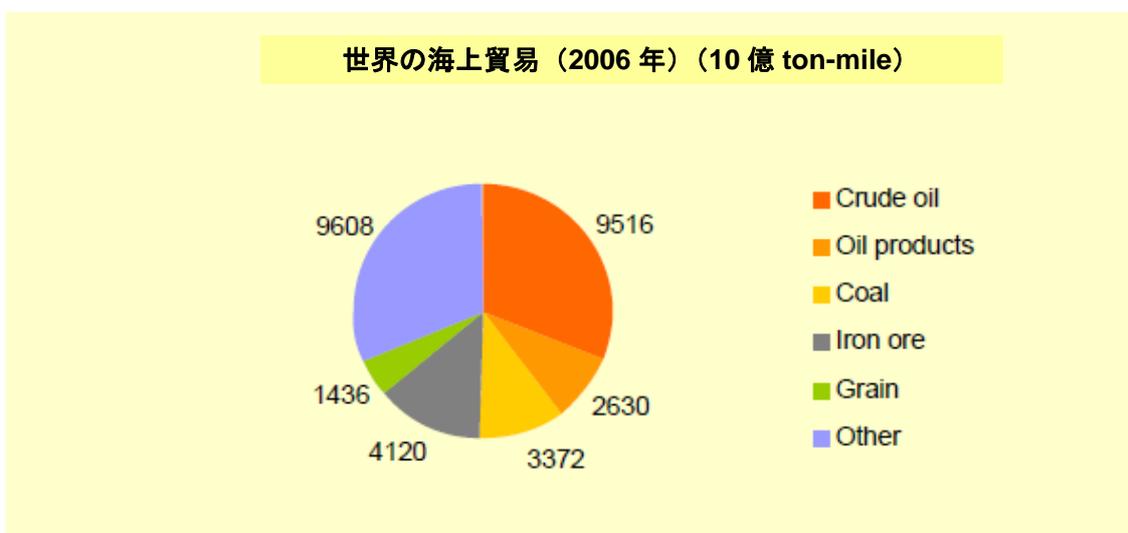


図 2-1 世界の海上貿易（2006年）

2.4 海上輸送は食料、エネルギー、原料、製品などの世界的な需要に応える活動である。船舶は、穀物、米、トウモロコシ、肉、魚、砂糖、野菜、植物油などの重要な食糧、さらには高品質の農作物をより多く収穫するための肥料などを運搬する。原油、石油精製品、石炭、ガスなどの形をしたエネルギーはトン・マイル輸送量の内の重要な比率を占める。さらに鉄鉱石、鉱物、木材、鉄スクラップ、綿、ウール、ゴムなどの原料が半製品、製品と同様に輸送される。貿易や輸送とは別に、特殊な船舶による多様な業務も遂行され、これには海上のサービス活動、インフラ整備（ケーブル敷設、パイプ敷設、浚渫）、漁業、探掘調査、曳航サービスなどが含まれる。

2.5 海上貿易は世界経済とともに成長してきた。1986年から2006年の20年間の貨物別トン・マイル輸送量の平均の年間成長率を図2-2に、また海上貿易総計の推移を図2-3に示す（単位：10億 ton-mile）。このデータは、元々は Fearnresearch が Lloyd's Marine Intelligence Unit の船舶活動データ及び貨物別の輸送量を使って世界の貨物船隊の部分を追跡することにより作成したものである。参考までに、このデータは2007 ISL 統計年鑑^[1]に掲載されている。

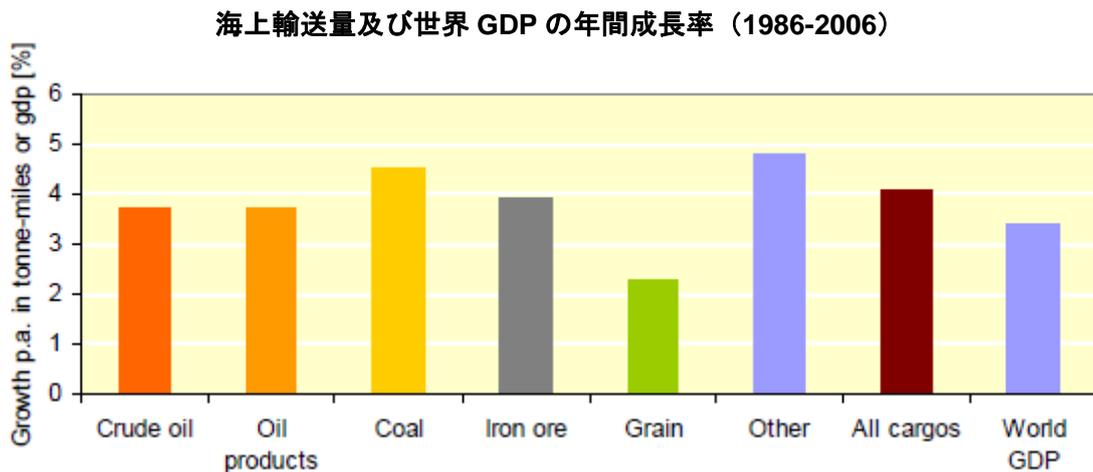


図 2-2 世界の海上輸送量及び GDP の平均年間成長率（1986 年—2006 年）
（Fearnresearch による）

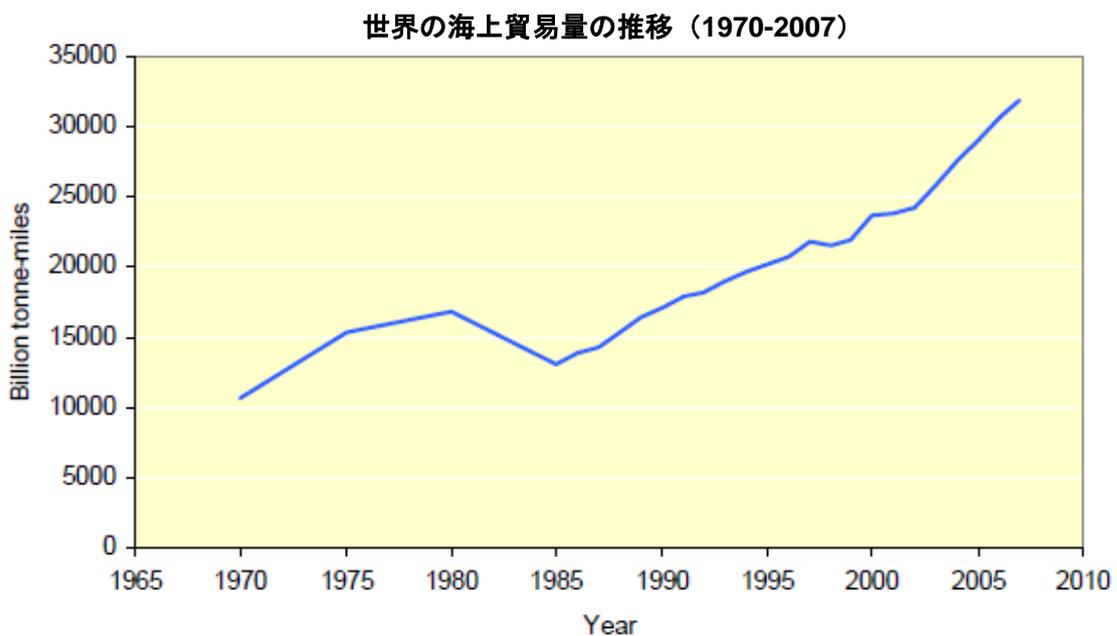


図 2-3 海上貿易量の推移（1970—2007）（10 億 ton-mile）
（Fearnresearch）

- 2.6 総トン・マイル量の平均年間成長率は4.1%である。石炭及びその他貨物がもっとも高い成長率を示し（各々4.5%と4.8%）、一方で穀物がもっとも低い成長率を示した（2.3%）。同じ期間内で世界の経済成長の実質 GDP は平均して年間3.4%増加した^[3]。
- 2.7 国際海運は貿易との密接な関連性を有し、もっとも費用効果の高い輸送手段として円滑な貿易の推進に重要な役割を果たす。経済成長とともに海運業は徐々に拡大し、海運事業の2004年総売上高は表2-1に見られるように1999年比8%増の1兆3000億ドルに達したとの集計がある（Stopford^[4]）。その内、約1/3が商船関連である。表2-1にはこの期間の商船のシェアの増加率も示されている（22%）。

表 2-1 海洋・海運活動の経済全体に占める比率

	US\$ millions		Growth 99-04 (% pa)	Share in 2004 (%)
	1999	2004		
1a. Merchant shipping	160 598	426 297	22	31
1b. Naval shipping	150 000	173 891	3	13
1c. Cruise industry	8 255	14 925	12	1
1d. Ports	26 985	31 115	3	2
Total operations	345 838	646 229	13	47
2. Shipbuilding	133 170	173 482	5	13
3. Marine resources	95 278	116 933	4	8
4. Marine fisheries	185 817	206 103	2	15
5. Other	179 466	243 898	6	18
Total – US\$ millions	939 570	1 386 645	8	100
World GDP (current US\$)	31 025 816	41 732 430		
GDP contribution – marine	3.03%	3.32%		
GDP contribution – shipping	1.01%	1.11%		

出典：Stopford 2009^[4]及び世界銀行のデータ^[5]

- 2.8 今日の海運業は約123万人の船員を雇用する。総船腹の約半数が貨物運搬船であり、3,000を超える主要な港間で運航されている。海運業にとって最大の支援産業は造船業及び船用機械産業で、2004年の売上高はそれぞれ469億US\$と906億US\$を記録した^[4]。世界銀行のGDPデータによると、世界GDPに占める海洋及び海運活動の比率はそれぞれ3%と1%になる^[5]。
- 2.9 世界の海事市場を2.7兆US\$と算定し、その中で造船業を世界的には最大の市場と位置付けた調査もある^[6]。国連貿易開発会議（UNCTAD 2006^[2]）は、船舶運航に伴う運賃収入が世界経済に及ぼす経済効果を3,800億US\$と推定している。
- 2.10 船舶による排出量の過去の推移の推定と将来の予測のため、必要に応じて図2-3に示す世界の海上貿易量の年次推移を使った。例えば、1990年から2007年の排出量は、排出量が世界の海上貿易量に比例して増加すると仮定して2007年の排出インベントリをベースに算定した。

船舶交通の地理的分布

2.12 船舶交通の地理的分布について、文献調査を行い、国際統合海洋気象データセット（ICOADS）及び自動相互船舶救助制度（AMVER）のデータセットを使用した。ICOADS は船舶の位置とその海洋状況及び気象状況の自発的な報告に基づくデータセットであり、自由に利用できる。AMVER はコンピュータを利用した世界中の船舶からの自発的な報告制度であり、米国沿岸警備隊が主宰しているが、海上遭難者の救助手配のため世界中の捜索救助機関が利用できる。これらのデータセットはともに偏りの傾向がみられるが、船舶交通が北半球と沿岸海域に集中していることが明白である。ICOADS に基づく分布図を図 2-4 に示す。

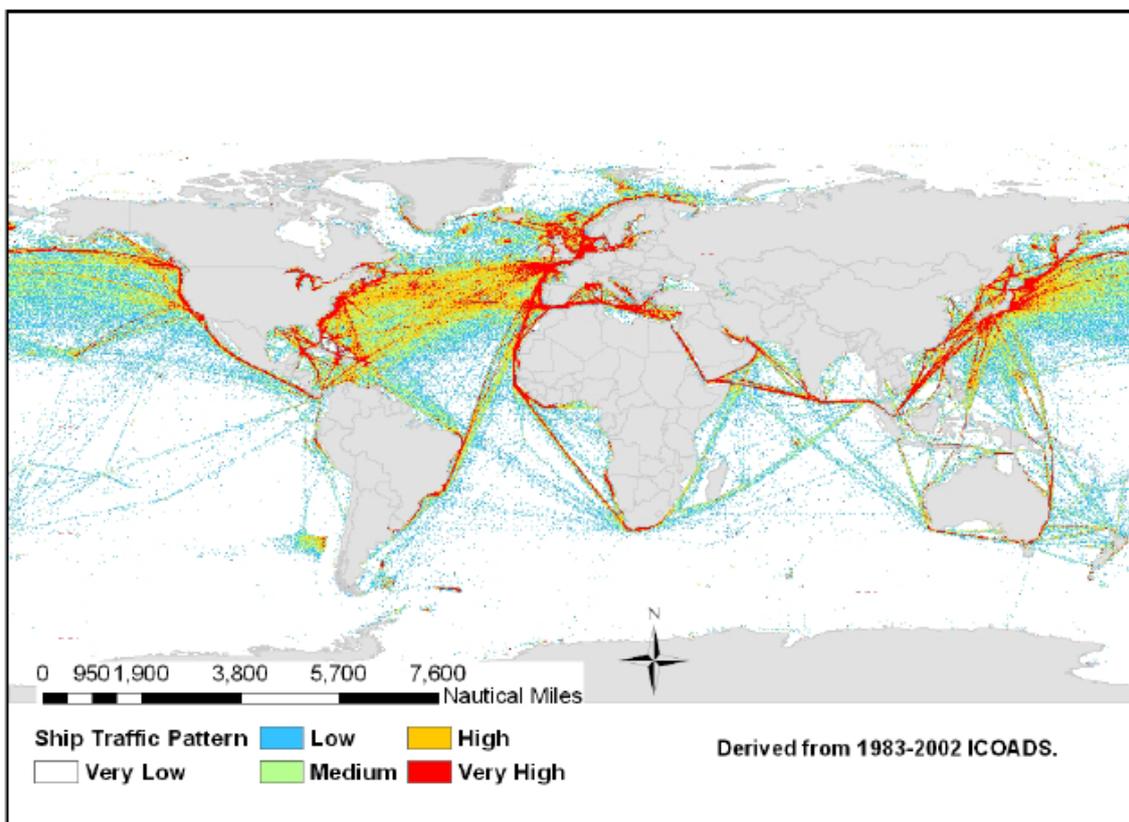


図 2-4 ICOADS のデータに基づく船舶交通分布の模式図

2.13 ICOADS と AMVER を結合したデータセット^[7]は $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ の空間分解能を有し、1 日の合計船舶観測データが 1,990,000 件に上る。このデータセットによると船舶交通通過点の海岸からの距離は以下の分布となった。

- | | | |
|----|-----------------|-----|
| .1 | 海岸から 200 海里以内 : | 70% |
| .2 | 海岸から 50 海里以内 : | 44% |
| .3 | 海岸から 25 海里以内 : | 36% |

世界の保有船舶

2.14 Lloyd's Register - Fairplay (LRF) のデータベースに基づく世界船腹に関する重要な数字を図 2-5 に示す。LRF のデータベースは、各船舶に登録を義務付けている IMO 登録制度ともリンクすることにより、国際貿易に従事するほぼ全ての船舶とそれ以外の多数の船舶のデータを収録する信頼性の高いデータベースといえる。IMO 船舶登録番号制度が決議 A.600 (15)の採択をもって導入された際、IMO は自身に代わる登録管理機関として Lloyd's Register を指名した。IMO 登録番号制度によって各船舶には識別のため恒久的な番号が割り当てられる。ある船舶の船籍が変わってもこの番号は変わらず、船籍証書に記載される。IMO 番号は 1996 年 1 月 1 日以降全ての船舶（一定の基準あり）に必須となった。

2.15 図 2-5 に示すように 2007 年の世界船腹には 100GT を超える船が 10 万隻以上含まれ、その半数弱が貨物船で占められている。GT で見ると貨物船が世界全体の 89% を占めることから、貨物船が相対的に大型船であることが分かる。

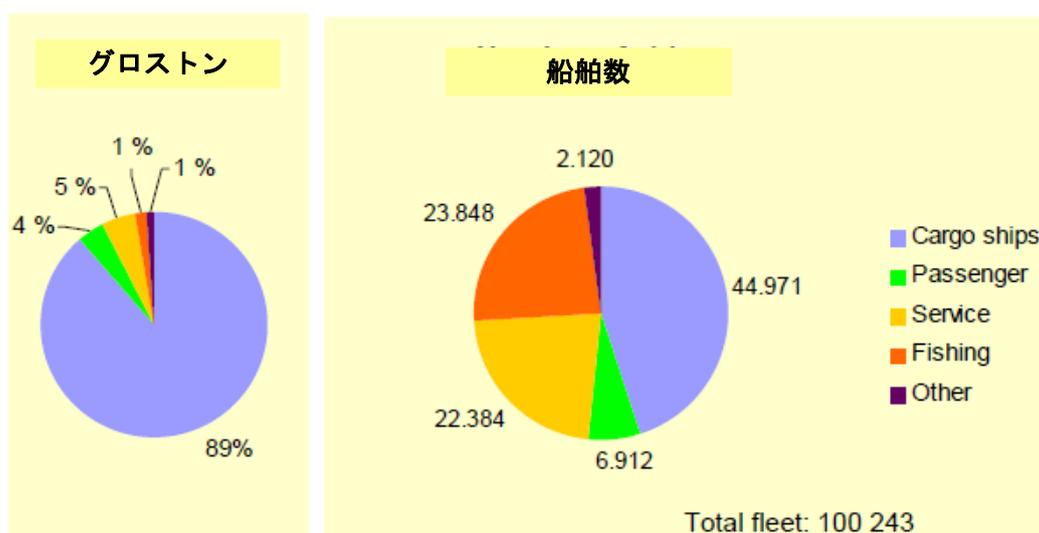


図 2-5 世界の船腹構成 (2007 年)
(Lloyd's Register - Fairplay)

2.16 貨物船の主要カテゴリ別の典型的な大きさの比較を図 2-6 に、またカテゴリごとの船腹量の推移 (百万 dwt) を図 2-7 に示す。図 2-8 は、Lloyd's Register - Fairplay の各種刊行物^[8]に基づく 100GT を超える全船腹の 1960 年から 2007 年までの推移を示したものである。グラフによれば、商船の世界船腹が船舶数及び大きさの両方で明らかに増加している。

2.17 船舶は輸送対象とする貨物の種類によって区別される。表 2-2 は、この調査報告の排出インベントリで使用する主要船舶カテゴリの定義の一覧である。さまざまな船種に関する詳細説明は、一般資料^[9]および^[10]またはインターネット^[13]および^[14]といった情報源で参照が可能である。冷蔵または冷凍された貨物の輸送用として建造された船舶は「冷凍船」としてまとめた。

標準的な貨物船の DWT

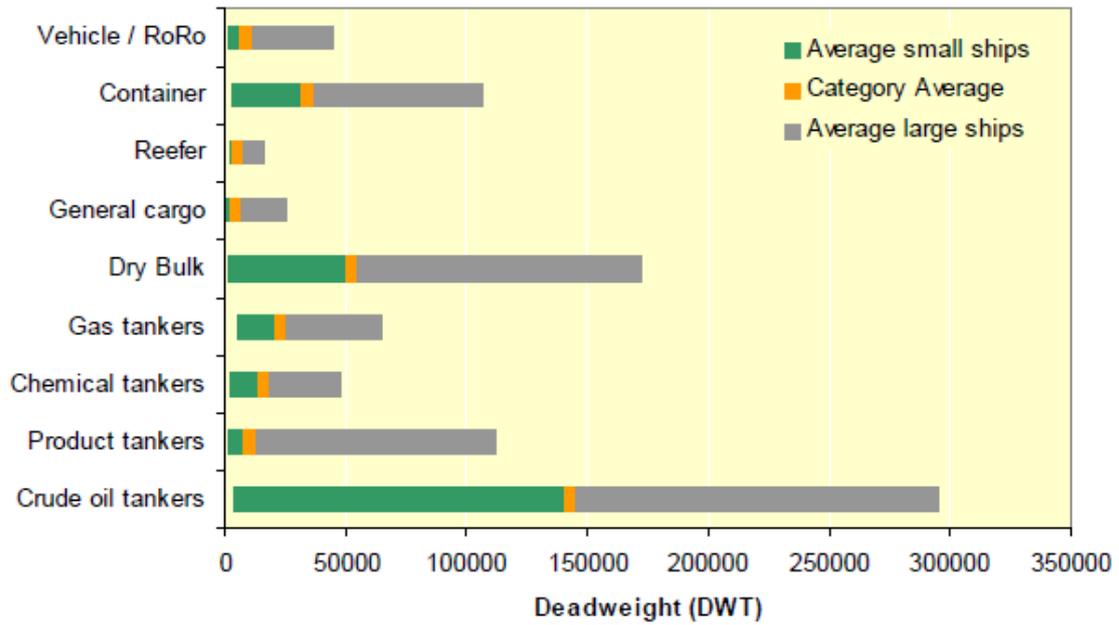


図 2-6 主要な貨物船船種別の DWT
(Lloyd's Register – Fairplay)

グラフの両端はこの調査で用いた船舶の大きさの大小カテゴリの平均 DWT を表わす。
個々の船舶の最大、最小ではない。個々の最大最小の幅はもっと広い。

船種別船腹推移 (DWT)

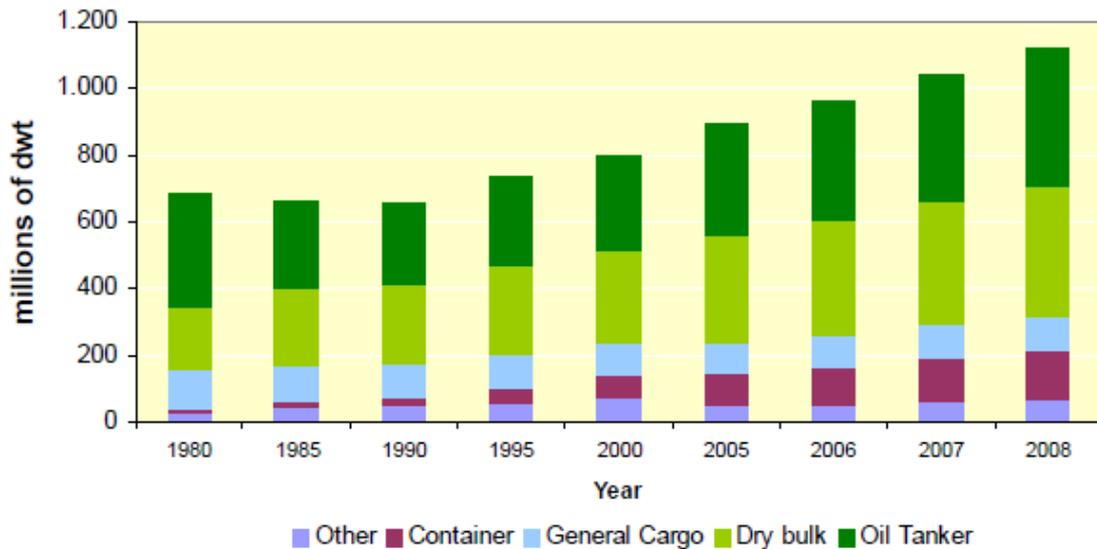


図 2-7 主要船種別船腹推移 (1980 - 2008) (百万 dwt)
(UNTACD 2008)

船舶数による船腹推移

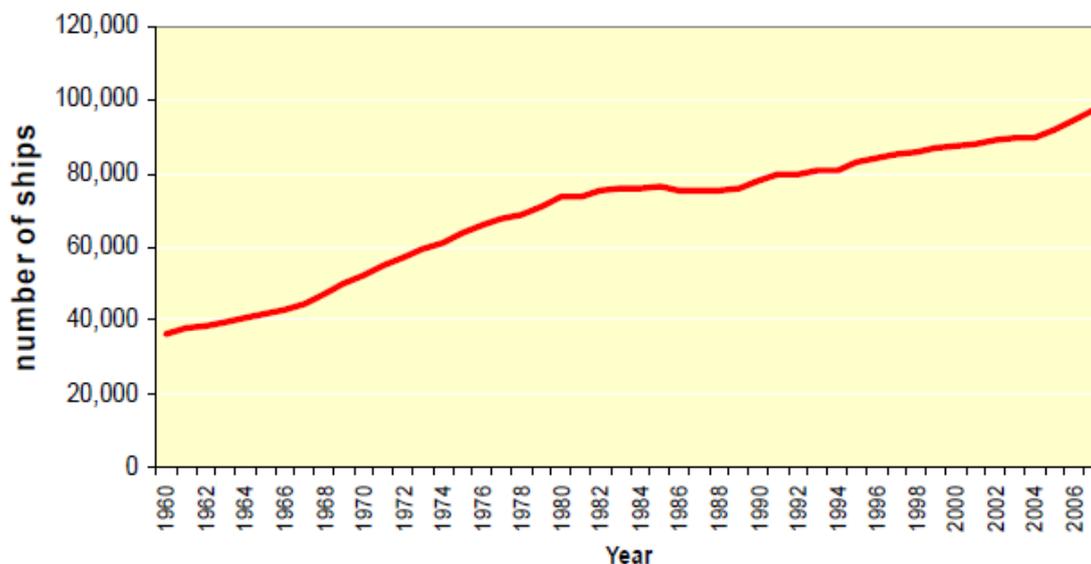


図 2-8 船舶数による船腹推移 (1960 - 2007)
(Lloyd's Register - Fairplay)

表 2-2 この調査の排出インベントリで用いた船舶分類の定義

貨物船	原油タンカー	原油運搬用のタンカーを包含する分類
	プロダクトタンカー	種々の石油精製品を運搬するタンカー
	ケミカルタンカー	種々の化学工業品を運搬するタンカー
	LPG タンカー	液化石油ガス及び時としてアンモニアのような他の製品を運搬する専用タンカー
	LNG タンカー	液化天然ガスを運搬する専用タンカー
	その他のタンカー	燃料輸送タンカー、あるいはオレンジジュース、ビチューメン、ワイン、水などの特定の液体製品を運搬するタンカー
	バラ積み貨物船	穀物、鉄鉱石、石炭などのバラ荷を運搬するよう設計された船舶
	一般貨物船	小型単倉船から最新式の多目的船まで幅広い範囲の貨物船を包含する分類。コンテナやバラ荷を運搬するよう設計された船舶も含まれる。これらの船舶の大部分は専用の揚重機を装備している。
	その他のドライ貨物船	冷凍貨物船あるいは特別のドライ貨物運搬船
	コンテナ船	コンテナに収められた貨物のみを運搬するよう設計された純然たるコンテナ船。すなわちデッキ上およびデッキ下の両スペースともにコンテナを運ぶよう設計されたフルセルラー船
	車輛運搬船	(新しい) 車、トラック、時には車輪が付いた特殊貨物を運搬するよう設計された船舶
	Ro-ro 船	貨物を車輛に乗せ、運転して積荷・揚荷をおこなう船舶

その他	フェリー	車と乗客を定期的に運搬する船舶。夜間フェリーも含む
	クルーズ	娯楽目的の航海で乗客を載せる船舶。
	ヨット	大型の娯楽用船舶。
	オフショア船	各種のプラットフォームサブライ船及びオフショアサポート船が含まれる。ドリリングリグはこの数値に含まない。
	サービス船	タグボートが主であるが、それ以外の作業船、浚渫船、観測船なども含まれる
	漁船	漁類捕獲用の船

2.18 Lloyd's Register - Fairplay による世界船腹の船齢プロフィールを図 2-9 に示す。それによると船舶数で見ると世界船腹の約半数が船齢 20 年以上となっている（1987 年以前の建造）。船舶数でなく GT でみると、船齢 20 年以上のものが 25% に過ぎない（図 2-10 参照）。GT では船腹の約半数が船齢 10 年以内である。すなわち、建造後一定の年数を経過した多数の小型船が就航中であることを示す。ただしこれら小型船が業界全体の輸送能力に占める比率は小さい。

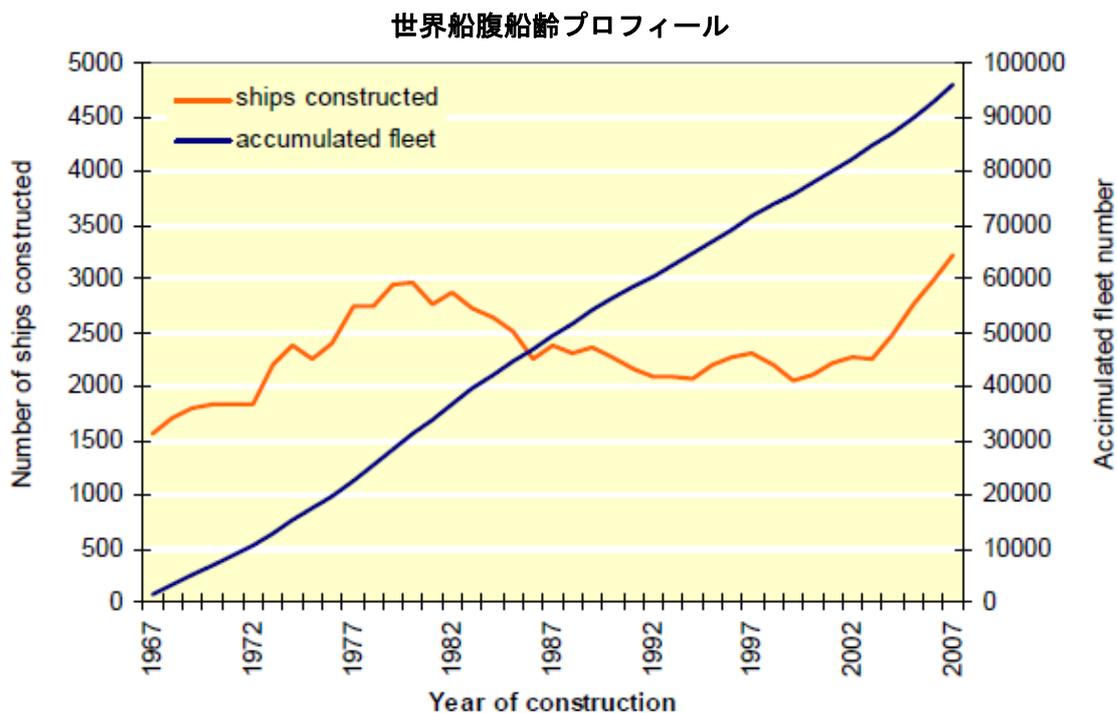


図 2-9 世界船腹船齢プロフィール
(Lloyd's Register - Fairplay、2007)

2.19 ドライ及びウェットバルク船（タンカー及びドライバルク船）の現状の船腹と発注量の比較（DWT）を図 2-11 に示す。2009 年の世界金融危機も一因となり、この内かなりの数の船舶が建造されない可能性が高いと思われる。

世界船腹船齢プロフィール (GT)

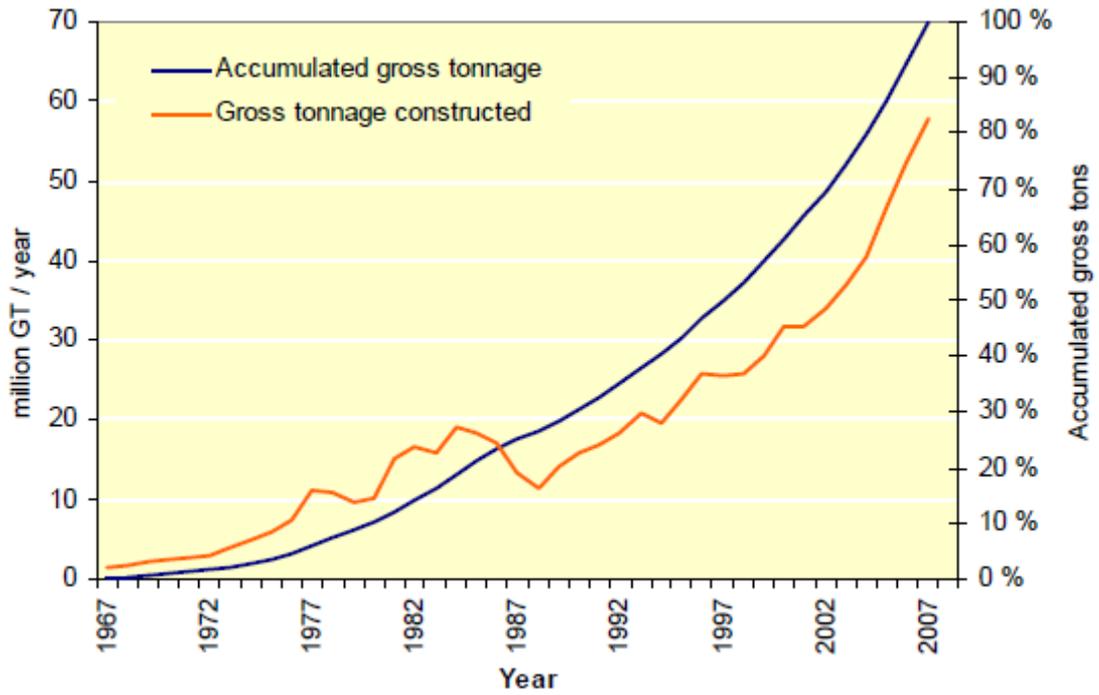


図 2-10 世界船腹船齢プロフィール (GT)
(Lloyd's Register - Faieplay、2007)

ドライ及びウェットバルク船腹プロフィール

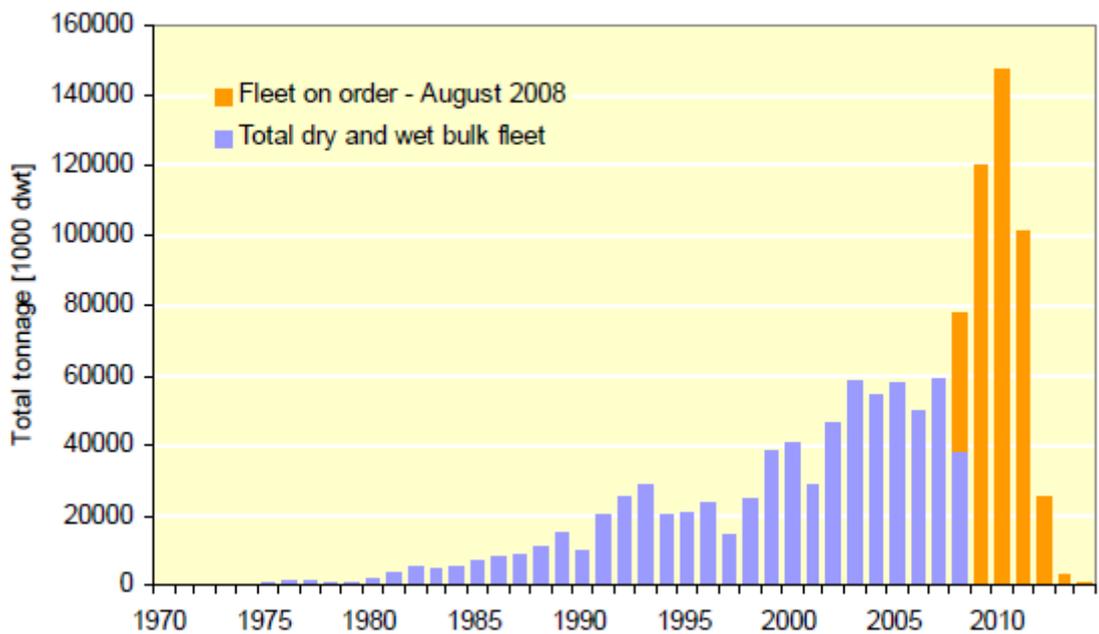


図 2-11 ドライ及びウェットバルク船腹推移及び発注量

(Fearnleys、2008/8、Lloyd's Register - Faieplay)

世界船腹の船籍及び船主構成

2.20 海運産業の国際性という特性によって、その支配構造及びそのメカニズムが複雑である。全ての船舶がどこか1つの国に船籍登録されるが、海運業の所有権の構成が多様なために、その船舶の利権を管理する「本籍国」を特定するのは必ずしも容易でない。例えば持ち株会社が、国籍が異なる多数の個人によって所有されるケースがあれば、ある企業が第三国の企業の株式に対して100%に近い株を保有するケースもある。このような困難さにもかかわらず、船舶の利権を支配する「本籍国」に関する統計がUNCTAD^[2]によって提供されている。ここで鍵となるいくつかの実態と数値を示し、さらに貿易量との関係についても考える。

2.21 DWT による船籍国トップ 10 を表 2-3 に示す。加えてそれらの国の船舶数、世界総DWT に占めるシェア、DWT 成長率も示した。上位 10 カ国で世界の総 DWT の約 69% を支配している。

表 2-3 船籍国トップ 10 (UNCTAD、2008)

Flag of registration	Number of ships	Total tonnage (1,000 DWT)	Share of world total DWT (%)	% dwt growth 2008/07
Panama	7616	252 564	22.6	8.8
Liberia	2173	117 519	10.5	11.7
Greece	1477	61 384	5.5	11.3
Bahamas	1422	59 744	5.3	8.2
Marshall Islands	1097	59 600	5.3	9.1
Hong Kong, China	1238	59 210	5.3	9.0
Singapore	2243	55 550	5.0	8.8
Malta	1442	45 218	4.1	12.5
China	3816	37 124	3.3	6.3
Cyprus	982	29 431	2.6	-0.7

2.22 外国船籍で登録される船舶が増加する傾向が長年にわたり続いた。UNCTAD^[2]によれば、外国船籍船の比率は1989年の41.50%から2007年の66.35%に増加した。ただし、ごく微小ではあるが2006年から2007年への減少は、その傾向が飽和点に達したシグナルといえる。ノルウェー国際船籍のような第二船籍やオランダ領アンティル船籍で登録される船舶を含めると、外国船籍船の比率はDWT比で世界船腹の71%以上を占める^[2]。

2.23 表 2-4 は 2008 年 1 月時点の支配国*のトップ 10 を示したものである。上位 10 カ国で世界の総船腹DWTの70.2%を支配している。併せて2007年から2008年のDWT成長

* UNCTAD 及び Lloyd's Register - Faieplay の定義によると、支配国とは実質的な利権支配権を持った所有者の国をいう。海運界ではこれが明確に区別されていない場合がある。

率及び 2008 年時点の自国船籍中の支配率（DWT比）も示した。

表 2-4 利権支配者の本籍国トップ 10（UNCTAD、2008）

Controlling interest's country of domicile	Number of ships	Total tonnage (1,000 dwt)	Share of world total dwt (%)	% Dwt growth 2008/2007	% Share of dwt in national registry
Greece	3115	174 570	16.8	-0.6	31.9
Japan	3515	161 747	15.6	0.5	7.2
Germany	3208	94 222	9.1	0.4	15.5
China	3303	84 881	8.2	1.0	40.5
Norway	1827	46 872	4.5	-0.5	30.3
United States	1769	39 828	3.8	-1.1	51.0
Korea, Republic of	1140	37 703	3.6	0.3	50.7
Hong Kong, China	657	33 424	3.2	-1.4	54.5
Singapore	869	28 632	2.8	0.1	57.4
Denmark	861	27 434	2.6	0.4	38.2

表 2-5 貿易国トップ 15 及びその船腹量並びに所有権プロフィール
(UNCTAD、2008)

貿易量は 2007 年データ、船腹量は 2008 年データ

Top trading nations	% share of world trade in terms of value	% of world fleet in terms of dwt	% of ownership of fleet in terms of dwt
United States of America	11.38	1.09	3.84
Germany	8.51	1.34	9.07
China	7.81	3.32	8.18
Japan	4.77	1.32	15.58
France	4.16	0.71	0.63
United Kingdom	3.76	0.42	2.5
Netherlands	3.72	0.56	0.83
Italy	3.55	1.19	1.71
Belgium	3.01	0.58	1.17
Canada	2.88	0.28	1.81
Republic of Korea	2.62	1.89	3.63
Hong Kong, China	2.56	5.3	3.22
Spain	2.18	0.25	0.43
Russian Federation	2.16	0.64	1.74
Mexico	2.04	0.14	n/a
Total – top 15	65.11	19.03	54.34
Total – top 25	78.02	28.16	64.93

2.24 海運業が抱える国際性という特性を簡単に説明するため、表 2-5 に貿易国の上位 15 カ国及びそれらの船腹と所有権のプロフィールを示した。貿易国トップ 15 は取扱額において世界貿易の 65%を占め、その船腹所有権比率は世界船腹総 DWT の 54%に及ぶことがわかる。しかしながら、その船籍比率は世界船腹総 DWT の 19%に過ぎない。

2.25 さらに表 2-5 を表 2-4 と比較した場合、パナマ、リベリア、バハマなどの主要船籍国は、支配国及び貿易国ともに上位に登場しない。例外は株式支配権に関するギリシャであり、ギリシャ支配下 DWT の 31% が自国船籍である。一般的に船主が外国船籍を取得する動機として、優遇税制、有利な船舶融資条件、外国船員の雇用のしやすさなどが挙げられる。これらは海運では普通の行為であり、海運業の国際的な仕組みを如実に物語るものである。

海運の規制

2.26 国際海運などの海事活動は、国際的な海洋法と特定国の法律が混在しながら規制を受ける。国連海洋法条約（UNCLOS）が国際海事法の基礎となる。UNCLOS は、いかなる統治国も船舶登録制度を設けて旗国になることを保証し、船舶には領海及び経済水域を越えて航行する権利を与えている。UNCLOS のような国際法は、国家間の問題を規制するが、個々の船舶に直接適用されることは無い[10]。

2.27 船舶は登録された国すなわち旗国の適用法および規則の規制を受ける。船籍登録の条件として、個別の登録基準を充たすことを要求される国もある。そのような個別の登録基準には、船舶がその領土内で建造されること、船舶の所有企業がその国で登録されていること、船主がその国の市民権を得ていること、などがある。また船籍登録に殆どあるいは全く制約をつけない国もあり、それらを総称して「自由置籍国」と呼ぶ。船舶が国際海運に従事する、すなわち他国の領海あるいは国際水域に入る場合、その旗国はその船舶が旗国の加盟する国際条約及び協定を遵守することを保証する義務を負う。

2.28 沿岸国の管轄水域内では、地域及び当該国の法規が適用される。一般的にそのような国家法規は船舶の航行に対して法的な境界を定める。なぜなら UNCLOS によって規定された無害通航の条項には次の内容が示されているからだ。すなわち、通常受け入れられる国際規則あるいは標準を実施しない限りは、ある国の法や規則は外国船の設計、建造、人員、設備には適用されない。

2.29 図 2-12 は、海運業の関係者の全体観を示すとともに、法体系の執行の観点から個々の関係者の役割を説明したものである。国際海運に関する今日の法体系は、国際海事機関（IMO）が制定した 50 の協定・協約と国際労働機関（ILO）が制定した船員のための関連法的措置で構成され、IMO が制定した協定・協約のうち 41 が効力を持っている。国際法を国の法令に置き換えそれを実施するのは協定加盟国の責任である。図 2-12 の右側は船主周辺の利害関係者を表わし、それには、船舶に融資する銀行、船舶に保険をかける保険会社、船舶の商業行為や日常業務にかかわる会社（運航会社、管理会社）などが含まれる。

2.30 国際海事機関（IMO）は「国際貿易に従事する海運に影響するすべての種類の技術的事項に関する政府の規則及び慣行について、政府間の協力のための機構となり、また、海上の安全、効率的な船舶航行、船舶による海洋汚染の防止に関し最も有効な標準の

採用勧告等をおこなう」ことを目的として設立された^[11]。IMOはこの目的に関連する行政上の問題及び法的な問題を処理する権限を与えられている。

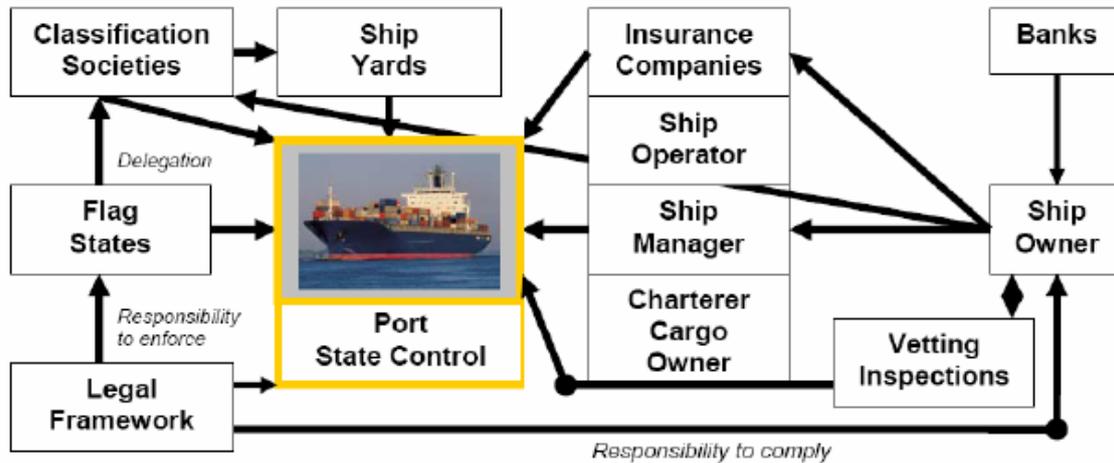


図 2-12 海運業の法体系に登場する関係者^[15]

- 2.31 IMOの役割はそもそも法律の制定であり、実施は条約加盟国（旗国）の責任である。IMO加盟国によって取り決めた法律を批准するかどうかは各政府機関が決定する。政府がIMOのある協定を批准した場合、その政府はそれに含まれる規則を自国の法令に反映させることに事実上合意したことになる。そして必要に応じて船級協会に検査活動を委託し、船級協会が旗国を代行して役目を果たす。船級協会は海運の技術に関する事項を扱う法人であり、旗国の代行として検査を実施する場合もある。この場合、船級協会はしばしば「認定機関」（recognized organization: RO）と呼ばれる*。船舶は通常船級規則に則って建造されるので、船級協会は船舶の建造に対して重要な役割を果たす。
- 2.32 各協定には、発効前に満足すべき条件を規定した条項が含まれる。代表的な発効要件として、ある国数以上、GT で世界船腹のある比率以上の国が合意に批准することなどが挙げられる。あるIMO措置が発効された場合は、一般的には国際規則あるいは国際標準が受け入れられたと考えられ、無害通航中の外国船の設計、建造、配乗、設備機器に適用する規則がUNCLOSによって禁止されることはない。
- 2.33 あるIMO法律文書が発効となった場合、それを批准した国は、それを自国籍船のみならず、旗国を問わず全ての船舶に適用することができる。そのため、IMO規則を批准した国の司法権下にある港あるいは海域に立ち入ることを希望する船舶は、旗国にかかわらず、その協定に従わなければならない。これは通例として「非差別適用」の原則と呼ばれる重要な原則である。この原則は、港に寄港する全ての船舶に対しその旗

* IMO 決議 A.739(18)「政府に代わって活動する組織への権限付与に対する指針」並びに MSC.208(81)における修正及び決議 A.789(19)「政府機関に代わって活動する認定組織の検査に関する仕様書及び認定機能」を参照。

国にかかわらず一定の方法で適用標準を強制する寄港国にもあてはまる。

- 2.34 この原則及び国際性という海運特有の特性のために、ある IMO 規則が一旦効力を発揮すると、船籍にかかわらず事実上ほとんどの船舶に影響が及ぶ。一方で、ある船舶が問題になっている協定を批准した国の領海外のみを航行する場合、その船舶に発効済みの IMO 規定の不遵守をやめさせる上での法的な障害は何もない。
- 2.35 旗国は自国籍船舶に対する法律の制定と実施の責任を負う。また IMO の重要度の高い技術協約には、船舶が外国の港に寄港する際に、IMO 要件を満たすことを保証するため検査を受けさせることができるという条項が含まれる。これは「寄港国検査」(Port State Control: PSC) と呼ばれる。そして PSC で基準に適合しなかった船舶を修理の完了まで拘留することが可能で、修理完了後にその船舶は解放される。PSC 検査が円滑にそして協力的に実施できるように、多くの国が了解覚書 (MOU) を交わしていくつかのグループを編成し地域的な PSC 体制に加入する。現状では以下のように 9 グループの寄港国検査体制があり、ほとんどの沿岸国が含まれる。
- .1 ヨーロッパ・北大西洋 (パリ MOU)、1982 年調印
 - .2 アジア・太平洋 (東京 MOU)、1993 年調印
 - .3 ラテンアメリカ (ヴィニヤデルマール合意)、1992 年調印
 - .4 カリブ海 (カリブ海 MOU)、1996 年調印
 - .5 西・中央アフリカ (アブジャ MOU)、1999 年調印
 - .6 黒海 (黒海 MOU)、2000 年調印
 - .7 地中海 (地中海 MOU)、1997 年調印
 - .8 インド洋 (インド洋 MOU)、1998 年調印
 - .9 アラブ湾岸諸国 (リヤド MOU)、2004 年調印
- 2.36 さらに米国沿岸警備隊 (USCG) が外国船舶の検査サービス体制を確立した。これは MOU の一部ではないが、PSC 体制相互の発展と調和に向けた取り組みの一環である。
- 2.37 PSC 当局者が実施する検査に加えて、海運業もタンカーとドライバルク船を主体に確認検査を実施する。この確認検査はスキームに応じて荷主関係者あるいは船主が実施する。

気候変動に関する国連枠組み条約、京都議定書と海運業

- 2.38 気候変動に関する国連枠組み条約 (UNFCCC) は 1992 年に調印され、1994 年に発効、2009 年 3 月時点で 192 カ国が加盟している^[16]。この条約の下で加盟国が集まってデータを共有しながら排出問題に取り組む国家戦略を発表し、気候変動への対応のため協力する。1997 年 12 月には京都議定書が採択され、2005 年 2 月に発効、2009 年 3 月時点で 184 加盟国が議定書を批准した。
- 2.39 国連の条約は排出削減のコミットメントはしないが、京都議定書が Annex I 締約国に対して拘束力のある目標を設定する。締約国は 6 種の温室効果ガスの総排出量を 2008

年から 2012 年の間に 1990 年レベルの平均 5.2%を削減することに同意した。実行過程で京都議定書は、(1) 排出量取引、(2) クリーン開発メカニズム (CDM)、(3) 共同実施 (JI) メカニズム、のような排出削減メカニズムを提供する。共同実施によって、該当国は排出削減あるいは排出吸収プロジェクトからの排出削減ユニットを獲得できる。一方 CDM では、先進国が途上国の排出削減プロジェクトに対して認証排出削減量 (CER) を獲得できる。

- 2.40 航空輸送及び海上輸送による排出は UNFCCC の課題の一つであるが、京都議定書の対象外である。京都議定書第 2 条 2 には以下の記述がある。

Annex I 締約国は、国際民間航空機関及び国際海事機関での活動を通して、モントリオール議定書で規制されない航空機用及び船用燃料油からの温室効果ガス排出の抑制または削減に努力するものとする。

- 2.41 IMO 内で議論的的となっているのは、京都議定書第 2 条 2 の言い回しをどのように解釈するか、及び UNFCCC の下で合意された「共通だが差異ある責任」という原則を、それ以前からある IMO の基本原則「非差別適用」を差し置いて国際海運の GHG 排出削減対策に適用すべきかどうかという点である。

- 2.42 さらに分かりやすく言えば「共通だが差異ある責任」の原則とは、温室効果ガス排出削減のような地球環境問題への取り組みにおける先進国と途上国間の分担に差を付けることを指すものと認識される。この原則は UNFCCC 条約第 3 条 1 には次のように記載されている^[16]。

締約国は、公平の原則に基づき、さらに共通だが差異ある責任ならびに各国の能力に応じ、人間の現在及び将来世代のために気候系を保護しなければならない。従って先進締約国は率先して気候変動及びその悪影響の防止に努めなければならない。

- 2.43 IMO での議論^[17]を経て多くの国が、IMO によって採択されたすべての GHG 排出削減対策が「共通だが差異ある責任」の原則に従い UNFCCC 及び京都議定書の Annex I 締約国にのみ適用されるべきである、との見解を持つに至った。代表団の中には、国際海運に係る GHG 排出量の削減は先進国の自主的な活動に委ねるべきだとの見解を持っていたところもあった。

- 2.44 IMO の法律問題分科会の法的な助言が報告書 MEPC 58/4/20 で明確に指摘するように、国際海運による GHG 排出量の削減に関して、京都議定書と IMO の規定条項の間には条約として法的な矛盾点になりそうなものはない。

- 2.45 また、船舶による汚染からの海洋及び大気的环境保護、あるいは船舶の安全に関しては IMO が地球全体の負託を受けたのだから、GHG 排出に関する IMO の規制枠組は船籍に関係なくすべての船舶に適用されるべきとの見解を表明した代表団もあった。

- 2.46 先に示したように、船舶運航をとりまく船舶の所有並びに管理の連鎖にはさまざまな国に本拠を置く多数の関係者が係っている。加えて耐用期間内に何度も船籍が管轄間を移動する場合もある。国際貿易に従事する商船の世界船腹の約 3/4 (DWT 比) が途上国 (京都議定書の非 Annex I 国) で登録され、世界船腹の大きな部分を占めることは注目に値する。残りの部分すなわち世界船腹の 1/4 のみへの適用であれば、どのような規制機関にとっても効果は薄い。
- 2.47 IMO には、IMO 条約自身によって、あるいは UNCLOS によって地球全体の負託が与えられているが、規制をその船籍に応じて選択的に適用するという優遇措置は、現存の 50 の IMO 条約条文のどこにもない。一方モントリオール議定書 (オゾン層破壊物質に関する) のように差異ある対応を認めた国際的な環境合意もある。しかし同じ問題を扱う場合に IMO が差異ある対応の原則を船舶に適用したことはない。

参考文献

- 1 Shipping Statistics Yearbook 2007. Institute of Shipping Economics and Logistics (ISL), Bremen, Germany. ISSN 0721-3220.
- 2 Review of Maritime Transport, United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), 2006, 2007, 2008.
- 3 International Monetary Fund IMF, 2007
<http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2008/01/index.htm#ch1fig>
- 4 Stopford, M. Maritime Economics, 3rd edition, Routledge, London, 2009.
- 5 World Bank, Key Development Indicators
<http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/DATASTATISTICS/0,,contentMDK:20535285~menuPK:1390200~pagePK:64133150~piPK:64133175~theSitePK:239419,00.html>
- 6 South East of England Development Agency (SEEDA)
http://www.seavisionuk.org/news.cfm?widCall1=customWidgets.contentItem_show_1&cit_id=4409
- 7 Dalsøren, S.B., Eide, M.S., Endresen, Ø., Mjelde, A., Gravir, G. and Isaksen, I.S.A. 2009. "Update on emissions and environmental impacts from the international fleet of ships. The contribution from major ship types and ports". Atmospheric Chemistry and Physics; 9, 2171-2194. <http://www.atmos-chem-phys.net/9/2171/2009/acp-9-2171-2009.pdf>
- 8 Lloyd's Register – Fairplay, World Fleet Statistics, various publications.
- 9 Wijnholst, N., and Wergeland, T. Shipping Innovation, IOS Press. 2009. ISBN 978-1-58603-943-1.
- 10 Morgan, N. (ed.). Marine Technology Reference Book, Butterworth & Co Publishers. 1990. ISBN 0-408-02784-3 (978-0-408-02784-7).
- 11 IMO Convention, article 1(a). This is on the webpage <http://www.imo.org>
- 12 United Nations Convention on the Law of the Sea of 10 December 1982
http://www.un.org/Depts/los/convention_agreements/texts/unclos/UNCLOS-TOC.htm
- 13 Wikipedia 'Commercial Vessels' http://en.wikipedia.org/wiki/Commercial_vessel
- 14 Wikipedia 'Merchant Vessel' http://en.wikipedia.org/wiki/Merchant_ship
- 15 Knapp, S., and Franses, P.H., "Comprehensive Review of the Maritime Safety Regimes – Present status and recommendations on improvement" Econometric Institute Working Paper 2007-19, Erasmus University Rotterdam, The Netherlands.
- 16 United Nations Convention Framework on Climate Change
http://unfccc.int/essential_background/convention/items/2627.php
- 17 IMO, Main events in IMO's work on limitation and reduction of greenhouse gas emissions from international shipping, Note from the IMO Secretariat, London, November 2008

第3章 1990年から2007年までの、海運からのGHG排出量

排出量推定方法の概要

- 3.1 今回の調査報告では国際海運による現状の排出量を算定した。「国際海運」の定義はIPCCガイドライン、すなわち「船籍にかかわらず異なる国の港間の海運」に準じた。国際海運には軍艦及び漁船は含まない。この定義によれば、同一船舶が「国際海運」と「国内海運」の両方に従事することが頻繁に起こり得る。国内海運及び漁船を含むすべての排出量についてもこの調査報告で算定した。海軍の活動による排出量は含まない。
- 3.2 この調査報告は、UNFCCC プロセスの対象となる温室効果ガス（CO₂、CH₄、N₂O、HFCs、PFCs、SF₆）及び付託条項の中で定義されたその他の関連物質（NO_x、NMVOC、CO、PM、SO_x）を取り上げる。船舶からの排出は、以下のように分類される：
- .1 排ガスからの排出
 - .2 貨物からの排出
 - .3 冷媒からの排出
 - .4 その他からの排出
- 3.3 この調査報告の対象となる排ガスからの排出は、主エンジン、補助エンジン及びボイラによって排出される。焼却炉の排ガスからの排出は僅かとみなされ、対象としない。冷媒は、主として貨物並びに食料の冷凍冷蔵庫及び空調機で使用され、航海中あるいは冷蔵設備並びに空調機のメンテナンス中に発生する漏れによって大気中に排出される。冷媒ガスは、スクラップ化の過程でも放出される可能性があるが、スクラップ作業による冷媒からの排出は通常、船舶をスクラップにする国に計上される。スクラップ作業に起因するその他の排出もこの調査には含まない。貨物からの排出には、冷蔵コンテナ並びにトラックからの冷媒の漏れ、液体貨物からの揮発性化合物（CH₄、NMVOC類）の放出が含まれる。その他からの排出は、消火設備の試験並びにメンテナンスからの排出などさまざまな発生源から生まれるが、大きな意味を持つとは考えられず、ここでは詳細の検討は省いた。
- 3.4 この調査報告では、排ガスからの排出について詳細な計算をおこなった。貨物からの排出、冷媒からの排出、その他からの排出は既存の調査データを利用して推定した。
- 3.5 排ガス中に含まれるGHG及び汚染物質の排出量の算定には、対象とする排ガス成分ごとの燃料基準排出係数の決定と燃料消費インベントリの作成が必要である。燃料基準排出係数は、消費燃料から、燃焼プロセスに由来する排出量への換算値である。燃料消費量と排出係数とを掛け合わせることによって排出量が求められる。
- 3.6 ベースとなる排出インベントリを決められた基準通りに作成するため、IPCC及びUNECE/EMEP CORINAIR プログラムによって定められたデフォルト排出係数を使用した。ただし、MARPOL Annex VIの第13規則のNO_x排出基準によってもっと詳

細な計算が必要となった NO_x は例外とする。この排出インベントリ作成指針に従い、排ガスからの汚染物質として次の物質を検討対象とした。すなわち NO_x 、 SO_2 、 PM_{10} 、 CO 、 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 、 NMVOC である。

3.7 本調査報告で提示する排ガスからの排出インベントリは、100 GT を超える全ての船舶に搭載された主エンジン、補助エンジン、ボイラの排ガスを対象とした。ここでは二通りのインベントリを提示する。

- .1 全ての排出インベントリ。国内海運及び漁業による排出も含む。
- .2 国際海運による排出インベントリ。国内海運及び漁業は除く。

3.8 まず 2007 年の排出インベントリを作成し、次いで、1990 年から 2007 年までの間の海運からの排出量は Fearnresearch の集計による海上貿易量データに比例するものとして計算した（第 2 章 図 2-3 を参照）。

1990 年から 2007 年までの燃料消費量の推定

3.9 船舶の燃料消費量は、2007 年については二通りの手法を用いて推定した。

- .1 活動量基準（ボトムアップ手法）
- .2 燃料統計基準（トップダウン手法）

3.10 国際海運と全海運による 2007 年の燃料消費量の推定値を納得性のあるものとするため、二通りの方法による予測結果を比較し考察した。この章では、1990 年から 2007 年までの燃料消費量の算定方法を要約して説明する。詳細は Appendix 1 を参照されたい。

3.11 活動量基準による算定方法では、船舶カテゴリごとにその燃料消費量を求めた。ある船舶カテゴリの主エンジン（ME）の燃料消費量を算定する場合、まずカテゴリの「船舶数」と「主エンジンの平均出力」とを掛け合わせてカテゴリの「搭載出力」（kW）を求める。次いで、その「搭載出力」にカテゴリ別の「主エンジン稼働時間」と「平均エンジン負荷係数」の予測値を掛けて年間の「出力量」（kW・h）を求める。最後に、その「出力量」にそのカテゴリのエンジン固有の「燃料消費率（g/kW・h）」を掛けることによってカテゴリの「燃料消費量」が求められる。ある船舶カテゴリの燃料消費量の算定プロセスを図 3-1 に示す。補助エンジンの燃料消費量の算定にも同じ方法を適用した。ボイラに関しては、加熱が必要な貨物の運搬頻度、載荷航海の距離と回数、蒸気ボイラの加熱に必要な 1 日当たりの燃料消費量、などの前提を基にタンカーに対してその燃料消費量を計算した。



図 3-1 活動基準法による燃料消費量の計算プロセス

- 3.12 この種の推定には相当数のデータを必要とするが、今回のようなレベルの分析をおこなう場合、個々の船舶からこれらデータの全てが入手できるとは限らない。主たる入力データの確かさ・不確かさに関するコメントは、表 3-1 及び表 3-2 を参照されたい。
- 3.13 燃料に関する統計は、対象範囲、報告の一貫性、国や地域による精度のばらつきといった点で限界があり、このため燃料統計には誤差及び過小評価のリスクがある。これまでの各推定結果の差によっても実証されるように、一般的に燃料消費量の推定には相当程度の不確かさを伴う (Corbett と Kohler, 2003[1]、Eyring 他, 2005[3]、Endresen 他, 2003, 2007[5, 6]、Gunner, 2007[8]、OLiver 他, 2001[11]、Skjolsvik 他, 2000[12]、Corbett と Fishbeck, 1997[15])。統計を基にした燃料消費量推定値、今回の検討結果、既存の報告を合わせて図 3-2 に示す。Appendix 1 で説明するように、比較を可能とするための修正が加えてある。

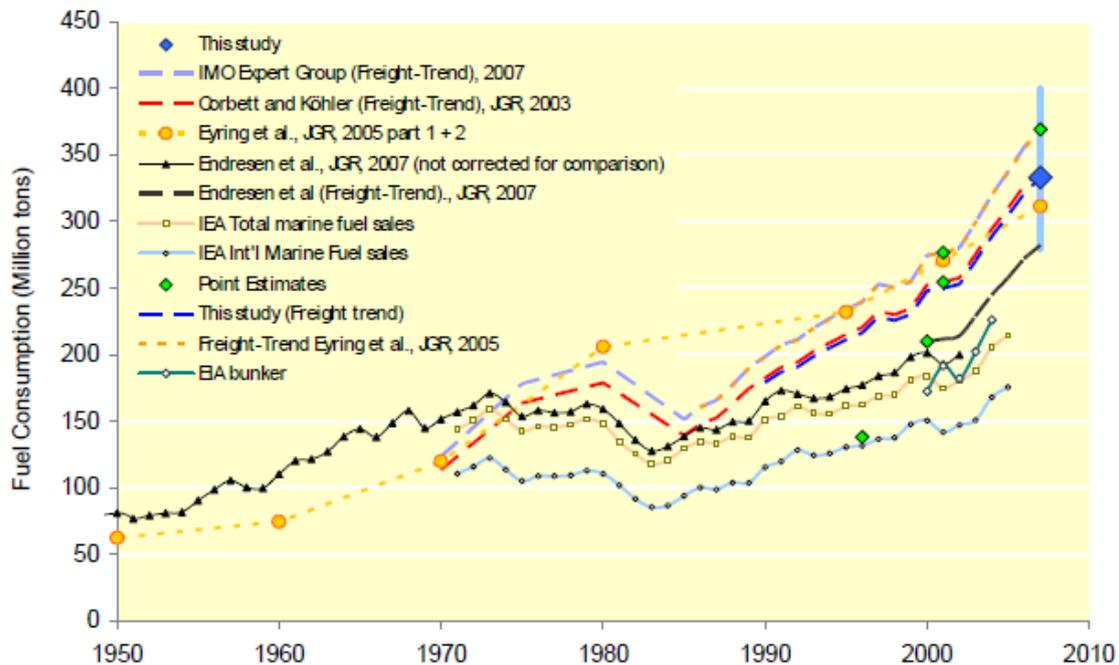


図 3-2 活動基準の推定法及び統計データによる世界船腹の燃料消費量（軍艦を除く）

ここで、各シンボルは、年ごとのオリジナルの推定点を示し、実線がその推移を示す。

波線は、推定点を起点として貨物量のトン・マイル値の時間発展法によって求めた過去および将来の推移予測を示す。

青四角は本調査の活動基準による推定結果を示し、青い縦棒が上下の推定限界を示す。

表 3-1 主エンジン燃料消費量算定の信頼性及び不確かさ

入力	情報源	信頼性	備考
カテゴリ別船舶数	Fairplay データベース	非常に高いとの定評あり	登録船の精度が高い。全船が活発に稼働しているか、あるいはカテゴリによっては係船しているか不確かさがある。
主エンジンの平均出力	Fairplay データベース	非常に高いとの定評あり	高精度と思われる。
主エンジンの平均稼働日数	AIS データから計算。ただし AIS データが少ない船種を除く。	中位のレベル。不確かさまではいかない。	精度は AIS の情報収集システムの精度に依存する。すなわち AIS ネットワーク内の港間を航行する船舶比率、船の動きに関する仮定、データのカットオフ及びフィルタリング、平均非稼働率/係船率、港間距離の計算、船舶設計速力などによる。
主エンジンの平均負荷	AIS の平均速度と Fairplay 設計速力データからデフォルト速力を求めた。他のデータあるいは個別条件の方がより適正と思われる場合はデフォルト値を置き換えた。	中位のレベル。不確かさに間接的に影響	計算は、拡大 Lloyd's データベースの設計速力データ及び AIS の航行速力推定誤差に敏感である。さらに船が空荷または軽荷の場合はエンジン負荷が過大に推定される。他のデータと比較して計算結果が実情にそぐわないと思われる場合は、専門家の判断で修正する。
平均非稼働日数あるいは係船日数	仮定	中位のレベル。主エンジンの稼働日数に影響	全ての船舶に対して有効暦日は 355 日と仮定（平均して年間 10 日が非稼働）
AIS 観測点間の距離計算	AIS 座標に基づいて計算	中位あのレベル	AIS 平均速力の計算に使用。AIS 受信点間の最短ルート内に陸地がある場合に精度に影響が出る。他のデータと比較して計算結果が実情にそぐわないと思われる場合は、専門家の判断で修正する。
船舶設計速力	拡大 Fairplay データベース	中位のレベル	「通常」と「低速」（異常）航海の間のカットオフを決定するために使用。海上の出力係数(power factor)の推定にも使用
主エンジンの平均 SFOC	幅広い試験台データ及びその他のデータから推定	高いとの定評あり	エンジンによるばらつきがあるが、平均値は比較的高い精度を持つものと思われる。

表 3-2 補助エンジン燃料消費量計算の信頼性及び不確かさ

入力	情報源	信頼性	備考
カテゴリ別船舶数	Fairplay データベース	非常に高いとの定評あり	登録船の精度が高い。全船が活発に稼働しているか、あるいはカテゴリによっては係船しているか不確かさがある。
補助エンジンの平均サイズ	拡大 Fairplay データベース	高い。但し、データギャップあり。	主エンジンに比べると精度は幾分落ちる。しかし比較的高精度が期待される
補助エンジンの平均稼働日数	専門家の判断および運航者と相談	中位のレベル。船舶の稼働日数と補助エンジンの需要による。	船舶の出力需要および運航状況の変動のため評価は難しい。信頼性は中位のレベルだが、トータルインベントリに与える影響は小さい。
補助エンジンの平均負荷	専門家の判断および運航者と相談	中位のレベル。船舶の運航状況及び出力需要による。	船舶の出力需要および運航状況によって変動するため評価が難しい。
補助エンジンの平均 SFOC	幅広い試験台データ及びその他の測定データから推定	高い。運航者、建造メーカーからの定評がある	エンジンによるばらつきがあるが、平均値は比較的高い精度を持つと期待される。

蒸気ボイラの燃料消費量推定の信頼性は中位の部類に入るが、全体のインベントリにはほとんど影響しない。

- 3.14 活動基準による推定では、いずれの推定も燃料統計の値より高い燃料消費量を予測する。これらの活動基準による推定は、多くの入力データと前提条件を共有するため、それぞれが完全に独立しているとはいえない。一方、統計データには明らかな誤差が含まれ、データ間の一貫性に欠ける場合も多く、消費量を過小に評価する原因となる。
- 3.15 本調査報告の Appendix 1 に詳述する検討の結果、この調査を推進した科学者達の国際チーム（本調査報告書の序論に名前を載せた）は、船舶による総排出量に関して、活動基準推定の方が燃料統計よりもよりの確な推定値が得られると結論付けた。当チームは、表 3-3 に示す活動基準推定値であれば、この調査報告の「総意の推定値」として使用できるとの合意に至った。そして不確かさを定量化するため、別の入力データを使って上下の推定限界を求めた。活動基準のモデルは、国際海運から国内海運を分割できない。そのため、国内海運による排出量算定用のバンカー統計からの数値を、国際海運による排出量の計算にも使用した。チームが合意した上下推定限界は中央値である総意の推定値からは、約 20%の上下幅がある。ここで、この限界は、不確かな入力データによって出力される可能性がある結果の全範囲を表わすものではなく、入手可能データで裏付けが可能と思われる範囲を示すものである。表 3-4 は、燃料種別及び燃焼源別の燃料消費量を示す。残留燃料と留出燃料間の比率は、活動基準のモデル中で燃料種別の前提条件を合わせ込むために使うもので、実際には燃料統計に基づくものである。表 3-5 は、1990 年から 2007 年までの燃料消費量の推移を予測したものであり、海上貿易量に関する Fearnly のデータを使って 2007 の推定値を起点にしてさかのぼって計算した。

表 3-3 2007 年の燃料消費量の「総意の推定値」（百万トン）

	Low bound	Consensus	High bound
Total fuel consumption ⁴	279	333	400
International shipping ⁵	223	277	344

表 3-4 燃料種別及び燃焼源別の 2007 年の燃料消費量（百万トン）

	Total fuel consumption			International shipping		
	Low bound	Consensus	High bound	Low bound	Consensus	High bound
Residual fuel	215	257	308	172	213	265
Distillate fuel	64	76	92	51	64	79
Slow-speed engines	181	215	259	144	179	223
Medium-speed engines	92	110	132	73	91	113
Boilers	7	8	9	5	7	8

⁴ この推定は 100GT を超える全ての船舶を対象とし、軍艦は含まない。国内海運及び漁船は含む。

⁵ 国内海運、漁船、軍艦は含まず。

表 3-5 1990 年から 2007 年までの燃料消費量（百万トン）

Year	Total shipping			International shipping		
	Low bound	Consensus	High bound	Low bound	Consensus	High bound
1990	150	179	215	120	149	185
1991	157	187	224	125	155	193
1992	160	191	229	128	159	197
1993	166	199	239	133	165	205
1994	172	205	246	137	170	212
1995	177	211	254	141	176	218
1996	181	216	260	145	180	223
1997	191	228	274	153	190	236
1998	189	226	271	151	188	233
1999	193	230	276	154	191	238
2000	208	248	298	166	206	256
2001	209	250	300	167	208	258
2002	212	253	304	169	210	261
2003	226	270	325	181	225	279
2004	242	289	347	193	240	298
2005	255	304	365	204	253	314
2006	269	321	385	215	267	331
2007	279	333	400	223	277	344

排ガスの燃料基準排出係数

3.16 燃料基準排出係数は、燃料消費量に基づいて排出量を計算するために使われる換算値である。所定の基準に沿ってベースの排出インベントリを作成するため、IPCC 及び UNECE/EMEP CORINAIR プログラムによって準備されたデフォルト排出係数を使用した。ただし、IMO NO_x 規制によって特殊な計算が必要となった NO_x は例外とした。1990 年から 2007 年までのインベントリに使用した排出係数を表 3-6 に示す。NO_x に対しては 3 種類の排出係数が示された。

- .1 規制を受けないエンジンの排出係数（Tier 0、2000/1/1 以前のもの）
- .2 Tier 1 NO_x 規制を受けるエンジンの排出係数（2000/1/1 以後のもの）
- .3 2007 年の計算に使う船腹加重平均された排出係数

3.17 2007 年の排出係数を決定するための重み付けは、2000 年 1 月 1 日以後に搭載された世界船腹のトータル出力比率に基づいておこなった。この 40.4% という数値は、Lloyd's Register - Fairplay データベースによるものである。ボイラ内の燃焼は、ディーゼルエンジン中の燃焼とまったく異なり、連続的かつ低圧で起こる。ボイラは単位燃料当たりの NO_x 発生が非常に少ない。ボイラの排出係数は IPCC あるいは CORINAIR ガイドラインによっては与えられていない。限られた数のデータに基づくものではあるが、ボイラからの NO_x 排出に関して 7 kg/ton という排出係数を選んだ。NO_x 排出係数の詳細のバックデータおよび計算については本報告の 4.5 項から 4.11 項を参照されたい。

表 3-6 2007 年インベントリで使用した燃料基準排出係数

Emission		Emission factor (kg emitted/tonne of fuel)	Guideline reference
CO		7.4	CORINAIR
NMVOC		2.4	CORINAIR
CH ₄		0.3	IPPC 2006/CORINAIR
N ₂ O		0.08	IPPC 2006/CORINAIR
CO ₂	<i>Residual fuel oil</i>	3130	IPPC 2006
	<i>Marine diesel oil</i>	3190	IPPC 2006
SO ₂	<i>Residual fuel oil (2.7% S)</i>	54	CORINAIR
	<i>Marine diesel oil (0.5% S)</i>	10	CORINAIR
NO _x	<i>Slow-speed diesel engines</i>	90 \ 78 (85)*	-
	<i>Medium-speed diesel engines</i>	60 \ 51 (56)*	-
	<i>Boilers</i>	7	-
PM ₁₀	<i>Residual fuel oil</i>	6.7	CORINAIR
	<i>Marine diesel oil</i>	1.1	CORINAIR

* NO_x 排出係数： 規制無し/IMO NO_x 規制有り (2007 年平均排出係数)

海運からの排ガス排出量 (1990 年から 2007 年)

3.18 3.9 項から 3.15 項までの燃料推定消費量及び 3.16, 3.17 項の燃料基準排出係数を使って、排ガスからの排出量を掛け算によって求めることができる。全ての海運による排出量及び国際海運による排出量の計算結果を表 3-7 及び表 3-8 に示す。これらの予測は、燃料消費量の総意の推定値に基づくものである。海運による燃料消費量の推定の不確かさは、排出量の推定に持ち越され、限界範囲は約±20%である。図 3-3 は船舶分類ごとの燃料消費量を示すものであるが、同時にある程度までは各排出量を示すものでもある。

表 3-7 全ての海運からの排ガス排出量 (1990 年-2007 年) (百万トン)

Year	NO _x	SO _x	PM	CO	NMVOC	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
1990	14	7.9	1.0	1.3	0.4	562	0.05	0.01
1991	15	8.2	1.0	1.4	0.4	587	0.06	0.02
1992	15	8.4	1.0	1.4	0.5	598	0.06	0.02
1993	16	8.7	1.1	1.5	0.5	624	0.06	0.02
1994	16	9.0	1.1	1.5	0.5	644	0.06	0.02
1995	16	9.3	1.1	1.6	0.5	663	0.06	0.02
1996	17	9.5	1.2	1.6	0.5	679	0.07	0.02
1997	18	10	1.2	1.7	0.5	717	0.07	0.02
1998	18	10	1.2	1.7	0.5	709	0.07	0.02
1999	18	10	1.2	1.7	0.6	722	0.07	0.02
2000	19	11	1.3	1.8	0.6	778	0.07	0.02
2001	19	11	1.4	1.8	0.6	784	0.08	0.02
2002	19	11	1.4	1.9	0.6	794	0.08	0.02
2003	21	12	1.5	2.0	0.6	849	0.08	0.02
2004	22	13	1.6	2.1	0.7	907	0.09	0.02
2005	23	13	1.6	2.3	0.7	955	0.09	0.02
2006	24	14	1.7	2.4	0.8	1008	0.10	0.03
2007	25	15	1.8	2.5	0.8	1054	0.10	0.03

燃料消費量の推定に起因する各排出量の不確かさ： ±20%

表 3-8 国際海運からの排ガス排出量（1990年－2007年）（百万トン）

Year	NO _x	SO _x	PM	CO	NMVOC	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
1990	12	6.5	0.8	1.1	0.4	468	0.05	0.01
1991	12	6.8	0.8	1.2	0.4	488	0.05	0.01
1992	12	7.0	0.9	1.2	0.4	498	0.05	0.01
1993	13	7.3	0.9	1.2	0.4	519	0.05	0.01
1994	13	7.5	0.9	1.3	0.4	535	0.05	0.01
1995	14	7.7	1.0	1.3	0.4	551	0.05	0.01
1996	14	7.9	1.0	1.3	0.4	565	0.05	0.01
1997	15	8	1.0	1.4	0.5	596	0.06	0.02
1998	15	8	1.0	1.4	0.5	590	0.06	0.02
1999	15	8	1.0	1.4	0.5	601	0.06	0.02
2000	16	9	1.1	1.5	0.5	647	0.06	0.02
2001	16	9	1.1	1.5	0.5	652	0.06	0.02
2002	16	9	1.1	1.6	0.5	660	0.06	0.02
2003	17	10	1.2	1.7	0.5	706	0.07	0.02
2004	18	11	1.3	1.8	0.6	755	0.07	0.02
2005	19	11	1.4	1.9	0.6	795	0.08	0.02
2006	20	12	1.4	2.0	0.6	838	0.08	0.02
2007	20	12	1.5	2.0	0.7	870	0.08	0.02

燃料消費量の推定に起因する各排出量の不確かさ：±20%

船舶カテゴリ別の燃料消費量

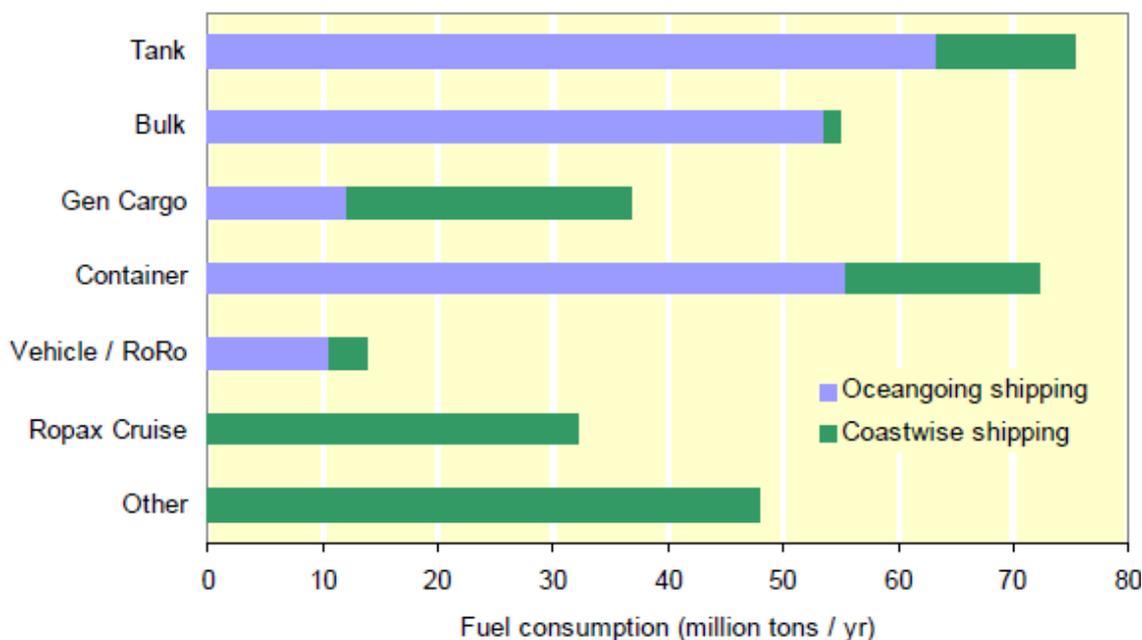


図 3-3 主要船舶カテゴリ別及び仮定された運航形態別の燃料消費量

(沿岸海運は、主に 15000 dwt 未満の船舶、大型フェリー、クルーザ、内航船、漁船によるものを指す)

海運からの冷媒の排出

3.19 冷媒は、熱サイクル中で使用されるときに、気体から液体あるいはその逆の相転移をする化合物である。船舶における冷媒の二つの主用途は、貨物と食糧の冷凍冷蔵及び空調機での使用である。船内で使われる代表的な冷媒は以下のとおり：

- .1 HFCs (ハイドロフルオロカーボン)
- .2 CFCs (クロロフルオロカーボン)
- .3 HCFC-22 (ジフルオロクロロメタン) (CFC の一つでもある)
- .4 R717 (アンモニア)

3.20 HCFC-22 及び CFC 類は、オゾン層破壊の一因である。MARPOL Annex VI の規則 12 は、これら物質及びその他オゾン層破壊物質の意図的な排出を禁止する。規則 12 は、HCFC 類が 2020 年 1 月 1 日まで許可されるのを除いて、オゾン破壊物質を使用する設備の新設を禁止する。HCFC-22、HFC、CFC は強いオゾン破壊性を有するのみならず、地球温暖化を引き起こす可能性も高い。

3.21 冷媒は運転中、あるいはメンテナンス作業に伴う漏れによって放出される。装置の解体時にも冷媒ガスが放出される可能性がある。国際海運による冷媒放出は、以下の 3 つの発生源に起因する。

- .1 冷凍船の冷凍設備
- .2 船舶型式に限らず、空調設備及び食糧の冷凍設備等、
- .3 船上輸送される冷凍コンテナ

3.22 船舶からの冷媒放出に関する最も包括的で至近の見直し作業は、国連環境計画 (UNEP) の 2006 年アセスメント報告である。この報告は、UNEP の冷凍・空調・ヒートポンプ技術選択委員会 (RTOC) によって作成された[33]。以下のセクションは、主としてこの報告に基づく。

冷凍船

3.23 冷凍船の約 90%が未だに HCFC-22 を使用する。しかし冷凍船の約 10%の冷凍システムは、HFC-134a (主に)、R404A 及び R407C あるいは R410A のような HFC 類によって運転され、そのほとんどが 500 kg から 1000 kg の冷媒を充填する間接システムによるものである。HFC-23 が冷凍庫に使われる場合もある。1993 年以降、新造船において R717 システムが増加してきた。旧式システムからの放出率が依然として高く、年間 20%と推定されるが、初期充填量が少ない間接システムからは年間 5%から 10%の放出に抑えられる[33]。

コンテナ

3.24 コンテナに冷凍品を収納した船上輸送が近年急速に増加している。2005 年の冷凍コ

ンテナ船腹は、約 750,000 ユニットで 1,270,000 TEU に相当する。これらのコンテナは船上及び陸上で使用される。現状でも HCFC-22 を使うシステムが 50,000 ユニット使われているが、HCFC-22 システムは、新規には造られていない。約 700,000 ユニットが HFC-134a を使用し、ごく一部に R404A を使用するものもある。コンテナ全体からの推定放出量を表 3-9 に示す。このうち船上で発生する放出量については分かっていない。

空調システム及び冷凍システム

- 3.25 ほとんどすべての商船に食糧庫用の冷凍設備と船内空調設備が装備される。船腹の 70%から 80%が未だ冷媒として HCFC を使用し、残りは HFC 類を使用する。R717 及び R717/R744 カスケードシステムを使う漁船もあり、CFC ベースのシステムも残っている。
- 3.26 HFC-134a、R404A、R507 は市場に出回り入手可能な状況にある。年間の推定リーク率は、データソースによって 1%から 100%までばらつく。適切な設備を使用し、訓練を受けた人が保守管理すれば、海上輸送の過酷な環境においてもリーク率の改善が可能であるというのが業界の総意である。しかしながら、常に適切な設備が設置され、正しい保守作業がおこなわれるとは限らない。このようなことは、空調設備や冷凍設備にもよくあるように、必ずしも絶対的に必要ではないと考えられる設備の場合に特に多く見受けられる。
- 3.27 クルーザー業界においては、米国で適用されるさらに厳格な環境規制（EPA 608）の影響を受けて日常のメンテナンス作業の改善が進み、HFC 冷媒の消費量には明らかな減少傾向が見られる。さらに冷媒回収装置の販売増や冷凍設備の検査及び修理の需要増もみられる。運航会社の将来への備えの奨励策として HCFC-22 からオゾンに優しい HFC 類への転換が進みつつある。

船舶からの冷媒放出量の推定値

- 3.28 海運及び他の輸送手段による冷媒放出量の推定が、国連環境計画の 2006 アセスメント報告中でおこなわれた。アセスメント結果の一部を表 3-9 及び図 3-4 に示す。この推定値は 2003 年に関するものである。これら放出量は、活動量よりも構成/構造とより密接に関連する。そのため排ガスからの排出量と同じ方法で将来や過去を予測することはできない。

表 3-9 各輸送手段からの冷媒排出量（2003 年）、UNEP [3333]

	Refrigerant emissions (tonnes)			
	HCFC-22	HFC	R717	CFC
Reefer ships	600	15	3	0
Merchant marine, naval, fishing	2500	400	4	15
Containers (including emissions from land and sea)	38	555	0	15
Road	1000	3780	0	1000
Rail	5	15	0	30
Total transport	4143	4765	7	1060
Total shipping (reefer + merchant)	3100	415	7	15

各輸送手段からの冷媒排出量

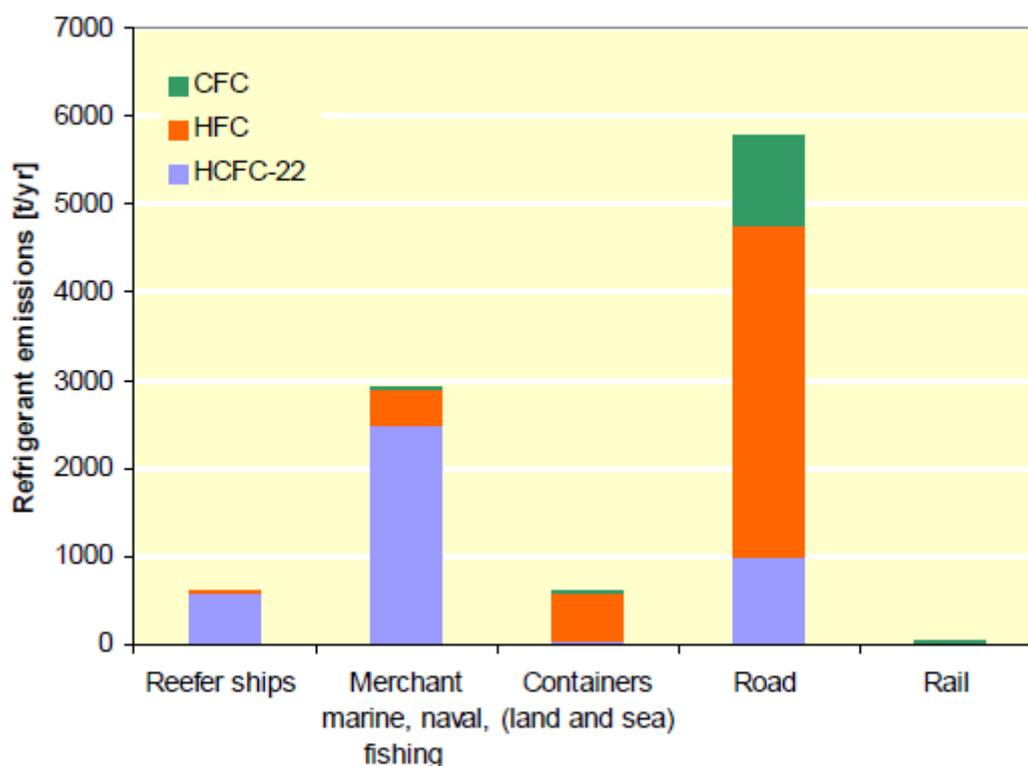


図 3-4 各輸送手段からの冷媒排出量（2003 年）、UNEP [3333]

船舶からの非排ガス系 VOCs の排出

3.29 揮発性有機化合物（VOCs）は船舶が運搬する貨物から排出される可能性がある。本調査報告では、原油の輸送中に発生する CH₄ 及び NMVOC の排出を対象とした。VOC はプロダクトキャリアからも排出される可能性がある。LNG タンクは、運航中は大気中との通気がないため、輸送による排出は非常に少ない。

- 3.30 VOCs の排出は、主として積荷中あるいは輸送中に起きる。積荷中に発生する VOC 排出量の一部は、国の排出インベントリにカウントされる場合がある[37]。3.29 項及び 3.30 項では、利用可能なデータ及び既存の文献を参考にしながら原油の輸送中に起きる VOCs 排出量を推定する。

貨物の受払量に基づく VOCs 排出量の推定

- 3.31 エネルギー協会のハイドロカーボン管理委員会 4A (HMC-4A) は、世界中の石油の海上輸送に関するデータの集計分析をおこなっている。2006 年のデータベースには海上輸送される原油の世界全体量の 40%に関する詳細の積荷及び揚荷データが含まれる。データ集計のまとめが Petroleum Review の 2007 年 10 月号に掲載された[34]。
- 3.32 そのデータベースからネット標準体積 (NSV) の損失分が分かる。これは個々の航海データから計算されたものである (「船荷証券上の NSV」 - 「揚荷 NSV」)。ここで NSV とは、堆積物と水分を除いて 60°F に換算した原油の体積である。2006 年の世界平均の NSV のネットロス、積荷体積の 0.177%である。この NSV ロスの値は、計算の元となる原油体積の一般的な測定精度 2%に比べると小さく、さらにいえば NSV ロスの計算は、多数のサンプル数がある初めて意味あるものになる。2006 年に報告された NSV ロスの標準偏差は 0.31%である。
- 3.33 このデータは単に VOCs の放出による体積変化を示すものであり、そこから各段階 (積荷、輸送など) の損失量及び CH₄ と NMVOCs の比率を特定するのは不可能である。
- 3.34 VOCs の放出により損失する質量のロス、NSV で表すロスよりも少し小さい値となる。VOC の放出で失われるのは原油の軽質品である。揚荷される原油の平均分子量は、積荷時の分子量よりも少し大きい。そのため同じ温度では、揚荷される原油の密度は積荷時よりも少し重い。
- 3.35 いくつかの事例で計算すると、質量ロスは体積ロスよりも 25%から 40%小さい値となる。質量ロスが体積ロスよりも 30%少ないと仮定すると、[34]にある 0.177%の NSV ロスは 0.124%の質量ロスに相当する。
- 3.36 BP の世界エネルギー統計[36]によると、2006 年の原油輸送量は 1,941 百万トンである。そうすると、これによる VOCs (CH₄ + NMVOCs) の排出量は~2.4 百万トンに相当する。

積荷、揚荷時の原油の蒸気圧に基づく推定

- 3.37 A.P.I. Bulletin No. 2518 で引用されたモデルに積荷・揚荷時の原油の平均蒸気分圧を入力することによって航海による平均的な VOC 排出ロスを求めるという手法で VOCs 排出量を推定したデータがある。この試みは、32 隻の船舶から提供を受けたサ

ンプル及びデータを使用したものである。

- 3.38 この手法によって、航海による VOC 排出ロス、積荷された原油の 0.26% であると推定された[35]。これは[34]で報告された積荷・揚荷時のロスを含む NSV ベースの推定値の約 2 倍の量である。以下に述べるようにこの結果に対しても、直接の測定、あるいは標準排出係数[6]を使った技術計算からはその妥当性を証明することができなかった。

VOC/NMVOC 排出の直接測定

- 3.39 MARINTEK/SINTEF は、20 年間にわたり北海の数カ所の沖合油田でシャトルタンカーへの積荷時に発生する VOCs 排出量の測定を多数実施してきた。これらは船内タンクから大気中に流出するガスの流量、絶対圧力、温度、組成を直接測定することにより排出量を求めた。図 3-5 に約 70 回の排出量測定で求めた VOC 排出係数（貨物の%で示した VOC 排出量）を示す。うち 2 カ所の油田に対してはそれぞれ約 20 回の測定を実施した。

- 3.40 VOCs の排出は、大きくばらついた。測定値が 0.04 質量%から 0.27 質量%まで変動した。同一油田に対してさえも、VOC ロスで 1:2 の違いがある。おそらく測定項目のいくつかは同一油田の VOCs 排出量に大きなばらつきを生む要因である。原油の組成及び温度の差が VOC 排出量のばらつきの大きな影響要因と思われる。また積荷前の船内タンク中の VOCs 量が相当量違っており、積荷中の VOCs ロスへの影響度が異なる可能性もある。

北海沖合油田での VOC 排出量の測定値

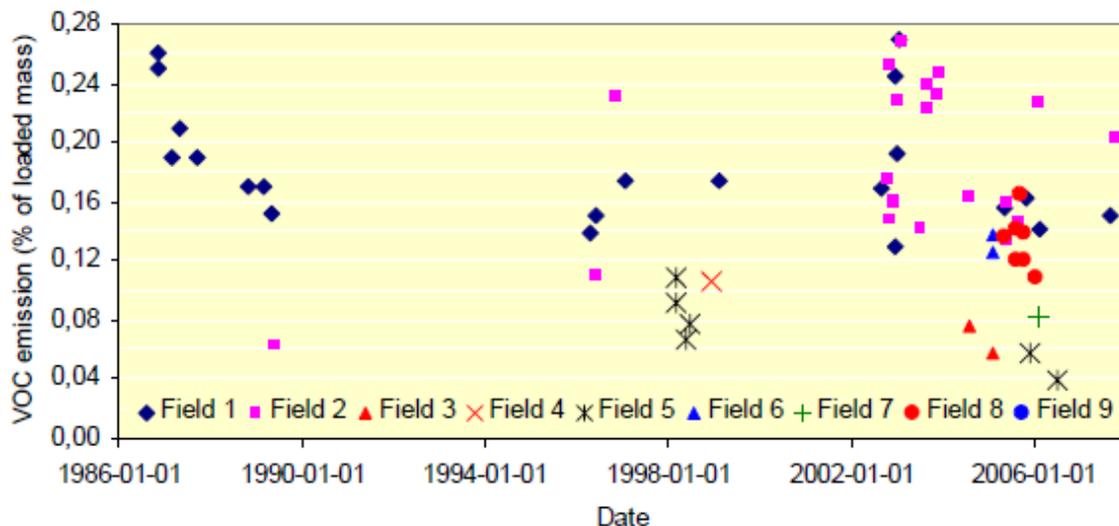


図 3-5 北海での海上積荷中に測定した VOC 排出係数

- 3.41 このような測定によって平均的な VOC ロス係数を求めようとする試みはこれまでなかった。ただし、これには個々の結果に対するある種の重み付けが必要で、長くて不確かなプロセスになる。重み付けを無視すると、図 3-5 の値の平均値はおよそ 0.18 質量%になる。たとえ[34]の NSV 法が輸送時及び揚荷時のロスも含むとしても、[34]のデータベースへの入力データの大部分が陸上中継基地での積荷時のデータである。にもかかわらずこの測定結果は NSV 法による平均 VOC ロスよりもかなり大きい。
- 3.42 MARINTEK は、排出ガスの組成を測定しており、それ故に VOC ロスをメタンロスとメタン以外の VOC (NMVOC) ロスに分割することが可能である。全 VOC ロスに対するメタンロスの質量比率は、0 から 0.5 までばらつく。0.5 という比率は、原油中のメタン含有量が通常高いとされる油田からのデータである。大部分の油田にとって、この比率は 0.02 から 0.10 の間にある。
- 3.43 図 3-5 に示す測定データのうちいくつかのケースでは、積荷航海中の NMVOC 排出量も測定された。航海日数は短期間で、概して半日から 4 日間である。積載航行中の NMVOC 排出量は、原油の組成と温度あるいは海況によって、積荷中の NMVOC 排出量の 0%から 10%の間を変動した。

標準排出係数に基づく公知の推定法

- 3.44 Endresen ら[6]は原油の輸送によって生じる VOC 排出量のモデル式を作成した。この研究は、船舶による VOC 排出量の地理的分布を示し、それが第 8 章の気候に対する影響の解析に使われた。
- 3.45 Endresen ら[6]は、積荷、輸送、揚荷中の VOC 排出係数を用い、また輸送パターンを想定しながら VOCs の排出量と排出場所を推定した。揚荷時及び輸送時の VOC 排出係数は、「AP-42 排出係数」として知られた US-EPA の排出係数を使った[38]（それぞれ 129 mg/litre と 150 mg/week/litre）。積荷中の VOC 排出係数は、EMEP/CORINAIR に提供されたヒドロカーボンの排出データと係数を見直したものをを用いた（積荷質量の 0.1%）。これらは船舶の主推進エンジンからの VOC 排出量も含む（燃料トン当たり 0.3 kg のメタン及び 2.4 kg の NMVOC）。
- 3.46 ある輸送パターンを想定し、彼らは往復航海による VOC 排出量が積載質量の 0.15% になるとの結論をだした。彼らのシミュレーションモデルによれば、VOC 排出の割合は、積荷中が 70%、航行中が 27%、揚荷中が 3%である。

原油輸送からの VOCs 排出量の推定

- 3.47 入手可能なデータを比較検討し、全体排出量を予測するのにもっとも適したデータベースとしてエネルギー協会のデータベースを選択した。CH₄ と NMVOC の比率は、MARINTEK 測定値によるもので、概ね 0.02%から 0.1%の範囲にあった。北海における MARINTEK のデータは、世界全体の状況を代表するものではないため、この想定比率は極めて不確かである。算定結果を表 3-10 に示す。

表 3-10 原油の輸送による VOC ロス (2006 年)

	Million tonnes
NM VOC	2.3
CH ₄	0.14
Total	2.4

船舶からの 6 フッ化硫黄 (SF₆) の排出

- 3.48 6 フッ化硫黄 (SF₆) は、非常に高い地球温暖化係数 (GWP 23,900) を示す合成ガスである。主な用途は、電力分野における高圧部の絶縁材料及びアーク開閉器媒体である。SF₆の主たる使用者は、電力会社、送電会社、一部の大規模な事業用電力利用者であるが、この SFR は窓の遮音材または油井中のトレーサーとしても使用される[30]。
- 3.49 6 フッ化硫黄が船上で相当量を使用されることはない。SF₆は、加圧されたガス容器に入れ分けて搬送される。船舶によって問題になるような量の SF₆が排出されるとは考えられない。

船舶からの PFC の排出

- 3.50 PFCs は、数千オーダーの地球温暖化係数を有する影響度の高い温室効果ガスである。化学物質である PFOS (ペルフルオロオクタンスルホン酸) は、PFCs として総称される化合物の一つである。PFOS 関連の物質は、その特殊な表面性状を付与する特性によって 1950 年代以来、工業用あるいは消費者製品での使用と広く利用されてきた。その用途は、布地や紙製品の処理をはじめ、塗膜関連のそれ以外の分野、すなわちクロムメッキ、油圧作動油 (航空機用)、消火器の泡 (フィルム形成が可能のため) など幅広い範囲にわたる。
- 3.51 船上で PFOS を使うとすれば、主に AFFF (水溶性フィルム形成泡式) 消火器での使用と思われる。新しい AFFFs 消火器における PFOS の使用は、近年では大手メーカーが中止したが、PFOS を含む消火器の備蓄品が残っていて使用される可能性がある。PFOS を含む AFFFs 消火器は、理屈上は多くの船舶で使われる可能性があるが、一般的に大容量のものは、可燃性液体を運搬する船舶あるいはヘリコプターデッキを有する船舶などに設置される。船舶の型式及び大きさによって 100 リットルから 10,000 リットル程度までの容量のものとなる。消火剤は、通常、機械室に設置された 1 個のメインシステム供給タンクに貯蔵され、小型のタンク (例えば 20 リットル) が付属する場合もある。PFOS は、通常 0.017kg/litre から 0.037 kg/litre の濃度であり、船舶 1 隻当たりの PFOS 量は 0.3 kg から 400 kg となる。PFOS は、消火装置内に密封され、装置が作動する場合のみ放出される。船舶からの PFOS の定常的な排出はなく、漏れは無視できる程度と思われる。PFOS の排出は、船のリサイクルとの関連が深く、そこでは消火装置を正しく処理しないと全量を放出する危険性がある[31]。

船舶からの現在の排出量のまとめ

3.52 以上のように、船舶の排ガスからの排出量は、活動基準法によって推定した。そこではインベントリガイドブックからの標準排出係数を可能な限り使用した。冷媒からの排出量は、UNEPのアセスメント報告から引用し、VOCsの排出量は、異なる情報源からのデータを合成して推定した。2007年の全ての航行による排出量予測の総括表を表3-11に示す。原油輸送によるVOCsの排出もCH₄及びNMVOCに関しては重要な排出源であるが、全体的に見ればやはり船舶の排ガスがより重要な排出源である。なお、冷媒排出量の数値は2003年のものである（使用できるもっとも至近の数字）。

表 3-11 全ての海運からの排出量（2007年*）（百万トン）

	Ship exhaust	Refrigerant	Transport of crude oil	Total
CO ₂	1054	–	–	1054
CH ₄	0.10	–	0.14 [†]	0.24
N ₂ O	0.03	–	–	0.03
HFC	–	0.0004	–	0.0004
PFC	–	–	–	–
SF ₆	–	–	–	–
NO _x	25	–	–	25
NMVOC	0.8	–	2.3	3.1
CO	2.5	–	–	2.5
PM	1.8	–	–	1.8
SO _x	15	–	–	15

* HFCの数値は2003年、原油の輸送の数値は2006年のもの

† かなり不確か

参考文献

1. Corbett, J.J. and Köhler, H.W. 2003. “Updated emissions from ocean shipping”. J. Geophys. Res. 108 (D20), 4650, doi:10.1029/2003JD003751.
2. Corbett, J.J., Firestone, J., and Wang, C., 2007. “Estimation, validation, and forecasts of regional commercial marine vessel inventories”, Final Report for the California Air Resources Board and the California Environmental Protection Agency and for the Commission for Environmental Cooperation in North America, ARB Contract Number 04-346.
3. Eyring, V., Köhler, H.W., van Aardenne, J. and Lauer, A. 2005. “Emissions from international shipping: 1. The last 50 years”. J. Geophys. Res. 110, D17305, doi:10.1029/2004JD005619.
4. Input from the four subgroups and individual experts to the final report of the Informal Cross Government/Industry Scientific Group of Experts. IMO document BLG 12/INF.10.
5. Endresen, Ø., Sørsgård, E., Behrens, H.L., Brett, P.O., and Isaksen, I.S.A. 2007. “A historical reconstruction of ships’ fuel consumption and emissions”. J. Geophys. Res. 112, D12301, doi:10.1029/2006JD007630.
6. Endresen, Ø., Sørsgård, E., Sundet, J.K., Dalsøren, S.B., Isaksen, I.S.A., Berglen, T.F. and Gravir, G. 2003. “Emission from international sea transportation and environmental impact”. J. Geophys. Res. 108, D174560, doi:10.1029/2002JD002898.

7. Fearnleys. 2007. Fearnleys Review 2007, The Tanker and Bulk Markets and Fleets, Oslo, Norway.
8. Gunner, T.J. 2007. "Shipping, CO₂ and other Air Emissions", Technical workshop meeting on emissions from aviation and maritime transport, Oslo, Norway, October 2007. <http://www.eionet.europa.eu/training/bunkerfuelemissions>
9. Lloyd's Register – Fairplay (LRF), 2006. Extracts from the World merchant fleet database for 2001 to 2006 (all civil ocean-going cargo and passenger ships above or equal to 100 GT), provided by Lloyd's, UK.
10. Olivier, J.G.J. and Peters, J.A.H.W. 1999. "International marine and aviation bunker fuel: trends, ranking of countries and comparison with national CO₂ emissions". Netherlands Environmental Assessment Agency. RIVM report 773301 002.
11. Olivier, J.G.J., Berdowski, J.J.M., Peters, J.A.H.W., Bakker, J., Visschedijk, A.J.H., and Bloos, J.P.J. 2001. "Applications of EDGAR. Including a description of EDGAR 3.0: reference database with trend data for 1970–1995". RIVM, Bilthoven. RIVM report 773301 001/ NRP report 410200 051.
12. Skjølsvik, K.O., Andersen, A.B., Corbett, J.J., and Skjelvik, J.M. 2000. "Study of greenhouse gas emissions from ships" (MEPC 45/8: Report to International Maritime Organization on the outcome of the IMO Study on Greenhouse Gas Emissions from Ships. MARINTEK Sintef Group, Carnegie Mellon University, Center for Economic Analysis, and Det Norske Veritas: Trondheim, Norway).
13. Thomas, R., Lauretis, R.D., Fontelle, J.-P., Hill, N., Kilde, N., and Rypdal, K. 2002. Shipping Activities, Chapter B842, in EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook – October 2002 UPDATE, edited by K. Lavender, G. Reynolds, A. Webster, and K. Rypdal, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.
14. Wang, C., Corbett, J.J. and Firestone, J. 2008. "Improving spatial representation of global ship emissions inventories". Environmental Science & Technology. 42, 193–199, doi:10.1021/es0700799.
15. Corbett J.J. and Fischbeck P.S. 1997. "Emissions from Ships". Science. 278 (5339), 823–824, doi:10.1126/science.278.5339.823.
16. Data provided by Lloyd's Register – Fairplay Research, Sweden.
17. Data compiled by DonChool Lee, Mpoko National Maritime University, Korea.
18. Diesel & Gas Turbine Worldwide. 2005. Diesel & Gas Turbine Publications, 20855 Watertown Road, Suite 220, Waukesha, WI 53186, USA.
19. Scott, R. 1994. "IEA: The first twenty years". Paris, France, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD).
20. ICF Consulting. 2005. "Best Practices in Preparing Port Emission Inventories: draft for review". Browning, L. and E.P.S.L. Bailey, K. Fairfax, Virginia, Prepared for Office of Policy, Economics and Innovation, United States Environmental Protection Agency.
21. UNFCCC and Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice. 2004. "Methodological issues relating to emissions from international aviation and maritime transport; Note by the secretariat". Bonn, Germany, 16–25 June United Nations Framework Convention on Climate Change, Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice: FCCC/SBSTA/2004/INF.5
22. International Energy Agency. 1987. Energy Statistics 1970–1985 and Main Series from 1960. Paris, France, Organisation for Economic Co-operation and Development.
23. Houghton, J.T., Meira Filho, L.G. *et al.*, editors. 1997. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Bracknell, UK, IPCC WGI Technical Support Unit.
24. Corbett, J.J. and Fischbeck, P.S. 2000. "Emissions from waterborne commerce vessels in United States continental and inland waterways". Environmental Science & Technology. 34, 3254–3260, doi:10.1021/es9911768.
25. CIMAC – International Council of Combustion Engines <http://www.cimac.com>
26. IEA Data Services, 2007 Energy Balances and Energy Statistics for OECD and non-OECD Countries.
27. Energy Information Administration. International Energy Annual, table 31 – various years: <http://www.eia.doe.gov/>

28. International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974. Chapter V – Safety of navigation.
29. Endresen, Ø., Bakke, J., Sjørgård, E., Berglen, T.F. and Holmvang, P. 2005. “Improved modelling of ship SO₂ emissions – a fuel-based approach”. *Atmospheric Environment*. 39, 3621–3628.
30. Bessede, J.L., Buescher, A., Marshall, R., Montillet, G.F., and Stelter, A. 2006. EPA San Antonio 2006 Version 2.8. “Limiting SF₆ gas emissions by optimization of design and handling over the life cycle of HV switchgear”.
31. Norwegian Pollution Control Authority. December 2005. Kartlegging av PFOS i brannskum. TA-2139/2005, ISBN 82-7655-275-7 (978-82-7655-275-1).
32. Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee (RTOC), United Nations Environment Programme 1998 RTOC Assessment report. <http://ozone.unep.org/teap/Reports/RTOC/index.shtml>
33. Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee (RTOC), United Nations Environment Programme 2006 RTOC Assessment report. <http://ozone.unep.org/teap/Reports/RTOC/index.shtml>
34. Petroleum Review. October 2007, http://www.oil-transport.info/Voyage_data/PetRev.pdf
35. Gunner, T. The physical behaviour of crude oil influencing its carriage by sea (CRUCOGSA), Vestfold College, Norway, 2000.
36. Statistical Review of World Energy. BP, www.bp.com, Accessed 2008 <http://www.bp.com/productlanding.do?categoryId=6929&contentId=7044622>
37. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
38. U.S. Environmental Protection Agency. “Emissions factors and AP 42” <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/>

第4章 MARPOL Annex VI の実施により達成された排出削減

4.1 この章では IMO 規則の実施により得られた温室効果ガス及びその他関連物質の排出削減の向上について述べる。海上輸送の増加によって絶対排出量は、年々増加傾向にあるが、輸送活動量当たりの排出量は減少した。一般的にエネルギー効率が改善されれば、排ガス排出量は減少するはずである。したがって、この章で説明することに加えて、第9章で述べる船舶効率の歴史的な改善も輸送活動量当たりの排出量削減に寄与することを示唆している。

規則 12 - オゾン層破壊物質

4.2 MARPOL Annex VI の規則 12 は、オゾン層破壊物質の故意の排出を禁止する。規則 12 では、HCFC が 2020 年 1 月 1 日まで許可されるのを除き、オゾン破壊物質を使用する設備の新建造も禁止された。

4.3 船舶による冷媒の推定排出量が UNEP の 1998 年[1]及び 2006 年[2]アセスメント報告の一部として報告された。これらアセスメントの推定値の比較を表 4-1 及び図 4-1 に示す。これら推定値は、失った分を補充するため船舶に供給された冷媒の量を基準にして算定された。CFCs 及び HCFCs は期間内に相当量の排出削減が達成された。ただし CFCs 及び HCFCs との置き換えによって HFCs の使用量及び排出量が増加した。2006 年 RTOC 報告[2]に示された排出量は、2003 年のデータであるが、1998 年報告[1]にはデータの年の提示がない。HCFC 以外のオゾン層破壊物質は、Annex VI の発効に伴い使用が禁止されているため、CFCs 及び HCFCs の排出は、ほとんどなくなったと思われる。

表 4-1 船舶*からの冷媒の推定年間排出削減量(トン)

	1998 RTOC	2006 RTOC	
	Total	Total	Reduction
CFC	750	15	735 (98%)
HCFC-22	14 000	3100	10900 (78%)
HFC	100	415	-315 (-315%)

* 商船、軍艦、漁船、冷凍船

4.4 Annex VI の改訂版[3]では、全ての船舶に対してオゾン破壊物質を貯蔵する設備のリストを携行すること、再充填可能なシステムを装備する 400 GT 超える全ての船舶に対してオゾン層破壊物質記録簿を携行することが規定された。これによって、運転方法の改善、排出レベルの把握、意識の向上、今後の排出削減への活用といった効果が期待される。

船舶からのオゾン層破壊物質排出量

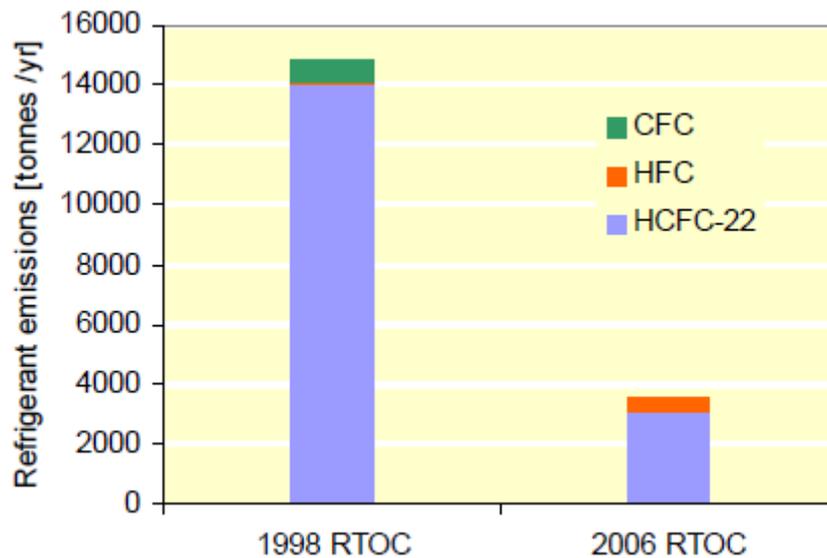


図 4-1 オゾン層破壊物質[UNEP]の推定排出量

規則 13—窒素酸化物 (NO_x)

- 4.5 NO_xの排出に関しては、Annex VI の規則 13 に規定されている。NO_x 排出量に対する最初の規制となった Tier I 規制は、2000 年 1 月 1 日以後に製造されたエンジンに適用される。MEPC/Circ.344[4]によって通達された暫定指針によって、エンジンメーカーは、規則の実施に先立ちこれに従うこととなった。
- 4.6 この規則による効果を分析するには、2000 年 1 月 1 日の前後の排出レベルの比較が必要となる。NO_x 排出量は、エンジン中での燃料の燃焼条件によって大きく影響される。そのためエンジンの型式、状態、運転条件によって変わり、さらに燃料の種類と燃焼条件によっても変わる。このため NO_x 排出量のデータは、相当量ばらつく。排出インベントリの作成時には、通常、低速ディーゼル (SSD) エンジンと中速ディーゼル (MSD) エンジンを区別して考える。
- 4.7 ノルウェーでは 2007 年 1 月 1 日をもって国内海運の NO_x 排出税が導入されたため、相当数のエンジンからの排出量の測定データが集まった。これらの未公開データを本調査報告に使用することについては Norwegian Maritime Administration (ノルウェー海事局) からの承認を得た。ノルウェー海事局のデータ、Lloyd's Marine Emission study のデータ、MARINTEK の測定データを組合せて、現存する船舶からの NO_x 排出量に関する統合データセットを作成した。このデータセットには 121 個の測定データが含まれ、その内 96 個は中速エンジンのデータである。このデータセットから算出した排出係数を、二つの権威ある参考文献からのデータと合わせて表 4-2 に示す。スウェーデン環境研究所 (IVL) のデータと Lloyd のデータを組合せて求めた MSD の排出係数が少し高めに出たことを除けば、各排出係数はかなり一致している。

表 4-2 2000/1/1 以前に設置されたエンジンの NO_x 排出係数 (kg/燃料 ton)

SSD	MSD	データソース
87	57	Lloyd's Marine Emissions study (1995) ^[5]
89*	65*	“Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community” 2002[6]に掲載の IVL のデータと Lloyd のデータの組合せ
90 ^a	60 ^b	今回の IMO 調査報告で編集したデータセット

* いくつかのエンジンは 2000/1/1 以後に設置された可能性がある。

^a 25 基のエンジン、Lloyd's Marine Emissions study から引用の 7 基を含む。

^b 99 基のエンジン、Lloyd's Marine Emissions study から引用の 19 基を含む。

4.8 排ガス排出量の船上測定は、試験台認証データなど別のデータが入手できないエンジンを主体に実施した。このため、船上測定データは、2000 年以前に設置されたエンジンのデータが主体となる。2000 年 1 月 1 日以後に新設された（そのため Tier 1 NO_x 排出規制が適用される）エンジンについては、DNV 認証試験のデータベースから引用したエンジンの試験データを使って排出係数を計算した。このデータベースには 2000 年 1 月 1 日の前後に設置され DNV 船級を取得した親エンジンの試験台での排出データも含まれる。このデータベースを使った算定結果を表 4-3 に示す。

表 4-3 試験台の NO_x 排出係数 (2000/1/1 以後のエンジン*)

	SSD	MSD
平均 NO _x 排出係数 (kg/燃料 ton)	78.2	51.4
データの標準偏差	11.0	7.6
加重処理をした測定数	1057	309.3
EMEP/CORINAIR Guidebook の NO _x 排出係数 (kg/燃料 ton)	87	57
差	-10%	-10%

* EIAPP 認証試験及びその技術ファイルのデータ

4.9 表 4-3 が示すように、MARPOL NO_x 規制の適用を受けるエンジンの排出係数は、現行の EMEP/CORINAIR ガイドブックの値よりも平均して 10%低い。試験台でのエンジンの排出測定は、留出燃料を使用して実際のエンジン運転負荷とは異なる負荷ポイントにおいて実施される。船上での実際の排出量は、例えば燃料中の窒素などが原因でより高目になる。一方で、船上での燃料消費量もまたより高目となり、排出係数（消費した単位燃料当たりの排出量）の観点からは低目に作用する。このように試験台でのデータが偏るとしても、どちらの方向に偏るのかは明らかでない。つまり試験台データを「船上相当」に修正する明らかな必要性はなく、エンジン排出係数を代表するものとして試験台データを「そのまま」使用した。

NO_x 排出係数データ

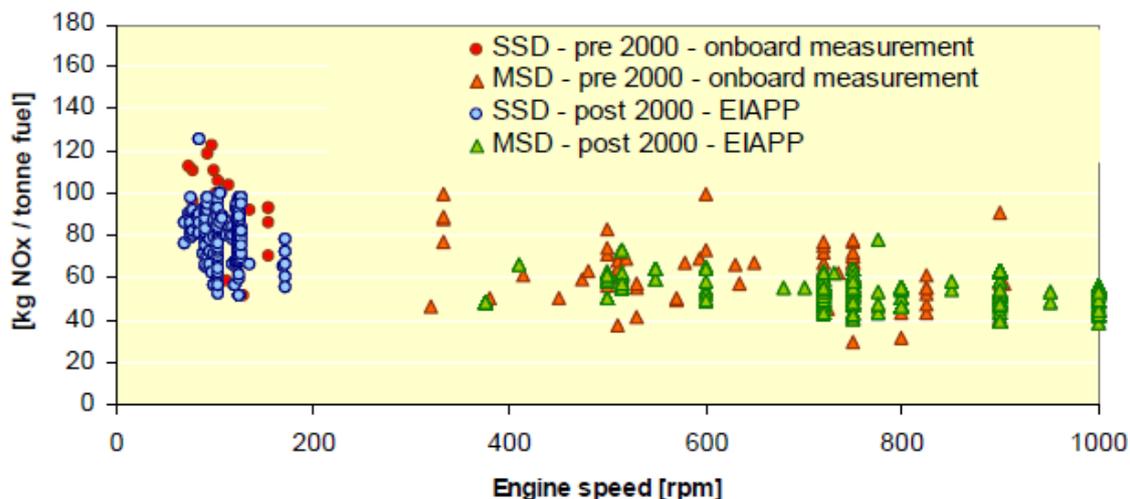


図 4-3 測定データ及び EIAPP 認証データから求めた NO_x 排出係数

4.10 2000 年以前 (Tier 0) と以後 (Tier I) のエンジンの違いを考慮した船腹全体の排出係数とするため、Lloyd's Register - Fairplay のデータから引用した 2000 年以前と以後の建造船の総出力比率を使って加重平均を求めた。2000 年以後の急激な船腹増加によって、総エンジン出力に占める 2000 年以後エンジンの比率が 40.4% となり、極めて大きな意味を持つこととなる (表 4-4 参照)。2000 年から 2006 年までの間の排出係数は、線形内挿法により求めた。

表 4-4 使用した NO_x 排出係数

	SSD	MSD
Tier 0 average NO _x factor (kg/tonne of fuel)	89.5	59.6
Tier I average NO _x factor (kg/tonne of fuel)	78.2	51.4
Power installed post-2000 (% total kW)	40.4%	
2007 NO _x (kg/tonne of fuel)	84.9	56.3
2000–2006 NO _x emission factor	Linear interpolation for each year*	

*表 4-5 を参照

4.11 第 3 章で示した燃料消費量データを使って、Tier 0 排出係数が 2000 年 1 月 1 日以後も適用された場合を仮想した「規制無しシナリオ」に対する NO_x 排出削減量を計算した。結果を図 4-3 及び表 4-5 に示す。世界船腹において Tier I 適用エンジンの比率が増加するにつれて、年間削減量が毎年増加した。規則 13 の導入によって 2007 年の船舶による NO_x 排出量が、規制無しシナリオに比べて約 6% 減少したと評価される。

規則 13 による NO_x 削減効果

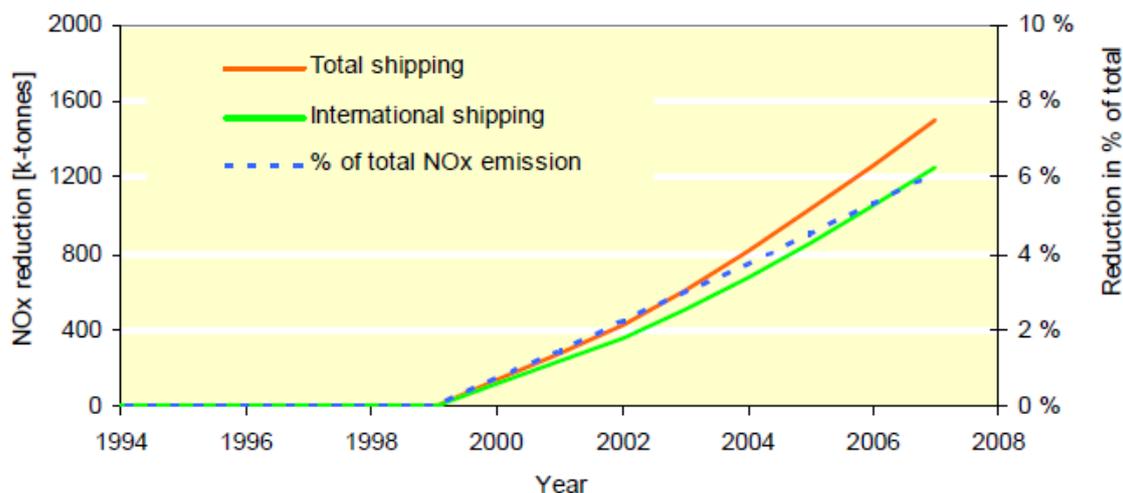


図 4-3 規則 13 による NO_x 削減効果

表 4-5 規則 13 による NO_x 削減効果 (千トン)

Year	Total	International	%
2000	140	116	0.7
2001	282	235	1.5
2002	428	356	2.2
2003	610	508	3.0
2004	816	679	3.7
2005	1031	857	4.5
2006	1268	1055	5.3
2007	1504	1251	6.1
Total 2000-2007	5940	4941	3.4

規則 14-SO_x

4.12 SO_x 排出量が Annex VI 規則 14 の対象となり、燃料中の硫黄含有量（**訳注：原稿の sulphur emissions は間違い**）の上限が世界全域で 4.5%に、SO_x 排出規制特定海域（SECAs）ではさらに低い上限に規制された。SECA 内では、船舶に使用する燃料の硫黄含有量が質量比で 1.5%を超えてはならない。一つの選択肢として、船舶は排ガス清浄システムを使ってもよいが、現状では非常に限られた数の船舶でプロトタイプ試験の形で実施されているに過ぎない。

4.13 船舶燃料中の硫黄含有量は、IMO の Sulphur Monitoring Programme（硫黄監視プログラム）によって監視されるが、それを MARPOL Annex VI の下で義務付けた。このプ

ログラムによれば、有償で燃料サンプルを分析する試験所からデータを集め、その結果は、毎年 MEPC に報告される[7]。

4.14 硫黄含有率 4.5%という世界共通の制約が、現実的には地球全体の硫黄排出量の削減に寄与しないことは幅広く認識されている。なぜならこの規制の発効以前から硫黄含有量がこのレベルを超えることは非常に稀だからである。硫黄含有量が 4.5%を超える稀なケースにおいてもごくわずかに超えるのみなので、相対的に低硫黄の燃料を混ぜれば容易に含有量を下げることができる。ただし、SECAs はかなりの効果を発揮する。

4.15 2 か所の SECAs が発効中である。すなわち

- .1 バルト海 SECA : 2006/5/19 発効
- .2 北海 SECA : 2007/11/22 発効

4.16 上記のような特別に環境上の配慮が必要で、また、船舶の航行密度も高い海域では、局地的な規制は SO_x 排出量の削減に対して大いに寄与する。排出削減効果を評価するためには、以下の値を求めなければならない。

- .1 SECA 内での燃料消費量（地球平均での削減効果を推定するため）
- .2 SECA 内で使われる燃料の平均硫黄含有量
- .3 MARPOL 規則 14 がなかった場合の燃料中の硫黄含有量の想定値

4.17 2008 年を基準年として設定した。なぜならこの年が、両 SECAs が年間を通して実施された最初の年となったためである。以下の前提を設けて計算をおこなった。

- .1 2008 年の世界燃料消費量（表 4-6 参照）は 2007 年の総意の推定値と A1B シナリオの成長傾向をベースとして求める。（A1B は第 7 章記載のシナリオ）
- .2 SECA 内の燃料消費量は世界の消費量の 8%と推定する。これは欧州委員会のために算定された推定値[7]を使った。
- .3 燃料中の硫黄レベルは表 4-7 に示すものとする。

表 4-6 燃料推定消費量（2008 年）（百万トン）

	HFO*	MDO†	Total
SECA	21	6	27
Non-SECA	241	71	312
Total	262	77	339

* HFO : 燃料重油

† MDO : 船舶用ディーゼル油

表 4-7 燃料の平均硫黄含有量推定値 (2008 年)

	HFO	MDO
SECA*	1.5%	0.5%
Non-SECA*	2.7%	0.5%

* SECA 域外の数値は、規制無しの仮想シナリオでも使用

表 4-8 SO₂ の推定排出量 (2008 年) (百万トン)

	Hypothetical baseline	MARPOL Annex VI	Reduction
Global total	14.9	14.4	3.4%
SECA	1.2	0.7	42%

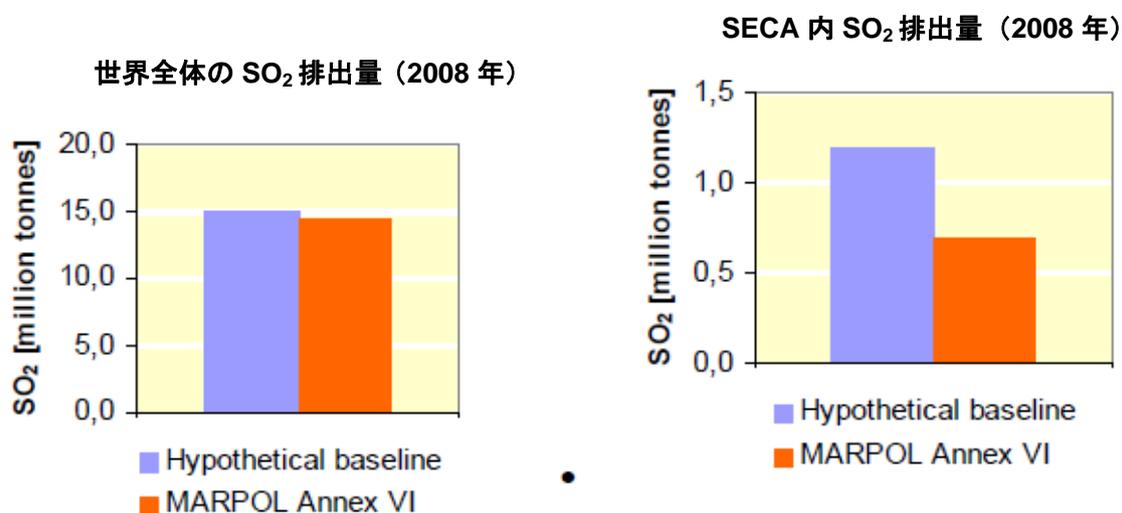


図 4-4 SO₂ の推定排出削減量 (2008 年)

規則 15—揮発性有機化合物 (VOC)

4.18 揮発性有機化合物 (VOC) の排出量は、MARPOL Annex VI 規則 15 の規制対象である。この規則は、Annex 締約国の司法権下にある港及び中継基地においてタンカー積荷時の VOC 排出をどのように抑えるかを規定した。特にこの規制の適用を受ける場所では、Annex VI 締約国は VOC 排出削減に関する規制内容を IMO[9]に報告しなければならない。いくつかの VOC 回収プラントが米国、ヨーロッパ、日本などの世界各地で稼働中であるが[10]、2008 年末までにはこのような規制の存在を IMO に報告した締約国はない。

4.19 規則 15 のもっとも具体的な成果は、積荷中に漏れた VOC を陸側に回収することを可能とする VOC 戻し配管の標準化の導入である。INTERTANKO によると、使用頻度はまちまちであるが、ほとんどのタンカーがこの戻し配管を設置している[10]。

- 4.20 改訂 Annex VIは原油タンカーに対しVOC管理計画を策定し実行するよう求めている。これには積荷中及び輸送中のVOCの漏れロスに対する注意を油タンカーの運航者に喚起するとともに、排出を最小限に抑える作業方法に関する指針を示す意図がある。

参考文献

1. Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee (RTOC), United Nations Environment Programme 1998 RTOC Assessment Report. <http://ozone.unep.org/teap/Reports/RTOC/index.shtml>
2. Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee (RTOC), United Nations Environment Programme 2006 RTOC Assessment Report. <http://ozone.unep.org/teap/Reports/RTOC/index.shtml>
3. Resolution MEPC.176(58), adopted on 10 October 2008. “Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto”.
4. “Interim guidelines for the application of the NO_x Technical Code”. MEPC/Circ.344, issued 19 November 1998.
5. Marine Exhaust Emissions Programme (Main report, Steady State operation and Slow speed addendum) Lloyd’s Register Engineering Services. 1995. Lloyd’s Register House, 29 Wellesley Road, Croydon, CR0 2AJ, UK.
6. “Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community”. 2002. Report prepared by Entec UK Ltd for the European Commission. <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/background.htm#transport>
7. Resolution MEPC.82(43), adopted on 1 July 1999. “Guidelines for monitoring the world-wide average sulphur content of residual fuel oils supplied for use on board ships”. http://www.imo.org/includes/blastDataOnly.asp/data_id%3D15684/82%2843%29.pdf
8. MARTOB: Onboard Treatment of Ballast Water (Technologies Development and Applications) and Application of Low-sulphur Marine Fuel, DTR-6.10-UNEW-07.04.
9. Information provided by the IMO secretariat in March 2008.
10. Information provided by INTERTANKO in February 2009.

第5章 排出削減に対する技術ポテンシャルび運航ポテンシャル

- 5.1 第3章に示すように、船舶は大気汚染物質および温室効果ガスの主要な発生源の一つである。第4章では、国際ルールによって排出削減が可能であることを示した。この章では技術的な観点から温室効果ガス及びその他の関連物質の排出削減ポテンシャル（可能性）を再検討する。
- 5.2 海運からの排出量の削減オプション（選択肢）は、原則的には4種類の基本カテゴリーのいずれかに入る。
- .1 エネルギー効率の改善。すなわち、同じエネルギー消費量でより有効な仕事をす。これは船舶の設計及び運転の両方に当てはまる。
 - .2 再生可能エネルギーの利用。例えば風力あるいは太陽光
 - .3 単位仕事量当たりのライフサイクル総排出量が少ない燃料の使用。例えばバイオ燃料あるいは天然ガス
 - .4 排出削減テクノロジーの活用。すなわち、化学的な転換、捕捉、貯蔵、その他オプション
- 5.3 以下の項では、これらのオプションを取り上げる。個々の具体的な排出削減ソリューション及び排出削減技術の詳細かつ補足的な説明は、本報告の Appendix 2 を参照されたい。

エネルギー効率改善オプション

- 5.4 エネルギー効率の改善とは、有効な仕事量が同じ場合に消費するエネルギーを少なくすることを意味する。すなわち、より少ない燃料を燃焼させて排ガスの排出量を減少させることである。船舶の設計面からあるいは運航面からエネルギー効率を改善する多様なオプションが利用可能である。省エネルギーに対する重要な着目点を「設計」と「運航」の分野に分けて表 5-1 に示す。

表 5-1 エネルギー効率改善の基本オプション

設計	運航
設計コンセプト、速力設計、機能設計	船腹管理、物流計画、奨励施策
船体構造、上部構造	航海の最適化
駆動源及び推進装置	エネルギー管理

船舶設計によるエネルギー効率改善

- 5.5 5.5 項から 5.20 項では、設計の変更によるエネルギー効率改善について述べる。MEPC がおこなったエネルギー効率設計指標 (EEDI: Energy efficiency design index) の策定（第6章を参照）は、効率改善のための設計オプションを引き出す一つの取

組みである。設計変更の多くは、新造する場合に特に適したものである。このことは逆に船舶の場合は、耐用年数が長いために（第2章参照）設計変更が段階的に導入され、エネルギー効率の改善効果が徐々に現れてくることを意味する。オプションによっては、既存の船舶に適用できる場合もある。

設計コンセプト、速力設計、機能設計

- 5.6 船舶のエネルギー効率は、オリジナルの設計仕様と密接に関連する。速力、大きさ、さらに船幅、喫水、長さなどの基本仕様は、設計に起因するエネルギー効率に大きく影響する。港や運河へのアクセスによって決まる喫水、船幅、長さなどの制約条件が設計面ではエネルギー効率を悪化させる方向に作用する可能性もある。ギャー付き船舶（貨物を降ろすクレーンを装備する船）あるいは耐氷船、予備の推進システムを装備する船は、余分な機能を備える分、エネルギー効率が悪い[1]。
- 5.7 船舶の寿命が30年を超え、その間に運航環境、事業環境が大きく変わる可能性がある。シナリオ変化に対応しながら船舶の改造及び効率的な運航を可能とするフレキシビリティを設計段階で考慮しなければならない。用途に適した船舶を建造することが重要な意味を持ち、それによって運航面でも十分なフレキシビリティが与えられる。船舶の仕様を定め、それに基づいて設計を進めていくのは、高度に複雑な仕事である。この段階において省エネルギーポテンシャルを推定することも同様に複雑な仕事といえる。しかし、この設計段階で下した選択の影響は非常に大きく、これを過小評価してはならない[2, 3]。例えば、積荷時には小型船に比べて大型船ほどトン・マイルあたりの効率が高いが、小型船あるいは最適サイズの船の方が高い稼働率を達成し、結果的に全体効率で勝るといったケースもある。設計速力もまた輸送効率に大きな影響を及ぼす。
- 5.8 設計コンセプト、速力設計、機能設計による排出削減ポテンシャルは、船舶の運航とも密接に関連する。設計段階の計画が良ければ、運航段階においてより多くの削減ポテンシャルがもたらされる。

船体構造及び上部構造

- 5.9 水中にある船体形状の最適化技術は、その都度、新しい船舶設計に導入されてきた。今日ではほとんどの新造船において、抵抗の減少と推進効率改善に重きを置きながら、体系付けられた最適化プロセスを踏んだ設計が進められるようになった。ただし、そのようなプロセスを経た世界船腹の実際の比率は不明である。このような最適化は難易度の高い課題であり、「最適化プロセス」を踏まえた結果が結果的に最適設計をもたらすとは言い切れない。プロペラに対して最適な運転条件を保証することが船体最適化の重要なポイントであり、船体とプロペラの最適化は一体のプロセスとして設計される。
- 5.10 重要なポイントの一つに、最適設計点を船舶の実際の運航条件に合わせる、という点がある。特に天候及び波に対する完全な最適化が必ずしもなされるとは限らない。

これは、契約仕様で定めた船舶性能を確認する試験航海が静水状態で実施されるという事実とも関連する。

- 5.11 船体の上部構造が全体抵抗に占める比率は小さいが、空気抵抗及び漂流時のような横風の悪影響を最小化するような設計によって更なる省エネルギーが可能である。これは大きな上部構造を持つ船舶にとっては特に重要となる。
- 5.12 船体の軽量化は、いかなる積載量に対しても水中表面積及び抵抗を減らし、省エネルギーになる。軽量化の可能性は、必要強度、安全率、設計基準での規定内容などに関連する。一般的に軽量化のためには、高級鋼と軽量素材の使用が必須となる。現在高速船では、アルミニウム、カーボンファイバー、グラスファイバーのサンドイッチ構造の部材が使用される。
- 5.13 前回の温室効果ガス調査報告[4]では、船体構造及び上部構造の最適化によるポテンシャルを算定するため、MARINTEK のデータベースを使ってモデルを解析した。モデル解析によって水中の船体挙動の最適化による省エネポテンシャルが 5%から 20%あることが示された。船舶の小型化の方が大きな省エネポテンシャルを持つが、船舶の小型はすでに実施済みであり、この面での最適化の原資は少ない。船体の最適化は、波の中での性能を考慮する必要がある、それは船舶によって相当な差があることが分かっている[5]。

駆動装置及び推進装置

- 5.14 船舶の駆動力は、特殊な場合を除き低速又は中速ディーゼルエンジンによって発生される。駆動系のエネルギー効率改善には多くの方法が考えられる。
- 5.15 古いエンジンの効率は、エンジンの改造（新鋭化）、古いターボチャージャーの更新、あるいは出力ダウンが許容される場合の減速比変更、などによって改善される。しかし、現在ではコストと複雑さが原因となってか、この種の改造はあまり採用されない。この種のエンジン改造は、IMO の NO_x 規制に関連して新たな認証の取得及び管理が必要な大改造とみなされる可能性もある。
- 5.16 排気側のバイパス流、あるいはエンジンの廃熱で発生させた蒸気、あるいはその両者によって直接駆動されるパワータービンを使って排ガスからのエネルギー回収が可能となる。回収したエネルギーは発電用の電動発電機の主軸駆動又は主エンジンの補助として使用する。補助エンジンの排ガスからもエネルギーの回収が可能である。将来的には高効率で小型のシステムを実現するため、蒸気以外の流体の使用も考えられる。排ガスからのエネルギー回収は、全体の約 10%に相当する追加の出力を発生させ、大型 2 サイクルエンジンの場合で軸効率を 50%から約 55%に改善できる。排ガスからのエネルギー回収は、小型エンジンにも適用可能である。また 2 段ターボチャージングが、排気エネルギーを利用した別のエネルギー効率改善手段として考えられる[5]。

- 5.17 運航パターンが変動する場合は、エンジン配列を特殊なものにして稼働率及び効率の最適化を図る。すなわち、親子推進エンジン方式、補助エンジンの数と大きさの変更、同軸発電システムなどの採用である。ディーゼル - 電気推進システムもこのようなケースの省エネ対策として考えられる。ただし、電気による推進方式はいかなる省エネ効果とも相殺される新たな変換ロスをもたらす。ディーゼル - 電気推進システムは設計の自由度を増やすといった別な面のメリットがあり、それによる間接的な省エネルギー効果を期待するものだ。
- 5.18 プロペラにはスラスト力が発生する。高い推進効率は低速で回転する大きなプロペラによって得られる。理想的には、ブレード数を最少にしてブレード面積及び摩擦抵抗を減らすのがよい。設計面での代表的な制約条件は、直径、キャビテーション、負荷に関する設計限界である。プロペラの寸法は船舶の設計、運航を予定する海域の喫水制約、エンジントルクなどによって制約される[1]。
- 5.19 特定のケースにおいては、羽、フィン、ダクト、高効率舵、羽根車、非対称舵、二重反転プロペラなど多様な対策によって、エネルギー効率を高めることができる。そのような装置に関しては Appendix 2 で説明する。これらの装置の多くは一般的にはプロペラの回転エネルギーを回収する代案と考えられる。これによる省エネポテンシャルは、より高い数値が特殊ケースとして業界で報告されることもあるが、概して船舶推進力の 5% から 10% のオーダーと推定される。
- 5.20 これらの推進装置の全てがあらゆる種類の船舶に適するわけではない。特殊な推進強化策は、コスト、信頼性などの理由で広範囲には使われない。プロペラに作用する機械負荷は非常に高く、荒海に耐える能力は限界に近い。またこのような対策の効果を実機規模で確認するのは難しい、そしてある船舶で達成された効果が別の船舶には当てはまらない可能性もある。そのためこのような先進的な推進方法への投資はむしろリスクと判断されることが多い。

運航面での省エネルギー

- 5.21 運航段階での省エネルギーは全ての船舶で達成可能である。しかし、5.6 項から 5.8 項で述べたように、貨物荷役装置の改良、異なる船速においても効率的に航行する能力といった運航面の省エネポテンシャルを引き出す自由度をより多く備えるのは新造船である。運航段階での省エネルギーへの取り組みとして、エネルギー効率運航指標（EEOI）及び船舶効率管理計画（SEMP）が MEPC によって策定された。

船腹管理、物流計画、奨励施策

- 5.22 エネルギー効率の改善は、ある輸送システムに対して正しい船舶を使用することによっても達成が可能である。一般的には 5.6 項から 5.8 項で示したように、可能な限り大型船に貨物を集中させた方がエネルギー効率は上昇する。大型船の使用によって、航行区間内でのエネルギー消費量が減少するが、一方では大型船による輸送が貨物の個別配送に貢献する小型船によって補佐されない限りは、ドアツードアの全

行程の物流機能に対する影響としてはマイナスの影響となる。当然ながら大型船は、十分な貨物を確保しない限りは低積載率を余儀なくされ、非効率となる。多くの港や貨物にアクセス可能で貨物積載率が高い小型船の方が実質的なエネルギー効率が低い場合もある[7]。

- 5.23 計画速力の減速（航海日数の延長が許容されるなら）はエネルギー効率を上げるが、結果的により多くの船舶が必要となる。計画速力の減速は、運搬量さらには輸送費の売上に直接的に影響するため、かえって高価なものになる可能性がある。しかし輸送単価と燃料費の間には相殺関係がある。すなわち例えば運賃単価が低く燃料価格が高い場合は、速度を下げた方が収益性の向上を期待できる。
- 5.24 先入れ先出しあるいは待ち行列優先順位付けなどの物流制御管理システムも影響がある。より効率的な貨物ハンドリング、接岸、係留による停泊時間の短縮が排出削減に貢献する。
- 5.25 運転面の効率を最適化し改善する多くのチャンスがある一方で（上記あるいは 5.29 項から 5.38 項、あるいは SEMP[30]で述べられたように）、あるレベルにおいては、そのための複数の関係者の協力も必要となる。これらの関係者がインセンティブとフレキシビリティを持って省エネルギーの取り組みに参加することが不可欠であり、特に、非効率な行動を助長するようなインセンティブを与えないことが重要である。逆効果のインセンティブの例として、船舶の性能が高度化し、重要な補修点検作業が運航会社の高度な戦略に頼らざるを得ないような場合がある。船舶が商業運航会社とは異なる会社によって運航される場合、技術的な運航は乾ドック時間を最短にする（オフハイヤーコストを最少にする）、あるいは他のメンテナンスコストを最小限に抑える（例えば塗装費）と同時に燃料費は商業上の運航会社持ちとするなどの傾向がある。別の例では、運航会社が混雑する港に到着して数日あるいは数週間荷揚げをただ待つだけで、待機日数に見合う補償（デマレッジ）を受け取る場合もある。契約条件及びインセンティブが運航に対して大きな影響を及ぼすことは明らかであり、当然効率に対しても大きな影響がある。
- 5.26 通常、契約は 2 当事者間のみで結ばれ、いろいろな条件の下で当事者の（経済的な）利益を保護することを目的とする。典型的な定期用船契約では、用船者は速力と燃料費、さらに遅延による結果も責任を負う。典型的な航海用船契約では、船舶運航者は速力を設定し、同時に港の混雑時の滞船に対する経済的な補償（デマレッジ）の権利も与えられる。港が船舶を処置することができる場合、船舶運航者は新しい貨物を積み込むことができるが、もしできない場合、船舶運航者はデマレッジによって補償される。しばしばデマレッジ料が追加の燃料費よりも高いので、両ケースともに船舶運航者にとってのインセンティブは可能な限り早く到着するために高速で航行する方に作用する。
- 5.27 この結果、効率的な運航に対して柔軟性が損なわれ、最悪のケースでは、非効率な運航を奨励することになる。現行システムの不備な箇所の指摘は容易であるが、全ての当事者が満足するような解決策を見つけ出すのは難しい。実際のところ、海運

界には直接的、間接的に輸送効率に影響を及ぼす多くの関係者が存在する。これらの関係者の利害は多くの契約によって縛られる。運航形態にもよるが以下のような関係者が考えられる：

- .1 船主（裸用船者/運航会社も含む）
- .2 用船者
- .3 複合運送人（MTOs）
- .4 貨物の荷送人及び荷受人
- .5 船荷購買者/売主（輸送を必要とした源泉）
- .6 輸送代理店/仲介者
- .7 港湾局
- .8 ターミナルオペレータ

- 5.28 輸送効率は、港で費やされる時間に影響される。上記関係者以外にも、他の関係者（船会社代理店、港湾作業会社、曳船会社、パイロット、燃料供給会社、その他のサービス供給者）が停船時間の最短化に何らかの形で関与する。

航海の最適化

- 5.29 航海の最適化とは、船長が物流、工程、契約事項による制約あるいはその他の制約の範囲内で達成できる船舶航行の最適化の意味があり、以下のような課題が含まれる。

- .1 エネルギー消費を最小化するための、天候及び海流の観点からの最適航路の選択（ウェザールーティング）
- .2 潮流、待ち行列、風向きを考慮したジャストインタイムの到着。前述のごとく、インセンティブ及び契約条件がこの点で非常に重要である。例えば到着遅延に対する厳格な罰則は船舶側に余裕を見込んだ航海計画を促す。時間待ちのための追加払い（デマレッジ）はジャストインタイム到着のやる気をそぐ。
- .3 バラスト最適化、すなわち不要なバラストの回避。最適バラストの決定は時として難しい思考を要し、航海の快適さと安全性に影響する。
- .4 トリムの最適化—適正トリムの検討及びそれによる運航

- 5.30 航海の最適化によるエネルギー効率の改善ポテンシャルは、船舶が現状どのように運航されているかによって大きく変わり、共通的な判定基準で評価するのは難しい。2000年の船舶によるGHG排出調査報告において、航行中のトリム及びバラストの最適化による船腹の平均改善ポテンシャルは微小と評価された（総燃料消費量の0から1%）[4]。DNVが最近実施したタンカー運航の具体的なケーススタディでは、トリム及びバラストの最適化による改善率は0.6%と算定された。航行時間の大半で相当量のバラストを運ぶような特定の船舶型式であれば、改善率が上がる可能性もある。

- 5.31 ウェザールーティングは、特定の航路を航行する船舶にとっては相当な省エネになる可能性がある。ウェザールーティングシステムは珍しいものではないが、このシステムの改善あるいは普及によって期待される省エネ効果は検討対象とされたことがない。ジャストインタイム到着にかかわる改善ポテンシャルは2000年報告では1から5%と評価された。効率化に逆行する港への到着のやり方を助長する経済的な対価（契約条件からのインセンティブ）に関しては、より大きな省エネポテンシャルが期待される。最近になって、日本の国内船腹ベースでジャストインタイム到着にかかわる省エネポテンシャルが1%であるとの報告があった。
- 5.32 多様な方式のウェザールーティングシステム、技術支援システム、性能監視システム、その他のシステムが最適航海の遂行を達成する補助手段として利用できる。これらのシステムは実際に使いながら理解を深めていくものであるが、同時に乗員の技能とモチベーションが重要となる。効率運航によって乗員が恩恵を受けられるようなインセンティブ制度はモチベーションを向上させる一つの方法といえる。

エネルギー管理

- 5.33 推進に必要な駆動源に加えて、乗員の日常生活（ホテル負荷）あるいはさまざまな補助システム（冷却水ポンプ、換気扇、制御システム、ナビゲーションシステムなど）のための電力が必要とされる。ほとんどの商船は低速での操舵用に横推力装置を装備し、ごく短時間であるがかなりの出力を必要とする。船舶によっては積荷、揚荷時に大出力を必要とする揚重機を搭載したものもある。旅客フェリーおよびクルーザーは客室設備、換気、空調にかなりの電力を要する。旅客の快適さの維持及び飲料水の製造に伴うかなりの熱エネルギーも必要となる。
- 5.34 特定のケースではあるが、貨物の品質を保つために冷却が必要とされる場合がある、すなわち冷凍・冷蔵貨物である。逆に、特殊な原油、重油、ピチューメンのような貨物は加熱を必要とする。このような熱需要に対しては、排ガスの回収熱で発生させた蒸気によってその一部を供給することが可能である。しかし、多くの場合、十分な蒸気を供給するために別の蒸気ボイラが必要となる。排気ガスから回収した蒸気は、航行時は船舶が使用する重油の加熱には十分であるが、停泊中は補助ボイラからの蒸気が必要になる場合がある。
- 5.35 船舶の各システムの最適運転をより意識して実行に移すことによって、船内でのエネルギー消費量の削減が可能である。対応可能な対策として以下が挙げられる。
- .1 エネルギーの不必要な消費の回避
 - .2 発電機の並列運転の回避
 - .3 蒸気プラントの最適化（タンカー）
 - .4 燃料浄化器/分離器の最適化
 - .5 船内 HVAC 運転の最適化
 - .6 エコノマイザー及び他の熱交換器の清掃
 - .7 蒸気及び圧縮空気システムの漏れの検知と修理

- 5.36 これには乗員の訓練並びに動機付け、あるいはエネルギー消費量の標準値の設定及び監視などに対する投資を必要とする場合がある。同時に自動温度制御、流量制御（ポンプ及びファンの自動回転数制御）、自動点消灯などの自動化設備及びプロセス制御系の増強も省エネルギーの手助けとなる。エネルギー管理に関する対策の省エネポテンシャルは、評価が難しい。なぜならそれは、すでにこれまでに、いかに効率よく船舶を運航してきたか及び総エネルギー消費量のうち補助出力の占める比率によって変わるからである。補助出力の10%の省エネは、多くの船舶にとって現実味がある。これは環境にもよるが総燃料消費量の1%から2%に相当する。
- 5.37 主エンジンの最適メンテナンス及び最高効率点の圧力での運転も重要である。平均的なポテンシャルは約1%と考えられるが、チューニングによって主エンジンの燃料消費量の1%から2%の省エネが達成されたという極端な例もある。
- 5.38 船体及びプロペラの清掃も燃料効率にとって重要である。多くの船主が、船体及びプロペラの清掃頻度の増加によって、あるいはコンディションベースの清掃の実施によって、相当量の省エネを達成した。より効果的な船体塗装を実施することによって、船体抵抗を減らし、結果的に入渠間隔を延長する効果が得られる。表面仕上げ、船体塗装、その他摩擦低減策は抵抗を決定する上で非常に重要な要素である。Appendix 1で述べるように、船体塗装及びメンテナンスを適正に実施するだけでもエネルギー消費量で5%の差を生じる場合がある。

再生可能エネルギー源

- 5.39 再生可能エネルギーは、船上で直接使用されるか（風力、太陽光、波力の有効利用による）、あるいはエネルギーを陸上で発生させて水素あるいは電気のようなエネルギー担体に変換することができる。

風力、船上利用

- 5.40 風力は、船舶の駆動力としていろいろな方法で有効に利用することができる。例えば以下の手段で利用する。

- .1 従来型の帆
- .2 固体翼帆
- .3 帆
- .4 フレットナー型回転子

- 5.41 これらの手段は異なる特性を持つ。海域によって風の状態が異なり、そのため風力は特定の海域あるいは航路においては他と比べてより効果的となる。ベルリン工科大学の研究[8]では、3通りの航路を航行する2種類の船舶に設置する3種類の帆がモデル化された。研究目的は、実際の気象データを用いて5年間の省エネ・省燃料ポテンシャルを評価することであった。この研究によれば、南太平洋よりも北大西

洋及び北太平洋の方が帆の省エネポテンシャルが高かった。また省燃料の絶対値では、高速航行時の方がわずかに高く、一方省燃料比率の点では、推進力のトータル需要が低いため低速航行時の方が大きくなった。省燃料比率は15ノットで約5%であったのが10ノットでは約20%に増加した。

- 5.42 風力の推力への利用技術は、大型船に対してはこれまで限定された実績しかなく、モデル計算の結果について検証するのが難しい。にもかかわらず風力のアシスト出力としての利用は中長期的には省燃料技術として可能性があると思われる。

太陽光、船上利用

- 5.43 現在の太陽光発電技術は、甲板全体を光電セルで覆ったとしてもタンカーに必要な補助出力のごく一部をカバーできるに過ぎない。当然、季節や海域によっては、太陽光の輻射量が平均以上となり補助動力需要を満たす可能性もある。ただし、太陽光電力は、いつも利用できるわけではないため（例えば夜間）バックアップ電源が必要である。太陽光電力はそもそもエネルギーの補完的な発生源として関心を集めるものであり、太陽光発電の利用拡大が進んだとしても、今日の技術では総エネルギー需要のわずか数パーセントの供給にとどまる。現状のコスト及び効率では、太陽光発電は費用効果リストの下位に置かざるを得ない[9]。

波力、船上利用

- 5.44 この技術の概念は、波のエネルギー及び船の動きを利用するものである。波力発電の例としては内部方式（ジャイロ式）と波foil、船尾フラップ、あるいは複数の船体間の相対運動（三胴船）などの外部方式がある。波力発電は、技術的な複雑さあるいはエネルギー効率の低さといった課題があり、必ずしも前途有望な技術とはみなされていない。

陸上からの再生可能エネルギー

- 5.45 陸上では、風力発電、水力発電、地熱発電、太陽光発電などが再生可能エネルギーとして考えられる。これらにふさわしいエネルギー担体を利用できれば、このような発生源からのエネルギーを船舶の動力に利用するという可能性もある。しかし陸上でも再生可能エネルギーが不足する限りは、陸上の再生可能エネルギーを船舶の推進力に向けるメリットはほとんどない。明らかな例外として停泊中の陸上電力の利用が考えられる。

燃料サイクル CO₂ 排出の低い燃料

- 5.46 全燃料サイクル（生産、精製、流通、消費）を通じて、トータル排出量が少ない燃料に転換することによって CO₂ 排出量の削減が可能である。改訂 MARPOL Annex VI による硫黄規制でも示唆された残留燃料から留出燃料への転換は、すでに合意済みであり、CO₂ 排出量に対するメリット、デメリットをここで論ずる必要はない。CO₂

排出削減の可能性を持つその他の燃料として、バイオ燃料と天然ガスが考えられる。

バイオ燃料

- 5.47 現状のバイオ燃料（第1世代バイオ燃料と呼ぶ）は、砂糖、でんぷん、野菜油、動物性脂肪から作られる。エンジンに手を加えることなく（或いは小さな改造で）、多くのバイオ燃料が容易に船用ディーゼル機器で使用できる。ただし、原料にもよるが、保管中の安定性、酸化、吸湿（燃料タンク中で生体成長を促す）、フィルタの詰まり、ワックス形成、エンジン沈殿物の増加などの技術課題がある。また、バイオ燃料は、生物付着に特に敏感なため、水との混合を避ける配慮が求められる。バイオ系燃料を少量ディーゼル燃料あるいは重油に混合させることは、技術的な観点からは実現可能である。しかし燃料油との適合性を確認する必要がある[25, 26, 27]。バイオ燃料に関連する技術課題の多くが細かいことのように見えるが、エンジン停止の原因となる可能性もあることに注意する必要がある。船舶のエンジン停止は、例えば車あるいは陸上の固定された燃焼設備よりも安全面でのより重大な問題に発展する可能性がある。第一世代のバイオ燃料は、製油所で改質（水素添加）することが可能である。この場合、改質後の燃料は、高品質で、前述の実用上の問題点はあてはまらない。ただし、改質にはエネルギーが必要で、結果的に排出増となる。
- 5.48 CO₂の正味の削減量は、バイオ燃料の種類によって異なる。全てのバイオ燃料で削減効果があるわけではない[25, 28]。CO₂削減効果は、燃料の製法にも関係し、必ずしも燃料の種類だけで決まるものではない。バイオ燃料は、従来燃料とは異なる燃焼特性を有する。バイオ燃料の使用によってNO_x排出量が7%から10%増えたケースもある。しかしこのようなケースでも、バイオ燃料に対するエンジンの最適化が図られれば、NO_xに対する影響も変わる可能性がある。
- 5.49 第一世代バイオ燃料は、人類の食物連鎖から食物を迂回させ、食糧不足や価格の高騰を招くとして批判されている。付随的な問題点として森林伐採、土壌浸食、水源に対する影響なども挙げられる。バイオ燃料に関する持続性の問題が国連のエネルギー報告書 *Sustainable Biofuels: a framework for decision makers* の中で取り上げられた[29]。
- 5.50 余った非食料穀物、既存の穀物の非食料部（葉、茎）、さらに果物圧搾後の木片、皮、パルプなどの産業廃棄物から製造されたバイオ燃料は、第二世代バイオ燃料と呼ばれ、より持続可能な燃料と考えられる。経済的に成り立つような第二世代バイオ燃料の工業規模での製造を可能にする転換プロセスは、未だ開発途上である。藻を利用したバイオ燃料は、第三世代バイオ燃料と呼ばれることがある。この技術は、現在開発の初期段階にある。
- 5.51 要約すると、船舶によるCO₂排出量に対するバイオ燃料の削減ポテンシャルは、限定的である。これは技術的な理由のみならず、バイオ燃料の製造及び利用する場合のコスト、入手難、その他の要因による。2050年に向けた将来のバイオ燃料の利用可能性をIPCCシナリオと照らし合わせながら第7章で検討する。

液化天然ガス（LNG）

- 5.52 液化天然ガスは海運業界で一つの代替燃料として使用される可能性がある。LNG は油ベース燃料に比べて水素/炭素比が高く、結果的に CO₂ の単位排出量（CO₂ kg/燃料 kg）が低い。加えて LNG は硫黄を含まないクリーンな燃料である。すなわち SO_x の排出がなく、汚染粒子もほとんど排出しない。さらに燃焼中のピーク温度が下がるため、NO_x 排出量が最大 90% 減少する。ただし、残念ながら LNG の使用によってメタン（CH₄）の排出量が増加するため、地球温暖化防止へのネットの貢献度は 25% から 15% 程度に減少する。
- 5.53 LNG 駆動の船舶は、排ガス処理をしなくても Tier III 排出基準及び SO_x 要件を満足するため、排出規制問題に関して特に将来的な期待が大きい。
- 5.54 船用燃料としての LNG が抱える課題の一つとして、船内に確保しなければならない広い保管スペースの問題がある。同じエネルギー含量で LNG はディーゼル油の 1.8 倍の体積を占める。しかも厚肉の圧力タンクはさらに広いスペースを必要とし、実際の必要容積スペースは、ディーゼル油の 3 倍程度になる。さらに給油地の港における LNG 燃料の入手性が LNG を一つの選択肢と考える上での解決しなければならない課題である。ディーゼル駆動から LNG 駆動への転換は可能であるが、エンジンの大改造及びタンク容量の増大に伴うスペース確保が必要となる。そのため LNG 化は、新造船の場合の選択肢との意味合いが強い。
- 5.55 目下のところ LNG 技術は、4 ストロークエンジンにのみ適用可能である。2 ストロークエンジンに対しては、直接吹き込みをベースとする別のガスエンジンコンセプトがより好ましい。また LNG による NO_x 削減効果は、4 ストロークエンジンで使われるプレミクックス希薄燃焼法よりも少ない。
- 5.56 要約すると、現在のところ LNG の補給手段に制約があること、LNG 化は新造の場合の選択肢であることなどの理由によって船舶による CO₂ の排出量に対する LNG の現状の削減ポテンシャルは、やや限界がある。来るべき NO_x 及び SO_x ECA の導入拡大によって、短い航海における LNG による推進システムの利用に対する新たな意味あるインセンティブが与えられると思われる。なぜなら ECA 要件は、LNG 推進船であれば容易に満足されるからである。LNG の価格は、現在留出油よりも十分安いので、LNG 化に対する経済的なインセンティブにもなる。

排出削減テクノロジー

- 5.57 様々な排出削減テクノロジーの利用が考えられる。化学変換によって排ガスから CO₂ を除去することも可能ではあるが、採算性があるとは思えない。確かに本調査報告が対象とする汚染物質のリストを考えると、排出削減技術は大部分が排ガス中の汚染物質、すなわち NO_x、SO_x、PM、CH₄、HNVOC との関連が深いことが分かる。排出削減のこれらのテクノロジー的なオプションについては、Appendix 2 で検討するものとし、ここでは短い紹介にとどめた。

NO_xに対する排出削減オプション

- 5.58 ディーゼルエンジンからの NO_x 排出量は、以下のように多くの手段によって削減できる。
- .1 燃料の改質、例えば水エマルジョン
 - .2 給気の改質、例えば加湿、および排ガス再循環（EGR）
 - .3 燃焼プロセスの変更、例えばミラータイミングの変更
 - .4 排ガス処理、例えば選択触媒還元（SCR）
- 5.59 燃料の硫黄含有量及び及び沈殿形成性は、排ガス再循環（EGR）あるいは選択触媒還元（SCR）などの排出削減技術の実現性に影響する。水の消費量及び純度は、水を使うすべてのオプションにかかわる問題である。
- 5.60 NO_x の排出量が減る時には CO₂ と PM の排出量が増えるといったようにある種の相殺関係が存在する。これは必ずしも、NO_x の排出レベルをより低くした将来のエンジンが現状モデルよりも CO₂、HC、CO、PM の排出レベルが高くなるはずだということを意味するものではない。[5]で実証されたように複数の領域で同時に改善することが可能である。残る課題は、もし改善されたエンジンを再度最適化する場合に、NO_x と他の汚染物質との相殺が生じるかもしれないということである。ミラーサイクルは 2 段ターボチャージャーと組合せた結果、4 ストロークエンジンにおいて、NO_x 排出量を 40% 強削減し、燃費も改善した[5]。
- 5.61 燃料としての LNG の使用は、燃料転換であると同時に燃焼プロセスの変更でもある。LNG 運転は 4 ストロークエンジンにおいて大幅な NO_x 削減（最大 90%）をもたらす可能性がある[10]。大型 2 ストロークエンジンに対する NO_x 排出削減ポテンシャルは確認されていない。LNG の燃料としての使用については 5.52 項から 5.56 項で取り上げた。
- 5.62 Tier II NO_x 規制、すなわち現状レベルから 15% から 20% の削減は、内部燃焼プロセスの変更によって達成される。現在のところは、Tier III 規制値（Tier I から 80% 削減）までの NO_x 排出削減は、選択触媒還元（SCR）後処理、あるいは LNG を使った希薄プレミックス燃焼によってのみ達成可能である。これらの技術は 4 ストロークエンジンに対しては実証されている、しかし大型 2 ストロークエンジンでの実績は限定的である。
- 5.63 SCR 及び LNG 技術を用いれば、負荷ポイントによっては Tier III 限界以上の排出削減の達成も可能である。ただし、低速域でのさらなる削減の達成は、SCR では原理的に解決が難しい。何故なら船用エンジンからの排ガス温度は、触媒の効率的な運転に必要な高い温度レベルにないからである。非常に低いレベルまで排出削減を長期にわたり安定して達成しようとする、触媒の非活性化という問題点が露見する可能性がある。船用エンジンにおける低負荷での NO_x 排出削減技術が、現在、改訂 NO_x Technical Code の改正された Tier III 試験サイクルの要件によって IMO から強く要請されている。

SO_xに対する排出削減オプション

- 5.64 SO_xの排出は、燃料の炭化水素と化学的に結合された硫黄がその発生源である。燃料が燃えるときに、硫黄が酸化されてSO_x（主にSO₂）になる。SO_x排出量を削減するためには硫黄含有量が低い燃料を使うか、燃焼過程で形成されるSO_xを除去する必要がある。
- 5.65 改訂 MARPOL は、燃料の硫黄含有量を規制することによってSO_x排出削減を保証するものである。低硫黄燃料使用の代案として、排ガススクラバシステムの採用によって二酸化硫黄（SO₂）の排出レベルを下げるができる。二つの基本形がある。すなわち、開ループ海水スクラバと閉ループスクラバである。両方式ともにPM及び限られた量ではあるが、NO_xの除去が可能である[16, 17]。排ガスの洗浄にはエネルギーが必要で、それはMCRの1%から2%の範囲であると推定される[18]。
- 5.66 SO_xを除去するための洗浄は、排ガス温度を下げる。一方で、SCR技術は、排ガスの高温を必要とし、同時に排ガス中の硫黄とPMの含有量を下げる。SO₂を下げるためにSCRと排ガス洗浄を組合せることは可能性がないと判断される。
- 5.67 排ガスから除去された汚染物質はスクラバ排水中に混入して運ばれる。硫黄酸化物は、海水と反応して一般の海水中に豊富に存在し大抵の海域では環境に無害と思われる安定した化合物を形成する。一方で、海水中に捕獲された排ガス中の粒子状物質は環境に有害な可能性がある。IMO Scrubber Guideline 改訂版[31]は、多環芳香族炭化水素（PAH）、濁度、pH、硝酸塩及びその他の物質の規制などを盛り込んだ排水規定を定めた。排水の放出に対する寄港国の要求は、海水スクラバの使用に対して重大な影響を持つ。この要件を満たすためには、排水を浄化する処理システムが必要になる。一般的には、スクラバによって排ガスから除去されるSO_x及びPMの量が多いほど、排水から除去すべき汚染物質が増える。

PMに対する排出削減オプション

- 5.68 化学的に定義される他の排出物と異なり、粒子状物質（PM）は国際標準（ISO 8178）においてしかるべき条件でフィルタに捕捉される塊として定義される。しかし、PMの塊と定義するだけで、PMの化学組成及び粒度分布は定義しない。これらは健康にとって、また環境的な影響において重要である。
- 5.69 粒子状有機物質（POM）が発生する度合いは、エンジン潤滑油の消費量と相関性があり、基本的には抑制が可能である。潤滑油のベース成分と添加物の変更によってPMの質量を減らすことができる。元素状炭素の排出量は、燃焼中に形成される煤煙の量と関係し、その内のいくらかは除去できる。このように有機物質及び元素状炭素の発生量は、燃料とは無関係と考えられる。硫酸塩及び付随する水分、灰分の量は、主に燃料によって決まる。燃料中の硫黄含有量が高い場合、硫酸塩系のPM排出量は、燃料依存性を示し、他のPM濃度は比較的依存性が薄い。燃料の硫黄含有量が低くなると、燃料非依存性PMはいっそう目立たなくなる。

- 5.70 高硫黄燃料を使用した場合、排出される PM の中には海水洗浄によって排出量の削減が可能なものもある。その場合の PM レベルの減少ポテンシャルは文献によって 90% から 20% の範囲のばらつきがある[16, 17]。低硫黄燃料を使用した場合も、PM の排出量は、煤煙並びに PM の酸化を促進させるような燃焼の最適化、潤滑油消費量の最少化、潤滑油添加物使用量の最少化によって、さらなる削減が可能である。燃料を水エマルジョン化させ、それを燃焼させることによっても PM 排出量をある程度まで削減することができる。
- 5.71 自動車分野で開発され、利用されている後処理技術、例えば微粒子トラップは硫黄分が多い船用燃料には適した技術とは考えられない[18]。SECA において使用が認められる 0.1% という将来の燃料中の硫黄含有量でさえも、EU 域内の自動車用ディーゼル燃料の現行規準の 100 倍のレベルである。

CH₄ 及び NMVOC に対する排出削減オプション

- 5.72 エンジン排ガスによるメタン (CH₄) 及び NMVOC の排出量は、比較的少ない。燃焼プロセスの最適化によっていくらかの削減が期待できる。NMVOC は触媒による酸化も可能である。酸化触媒と SCR 装置との併用は、珍しい組合せではなく、未利用のアンモニアを酸化してその排出を抑える。ただし、触媒を使用しても排ガス中の CH₄ レベルを下げるのは難しい。
- 5.73 ガスエンジンからの CH₄ 排出は、プレミックス燃焼による未燃メタンの発生によるものである。CH₄ の排出レベルは、燃焼室の設計に依存する。隙間を生じないように設計することによって排出量が相当削減される。しかしそれでもあるレベルの排出量が残る。NMVOC の場合ほど単純ではないが、残った CH₄ は、触媒によって酸化が可能である。この問題は、研究開発的な課題といえる。
- 5.74 ガスエンジンからの CH₄ 排出は、希薄プレミックス燃焼の概念を高圧ガス吹き込みで置き換えることによってほぼ除去できる。後者のコンセプトは、大型 2 ストロークエンジンに対しては効果があると確信されている。このオプションの弱点は、希薄プレミックス燃焼に比べて直接吹き込みによって達成される NO_x の排出削減量が少ないことである。

HFC 並びに他の冷媒に対する排出削減オプション

- 5.75 HFC の排出は、冷凍設備の運転及びメンテナンス中の漏れによって起きる。漏れを少なくする技術的対策として、腐食、振動、応力に対して耐久性を持たせる設計、冷媒補充量の最少化 (間接冷却法) による漏れた場合の影響緩和、漏れを遮蔽する配管スペースの区切りなどが挙げられる。メンテナンス中に安全、かつ不必要に面倒でない回収作業を可能とする装置の開発も重要である。運転面の対策としては、計画的なメンテナンス、漏れの防止及び検出のための冷媒消費量の監視などが挙げられる[19, 20]。

排出削減ポテンシャルの評価

CO₂ 排出削減ポテンシャル

- 5.76 効率改善のための多くのオプションがこれまでの各項で取り上げられた。これらのオプションを組み合わせた場合の省エネポテンシャルは非常に大きなものとなる。一方で、コスト、インセンティブの欠如、その他障壁の存在などによって多くのオプションの採用が見送られる。省エネポテンシャルに対する評価を下すに当たって、われわれは妥協、取り組み方、さらに費用の増大の程度に関して、暗黙の仮定をおいた。これまでに説明した技術オプション及び運航オプションを実行した場合の省エネポテンシャルの評価を表 5-2 に示す。表中の数字の範囲は、船種の違い及び削減義務の程度によるポテンシャルのばらつきを表す。
- 5.77 将来の効率改善に関する予測は、第 7 章で述べる将来の排出シナリオでおこなった。表 5-2 に示された高い方の数値は、省エネ効果が最も高い改善を実施する場合のシナリオにかなり一致する。そのシナリオでは、2050 年のネットの改善率は低カーボン燃料オプション分を含まないで、船種によって 58%から 75%まで変動した。船種別効率のこれまでの推移と今後の推移予測を図 5-1 に示す。これまでの効率の推移の背景については第 9 章で説明する。

表 5-2 既知の技術オプション及び運航オプションを実施した場合の
海運からの CO₂ 排出削減ポテンシャルの評価

DESIGN (New ships)	Saving (%) of CO ₂ /tonne-mile	Combined	Combined
Concept, speed & capability	2-50 ⁺	10-50% ⁺	25-75% ⁺
Hull and superstructure	2-20		
Power and propulsion systems	5-15		
Low-carbon fuels	5-15*		
Renewable energy	1-10		
Exhaust gas CO ₂ reduction	0		
OPERATION (All ships)		10-50% ⁺	
Fleet management, logistics & incentives	5-50 ⁺		
Voyage optimization	1-10		
Energy management	1-10		

+ このレベルの削減には船速の低下を必要とする

* LNG 利用前提での CO₂ 換算

効率改善の推移

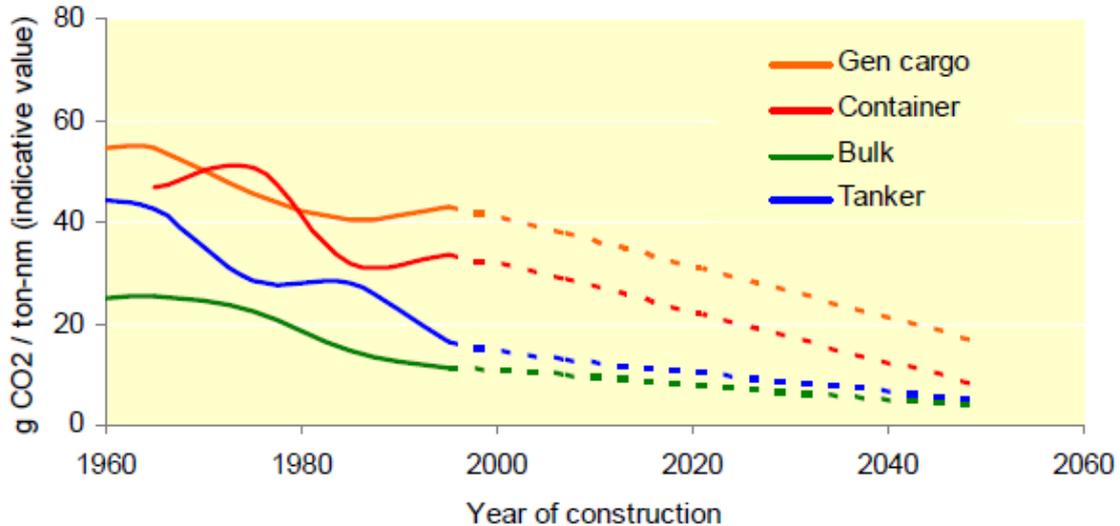


図 5-1 これまでの効率の推移及び最大効果シナリオによる今後の推移予測

- 5.78 削減ポテンシャルに関する別の観点は、限界削減コストカーブ（MACC）による見方である。そこでは、各対策のコストを弾き出し、それを表 5-2 に示した削減ポテンシャルに情報として追加する。こうして算定された費用効果に対して、MACC は達成可能な最大削減量をプロットしたものである。最も費用効果が高い削減対策が最初に実施されると仮定すると、次点のオプションはコストに対して効果がより少なくなる。例えば、船体の設計変更によってエネルギーを 5%削減し、プロペラの設計変更によって 3%の削減を達成するとすれば、両方を実施した場合に必ずしも 8%の削減が得られるものではない。MACC は実施済みのオプションによる削減を常に前提として、次のオプションの CO₂ トン当たりの排出削減コストを考える[22]。
- 5.79 MACC は、ある排出削減量を達成するためのコスト、あるいは税金や課徴金の環境面での効果などに関して、政策決定者の判断材料になり得るものである。しかしながら、MACC がある政策に対して考えられる全てのリアクションを表現できるわけではないことに注意すべきである。例えば、需要変化に及ぼす影響などは考慮されないため、施策に伴うコスト分析を完全に実施するためには経済モデルを使わなければならない。
- 5.80 MACC カーブの作成は、データ収集の観点からは非常に厳しい作業である。海運業における排出削減対策の費用効果のデータが皆無に近く、今回の MACC はまさにこれに該当する。この調査報告では、ごく一部の対策（25 の対策）が MACC に取り込まれた。いくつかの対策を取り込まなかった理由は、データの関連性ではなく、入手の困難さであった。にもかかわらず、相当数のオプションを取り込み、コスト及び排出削減ポテンシャルに関して世界船腹に対する意味ある指標とすることができた。対策の対象を適正に選択すれば、排出量の削減ポテンシャルは拡大する。ここでは取り上げなかった対策のいくつかがすでに実施されており、費用効果の高い排出削減ポテンシャルがさらに拡大すると予測するのが妥当である。

5.81 大部分のオプションについてコスト及び削減ポテンシャルを一つの値で推定するのは不可能であるため、単一の値ではなく、範囲として提示することとした。個々の手続の費用効果について、前提条件、データ、特記事項を Appendix 4 に示した。CO₂ の MACC を図 5-2 に示す。このカーブを考察する場合、以下の点に留意する必要がある。

- .1 この曲線は社会的な観点で作成した。言い換えれば、排出削減が世界経済に対してかける負担を示すものだ。海運会社が排出削減のために負担する費用を表わすものではない。
- .2 今回の評価モデルは、船腹平均の削減ポテンシャル及び対策の費用効果を評価するものだ。船種によっては非常に費用効果の高い対策であっても、世界中の船腹に適用すると高いコストがかかる場合がある。そのような場合、このグラフでは費用効果が高いようには見えない。
- .3 このモデルは、一部の改善オプションを取り込んだ。オプションを多く取り込むほど、トータルの削減ポテンシャルは増加する。
- .4 削減ポテンシャルの最大値は、2020 年の世界船腹において達成可能となる。これは表 5-2 との直接的な比較はできない。さらに、特定の対策の利用が限定されるといった市場的な制約は考慮されていない。
- .5 オプションによってはコストがマイナスになり、採用した方が得になるケースもある。ただし、その実施を妨げる非財政的な障壁があるかもしれない。あるいは社会的な観点からは費用効果が高いが、海運会社の観点からはそうでない可能性もある。
- .6 一般的に公定歩合が引き上げられると、投資による返済コストが増加してカーブを上方にシフトする（費用効果を下げる）
- .7 一般的に燃料価格が上昇すると、節約される燃料の観点からは対策による恩恵を増やし、カーブを下方にシフトする（費用効果を押し上げる）
- .8 2020 年の最大削減ポテンシャルは、CO₂ 換算で 210 百万トンから 440 百万トン、すなわち A1 シナリオ群での予想排出量の約 15%から 30%に相当する。

2020 年の CO₂ 限界削減コストカーブ (燃料価格 500 \$/ton)

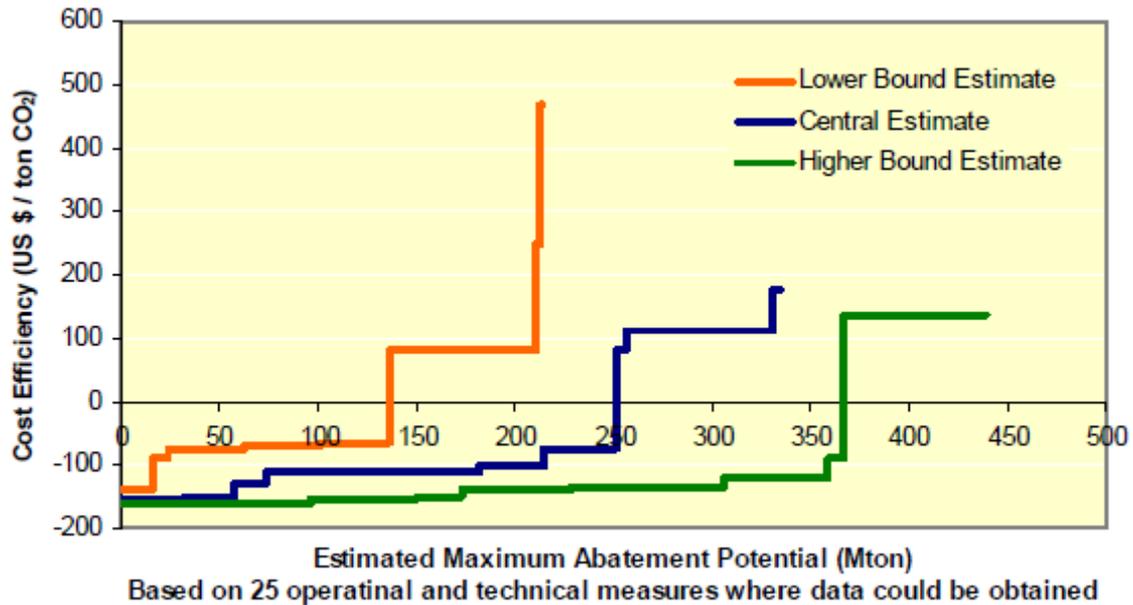


図 5-2 2020 年の CO₂ 限界削減コストカーブ

(データの利用が可能な 25 の技術対策と運航対策を取り込んだ)

その他の GHG の排出削減ポテンシャル

- 5.82 海運からの排出量が気候に及ぼす影響の詳細な解析は第 8 章で取り上げる。多少とも単純化すれば、船舶から排出される個々の温室効果ガスの相対的な重要性は、それらの地球温暖化係数 (GWP) によって表示される[21]。2007 年をベースとした 100 年の視野での GWP の比較を表 5-3 に示す。この表では、CO₂ が船舶によって排出される GHG のうちもっとも重要度が高く、それに比べると他の GHG の排出削減ポテンシャルは小さいことがわかる。
- 5.83 排ガスによる N₂O 及び CH₄ の排出量は、エネルギー消費量に比例した削減が可能である。従って、表 5-2 に示す削減ポテンシャルは、これらの排出量にも適用できる。ただし、CH₄ の排出量の一部は、原油の輸送及びハンドリングから発生し、これらの排出量は、船舶効率を改善しても削減されないことに注意されたい。HFC の排出は、漏れによるものであり、達成は難しいが HFC の理論的な排出削減ポテンシャルは、非常に高い。

表 5-3 船舶による GHG 排出の相対的な重要性 (2007 年)

	million tonnes	GWP	CO ₂ equivalent	GWP %
CO ₂	1054	1	1054	98%
CH ₄	0.24	25	6	0.6%
N ₂ O	0.03	298	8	0.7%
HFC *	0.0004	1300	0.5	0.6%
SF ₆	0	23900	0	0
PFC	Negligible	6500–9200	Negligible	Negligible

* GWP 値は HFCs の種類によって大きく変動する。冷媒 HCFC-22 が船上でもっとも一般的に使用される冷媒である。そこでこの表の計算ではその GWP 値を使用した。

その他の関連物質の削減ポテンシャル

- 5.84 排ガス中のその他関連物質 (NO_x、SO_x、PM、CO、NMVOC) の排出量は、航行時のエネルギー効率の向上とともに減少する。そこで、表 5-2 に示した削減ポテンシャルは、これらの排出にも適用できる。ただし、原油の輸送および積荷・揚荷によって発生する NMVOC の排出比率は、エネルギー効率には影響されない。5.84 項から 5.90 項ではエネルギー効率改善以外の削減ポテンシャルについて検討する。
- 5.85 改訂 Annex VI の実施によって要求あるいは期待される排出削減量を表 5-4 に示す。この削減ポテンシャルは、燃料の硫黄含有率が 2.7%、PM 濃度が 7.53 項及び 7.54 項の値とするとの前提で算定した。

表 5-4 改訂 Annex VI の実施による最大排出削減量

	Global	ECA
NO _x (g/kW·h)	15–20%	80%
SO _x * (g/kW·h)	80%	96%
PM (mass) ⁺ (g/kW·h)	73%	83%

* 燃料中の硫黄含有率を 2.7%とした場合の削減量

⁺ 燃料転換による推定削減量

NO_x

- 5.86 Tier III 規制値 (Tier I から最大 80%削減) に到達する NO_x 排出削減は、今のところは、SCR 後処理法あるいは LNG を使用した希薄プレミックス燃焼によってのみ達成可能である。これらの技術は、4 ストロークエンジンでは実績があるが、大型 2 ストロークエンジンでの実績は限られる。現状のエンジンに対してエネルギー効率の改善と CO₂ 排出削減対策を同時に実行した場合、4 ストロークエンジンでの削減効果は、Tier I からは 40%から 50%程度の削減である[5]。

5.87 SCR 及び LNG 技術を活用すれば、高負荷運転時には Tier III 規制を超える排出削減が可能である。しかし、低負荷時のさらなる削減及び長時間の安定した削減は、より困難である。さらに 2 ストロークエンジンの削減ポテンシャルは、報告例が少ない。そのため NO_x 排出削減の第 1 歩は、ECAs を拡大あるいは新規に設定し、世界全体の NO_x 量を減らすことであろう。ECAs 対象海域の拡大による削減ポテンシャルは、算定しなかった。

SO_x 及び PM

5.88 改訂 MARPOL Annex VI では、表 5-4 に示すように SO_x 及び PM についても然るべき削減が要求されている。個々の船舶からの SO_x 排出量を削減する可能性については、あまり議論の対象とならなかったが、この排出規制が世界中の船腹に適用された場合の CO₂ 排出に与えるトータルの影響に関しては、専門家の中で議論があった。さらなる削減のポテンシャルを検討する場合も同様のことがいえる。技術的には、船舶の観点からは、硫黄分のさらなる削減は、明らかに実現可能である。確かに燃料中の硫黄含有量を下げるとはエンジン自体にもメリットがある。しかし、燃料の別の特性（例えば、潤滑性、点火性、燃焼性などの）もエンジンの性能にとっては重要な要素である。船用燃料の最大硫黄含有量の低減を求めると、船用エンジンが異なる成分を使ってこれまでと異なる方法で混合される原因となる。それは燃料の他のパラメータに対してプラスマイナス両方向に影響する。以上のように今後船用燃料に対しては、より包括的かつ厳格な仕様が求められる。

5.89 SO_x 及び PM の排出量を表 5-4 のレベル以下にするスクラバー技術を利用した削減ポテンシャルが報告された。LNG のような代替燃料もまた SO_x 排出レベルを下げるができるが、そのような燃料は、一部の船腹に対してのみ可能性があると考えなければならぬ。LNG の船用燃料としての将来の適用の可能性は、第 7 章で検討する。ECA 海域の拡大による SO_x の排出削減ポテンシャルは、算定しなかった。

CO 及び NMVOC

5.90 一酸化炭素及び NMVOC は、不完全燃焼の副産物である。これらの排出量は NO_x 排出量とある相殺関係にあり、SCR を除く NO_x 削減技術は、これらの排出量を増やす傾向にある。これらの排出量の一般的なレベルは 0.1 g/kWh から 0.3 g/kWh と非常に低く、それ以上の削減に対しての取り組みは、ほとんどなされていない。

まとめ

5.91 5.91 項から 5.94 項では、海運業界からの温室効果ガス及び関連物質の排出量を削減する可能性を有するオプションについて技術面からの考察をおこなう。船舶による排出量の削減オプションは、原則的には 4 種類の基本カテゴリーのいずれかに入る。

- 1 エネルギー効率の改善。すなわち同じエネルギー消費量でより有効な仕事をする。これは船舶の設計及び運航の両方に当てはまる。

- 2 再生可能エネルギーの利用。例えば風力あるいは太陽光。
- 3 単位仕事量当たりの燃料サイクル総排出量が少ない燃料の使用。例えばバイオ燃料あるいは天然ガス。
- 4 排出削減テクノロジーの活用。すなわち化学的な転換、捕捉、貯蔵、その他オプションなど

- 5.92 表 5-2 に示したような各オプションの組合せによる省エネポテンシャルは、非常に重要な意味を持つ。ここで説明した技術オプション及び運航オプションを組合せて適用すれば、船種及び妥協の程度にもよるが、船舶のエネルギー効率を 25% から 75% 改善できると評価する。
- 5.93 風力、太陽光などの再生可能エネルギーは、補助的な駆動源としてであれば船上で利用可能である。しかし、風力あるいは太陽光の稼働時間、安定性、現状の利用技術などの理由から、再生可能エネルギーによる総エネルギーに対する供給比率は、限定的である。
- 5.94 LNG は、NO_x、SO_x、PM などの排出削減と同時に CO₂ 換算排出量の削減にも効果がある船用燃料である。入手しやすい地域では、LNG は留出燃料に比べて安価な燃料として存在価値を示すものと期待される。両者の組合せは、特に ECA 域内での将来の利用という点で関心を集めている。排出削減テクノロジーは、SO_x、NO_x、PM の排出削減に適用可能である。

参考文献

1. Bertram, V. and Schneekluth, B. 1998. *Ship Design for Efficiency and Economy*. Second edition. Butterworth Heinemann. ISBN 0-7506-4133-9 (978-0-7506-4133-3).
2. Wijnholst, N. and Wergeland, T. 2009. *Shipping Innovation*, IOS Press. ISBN 978-1-58603-943-1.
3. Brett, P.O., Boulougouris, E., Horgen, R., Konovessis, D., Oestvik, I., Mermiris, G., Papanikolaou, A. and Vassalos, D. 2006. "A methodology for logistics-based ship design". 9th International Marine Design Conference (IMDC'06), Ann Arbor, Michigan, USA.
4. IMO. 2000. Study of Greenhouse Gas Emissions from ships. MEPC 45/8.
5. Tanaka, Y. 2003. "Economical speed and life cycle value of ship". 4th Japan Towing Tank Conference, The Society of Naval Architects of Japan.
6. Wik, C. and Hallback, B. 2007. "Utilisation of 2-stage turbo charging as an emission reduction means on a Wärtsilä 4-stroke medium-speed diesel engine". CIMAC paper 101; Proceedings of the 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, Wien, Austria, 21-24 May 2007.
7. Buhaug, Ø., Halvorsen, E., Brembo, J.C., Nilsen, J. and Hawkes, R. 2006. Flagship D-B1.1 Influence of external factors on the energy efficiency of shipping. EU IP TIP5-CT-2006-031406.
8. Clauss, G.F., Siekmann, H. and Tampier B., G. 2007. "Simulation of the operation of wind-assisted cargo ships". 102 Hauptversammlung der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 21-23 November 2007, Berlin.
9. Eide, M., Endresen, Ø., Skjong, R., Longva, T. and Alvik, S. 2009. "Cost-effectiveness assessment of CO₂-reducing measures in shipping". Submitted to Maritime Policy & Management.
10. Einang, P.M. 2007. "Gas-fuelled ships". CIMAC paper 261; Proceedings of the 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, Wien, Austria, 21-24 May 2007.
11. Bergh, O. 2006. NO_x verifikasjon, B/F "TRESFJORD" MARINTEK report MT28 F06-010.
12. Maeda, K., Takasaki, K., Masuda, K., Tsuda, M. and Yasunari, M. 2004. "Measurement of PM emission from marine diesel engines". CIMAC paper 107; Proceedings of the 24th CIMAC World Congress on Combustion Engines, Kyoto, Japan, 7-11 June 2004.
13. Okada, S., Senda, J., Tsujimoto, K. and Kitagawa, K. 2007. "Physical characteristics of particulate matter emission from medium-speed marine diesel engine". CIMAC paper 59; Proceedings of the 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, Wien, Austria, 21-24 May 2007.
14. Wall, J.C. and Hoekman, S.K. 1984. "Fuel composition effects on heavy-duty diesel particulate emission", SAE Technical paper series 841364.

15. Kurok, C., Pawils, V., Brumm, H. and Götze, H.J. 2007. "Emission of particulate matter from marine diesel engines", presentation at IMO BLG WGAP2, Berlin 2007
16. Ives, R. and Klok, S. 1993. "Exhaust gas sulphur removal by sea water washing, marine diesel engines". Paper D58; Proceedings of the 20th CIMAC World Congress on Combustion Engines, London, UK, 17–20 May 1993.
17. Bak, F. 2007. "The influence of a SO_x abatement plant on diesel engine emissions". CIMAC paper 99; Proceedings of the 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, Wien, Austria, 21–24 May 2007.
18. CIMAC 2008. "Guide to diesel exhaust emissions control of NO_x, SO_x, particulates, smoke and CO₂ – seagoing ships and large stationary diesel power plants, 2008". CIMAC Recommendation 28. www.cimac.com
19. Schwarz, W. and Rhiemeier, J. 2007. The analysis of the emissions of fluorinated greenhouse gases from refrigeration and air conditioning equipment used in the transport sector other than road transport, and options for reducing these emissions. Maritime, Rail, and Aircraft Sector.
20. Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee (RTOC), United Nations Environment Programme. 2006 RTOC Assessment report. <http://ozone.unep.org/teap/Reports/RTOC/index.shtml>
21. Shine, K.P., Fuglestad, J.S., Hailemariam, K. and Stuber, N. 2005. "Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases". *Climatic Change*, 68, 281–302.
22. Longva, T., Eide, M.S. and Skjong, R. 2009. "A cost-benefit approach to determining a required CO₂ index for future ship designs". Submitted to *Environmental Science & Policy*.
23. Vallentin, D. 2008. "Driving forces and barriers in the development and implementation of coal-to-liquids (CtL) technologies in Germany". *Energy Policy*, 36(6), 2030–2043.
24. Einang, P.M., "Gas-fuelled ships". CIMAC paper 261; Proceedings of the 25th CIMAC World Congress on Combustion Engine Technology, Vienna, Austria, 21–24 May 2007.
25. Opdal, O.A. and Fjell Hojem, J. "Biofuels in ships: A project report and feasibility study into the use of biofuels in the Norwegian domestic fleet", ZERO report 18 December 2007.
26. Ollus, R. and Juoperi, K. 2007. "Alternative fuels experiences for medium-speed diesel engines". CIMAC paper 234; Proceedings of the 25th CIMAC World Congress on Combustion Engine Technology, Vienna, Austria, 21–24 May 2007.
27. Matsuzaki, S. 2004. "The application of the waste oil as a bio-fuel in a high-speed diesel engine", Proceedings of the 24th CIMAC World Congress on Combustion Engine Technology, Kyoto, Japan, 7–11 June 2004.
28. "Energy and greenhouse gas balance of biofuels for Europe – an update". CONCAWE Ad Hoc Group on Alternative Fuels. Brussels. 2002. <http://www.concawe.org/DocShareNoFrame/docs/1/LDHHJOAAEHLEHNCOKCFLBMBEPDBY9DBYW69DW3571KM/CEnet/docs/DLS/2002-00213-01-E.pdf>
29. UN-Energy. "Sustainable Biofuels: a framework for decision makers", April 2007, <http://esa.un.org/un-energy/pdf/susdev.Biofuels.FAO.pdf>
30. IMO 2008. Ship Efficiency Management Plan. MEPC 58/INF.7.
31. IMO 2008. "Guidelines for exhaust gas cleaning systems" MEPC.170(57). http://www.imo.org/includes/blastDataOnly.asp/data_id%3D22480/170%2857%29.pdf
32. The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers Conference Proceedings, Vol. 5W, 2007. "A study of energy-saving navigation planning considering weather forecast data".
33. Takashima, K., Kano, T. and Kobayashi, M. 2008. "Energy saving operation for coastal ships based on precise environmental forecast". *The Journal of Japan Institute of Navigation* Vol. 118, 99-106

第 6 章 GHG 及び関連物質削減のための施策オプション

はじめに

3.14 船舶による将来の排出シナリオが本調査報告書の第 7 章で示される。このシナリオによると、海運による GHG 排出量は将来主として輸送需要の拡大のため増加する。第 3 章で、海運が排出する GHG のうち CO₂ がもっとも重要度が高いことが分かった。そこでこの章では CO₂ の排出削減を重点的に取り上げる。第 8 章では気候への影響について述べるが、そこでは将来の海運による排出を地球規模で考える。将来の船舶による CO₂ 排出シナリオを地球全体の CO₂ 排出量と比較するが、この地球全体の CO₂ 排出量は将来気温を 2°C 上昇させるといわれている。海運による CO₂ 排出は、そのシナリオで予測した削減量以上の削減が必要とされることがこの比較でわかった。排出削減のために実施可能な技術的な対策と運航面の対策を第 5 章で示した。対策のいくつかはコストが高いため、その実施をサポートする施策が必要である。ここでは、排出削減のために適用が可能と思われる施策オプションを分析する。

3.15 この章は以下の構成とした。6.4 項から 6.33 項では、この課題に対する IMO の取り組みの経緯と現状について説明する。6.34 項から 6.47 項では施策オプションの分析方法の概要を示し、6.48 項から 6.71 項では分析対象となるオプションの施策設計を説明する。6.72 項から 6.130 項では、施策オプションの判定基準を示し、定性的な分析結果を提示する。最後に 6.131 項で結論を述べる。

3.16 この章の全体的な背景に関連する情報は第 2 章で提供した。主たる背景には、国連気候変動枠組み条約（UNFCCC）の紹介、京都議定書 2.2 条項の文言に対する解釈の違い、海運業における規制及び法体系の概要などがある。

IMO 内の進捗及び現状の議論

3.17 1997 年の MARPOL 総会は「船舶による CO₂ 排出」に関する決議を採択し、IMO に対して、船舶による GHG 排出量に関する調査を実施し「実行可能な GHG 排出削減戦略」を検討するよう要請した。MEPC はその調査を委託し、2000 年に調査が完了した。この調査報告では、船舶による温室効果ガス排出量を検討し、さらに各種の技術手段、運航手段、市場手段による排出削減の可能性を提示した。

3.18 船舶による GHG 排出の問題に対するさらなる取り組みとして、IMO 総会は「船舶による温室効果ガスの削減に対する IMO 方針とその実施」に関する決議 A.963(23)を採択した（2003 年 12 月）。その内容は以下のとおり。

- 1 国際海運による GHG 排出量の制限または削減に必要なメカニズムを特定し、それを構築するよう MEPC に要請する。そのために、とりわけ以下を優先させる。
 - GHG 排出ベースラインの設定
 - 船舶による GHG 排出量の指標化との観点から船舶の GHG 効率を計算す

る方法の開発。GHG 排出指標スキームの開発に当たっては、CO₂が船舶の排出する主要温室効果ガスであることに留意する。

- GHG 排出指標スキームを実施する際のガイドラインの策定。例えば検証方法などを規定する。
- 排出削減を達成する技術手段、運航手段、市場手段の評価

6.6 この課題に対応した MEPC 内の広範囲な作業の結果を以下のセクションで簡単に説明する。6.7 項から 6.12 項では GHG 排出量のベースラインの設定に向けた進捗を説明する。6.13 項から 6.28 項では、船舶の GHG 係数を表現する方法に焦点をあてる。6.29 項と 6.30 項では、GHG 排出指標スキームを現実的に適用する場合のガイドラインの開発について述べる。6.31 項は、6.48 項から 6.71 項でも取り扱われるが、技術的対策、運転面の対策、市場ベースの対策の評価について説明する。

GHG 排出ベースラインの設定

6.7 GHG 排出ベースラインに関して、決議 A.963(25)では、船舶による総排出量の推移を把握するため、ある年の CO₂ 総排出量を全体のベースラインとして設定するよう求められた。合わせて同決議では、国際貿易に従事する船舶の GHG 排出量の報告に関し、その算定方法についても検討するよう MEPC に要請があった。

6.8 海運活動に対するベースラインの設定は、MEPC にとってはかなりの難題である。なぜなら、ベースラインの対象範囲に船籍による制限を設ける、設けない、という争点がある。すなわち IMO の基本原則である「特別待遇をしない」ではなく「共通だが差異ある対応」の原則を国際海運による GHG スキームに適用すべきか否かという疑問が未解決のまま残されている。

6.9 さらにこのようなベースラインの設定には方法論的な難しさがある。これは、本調査報告書の第 3 章及び Appendix 1 における検討においても明らかである。その検討では、現在利用可能な統計データは船用燃料消費量を過小評価する傾向にあると、あえて結論付けた。今回の調査報告書の排出インベントリは、2007 年の船舶の活動基準による予測をベースとした。第 3 章で分かったように、この予測にはかなりの不確かさが含まれる。今回の調査報告では、2007 年以前の年間排出量の推移予測は、Fearresearch による海上貿易量の推移予測に基づいた。今回の調査報告での可能な選択肢の中ではこれがベストであると思われるが、将来の排出量を予測する場合、目標達成の成否の判定には極力直接的な活動データを利用するとの方針があり、Fearresearch のデータを使って将来の排出量を予測するというのは不適切と思われる。

6.10 本報告書の第 3 章及び Appendix 1 は、当該年の排出量を設定するために船舶活動量を使用した範例であり、さまざまな干渉や経済情勢の下で将来の排出量を予測するために説得性のあるシナリオドライバーを使うという方法を実際に示したものである。ベースラインの設定はこの後のセクションで説明する施策オプションの重要な要素であり、適切な選択といえる。

- 6.11 さまざまな船種が実際に海上を航行する日数は、不確かさの最大要因となる活動基準インベントリのパラメータである。船舶長距離識別システム (LRIT) によって、活動基準ベースラインに好都合な船舶活動の傾向に関するデータの入手が可能である。また、SOLAS 1974 年条約の関連条項が 2008 年 1 月 1 日に発効となった。2008 年 12 月 31 日から段階的实施がスタートし、2009 年 12 月 30 日までに国際航行に従事する旅客船 (高速艇を含む)、500GT 以上の貨物船 (高速艇を含む)、自走海洋掘削装置 (目的地にいない間) に対して完全実施となる (SOLAS1998 年議定書の締約者でもある SOLAS 締約政府機関の場合は、2010 年 3 月 30 日までに完全実施)。
- 6.12 LRIT 情報のコストはその情報の要求元が支払うが、実質的には LRIT システムの全体コストは、旗国として SOLAS 条約を批准した政府が支払う。結果的に、LRIT 情報の利用及び共有に関してはある種の通告があるため、LRIT 情報を環境保護の目的に利用できるように現行の決定を修正するなど Maritime Safety Committee (海上安全委員会) 内での議論が必要となる。いくつかの不確かさは避けられないにしても、活動基準データに基づいて正確なベースラインを設定するのは、技術的には、近い将来に可能となると思われる。

船舶の GHG 効率の表現方法

- 6.13 決議 A.963(23)によって、船舶の GHG 排出に関する指標としてその船舶の GHG 効率を表わす方法を開発するよう求められた。船舶が排出する温室効果ガスでもっとも重要なのが CO₂ であるとの認識の下、MEPC が CO₂ 排出量を中心に検討を進めた。MEPC は排出量を指標化する方法として、三通りの基本的なアプローチを検討した。
- .1 船舶設計要因の GHG 効率を表わす指標
 - .2 船舶運航要因の GHG 効率を表わす指標
 - .3 上記の組合せ
- 6.14 排出指標は、船舶の設計あるいは性能を評価する目安となるよう設計される。将来的には、この排出指標は船主及び運航会社が自主改善のために活用するものである。また 6.48 項から 6.71 項で述べるように、自発的なインセンティブスキームあるいは強制的なスキームの中で利用される可能性もある。このセクションの残りで、現在 IMO が検討中の二通りの指標を紹介する、すなわち、エネルギー効率設計指標 (6.15 項から 6.23 項) とエネルギー効率運航指標 (6.24 項から 6.28 項) である。

エネルギー効率設計指標 (EEDI)

- 6.15 MEPC は、船舶設計の GHG 効率を表わす指標について極めて詳細に亘り検討した。その結果、基本原則として排出指標をコスト (= 排出量) と利益 (= 輸送仕事量) の比率を示すものとするとの結論に達した。
- 6.16 MEPC58 では、本報告書の Annex 11 に述べるように更なる工夫と改善を行うために、新造船のエネルギー効率設計指標の計算方法に関する暫定ガイドライン (案) を計算

及び試験運用の目的で導入することが承認された。本報告書の執筆時点（2009年5月）ではEEDIが未完成のため、ここで紹介するものに対して修正が加わる可能性もあるがそれも細部の変更にとどまり、ここでの議論の対象となる全体コンセプトにはほとんど影響がないものと思われる。

- 6.17 EEDIは、船舶によるCO₂排出量を特定の条件（エンジン負荷、喫水、風、波）の下での名目輸送仕事量と関連付けて表わすものである。EEDIの単位は、輸送能力-マイルあたりのCO₂換算グラムで、「輸送能力」とはその船舶の輸送対象として設計された貨物の搬送能力を示す値である。大部分の船舶が、輸送能力をDWTで表わすことになる。
- 6.18 EEDIの計算式は、エネルギー回収の採用、低炭素燃料の使用、波浪中における船舶の機能、特定船舶の耐氷構造ニーズなどの特別な設計特性及び設計ニーズを考慮する。電気推進のような特殊設計仕様の扱いは未だ検討中である。EEDIは設計変更の場合にのみ変化する定数である。
- 6.19 EEDIによって、各船舶の設計性能を表わす数値が示される。あるカテゴリに属する船舶のEEDIデータを集めることにより、その船舶カテゴリの典型的な効率を示すベースラインを設定することが可能になる。図6-1に、いくつかの船舶カテゴリのCO₂設計指標に及ぼす船舶DWTの影響を示す^[2]。CO₂設計指標の計算に使用した式はEEDIと似たものであり、EEDIも同じ傾向を示すと思われる。
- 6.20 このような計算で求めた、船舶の大きさを関数とする（ここでは船舶の大きさをDWTあるいはGTで表わした）船舶カテゴリ別のEEDIベースラインを提示した^[3]。EEDIベースラインは、EEDIを利用する種々の施策に適用することができる。しかしながら船舶の大きさの単位としてDWTあるいはGTを使うとなると、それが非常に小さくなると、すなわち小型コンテナ船及びドライカーゴ船の場合は、EEDIを表すカーブが急勾配になり、船の大きさが少し変化しただけでEEDIベースラインが大きく変化してしまう。船舶の大きさを運航ニーズよりもEEDIベースラインの許容条件によって選択した場合は、これは最適とはいえない設計につながる危険性があり、好ましい結果にならない。そのためこの種のEEDIベースラインを適用する場合は、大きさの閾値を考慮することも必要になる場合がある。

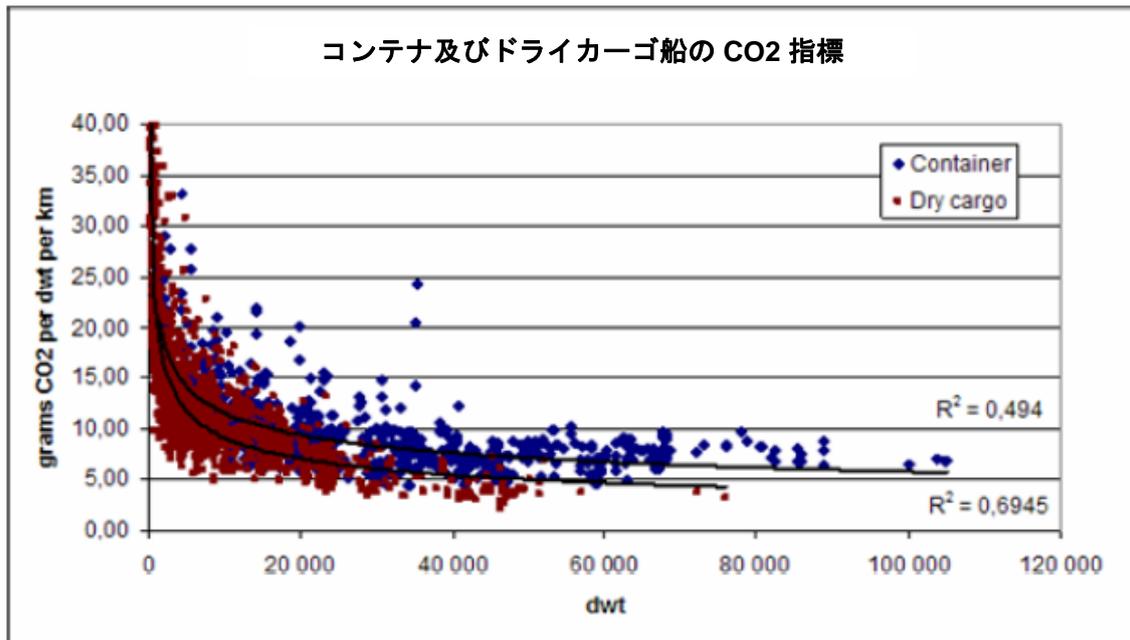


図 6-1 船舶 DWT が CO₂ 設計指標に与える影響^[2]

- 6.21 異なるデータセットを使って EEDI ベースラインを計算すると、計算結果が違ったものとなる。現状、EEDI は最終決定されたものではなく、ベースラインデータも、個々の船舶の EEDI を求める過程で得られたデータベースよりも現存する船舶のデータベースのデータを使用して近似したものである。また、共通構造規則（CSR: Common Structure Rules）の導入によって新造船の鋼材重量が増えるため、それも考慮する必要がある。EEDI ベースラインの策定の完了までに MEPC にはいくつかの作業が残されている。
- 6.22 船舶によっては、貨物輸送用に設計されていないものもある。例として、曳航船、砕氷船、浚渫船、漁船、クルーザーなどが該当する。このような場合、輸送仕事量は船舶がもたらす利益を表わすものとしてはふさわしくない^[4]。船種によってはキロメートル (km) の単位による EEDI は、意味合いや妥当性が少ないと考えられる。このようなケース、あるいは最小サイズの閾値を設ける必要性の有無などから、船舶型式や大きさによって EEDI の測定単位を変える必要があること、さらには EEDI を全ての船舶型式に適用するのは現実的には難しいこと、なども想定される。ただし、大型貨物船に関しては何も問題がなく、第 3 章に示したようにこれら大型貨物船が全排出量の圧倒的なシェアを占めている。
- 6.23 EEDI を基本パラメータとして利用する施策の内、実現可能性のある施策について以後のセクションで検討する。

エネルギー効率運航指標 (EEOI)

- 6.24 EEOI の基本的な原則は EEDI での結論と同じである。すなわち排出指標とは、コスト (= 排出量) ともたらされる利益の比率を表わすものである。
- 6.25 EEOI はこれまで (運航的面で) 「IMO CO₂ 指標」と呼ばれた。試験的な利用で自主的に船舶 CO₂ 排出を指標化するための暫定指針が、2005 年 7 月の MEPC53 で採択され MEPC/Circ.471 として公表された。MEPC は、関連機関に対してその試験的運用を手助けし、結果を報告するよう要請した。MEPC 53/WP.3 及び MEPC 49/4 の中で紹介されたように MEPC/Circ.471 の採択に至る作業の中で、別の計算式、手法、指標の使用なども議題に上った。今回の調査報告書の執筆時点 (2009 年 3 月) では、IMO は EEOI 改訂版の仕上げ段階の途中にある。そのため最終の EEOI はここで検討されている EEOI とは少し異なるものとなる可能性がある。
- 6.26 EEOI は単位輸送仕事量当たりの CO₂ 排出量といった観点から実際の CO₂ 効率を以下の計算式を使って表わす (MEPC/Circ.471)。

$$EEOI = \frac{\sum_i FC_i \times C_{carbon}}{\sum_i m_{cargo,i} \times D_i}$$

ここで

- FC_i は、航海 i の燃料消費量
- C_{carbon} は、使用された燃料中の炭素含有量
- $m_{cargo,i}$ は、航海 i で輸送された貨物質量
- D_i は、航海 i の航行距離

EEOI の単位は輸送能力-マイル当たりの CO₂ グラムで、「輸送能力」とは船舶が実際に輸送する貨物の量である。大部分の船舶にとって「輸送能力」は移動される荷物のトン数で表わされる。しかし他の単位 (乗客数、TEU、車輛台数など) を使ってもよい。EEDI と異なり EEOI は運航条件によって変化する。EEOI はそのため航海の 1 行程ごとに計算する必要があり、一定期間平均としてまたは定期的に報告される。

- 6.27 MEPC/Circ.471 では「この指針は輸送業務をおこなう全ての船舶に適用する」と規定された。
- 6.28 これまでの試験運用から、EEOI の値は、とりわけ、貨物輸送能力に対して実際の運航で達成された平均稼働率によって大きく影響されるように思われる。稼働率は、さまざまな貿易を取り巻く周期的なビジネス環境の影響を受ける^[5]。従って、船舶カテゴリごとの平均稼働率は、年毎に、需要と競争力の変化、更には航路間で、変動する可能性もある。輸送作業によっては (例えば、戻りの貨物、あるいは三角貿易など) 高い平均稼働率の可能性を示唆するものもあれば、他の取引形態 (小荷持の輸送など) によっては、運航のやり方や船舶の選択の仕方ではなく輸送需要の特質あるいは地理的な問題から構造的な低稼働率に終始する場合もある^[6]。こういった問題全てが EEOI ベースラインの設定を難しくしている。

GHG 排出指標スキームの実用化

6.29 船舶の燃料効率運航のための最善の手法を推進するため、MEPC は船舶効率管理計画 (SEMP) の導入を検討中である。MEPC 58/INF.7 で紹介されたように、海運業界はこの運用方法の技術的詳細を検討する作業に大変な努力を払っている^[7]。

6.30 SEMP は、体系化された手法で性能を監視し改善の可能性を探ることによって、エネルギー効率の高い運航を実現する枠組みを船舶に対して提供するものである。SEMP は海運会社のみならず用船者のような他の関係者も開発に参加可能である。これは4段階のフェーズを経ながら使いこなすことになる。

1. 計画
2. 実行
3. 性能監視
4. 自主改善

SEMP の中では性能監視のために EEOI を活用できる。SEMP は単独で考えるものではない。このような規定はすでに ISM コード (国際安全管理コード) 中に存在し、船主及び運航会社に対して環境性能の監視と継続的な改善プログラムの策定を求めている。MEPC が提案する SEMP も ISM コードの要求事項を拡大したものと考えられる。SEMP は、船舶及び船腹の性能実績 (EEOI に基づくもの) の推移を監視する実用的なメカニズムを提供するほか、船舶性能の最適化を目指す場合に検討対象となるいくつかのオプションも提供する^[7]。

技術手段、運航手段、市場ベースの手段による解決策

6.31 IMO 総会決議 A.963(23)が MEPC に要請した作業の一つが「技術手段、運航手段、市場手段の評価」である。確かに MEPC は、技術手段、運航手段、市場ベース手段での解決策の検討に着手したが、未だ施策の採択という具体的な姿にはなっていない。ただし、この間になされた提案が、6.48 項から 6.71 項で取り上げる海運の GHG に対する施策設計のベースとなった。

IMO GHG の作業計画

6.32 決議 A.963(23)のフォローとして、MEPC 55 (2006 年 10 月) は「国際海運による CO₂ 排出量の制限及び削減を達成するために必要なメカニズムを特定し設定する作業計画」を採択し、締約政府にこの作業に積極的に参画するよう要請した。この作業計画は MEPC 59 (2009 年 7 月) で終了し、特に前述の 6.13 項から 6.28 項で述べた運航効率を指標化する方法の改善、CO₂ 排出ベースラインの設定、国際貿易に従事する船舶による GHG 排出に対応する技術対策、運航対策、市場ベースの対策といった問題が検討された。

6.33 この作業の成果は、第 15 回気候変動枠組み条約の締約国会議総会 (COP-15 2009 年

12月)でのUNFCCCに関する判断に対して大きな影響を与える。この会議の全体目標は、地球の気候に関する野心的な合意を築くことである。

施策オプションの特定

6.34 船舶によるGHG排出量を削減する多くの施策が考えられる。このセクションではIMOに対する具体的な提案から抜粋したいくつかのオプションについて、その概要の包括的な特定を試みる。その次のセクションでは現在IMOで議論の対象となっているオプションについてより詳細に検討する。

6.35 施策を分類する場合に多くの方法があるが、分類方法を二つ挙げる。

- .1 その施策が使用する基本パラメータに基づいて各施策を分類する。気候に関する施策の基本パラメータには絶対排出量、効率指標、燃料から生じるライフサイクル炭素排出量などがある
- .2 各施策は、施策手段の種類によって分類される。環境施策で使われる手段には、市場手段、指揮統制⁶手段、自発型手段などがある。

本調査研究では基本パラメータによって施策手段を明らかにする⁷。6.42項から6.44項では、政策手段を基本パラメータと手段の種類の間で分類するマトリクスを提示する。

海運によるCO₂排出量の決定要因

6.36 図6-2は、海上輸送による排出量の大きさに影響する基本的な要因の型式化した概観図である。図の目的とするところは、排出削減オプションを評価するために施策を分析する枠組みを提示することにある。各要因を示すとともにそれら要因と海運活動による排出量との間の直接的、間接的関連を下に詳細に表わした。これは全般的な概念図であり、すべての考えられる要因及び相互関係を示すものではないことに注意されたい。この枠組みによって海運活動のGHG排出量を削減する施策オプションの特定が可能となるため、ここでこの枠組みを紹介し、以後のセクションで使用するものとする。

⁶ 「指揮・統制」(command-and-control)という用語は通常全ての規範的な規則を包含する。例えば、禁止、技術ベースの排出基準、達成水準など(RussellとPowell, 1999^[26])。

⁷ その施策の種類によって分類された施策リストは、例えばTorvanger他, 2007^[29]を参照

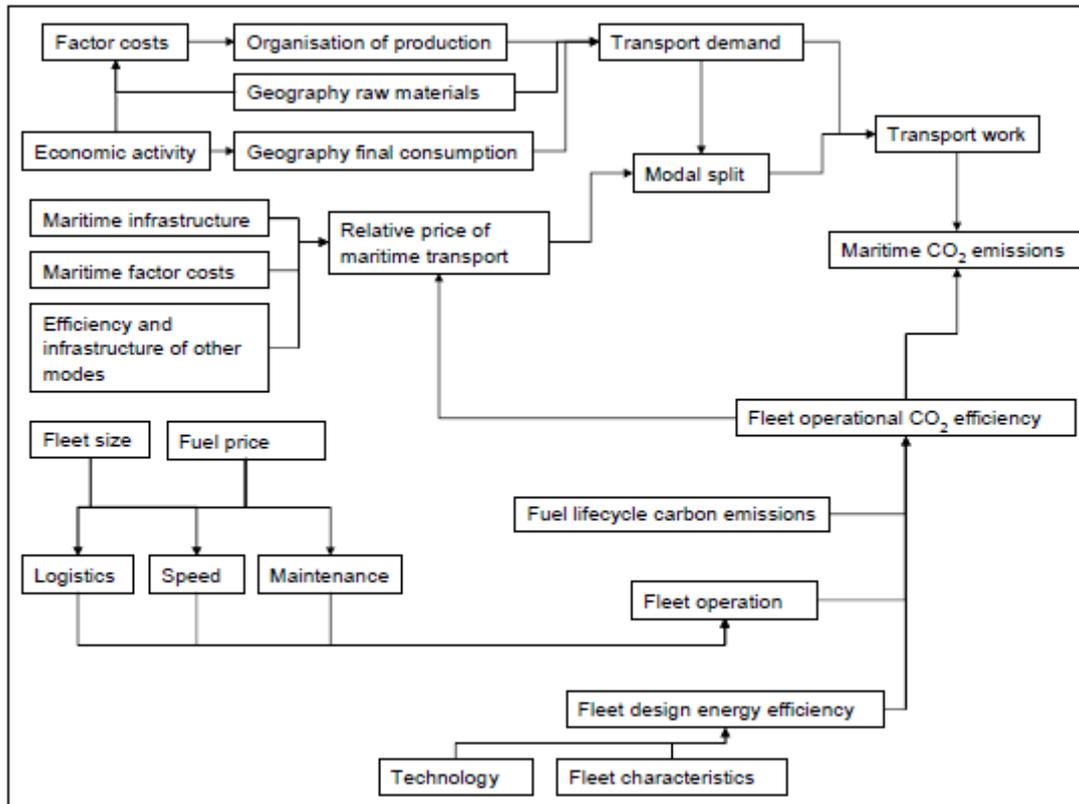


図 6-2 海運による排出量の決定要因型式概観図

- 6.37 大部分の船舶において、海運活動による排出量は、その定義のとおり、船腹の運航上の CO₂ 効率（CO₂ 排出量/トン・マイル）と輸送仕事量（トン・マイル）による。非輸送船舶の場合は、作業単位が違ってくる（例えば出漁日数、曳航/非曳航稼働時間、旅客数 - マイルなど）が、ここでは取り上げない。
- 6.38 海事部門の輸送仕事量は、（全体の）輸送需要及び輸送形態間の分担という二つの主要因によって決まる。図 6-2 には示されていないが、物流効率も実際のトン・マイル量に対する要因の一つとなる。また、輸送需要は経済活動全般及び原材料、最終消費地、製造拠点の地理的分布によって決定される。生産は要素コストが安い地域に集中する傾向がある（要素コストとは、労働、エネルギー、原料など入力要素のコストのこと）。要因コスト及び最終消費地は、世界各地域の人口当たり GDP のような経済指標との相関性がある。総 GDP は総輸送需要と正比例の関係にある。このように経済活動（例えば GDP で表わされる）及び原材料、生産、消費の地理的分布が輸送需要の原動力（driving force）である。
- 6.39 輸送形態分割は、代替となる輸送形態の利用可能性と海上輸送の価格競争力によって決まり、さらに後者は船隊運航 CO₂ 効率、海事インフラ、海上輸送の要素コストおよび競合輸送形態の価格次第である。
- 6.40 一方、図 6-2 の下半分に示された運航 CO₂ 効率について説明すると、運航 CO₂ 効率

は燃料のライフサイクル炭素排出量、船隊の運航状況及び船隊設計エネルギー効率によって決まる（図 6-2 の「船隊運航エネルギー効率」は、EEOI が対象とするような個々の船舶ではなく、船隊に対して適用されることに注意されたい。船隊運航効率は各船舶の EEOI の加重平均値である）。燃料のライフサイクル炭素排出量は天然ガスやバイオ燃料などへの燃料転換によって変化する可能性がある。CO₂ 効率にもっとも影響を及ぼす船隊運航上の要素は、物流（航海実績）、メンテナンス、速力である。三つの要素は全て、燃料価格及び輸送需要と船腹量との相対関係の影響を受ける。

- 6.41 船隊設計エネルギー効率はその船隊に属する船舶の型式（例えばエンジン型式、大きさ、船の形状）及び第 5 章で概説した種々の省エネルギー技術（その船隊中の当該船舶が建造された時点の最新の造船技術と関連する）の利用によって決まる。（再度、図 6-2 に示す「船隊設計エネルギー効率」は、EEDI が対象とするような個々の船舶ではなく、船隊に対して適用されることに留意されたい。船隊設計エネルギー効率は各船舶の EEDI の加重平均値である。）

施策オプション概観

- 6.42 原則として施策は、図 6-2 に示すように海運活動による CO₂ 排出量を決定する各要因をターゲットとする。実際には、自由な海上行動あるいは自由貿易を阻害する施策、すなわち、輸送仕事量に直接影響するような施策もある。多くの施策は、使用する指標によって 4 つのカテゴリにまとめられる
- .1 設計、運航、エネルギー源を問わず海運活動の CO₂ 排出削減を直接狙った施策
 - .2 船隊の運航燃料効率の改善を狙った施策
 - .3 船隊の設計効率の改善を狙った施策
 - .4 燃料のライフサイクル炭素排出量の削減を狙った施策、例えば天然ガスあるいはバイオ燃料の利用促進施策

これらの基本パラメータごとに、多くの施策手段が設計できる。海運活動による CO₂ 排出量は市場手段による対処が可能である。運航効率、設計効率、ライフサイクル炭素排出量は、市場手段あるいは指揮統制手段あるいは自発的な対策によって対処可能である。施策オプションの全体観を単純化して表 6-1 に示す。

表 6-1 船舶による GHG を制約・削減する施策の全体観

	市場手段	指揮統制手段	自発的な対策
海運活動による GHG 排出量	排出枠取引、例えば METS* 排出税、例えば ICF ⁺		
運航効率	EEOI 税 EEOI 税/報奨金スキーム	EEOI の強制的な制約 EEOI の強制的な報告 SEMP の強制的な適用	EEOI 自主改善の協定 SEMP の自主活用協定

設計効率	EEDI 税 EEDI 税/報奨金スキーム	新造船 EEDI の強制的な制約	EEDI の自主改善協定 自主基準の遵守
燃料ライフサイクル 炭素排出量	燃料税の差別化	燃料ライフサイクル 炭素排出量標準化 バイオ燃料標準	

* METS : 海事排出量取引制度

* ICF : 国際補償基金

6.43 IMO の内部議論では、施策を 3 つのカテゴリに分けた。

- .1 技術施策オプション、すなわち船隊の設計効率改善を目指す施策
- .2 運航施策オプション、すなわち船隊の運航効率改善を目指す施策
- .3 市場ベースの施策オプション、すなわち直接 CO₂ 削減に取り組む手段

「市場ベースの施策オプション」という言葉は、IMO 内部では通常 CO₂ 排出削減に対応する市場に基づく施策オプションを指すことに注意されたい。運航効率あるいは設計効率に対処するための市場ベースの施策オプションが議論されることは殆どない。この章でも IMO 用語に従う。

6.44 上記カテゴリを以下の議論でも使用する。

施策の下での技術対策及び運航対策

6.45 第 5 章では船舶による CO₂ の排出削減のために講じることができる技術対策及び運航対策を特定した。燃料価格次第ではあるが、運航者にとって費用効果が高いと思われる対策もある。海運業界関係者は、事業的・経済的な判断に基づいてこれらの対策を実行する傾向にある。それ以外の対策は、燃料価格の上昇を仮定したとしても、費用効果が高いとは思えない。事業的・経済的な判断だけが規準になれば、これらの対策が講じられることは決してない。そのためそれらの対策は施策によるインセンティブを与える必要がある。

6.46 表 6-2 は、基本的な施策オプションと第 5 章に示した排出削減オプションとの関連を表したものである。この表においても、技術施策オプションが新造船の設計対策を意図したものであることがわかる。運航施策オプションは、原則として新造船の設計オプションと全船舶の運航オプションの両方を包含している。市場ベースの手段は設計対策と運航対策の両方を対象とし、他部門の排出削減オプションを利用するメカニズムを意味する場合もある。

表 6-2 基本施策と主要排出削減オプション間の関係

	技術施策オプション*	運航施策オプション+	市場ベースの手段**
設計（新造船）			
コンセプト、速力、輸送能力	EEDI あるいは技術標準において主仕様が明記される	実施後の性能がこの手段の評価基準であり、暗黙的に全ての設計要素と運航要素が対象となる。	実施後の CO ₂ 排出量がこの手段の評価基準であり、暗黙的に全ての設計要素と運航要素が対象となる。
船体及び上部構造			
駆動源及び推進装置			
低炭素燃料			
再生可能エネルギー	能力は考慮されるが、必ずしも使われるとは限らない。		
運航（全船舶）			
船隊管理、物流、インセンティブ	No		
航海最適化	No		
エネルギー管理	No		
その他			
他部門からの排出権購入	No	No	No

* EEDI の削減を目指す施策。あるいは他の特定技術標準。

+ EEOI の削減を目指す施策、エネルギー効率管理計画の実施

** 排出量取引制度（ETS）、国際 GHG 基金（補償基金）

6.47 各種施策において利用できる対策については、6.72 項から 6.130 項の各種施策の環境効果及び費用効果に関する検討の箇所にて詳細に検討する。

詳細分析の対象となる施策オプションの選択と定義

6.48 6.34 項から 6.47 項に示したように、船舶による GHG 排出量を削減する多くの施策が考えられる。このセクションでは IMO 内部で検討中の主な施策オプションの高度な設計について説明する。この設計の目的は、これらの施策手段の評価を可能にすることである。この施策評価は MEPC 57 で合意された評価基準に基づくものである（6.72 項から 6.130 項）。

技術施策オプション

6.49 技術施策オプションに関する IMO 内の検討対象は、現在エネルギー効率設計指標（EEDI）として知られているものをベースとするオプションが主体である。すでに説明したように MEPC 58 は、更なる改良改善を視野に入れながら、この暫定的な計算方法を試験運用的に使用することを認めたのであって、EEDI は未だ開発途上である。このセクションは「新造船 EEDI 数値の強制的な制約」、「新造船 EEDI の強制的な報告」、「新造船 EEDI の自主報告」といったことを取り上げる。

施策設計の特徴：新造船 EEDI の強制的な制約値

6.50 IMO 内部で提案された一つの技術施策オプションが、新造船 EEDI 値の強制的な制約値である（例えば、Annex 6、MEPC 58/4、MEPC 58/4/17、MEPC58/4/18 を参照）。EEDI の強制的な制約値の設計の骨子は

- .1 IMO が EEDI の計算式を決める
- .2 IMO が EEDI のベースラインを承認する。ベースラインはその指標の試験的な運用結果に基づいて設定される。ベースラインは船舶の種類と大きさの関数となる。一般式として、ベースライン値 = $a \cdot \text{Capacity}^c$ で求められ、ここで a と c は船種固有のパラメータである。以下の 7 種類の船種に関しては、ベースラインを求めることが可能である（MEPC 58/23、MEPC 58/48）。他の船種への拡大は追って可能となろう。
 - ドライバルクキャリア
 - タンカー
 - ガスカリヤ
 - コンテナ船
 - 一般貨物船
 - RO-RO 貨物船
 - 旅客船、ただし RO-RO 旅客船は含むが、高速船は除く。
- .3 IMO が例えば「ベースラインの X % 下」といった目標を設定する。従って、その目標は船種と大きさ別に設定される。ある日付以後に建造された船舶は、EEDI がその目標より優れていることを証明しなければならない。
- .4 IMO が徐々に目標値を上げる。

施策設計の特徴：新造船 EEDI の強制的な報告

6.51 この施策は、EEDI の計算が可能な船舶に対して、船籍登録時に EEDI の報告を求めるものである。EEDI は新造船にとってはすでに分かっている性能指標であり、自主管理、港湾使用料の差別化、識別表示といったスキームの中で利用される。

6.52 EEDI 強制報告スキームの設計の骨子は次のとおり。

- .1 IMO が EEDI の計算及び検証のためのガイドラインを設定する
- .2 IMO が旗国に対し新造船の EEDI を登録するよう求める。

施策設計の特徴：新造船 EEDI の自主報告

6.53 この施策は、EEDI が計算可能な船舶に対し、EEDI を報告させる受け皿を設けるものである。EEDI は自主管理、港湾使用料の差別化、識別表示といったスキームの中で利用される。

6.54 EEDI 自主報告スキームの設計の骨子は次のとおり。

- .1 IMO が EEDI の計算のためのガイドラインを設定する
- .2 異なったインセンティブスキームの中で判断基準が異なるのを避けるため、IMO は随意に EEDI の検証のためのガイドラインを設けることができる。

運航施策オプション

6.55 EEOI は原型も含めてその使い方が MEPC で度々議論され、以下のような提案がなされた。

- .1 EEOI の強制的な記録/報告
- .2 EEOI/SEMP の強制的な適用
- .3 不順守に対する罰則と組合せた EEOI の強制的な制約値
- .4 EEDI の自主的な記録/報告
- .5 EEOI/SEMP の自主的な利用

これらのオプションの設計について以下で簡単に紹介する。

施策設計の特徴： EEOI の強制的な記録/報告

6.56 この施策は船舶に対しその EEOI 値を記録する義務を課すものである。そうすれば EEOI を業界内部での活用、あるいは例えば港湾のような第三者が設けるインセンティブスキームでの利用などが考えられる。EEOI 値をインセンティブスキーム中で報償の事由として使う場合は、EEOI 値の検証等級を設定する必要がある。

6.57 船舶効率及び総排出量のベースラインを設定するための手段として、中央機関へ EEOI データを報告させることも提案された。そうすれば自主行動、入港税の差別化、識別表示といったスキームの中で利用される可能性がある。しかしそうなるとその内容自体が排出削減施策でなくなるため、ここでは取り上げない。

施策設計の特徴： EEOI/SEMP の強制的な適用

6.58 SEMP に関して何かを強制するとするならば、各船舶が運航効率を管理するための活動内容を文書化させるといったようなことが考えられる。この場合船上では VOC 管理計画（改訂 MARPOL VI 規則 15 で義務付けられた）に類似した形態で実施されることになる。性能監視のために EEOI を強制的に適用させることなどもこの施策の一種といえる。EEOI を強制的に利用させて、入港税の差別化、識別表示スキームのような他の施策の中での利用に対して道を開くこともできる。このようないろいろな可能性を持つ施策手段あるいは自主活動の評価は本調査報告書の範囲外である。

6.59 EEOI をインセンティブスキーム中で利用する場合は、独立した第三者機関による EEOI の検証だけは必要である。

施策設計の特徴： 強制的な EEOI 制約値

6.60 2008 年に MEPC の GHG 作業部会が、EEOI を将来強制的なものにする可能性を残すものの、EEOI は本質的には推奨するものであって強制するものではない、との考え方を提示した (MEPC 58/4)。EEOI の強制的な制約値に関する設計の骨子は以下のとおりである。

- .1 IMO は、船舶の EEOI に関する必要データを収集した後、EEOI のベースラインを設定する。前述の EEDI ベースラインと同様、原則的にはこの EEOI が IMO に報告された各 EEOI の最大公約数的なものになるはずである。EEOI は統計数値ではないので、この仕事は EEDI よりも EEOI の方が相当な困難さを伴うことに注意されたい (6.24 項から 6.28 項を参照)。
- .2 IMO は、例えば、ある期限までに然るべき EEOI 値を改善すること、のような EEOI の削減目標を設定できる。
- .3 各船舶は、妥当な指針に従って自らの EEOI を定期的に計算する。
- .4 船舶は、自らの EEOI を旗国に報告する。不正防止のため、報告書は第三者検証機関の検証を受ける。
- .5 船舶の EEOI 値が規定値に適合しない場合、旗国は適正な措置を講じる。船舶が EEOI を改善する方法は唯一、運航効率を改善することであり、不適合には罰金を課すこともあり得る。これは不適合船舶を罰すると同時に、次の期限までに EEOI を改善するよう促すためである。

施策設計の特徴： EEOI の自主記録/報告

6.61 この施策は、船舶に対し自主的に EEOI の計算及び報告をさせるものである。この EEOI は自主行動、入港税の差別化、識別表示といったスキームの中で利用される。EEOI のベースラインあるいは検証に対する要求事項は、この情報を利用するスキームによって決まる。

6.62 EEOI の自主報告スキームの設計の骨子は以下のとおりである。

- .1 IMO は、EEOI の計算式を含むガイドラインを設定する。
- .2 異なったインセンティブスキームの中で判断基準が異なるのを避けるため、IMO は随意に EEDI の検証のためのガイドラインを設けることができる。

施策設計の特徴： SEMP の自主活用

6.63 SEMP の自主活用は、船主と運航者に普及して独自の判断で利用できるような SEMP を IMO が開発するという暗黙の前提がある。

6.64 SEMP の自主活用のための設計の骨子は以下のとおりである。

- .1 IMO は SEMP を開発する。

- .2 SEMP が船主と運航者に普及して独自の判断で利用される。

市場ベースの手段

- 6.65 IMO における市場ベースの手段に関する議論の対象はあくまでも船舶の CO₂ 排出と取り組むための手段であって、例えば効率指標を改善するための市場ベースの手段ではない。多くの関心を集めた 2 つの市場ベースの手段は、海運の排出量取引制度 (METS) 及び船舶による GHG 排出に対する国際補償基金である。後者は世界的な船用燃料税をベースとする基金で、本調査報告書では ICF と呼ぶ。
- 6.66 IMO で議論の対象となっているこの 2 つの市場ベースの手段は多くの特徴を共有する。
- .1 両スキームとも、原則として、地球全域で、全ての船舶に適用できる。
 - .2 両スキームとも、使用する燃料コストを押し上げることにより、各船舶の燃料効率を改善する新たなインセンティブを生み出す。
 - .3 両スキームとも、スキームを管理する中央機構が必要となる。
 - .4 両スキームとも、基金を調達してそれを多くの目的に利用しよう提案されている。ただし、歳入を高めることは、当然税金にとっては重要な要素であるが、一般的に排出量取引スキームにとっては重要な要素ではないことに注意が必要だ。
 - .5 両スキームとも、基金を管理する機構の設立が必要となる。
 - .6 両スキームとも、慎重な法的な検討を必要とする。法的な観点からの検討は一般的にはこの調査報告の範囲外である。ただし基本的な枠組みは第 2 章で簡単に紹介した。
- 6.67 二つの市場ベースの手段の主な違いは以下のとおりである。
- .1 METS は地球全体の CO₂ 排出量に対する海事部門のみの貢献に限定される。海事部門の排出量が増加した場合にそれによって他の部門の排出量が同時に減少しない限り貢献したとは認識されない。ICF にはこの設計特性はない。
 - .2 METS は、効率改善に対するインセンティブを高めることによって、また排出枠上限を超える事業者に対して他の部門から排出枠を購入するよう要求することによって、地球全体の GHG 排出量の削減に貢献する。
 - .3 ICF は、効率改善に対するインセンティブを高めることによって、及び基金から他の部門の相殺分を購入することによって地球全体の GHG 排出量の削減に貢献する。
 - .4 ICF には 4 年ごとに一定の税収が見込める。METS における排出枠価格は市場によって決まるものであり、不安定さがある。

国際補償基金 (ICF) の制度設計の特徴

- 6.68 世界規模の船用燃料税に基づく国際補償基金の制度設計案は、IMO に対する数回にわ

たる提案の中で説明された（MEPC 56/4/9、MEPC 57/4/4、MEPC 57/INF.13、GHG-WG1/5/1、MEPC 58/4/22）。MEPC 内で使われているこのオプションの名称が、この市場ベースのオプション（ICF）と METS との主たる違いを浮き彫りにするものではないことに注意されたい。最終的には、提案されているオプションは、共に国際補償基金のために歳入を確保する特性を共有する（6.70 項及び 6.71 項参照）。両者の違いは歳入確保の方法にある。すなわち ICF は燃料税によって歳入を確保し、一方 METS は排出枠を競売にかけて歳入を得る。

6.69 ここに紹介する設計は上記 IMO への提案に基づくものである。制度設計は以下の特徴をもつ。

- .1 国際貿易に従事する全ての船舶は、積み込む燃料のトン当たりで決められた額の船用燃料税を納付する。この燃料税はその排出係数に応じて全ての船用燃料に適用される
- .2 税を払うのは船舶、船用燃料の供給者、石油精製業者のいずれかとなる。各ケースについて GHG-WG 1/5/1 で議論されたので、以下を補足する。
 - 最初のケース（船舶が支払うケース）では、非加盟国の船籍船に対しても締約国の港に寄港中の場合、締約国のポート・ステート・コントロールによって支払を請求できる。
 - 後者のケース（燃料供給者が支払うケース）では、非締約国の船用燃料供給者には税金の支払いを請求できない。言い逃れを防止するため、代わりに船舶に税金を納めさせることとし、それは旗国及び PSC を経由して請求するという規定を定める。
 - 船用燃料の供給者に税金の支払いを要求する場合も、ケースによっては船舶が支払う規定を必要とするのであるから、結局は船舶に納税義務を負わせる方が、理解が簡単で実施しやすいスキームとなる。
- .3 中央機関は各船舶固有の口座を設け、燃料の購入及び税金の納付の記録を追跡する。このようなシステムは船舶（すなわち船主/運航会社）との信頼関係に基づき、燃料補給後直ちに船舶の口座に税金を振り込ませる。船舶は PSC に提示する納付レシートを受け取る。
- .4 その税金は、未決定であるが締約国あるいは中央機関が管理する国際海事 GHG 排出基金に預けられる。
- .5 締約国は基金の用途に関する明確なガイドラインを設定する。一般的には以下の目的で基金から支出する。
 - 他の業界で所有する排出枠の取得。たとえば CDM クレジット、その他のプロジェクトのクレジットなど
 - 船舶に限定しない GHG 排出削減プロジェクトあるいは適応プロジェクト（CDM あるいは JI）への資金提供
 - 海運に関する研究開発への資金提供
 - 世界船腹の効率を改善するための IMO 技術協力プログラムへの資金提供

海事排出量取引制度 (METS) の制度設計の特徴

- 6.70 METS の制度設計案が数回にわたる IMO への提案の中で説明された (GHG-WG 1/5/3、GHG-WG 1/5/5、GHG -WG 1/5/6、GHG-WG 1/5/7、MEPC 58/4/19、および MEPC 58/4/25)。これらの提案の多くに、先に説明した ICF のような国際基金の要素が含まれることに注意が必要である。両者の違いは基金調達方法にある。METS の場合は、排出枠を競売にかけることによって調達し、ICF の場合は船用燃料に課税することによって調達する。
- 6.71 ここに紹介する制度設計は上に引用した IMO への提案に基づくものである。設計は以下の特徴をもつ。
- .1 スキームの範囲は世界全域とし、ある大きさ以上の全ての船舶による CO₂ 排出を対象とする。ただし、好ましくないマイナス効果を避けるため対象範囲の修正が許される。
 - .2 これまでの排出量推移及び削減目標に基づき、世界全体の海事排出量上限枠を設定する。気候変動に対する影響を低減・遅延・防止するために、地球の総排出量を絶対量で制限する必要があるとの IPCC の見解 (IPCC 2007^[20]) に沿った形で、その上限枠は絶対量の排出目標とする。上限枠を世界全域の海上輸送に適用するのであるから、その上限枠は適当な国際機関によって設定されるべきという主張は理にかなっている。
 - .3 スキーム内の船舶間の取引はさておき、このスキームは他の排出量取引スキームとの取引にも門戸を開放する。このことの利点は、海運部門が他の業界から排出枠を購入することが可能となり、海運業界が自らの削減コストに比べて安い価格で排出を削減する可能性が生まれることである。METS を開設して他部門の排出枠が利用できることによって、価格の不安定さがかなり緩和される。何故なら、ビジネスサイクルが異なる他の部門が組み込まれるためである。さらに、途上国のプロジェクトクレジット (CDM クレジットのような) の利用を可能にすることによって、METS による途上国の排出削減に対する資金提供も可能となる。
 - .4 責任事業体、すなわち排出量の監視と報告、あるいは排出枠の返還に責任を負う事業体は船舶となる。これによって、船舶が不順守の場合の責任を船舶に負わせることが保証される。しかし船舶自体は排出枠を返還できないので、実際には、船舶の排出量に対して排出枠を返還するのは運航会社、用船者、あるいは荷受人である。規制する側からの視点では、誰が排出枠を返還するかは、返還される限りでは重要な問題ではない。海運に従事する当事者に残された問題は、排出権返還の責任に関して契約上の手配を整えることである。船舶は検証可能な方法によって燃料消費量を監視しなければならない。
 - .5 責任事業体は年間排出量を旗国に報告し、所定の排出枠を返還するものとする。非締約国で登録された船舶は他の国あるいは他の事業者に排出枠を返還する可能性を与えられる。寄港国は船舶が排出枠を返還したかどうかを検査することができる。
 - .6 初めに個々の船舶に排出枠を割り当てていくつかのオプションがある。
 - 排出枠の販売あるいは競売

- 個々の船舶のこれまでの排出量あるいは活動量（トン・マイル）に基づく自由な割り当て
 - ある基準に基づく自由な割り当て
 - 上記の組合せ
- .7 これらのオプションはそれぞれ、海運業界に与える影響、早期対応の場合の優遇措置、環境効果が異なる。いずれを選択するかについては、経済効率、行政面の負荷、海運業界に与える影響のバランスを考える必要がある。
- .8 排出枠を競売にかける場合、売上金は途上国での適用あるいは海運業界の研究開発などの支援基金への資金提供に使うこともできる。
- .9 排出枠の全てあるいは一部を競売にかける場合は、その基金を管理するための行政管理組織を設立する必要がある。

施策オプションの評価

評価基準

6.72 MEPC 57 において、船舶による GHG 排出に対する一貫性があり包括的な将来の IMO 規制枠組みは以下のものであるべきとの合意に達した（MEPC 57/21）。

- .1 地球全体の GHG 総排出量の削減に効果的に貢献する。
- .2 「言い逃れ」を防止するため、全ての旗国に拘束力を持たせ、平等に適用する。
- .3 費用効果が高い。
- .4 競争の不公平さを排除する、あるいは少なくとも効果的に最少化する。
- .5 世界貿易およびその成長を妨げることなく持続可能な環境開発を基本とする。
- .6 目的に基づく手法を基本とし、特殊な手法を採用しない。
- .7 海運業界全体の技術革新及び研究開発の推進と促進をサポートする
- .8 エネルギー効率分野の先端技術を導入する
- .9 実用的であり、透明性があり、不正がない、運営しやすい。

ただし、2 番目の原則は全ての代表団には受け入れられたわけではない。

6.73 次に、分析結果を理解しやすいように、上記の九つの評価基準を 4 項目に集約する。その過程の議論について補足説明する。

- .1 MEPC 57 の 2 番目の基準 - 全ての旗国への平等な適用性 - はここで取り上げる全ての施策にあてはめることができる。
- .2 MEPC 57 の 4 番目の基準 - 競争の不公平さの最小化 - は環境効果及び費用効果を評価する時に考慮される。結局のところ、施策が市場の特定の部分にのみ他と異なる影響を与えるならばその市場はゆがめられる。これは、環境目標が海運市場の特定の部分にのみ影響を与えるので、排出削減量及び制約量がより少なくなることを意味する。あるいは、目標に到達する負荷が市場のある部分に他の部分に比べ重くのしかかることを意味する。このような場合、影響が及ばない部分では費用効果の高い手段は講じられることなく、平均の費用効果が

- 下がる。このように、不公平な競争は環境効果と費用効果の両方を阻害する。
- .3 環境効果と費用効果は共に、MEPC 57 の 5 番目の基準、すなわち地球全体の貿易及びその成長を妨げない持続可能な環境開発、を満足する度合いを指標化するものである。
 - .4 MEPC 57 の 6 番目の基準は、いずれも具体的な規定がないので、検討中の全ての施策が満足できる。

6.74 当チームは、MEPC 57 が設けたいずれの評価基準をも廃棄するつもりではなく、議論の繰り返しを減らすためにそれらを集約したことに注意されたい。この調査報告書で使う基準は以下のとおりである。

- .1 環境効果、すなわち施策が全地球的な温室効果ガスの排出削減に及ぼす効果の程度（MEPC 57 の 1 番目の基準）
- .2 費用効果（MEPC 57 の 3 番目の基準）
- .3 技術的な変更に対するインセンティブ（MEPC 57 の 7 番目と 8 番目の基準。技術的な変更とは新しいテクノロジーの開発及び導入、すなわち R&D 及び技術革新、あるいは現行のテクノロジーの導入と理解される）
- .4 実施の実用面での実現可能性（MEPC57 の 9 番目の基準）

環境効果の評価

6.75 施策の環境効果は、排出削減手段の供給と排出削減に対する需要に依存する。削減に対する需要は、目標、排出枠上限、税率（これは政治的な判断）によって決まるので、このセクションでは供給を決定する四つの要素に着目する。

- .1 施策の対象となる排出量。すなわち、量が多いほど施策はより有効性が増す。
- .2 海運業界以外での排出に対する影響
- .3 施策の恩恵を受けられる対策。この場合、対策の排出削減ポテンシャルが大きいほど施策はより有効性が増す。
- .4 施策手段の適用性。すなわち、回避できる施策、リバウンド効果あるいはただ乗りに悩まされる施策は効果が少ない。

これらの各要素を以下で取り上げる。これら要素は、報告を求めるといった類を除く施策手段に限定して適用される。除外の理由は、報告手段の有効性は、その報告されたデータが、例えば入港税差別化あるいは識別表示スキームのような他の施策においてどのような使われ方をするかによって変わるためである。このようなスキームの有効性の評価は本調査報告の範囲外である。

施策の対象となる排出量

6.76 施策の対象となる排出量は、施策の影響を受ける船舶の型式あるいは種類をどう限定するかによって変わる。そのような限定には技術的な理由がある。例えば、EEOI、EEDI 及びそれぞれのベースラインを全ての型式の船舶には設定できない。施策対象

の限定には行政的な理由もある。例えば施策が適用対象とする船舶数を限定するために船舶の大きさの閾値が設けられる。施策の適用に地理的な制約をつける場合もある。これらについては以下で検討する。

- 6.77 MEPC によって検討された技術施策オプションは EEDI がその基準となっている。現状 EEDI はドライバルクキャリア、タンカー、ガスカリヤ、コンテナ船、一般貨物船、RO-RO 貨物船で、RO-RO 旅客船は含むが、高速船は除いた旅客船に対して適用される (MEPC 58/4/8)。船種の数はいずれも将来拡大するであろうが、そのためにはこれ以外の船種用に計算式の変更あるいは新たな計算式の作成が必要になる。現状の適用対象船種を合計すれば、2007 年の海運による CO₂ 総排出量の約 81% を排出したと推定される (第 3 章参照)。現在の形の EEDI を基準とする施策の環境効果は、全ての船腹に適用可能な施策の効果よりも約 19% 低い。
- 6.78 現在の形の EEOI は、貨物を輸送する全ての船舶に適用される (MEPC/Circ.471)。2007 年には、これらの船種からの排出量は全ての船舶による排出量の約 84% になる (第 3 章参照)。従って、現在の形の EEOI を基準とする施策の環境効果は、全ての船腹に適用可能な施策の効果よりも約 16% 低い。
- 6.79 CO₂ 排出量を基準とする SEMP 及び市場ベースの手段は、原則的には、全ての船種を対象にできる。従って、この点では環境効果を制約する要素はない。ただし、市場ベースの手段が可能とする対象範囲に関する MEPC の議論は、未だ結論に至っていない。
- 6.80 大きさの閾値は施策の対象となる排出量を制約する。第 3 章に示したサイズカテゴリ別の排出量データは、ほとんどの船種に対して、大きさと排出量の関係が逆 U 字型になることを示している。言い換えれば、小型の船舶ほど排出量が少ないが、多数の小型船舶が存在するため、サイズカテゴリ別の合計排出量は中型船で最大値を示す。そのためもっとも小型の船舶カテゴリを除外しても総排出量にはほとんど影響しない。しかし、大きさの閾値の取り方によって影響は急激に拡大する。
- 6.81 ここで取り上げる全ての施策の地理的な対象範囲は地球規模であり、その場合、環境効果を制約するものではない。これは、現行の IMO 条約手段及び MEPC 49 で起草された決議 A.963(23) に沿うものである。草案の中では、MEPC は「船舶からの温室効果ガス排出削減に関連する IMO 施策及び履行に関する総会決議案は、京都議定書の規定に基づくよりも全ての船舶に適用可能な汎用性のある施策に基づくべきであると合意した」とある。因みに京都議定書は、温室効果ガスの排出削減は議定書 Annex 1 締約国の責任により行う、と述べている。(MEPC 49/22 の 4.9 項)
- 6.82 しかし施策において地域による差別化を適用することもあり得ることで、それは UNFCCC の「共通だが差異ある責任」の原則に沿うものである。このオプションの一つが船籍に応じた差別化であるが、これでは旗国の変更が容易であるゆえに、どの施策の環境効果も著しく損なわれる (CE Delft 他、2007^[15])。結局どの施策もコスト上昇につながり、ある特定国に登録した船舶のみがこのコスト上昇に直面し、他国に

登録した船舶のコストが安いのであれば、施策の対象とならない国で登録するのは当然の成り行きである。施策の対象外の国で船舶を所有する法人を設立するのが比較的容易であるため、船舶の船主国に対しても同様の議論となる。

6.83 それとは対照的に、船舶の航路あるいは貨物の輸送経路による差別化の場合、確かに対象とする排出量は減少するが、航路の選択がそれほど影響を受けないのであれば、地球全域での総排出量の内、相当な比率が施策の対象範囲内に残る。従って環境効果はさほど極端には下がらない。

6.84 各種施策の対象範囲内にある排出量を状況分析した結果を以下に要約する。

- .1 CO₂ 排出量に基づく市場ベースの手段の対象となる排出量は、対象船種による制約はない。
- .2 EEOI の対象となる排出量は、現在の定義では、全ての船舶による地球全域排出量の約 84%と推定される。
- .3 EEDI の対象となる排出量は、現在の定義では、全ての船舶による地球全域排出量の約 81%と推定される。
- .4 船舶の航路あるいは貨物の輸送経路に応じて差別化する施策手段の環境効果は一律の施策の効果に比べ減少する。ただし本調査報告ではその減少量の予測は行わなかった。
- .5 旗国あるいは船主によって差別化する施策手段の環境効果は極端に下がると思われる。

海運以外の部門の排出量への影響

6.85 施策の環境効果は、海運部門の排出量削減だけでなく他部門においても見込まれる効果にも依存している。施策手段によりその効果は、他の部門の排出量が増加する場合もあれば減少する場合もある。増加は、海上輸送からのモーダルシフトによって起こる可能性が強い。減少は排出量の相殺によって起こる可能性が強い。両ケースを以下で検討する。

6.86 別の輸送形態へのシフトは、短距離海上輸送の場合に問題となることが多い。このことは価格弾力性及び交差価格弾力性といった指標によって裏付けられる。海運需要の価格弾力性は一般的には低いとされるが（上記参照）、短距離海上輸送及び内陸水上輸送の場合は価格弾力性が非常に高い。Beuthe 他（2001）^[13]は、ベルギー国内の内陸水上輸送の価格弾力性が、比較的長距離の場合の 1.3 から比較的短距離の場合の 2.6、の間にあると推定した。Oum 他（1990）^[25]は、石炭の内陸水上輸送需要は非弾力性で、小麦及び油の内陸水上輸送需要はかなりの弾力性があることを見出した。これらの研究は内陸水上輸送に着目したものだが、同様のことが近距離海上輸送にも当てはまる。オーストラリアでは、国内海運の価格弾力性は、国際海運に比べてずっと高い平均値 0.8 を示すとの報告がある。（Bureau of Transport and Communications Economics, 1990^[12]）。交差価格弾力性に関しては実例がほとんどないが、内陸及び近距離海上輸送における非常に高い価格弾力性は、鉄道あるいはトラック輸送などの他

の輸送形態との競争によるものと考えるのが妥当であろう。

- 6.87 近距離海上輸送における自己弾力性及び交差価格弾力性に関して入手可能なデータを分析すると、海上輸送の価格が鉄道及びトラック輸送に比較して上昇した場合、海上輸送モード離れが起こることが分かる。逆に、例えば燃料消費税によって、あるいは排出量取引制度における発電コストの算入によって、トラック及び鉄道輸送が割高となった場合は、近距離海上輸送へのモーダルシフトが起こる。海上輸送と陸上輸送のコストが同時に同じ程度まで上がる場合は、モーダルシフトは起こらない。
- 6.88 それ故に、海運コストを上げるような施策は、同時に他の輸送形態のコストが上がらない限りは、近距離海上輸送においてモーダルシフトが起こる可能性がある。自主対応による施策は海運コストを上げそうにないため、EEDI 及び EEOI の強制的な制約、METS、ICF の場合の方がモーダルシフトのリスクが最も高い。
- 6.89 この章で検討した施策手段の内の二つが、その施策設計の中に相殺メカニズムが含まれる。
- .1 ICF は、燃料税によって調達された基金を使って、他部門からの排出枠または他部門が生み出した排出枠を購入することができる。
 - .2 METS は、他の排出権取引制度とリンクして、一つの排出枠上限の下にある異なった部門あるいは地域からの排出量を取り込む。さらに、排出枠を競売に掛けて資金を調達し、この内の一部を使って他の部門から排出枠または他部門が生み出した排出枠を購入することができる。

ICF の相殺メカニズムは、他部門から排出権を購入するために利用可能な基金の割合による。一方の METS は、中心的な設計要素として、排出枠を超える海運部門のいかなる排出量も METS がリンクする他の取引制度における排出削減によって相殺されなければならないとの特性を有する。言い換えれば、ICF における相殺量は資金によって決まり、METS における相殺量は海運部門の排出枠と排出量によって決まる。

- 6.90 モーダルシフト及び相殺メカニズムが非海運部門の排出量に及ぼす影響を分析した結果を下記の通り要約する。
- .1 モーダルシフトは近距離海上輸送で起こりやすく、海運と鉄道あるいはトラック輸送など他の輸送形態との相対コストによって決まる。近距離海上輸送のコストを上げるような施策はモーダルシフトの要因となる。
 - .2 METS、ICF の両市場ベースの手段ともに他部門における排出量との相殺が可能となる。METS の施策設計による相殺量は環境目標との関連性があるが、ICF の施策設計における相殺量は、環境目標との明確な関連性はない。

施策の下で利用できる対策

- 6.91 要件遵守のために全ての排出削減対策が使えるとは限らない。施策の形式によって利

用できる対策が変わる。表 6-1 に示したように、EEDI に基づく技術施策オプションでは新造船に対する改善オプションが利用できる。EEOI に基づく運航施策オプションでは既存船舶の運航オプションが利用できる。市場ベースの施策手段では、他部門のオプションも含む全てのオプションが利用できる。

- 6.92 第 5 章で紹介した限界削減コストカーブは、排出を削減する全ての技術対策及び運航対策を対象としたものではないため、上記による差を定量化しても単なる試算ではない（限界削減コストカーブに含まれていない主な対策には、廃熱回収、ディーゼル - 電気推進、アジポッドシステム、太陽光発電などがある）。表 6-1 はより包括的な全体観を示したものだ。また以上のような問題はあるが、EEDI ベースのオプションと EEOI ベースのオプションの差をあえて示せば図 6-3 のようになる。
- 6.93 図 6-3 に、本報告書の限界削減コストカーブの対象とした対策の費用効果と削減ポテンシャルを示した（Appendix 4）。第 5 章で述べたように、MACC は予測される費用効果に対する達成可能な最大削減量をプロットしたものである。
- 6.94 図 6-3 において、緑色の線は EEDI ベースの施策を遵守するために利用できる対策について示したものであるが、ここではその EEDI 施策で、船体形状、プロペラ並びに推進システム、エンジンに対する各種改造対策が利用できるとの前提を設けた。改造対策が利用できると仮定するのであるから、このカーブに表れた EEDI 対策が既存の船舶にも適用され、新造船が新たに船腹に加わる場合も EEDI は大きくは変化しないことに注意されたい。赤線は EEOI ベースの施策を遵守するために利用できる対策を表わす。図 6-3 で分かるように、これには改造対策だけでなく運航オプション及びメンテナンスオプションが加えられている。
- 6.95 両ケースともに各対策の最大削減ポテンシャル（x 軸上の幅）は、施策手段として利用できる対策が適用可能な船種において実施されることを想定したものである。
- 6.96 このグラフによって、EEDI 基準の施策手段の費用効果削減ポテンシャルは EEOI 基準の施策手段の費用効果削減ポテンシャルと比較して約半分しかないことが分かる。EEOI 基準の施策手段で評価された対策の総ポテンシャルは EEDI 基準の施策手段で評価された対策の総ポテンシャルの 2.5 倍以上となる。現状の EEDI は新造船のみに適用されるので、短期的にはこの差はより大きくなる。EEDI、EEOI の両限界削減コストカーブ間の差は、EEDI では技術対策のみが利用可能であるのに対して EEOI では排出削減の運航対策も利用可能であるという事実起因するものである（表 6-2 参照）。

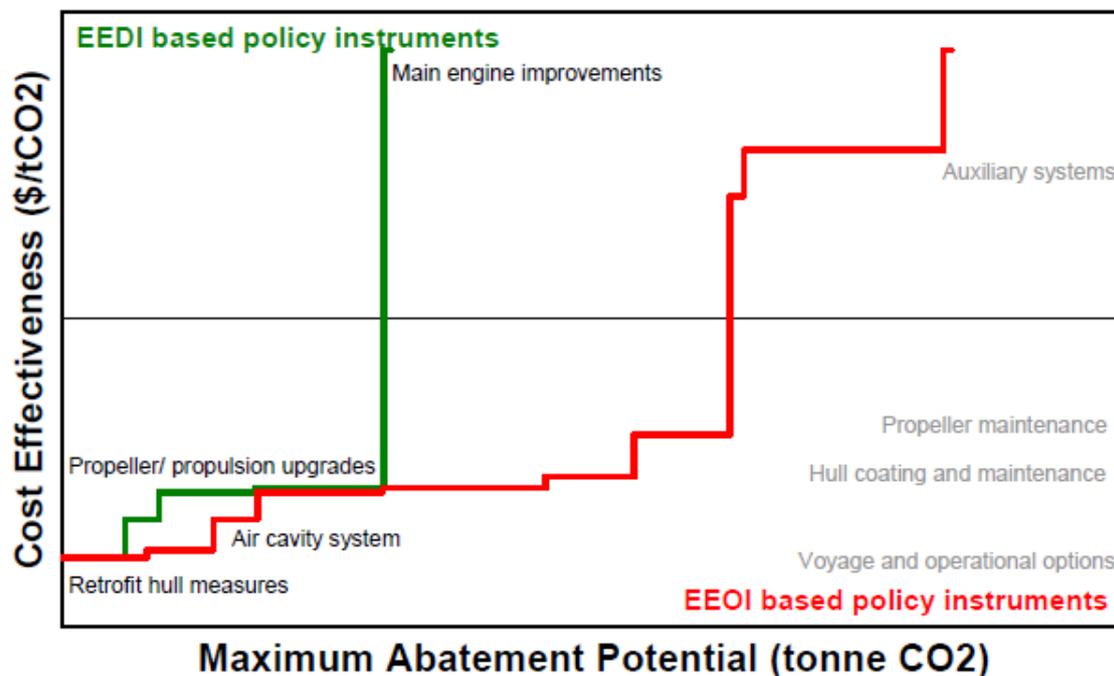


図 6-3 2020 年の限界削減コストカーブ（燃料価格：500 US\$/ton）

6.97 CO₂ 排出量基準の市場ベースの手段は、EEOI ベース施策で利用可能な全ての排出削減対策の利用が可能である。従ってそれらの削減ポテンシャルは少なくともそのままの数字が示される。さらに、6.85 項から 6.90 項で示したように、市場ベースの手段によって対策が他の部門で講じられることも可能である。

6.98 限界削減コストカーブに含まれていない排出削減の対策の 1 つは需要の減少である。費用効果の低い対策を強いるような施策は必然的に海運コストを上昇させ、その結果需要を減少させる。需要に与える価格の影響は需要の価格弾力性で示される。推定サンプル数は限られるが、海運業においてこの弾力性は、近距離海上輸送を除いて低いように思える (6.85 項から 6.90 項を参照)。研究結果の見直しの中で Oum 他は (1990)^[25] は、その弾力性が -0.06 から -0.25 の間にあると発表した。であれば例えば海運コストが 10% 上がると需要が 0.6% から 2.5% 減少することになる。Meyrick と Associates 他 (2007)^[23] も似た数値を報告した。このように需要がコストに与える影響は小さいと考えられる。

6.99 各種の施策手段を遵守するために利用できる対策を分析した結果を要約する。

1. METS、ICF および EEOI に基準を置く施策は、その遵守のために利用できる対策に制約がない。
2. EEDI 基準の施策は、その遵守のために利用できる対策に制約がある。さらに、短期的なポテンシャルも、その適用が新造船に限られるため限定される。

施策手段の適用性

- 6.100 施策手段及び遵守のために利用できる対策の対象となる排出量に加えて、環境効果は施策のリバウンド効果、さらには「言い逃れ」や「ただ乗り」による影響を受ける。これらをこのセクションで検討する。
- 6.101 一般的には、運航効率にしる、設計効率にしる、効率改善を目的とする施策はリバウンド効果に悩まされる場合がある^[8]。この「リバウンド効果」とは、効率を改善しても結果的にごくわずかな排出削減効果に終わってしまうことを指す。理由は、効率が改善されことで限界コストが減少し（海運コストが下がる）、結果として海運需要が増加するためである。需要が価格に敏感であるほど、すなわち需要の価格弾力性が高いほど、リバウンド効果は大きくなる。海運においては、証拠は僅かだが、価格の弾力性は低い。報告では、価格弾力性は、-0.06 から-0.29 の範囲にある^[9]。6.85 項から 6.90 項で説明したように、近距離海運における一般貨物の輸送が唯一の例外と思われる。その他の海上輸送ではリバウンド効果は小さいように思われる。
- 6.102 一般的に施策の対象範囲が限定されると、言い逃れをしやすくなる。ここでの「言い逃れ」とは「何らかの違法な行為」という意味で用いるのではない。「言い逃れ」は、施策手段が提示するものに対して、それに従わない法的な可能性を利用するという意味において「詐欺」とは区別される。船舶に対する気候変動防止施策との関連では、三通りの言い逃れの可能性が考えられる。
- 1 施策がある船種には適用されて他の船種には適用されない場合で、これら船種の機能が重なる場合、運航者は施策の対象にならない方の船種を使うことにより施策に対する言い逃れができる。
 - EEDI 基準の技術施策手段及び EEOI 基準の運航施策手段は、限られた船種に適用される。しかし EEDI 及び EEOI の対象となる船種は本質的に全ての貨物船であり、貨物船と非貨物船の間には機能的な重なりがほとんどないため、言い逃れの余地は少ないと思われる。
 - 2 施策が船の大きさに閾値を設ける場合、運航者は閾値を超える船舶の代わりに閾値を少し下回る小型の船舶を利用することにより施策に対する言い逃れが可能となる。
 - CO₂ 排出量基準の市場ベースの手段の提案内容には 400GT という大きさの閾値が計画されている。おそらく同じ閾値がここで取り上げる他の施策手段にも適用されるであろう。400GT 前後の船舶を概略調査した結果では、これらの大半はサービス船（浚渫船、曳航船、探査船）、漁船、旅客船、RO-RO フェリーを含むフェリーである。400GT 前後の貨物船は数少なく、そのほとんどが一般貨物船である。そのため言い逃れが起こるとすれば、主として技術施策手段及び運航施策手段の両者の対象とならない「その他」の船種で起こる可能性がある。従って、この種の言い逃れは、主として CO₂ 排出量基準の市場ベースの手段に対して発生しやすくなる。ただし、本調査報告はこの種の言い逃れの対象を定量化する立場にない。

- .3 施策が船舶あるいは貨物の経路によって差別化する場合は、船舶の経路を変更することによって言い逃れが可能となる。
- CO₂ 排出量を基準とする市場ベースの手段においては、施策手段中での「経路」の定義のされ方によっては、船舶が施策の対象とする地域外の港に寄港するか、あるいはそこで貨物を降ろすかもしれない。言い逃れをすることが利益をもたらすのであれば、すなわち、言い逃れのための経路変更によって発生する伴う追加のコストが、税金の支払いあるいは排出枠の返還を免れる利益よりも小さければ、船舶は制度に対する言い逃れをするようになる。我々は、このコストと利益を定量的に評価するに十分な証拠を持ち合わせていないが、定性的にこの種の言い逃れは税金または排出枠返還のレベルが高ければ起こりやすい。
 - EEDI あるいは EEOI のいずれかを基準とする指揮統制施策手段においては、運航者は非遵守船を施策手段の対象外地域に移すかもしれない。繰り返すが、当チームはこの種の言い逃れの件数を定量的に評価するに足る証拠を持ち合わせていない。

6.103 海運に対する気候施策の環境効果は、モーダルシフトの範囲によって影響を受ける。例えば気候施策の結果、海運の価格が上昇すれば貨物は海上輸送から他の輸送形態にシフトされるかもしれない。これによって海運部門の排出量は減少するが、他のモードの方が、輸送効率が低いためトータルの排出量が増える（第 9 章参照）。

6.104 「ただ乗り」は自主協定において起こりやすい。自主協定は本来、社会的圧力以外に強制する手立てがない。施策遵守のためのコストが上昇すると、ただ乗りの発生件数が増えやすい。従って、コストがかかる対策はただ乗りに悩まされることが多く、自主施策による環境効果は費用効果の高い対策に限定される。もっと一般的な意味では、これまで OECD で思い知らされたように、大抵の場合、自主協定の環境効果は低い^[9]。

環境効果に関する要約及び結論

6.105 このセクションでは次の四つの要素が施策手段の環境効果に与える影響を評価した。

- .1 施策の対象となる排出量
- .2 非海運部門の排出量の影響
- .3 関係者が施策による恩恵を受けるために利用できる対策
- .4 施策のタイプ

このセクションで取り上げた施策手段ごとにこれらの要素についての結論を総括し、表 6-3 にまとめた。

表 6-3 施策の環境効果の総括評価

評価基準	技術施策 オプション	運航施策オプション			市場ベースの手段	
		SEMP の 強制的な適用	SEMP の 自主活用	EEOI の 強制的な制約	METS	国際補償基金 (ICF)
施策の対象となる 排出量	現状は、新造船のみへの適用であるため、それほど多くない。適用船種を拡大するよう計算式を変えない限り、将来も全排出量の 81% までの増加にとどまる。	原則として全ての船舶に SEMP の開発を求めため、大量の排出量が対象となる。	この種の自主対策の実施程度による。	現状では全排出量の 84%。計算式を変更して、対象船種が増えれば、将来はさらに増加する。	原則として全ての船舶が METS の対象となるため、大量の排出量が対象となる。	原則として全ての船舶が ICF の対象となるため、大量の排出量が対象となる。
非海運部門の排出量に対する影響	近距離海上輸送でモーダルシフトが起こる可能性がある。	SEMP によって海運のコストがさほどは上がらないため、モーダルシフトは起きにくい。	SEMP によって海運のコストがさほどは上がらないため、モーダルシフトは起きにくい。	近距離海上輸送でモーダルシフトが起こる可能性がある。	近距離海上輸送でモーダルシフトが起こる可能性がある。 海運部門の排出枠上限を守るよう他部門で排出を削減する。	近距離海上輸送でモーダルシフトが起こる可能性がある。 他部門での排出削減が起こりうる。

評価基準	技術施策 オプション	運航施策オプション			市場ベースの手段	
		SEMP の 強制的な適用	SEMP の 自主活用	EEOI の 強制的な制約	METS	国際補償基金 (ICF)
排出削減のため認められる対策	新造船に対する設計対策。 海運部門で考えられる全ての対策の約 50%。	一種の管理計画として、SEMP は排出削減を求めるものではない。費用効果の高い排出削減方法を特定する。	一種の管理計画として、SEMP は排出削減を求めるものではない。費用効果の高い排出削減方法を特定する。	海運部門における運航対策及び設計対策。 即ち、海運部門で考えられる全ての対策。	海運部門における運航対策並びに設計対策、及び他部門での対策。	海運部門における運航対策並びに設計対策、及び他部門での対策。
施策手段の適用性	地理的な対象範囲を限定すると、「言い逃れ」が発生しやすい。	地理的な対象範囲を限定すると、「言い逃れ」が発生しやすい。	「ただ乗り」に悩まされる可能性がある。	地理的な対象範囲を限定すると、「言い逃れ」が発生しやすい。	地理的な対象範囲を限定すると、「言い逃れ」が発生しやすい。	地理的な対象範囲を限定すると、「言い逃れ」が発生しやすい。

6.106 全体として以下のように結論付ける。

- .1 市場ベースの施策手段は全ての船種及び大きさに適用可能で、他部門での対策も含めて全ての種類の排出削減対策が認められるため、潜在的に高い環境効果を有する。
- .2 METS の環境効果は排出枠上限によって決まる。それに対して ICF の環境効果は他部門から相殺排出枠を購入するために利用できる基金の額によって決まる。
- .3 EEOI 基準の運航施策手段は、現状では輸送に従事する全ての船舶に適用され、海運部門のすべての排出削減対策が認められるため、METS あるいは ICF よりも環境効果は幾分か低い。EEOI が全ての船種を対象とするように策定されれば、その強制的な制約による環境効果は市場ベースの施策手段の環境効果に近づく。
- .4 EEDI 基準の技術施策手段は、現状では対象が新造貨物船による排出量に限定される中で技術的な排出削減対策のみが認められるため、その環境効果は運航施策手段よりも低い。EEDI を全ての船種を対象とするように設定すれば、環境効果は増える。また、時間経過とともに船腹に占める新造船の比率が拡大するため、環境効果も増える。しかしながら、技術施策手段で認められるのは技術的な排出削減対策に限定されるため、その環境効果は依然として運航施策手段よりも低い。
- .5 施策手段をいかに選択しようとも、地域によって差別化する施策は、対象とする排出量が少なくなる上に「言い逃れ」の口実を与える可能性があり、環境効果が低い。
- .6 施策手段をいかに選択しようとも、自主協定は「ただ乗り」される可能性があるため、環境効果が低くなる。

費用効果

6.107 施策オプションの費用効果は主として以下の要因で決まる

- .1 奨励される排出削減対策の費用効果
- .2 施策スキームの実施及び運営に伴う行政管理費

報告の要求以上のものを求める施策手段に対する各要因を以下で分析する。その理由は、報告手段の費用効果は、その報告されたデータが、例えば入港税差別化あるいは識別表示をスキームとするような他の施策においてどのような使われ方をするかによって変わるためである。このようなスキームの効果を評価するのは本調査報告の範囲外である。

奨励された手段の費用効果

6.108 施策手段の費用効果ポテンシャルは限界削減コストカーブ（図 6-3）から読み取ることができる。限界コストカーブとは、「削減量当たりのコスト」に対する「達成

可能な削減量」を示したものである。

- 6.109 図 6-3 から、大部分の排出削減目標に対して、運航対策を利用できる施策の方が、技術対策のみを認める施策よりも費用効果が高いことが分かる。図 6-3 は Appendix 4 で説明する費用効果分析に基づいて、航海および運航オプション、船体の塗装及びメンテナンス、プロペラのメンテナンスが費用効果の高い対策であることを示す。それらは運航施策及び市場ベースの施策の手段によって奨励されるものであり、技術施策手段によって奨励されるものではない。
- 6.110 しかしながら図 6-3 に一例を示したような限界削減コストカーブは、現実を少し抽象化したものになっていることに注意しなければならない。今回の調査報告で提示した限界削減コストカーブは、船隊平均の費用効果を示したものである、例えば、ある対策が適用可能な全ての船種に適用した場合のネットのコストを示す。現実には、削減対策の費用効果は船舶の特性及び運航の方法に依存する。従って、その船隊平均では費用効果が高いとされる対策が、ある船舶では費用効果が低く、他の船舶では非常に高いというケースもある。逆に、船隊平均では費用効果が低いとされた対策が、ある船舶では費用効果が高いというケースもある。市場ベースの施策手段は、例えば、あるインセンティブレベルにおいて費用効果が高い全ての排出削減対策を実行し、残りの排出量に対しては排出枠を購入するか課徴金を支払う、といったようなやり方を含めた最適戦略を各船舶に模索させることができる。
- 6.111 市場ベースの施策手段の費用効果を比べた場合、主たる違いは価格変動の影響である。ICF で用いるような固定税制度は、排出権の価格が変動しやすい METS に比べて、投資する側から見てリターンの確実性がより高い。一般的に、不確かさは投資の先送りを生みがちで、その結果費用効果を下げる。しかしこの場合投資に対するリターンは使用された燃料の節約と低い排出量である。燃料価格の不安定さは手段の選択とは無関係である。燃料単価を 250 US\$/ton というより安い価格に想定し、排出税あるいは排出権単価を 30 US\$/ton というより高い単価に想定しても、排出量の数字には投資に対するトータルリターンの約 1/4 の変化しか表に出ない。これは、燃料価格が排出枠価格と同じように不安定である限りは、施策の選択によって不確かさが受ける影響は限られた範囲であることを意味するものである。
- 6.112 各種の施策手段の遵守のために利用できる対策の費用効果を分析した結果を以下に要約する
- 1 市場ベースの手段においては、他部門での排出削減も含めて考えられる全ての排出削減対策が利用可能であり、さらに市場ベースの施策の影響を受ける関係者が排出削減量の最適レベルを模索可能であるため、その費用効果は非常に高い。
 - 2 EEOI 基準の運航施策手段においては、考えられる全ての排出削減対策が利用可能であるため、その費用効果は高い。

- 3 EEDI 基準の技術施策手段においては、考えられる排出削減対策の一部しか利用できないため、その費用効果は中位のレベルにとどまる。

行政管理コスト

6.113 広義の「取引コスト」(transaction costs)には、プロジェクト提唱者及びスキームの実施を請け負った部署によって負担される削減のためのコスト(技術対策及び運航対策に関連するもの)を除く全てのコストが含まれる(Betz 2007^[14])。取引コストは二つのカテゴリに分けられる。

- 市場参加者がスキームの規則を遵守するためコスト
- スキームの行政管理コスト(administrative costs)

このセクションでは強制的な施策手段に焦点を当てる。自主協定の場合の取引コストが安いとの理由からではない - 経験論的には逆であるとの証拠がある(OECD 2003^[9])。むしろ、自主協定の行政管理的な取り決めは当該協定の関係者間の折衝によって決まるので、そのコストについて事前の話し合いはほとんどない。対照的に、強制的な施策手段を実施するためには最小限の行政管理を必要とし、事前の評価が可能である。

6.114 6.48 項から 6.71 項に示した施策手段の設計に基づいて、表 6-4 に示すような必要となる行政管理業務をリストアップした。

表 6-4 各種の施策手段の行政管理業務

	船舶	旗国	寄港国	その他の機関
EEDI の強制的な制約	EEDI の計算 EEDI の検証を受ける EEDI の報告	船舶の EEDI の登録	船舶の EEDI の検査	IMO が計算式を作成 IMO がベースラインと削減目標を設定
EEDI の強制的な報告	EEDI の計算 EEDI の検証を受ける EEDI の報告	船舶の EEDI の登録	船舶の EEDI の検査	IMO が計算式を作成
EEDI の自主報告	EEDI の計算 EEDI の検証を受ける EEDI の報告 (全て自主的な行動)			IMO が計算式を作成
EEOI の強制的な報告	EEOI の計算(毎年) EEOI の検証を受ける(毎年) EEDI の報告(毎年)	船舶の EEOI の登録	船舶の EEOI の検査	IMO がベースラインと削減目標を設定
SEMP の強制的な適用	SEMP の作成	SEMP の登録及び SEMP の携行を確認	SEMP の携行を確認	IMO が SEMP ガイドラインを設定
EEOI の	EEOI の計算(毎年)	船舶の EEOI の登録	船舶の EEOI の検査	IMO がベースライン

強制的な制約	EEOI の検証を受ける (毎年) EEDI の報告 (毎年)			と削減目標を設定
EEOI の 自主報告	EEOI の計算 (毎年) EEOI の検証を受ける (毎年) EEDI の報告 (毎年) (全て自主的な行動)			IMO が登録簿を保管
SEMP の 自主活用	SEMP の自発的作成			IMO が SEMP のガイドラインを設定
METS	排出量及び燃料消費量を監視 排出量及び燃料消費量を検証 排出量及び燃料消費量を報告 排出枠の取得 排出枠の返還	船舶の排出枠登録簿の管理 遵守の監視 排出枠の受領	排出枠返還証書の検査	国際機関が排出枠上限を設定 国際機関が排出枠を割り当て 国際機関が基金を管理
ICF*	排出量及び/又は燃料消費量を監視 排出量及び/又は燃料消費量を検証 排出量及び/又は燃料消費量を報告 税金の支払い	税金の徴収	税金納付証書の検査	国際機関が税金納付記録簿を保管 国際機関が基金を管理

* ICF の場合、船舶の管理上の責任は、施策の詳細設計によっては燃料油の供給元に移管することもできる(6.68 項および 6.69 項を参照)。

6.115 表 6-4 から、技術施策オプションには管理業務がほとんど存在しないことが明らかである。各船舶にとって EEDI を 1 回だけ計算すればよい。計算に必要な全ての係数は設計仕様に記載されており、計算に要するコストはわずかである。これらのコストは船舶寿命期間中に償却される。

6.116 EEOI は毎年あるいはある周期で計算が必要なため、EEOI に基づく運航施策手段の管理的な負荷は技術施策手段の負荷よりも重い。試験的運用の結果では、その指標は、ほとんどの運航者が必要データを管理情報システム中に保有していると思われた (CE Delft 他 2006^[6])。しかし強制的な手段においては、これらのデータ及びそこから求められる EEOI は定期的な、すなわち年に 1 回の検証が必要であり、それによってコストが増加する。

6.117 市場ベースの手段は、排出量を毎年、監視・検証・報告することを求められるため、EEOI に基づく運航施策手段と多くの管理的な負担を共有する。ただし EEOI とは対照的に、輸送実績の監視及び検証をする必要はない。代わりに金銭的な取

引または排出枠の返還に関連するコストが発生する。更に、旗国及びその他機関の行政負担は他の施策手段よりも重いように思える。

費用効果に関する要約及び結論

6.118 このセクションでは、二つの要因が施策手段の費用効果に及ぼす影響を評価した。

- .1 排出削減対策のコスト
- .2 施策スキームの実施及び運営に伴う行政管理コスト

これら二つの要因が全体の費用効果に占める相対比率は、施策全体の環境効果に依存する。施策が大きな環境効果を生み出すように設計された場合は（例えば、税金が高い、排出枠上限が厳しい、EEDI あるいは EEOI の目標値がベースラインよりもはるか下に設定された）、関係者はこの効果を達成するために、費用がかかる対策を数多く実施しなければならない。この場合全コスト中の行政管理コストの比率は低くなる。逆に環境効果を小さく設計すると全コスト中の行政管理コストの比率は上がる。

6.119 表 6-5 はこのセクションで取り上げた施策手段のこれら要因について結論を要約したものである。

表 6-5 施策の費用効果に対する評価のまとめ

評価基準	技術施策 オプション	運航施策オプション				市場手段	
		SEMP の 強制的な適用	SEMP の 自主活用	EEOI の 強制的な報告	EEOI の 強制的な制約	METS	国際補償基金 (ICF)
排出削減対策の 費用効果	中位のレベル 考えられる排出 削減オプション の一部しか利用 できない。	該当せず	該当せず	該当せず	良好。 考えられる排出 削減対策が全て 利用できる。	非常に良好。 考えられる排出 削減対策が、他 部門の対策も含 めて全て利用で きる。関係者は 市場原理に基づ いて最適削減レ ベルを決めるこ とができる。	非常に良好。 考えられる排出 削減対策が、他部 門の対策も含め て全て利用でき る。関係者は市場 原理に基づいて 最適削減レベル を決めることが できる。
行政管理コスト	低い。 EEDI の計算が 船舶の寿命の中 で 1 度だけ必 要。			高い。 EEOI の計算が 毎年必要	高い。 EEOI の計算が 毎年必要	高い 排出量の監視・ 検証・報告が毎 年必要。また排 出枠の返還が毎 年必要。	高い 排出量の監視・検 証・報告が毎年 必要。また金銭的 な取引が少なく とも年に一度発 生する

6.120 以下の結論にまとめられる。

- .1 大きな効果を出すように設計された施策手段では、削減対策コストがトータルコスト中の大きな比率を占める。削減対策コストが支配的な場合、市場ベースの施策手段は、運航者が最適な削減レベルを模索できるようにしているため、非常に高い費用効果を示す。
- .2 小さな効果を狙った施策手段では、行政管理コストがトータルコスト中の大きな比率を占める。行政管理コストが支配的な場合、技術施策手段は監視・報告・検証が比較的簡単なため、非常に高い費用効果を示す。

技術的な変革に対するインセンティブ

- 6.121 このセクションでは MEPC 57 で合意された「施策は、海運部門全体の技術革新及び研究開発の促進、さらにはエネルギー効率分野の先進技術の導入を支援するものでなければならない」との判断基準を取り上げる。このセクションでは技術変革のための施策に対するインセンティブについて検討する。
- 6.122 CO₂ の排出価格を引き上げる施策は、燃料価格の上昇が対応技術の導入を奨励すると同様に、排出削減技術の導入を奨励する。これらの技術の需要が増えれば、これらの技術の提供者は、より高いリターンを期待して R&D への投資を駆り立てられる (Baumol 2002^[11])。市場ベースの施策のみがこの効果を見込めるわけではない。EEOI あるいは EEDI の強制的な制約数値が、成り行きの効率改善以上のものを要求する場合、排出削減技術に対する需要が増大する。
- 6.123 一般的に、大気汚染のコストが上昇すると、R&D 及び技術革新への投資に対するインセンティブが強まる。市場ベースの手段の場合、これはより高い税金あるいはより野心的な排出枠上限が技術革新に有利に作用することを意味する。技術対策及び運航対策の場合は、ベースライン以下の削減量はそのインセンティブを決める。対照的に、自発的な施策あるいは自主報告を要求するにとどまる施策は、成り行きレベルを超える排出削減に対する見返りがないため、技術に対する需要を増大させるか、あるいは R&D を奨励する可能性はほとんどない。
- 6.124 6.75 項から 6.120 項で述べたように、技術施策オプションは技術的な排出削減対策のみを奨励する。現状の姿では、例えば EEDI はより効率的なエンジンあるいはより効率的な船体形状は評価するが、船体やプロペラのブラッシング頻度の増加は評価しない。従って、技術革新に対するインセンティブはこれらの対策だけに向けられる。対照的に運航施策及び市場ベースの施策は運航面の技術革新も奨励する。
- 6.125 以上の検討によって次のことが分かった。
- .1 市場ベースの手段は、全ての技術対策及び運航対策による船舶の効率向上を目的とする技術革新及び R&D に対してインセンティブを与える。なぜなら技

術革新及び R&D のリターンを増やすからである。

- .2 運航施策手段は、技術対策及び運航対策による船舶の効率向上を目的とする技術革新及び R&D に対してインセンティブを与える。なぜなら技術革新及び R&D のリターンを増やすからである。
- .3 技術施策手段は、技術対策による新造船の技術的効率の向上を目的とする技術革新及び R&D に対してインセンティブを与える。なぜならこれらの対策が技術革新及び R&D のリターンを増やすからである。
- .4 自発施策はリターンを増やさないため、技術革新及び R&D に対するインセンティブは弱い。

実施の現実的な可能性

- 6.126 このセクションでは MEPC 57 で提案された「GHG 施策は、実用的で、透明で、不正行為を許さず、行政的面の処理をしやすいものでなければならない」との基準を取り上げる。個々の施策オプションは、多くの技術的な問題、実用上の問題、法的な問題に直面する。これらは、施策の詳細設計、ベースライン設定、法的な定義・取扱・施行、さらには新しい機構/法人設立の必要性などに関連する。これらの形勢は、基本的な施策設計と同程度に実施面の詳細によっても変わる。特に「透明性」と「不正行為」に関してはそうである。そのため、これらの側面の評価はここでは難しい。
- 6.127 施策手段の行政的な処理のしやすさは、その行政面の複雑さによって決まる。複雑さの尺度は、少々乱暴だが、業務の数である。表 6-4 にその全体観を示している。表によればここで取り上げた中では市場ベースの手段がもっとも複雑で、EEDI の強制がもっとも簡単な手段である。
- 6.128 施策が実施可能となる前に解決しなければならない問題点といった観点から、表 6-4 をベースに以下のようにまとめられる。
- .1 「EEDI の強制的な制約数値」の場合、ベースラインと削減目標の設定が必要となる。6.15 項から 6.23 項、6.49 項から 6.54 項でベースラインの例を示した。これによってベースラインの設定は実行可能になったと結論できる。削減目標の設定には、おそらく EEDI の改善ポテンシャルに関する詳細の検討が必要となるであろう。
 - .2 「EEOI の強制的な制約数値」の場合、ベースラインと削減目標の設定が必要となる。6.24 項から 6.27 項に示したように、EEOI に関するデータからも、ベースラインがビジネスサイクルによって変動することが分かった。従って、ベースラインを設定するのはかなりの難題である。同様に、削減目標を設定するにも難しさがある。
 - .3 「SEMP の強制的な適用あるいは自主活用」の場合、SEMP のガイドラインを設定する必要がある。これはどちらかといえば問題ない作業である。
 - .4 「METS」の場合、排出枠上限の設定、排出枠の割り当て、登録簿の作成が必要で、おそらく基金の設立及び運営も必要となる。6.7 項から 6.12 項で述べ

たように、排出枠上限の設定には排出量データの収集、あるいは現行の算定法の改善が必要になる。別の課題として、これらの業務に当たる一つあるいは複数の機関も設立しなければならない。これら業務は全て他の部門での実績があり、基本的には実行可能と思われる。

- .5 「ICF」の場合、納税記録簿の管理及び基金の運営をおこなう一つあるいは複数の機関を設立しなければならない。これら業務は全て他の部門での実績があり、基本的には実行可能と思われる。
- .6 「ICF」及び「METS」ともにそれらの業務範囲を拡大するため、国際機関の設立を必要とする。これはかなり挑戦的な仕事となる。

施策評価のまとめ

6.129 このセクションではこれまでのセクションの施策評価を表にまとめる。目的はMEPC で検討中の各種提案の主たる強みと弱みを要約するためである。そのためこれまで評価した結果をあえて単純化したことに注意されたい。従ってこれまでの各セクションにおける詳細な評価を参照しながら、この表を活用するよう強く要請する。

6.130 この表は、報告の要求以上のものを求める施策手段に限定して適用される。その理由は、報告手段の有効性及び費用効果は、その報告されたデータが、例えば入港税差別化あるいは識別表示スキームのような他の施策においてどのような使われ方をするかによって変わるためである。このようなスキームの有効性の評価は本調査報告の範囲外である。

表 6-6 集約化した基準*に基づく施策評価のまとめ

評価基準	技術施策 オプション	運航施策オプション			市場ベースの手段	
		SEMP の 強制的な適用	SEMP の 自主活用	EEOI の 強制的な制約	METS	国際 GHG 基金
環境効果	長期的には 中位	低い	低い	高い	非常に高い	非常に高い
費用効果	中位	不明	不明	良好	非常に良好	非常に良好
技術変革に対する インセンティブ	高い、 ただし技術手段 に限定	低い	低い	高い	高い	高い
実施の現実的な可 能性	高い	高い	高い	低い	中位	中位

* これら四つの基準と MEPC 57 の関係は、6.72 項から 6.74 項で説明している。

結論

6.131 今回の調査報告の第 7 章（海運による将来の排出量シナリオ）及び第 8 章（気候影響）の結果によれば、海運による将来の排出量に対して「成り行き」シナリオで達成できる以上の削減が必要となる。第 5 章は排出削減のために講じることができる技術対策及び運航対策の例を示した。これら対策の内いくつかはコストが高いため、実施をサポートする施策が必要となる。このような状況においてこの章では、船舶による CO₂ 排出量を削減する施策オプションについて分析した。特に、IMO 内で議論されてきた施策オプションを中心に検討を進めた。これらの施策に対する定量的な評価を下すのは現状では不可能である。しかし定性的な評価としては以下のように整理できる。

- .1 「新造船 EEDI の強制的な制約」は、新造船による排出量の削減に強いインセンティブを与える費用効果の高い解決法と思われる。EEDI の最大の限界は、船舶設計のみに対応して運航対策が対象外となることである。新造船にのみ適用されるという意味においてその効果も限定的なものとなる。これら 2 つの要因のために、地球全体の CO₂ 排出削減手段としての「EEDI の強制的な制約」の環境効果及び費用効果には限界がある。
- .2 「EEOI の強制的な制約」は、輸送作業に従事する全ての船舶による排出量の削減に強いインセンティブを与える費用効果の高い解決法と思われる。それは技術対策、運航対策両者に対する刺激策となる。しかしながら、運航効率のベースラインの設定並びにその見直し、さらに目標設定のいずれもが難しい課題となり、このオプションの実施には技術的に非常な困難を伴う。
- .3 要請ベースでおこなわれる「強制的な EEOI の記録/報告」は、実行される可能性の高いオプションと思われる。ただし、達成可能な削減量は、その情報を利用するインセンティブスキームによって決まるため、このオプションの環境効果及び費用効果の評価が難しい。
- .4 「SEMP の自主活用」は、費用効果の高い排出削減対策に対する意識を高める実現性の高い取り組み方といえる。しかしながら、この手段は排出削減を求めているため、その環境効果は、費用効果が高い排出削減対策（すなわち、燃料節約効果が投下資本及び運航支出に勝るような対策）の利用可能性に依存する。同時に、このオプションは「成り行き」の状況を打破するような技術革新及び R&D の刺激策となるものでもない。
- .5 「SEMP の強制的な適用」は SEMP の自主活用に比べて適用範囲が拡大する。しかし排出削減に対するインセンティブは変わらない。
- .6 「METS」及び「ICF」は共に高い環境効果を有する費用効果の高い施策手段と思われる。これらの施策手段は、膨大な排出量を対象とし、海運部門の全ての対策が利用可能であり、さらに他の部門と排出量の相殺も可能である。市場ベースの手段として、これらは費用効果が高いと思われる。両施策手段ともに新しい機関の設立あるいは既存の機関の業務の拡大が必要であり、それらはかなり挑戦的な課題である。
- .7 「METS」の環境効果は制度設計上からも不可欠な要素であり、それゆえに達成される。対照的に、ICF の環境効果の一部は、他部門から排出枠を購入する

際に支出される基金の割合をどうするか決定にかかっている。費用効果、技術変革に対するインセンティブ、実施の実現可能性に関しては、両施策手段とも同じ程度と思われる。

参考文献

- 1 “Draft interim guidelines on the method of calculation of the energy efficiency design index for new ships” (Report of the Marine Environment Protection Committee on its fifty-eighth session). IMO document MEPC 58/23, annex 11.
- 2 DNV Technical Report 2007-1891 rev 3. Submitted to IMO as document MEPC 57/INF.12.
- 3 “Methodology for Design CO₂ Index baselines and recalculation thereof”. IMO document MEPC 58/4/8.
- 4 Anink, D. and Krikke, M. 2009. “The IMO Energy Efficiency Design Index: A Netherlands Trend Study”, CMTI Centre for Maritime Technology and Innovation, 7 January 2009.
- 5 CE Delft, MARINTEK, DNV and Germanischer Lloyd. 2006. “Greenhouse Gas Emissions for Shipping and Implementation Guidance for the Marine Fuel Sulphur Directive”, Delft, http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/transport/final_report.pdf
- 6 “Ship emission indexing in a logistic chain perspective”. Annex to IMO document MEPC 55/4/4.
- 7 “Ship Efficiency Management Plan”. Submitted to IMO by ICS, Bimco, Intercargo, Intertanko, and OCIMF as document MEPC 58/INF.7.
- 8 Sorrell, S. 2007. “The Rebound Effect: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency”. UKERC, London, UK. ISBN 978-1-903144-03-9.
- 9 OECD. 2003. Voluntary Approaches for Environmental Policy: Effectiveness, Efficiency and Usage in Policy Mixes. ISBN 978-92-64-10178-4.
- 10 “Proposal for elements to be included in an IMO strategy on greenhouse gases”, IMO document MEPC 49/4/5.
- 11 Baumol, W.J. 2002. The Free-Market Innovation Machine – Analyzing the Growth Miracle of Capitalism. Princeton University Press. ISBN 978-0-691-11630-3.
- 12 Bureau of Transport and Communications Economics. 1990. “Freight Flows in Australian Transport Corridors”. Occasional Paper 98, Canberra, Australia.
- 13 Beuthe, M., Jourquin, B., Geerts, J.-F. and Koul à Ndjang’Ha, C. 2001. “Freight transport demand elasticities: A geographic multimodal transportation network analysis”. *Transportation Research E*. 37, 253–266.
- 14 Betz, R. 2007. “Emissions trading to combat climate change: The impact of scheme design on transaction costs”, Centre for Energy and Environmental Markets. University of New South Wales, Sydney, Australia.
- 15 Faber, J., Boon, B., Berk, M., den Elzen, M., Olivier, J. and Lee, D. 2007. “Aviation and maritime transport in a post-2012 climate policy regime”, CE Delft, Delft.
- 16 Corbett, J.J., Winebrake, J.J., Green, E.H., Kasibhatla, P., Eyring, V. and Lauer, A. 2007. “Mortality from Ship Emissions: A Global Assessment”, *Environmental Science & Technology*. 41, 8512–8518.
- 17 ExternE, 2005. “ExternE, Externalities of Energy, Methodology 2005 update”, ed. Bickel, P. and Friedrich, R. European Commission DG for Research, Sustainable Energy Systems. <http://www.externe.info/brussels/methup05a.pdf> accessed on 20 December 2008
- 18 Hanley, N., Shogren, J.F. and White, B. 1997. *Environmental Economics in Theory and Practice*, Oxford University Press, New York.
- 19 Hein, L. and Blok, K. 1995. “Transaction costs of energy efficiency improvement” in *Proceedings of the 1995 Summer Study: Sustainability and the Reinvention of the Government – A Challenge for Energy Efficiency*, ed. Persson, A. The European Council for an Energy Efficient Economy, Stockholm (NWS-95056).
- 20 IPCC. 2007. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- 21 Kågeson, P. 2007. “Linking CO₂ Emissions from International Shipping to the EU ETS”. Report commissioned by the Federal Environment Agency, Germany, July 2007.
- 22 Marbek Resource Consultants, PricewaterhouseCoopers; International Institute for Sustainable Development, 2004, “Administration and transaction cost estimates for a greenhouse gas offset system”, final report, in Betz, R. 2007. “Emissions trading to combat climate change: The impact of scheme design on transaction costs”.
- 23 Meyrick and Associates, GHD and Booz Allen Hamilton. 2007. “International and Domestic Shipping and Ports Study”. Wollongong, Australia.

- 24 Preiss, P., Friedrich, R. and Klotz, V. 2008. "Report on the procedure and data to generate averaged/aggregated data", deliverable No. 1.1 – RS 3a, NEEDS integrated project.
- 25 Oum, T.H., Waters, W.G. and Yong, J.S. 1990. "A survey of recent estimates of price elasticities of demand for transport". Infrastructure and Urban Development Department, The World Bank, Policy Research Working Paper number 359.
- 26 Russell, C.S. and Powell, P.T. 1999. "Practical considerations and comparison of instruments of environmental policy", in Handbook of Environmental and Resource Economics, ed. van den Bergh, J.C.J.M. Edward Elgar Publishing Ltd., Cheltenham, UK.
- 27 Skjølsvik, K.O., Andersen, A.B., Corbett, J.J. and Skjelvik, J.M., 2000. "Study of greenhouse gas emissions from ships" (MEPC 45/8: Report to International Maritime Organization on the outcome of the IMO Study on Greenhouse Gas Emissions from Ships). MARINTEK Sintef Group, Carnegie Mellon University, Center for Economic Analysis, and Det Norske Veritas: Trondheim, Norway.
- 28 Stern, N. 2006. "Stern Review report on the economics of climate change"
http://www.hm-treasury.gov.uk/stern_review_report.htm accessed on 15 January 2009.
- 29 Torvanger, A., Bogstrand, B., Bieltvedt Skeie, R. and Fuglestvedt, J.S. 2007. "Climate regulation of ships", CICERO Report 2007:7.
- 30 Tol, R.S.J. 2007. "The Social Cost of Carbon: Trends, Outliers and Catastrophes", Economic Discussion Paper 2007-44
<http://www.economics-ejournal.org/economics/discussionpapers/2007-44>, accessed on 15 January 2009.
- 31 Tietenberg, T.H. 2006. "Emissions Trading. Principles and Practice". Resources for the Future, Washington D.C., USA.
- 32 Varian, H.R. 2005. "Intermediate Microeconomics", 7th international student edition, W. W. Norton & Company Inc., New York, USA.
- 33 Zylicz, T. 2004. "Ekonomia srodowiska i zasobow naturalnych" (*Economics of the environment and natural resources*), Polish Economic Press, Warsaw. ISBN 83-208-1521-5 (978-83-208-1521-4).

第7章 国際海運による排出量の将来シナリオ

はじめに

- 7.1 この章では、国際海運による排出量の将来シナリオを提示する。このシナリオは、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の SRES 中の筋書き (Nakicenovic 他 2000[6]) で示された地球規模の発展予測に基づき作成した。すなわち本プロジェクトの策定シナリオは、基本的には IPCC SRES シナリオで示された全体将来像に沿った海運と海上貿易の詳細版と位置付けられる。シナリオの作成過程において当調査チームは、フェーズ1の「検討項目」(Terms of reference) の1.3に記された「各種の規制シナリオ」(different regulatory Scenarios) という表現を海運によるCO₂の排出量の削減を要求する『具体的な』規制施策や指令はないと解釈した。このシナリオは、将来の排出量に影響する重要な経済的変数、技術的変数、運航的変数を特定するために利用される。当然ながら『具体的な』施策の効果として、技術的な差異(船舶効率及び使用燃料種類)は生じる可能性もある。その他の汚染物質に関しては、改定 MARPOL Annex VI が適用されるものと仮定した。
- 7.2 この章では2050年までの船舶による排出量に影響を及ぼす三種類の駆動変数(driving variables)を特定した。これらの変数は、(1) 経済 (2) 輸送効率 (3) エネルギー、のカテゴリに分類される。これら三つのカテゴリに属する主要パラメータの値は、専門家の意見と分析に基づく「オーペンデルファイ (Delphi) プロセス」を使って作成された。1960年代に Rand Corporation で開発されたこのプロセスは、各分野の専門家グループに対し、意見の違いにはっきりと妥協や合意することなく、各パラメータに対する最良の情報源を信頼させる手法である[22]。今回の作業ではこれらパラメータの値を地球全体の船腹排出インベントリのモデルに使ったが、これは前の章でインベントリモデル用に修正されて検討されたものである。全体で324通り(2020年シナリオと2050年シナリオがそれぞれ162通りずつ)のシナリオをモデル化し解析した。この解析結果に基づき、2050年までに起こり得る海運による排出量の変動範囲を提示した。

IPCC SRES シナリオ

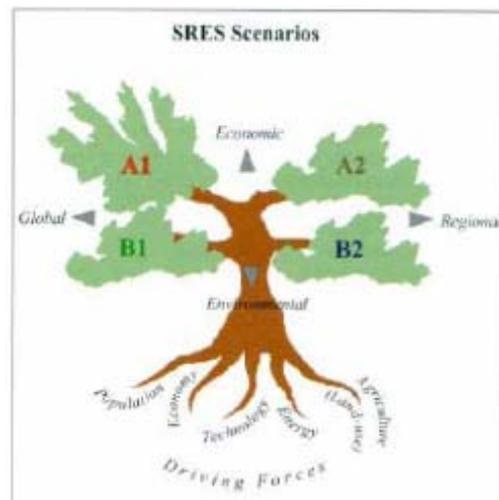
- 7.3 シナリオプランニングは不確かな将来を予測する研究者にとって共通のツールである。シナリオプランニングの定義には以下のようなものがある[1]。
- .1 「将来そうなるかもしれないという『一つの』内部的統一見解。単なる予測ではなく、可能性のある将来像として下した結論」[2]
 - .2 「個人の決定事項が実行されるかもしれない将来環境のどれかひとつに関する個人的概念を順位付けする『一つの』ツール」[3]
 - .3 「組織の決定事項が実行されるであろう将来像を思い描くための決められた『一つの』手法」[4]

シナリオは、しっかりした決定を導き、これらの決定が想像しうる将来の世界の中で

どのような結果を生むのかテストするのに役立つ[5]。この章では、排出削減オプションに関する政策決定者の戦略的思考をサポートするため、シナリオを使って将来の排出量の変動範囲を予測する。

7.4 1992年にIPCCは、気候変動モデルに対して状況設定及び排出量データを提供する排出シナリオのセットの作成を開始した。このシナリオは排出量のベースラインを設定し、それに対して技術の変革、経済成長、人口統計学的推移を変えて排出量を予測するものである[6]。このシナリオはその大部分を2000年に第3回アセスメント報告用に、さらに2007年には第4回アセスメント報告及びIPCC排出量シナリオに関する特別報告(SRES)[7]用に修正した。IPCCはシナリオに以下の用語を使用する[8]。

- ・筋書き (Storyline) : あるシナリオ (あるいはシナリオの1ファミリー) の物語的記述。メインシナリオの特性並びに動学、そして重要な駆動力 (driving force) 間の関係に重きを置いたもの。
- ・シナリオ (Scenario) : 明確なロジック及び定量的な筋書きに基づく将来予測
- ・シナリオファミリー (Scenario family) : 人口統計的、政治的社会的、経済的、技術的筋書きを共有する一つあるいは複数のシナリオ[8]



IPCCの筋書き (IPCC)

7.5 図7-1は、SRESで策定されたさまざまな筋書きを示したものである（**訳注：P128のFig 7.1ではなく、このページの図番のない図**）。それぞれA1、A2、B1、B2と名前がつけられた。図中に駆動力が示されているがそれらは人口、経済、技術、エネルギー、土地利用、農業などである。これらの駆動力は二つの大きな動き、すなわち(1)グローバル化 vs 地域化および(2)環境価値 vs 経済価値、に対して予測される。IPCCの報告書から抜粋した各筋書きの要旨を以下に示す（各筋書きにはさまざまな個別シナリオが含まれる）[6, 7]。

- .1 **筋書きA1** : 急激な経済成長、世紀半ばにピークに達しその後は下り坂になる世界人口推移、効率改善新技術の積極的な導入、といった変化を伴う未来社会。人口当たりの所得格差を是正するための経済・文化の収束及び生産能力増強が

主たる課題となる。このような未来社会で人々は環境品質よりも個人的な富を追及する。

2. 筋書きA2： 世界人口の増加が継続する一方で、他の筋書きと比べて断続的で緩やかな地域的な経済成長が継続する、非常に不均一な社会。
3. 筋書きB1： 筋書きA1と同じ世界人口推移で、経済構造がサービス・情報経済に向かって急速に変化する収束社会。省資源志向が強まり、環境及び省資源技術の導入が進む。
4. 筋書きB2： 経済的、社会的、環境的持続性に対する地域的な解決を重視する社会。人口が連続的に増加し（A2よりは緩やか）、中位の経済成長を伴う。

7.6 IPCC はこれらの筋書きを使ってさまざまな駆動力の値を推定し、結果的に六つのモデル化チームで 40 通りのシナリオを作成した。IPCC はこれらのシナリオに確率論は適用しなかった。4 通りの筋書きから 6 グループのシナリオが作成された。A2、B1、B2 ファミリに属するのが各々1グループ、A1 ファミリが 3 グループである。3 個の A1 シナリオは将来のエネルギー利用を以下のように特徴づけて使い分けた。すなわち A1FI（化石燃料集約型）、A1T（先進技術による非化石燃料シフト型）、A1B（エネルギー源バランス型）。

7.7 IPCC シナリオの重要な駆動変数の特定は、下記に示す環境影響の IPAT モデル及び CO₂ 排出量の関連モデル中によく出てくる次の関係式を使った。

$$\text{影響} = \text{人口} \times \text{豊かさ} \times \text{技術}$$

$$\text{CO}_2 \text{ 排出量} = \text{人口} \times (\text{GDP}/\text{人口}) \times (\text{エネルギー}/\text{GDP}) \times (\text{CO}_2/\text{エネルギー})$$

IPAT モデルによって前述の四つの重要な駆動要因、すなわち人口、経済、技術、エネルギーの重要な関係が単純ではあるが端的に示された。40 通りの IPCC シナリオのデータ表は http://sres.ciesin.org/final_data.html を参照されたい。

シナリオの作成方法

7.8 本プロジェクトは分析のためのシナリオを作成するにあたり、IPCC とよく似た手法を採用した。シナリオ構築用の Schwartz の方法[9]を使って、将来の船舶による排出量に影響を与える重要な駆動変数を特定した。これらの変数は、表 7-1 に示すように三つのカテゴリに分類できる。またこの表によって各変数の将来値に影響を及ぼす関連要素も分かる。

表 7-1 シナリオ分析に使用する駆動変数

カテゴリ	変数	関連要因
経済	海運需要 (ton-mile/year)	人口、世界全体と地域の経済成長、モーダルシフト、部門間の需要シフト
輸送効率	輸送効率 (MJ/ton-mile) 船隊構成、船舶技術、運航によって変わる	船舶設計、推進システム、船舶速力、目的は別にあるが、GHG 排出と因果関係がある規制

エネルギー	海運燃料炭素画分 (C-g/燃料エネルギーの MJ)	燃料のコスト及び入手性 (例えば残留燃料、流出燃料、バイオ燃料、その他)
-------	-------------------------------	--------------------------------------

7.9 この調査研究では、CO₂ 排出量をシナリオパラメータとして詳細にモデル化した。その他汚染物質の排出レベルはエネルギー消費量を基準にして計算し、MARPOL 規制も考慮した。その他汚染物質の排出削減に関する個別のシナリオは作成しなかった。

7.10 これらの駆動変数は、船舶カテゴリごとに影響の仕方が異なる。そこで国際海運船腹を三つのカテゴリに分けて、上記の要因の全体影響の仕訳を可能とした。すなわち

- .1 沿岸海運—地域的な (近距離) 海運に使われる船舶。ほとんどが小型船及び Ro-Ro 客船
- .2 外航海運—大陸間貿易用の大型船
- .3 コンテナ船 (全ての大きさ)

この分類によって、さまざまなシナリオに対して、成長率、効率、燃料消費量などを変えたモデル化が可能となった。大型船と小型船の境界は通常 15,000 DWT 近傍に設定されるため、コンテナ船以外の船腹の大半が外航海運船とみなされる。小型のコンテナフィーダ船は近距離船とみなすことも可能であるが、その需要は一般的なコンテナ輸送の需要とリンクする。そこで全ての純コンテナ船を一つのカテゴリにまとめることとした。

7.11 この分類に基づいて、IPCC シナリオファミリ (すなわち A1FI、A1B、A1T、A2、B1、B2) ごとに各変数の値を推定した。これらの値は「オープンデルファイ法」によって求められた。これは、議論と熟考を繰返した結果まとまった専門家の意見を尊重するという方法である。このケースでは、世界中から集まった海運の専門家で構成されたプロジェクトチームがミュンヘンで開催された 3 日間作業部会に出席し、各変数、各変数の値に影響する要因、各変数が全体のシナリオロジックの中で果たす役割などについて議論した。この期間中、各変数の初期パラメータ値が議論と討論を経て決定された。この作業部会に続き、変数の推定及びシナリオモデルの設計精度の改善が、e メール、2008 年 4 月 25 日のプロジェクトチームのウェブ会議、2008 年 5 月の電話会議などの場で話し合われた。シナリオのパラメータ化の作業は 2008 年 6 月 3 日、4 日にロンドンで開催されたチーム作業部会をもって終了した。

シナリオモデル入力値

経済成長と海上輸送量の伸び

7.12 輸送に対する需要は世界船腹の規模と活動レベルを決定し、同時に船舶による排出量のもっとも重要な駆動力でもある。輸送の将来需要は、貿易の拡大、工場の立地、原料の消費量、貿易形態の変化、新規航路開拓の可能性などによって変わる。ある

種類の貨物に対する輸送需要がこの市場の船舶数に比べて少ない場合、減速措置が奨励されて輸送効率が上がるという意味では、船舶による排出量も海運市場に敏感である。逆に相対的に船腹が不足している場合は、より高速で運航して効率が下がり排出量が増える。この種の市場不安定さは未だモデル化されていない。その代わりに、シナリオモデルでは、経済成長の予測に基づいて将来の輸送需要を推定した。さらに将来の輸送需要に見合う理想的な成長率で船腹量が増えると仮定した。

- 7.13 経済成長と海上輸送量の伸びの間には歴史的に見ても強い相関がある。これまでの調査研究でも将来の輸送需要予測にこの相関関係を使った[11]。問題の複雑さ及びGDPと海運のこれまでの強い関連性を考えれば、この相関関係を利用することが不適切だとは言えない。しかし、この方法では他の重要な動向を見落とす危険性がある。海洋政策研究財団（OPRF）は最近 IPCC A1B シナリオに基づく将来の海上貿易量に関する基礎調査報告の結果を発表した[21]。これら二通りの手法の概要と結果について紹介する。

GDP との歴史的な相関から類推した輸送需要予測

- 7.14 世界の GDP と海上輸送需要の間の歴史的な相関が [11] に示されている。この相関に基づいてシナリオごとに将来の ton-mile 需要を予測した。今回のシナリオモデルでは、外航海運、沿岸海運、およびコンテナ海運を区別するため、予測された ton-mile 量をモードごとに分配する必要がある。この分配は、各種 SRES シナリオの地域的な特性及びコンテナ輸送の急成長を考慮したものとした。この 20 年間でコンテナ輸送は年間 10% 近くの伸びを示した[10]。ただしこの傾向が 2050 年まで継続するとは想定しにくい。なぜなら、もしそうなるとコンテナ輸送量単独で世界全体の海上輸送量の予測 ton-mile 量を超えてしまうからだ。その代わりにコンテナ輸送の平均成長率を他の貨物輸送よりも 2% 高いと仮定した。その結果世界全体の ton-mile 量に対するコンテナ輸送の比率が 2007 年の 24% に対して 55% という結果になった。2020 年の予測は 2050 年のシナリオから指数関数的に内挿した。このようにして求めたシナリオの入力値を表 7-2 に示す。この表はシナリオファミリーごとに将来の ton-mile 量を 2007 年に対する指数表示で示したものである。例えば、2050 A1B シナリオファミリーの外航海運の 320 という数字は、2050 年の外洋航行の ton-mile 量が 2007 年に比べて 3.2 倍になることを意味する。

表 7-2 GDP との相関から求めた 2050 年の ton-mile 量指数 (2007 年を 100)

2050	A1B	A1F	A1T	A2	B1	B2
Ocean-going shipping	320	320	320	240	220	180
Coastwise shipping	320	320	320	270	220	220
Container	1230	1230	1230	960	850	690
Average, all ships	540	540	540	421	372	302

OPRF A1B シナリオに基づく輸送需要シナリオ

- 7.15 日本の OPRF が現在、本格的な調査研究を実施中であるが、その中で 2050 年までの輸送需要 (ton-mile) を IPCC A1B シナリオに基づいて予測している。この興味深い、そして詳細なシナリオの中で、OPRF は GDP と ton-mile 量との相関をコンテナ輸送にのみ適用した。OPRF は他の貨物（ドライバルク、原油、LNG、石油製品）に対しては、総人口や一次エネルギー消費量といった異なるパラメータを使用した。このようなパラメータは IPCC も検討したが、その増加率は GDP よりも低い。そのためこのような予測による輸送需要は、GDP を全ての増加率に使った場合よりも低く出る。次に、OPRF は、輸送形態の変化あるいはモーダルシフトによって平均輸送距離も変化すると想定した。OPRF が想定する重要な将来展開には、パナマ運河の拡張、あるいはミャンマーから中国（2030 年代）、中東からインド（2030 年代）、ロシアから中国（2010 年代）へのガスパイプラインの開通なども含まれる。さらには北アフリカからヨーロッパへのパイプラインの延長（2030 年代）、シベリア鉄道近代化の完工（2030 年代）なども想定された。鉄道は東アジアからヨーロッパまでのコンテナ輸送のある一定の比率を担うであろう。東アジアとヨーロッパ間の北極海航路が商業的に注目を集める（2040 年代）ことも想定された。極海域における船舶の安全航行及び汚染防止を保証する観点からの IMO 内の作業（Polar Code の策定）もこのような変化を実現させるために重要な意味を持つ。さらに、2020 年から 2050 年までの鉄スクラップリサイクルの増加は鉄鉱石の生産量を約 5% 減少させることに相当するという。要するに、OPRF は 2050 年の A1B シナリオにおける輸送需要を、GDP からの類推と比較して約半分と予測する。
- 7.16 OPRF シナリオでは広範囲の船種に対して輸送需要が予測された。これら船種を今回のシナリオの該当カテゴリに統合して、OPRF の A1B ton-mile 量を IMO の A1B ファミリー用に編集した。IMO の他のシナリオファミリーに対しては、地域化、GDP の伸び、その他のシナリオ要素の A1B との相対的な差に関して判断を加え、その結果以下のシナリオを作成した。A1B は詳細な分析の結果であるが、他のファミリーはそうでないことに注意されたい。2020 年の予測は 2050 年のシナリオから指数関数的に内挿した。こうして作成したシナリオを表 7-3 に示す。

表 7-3 OPRF の 2050 A1B 詳細シナリオを参考に予測した ton-mile 指数(訳注；英文には index は抜けているが本来 Tonne-miles index とあるべき) (2007 年を 100)

2050	A1B	A1F	A1T	A2	B1	B2
Ocean-going shipping	170	170	170	140	150	130
Coastwise shipping	170	170	170	160	150	150
Container	570	570	570	330	380	360
Average, all ships	266	266	266	188	205	187

この調査研究で使用する ton-mile 需要予測

7.17 上記2種類の手法は各々不確かさがあることが判って居るので、両手法の平均値を使用すべきことで合意した。平均値であれば歴史的な相関と貿易パターンの変化や極海航路の開通なども見込んだ将来動向の予測という両方の見方を取り込むことができるだろう。さらに、ある余裕代を持たせて両手法による予測値を包含するシナリオの上下限を設定することも決定した。これら予測結果の相対比較を図7-1に示した。この調査研究で使用するこのような輸送需要予測 (ton-mile) 結果を表7-4、表7-5、表7-6にまとめた。

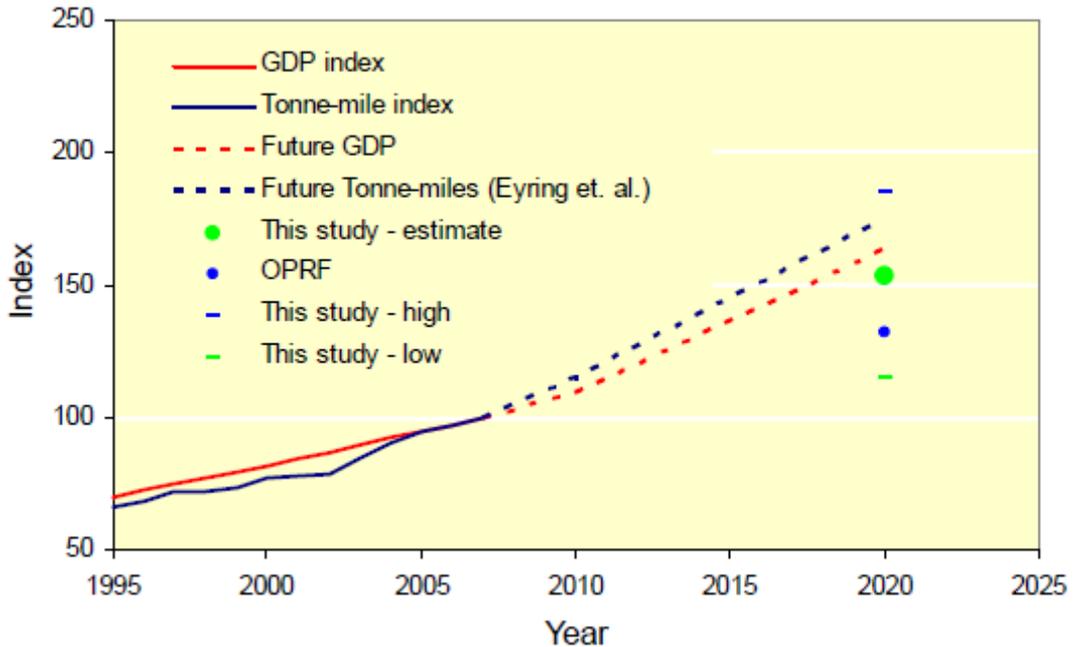


図 7-1 輸送需要の予測基本図

輸送需要予測の原則 シナリオごとの輸送需要を、(1) SRES の GDP 予測と歴史的な GDP の相関の組合せ（青い破線）、(2) SRES の GDP 予測と OPRF の想定、の組合せによって予測した。この調査研究で使用するのはその平均値である（緑のドット）。上下限値は(1)(2)の手法による結果よりも夫々高い、または低い値となった。

表 7-4 本調査研究で使用する輸送需要予測 (ton-mile) (2007 年を 100 とする)

2050	A1B	A1F	A1T	A2	B1	B2
Ocean-going shipping	245	245	245	190	185	155
Coastwise shipping	245	250	245	215	185	185
Container	900	875	905	645	615	525
Average, all ships	402	397	403	302	288	247

2020	A1B	A1F	A1T	A2	B1	B2
Ocean-going shipping	131	131	131	121	120	114
Coastwise shipping	131	132	131	126	120	120
Container	194	193	195	176	173	165
Average, all ships	146	146	146	135	133	127

表 7-5 本調査研究で使用する輸送需要予測の上限 (ton-mile) (2007 年を 100)

2050	A1B	A1F	A1T	A2	B1	B2
Ocean-going shipping	383	383	383	262	252	193
Coastwise shipping	383	395	383	315	252	252
Container	2700	2588	2723	1638	1525	1203
Average, all ships	939	913	945	597	558	441
2020	A1B	A1F	A1T	A2	B1	B2
Ocean-going shipping	150	150	150	134	132	122
Coastwise shipping	150	152	150	142	132	132
Container	271	267	272	233	228	212
Average, all ships	179	178	179	159	155	145

表 7-6 本調査研究で使用する輸送需要予測の下限 (ton-mile) (2007 年を 100)

2050	A1B	A1F	A1T	A2	B1	B2
Ocean-going shipping	157	157	157	138	136	124
Coastwise shipping	157	158	157	147	136	136
Container	300	296	301	254	248	229
Average, all ships	191	190	192	167	163	150
2020	A1B	A1F	A1T	A2	B1	B2
Ocean-going shipping	115	115	115	110	110	107
Coastwise shipping	115	115	115	112	110	110
Container	139	139	140	133	132	128
Average, all ships	121	121	121	116	115	112

表 7-7 シナリオ入力値 (年間成長率として一括)

	A1B	A1F	A1T	A2	B1	B2	
GDP ⁽¹⁾	3.9%	4.0%	3.6%	2.4%	3.3%	2.7%	
Total transport demand	Base	3.3%	3.3%	3.3%	2.6%	2.5%	2.1%
	High	5.3%	5.3%	5.4%	4.2%	4.1%	3.5%
	Low	1.5%	1.5%	1.5%	1.2%	1.1%	0.9%

(1) 2000 年から 2050 年の世界 GDP (年間) の平均成長率[8]

輸送効率

7.18 エネルギー効率の改善及び船舶による CO₂ 排出量の削減に利用できる手段は、第 5 章及び本報告書の Appendix 2 にて説明した。第 5 章では CO₂ 排出削減ポテンシャルの評価もおこなった。このセクションでは、将来の輸送効率に関するシナリオを提示する。

7.19 海運界の輸送効率改善には長い歴史がある。船舶の大きさが決まると、速度が燃料消費量を決定するもっとも重要なパラメータとなる。速度と「標準的な」運航パターンの間にはある種の関連がある。一般的には、船主は速度に余裕を持った船を発注し、運航会社に対してある限度内でそれを自由に変更する裁量を与える。このフレキシビリティがいくつかの場面で非常に役に立つ (運河あるいは港の進入溝、あるいは運賃が高い場合)。この措置によって、世界船腹としても輸送需要の変動に対応する柔軟性を与えられたことになる。さらに、技術の進歩によって長い間に効率が改善されてきた。例えば、蒸気タービンからディーゼルエンジンへの転換、それに伴う改善、知識の蓄積による船体並びにプロペラの設計改良並びに最適化、製造ツール並びに解析ツールの開発などである。今日の船舶の効率は、設計時点では経済的に最適と考えられたものを反映したものになっていることも補足したい。この

ような考えから、将来シナリオをモデル化する場合、効率を三つの要素に分けることとした。

- .1 大きさによる効率。大きな船舶ほど効率がよい（大型の優位性を発揮できる量の貨物が確保される前提で）
- .2 速度による効率
- .3 船舶の設計及び運航方法による効率

大きさによる効率

7.20 大型船が小型船に代わって船腹構成に加わった場合は一般的には輸送効率が上がり、逆も成り立つ。大きさによる影響は、今回のシナリオモデルで将来の船腹構成を変化させることによって検証した。2020年の船腹構成についてはロイド船級協会・フェアプレイ研究所（LRFPR）による予測がある。このLRFPRの船腹予測はIMO専門家グループが示した2020年の船腹予測にほぼ近い[12]。2020年の船腹は、しかるべき公称輸送能力を備えているといえる。しかしながら、ton-mileで表わした輸送需要予測はシナリオによって異なるものとなっているため（上記参照）、2020年の船腹予測を今回のシナリオに合わせて調整する必要がある。そこでカテゴリごとの輸送作業のポテンシャルを表わす指標としてGT（gross tonnage）総計を使用した。2007年の船腹総GT及び2020年の船腹総GT予測を表7-8に示す。

表 7-8 カテゴリ別の船腹総GT及び成長指数

	2007	2020	Nominal GT index
Ocean-going shipping	536 731 017	954 049 435	178
Coastwise shipping	80 986 919	95 022 648	117
Container	126 217 091	348 078 393	276

7.21 個別の船腹構成ごとの重み係数は、公称GT指数を各シナリオのton-mile予測指数で割った数字とした。下記の例は、その方法をチャート図で示したものだ。2020年では、A1Bシナリオによると外航海運の輸送需要指数は131に増え、一方船腹予測（公称GT指数で表現）は178である（表7-9）。そこでこの差を調整するための重み係数を求め、次いでこの係数を今回のシナリオの船舶カテゴリごとに適用した。

表 7-9 重み係数の計算

2020	A1B* (1)	Nominal GT index (2)	Scaling factor (2)/(1)
Ocean-going shipping	131	178	0.74
Coastwise shipping	131	117	1.12
Container	194	276	0.70

7.22 シナリオ A1B の 2020 年船腹量は、2020 年の額面上の船腹量欄におけるカテゴリ別船腹量に妥当なカテゴリ別重み係数を掛け合わせて求める。2020 年船腹量の計算方法の全体観を図 7-2 に示す。

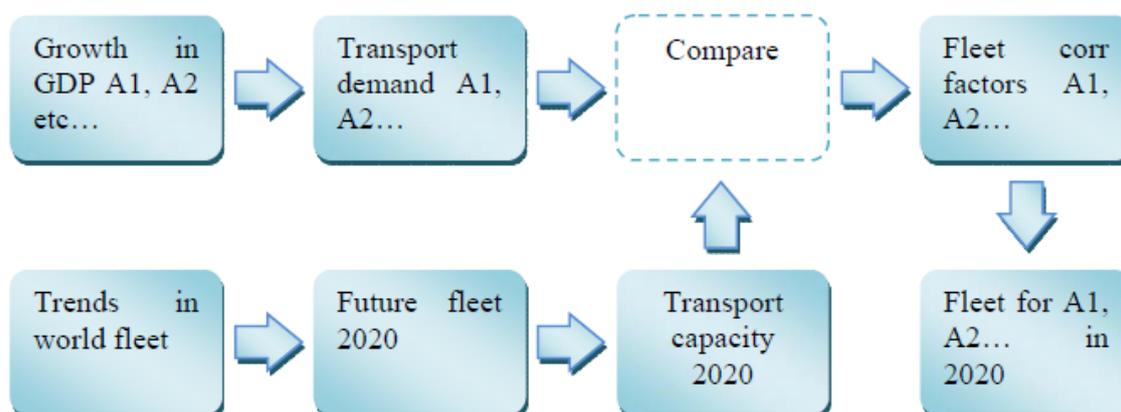


図 7-2 2020 年船腹構成の予測プロセス

7.23 2050 年の船腹構成の予測は 2020 年の予測よりもはるかに難題である。そのため、2020 年と 2050 年では、構成の変更をモデル化しなかった。その代わりに 2050 年に対しては、各シナリオに 2020 年の構成比をベースとして ton-mile 量の増加率に相当する成長係数を適用することとした。この期間の船腹構成の変化による効率改善の可能性は、後で説明する効率の評価の項で考慮した。例として、2020 年と 2050 年間の A1B シナリオにおける成長係数の計算を表 7-10 に示す。

表 7-10 成長係数の計算

	A1B 2020*	A1B 2050*	Growth factor
Ocean-going shipping	131	245	1.87
Coastwise shipping	131	245	1.87
Container	194	900	4.64

* 予測 ton-mile 指数

- 7.24 多くの場合、今回のシナリオの 2020 年予測船腹がロイド船級協会・フェアプレイ研究所の予測値よりも低いことに注意されたい。これは主としてロイド船級協会・フェアプレイ研究所に比べて我々のシナリオでは今回の輸送需要予測が低いことによるものである。Lloyd's の予測は SRES の経済成長予測と関連づけていない。

速度による効率

- 7.25 速度を落とすほど船体の摩擦抵抗が支配的になり、所要推進力は速度のおよそ 3 乗に比例する。高速になると波の発生による抵抗が顕著になり、この抵抗増のために速度の 3 乗以上の出力増が必要となる。そのため特に高速船において減速措置が消費動力を減らす有効な手段となる。一方、輸送能力が不足してしかも運賃が高い場合は、増速措置が輸送能力ニーズを満足する方法となる。
- 7.26 航行中の速度は、運賃、燃料価格、その他の固定費、変動費などの経済的な要因によって決定する。例えば、燃料価格が上昇し輸送能力の伸びが需要の伸びを上回る場合は、市場主導による減速措置が想定される。速度変更はこのように市場変動や剰余能力吸収のために利用される。また長期的にも、燃料価格が他のコストよりも上がると予測される場合は、船隊側は、船舶の大型化および運航速度の減速措置によって対応すると予想される。逆もまた成立する。
- 7.27 今回のシナリオモデルでは、現状と将来の船隊平均速度に関する 2020 年と 2050 年の予測をベースに市場要因による速度変更の可能性を考慮した。表 7-11 において速度変更の下限をゼロに設定したが、それは船隊の設計速度の平均値が将来も変わらないことを意味する。これまでの実績では増速傾向が見て取れるが（コンテナ化の進展の間）、船隊の平均速度は大体において安定しており、エネルギー効率及び GHG 効率を考慮した今後の市場条件の下では、本調査報告では増速シナリオをモデル化することは選択しなかった。この減速値のテーブルは全てのシナリオファミリーに対し一様に適用した。

表 7-11 シナリオ入力；市場要因による平均船隊速度変化

2050	All scenarios		
	Base	High	Low
Intercontinental	-10%	-20%	0%
Coastwise shipping	-10%	-20%	0%
Container	-10%	-40%	0%
2020	All scenarios		
	Base	High	Low
Intercontinental	-5%	-10%	0%
Coastwise shipping	-5%	-10%	0%
Container	-5%	-20%	0%

7.28 減速によってもたらされるネット効率改善効果は、速度と出力間の 3 乗比例を前提にモデル化した。速度変更が船舶の輸送能力に影響するため、船舶の生産性を一定に保つためモデルでは船腹の大きさを調整した。効率改善効果を若干過大評価することになるが、単純化のため減速措置は補機にも適用した。減速措置及び他の対策によるネットの改善効果を表 7-12 に示す。

船舶設計、技術、運航による効率

7.29 この評価ではそれぞれのシナリオにおいて技術が進歩することが想定される。ただし、燃量消費に関する規制が明確でないため、技術的な要素の変化としては最大限の技術的ポテンシャルではなく費用効果の高い改善内容を各シナリオに反映させた。

7.30 検討過程では、以下のような技術の進歩が話題になった。

- .1 回転エネルギーの回収（二重反転プロペラ、高効率舵、非対称船体、ボスキャップフィンなど）
- .2 船舶大型化を除く船体に対する全般的な改造及び設計優先順の変更
- .3 エンジン技術の進歩
- .4 排熱回収技術の活用促進
- .5 すでに紹介した減速措置以外の運航改善策
- .6 帆、太陽光などの代替エネルギー源

7.31 これらの技術に加えて、海運活動を別の観点から改善する規制面の整備によって船舶のエネルギー効率が影響を受ける。そのような規制面の整備の例として、防汚、空気排出量削減、バラスト水規制、速度制約（クジラの衝突防止）、二重船殻化、新しい建造標準、船体の対氷強度などの話題がある。これらの要素は、議論の結果、

技術改善に関するシナリオ入力に反映した。輸送効率の改善に関連するパラメータを表 7-12 に示す。これらの値は船隊平均に適用される。2020 年までには船隊の限られた範囲しか入れ替わらないため、技術的進歩による効率改善は緩やかに進むと予測される。

表 7-12 シナリオ入力：市場要因の技術的変化及び規制面の変化による輸送効率への影響
(船隊平均値)

2050	All scenario families		
	Base	High	Low
Ocean-going shipping	-25%	-35%	-5%
Coastwise shipping	-25%	-45%	-5%
Container	-25%	-30%	-5%
2020	All scenario families		
	Base	High	Low
Ocean-going shipping	-2%	-4%	0%
Coastwise shipping	-2%	-4%	0%
Container	-2%	-4%	0%

輸送効率の総合改善

7.32 輸送効率の総合改善の予測を表 7-13 に示す。この数字はこれまで説明した検討結果から求めたものであるが、実施順序が異なる場合でも同じような削減結果に到達することを確認した。2050 年の総合値は、2020 年以降に起こり得る船腹構成の変化も考慮した。新造船の平均効率のこれまでの推移は 9.13 項から 9.15 項で計算する。シナリオ入力の結果を大局的に把握するため、効率のベースラインの総合改善の予測結果を、9.13 項から 9.15 項で求めたこれまでの効率改善推移とともにプロットしたものを図 7-3 に示す。実績としての効率推移の最終は 1995 年のデータであるため、1997 年と 2007 年の間は 2007 年から 2050 年の間の予測と同じ比率を使って線形内挿法によって補完した。

表 7-13 シナリオ入力：2007 年の効率をベースとして比較した効率の総合改善
(船隊平均値)

2050	All scenario families		
	Base	High	Low
Ocean-going shipping	-39%	-58%	-5%
Coastwise shipping	-39%	-65%	-5%
Container	-39%	-75%	-5%
2020	All scenario families		
	Base	High	Low
Ocean-going shipping	-12%	-22%	0%
Coastwise shipping	-12%	-22%	0%
Container	-12%	-39%	0%

歴史的観点でのベースラインの効率改善

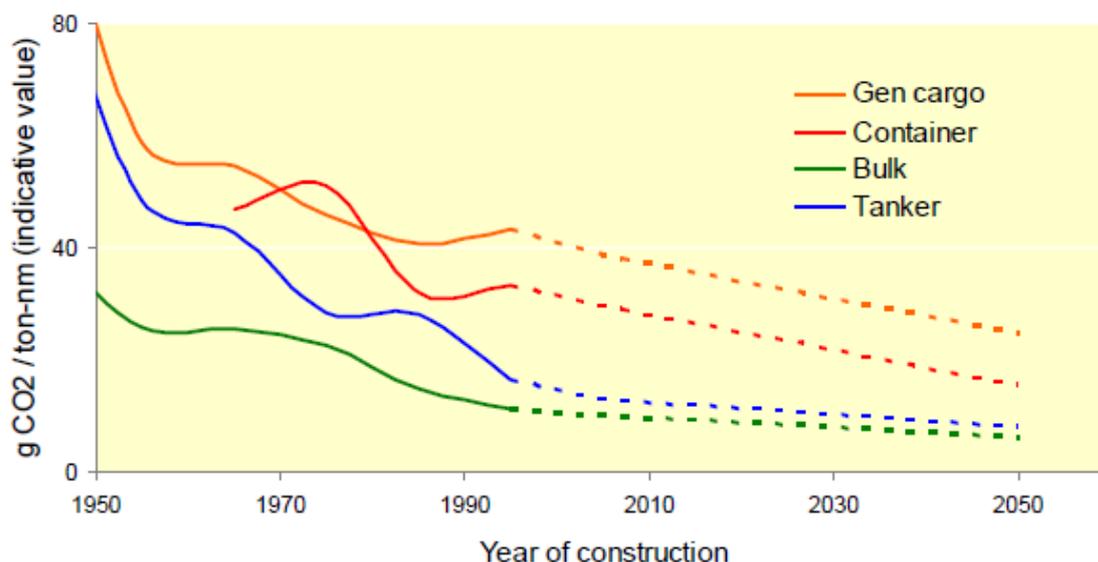


図 7-3 効率のベースライン向上予測及びこれまでの実績推移

船用燃料の進歩

7.33 船舶による CO₂ 排出量は燃料の種類によって変わる。例えばある燃料が他に比べてエネルギー出力当たりの炭素含有量が多い場合は、単位仕事量当たりの CO₂ 排出量

が増える。この影響を反映するには、将来シナリオで使用する燃料の前提を設ける必要がある。将来の燃料の選択は、入手性、価格、船舶利用上の実用的な適合性、規制など多くの要因がある。燃料に関して考慮が必要な規制は改訂 MARPOL Annex VI による規制である。

7.34 SRES シナリオでは、一次エネルギー源ごとの世界全体の使用予測が取り込まれた。一次エネルギーは、地球上の全エネルギーの発生源であり、全ての有効な仕事の根源である。集約レベルでは以下のエネルギー源が挙げられる。

- .1 石炭
- .2 石油
- .3 ガス
- .4 核燃料（シナリオ B1 では非化石電力と表記）
- .5 バイオマス
- .6 他の再生可能エネルギー

当然、地球全体のエネルギー動向はある程度までは海運にも反映される。しかし従来の石油燃料からの転換は相当な牽引力が必要である。各シナリオにおけるその牽引力は経済である。なぜならこれらシナリオには燃料転換を要求する規制が設定されていないためである。上記エネルギー源の船用燃料としての適合性に関する考察結果を以下に要約する。

石炭

7.35 石炭による推進駆動は、技術的にはボイラ/蒸気タービンの組合せによって実現可能である。ただし、硫黄酸化物除去の必要性、低い熱効率、入港中もボイラ加熱が必要、石炭の燃えガラおよび灰の廃棄が必要などの観点から、魅力ある燃料とは思えない。石炭から液体燃料を抽出することが可能で、液体燃料であれば船舶での使用に適し、さらにほとんど硫黄フリーである[13]。現在では石炭液化燃料技術に対する関心が高まり、製造プラントが米国と中国で計画されている[14]。このような合成 hidrocarbon 燃料は、カーボン比が石炭とは異なるがディーゼル燃料と似た炭素含有率を有する。ただし製造に伴う CO₂ 排出量が石油燃料よりも多い[25]。炭素の捕捉・貯蔵技術を適用して石炭液化プラントが排出する CO₂ の 90% を捕捉しても、石炭液化燃料からのネット排出量は既存の道路燃料よりも多い[14]。

石油

7.36 石油は現状では国際海運にとって唯一と言ってよい主力エネルギー源である。これを変更するのは強力な推進力が必要である。よって石油系燃料を全てのシナリオのデフォルト選択肢と考える。改訂 MARPOL Annex VI を考慮して石油系船用燃料を「グローバル留出燃料」と「ECA 留出燃料」に区分する。この両者の基本的な違いは硫黄分の制約である。両者の炭素含有率はエネルギーベースの測定結果では大きくは変わらない。

ガス

- 7.37 天然ガス、液体で貯蔵される場合は液化天然ガス (LNG)、は将来の船用燃料と予測されている。LNG 化を推進させる重要な要因は、LNG 駆動船舶の NO_x 、 SO_x 、PM の低排出量、及び留出燃料と比べた価格の安さである。一方で重要な技術課題として、船内での必要貯蔵スペースの確保と給油港での LNG の入手性が挙げられる。そのため、LNG の導入があるとすれば、まずは沿岸海運での採用が現実的である。沿岸海運であれば、船舶の航行距離が短いことによって問題の顕在化が抑制され、さらに次の給油港が予測しやすい。タンカーは甲板上に十分な LNG タンクのスペースを確保できるため、LNG に対する関心を集める可能性がある。LNG 船は後処理なしでも Tier III 排出レベルに適合するため、 NO_x 排出規制海域では特にメリットが多い。天然ガスは特殊な処理によってディーゼルエンジン用のフィッシャー・トロブシュディーゼル (FTD) への転換も可能である。ただしこの場合は LNG 運航に伴う NO_x の利点は失われる。
- 7.38 LNG はディーゼル燃料と比べて水素が多く炭素が少ない。従って、 CO_2 排出量が削減される。残念ながらメタン (CH_4) の排出増によってネット効果が CO_2 換算排出削減量の 15% が目減りする。バルク LNG のコストは残留燃料油とほぼ同じで、留出油よりは相当安い。

核燃料

- 7.39 原子炉を船上に搭載するのは、国際海運船舶にとって、環境、政治、安全、商業的な理由から関心を引くオプションとは思えない。原子力発電あるいは他の非化石電源から取り出した電力を推進駆動力として利用するのも (停泊中の利用は別として) 出力密度の低さ、コスト、重量、バッテリーサイズ等の理由で実現可能とは思えない。

バイオマス燃料

- 7.40 この種の燃料には、既存の技術を使って砂糖、でんぷん、野菜油、動物性脂肪から作られる「第一世代」バイオ燃料が含まれる。この内、バイオディーゼル (すなわち脂肪酸メチルエーテル : FAME) と野菜油が船用ディーゼルとして容易に利用できる。大まかに言えばバイオディーゼルは留出燃料の代替として、野菜油は残留燃料の代替として利用できる。現状の (第一世代) バイオ燃料の場合は、どれを選択してエンジンにどう適用するのかについて、細心の注意が必要と思わせる具体的な問題点がある (保管中の安定性、酸化、吸湿、フィルタの詰まり、ワックス形成など) [16, 17, 18, 19]。少量のバイオ系燃料をディーゼル燃料あるいは重油に混合させることは、技術的な観点からは実現可能であるが、燃料油との適合性を確認する必要がある。バンカー燃料に対しても同じことがいえる。将来は、船上での利用に適した燃料を合成するバイオマス液化燃料製造プロセスが開発される可能性がある。現状バイオ燃料は石油系燃料に比べて非常に高価である [16]。規制無しのシナリオでも船舶のバイオ燃料使用にインセンティブを持たせるとすれば、価格問題も解消

しなければならない。

他の再生可能エネルギー源

- 7.41 その他の船用再生可能エネルギーとして、船上で発生可能な再生エネルギー（主なものとして、風力、太陽光、船の動きによる発電）あるいは陸上で発生させ水素のようなエネルギー担体を利用して船舶に移送する再生エネルギーなどが考えられる。シナリオモデルの構成としては、船上で創出される再生可能エネルギーは省エネルギー対策としてモデル化され、燃料の炭素含有量の変更には反映されない。一方、陸上で創出され船上まで移送される再生可能エネルギーは燃料と解釈され、燃料の炭素含有量に反映される。もし陸上で創出された再生可能エネルギーが規制無しシナリオの中で使用されるのであれば、競合する燃料（石油系など）よりも費用効果がより高いものでなければならない。

海上輸送業への新燃料の浸透

- 7.42 今回のシナリオ分析に際して、現実味のある7種類の燃料の市場普及ポテンシャルをシナリオファミリーごとに考察した。それらの燃料は、(1) 船用留出油、(2) 重油、(3) LNG、(4) LPG、(5) バイオディーゼル (6) 合成ディーゼル (例えばFTD) (7) その他再生可能燃料である。各種シナリオに対して市場浸透を考える場合、以下の特記事項がある。
- .1 全てのシナリオで、石油は2020年と2050年においても主要1次エネルギーの一つである（2050年の世界1次エネルギー消費の16 - 28%）
 - .2 SRESシナリオでは、2050年には化石燃料が全ての1次エネルギーの57 - 82%を占める。
 - .3 SRESシナリオに基づくこれまでの予測では、2050年の海運の燃料消費量は400百万-810百万トン(4億トン-8.1億トン?)の範囲となる。これは22 - 32 EJ、すなわちSRESシナリオにおける2050年の世界一次石油エネルギー消費の10-15%に相当する。
- 7.43 さらに2020年には、改訂MARPOL Annex VIによる硫黄規制が採択され、新たな航路開設に伴う規制として硫黄含有量に関する世界共通の上限0.5%が適用されると予測される。
- 7.44 前述のようにSRESシナリオは、燃料コストの上昇が予想されるものの石油系燃料の継続使用を容認するものと考えられる。そこでGHG以外の排出の規制に係るシナリオにおいては、脱石油燃料の動きは経済によって刺激されるしかない。しかし陸上においてはGHG排出削減の拘束力のある目標がすでに設定されているため、バイオ燃料が価格競争力を発揮して船舶までは回ってこないことが予測される。陸上から転送される再生可能エネルギーについても同じことが言える。
- 7.45 シナリオA1FI及びA2においては石炭液化燃料が価格競争力を発揮するようになり、

石炭が主力エネルギー源の一つになると予想される。この燃料のある量が市場に回る可能性がある。天然ガスは全ての SRES シナリオでの主要エネルギー源の一つである。LNG による推進駆動は全てのシナリオの沿岸海運に対して魅力ある技術になるとと思われる。LNG は特にタンク構造の船舶に適した燃料となる可能性を有し、そこでは甲板上のタンクに燃料を貯蔵することでマイナス要素の制約条件が解消され、実現性が出てくると期待される。このような考察を基に、表 7-14 及び表 7-15 に示すような市場浸透の予測を立てた。

表 7-14 将来の燃料シナリオ (2020 年)

2020	A1B	A1FI	A1T	A2	B1	B2
LNG	5% of coastwise	5% of coastwise	10% of coastwise + 5% of tank ships†	5% of coastwise	10% of coastwise + 5% of tank ships†	10% of coastwise + 5% of tank ships†
Synthetic diesel*	None	None	None	None	None	None
Distillates	Balance	Balance	Balance	Balance	Balance	Balance

* 石炭あるいは他の競合材料をベースとするもの

+ 全てのサイズの外航原油タンカー

表 7-15 将来の燃料シナリオ (2050 年)

2050	A1B	A1FI	A1T	A2	B1	B2
LNG	25% of coastwise + 10% of tank ships†	25% of coastwise + 10% of tank ships†	50% of coastwise + 20% of tank ships†	25% of coastwise + 10% of tank ships†	50% of coastwise + 20% of tank ships†	50% of coastwise + 20% of tank ships†
Synthetic diesel	None	20% of all ships	None	20% of all ships	None	None
Distillates	Balance	Balance	Balance	Balance	Balance	Balance

* 石炭あるいは他の競合材料をベースとするもの

+ 全てのサイズの外航原油タンカー

7.46 不純物、ヒドロカーボンの分子式、エネルギー含有量、物理的密度など将来の燃料の特性に関する予測に基づき、表 7-16 に示すように燃料種別ごとの炭素画分（炭素グラム/MJ）を計算した。これらの燃料種別ごとの炭素画分と各シナリオ中の市場浸透率を使って船種ごとの燃料炭素画分の加重平均を求められる。

表 7-16 シナリオモデルで使用される燃料固有の炭素画分

Fuel	Carbon fraction (g of C/MJ)	Emission factor (kg of CO ₂ /kg of fuel)
LNG	15.4	2.75
Synthetic diesel	19.7*	3.13*
Distillates	20.2†	3.19†

- * 合成ディーゼルの係数はフィッシャー・トロプシュディーゼルの代表的なデータを使用した。
+ 将来の燃料では不純物が減ると予想して現行のインベントリより高い排出係数を想定した。

排出量の計算

- 7.47 これまで説明した主要な前提に基づき、シナリオモデルを使ってエネルギー消費量と CO₂ 排出量が直接計算される。
- 7.48 CO₂ 以外の排出ガス汚染物質に関しては、技術的なシナリオは作成せず、排出量が MARPOL Annex VI の規制を遵守しながら推移すると仮定した。これはこの規制の導入に伴って NO_x、SO_x、PM 固有の排出係数が下がることを意味するものだが、他の汚染物質固有の排出係数は下がらないと仮定した。

将来の NO_x 排出量

- 7.49 改訂 MARPOL Annex VI は段階的な手法で NO_x 排出量を削減する。Annex VI による元々の排出限界は「Tier I」と呼ばれ、「Tier II」、「Tier III」と呼ばれる将来の排出限界は 2011 年と 2016 年に導入される。改訂 MARPOL Annex VI の見直し規制 13 の内容を表 7-17 にまとめた。

表 7-17 MARPOL Annex VI の NO_x 制約

Tier	Date	NO _x limit (g/kW·h)		
		$n < 130$	$130 \leq n < 2000$	$n \geq 2000$
Tier I	2000	17.0	$45 \cdot n^{-0.2}$	9.8
Tier II	2011	14.4	$44 \cdot n^{-0.23}$	7.7
Tier III	2016*	3.4	$9 \cdot n^{-0.2}$	1.96

Tier III は排出規制海域でのみ適用される。n は定格エンジン回転数 (rpm) のこと。

- 7.50 Tier II では、排出係数が排出規制に比例して削減されると仮定する。そこで低速エンジンの場合は、排出係数が Tier I の 14.4/17 (85%) に下がり (訳者注: 66/78 (85%) の間違いでは?)、中速エンジンの場合は排出係数が Tier I の 80% に下がると仮定

した（表 7-18）。Tier III は、全てのエンジンが排出限界近くで運転されるものと仮定する。LNG エンジンによる排出量は MARINTEK 及びエンジンメーカーの測定データをベースにした。

表 7-18 排出標準による NO_x 排出係数の推定値

	Tier 0	Tier I	Tier II	Tier III
SSD	90	78	66	18
MSD	60	51	41	12
LNG	6	6	6	6

7.51 船隊平均の排出係数は各年の船隊構成によって変化し、船隊構成は船の寿命及び船腹量の伸びによって決まる。船腹量の増加は船舶速度の減速措置と関連がある。従って、減速措置は新造船及び新しいエンジンの導入を加速することによって間接的に NO_x 削減に対してポジティブな効果を与える可能性がある。NO_x の将来の排出係数は、船腹が年間で 3% 増加し、船舶の平均寿命を 30 年というシナリオに基づけば図 7-4 のように推移する。この図は、将来の ECA 域内、域外での低速エンジン(SSD) 及び中速エンジン(MSD)の排出係数を示すものだ。

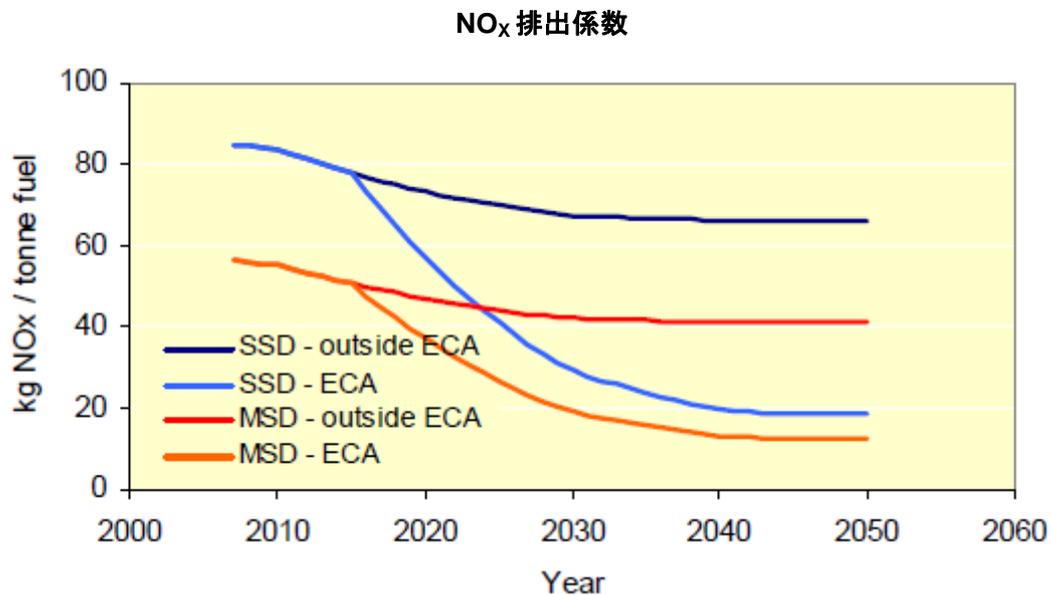


図 7-4 将来の NO_x 排出係数（年間船腹増加率：3%、船の寿命：30 年）

将来の SO_x 排出量

7.52 燃料硫黄排出係数の新しい限界値が改訂 MARPOL Annex VI によって与えられている。現状の燃料中の硫黄含有率データは IMO 硫黄監視計画によって入手できる[26]。

燃料中の硫黄含有率に関する IMO による将来の限界値を表 7-19 に示す。これらの規制を反映した硫黄排出係数の低下予測を図 7-5 に示した。ここで、世界平均が現状でも 2.7%であり、2012 年に導入される 3.5%という世界の規制値が平均排出係数に影響を与えるとは期待できないことに注意されたい。

表 7-19 MARPOL Annex VI による燃料中の硫黄含有率限界

	Global	ECA
Present	4.5%	1.5%
1 July 2010		1.0%
1 January 2012	3.5%	
1 January 2015		0.1%
1 January 2020*	0.5%	

* この数字は 2018 年に見直され、2025 年まで延期される可能性がある。

SO_x 排出係数

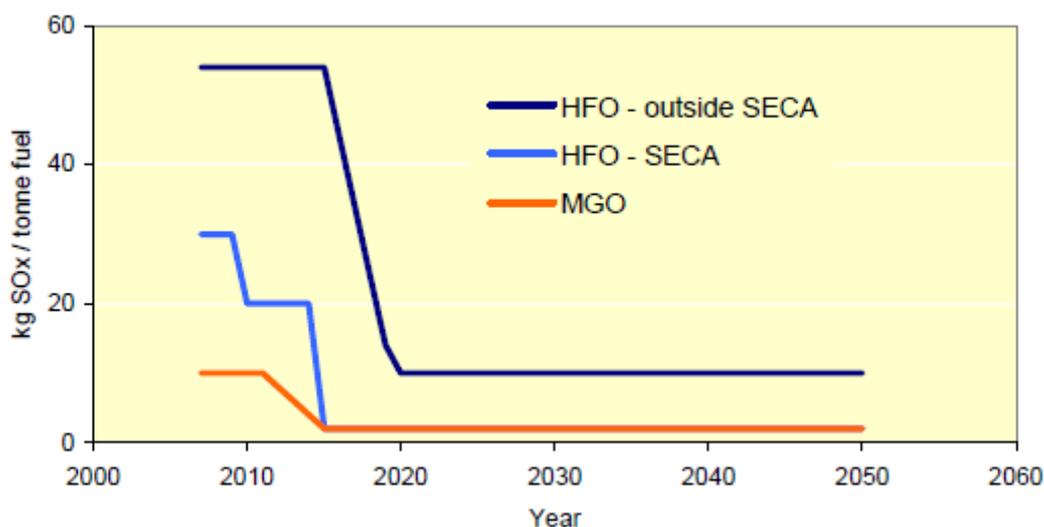


図 7-5 シナリオで使用する将来の SO_x 排出係数
硫黄含有率 3.5%という世界の規制値が平均排出係数に影響するとは思えない。

粒子状物質の将来の排出量

7.53 粒子状物質 (PM) は非揮発性化合物と半揮発性化合物の混合物で、燃焼中に必ず発生するとは限らず、高温高圧燃焼によって発生する。船舶の場合は PM の例としてしばしば、灰及びその他の不燃残渣汚染物質、エアロゾル (例えば硫酸塩) を形成する硫黄系化合物、凝縮水粒子、通常は有機物と呼ばれる複合有機化合物、元素状炭素 (大きさや数によって目に見える場合は「すす」として知られる) と呼ばれる微小な不燃炭素粒子などが挙げられる。粒子状物質の排出量は燃料中の硫黄の量に

よって部分的に影響されるが、特に燃料中の硫黄含有量に合わせた成分設計がなされ、他の排出物と共に排出されるシリンダ潤滑剤に含まれる複合有機化合物の影響が大きい。灰及びその他残渣汚染物もまた直接的な影響はないが、一般的には燃料中の硫黄含有量に比例して排出される。燃料に起因する硫黄排出量の削減対策は、このように粒子状物質の削減にも効果がある。Germanischer Lloyd から提供された 2 ストロークエンジンの実験による PM 排出量と燃料組成の関係を図 7-5 に示す。このデータから以下のことが分かる。

- .1 PM 灰は燃料中の硫黄含有率が 1%未満（留出油）になると、ステップ状に大幅に減少する。
- .2 硫酸塩及び付随する水分は燃料中の硫黄含有率と関連がある。
- .3 元素状炭素は燃料中の硫黄含有率と関連がある。
- .4 有機物質は燃料中の硫黄含有率の影響を受けない。

PM 排出物の化学組成

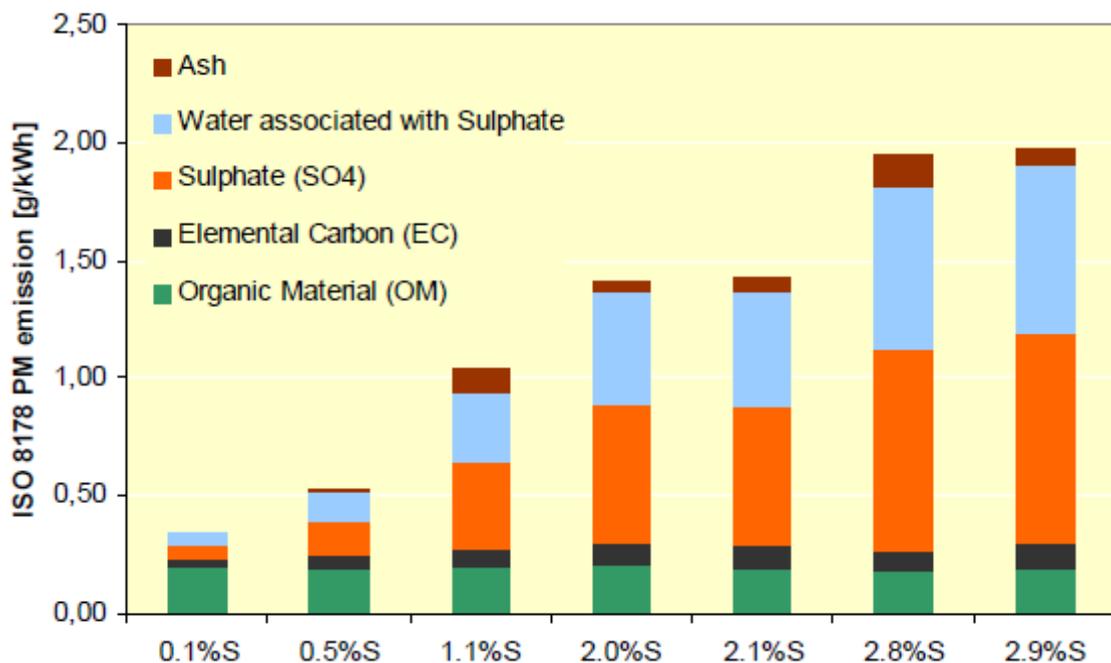


図 7-6 異なる燃料から採取した粒子状物質の組成
Germanischer Lloyd[24]

7.54 Germanischer Lloyd によって提供されたデータを使用し、CORINAIR Emissions Guidebook にある PM の各排出係数に基づいて以下に示す将来の PM 排出量を算定した。図 7-5 及び表 7-20 に示すように、硫黄含有率が 0.1%のときの PM 組成は、2.7%のときの PM の組成とまったく異なる。そのため PM の大幅な削減が予想されるものの、将来の PM の組成は現状とは違ってくる可能性がある。

表 7-20 現状及び将来の PM 排出量 (kg/燃料 ton) のシナリオ

	2.7% S	0.5% S	0.1% S
Organic material (OM)	0.67	0.66	0.68
Elemental carbon (EC)	0.34	0.17	0.08
Sulphate (SO ₄)	3.02	0.52	0.22
Water associated with sulphate	2.42	0.42	0.17
Ash	0.25	0.03	0.00
Total	6.70	1.79	1.16

排出係数のまとめ

7.55 SECA 海域内の燃料消費量が世界全体の 8% (現状レベル) を維持するものとし、船腹量の年間の伸びを 3%、船舶の平均寿命を 30 年と仮定すれば、排出シナリオ用の合成排出係数を導くことが可能である。燃料に関する前提が変わるため、筋書きによって排出係数が異なる。異なる IPCC 筋書きごとの技術シナリオは作成しなかった。

表 7-21 シナリオ別の 2020 年の排出係数 (kg/燃料換算 ton)

	A1B	A1F	A1T	A2	B1	B2
NO _x	61.0	61.0	59.8	61.0	59.8	59.8
SO _x *	9.2	9.2	9.0	9.2	9.0	9.0
PM*	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
CO	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4
NMVOC	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
CH ₄	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
N ₂ O	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

* 現行の Annex VI による最終段階の規制は 2020 年までに実施されると仮定した。ECA 海域内の燃料消費量は全体の 8%と仮定した。

表 7-22 シナリオ別の 2050 年の排出係数 (kg/燃料換算 ton)

	A1B	A1F	A1T	A2	B1	B2
NO _x	49.1	49.1	45.0	49.1	45.0	45.0
SO _x *	8.6	6.7	7.8	6.7	7.8	7.8
PM*	1.6	1.6	1.4	1.6	1.4	1.4
CO	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4
NM VOC	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
CH ₄	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
N ₂ O	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

* 現行の Annex VI による最終段階の規制は 2020 年までに実施されると仮定した。ECA 海域内の燃料消費量は全体の 8%とする。

結果

- 7.56 シナリオ分析に際しては、前記 6 通りのシナリオファミリーごとにさらに細かく分けたシナリオを作成した。CO₂ の場合は、需要の伸び（ベース、低い、高い）、輸送効率（ベース、低い、高い）、減速措置の影響（ベース、低い、高い）の全ての可能性のある組合せについて検討した。この方法によって両年（2020 年と 2050 年）の CO₂ に対して、シナリオファミリーごとに $3 \times 3 \times 3 = 27$ 通り、すなわちトータルでは $6 \times 27 = 162$ 通りのシナリオが生まれた。今回の調査報告ではこれまで説明したように、シナリオファミリーごとに船種別の炭素排出係数を特定しそれを使用した。CO₂ 以外の排出量については、ベースラインの予測値を基準として将来の排出量を類推した。
- 7.57 CO₂ 排出量のベースシナリオ値の推移と 162 通りのシナリオ全体の最大最小範囲を図 7-7 に示す。さらに各数値を表 7-23 と表 7-24 にも示した。その他の排出量は表 7-25 と表 7-26 に示した。

国際海運による CO₂ 排出量シナリオ

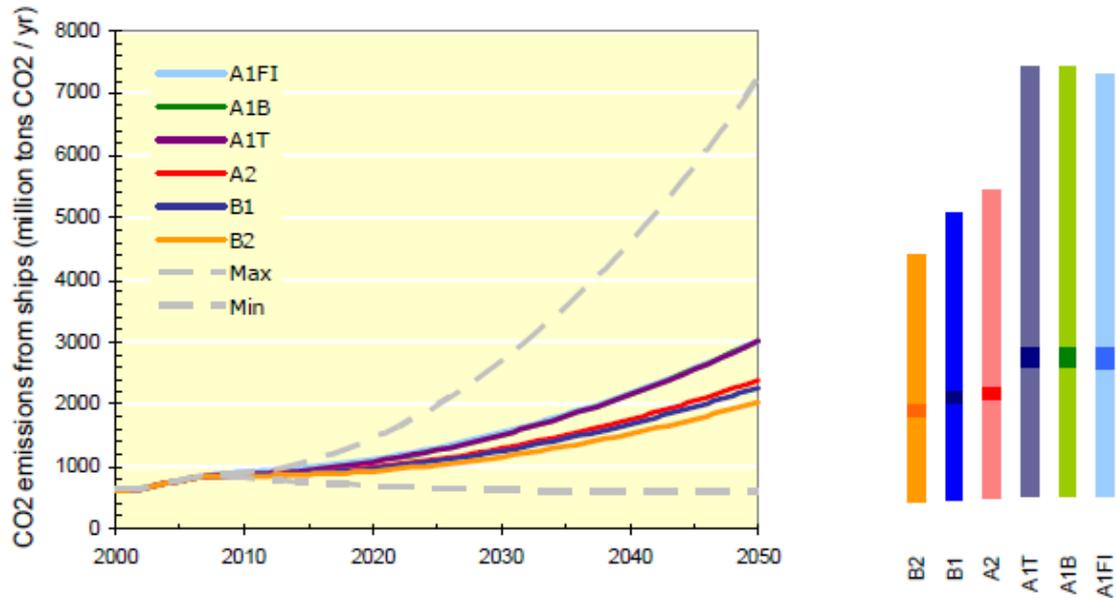


図 7-7 国際海運による CO₂ 排出量の推移
右欄の縦棒は各シナリオファミリー中の予測結果の最大最小範囲を示す。

表 7-23 国際海運による CO₂ 排出量 (百万 ton/年)

	2020			2050		
	Base	High	Low	Base	High	Low
A1FI	1058	1440	689	2648	7228	692 880
A1B	1057	1447	688 770	2681	7344	693 885
A1T	1058	1447	689 771	2668	7341	688 879
A2	982	1275	662 740	2194	5426	637 804
B1	959	1252	656 734	2104	5081	616 781
B2	925	1160	644 719	1903	4407	588 746

表 7-24 海運による CO₂ 排出量の平均年間増加率予測 (2007 - 2050*)

	Base	High	Low
AIFI	2.7%	5.1%	-0.4%
AIB	2.7%	5.2%	-0.4%
AIT	2.7%	5.2%	-0.4%
A2	2.2%	4.4%	-0.6%
B1	2.1%	4.3%	-0.7%
B2	1.9%	3.9%	-0.8%

* 国内海運と国際海運の成長率が同じと仮定した。

7.58 最大最小シナリオは別として、図 7-7 の各シナリオはその類似性が特徴といえる。これは、筋書きと一次エネルギー源が異なるにもかかわらず、シナリオが前提とした船舶に対する技術的な展開の経路が全体的に類似している結果である。シナリオ間の差は主として需要と使用される化石燃料の種類との違いによって生じたものである。これらのシナリオでは、地球規模の影響を及ぼす核やバイオマスのようなゼロエミッションエネルギーへの転換が海運部門では十分に浸透しないとの予測がある。

表 7-25 2020 年における全ての海運による排出量のシナリオ (百万 Ton/年)

	AIB	AIF	AIT	A2	B1	B2
NO _x	25.1	25.1	24.6	23.3	22.3	21.5
SO _x	3.8	3.8	3.7	3.5	3.4	3.2
PM	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6
CO	3.0	3.0	3.0	2.8	2.8	2.7
NM VOC	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9
CO ₂	1345	1293	1294	1188	1167	1114
CH ₄	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11
N ₂ O	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03

表 7-26 2050 年における全ての海運による排出量のシナリオ (百万 ton/年)

	A1B	A1F	A1T	A2	B1	B2
NO _x	50.3	51.0	46.7	41.6	36.8	33.3
SO _x	8.8	6.9	8.0	5.7	6.3	5.7
PM	1.6	1.7	1.5	1.3	1.2	1.1
CO	7.6	7.7	7.7	6.3	6.0	5.5
NMVOC	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	1.8
CO ₂	3595	3644	3634	2878	2735	2449
CH ₄	0.31	0.31	0.31	0.25	0.25	0.22
N ₂ O	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06

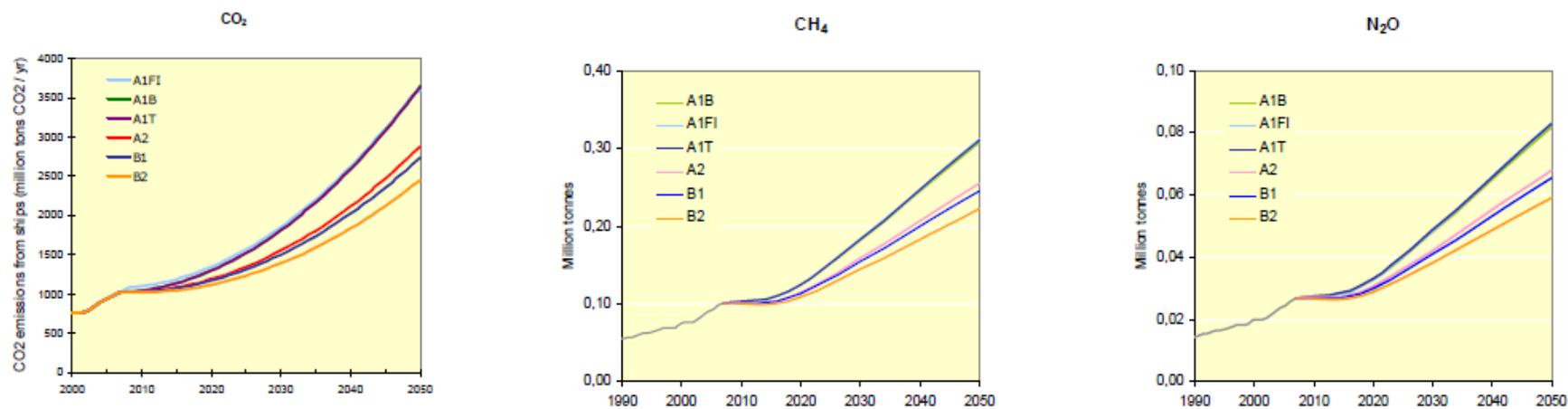


図 7-8 全ての海運による GHG 排出量推移シナリオ (排ガスによるものに限定)

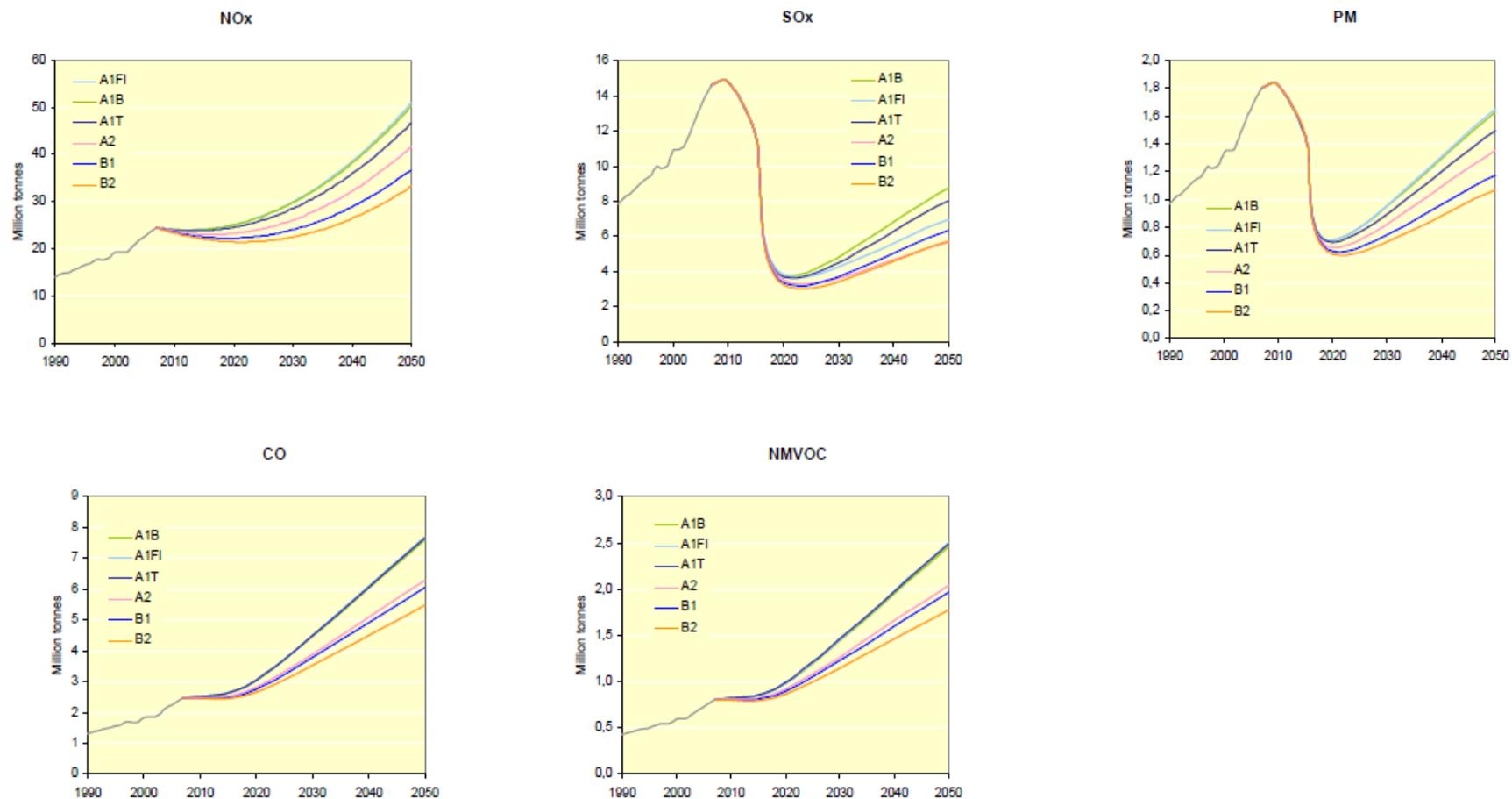


図 7-9 全ての海運によるその他の関連物質排出量推移シナリオ（排ガスによるものに限定）

考察

7.59 作成されたシナリオは、船舶の活動量及び船舶による排出量の大幅な増加を示している。これは、船舶による温室効果ガス排出量に関する IMO 調査報告 2000 を含む、船舶の将来の排出量に関する従来の調査結果と同様である。今回の調査研究で予測した将来の CO₂ 排出量は 2005 年に発表された Eyring 他[11]の予測よりも多いが、最近作成された EU project QUANTIFY (OECD 2008[23]) による 2050 年までの海運活動シナリオと同等の範囲にある。

船舶による CO₂ 排出量のこれまでの推移と将来シナリオ

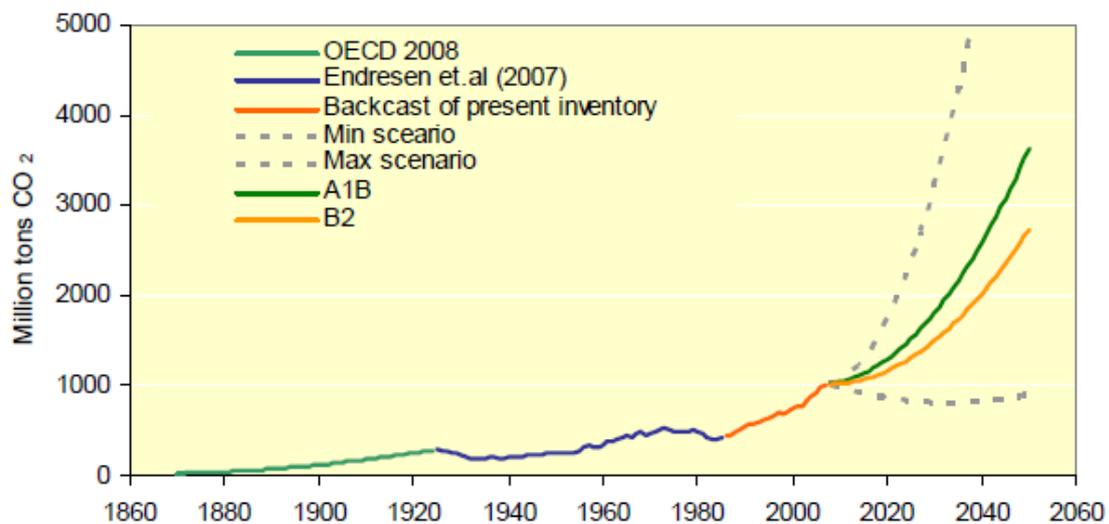


図 7-10 過去の推移からみた船舶による CO₂ 排出量のシナリオ

7.60 NO_x、SO_x/PM の現状および将来の排出量に及ぼす IMO 規制の影響は図 7-9 から明らかである。NO_x 排出量は 2020 年までは安定もしくは減少傾向さえ示し、その後徐々に増加する。今回の予測は排出規制海域の数が現状と同じとの前提に立った。ECAs の導入が進めばさらに多くの削減がなされるであろう。これは SO_x、PM に関しても同じことがいえるが、ここでもかなりの削減が行なわれている。燃料の硫黄含有量の低下とともに PMs の化学組成及び粒径分布が変化するため、得られる環境上の効果や公衆衛生上の効果はここに示した PM の排出削減量に必ずしも比例するわけではない。

7.61 今回のシナリオの結果を分析することによって多くの重要な知見が得られる。重要な知見の一つが、輸送需要が将来の CO₂ 排出増加量にもっとも影響度の高い変数であるということである。また中には排出量が削減するとのシナリオもある。このようなシナリオは、輸送需要の伸びが極めて小さく、一方で輸送効率が改善されるケースである。海上輸送の低成長は必ずしも世界経済の低成長を意味するものではない。リサイクルの増加、域内貿易の増加、経済のサービス化の進展などによって、

経済成長と海上貿易の関係が切り離される可能性もある。

- 7.62 もう一つの知見はシナリオ A1 ファミリの比較によって得られるものだが、A1 ファミリの全てがほぼ同じ排出量を示す。A1 ファミリ内で差が生じるとすれば、それは世界的なエネルギー消費パターン変化の仮定の違いによるものである。IPCC SRES シナリオでは、「バランス型」、「化石燃料集中型」、「先進技術型」といった将来像の違いが浮き彫りにされた。それは、発電、軽量自動車製造、工業プロセスなど海運業界以外の分野では代替低炭素燃料の果たす役割が変わってくるためである。国際海運の場合は、世界のエネルギー市場で起きる高炭素燃料から低炭素燃料への転換の影響がほとんど見られない。なぜなら、海運業界のように規模が大きくなると、低炭素燃料への転換は何十年という長い年月を必要とするためである。さらにこの転換が海運業界よりも他の部門で早く実現されることを予測している。

結論

- 7.63 最小排出シナリオで示された以上の排出削減を達成するには、我々のモデルの前提条件と比較してより抜本的な変化が必要である。そのような変化の例を示す。

1. 海上貿易の拡大と世界経済の成長の間に存在する相関関係の劇的な切り離し。今回のモデルではすでに、輸送需要の伸びを GDP とのこれまでの相関よりも低めに設定した。従って、この切り離しがより急激でより大幅なものでなければならない。
2. B2 シナリオと比べて大幅に低い世界経済の成長率
3. SRES シナリオに比べて化石エネルギーの極端な不足。SRES シナリオによれば、2050 年までに一次エネルギーの総消費量は 2010 年の 160%から 284%の範囲に増加し、化石燃料が世界一次エネルギー需要の 57%から 82%を賄う。
4. 想定外の技術の導入

従って、本調査の各シナリオは、CO₂ 排出量削減の可能性を排除しない。しかしながらそのようなレベルの削減を達成するためには基本的な変化が必要であることを知らせている。

- 7.64 全体的に見て、海上輸送はトラック輸送や航空輸送に比べて炭素排出量において十分な優位性を示し、この点では第 9 章で示すように鉄道に対しても競争力がある。そのため国際海運の需要増加に伴い 2050 年まで排出量が増え続ける。ただしこの増加を他の輸送モード（トラック及び航空）のさらに多い排出量と相殺する設計が可能である。例えば、輸送形態をトラックから船へのシフトによって船舶からの排出量は増えるが、商品輸送システム全体の排出量から見ればトータルではプラスの効果을及ぼすことになる。

参考文献

- 1 Chermack, T.J., Lynham, S.A. and Ruona, W.E.A., 2001. "A review of scenario planning literature". *Futures Research Quarterly*. 17 (2), 7–31.
- 2 Porter, M.E. 1980. *Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors*. Free Press, New York.
- 3 Schwartz, P. 1991. *The Art of the Long View*. Doubleday Currency, London.
- 4 Shoemaker, P.J.H. 1995. "Scenario planning: a tool for strategic thinking. *Sloan Management Review*. 37 (2), 25–40.
- 5 Winebrake, J.J. 2003. "The future impacts of electric drive vehicles: A case of normative scenario modelling". *Futures Research Quarterly*. 19 (1), 5–25.
- 6 Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G. and Vries, B.D. 2000. *Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press: Cambridge, UK.
- 7 Nakicenovic, N. and Swart, R. (editors). 2007. *Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. <http://www.grida.no/publications/other/ipcc%5Fsr/?src=/climate/ipcc/emission/index.htm>
- 8 SEDAC. The SRES Emissions Scenarios. <http://sedac.ciesin.columbia.edu/ddc/sres/index.html> (28 February 2008).
- 9 Schwartz, P. 1991. *The Art of the Long View: Planning for the Future in an Uncertain World*. Currency Doubleday, New York, USA, p. 272.
- 10 Review of Maritime Transport, United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) 2007.
- 11 Eyring, V., Köhler, H.W., Lauer, A. and Lemper, B. 2005, "Emissions from international shipping: 2. Impact of future technologies on scenarios until 2050". *J. Geophys. Res.* 110, D17306, doi:10.1029/2004JD005620.
- 12 BLG 12/INF.10 Input from the four subgroups and individual experts to the final report of the Informal Cross Government/Industry Scientific Group of Experts.
- 13 Davies, G.O. and Freese, R.G. 1981. "The preparation and performance of coal derived diesel fuel". *Proceedings of the 14th International Congress on Combustion Engines, Diesel Engines, Helsinki, Finland, 1981*.
- 14 Vallentin, D. 2008. "Driving forces and barriers in the development and implementation of coal-to-liquids (CtL) technologies in Germany". *Energy Policy*, 36 (6), 2030–2043.
- 15 Einang, P.M. 2007. "Gas fuelled ships". *Proceedings of the 25th CIMAC World Congress on Combustion Engine Technology, Vienna, Austria, 21–24 May 2007*, Paper 261.
- 16 Opdal, O.A. and Fjell Hojem, J. 2007. "Biofuels in ships: A project report and feasibility study into the use of biofuels in the Norwegian domestic fleet". ZERO report, 18 December 2007.
- 17 Ollus, R. and Juoperi, K. 2007. "Alternative fuels experiences for medium-speed diesel engines". *Proceedings of the 25th CIMAC World Congress on Combustion Engine Technology, Vienna, Austria, 21–24 May 2007*. Paper 234.
- 18 Matsuzaki, S. 2004. "The application of the waste oil as a bio-fuel in a high-speed diesel engine". *Proceedings of the 24th CIMAC World Congress on Combustion Engine Technology, Kyoto, Japan, 7–11 June 2004*.
- 19 Ohgawara, T., Okada, H., Tsukamoto, T., Iwasawa, K. and Ohe, K. 2007. "Application study of waste-vegetable oils as a bio-fuel for diesel engine by high-density cavitation". *Proceedings of the 25th CIMAC World Congress on Combustion Engine Technology, Vienna, Austria, 21–24 May 2007*. Paper 196.
- 20 Dahle, Ø. 2008. *The Climate Challenge*. 29th International Bunker Conference, 23–25 April 2008, Copenhagen, Denmark.
- 21 OPRF: "Research Study: The World's Changing Maritime Industry and a Vision for Japan". ISBN 978-4-88404-212-7. Note: A pdf file for this report is available in English at http://www.sof.or.jp/en/topics/08_04.php.
- 22 Brown, B.B. 1968. "Delphi Process: A methodology used for the elicitation of opinions of experts". Rand Corporation, Santa Monica, CA, USA. <http://www.rand.org/pubs/papers/2006/P3925.pdf>
- 23 OECD. 2008. Endresen, Ø. and Dalsøren, S. (main authors) "The environmental impacts of increased international maritime shipping – Past trends and future perspectives". Work produced by Det Norske Veritas and University of Oslo, Rep. no. ENV/EPOC/WPNEP/T(2008)5 7.
- 24 Kurok, C., Pawils, V., Brumm, H. and Götze, H.J. (Germanischer Lloyd). "Emission of particulate matter from marine diesel engines". Presentation at IMO BLG-WGAP 2, Berlin, 2007.
- 25 van Vliet, O.P.R., Faaij, A.P.C., *et al.* 2009. "Fischer–Tropsch diesel production in a well-to-wheel perspective: A carbon, energy flow and cost analysis". *Energy Conversion and Management*. 50(4), 855–876.
- 26 Sulphur Monitoring for 2008. IMO Secretariat, document MEPC 59/4/1.

第8章 気候影響

はじめに

- 8.1 近年、海運部門が気候に及ぼす影響の性質及び強さに対する問題意識が高まりつつある。船舶による排出物質が人間の健康に直接悪影響を及ぼすほか、地域的な酸性化及び富栄養化をもたらし、さらには気候の「放射強制力¹³」(RF)にも影響するということが現実のものになり、海運活動による気候影響の問題は、環境政策決定者にとって重要な課題に発展しつつある (Corbett 2003)。
- 8.2 気象科学分野における研究成果は、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第 1 作業部会 (WG1) によって定期的な見直し及び評価が実施される。至近の報告書は 2007 年に発行された (IPCC 2007)。ただし IPCC 2007 は、特別に海運を取り上げたものではなく、報告書の第 2 章で航跡との関連の中で海運活動の影響について簡単に触れたに過ぎない (Forster 他 2007)。このように IPCC では、気候に対する海運の影響が例えば航空活動と同じレベルでの総合的な評価がなされていない (IPCC 1999)。参照可能な技術文献として、近刊予定の Eyring 他 の評価報告書 (2009) に現状でもっとも完成度の高い新しい評価が掲載される。
- 8.3 海運によって多様な物質が排出される。主たる排出化合物として、二酸化炭素 (CO₂)、窒素酸化物 (NO_x)、一酸化炭素 (CO)、揮発性有機化合物 (VOC)、二酸化硫黄 (SO₂)、黒色炭素 (BC)、粒子状有機物質 (POM) が挙げられる。海運が排出する NO_x 及びその他オゾン先駆物質によって対流圏オゾン (O₃) が形成され、水酸基ラジカル (OH) の濃度が不安定になり、結果的にメタン¹⁴ (CH₄) の寿命が不安定になる。船舶による排出がもたらすエアロゾルの主成分は硫酸塩 (SO₄) である。SO₄ は SO₂ の酸化によって生成されるものであるが、元々は燃料中の硫黄が発生源である。
- 8.4 二酸化炭素は直接温室効果ガスである。また NO_x、CO、VOCs はオゾン先駆物質であり、これまで多くの研究で取り上げられた (例えば、Lawrence と Crutzen 1999、Kasibhatla 他 2000、Davis 他 2001、Endresen 他 2003、Eyring 他 2007a)。海運によって排出される粒子状物質は、対流圏化学への影響に加えて下層雲の物理的性質を変え、気候に影響を与える (Lauer 他 2007)。船舶の排出物に起因する長くて湾曲した雲の構造を衛星画像で見ることができるが、これが通常「航跡」と呼ばれるものである (例えば Durkee

¹³ 地球の平均放射強制力と地球の平均表面温度変化の間にはほぼリニアな関係が存在するため、異なる発生源の気候に対する影響を定量化する共通の基準として「放射強制力」(RF) (単位: w/m^2) が使われる。RF とは、産業化以前の時代以降に生じた地球と大気間のエネルギーバランスの変化量をいう。例えば CO₂ のような温室効果ガスの増加によって大気がプラスの放射強制力を受ける場合、大気は放射の平衡状態を維持しようとして大気温度が上昇する。

¹⁴ メタンは温室効果ガスの一つで、原則的には他の部門から排出される (農業、鉱業など)

他 2000、Schreier 他 2006, 2007)。海運による排出物質は、気候の放射強制力 (RF) に影響する。RF は m^2 当たりのワット数 (W/m^2) で表わされる慣習的な気候尺度として気象化学で使われ、IPCC も使用する。RF は、1750 を基準値として大気圏のエネルギー収支の変化を示す (IPCC が採用した定義で、本報告書でも使用する)。RF は通常、全球平均で表わされ、プラスの RF は温暖化、マイナスの RF は寒冷化を意味する。海運からの排出物と気候への影響は以下に起因する。

- .1 CO_2 の排出。温暖効果を持つ (プラスの RF)
- .2 NO_x の排出。この結果大気圏オゾンが発生し (プラスの RF)、大気メタンが減少する、すなわち冷却効果がある (マイナスの RF)
- .3 硫酸塩粒子の排出。(マイナスの直接 RF)
- .4 煤煙粒子の排出 (プラスの直接及び間接 (雪) RF)
- .5 下層雲の形成あるいは変化 (マイナスの間接 RF)

8.5 排出物質が気候に与える総合的な影響は複雑である。海運部門の関連要素を表わした概念図を図 8-1 に示す。大気中にさまざまな微量種物質が排出されることによって変化が生じる。大気中のプロセスとして、これら排出微量種が大気反応を起こしてミクロ物理プロセス的变化を生じる、すなわち乾性沈着あるいは湿性沈着を通してさまざまなシンク (地表あるいは水面) に吸収/除去される。次いでこれらの変化が、豊富な微量種の変化、大気組成の変化、雲及びエアロゾルの特性変化を通じて大気圏の放射バランスに影響する。このような RF の変化によって、例えば地球全体のあるいは局地的な平均地表温度、海面水位、降雨量、積雪量の変化、氷冠面積の変化などさまざまな形での気候に対する影響が出る。引き続いて、これらの物理的影響が、農業、林業、エネルギー生産、人間の健康への影響を通して社会的影響を与える。最終的には、これら全ての影響が社会的なコストに跳ね返り、それを定量化するのは非常に困難な作業となる。ただしこれらの影響として明らかなのは、相互の関連性が深まる一方でそのためより複雑となり、定量的にはより不確かになるということだ。この調査報告では、全球平均の RF 応答と温度応答の変化を主な尺度として気候影響を評価する。ただし全球平均という指標は気候影響を単純化していることに注意しなければならない。すなわちプラスとマイナスが存在して互いに相殺すると思われる局地的な応答変化でも、さらに全球平均 RF 応答のような尺度の一次指標としては微小な (あるいはゼロの) 変化であっても、気候に影響する可能性がある。

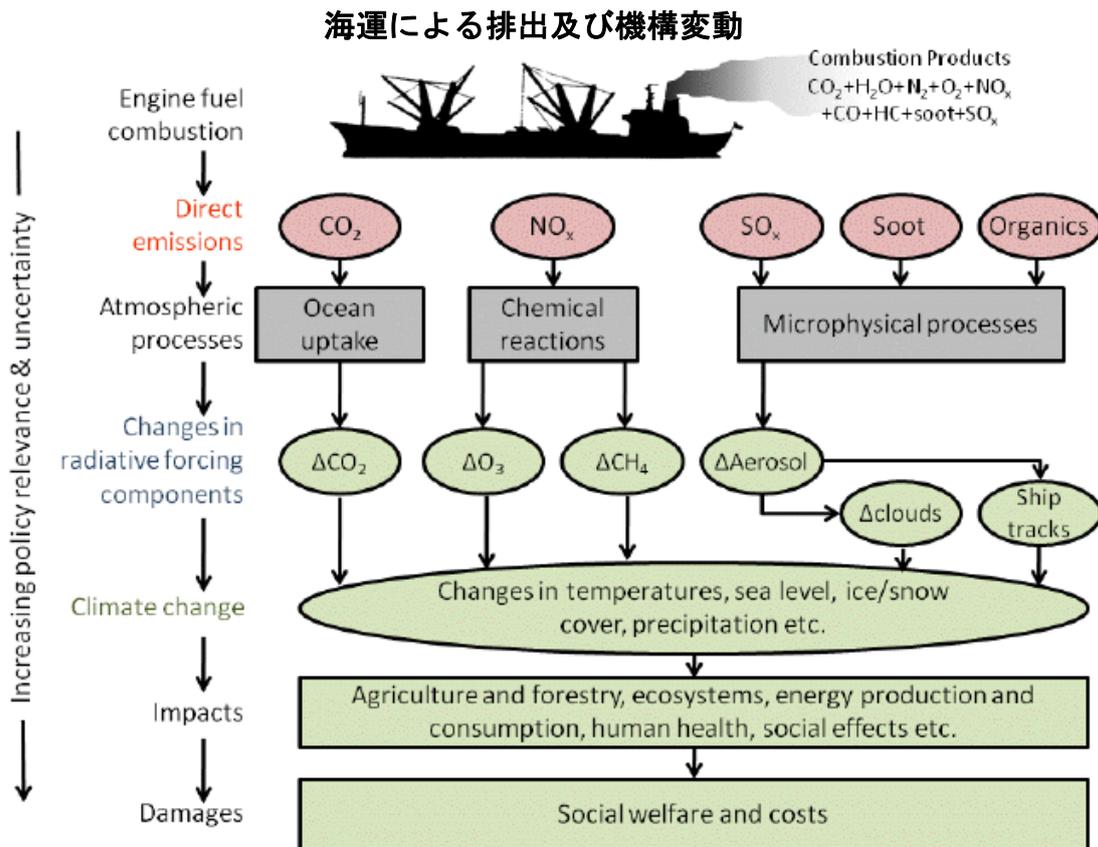


図 8-1 海運部門による排出物質の影響を表現したブロック図
(出典：Lee 他 2009a)

8.6 今日の海運による排出量については本調査報告書の別のセクションで取り上げられてきた。以後のセクションでは、2007 年の海運排出量から全球平均 RF 応答と気温応答が計算によって求められた方法を説明する。その後その計算結果を示して他の文献の値とも比較する。仮想的ではあるが一つの気候安定状態の中で海運が果たす潜在的な役割についても取り上げた。最終のサブセクションでは、海運の影響による気候変動に関して総合的な結論を述べる。

計算方法及びモデルの説明

8.7 海運による排出に起因する全球平均の RF 応答と気温応答を計算するため、単純化した炭素サイクルモデルを使って、限界 CO₂ 濃度とその結果の RF に対する CO₂ 排出量の影響を計算した。RF 応答は、全球平均気温応答を計算する線形気候応答モデルに使用され、あらゆる強制媒体に適用可能である。

8.8 CO₂ 以外の RF 応答に対しては、強制力の計算がより複雑なため異なる手法を必要とする。例えば、海運による CO₂ 以外の排出物質が大気組成及び雲量に及ぼす影響の計算はもっと複雑なモデルを使わなければならない（例えば、Lauer 他 2007、Eyring 他 2007a）。この調査報告で求めた 2007 年の排出量を、2 種類のモデルの入力デー

タに使用した。一つは対流圏オゾン化学モデル (MOZART v2 Horowitz 他 2003) そして一つはエアロゾルの存在度と雲量に影響する大気組成モデル (ECHAM5/MESSy1-MADE、Lauer 他 2007) である。CO₂以外の強制力による全球平均の時間展開気温応答を計算するため、まずある年の RF を予測し (より複雑なモデルの結果から)、年間排出量との関係を代理に利用して各年の RF 応答を計算した。このようにして全球平均温度応答を計算することができる。この方法は以下で詳細に説明する。

海運排出物質に起因する RF 及び気温の時間展開応答の計算方法

- 8.9 Sausen と Schumann (2000) が開発した気候応答モデルは、これまで航空機の排出シナリオに適用された実績があるが (Lee 他 2009b)、その排出シナリオは、Hasselmann 他 (1993, 1997) の方法に基づいて作成されたものだ。いくつかの改善及び拡張がその気候応答モデルに加えられ、今では海運による全ての影響を扱えるようになった (O₃ 及び CH₄ に対する CO₂ 及び NO_x の影響、エアロゾル及びその先駆物質、Lim 他 2007、Lee 他 2007 を参照)。
- 8.10 CO₂ の大気中濃度に対する海運 CO₂ 排出の寄与は、以下に示すように、「背景の」総排出量の寄与と海運排出量の寄与の次の計算値の差であると仮定する。**(訳注：内容的には「船舶 CO₂ 排出の寄与は船舶を含む背景の総排出量の寄与と船舶を含まない排出量の寄与の差である」に意味だと思うが、英文原稿ではこうしか読めない)** CO₂ の時間当たり排出量 $E(t)$ に対する CO₂ 濃度の応答 $C(t)$ は、Hasselmann 他 (1997) を参考にしてモデル化された。これは Meier-Reimer と Hasselmann (1987) の炭素循環モデルから導かれたものとほぼ等しく、以下で表わされる。

$$\Delta C(t) = \int_{t_0}^t G_C(t-t')E(t')dt' \quad (1)$$

及び

$$G_C(t) = \sum_{j=0}^5 \alpha_j e^{-t/\tau_j} \quad (2)$$

ここで τ_j はモード j の「1/e 減衰時間」であり、単位強制力に対するモード j の平衡応答は表 8-1 に示すモードパラメータを使って $\alpha_j \tau_j$ で表わされる。

表 8-1 CO₂ 濃度の力積関数 G_C の係数 (Schumann と Sausen 2000)

Mode j	1	2	3	4	5
α_j (ppbv/Tg (C))	0.067	0.1135	0.152	0.097	0.041
τ_j (year)	∞	313.8	79.8	18.8	1.7

- 8.11 CO₂のRFは、スペクトル飽和のためその濃度とは無関係である。そのため海運によるCO₂排出の影響を計算する場合、「背景の」RFを求める必要がある（式3）。

$$\Delta RF_{\text{Shipping}} = \Delta RF(C_{\text{Background}}) - \Delta RF(C_{\text{Background}} - C_{\text{Shipping}}) \quad (3)$$

- 8.12 1800年から1995年間の過去の背景CO₂濃度データ及びSRESの2100年まで将来シナリオデータ（IPCC 2000）（海運も含むすべての自然的及び人為的発生源による排出）を使用した。濃度は背景濃度と海運に起因する濃度の差であるとの前提で、海運が排出するCO₂の寄与は、式（3）及び式（4）によって求められる。（訳注：内容的には「CO₂大気濃度に対する船舶の寄与は、『背景濃度』と『船舶の排出を除いた背景濃度』の差である」の意味だと思うが、英文原稿ではこうしか読めない）
- 8.13 CO₂濃度からRFを計算した。IPCCによると、CO₂のRFは濃度の対数関数として求められる。対数関数はCO₂濃度の増加によってRFが飽和するという関係を近似したものである。
- 8.14 ここではRamaswamy他（2001）の式を使用し、Myhre他（1998）による5.35のα係数を代入する。

$$RF(t) = \alpha [\ln(C_{(t)} / C_{(0)})] \quad (4)$$

ここで使用する海運による排出量及び排出シナリオについては、本調査報告書の別のセクションでその前提も含めて説明した。使用する過去及び現在の排出量を図8-2に示す。1870年から1925年までの排出量は、OECDの推定値（2008）を採用した。その後のCO₂排出量の推移は、1925年から1985年のEndresen他（2007）の推定につなげた。今回の調査報告では2007年のCO₂排出量を1050 CO₂-Tg/Yearと予測した。1986年から2007年の間は、この2007年を基準の年として、フレートトン・マイル量（Fearnleys 2007）をベースに過去の類推で時間展開して排出量を求めた。現在の排出インベントリから過去の類推で求めたCO₂排出量がEndresen他（2007）の1985年推定値と十分に一致し、1870年から2007年までの全期間を通してなめらかな曲線を描けた。

過去の船舶からの CO₂ 排出量

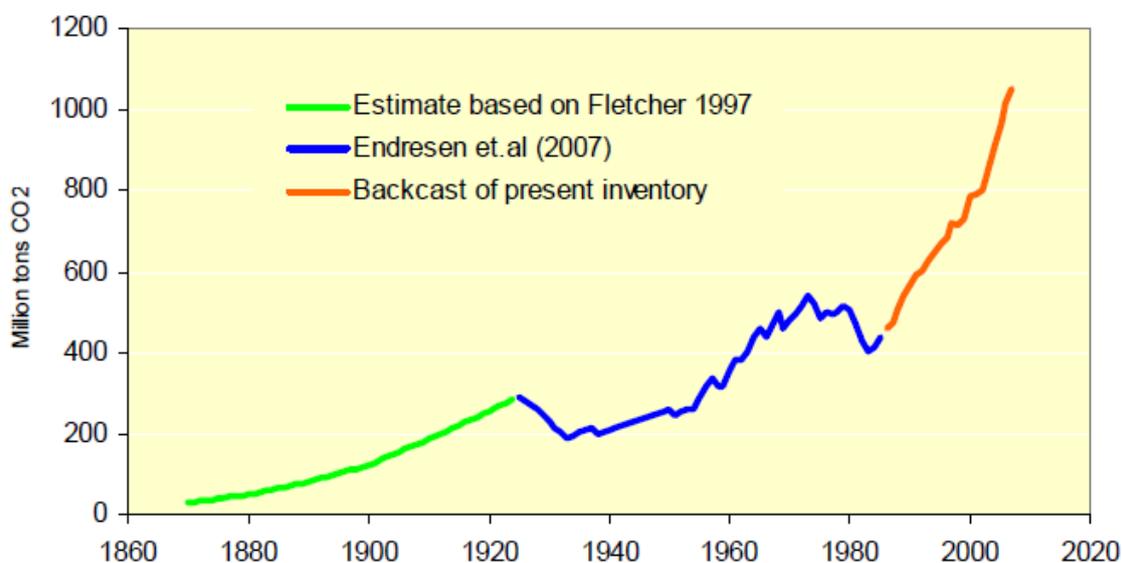


図 8-2 海運による CO₂ 排出量の過去および現在までの推移

8.15 以上の方法によって、CO₂ 濃度の変化及びそれによる RF 変化が計算される。CO₂ 以外の排出物質の影響については、影響物質ごとに他の研究で求められた RF を基準に取り、年間排出量をベースにした変換計算によって RF の年次推移を求める。全球平均気温応答を計算するためには、RF の年ごとの推移を示す完璧なデータをそろえなければならない。気温応答の計算に使用した排出物質別の RFs の外部計算値、その前提となる年間排出量、基準年及び出典を表 8-2 に示した。

表 8-2 気候応答モデル入力値

(海運に規定される CO₂ 以外の排出物質の RF、年間排出量、基準年、出典)

Forcing	Prescribed RF (mW m ⁻²)	Relevant emission rate (per year)	Reference year	Source
Ozone (from NO _x and other precursors of O ₃)	26.0	5.43 (Tg of N)	2000	Eyring <i>et al.</i> (2009)
Methane reduction (from NO _x and other precursors of O ₃)	-33.0	5.43 (Tg of N)	2000	Eyring <i>et al.</i> (2009)
SO ₄ (direct)	-31.0	11.1 (Tg of SO ₂)	2000	Eyring <i>et al.</i> (2009)
Black carbon (BC)	2.0	0.13 (Tg of BC)	2000	Eyring <i>et al.</i> (2009)
Particulate organic matter (POM)	-0.4	0.14 (Tg of POM)	2000	Eyring <i>et al.</i> (2009)
Indirect cloud	-66.0	8.3 (Tg of SO ₂)	2000	Fuglestedt <i>et al.</i> (2008)

- 8.16 表 8-2 に示した RF は、それぞれのデータソースが独自の年間排出量を前提に基準の年を定めて、その値を計算したものである。従って基準の年を同じにしても、今回の調査報告とは排出量が異なるため上記の RF をそのまま使用することはできない。今回求めた各排出物質の排出量が最良の推定値と考え、整合性を図るため RF の計算には今回求めた排出量を使用した。
- 8.17 各種の強制媒体に対する全球平均気温応答は、従来から幅広く利用されてきた Hasselmann 他（1993）が開発した手法を使って計算した（例えば、Hasselmann 他 1997、Sausen と Schumann 2000、Shine 他 2005）。
- 8.18 気候応答関数による計算にはコンボリューション積分を使うが、それには、システム（ここでは気候）に対する微小摂動は線形加法の式を使って表わされるという意味が含まれている。そこで強制力 $F(t)$ に対する時間 (t) における気候応答変数 Φ は次の式で求められる

$$\Phi(t) = \int_{t_0}^t G_{\Phi}(t-t')F(t')dt' \quad (5)$$

ここで $G_{\Phi}(t)$ は、 $t = 0$ における強制力変化に対するシステムの応答を表わす力積関数すなわち Green 関数（例えば Livesly 1989）である。また強制力 $F(t)$ 及び $\Phi(t)$ は平衡状態（気候）に対する摂動である。

- 8.19 摂動の影響を加味するため、Sausen と Schumann（2000）の式を修正した。すなわち

$$\Delta T_i(t) = r_i \lambda_{CO_2} \int_{t_0}^t \hat{G}_T(t-t') RF_i(t') dt' \quad (6)$$

$$\hat{G}_T(t) = \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau} \quad (7)$$

ここで、 ΔT_i は摂動 i による気温応答 (K)、 r_i は i の有効率、 λ_{CO_2} はもととなる大気循環モデル (GCM) の CO_2 気候感度パラメータ ($K/W m^{-2}$)、 RF_i は i の RF (Wm^{-2}) である。修正した Green 関数 $\hat{G}_T(t)$ において、 τ は気温摂動の寿命 (平均寿命) である (年)。モデルの現行バージョンではさらに細かい修正が加えられ、フルスケールの大気海洋モデル ECHAM4/OPYC3 (Roeckner 他 1999) の過渡的挙動も λ_{CO_2} を $0.64 K/W m^{-2}$ 、 τ を 37.4 年と置いて計算できるようになった。ここで、 λ_{CO_2} と τ を関数に含む気候システムの熱容量には不確かさが含まれることに注意されたい。ある排出シナリオに対して IPCC (2007) が示した気温応答の差の範囲は、気候システムの熱容量の不確かさが原因である。

大気組成及び雲量変化の計算手法

- 8.20 気候応答モデルの目的は、単純化されかつ経済的な方法で時間展開 RF 応答及びそれによる全球平均気温応答を計算することである。それは、大気組成及び雲量の変化から RF を計算するさらに複雑なモデルに頼っており、そのようなモデルで求めた排出物質の影響についても、変化の空間特性及び RF 応答を示すためにここで提示する。本報告書では 2 種類の全球モデルからの結果を示す。ECHAM5/MESSy1-MADE (Lauer 他 2007) は、エアロゾルの豊富さの変化とそれに伴う雲の特性の変化を計算するために使った。そして MOZART v2 (Horowitz 他 2003) は、船舶からの O₃ 先駆物質の排出が O₃ の豊富さ及び CH₄ の寿命に及ぼす影響を計算するために使った。
- 8.21 ECHAM5/MESSy1-MADE (以後 E5/M1-MADE と呼ぶ) は全球エアロゾルモデルで、Lauer 他 (2007) による詳細な説明がある。E5/M1-MADE の主要部は、モジュール球体サブモデルシステム MESSy (Jockel 他 2005) に組み込まれた大気循環モデル (GCM) ECHAM5 (Roeckner 他 2006) で構成される。エアロゾルサブモデル MADE (Ackermann 他 1998) は、エアロゾル中の詳細なマイクロ物理プロセスを考慮して作成された。このエアロゾルサブモデルは、GCM の雲マイクロ物理 (Lohmann 他 1999、2000) 及び放射スキームだけでなく化学サブモデル MECCA (Sander 他 2005) とお互いに連携が取られる。
- 8.22 MOZART v2 は、対流圏の化学的な全球モデルである。3 次元グリッド内に放出された微量成分が予測した風況に応じて運ばれる様子を (通常は) 1 年間の全行程を 6 時間ごとの時間ステップで追跡する。微量成分が運ばれる間に他の微量成分と化学的に反応し、乾性及び湿性堆積の物理プロセスによって除去される。海運による排出の有無を切り替えてモデルを走らせることによって、海運による排出量が O₃ 及び CH₄ の濃度に及ぼす影響の定量化が可能となる (O₃ 及び CH₄ は、NO_x 及びその他のオゾン先駆物質の排出との関連において、放射的な重要性が高い主要成分である)。モデル及びその機能は Horowitz 他 (2003) によって詳細に説明されている。今回のシミュレーションでは全行程を 1 年間とし、グリッド形式で示された NO_x、NMVOCs、CO の排出量データを使用した。気象データは、ECMWF の運転データから 2003 年のデータを採用した。2003 年は 1998 年から 2008 年の間を気象的に代表する年であるため、固有のバイアスが取り込まれることはない。

結果：放射強制力及び気温応答

CO₂ 排出が放射強制力に与える影響

- 8.23 排出された CO₂ は、大気中の残存期間が長いこと十分に混合される。式 (5) は CO₂ 濃度の変化からその結果生じる RF を計算するものだ。今回の作業で求めた排出量によって生じる RF の過去から現在までの時系列推移及び排出シナリオに基づく RF のばらつき範囲を提示する。
- 8.24 2007 年の船舶による CO₂ の RF は 49 mW m⁻² であった。現時点の年間排出量の比較

では、航空機が同等もしくはわずかに少ない値と予測されるが（航空機は 2005 年に 733 CO₂ Tg、海運は 2005 年に 965 CO₂ Tg）、2007 年の航空機による RF は 30 mW m⁻² である（Lee 他 2009b の 2005 年予測から外挿した）。このように船舶による RF の方がいくぶん大きくなった理由は、大気中の CO₂ の滞留時間及び両部門の活動期間の両方で説明される。CO₂ は単一の寿命を持つのではなく、排出されたうち 50% は 30 年以内に吸収され、30% は数世紀の時間尺度の間に吸収され、さらに残りの 20% は何千年もの間、空中を浮遊する（IPCC 2007）。炭素循環モデルの至近の見直し結果によると、この長期に浮遊する比率は元の排出量の 20 - 60% であると報告された（Archer と Brovkin 2008）。活動期間でみると、動力によって駆動される海運活動が開始された時期は石炭焚船が帆船に取って代わった 19 世紀後半までさかのぼる。一方、本格的な航空機の活動は一般的に 1940 年以降に始まったものと思われる。

- 8.25 Fuglestvedt 他（2008）が最近になって輸送活動の気候への影響を解析した結果、海運が排出した CO₂ による RF が 2000 年には 35 mW m⁻² であったと報告した（補足の情報は、<http://www.pnas.org/content/105/2/454/suppl/DC1> を参照）。本調査報告の検討結果では、2000 年の該当する CO₂ の RF は 43 mW m⁻² となり、これは排出量の予測をより詳細なモデルに基づいておこなったことを考えれば、Fuglestvedt 他（2008）の RF 推定計算も十分に近い数字であったと評価できる。
- 8.26 2007 年以後は、多くの CO₂ 排出シナリオ（第 5 章で説明した）が作成された。中心的な存在といえる SRES A ファミリーあるいは B ファミリーに属する全てのシナリオをモデル化したわけではないが、A1FI、A1B、A1T、B1、B2 などのファミリーのベースシナリオをモデル化した。加えて全体の中で最大量（A1B ファミリーから）と最小量（B2 ファミリーから）を示す二つのシナリオもモデル化した。各種シナリオにおける 2007 年から 2050 年間の CO₂ 排出量は図 7-7 に示した。それらの CO₂ 排出量に対応する RF を図 8-3 に示す。

CO₂の放射強制力

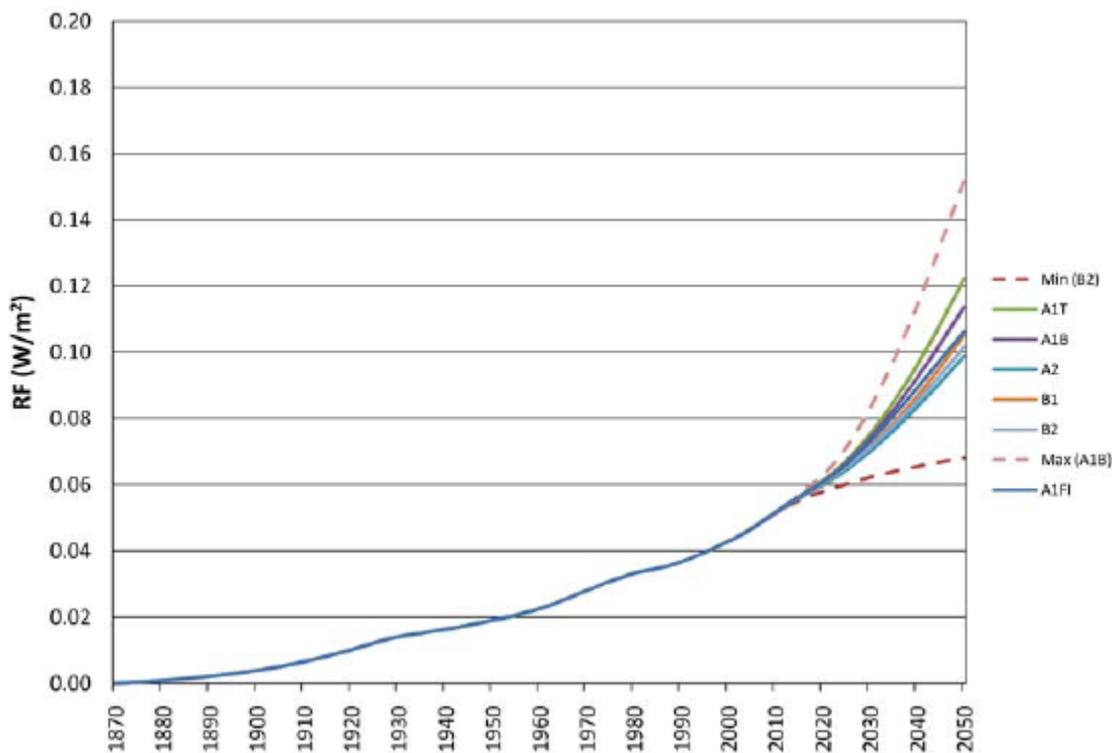


図 8-3 海運による CO₂の放射強制力

これまでの推定（1870 年－2005 年）及び今後のシナリオに沿った予測（2050 年まで）

8.27 各種の CO₂ 排出ベースシナリオは、2050 年の RF を 99 から 122 mW m⁻² の間にあると予測する。2050 年の最小 RF は 68 mW m⁻²、最大 RF は 152 mW m⁻² となり、これは排出シナリオ及びその前提条件の不確かさが表れたものだ。

CO₂ 以外の排出が放射強制力に与える影響

8.28 8.7 項から 8.22 項で説明した方法において、他の研究による CO₂ 以外の物質の推定排出量を使って RF の時系列推移を求めた。これによって対応する気温応答の計算が可能になる（表 8-2 参照）。表 8-3 は気温応答及び全球モデルシミュレーションで使用した 2007 年の排出量を示す。

表 8-3 モデル計算で使用した船舶の燃料消費量及び排出量（2007 年、Tg/Year）

Fuel use	CO ₂	NO _x (Tg (N)/year)	SO _x (Tg (S)/year)	SO ₄ (primary)	NMVOC*	CH ₄ *	BC	POM	N ₂ O	CO
333	1050	24.5	14.6	0.87	0.80	0.10	0.12	0.29	0.027	1.80

* タンカーの積荷時に発生するものは除く

8.29 図 8-4 は 2007 年の CO₂ 及び CO₂ 以外の排出物質による RF を棒グラフ（青い棒）で示し、各強制力に対応する気温応答も併記した（赤い棒）。これらの RFs は 2007 年以前と 2007 年の排出物質によってもたらされる放射強制力を示す。実際には 2007 年以前の排出物質による影響を受けるのは、CO₂ による放射強制力と CH₄ 濃度の減少である。しかし対応する気温応答の場合はそうではない、以下に説明し、図に示すように、それらは全て 2007 年以前の排出による影響を受ける。

8.30 IMO の検討結果及び CO₂ 以外の排出物による RFs の外部研究（表 8-2）に基づいて計算された海運による全球平均 RF は -110 mW m⁻² である。ネットでマイナスの RF はほとんどが海運の排出による付加的な低層雲の形成、地球のアルベドの増加、地表の冷却などの間接効果によるものである（Lauer 他 2007）。このマイナスという強制力が意味するように、2007 年の全球平均気温応答は冷却応答である。

海運排出による全球平均 RF と ΔT 応答（2007 年）

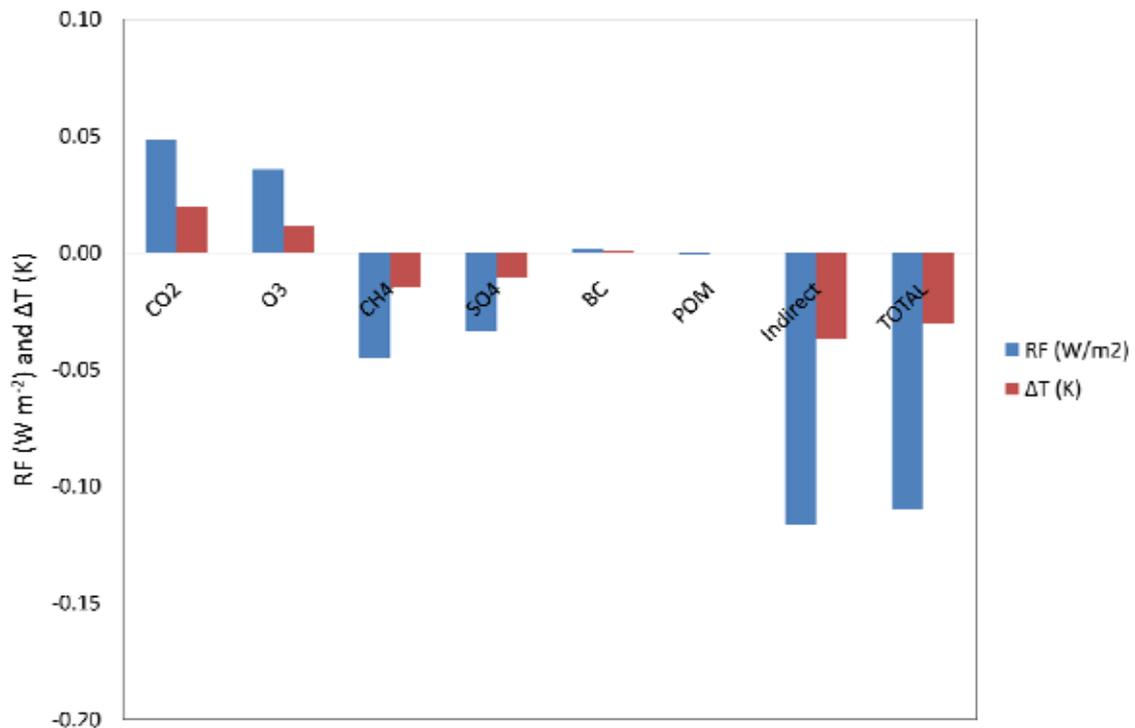


図 8-4 海運排出による全球平均 RF (W m⁻²) 及び気温応答 (K) (2007 年)

この図には、船舶に関しては未だ解析されていない BC と雪の相互作用によって起こり得るプラスの RF は含まない。

8.31 Fuglestad 他 (2008) の計算によるネットのマイナス強制力は、-71 mW m⁻² (2000 年) であり、今回の計算結果のネットの強制力 -72 mW m⁻² と非常に近い。

8.32 海運による排出の結果、RF 及び全球平均気温応答がネットでマイナスになるという

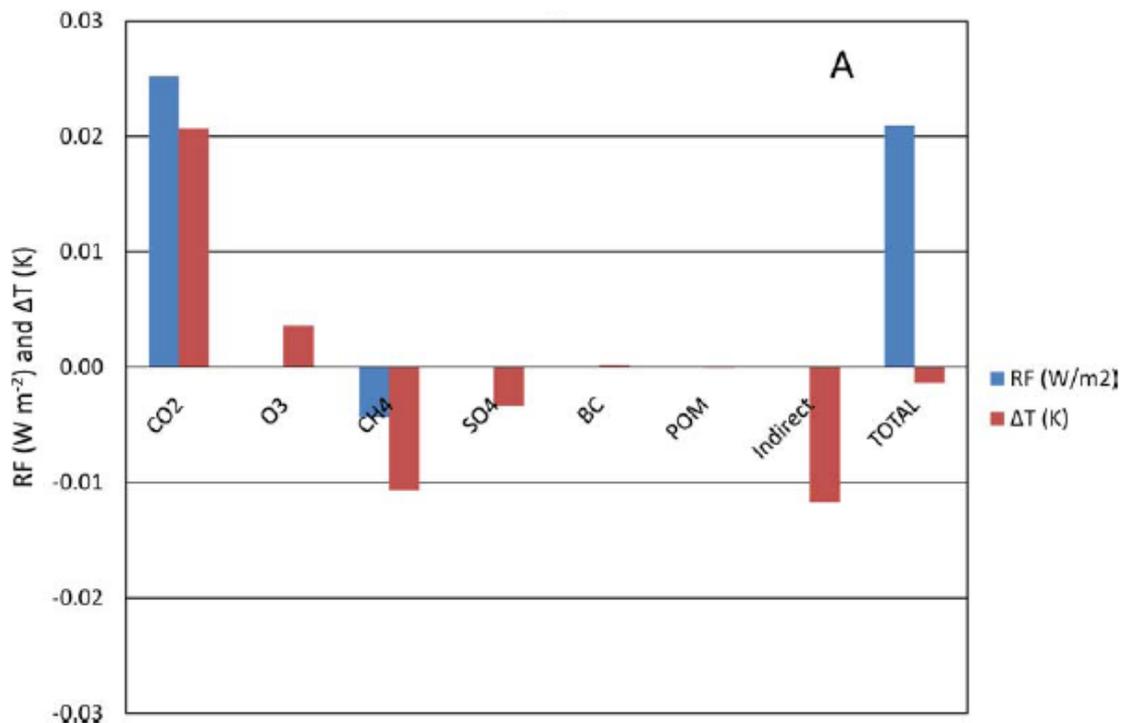
イメージは、あまりに単純化され過ぎて、誤解を招く恐れがある。こういう解析は空間、時間の次元を無視しているからである。

8.33 さまざまな RF 要因の時間の次元が全く異なり、気温応答も異なる可能性がある。短命の排出種物質及びその影響、例えば O₃、SO₄ ダイレクト、BC、POM、及び間接効果の場合、排出物質が除去されれば、強制力は応答モデルの離散期間である 1 年以内に急激に消滅する。ただし CO₂ と CH₄ の場合は事情が異なり、前にも説明したように CO₂ は数種類の寿命を有し、同時期に排出された内のごく一部は数千年の間大気中に残存する。メタンは約 12 年の寿命を有し、CH₄ 存在量に対するいかなる摂動（増加・減少とも）も RF を非常にゆっくりと変化させる（さらに、寿命に対する CH₄ の化学的なフィードバック効果がある）。全ての強制力に起因する気温応答は、気候系の熱慣性のために非常に長い時間軸で起こり、それは海洋面と大気との間の熱交換の時間軸の影響を大いに受ける。そのため 1 年以内に消滅する短命の強制力に比べて、その熱応答は非常に長い時間を要する。

8.34 RF と気温の過渡応答は、海運の排出時点から 2007 年までに残るであろう「残存」RF 応答と気温応答を計算することによって求められる。このような異なる見方は、海運による全ての排出が止まるとして 2007 年以降に起きるのが、RF と気温応答であるというものである。この仮想的な状況設定は、図 8-4 の考察からは気付かない各種応答の時間推移を説明する方法として役立つ。

8.35 図 8-5 は、2007 年以前の海運排出物による 2050 年と 2100 年の残存 RF と気温応答をその時点の値で表示したものである。

パネル A : 2007 年以前の海運排出物による 2050 年時点の残存 RF 及び全球平均 ΔT



パネル B : 2007 年以前の海運排出物による 2100 年時点の残存 RF 及び全球平均 ΔT

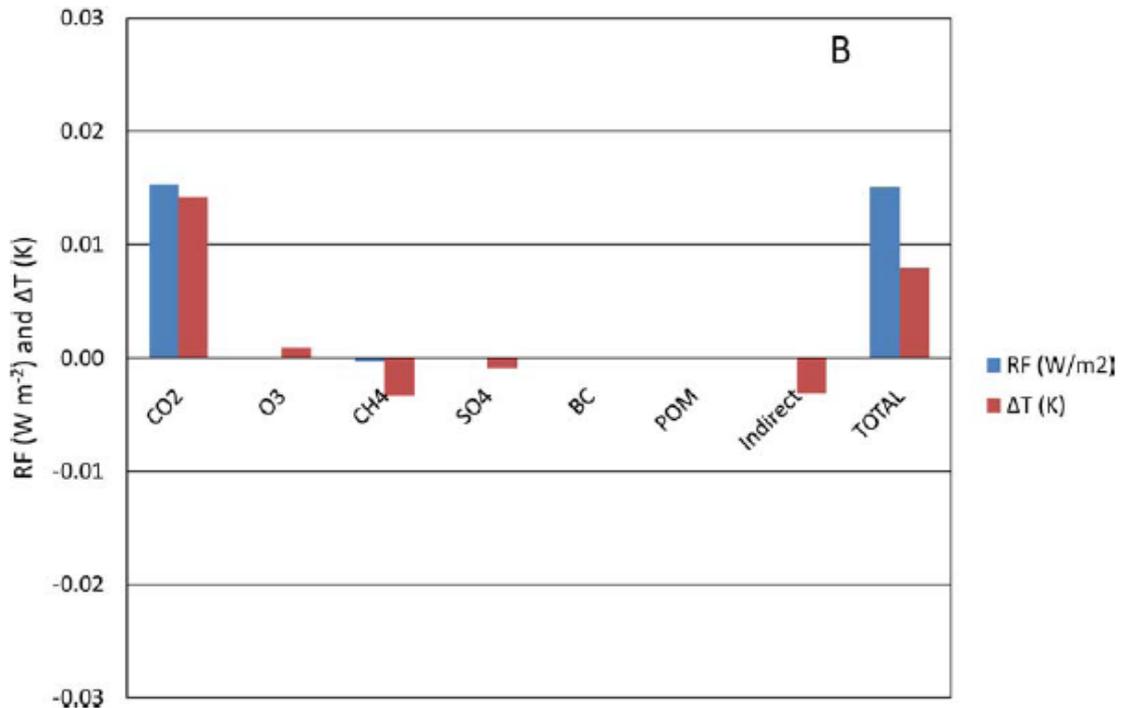


図 8-5 2007 年以前の海運排出物による残存 RF 及び気温応答

2050 年時点 : パネル A、2100 年時点 : パネル B

この図には、船舶に関しては未だ解析されていない BC と雪の相互作用によるプラスの RF は含まない。

8.36 2050 年には、残存 RF はすでにマイナスからプラスに切り換わっているが、気温影響は未だマイナスである。これは CO₂ による RF がゆっくりではあるが減衰するのに対し、大きなマイナスの強制力を主要素（間接効果）とする強力で持続性のあるマイナスの気温影響が未だ残るためである。2100 年までには残存 RF 及び気温応答ともにプラスに切り換わる。これは、CO₂ によるプラスの RF が保持され続ける一方で、CH₄ の減少によるマイナスの残存 RF が消滅するためである。同様に CO₂ によるプラスの気温影響が残って、間接効果によるマイナス要素がほとんど消滅する。

8.37 RF 及び気温応答を異なる時間経過で検討し図解できる多くの方法がある。一般的に使用される RF の気候尺度（気候影響を測る尺度）は、大部分が回顧（backward-looking）尺度である。すなわちある時点においてそれまでの排出によって発生した RF を求めるものだ。そのような RF では、すでに説明したように、CO₂ あるいは CH₄ のような寿命の長い温室効果ガスの効果のみが残り、気温応答のプラス・マイナスが切り換わる可能性さえあるにもかかわらず、その排出の結果として将来に起こることについては何も予測できない。予見（forward-looking）尺度であれば、政策の策定及び CO₂ 等価（CO₂-e）排出量の割当などに利用できる。地球温暖化係数（GWP）あるいは地球温度変化係数（GTP; Shine 他 2005）のような尺度であれば、

微々たるものとはいえ放射的に活性な物質のある将来の時点における単位排出量当たりの影響を CO₂ と比較して評価することができる。絶対地球温暖化係数 (AGWP) は RF を時間軸で積分したものだ。これらの尺度が Fuglestedt 他 (2009) によって詳細に検討された。GTP 尺度による CO₂ 換算排出量の評価では、CO₂ による温暖化と硫酸化物並びに窒素酸化物の冷却化の相殺によって、現状の排出物質のネットの全球平均効果が 50 年後にはゼロに近づくと予測されている (Eyring 他 2009、Fuglestedt 他 2009)。

- 8.38 精密な排出シナリオと少し不確かな (特に間接効果) RF 応答の強さから総合的に判断すれば、海運の全体効果は将来、冷却化から温暖化に切り換わるものと思われる。理由は、CO₂ の持続性と蓄積による温暖化影響が最後にはいかなる冷却化影響よりも勝るとされるためである。
- 8.39 これまでの計算には、船舶排出に関して未だ検証されていない可能性の一つで、BC と雪との相互作用によって起こるかもしれないプラスの RF が考慮されていない (Hansen と Nazarenko 2004、Hansen 他 2005、Koch と Hansen 2005、Flanner 他 2007)。Flanner 他 (2007) は、予後のエアロゾルの移動も考慮した全球気候モデルと雪、氷、エアロゾルの放射モデルを合体させて、雪に堆積する石油燃料、バイオ燃料、バイオマス燃焼による BC 排出物による気候強制力について解析した。彼らは、現状の使用可能な排出予測データに基づけば、雪中への BC 封入によって起こる全球平均平衡温暖化は年間 0.1°C から 0.15°C であるが、北極圏だけで見れば温暖化影響がかなり大きいことを発見した (年間 0.5°C から 1.621°C)。この検討結果は、特に北極圏においては、雪と BC の相互作用が全体のエアロゾル気候強制力の中でも重要な要素となることを示唆するものだ。船舶にとっても同様の BC・雪相互作用によるプラスの強制力が将来北極圏において重要な役割を果たす可能性がある。北極圏は今や地上でもっとも急激な気候変動を経験している。北極圏における気温上昇の速度は、年間平均で世界の他の地域の 2 倍である。過去 50 年間の観察結果では、北極圏における海氷は、夏季がもっとも顕著であるが年間を通しての氷解が認められた。北極圏の海氷の溶解によって、北極海域が効果的に開放され、人類の活動、特に海運及び石油とガスの生産に対する門戸が開かれる可能性がある (IPCC 2007、Pharand 2007、Serreze 他 2007)。北極圏の温暖化傾向は、北極海の氷の厚みが減少して氷結海域が狭まる季節が延長されることを意味し、北極海盆の縁周辺の船舶のアクセスが向上する。気候モデルによって、この傾向が加速され、新しい航路の開設及び海運可能期間の拡大が進むことが示された。最近までこの海域での貨物の海上輸送は非常に限定され、報告された船舶排出量は低いものであった (Corbett 他 1999、Endresen 他 2003)。ヨーロッパと北太平洋地域の間をバレンツ海経由で北海航路 (NSR) を選択すれば、今日利用中のルートに比べて航海日数を最大 50% 短縮できる (Fridtj of Nansen Institute 2000)。従って年間の航海可能日数が増えれば、このルートを通る通行量が増加し、その場合 BC・雪効果は将来さらに重要なプラスの強制力要因となるであろう。

空間分布及び気温以外の気候応答

- 8.40 空間的な次元もまた、全球平均の RF 及び気温応答では表に出ない要素である。CO₂ のような長寿命の温室効果ガスは、RF 分布においても空間的な偏りが小さい。しかし O₃、SO₄、エアロゾル、間接効果などの短命の強制媒体は、強制力分布が空間的に不均一となる。
- 8.41 NO_x 排出の場合は、それによる O₃ の RF が CH₄ のマイナス RF 応答に比べて寿命が極端に短いため（週対年）、空間的な偏りが大きい。二つの要因が重なった結果、NO_x 排出によるネットの強制力はゼロ、もしくは若干マイナスとなり、全球平均気温応答は、これによる全球平均の地表温度に変化がないか、あるいはトータルでわずかに冷却かのいずれかである。これは気候応答が微々たるものというよりもむしろ評価の尺度及びモデルの限界である。局地的な強制力は、プラス・マイナスが相反する強制力（例えばそれが地球規模では同程度の強度であっても）によって相殺されない可能性がある。
- 8.42 局地的な気候影響なのか、全球的な気候影響なのかを判断するには、海洋・大気結合気候モデルを解析しなければならない。この計算は、計算機の利用コストが高く、微小摂動の S/N 比の問題に悩まされ、たくさんのシミュレーションあるいは長期の平衡シミュレーションが必要となる。地球・海洋結合気候システム特有のフィードバック効果によって、異なる強制力分布であっても似たような気温応答の空間分布の結果となるとの報告がある（Boer と Yu 2003）。ただし「気候」とは気温だけではない。似たような強度の強制力であっても空間分布が異なれば、降水量の分布が変化するととの報告がある（Taylor と Penner 1994）。
- 8.43 海運による RF の全体的な分布を求めるために、Lee 他（2009a）は、O₃ と CH₄ に対して全球対流圏化学モデル MOZART v2（8.20 項から 8.22 項で説明）を適用した。彼らは先に説明した全球エアロゾルモデル E5/M1-MADE を使って、エアロゾルの直接・間接効果のゾーン平均 RF 分布を求めたほか、エアロゾルと雲量の応答をもとめるために GCM を、CO₂ 応答を求めるために海洋・大気結合 GCM を使用した。2007 年の RF の IMO 予測に対して求めたゾーン平均 RF 分布を図 8-6 に示す。上で説明したような緯度によって強制力が変化する様子がはっきりと表わされた。

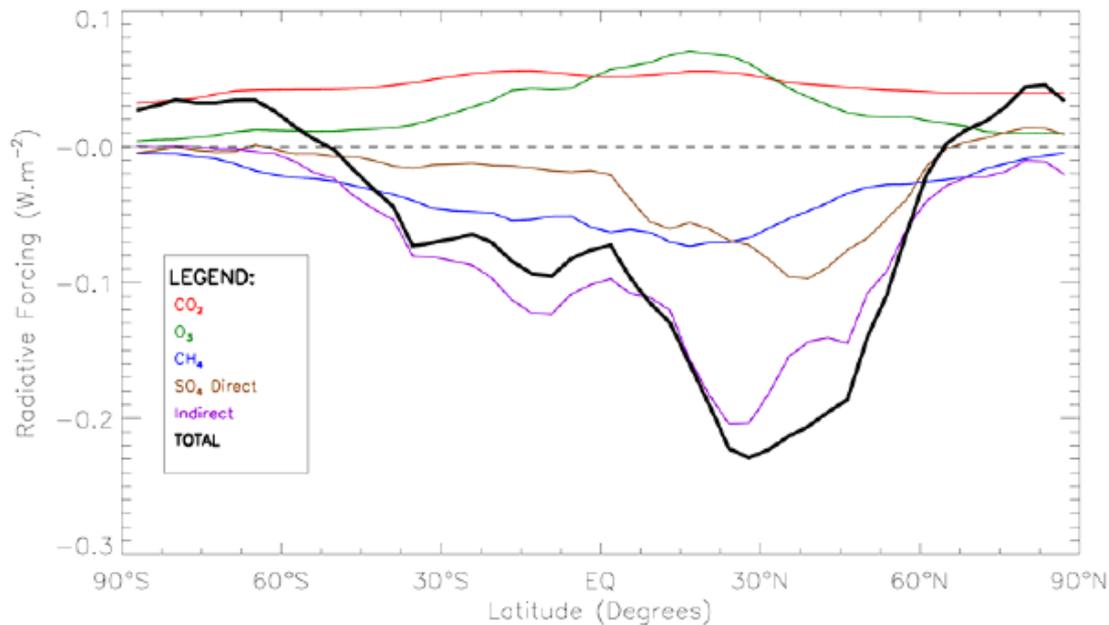


図 8-6 IMF の 2007 年海運 RF 推定 (Lee 他 2009a を修正) を使用した海運 RF の緯度による年間平均値の変動

CO₂ に対する海運と気候安定化

8.44 気候安定化に関する初期の解説が Wigley 他 (1996) によってなされ、その後 IPCC の第 2 回評価レポート (IPCC 1996) でも取り上げられた。この「安定化」という語句は、大気濃度並びに大気温度に対して同じ程度に使用され、排出量にも誤って使用されることがある (排出量の安定化は、21 世紀の CO₂ 濃度あるいは気温の安定化を達成するものではない)。厳密に言えば「安定化」は、いわゆる WRE (Wigley、Richels、Edmonds の頭文字) シナリオを背景とする CO₂ 濃度に適用される。

8.45 気候は CO₂ に対して複雑な応答をするため、ここで CO₂ の安定化の概念と排出履歴 (pathway) について説明する。第一に、CO₂ は大気中に長期間残ること知られ、300 年を超えるオーダーになる。厳密に言えば反応時間が異なる複数の発生源や吸収源が存在するため、CO₂ は単一の寿命を持つわけではない (Harvey 2000、IPCC 2007¹⁵ を参照)。第二に、気温の観点から、気候系の熱慣性が大きく海洋と大気間の熱交換に長時間を要するために、CO₂ 排出量と気温変化の間の応答が遅れる。これは何十年のオーダーである。従って気温の応答を制限するには、気候系が 2100 年ごろまでに応答するように排出削減に関する早期の対応が必要とされる。

8.46 21 世紀末までに大気中の CO₂ 濃度の安定化を達成するには、将来の CO₂ のグローバル排出量の相当な削減が必要である。いくつかのレベル (例えば 450ppm、550ppm)

¹⁵ 「よくある質問」7.1 を参照 (http://ipcc-wgl.ucar.edu/wgl/Report/AR4WG1_Print_FAQs.pdf)

2008 年 8 月 6 日アクセス済み

で CO₂ 濃度を安定化させた場合、その結果生じる気温変化は、気候感度によって変わる。気候感度とは、CO₂ 濃度が倍増した場合の全球平均地表温度変化を示し、気候モデルの共通指標である。気候感度は通常 2°C から 4.5°C の間にあると予測される。

- 8.47 気候安定化に関して、550ppm で安定させた場合は全球平均地表温度変化 2°C という目標は達成できないが、450ppm ならば 50%の可能性で達成できる、とした最近の研究報告がある (Tirpak 他 2005)。より最近になって NASA Goddard 宇宙科学研究所理事長の James Hansen 教授は、350ppm の CO₂ 濃度が「危険な気候変動」を防止するより最適なレベルであるが、これは 385ppm という現状の大気濃度よりも低い、と指摘した (Hansen 他 2008)。この主張は古い気候データの解析に基づくものである。
- 8.48 CO₂ 濃度 450ppm という繰り返し検討されてきた目標を達成するには、CO₂ のグローバル排出量を、図 8-7 の WRE 450 で表わされた値に制限しなければならない。図には WRE 550 排出履歴カーブも示した。
- 8.49 以下の項では、今回の調査報告で作成した海運による排出シナリオと照合しながら、CO₂ 安定化排出履歴の概念を取り上げる。これは単なる説明に過ぎないことに注意されたい。重要な要素であるが、本調査報告書の海運排出シナリオは、本質的にいかなる気候施策の介入も想定しない (IPCC の SRES 背景シナリオ筋書きと同様)。したがって、安定化シナリオは明らかに気候施策の介入を意味するから、両者の「筋書き」は本質的に異なる。
- 8.50 図 8-7 は、気候介入施策がないと想定したシナリオにおける海運排出量の増加予測と 450ppm の CO₂ 大気濃度の安定化との間に潜む不一致を表わすものである。図 8-7 が示すように、ベースシナリオにおける 2050 年の海運の排出量は、その時点の WRE 450 シナリオのグローバル排出量の 12-18%を占めると予測される (合わせて表 8-4 も参照)。
- 8.51 WRE 安定化シナリオは、排出量の求め方に関する限り、規定しているものではない。なぜなら WRE の排出量は CO₂ 大気濃度の安定化を達成するためという逆モデルによって求められたからである。本調査報告書で提示した海運シナリオは SRES 式の前提に基づくものである。それは WRE シナリオと違って、気候施策介入有りのシナリオではない。そのため基本的な考え方で両立しない。にもかかわらず、もし海運が安定化に貢献するのであれば、想定以上の削減が必要となる可能性が非常に高いことを説明するために、安定化に必要な排出履歴と比較する形で SRES ベースの海運排出予測を併記するのは意味のあることといえる。

表 8-4 WRE 安定化シナリオグローバル排出量に占める海運排出量の比率
(2050 年時点)

	A1FI	A1B	A1T	A2	B1	B2
WRE 450	17.6%	17.9%	17.8%	14.1%	13.4%	12.0%
WRE 550	9.7%	9.9%	9.8%	7.8%	7.4%	6.6%

WRE 450/550 排出量安定化に対する海運活動の影響

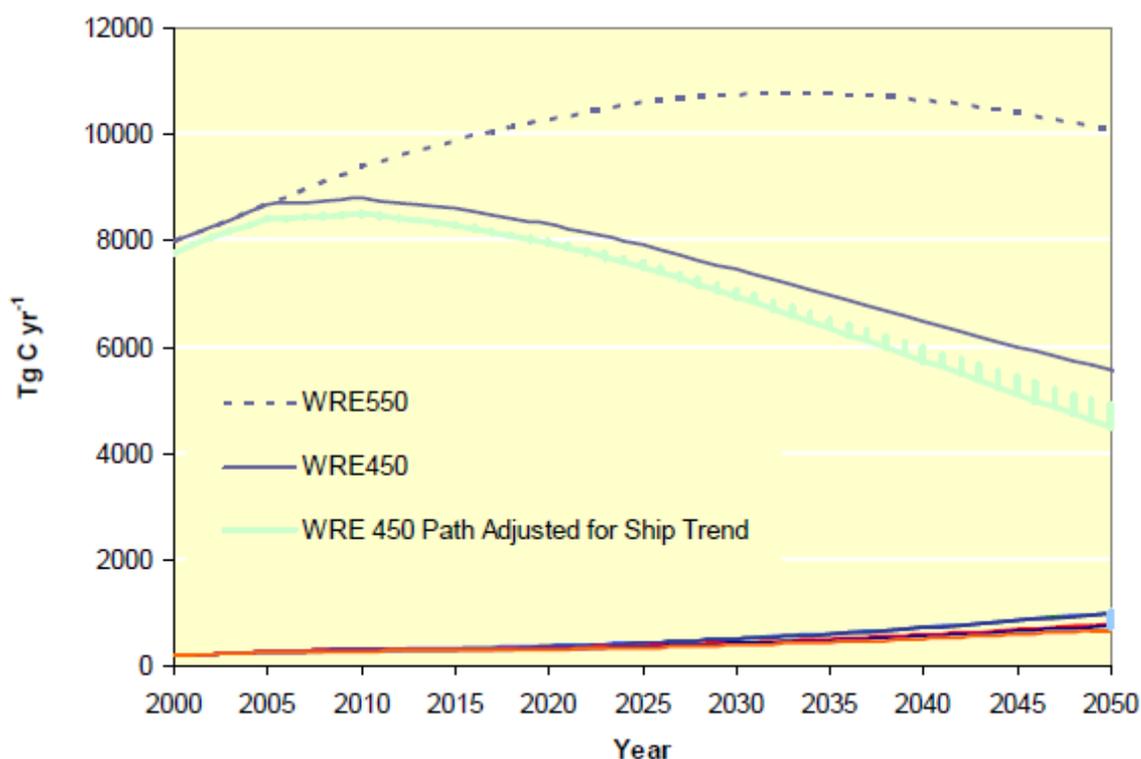


図 8-7 海運予測排出量の比較

対 WRE450、対 WRE550、および 修正 WRE450 (グローバルトータル - 海運排出量)

人体の健康に対する影響

8.52 外洋航行船は、地上レベルオゾンの形成と移動及び硫黄物質並びに粒子状物質の排出を通して、局地的、地域的な規模で人体の健康に影響を与える (Corbett 他 2007)。多くの港湾都市で、船舶による排出は都市公害の主たる発生源となった。さらに、船舶が排出する NO_x、CO、VOC、粒子状物質、硫黄 (およびその派生物) などは、たとえ海上で排出されても、数百キロ離れた大気中まで運ばれ、遠い内陸での大気環境を汚染する可能性がある。運ばれる経路にあたる場所では硫黄及び窒素化合物が堆積し、自然界の生態系と淡水系の酸性化及び富栄養化の原因となるほか、過度の窒素入

力によって生物の多様性が脅かされる (Eyring 他 2007b、2009)。このため NO_x、SO₂、粒子状物質の排出抑制は、大気環境汚染、酸性化、富栄養化を防止する有効な対策となる。

- 8.53 Corbett 他 (2007) は、外洋航行船による PM の排出が引き起こす新肺疾患と肺がんによる若年死が年間 6 万件に上ると報告した。彼らのシナリオでは 2012 年までにさらに 40% の増加を予測するが、シナリオには 2008 年 10 月に IMO の海洋環境保護委員会 (MEPC) で採択された船舶による有害排出物を削減する MARPOL Annex VI 規制の修正内容は盛り込まれていない。Corbett 他 (2007) の死亡予測値には、呼吸器疾患 (例えば気管支炎、ぜんそく、肺炎) のようなその他の健康被害によるものは含まれていない。健康被害はヨーロッパ、東アジア、南アジアの海岸線近くに集中する。

まとめと結論：気候影響

- 8.54 国際海運及びその排出物質は大気組成、人間の健康、そして気候に大きな影響を与える。それらの影響は、緯度によって、あるいは排出場所が沿岸地域か外海かによって事情が異なる場合もある。船舶が排出する化合物及びその反応物質には、それによる RF がプラスのもの (CO₂、O₃、BC) とマイナスのもの (例えば、硫酸塩粒子の直接効果、メタンの大気中濃度の減少) がある。粒子状物質は、雲核 (CCN) として作用することにより、あるいは雲粒中で溶解することにより、そして表面張力が変わることによって (いわゆる間接的なエアロゾル効果) 雲の光学特性を変える性質を持ち、気候に対して間接的に影響を及ぼす。そこでは雲が光学的な輝きを増し、より多くの太陽放射を宇宙に反射して戻すようになる。不確かさが依然として高いモデルではあるがその結果によると、変質された雲による冷却効果が現状の海運による温室効果ガス (CO₂ あるいは O₃) の温暖効果を上回り、現状のところネットの RF はマイナスになることが分かった。ただしこのモデル計算は、BC と雪との相互作用によって予測されるプラスの RF は考慮していない。BC・雪の相互作用は、船舶に対しては未だ検証されていない。
- 8.55 硫黄排出量の減少によってそれに伴うマイナスの RF が局地的に減少する可能性がある。プラスの RF とマイナスの RF の気候的な相殺は、未だ一つの研究課題であるが、全球平均値の単純な相殺が無意味であることは自明であり、より包括的な評価基準が必要である。しかしながら、CO₂ が排出後も長期にわたって大気中に残って温暖効果を発揮し続けることを強調したい。IPCC 第 4 次評価報告においても、かなりの割合の CO₂ が数千年のオーダーで大気中に残ることを重要視した。対照的に硫酸塩の大気中の残存期間は 10 日程度で、硫酸塩による気候応答は 10 年のオーダーである。因みに CO₂ による気候応答は数世紀以上のオーダーとなる。確かに、全球気温変化ポテンシャル (GTP) という尺度で各排出物質の CO₂ 換算排出量を見ると、現状の排出の 50 年後のネット効果は、CO₂ による温暖化と硫酸塩及び NO_x による冷却化の相殺によってほぼ中立になる (Eyring 他 2009)。このことは、2007 年までに放出された排出物質の 2050 年と 2100 年時点での残存効果を計算するモデルでも裏付けられた。すなわち、CO₂ の今までの排出量によるネット RF は 2050 年までにはプラスに変わ

るが、CH₄によるマイナスのRF 応答が未だ残るのである。しかし全体のネットの気温効果は、この「2007 年で船舶排出量を無くす」シナリオにおいても、気候系のゆっくりとした応答（海洋の熱慣性による）のために 2050 年には依然としてマイナスである。2100 年までにはいかなる有効なマイナスの強制力も確認されていないが、CO₂による 2007 年時点のプラスのRF の 32%は 100 年後にもまだ残る。従って 2100 年には、残存する気温応答及びRF 応答はともにプラスである。このシミュレーション結果は CO₂ 及びその気候影響の長寿命特性を証明するものである。

結論

8.56 以下の結論が導かれた。

- .1 二酸化炭素のような十分に混合された温室効果ガスが増加することによってプラスの放射強制力が発生し、長期的には地球温暖化をもたらす。
- .2 海運が 2007 年に排出した CO₂による RF は 49 mW m⁻² と計算される。IPCC 第 4 次評価報告によると（すべての排出源からの）CO₂によるトータル RF は 1.66 mWm⁻²（2005 年）であり、船舶の RF は 2005 年のトータル的人為的 CO₂ RF の約 2.8%を占める。
- .3 2050 年シナリオの計算結果によると、海運が排出した CO₂による RF は 99 から 122 mWm⁻²の間にあるが、その最小・最大不確かさは 68 mW⁻²と 152 mWm⁻²である。
- .4 船舶による 2007 年時点のトータル RF は-110 mWm⁻²と予測されるが、かなり不確かな間接効果（-116 mWm⁻²）の影響を受け、さらに船舶に関しては未検証だがおそらくプラスのRF となる BC と雪との相互作用は考慮されていない。CO₂が長期にわたって大気中に残り、排出後も長く温暖効果を持ち続けることを強調したい。このことは、2007 年までの船舶排出による残存効果が気温に対する冷却効果から温暖効果に切り換わることを示すことによって証明された。対照的に硫酸塩は大気中の残存期間が約 10 日しかない。硫酸塩による気候応答は 10 年のオーダーであるが、CO₂の場合は数百年から数千年のオーダーとなる。
- .5 全球平均の RF 応答及び気温応答を簡略化計算によって求め、他の研究結果（例えば Fuglestad 他 2008）と一致することを確認した。他の研究でも強調されたように、全球平均気温応答は気候変動の 1 次の指標でしかない。今回の調査報告の計算によって海運による RF が複雑な空間分布を有することが分かった。雲による間接的な強制効果を扱ったより一般的な他の研究では、局地的なマイナスの強制力によって気温応答がさほど変化しない場合でも、降水パターンがかなり変化したことが報告された。マイナスの強制力によってもそのような降水パターンの変化も気候変動の一つである。これは複雑な課題であり、更なる検討が必要である。
- .6 船舶からの NO_x、SO₂、粒子状物質の排出抑制は、大気環境、酸性化、富栄養化に対する有効な対策であり、船舶及び他の運送形態を含む全ての発生源からの CO₂ 排出削減は、地球温暖化防止のために必要とされる。さらにクリーン燃焼及びクリーン燃料へのシフトは、使用する燃料の単位量当たりの CO₂ 排出量を削減させる技術が強力な推進力となる。

- 7 気候安定化のためには、将来 CO₂ グローバル排出量をかなり削減しなければならない。今回の調査報告用に作成したシナリオ（気候施策による介入が無いことを前提とする SRES シナリオに基づくもの）における 2050 年の海運の予測排出量は、WRE 450 シナリオ排出量の 12%から 18%を占める。ここでの WRE 450 シナリオ排出量とは、全球平均気温の上昇を 50%以上の確立で 2°C に抑制する場合に、2050 年に許容される CO₂ のグローバル排出量を指す。

特記事項

- 8.57 全球モデルシミュレーション並びに海運によるゾーン別年間平均 RF 計算をお願いした Jerome Hilaire (MMU 英国)、Axel Lauer (ハワイ大学 米国)、Michael Ponater (DLR ドイツ)、Ruben Rodriguez (MMU 英国) の諸氏に感謝の意を表します。これらは本報告書の図 8-6 に提示されている。

参考文献

- 1 Ackermann, I.J., Hass, H., Memmesheimer, M., Ziegenbein, C. and Ebel, A. 1998. "Modal aerosol dynamics for Europe: Development and first applications". *Atmospheric Environment*. 32, 2981–2999.
- 2 Archer, D. and Brovkin, V. 2008. "The millennial atmospheric lifetime of anthropogenic CO₂". *Climatic Change*. 90, 283–297, doi:10.1007/s10584-008-9413-1.
- 3 Boer, G.J. and Yu, B. 2003. "Climate sensitivity and climate state". *Climate Dynamics*. 21, 167–176.
- 4 Corbett, J.J. 2003. "New directions: Designing ship emissions and impacts research to inform both science and policy". *Atmospheric Environment*. 37, 4719–4721.
- 5 Corbett, J.J., Fischbeck, P.S. and Pandis, S.N. 1999. "Global nitrogen and sulphur inventories for oceangoing ships". *Journal of Geophysical Research*. 104(3), 3457–3470.
- 6 Corbett, J.J., Winebrake, J.J., Green, E.H., Kasibhatla, P., Eyring, V. and Lauer, A. 2007. "Mortality from ship emissions: A global assessment". *Environmental Science & Technology*. 41, 8512–8518, doi:10.1021/es071686z.
- 7 Davis, D.D., Grodzinsky, G., Kasibhatla, P., Crawford, J., Chen, G., Liu, S., Bandy, A., Thornton, D., Guan, H. and Sandholm, S. 2001. "Impact of ship emissions on marine boundary layer NO_x and SO₂ distributions over the Pacific Basin". *Geophysical Research Letters*. 28, 235–238.
- 8 Durkee, P.A., Chartier, R.E., Brown, A., Trehubenko, E.J., Rogerson, S.D., Skupniewicz, C., Nielsen, K.E., Platnick, S. and King, M.D. 2005. "Composite ship track characteristics". *Journal of Atmospheric Science*. 57, 2542–2553.
- 9 Endresen, Ø., Sørgård, E., Sundet, J.K., Dalsøren, S.B., Isaksen, I.S.A., Berglen, T.F. and Gravir, G. 2003. "Emissions from international sea transportation and environmental impact". *Journal of Geophysical Research*, 108(D17), 4560, doi:10.1029/2002JD002898.
- 10 Endresen, Ø., Sørgård, E., Behrens, H.L., Brett, P.O. and Isaksen, I.S.A. 2007. "A historical reconstruction of ships' fuel consumption and emissions". *Journal of Geophysical Research*. 112, D12301, doi:10.1029/2006JD007630.
- 11 Eyring, V., Stevenson, D.S., Lauer, A., Dentener, F.J., Butler, T., Collins, W.J., Ellingsen, K., Gauss, M., Hauglustaine, D.A., Isaksen, I.S.A., Lawrence, M., Richter, A., Rodriguez, J.M., Sanderson, M., Strahan, S.E., Sudo, K., Szopa, S., van Noije, T.P.C. and Wild, O. 2007a. "Multi-model simulations of the impact of international shipping on atmospheric chemistry and climate in 2000 and 2030". *Atmospheric Chemistry and Physics*. 7, 757–780.
- 12 Eyring, V., Corbett, J.J., Lee, D.S. and Winebrake, J.J. 2007b. "Brief summary of the impact of ship emissions on atmospheric composition, climate, and human health". Health and Environment Sub-Group of the International Maritime Organization: London, UK, 6 November 2007.
- 13 Eyring, V., Isaksen, I.S.A., Bernsten, T., Collins, W.J., Corbett, J.J., Endresen, O., Grainger, R.G., Moldanova, J., Schlager, H. and Stevenson, D.S. 2009. "Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping". *Atmospheric Environment*, under revision.
- 14 Fearnleys. 2007. *Fearnleys Review 2007, The Tanker and Bulk Markets and Fleets*, Oslo.

- 15 Flanner, M.G., Zender, C.S., Randerson, J.T. and Rasch, P.J. 2007. "Present-day climate forcing and response from black carbon in snow". *Journal of Geophysical Research*. 112, D11202, doi:10.1029/2006JD008003.
- 16 Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Bernsten, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M. and Van Dorland, R. 2007. "Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing". In 'Climate Change', Fourth Assessment Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- 17 Fridtjof Nansen Institute (FNI). 2000. "Northern Sea Route Cargo Flows and Infrastructure – Present State and Future Potential". FNI REPORT 13/2000. ISBN 82-7613-400-9. Fridtjof Nansen Institute, PO Box 326, N-1326 Norway.
- 18 Fuglestad, J.S., Bernsten, T., Myhre, G., Rypdal, K. and Bieltvedt Skeie, R. 2008. "Climate forcing from the transport sectors". *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 105, 454–458.
- 19 Fuglestad, J.S., Shine, K.P., Cook, J., Bernsten, T., Lee, D.S., Stenke, A., Bieltvedt Skeie, R., Velders, G.J.M. and Waitz, I.A. 2009. "Transport impacts on atmosphere and climate: metrics". *Atmospheric Environment*, under revision.
- 20 Hansen, J. and Nazarenko, L. 2004. "Soot climate forcing via snow and ice albedos". *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 101, 423–428, doi:10.1073/pnas.2237157100.
- 21 Hansen, J., *et al.* 2005. "Efficacy of climate forcings". *Journal of Geophysical Research*. 110, D18104.
- 22 Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., Beerling, D., Berner, R., Masson-Delmotte, V., Pagani, M., Raymo, M., Royer, D.L. and Zachos, J.C. 2008. "Target atmospheric CO₂: where should humanity aim?" Manuscript online <http://arxiv.org/abs/0804.1126> (accessed 6 August 2008).
- 23 Harvey, L.D.D. 2000. *Global Warming: the hard science*. Prentice Hall, London.
- 24 Hasselmann K., Sausen, R., Maier-Reimer, E. and Voss, R. 1993. "On the cold start problem in transient simulations with coupled atmosphere-ocean models". *Climate Dynamics*. 9, 53–61.
- 25 Hasselmann K., Hasselmann, S., Giering, R., Ocana, V. and von Storch, H. 1997. "Sensitivity study of optimal CO₂ emission paths using a Simplified Structural Integrated Assessment Model (SIAM)". *Climatic Change*. 37, 345–386.
- 26 Horowitz, L.W., Walters, S., Mauzerall, D.L., Emmons, L.K., Rasch, P.J., Granier, C., Tie, X., Lamarque, J.-F., Schultz, M.G., Tyndall, G.S., Orlando, J.R. and Brasseur, G.P. 2003. "A global simulation of tropospheric ozone and related tracers: Description and evaluation of MOZART, version 2". *Journal of Geophysical Research*. 108(D24), 4784, doi:10.1029/2002JD002853.
- 27 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1996. *Climate Change 1995: the science of climate change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callender, B.A., Harris, N., Kattenberg, A. and Maskell, K. (eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK. 572 pp.
- 28 IPCC, 1999. *Aviation and the Global Atmosphere*. Penner, J.E., Lister, D.H., Griggs, D.J., Dokken, D.J. and McFarland, M. (eds), Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- 29 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2000. *Emission Scenarios. A Special Report of IPCC Working Group III*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- 30 IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. and Miller, H.L. (eds). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 31 Jöckel, P., Sander, R., Kerkweg, A., Tost, H. and Lelieveld, J. 2005. "Technical Note: The Modular Earth Submodel System (MESSy) – a new approach towards Earth System Modeling". *Atmospheric Chemistry and Physics*. 5, 433–444.
- 32 Kasibhatla, P., Levy II, H., Moxim, W.J., Pandis, S.N., Corbett, J.J., Peterson, M.C., Honrath, R.E., Frost, G.J., Knapp, K., Parrish, D.D. and Ryerson, T.B. 2000. "Do emissions from ships have a significant impact on concentration of nitrogen oxides in the marine boundary layer?" *Geophysical Research Letters*. 27, 2229–2233.
- 33 Koch, D. and Hansen, J. 2005. "Distant origins of Arctic black carbon: A Goddard Institute for Space Studies ModelE experiment". *Journal of Geophysical Research*. 110, D04204, doi:10.1029/2004JD005296.
- 34 Lauer, A., Eyring, V., Hendricks, J., Jöckel, P. and Lohmann, U. 2007. "Global model simulations of the impact of ocean-going ships on aerosols, clouds, and the radiation budget". *Atmospheric Chemistry and Physics*. 7, 5061–5079.
- 35 Lawrence, M.G. and Crutzen, P.J. 1999. "Influence of NO_x emissions from ships on tropospheric photochemistry and climate". *Nature*. 402, 167–170.
- 36 Lee, D.S., Lim, L.L., Eyring, V., Sausen, R., Endresen, Ø. and Behrens, H.L. 2007. "Radiative forcing and temperature response from shipping". In *Transport, Atmosphere and Climate*. Sausen, R., Lee, D.S. and Fichter, C. (eds). Oxford, 26–29 June, 2006. European Commission Air Pollution Report, 208–213.

- 37 Lee, D.S., Eyring, V., Hilaire, J., Lauer, A., Lim, L.L., Ponater, M. and Rodriguez, R. 2009a. "Radiative forcing from shipping emissions: spatial and zonal mean responses". Manuscript in preparation.
- 38 Lee, D.S., Fahey, D., Forster, P., Newton, P.J., Wit, R.C.N., Lim, L.L., Owen, B. and Sausen, R. 2009b. "Aviation and global climate change in the 21st Century". Atmospheric Environment. under revision.
- 39 Lim, L.L., Lee, D.S., Sausen, R. and Ponater, M. 2007. "Quantifying the effects of aviation on radiative forcing and temperature with a climate response model". In Transport, Atmosphere and Climate. Sausen, R., Lee, D.S. and Fichter, C. (eds). Proceedings of an international conference, Oxford, 26-29 June 2006. European Commission Air Pollution Report, 202–207.
- 40 Livesey, R.K. 1989. *Mathematical Methods for Engineers*. Ellis Horwood Limited, Chichester, UK.
- 41 Lohmann, U., Feichter, J., Chuang, C.C. and Penner, J.E. 1999. "Prediction of the number of cloud droplets in the ECHAM GCM". *Journal of Geophysical Research*. 104, 9169–9198.
- 42 Lohmann, U. 2002. "Possible aerosol effects on ice clouds via contact nucleation" *Journal of Atmospheric Science*. 59, 647–656.
- 43 Meier-Reimer, E. and Hasselmann, K. 1987. "Transport and storage of CO₂ in the ocean – an inorganic ocean-circulation carbon cycle model". *Climate Dynamics*. 2, 63–90.
- 44 Myhre, G., Highwood, E.J., Shine, K.P. and Stordal, F. 1998. "New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases". *Geophysical Research Letters*. 25, 2715–2718.
- 45 Pharand, D. 2007. "The Arctic waters and the Northwest Passage: a final revisit". *Ocean Development and International Law*. 38, 3–69, doi:10.1080/00908320601071314.
- 46 Ramaswamy, V., Chanin, M.L., Angell, J., Barnett, J., Gaffen, D., Gelman, M., Keckhut, P., Koshelkov, Y., Labitzke, K., Lin, J.J.R., O'Neil, A., Nash, J., Randel, W., Rood, R., Shine, K., Shiotani, M. and Swinbank, R. 2001. "Stratospheric temperature trends: Observations and model simulations". *Reviews of Geophysics*. 39, 71–122.
- 47 Roeckner, E., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kornblueh, L., Manzini, E., Schlese, U. and Schulzweida, U. 2006. "Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model". *Journal of Climate*. 19, 3771–3791.
- 48 Sander, R., Kerkweg, A., Jöckel, P. and Lelieveld, J. 2005. "Technical Note: The new comprehensive atmospheric chemistry module MECCA". *Atmospheric Chemistry and Physics*. 5, 445–450.
- 49 Sausen, R. and Schumann, U. 2000. "Estimates of the climate response to aircraft CO₂ and NO_x emissions scenarios". *Climatic Change*. 44, 27–58.
- 50 Schreier, M., Kokhanovsky, A.A., Eyring, V., Bugliaro, L., Mannstein, H., Mayer, B., Bovensmann, H. and Burrows, J.P. 2006. "Impact of ship emissions on the microphysical, optical and radiative properties of marine stratus: a case study". *Atmospheric Chemistry and Physics*. 6, 4925–4942.
- 51 Schreier, M., Mannstein, H., Eyring, V. and Bovensmann, H. 2007. "Global ship track distribution and radiative forcing from one year of AATSR data". *Geophysical Research Letters*. 34, L17814, doi:10.1029/2007GL030664.
- 52 Serreze, M.C., Holland, M.M. and Stoeve, J. 2007. "Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover". *Science*. 315, 1533–1536, doi:10.1126/science.1139426.
- 53 Shine, K.P., Fuglestedt, J.S., Hailemariam, K. and Stuber, N. 2005. "Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases". *Climatic Change*. 68, 281–302.
- 54 Taylor, K.E. and Penner, J.E. 1994. "Response of the climate system to atmospheric aerosols and greenhouse gases". *Nature*. 369, 734–737.
- 55 Tirpak D., Ashton, J., Dadi, Z., Meira Filho, L.G., Metz, B., Parry, M., Schellnhuber, J., Yap, K.S., Watson, R. and Wigley, T. 2005. "Avoiding dangerous climate change. International symposium on the stabilisation of greenhouse gas concentrations. Report of the International Scientific Steering Committee". http://www.stabilisation2005.com/Steering_Committee_Report.pdf (accessed 30 June 2008).
- 56 Wigley, T.M.L., Richels, R. and Edmonds, J.A. 1996. "Economic and environmental choices in the stabilisation of atmospheric CO₂ concentrations". *Nature*. 379, 242–245.

第9章 船舶からのCO₂排出量と他の輸送モードからの排出量との比較

はじめに

- 9.1 この章では、CO₂ 排出インベントリ及び貨物輸送能力の平均稼働率の仮定に基づく貨物船の輸送効率について述べる。それを他の輸送モードにおける同様の数字と比較する。効率改善対策の進捗についても紹介する。

定義及び計算方法

- 9.2 輸送の CO₂ 排出効率は、CO₂/ton*km で表わし、ここで、「CO₂」は輸送活動によって排出される総質量（単位：グラム）、「トン・キロメートル」（単位：ton-km）は総輸送仕事量を示す。
- 9.3 ある期間における CO₂ 排出効率を以下のように定義する。

$$CO_2 \text{ efficiency} = \frac{CO_2}{\text{tonne} * \text{kilometre}}$$

ここで、CO₂：期間内に輸送手段が排出したトータル CO₂ 量
トン・キロメートル：同じ期間内に実際になされた仕事のトータルトン・キロメートル量

この原則は、海運、鉄道、航空などの全ての輸送部門に対して適用される。この定義を使うということは、列車、船、大型トラック、その他の運搬手段が貨物を積んでいた、積んでいなかったに限らず、報告期間内に輸送手段から発生した CO₂ 総排出量にカウントされることを意味する。さらに CO₂ 効率が、負荷係数、すなわち積載時に実際に運ばれた貨物の量によって変わることを意味する。この式はエネルギー効率設計指標（EEDI）及びエネルギー効率運航指標（EEOI）でも使用される。

- 9.4 結果的に同じくトン・キロメートル当たりの CO₂ グラムで表わす CO₂ 効率の別の定義がある。例えば満載時の輸送効率を示す場合にこの計算をする。すなわち平均積載率や空の搬送などの事情を考慮しない。そのため、他の文献で報告された数値がここでの数値と異なる場合があり、比較する場合は同じ定義が使われていることを確認する必要がある。海運の場合は、距離の単位として海里がしばしば使われるが、その場合、CO₂ 効率は CO₂-g/ton-mile で表わされる。CO₂-g/ton-mile から CO₂-g/ton-km への変換は 0.540 をかける。

輸送モード別 CO₂ 効率の比較

海上輸送の CO₂ 効率

- 9.5 世界貨物船腹のさまざまなカテゴリ別の輸送効率について論じる場合、2007 年イン

ベントリの CO₂ 排出量の推定値が起点として使われる。一方、各船腹カテゴリが実行した輸送仕事量（トン・キロメートル）も推定する必要がある。今回の調査報告の場合は、Fairplay データベースによる船舶カテゴリ別の平均航行速度と 2007 年インベントリによる主エンジン稼働日数（洋上にいる日数）に基づいてキロメートルを推定した。CO₂ 効率は主エンジンの稼働日数には依存しない。なぜなら、CO₂ 排出量も稼働日数に比例するため、互いに相殺されるからだ。輸送トン数は、船舶の輸送能力（貨物重量）と平均稼働率の推定値の積として計算する。平均稼働率は、各種船舶が空荷のまま戻る航海（バラスト航海）、複数の港への配送、通常の積載率などを加味して決定する。現実的には季節変動、競合、世界貿易の変動などによる船舶能力を満たさない需要不足は珍しくはないが、今回は考慮しなかった。

- 9.6 貨物輸送能力を推定する場合、コンテナ船に対しては、コンテナ当たり 7 ton というネット重量を使用した。RO-RO 船の場合は 2 ton/車線メートル、車輛専用運搬船の場合は 1.5 ton/車輛換算ユニットを使用した。計算結果を表 9-1 に示す。
- 9.7 表 9-1 に示す数字は、船舶カテゴリ別の輸送効率の現実的なレベルを示したものだ。個々の船舶の実際の値及び年間平均は、貿易需要の変動も含めた係数の取り方によって変わる。需要変動の影響は、UNCTAD[1]の船腹生産性データを使って図 9-1 に示す。この図は、船腹輸送能力（DWT で表示される）に対する海上貿易推定量（トン・マイル）の比率が年ごとにかなり変動する可能性があることを示す。この結果、洋上日数、速度、積載稼働率などの多くのパラメータが変動する。

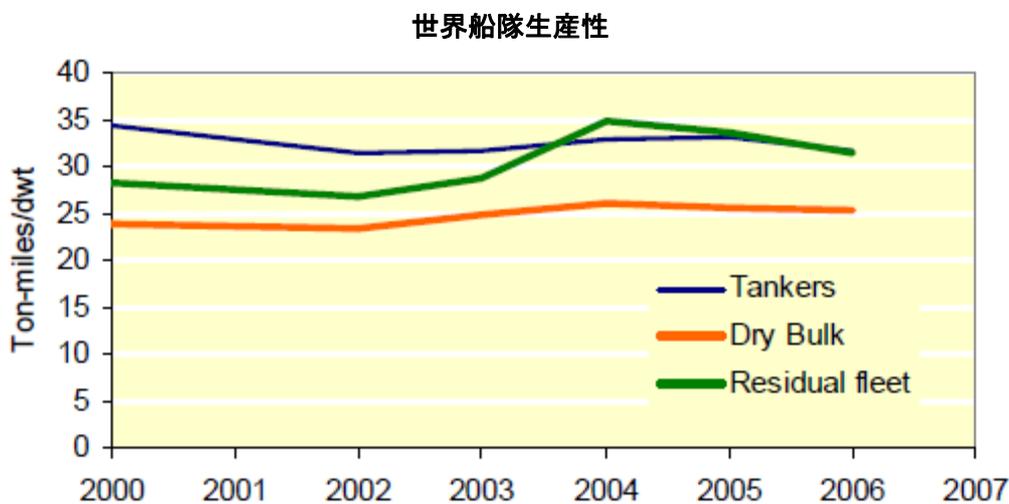


図 9-1 UNCTAD[1]データに基づく船隊生産性

道路輸送の CO₂ 効率

- 9.8 陸上輸送手段の輸送効率は、海運と同じく多くの要因の影響を受ける。すなわち輸送効率は、負荷係数及び車輛と貨物の重量比によって大きく変わる。貨物重量が重くな

るほど、輸送手段が大きくなるほど、貨物/輸送手段の重量比が改善され結果的にCO₂/ton-km 値が向上する。世界の大半の国が法律でトラックやトレーラの総重量を規制するが、それも重要な要因である。規制によって、極めて低密度の貨物(350 kg/m³以下)の輸送でさえも、道路の総重量制限に抵触することが多い。また短距離輸送と長距離輸送では特性が異なる。短距離輸送は主に都市部で利用され、トラックが往路は荷物を積んで走り、復路は空荷で戻るケースが多い。長距離輸送は、都市部まで進入することもあるが、大体は混雑度の低い高速道/自動車専用道を走ることが多い。長い距離を走行するため、往復ともにいかに搬送能力を活用できるかが重要である。急峻な丘、曲がりくねった道路、或いは混雑を含んだ地域の輸送は燃料の消費を増大させる。道路輸送手段による排出量に関する詳細な調査研究は未だ実施されていないが、船舶のデータに匹敵する効率データを、表 9-2 に示す参考文献から引用した。これらの数字から道路輸送の効率が 150 CO₂-g/ton-km を平均値として 80 CO₂-g/ton-km から 180 CO₂-g/ton-km の範囲にあると結論付けた。必然的に、個々のトラック間の効率のばらつきは、表 9-2 に示した平均値の範囲よりもずっと広い。

表 9-1 貨物船の推定 CO₂ 効率

Type	Size	Average cargo capacity (tonne)	Average yearly capacity utilization	Average service speed (knots)	Transport work per ship (tonne-NM)	Loaded efficiency (g of CO ₂ /tonne-km)	Total efficiency (g of CO ₂ /tonne-km)
Crude tanker	oil 200,000+ dwt	295237	48%	15.4	14197046742	1.6	2.9
Crude tanker	oil 120,000–199,999 dwt	151734	48%	15.0	7024437504	2.2	4.4
Crude tanker	oil 80,000–119,999 dwt	103403	48%	14.7	4417734613	3.0	5.9
Crude tanker	oil 60,000–79,999 dwt	66261	48%	14.6	2629911081	4.3	7.5
Crude tanker	oil 10,000–59,999 dwt	38631	48%	14.5	1519025926	5.2	9.1
Crude tanker	oil 0–9999 dwt	3668	48%	12.1	91086398	20.7	33.3
Products tanker	60,000+ dwt	101000	55%	15.3	3491449962	3.3	5.7
Products tanker	20,000–59,999 dwt	40000	55%	14.8	1333683350	7.2	10.3
Products tanker	10,000–19,999 dwt	15000	50%	14.1	464013471	11.3	18.7
Products tanker	5000–9999 dwt	7000	45%	12.8	170712388	14.8	29.2
Products tanker	0–4999 dwt	1800	45%	11.0	37598072	26.5	45.0

Chemical tanker	20,000+ dwt	32200	64%	14.7	1831868715	5.7	8.4
Chemical tanker	10,000–19,999 dwt	15000	64%	14.5	820375271	7.3	10.8
Chemical tanker	5000–9999 dwt	7000	64%	14.5	382700554	10.7	15.1
Chemical tanker	0–4999 dwt	1800	64%	14.5	72147958	18.6	22.2
LPG tanker	50,000+ m ³	46656	48%	16.6	2411297106	5.2	9.0
LPG tanker	0–49,999 m ³	3120	48%	14.0	89631360	27.0	43.5
LNG tanker	200,000+ m ³	97520	48%	19.6	5672338333	5.4	9.3
LNG tanker	0–199,999 m ³	62100	48%	19.6	3797321655	8.4	14.5
Bulk carrier	200,000+ dwt	227000	50%	14.4	10901043017	1.5	2.5
Bulk carrier	100,000–199,999 dwt	163000	50%	14.4	7763260284	1.8	3.0
Bulk carrier	60,000–99,999 dwt	74000	55%	14.4	3821361703	2.7	4.1
Bulk carrier	35,000–59,999 dwt	45000	55%	14.4	2243075236	3.8	5.7
Bulk carrier	10,000–34,999 dwt	26000	55%	14.3	1268561872	5.3	7.9
Bulk carrier	0–9999 dwt	2400	60%	11.0	68226787	22.9	29.2
General cargo	10,000+ dwt	15000	60%	15.4	866510887	7.6	11.9
General cargo	5000–9999 dwt	6957	60%	13.4	365344150	10.1	15.8
General cargo	0–4999 dwt	2545	60%	11.7	76945792	10.9	13.9
General cargo	10,000+ 100+ TEU	dwt, 18000	60%	15.4	961054062	8.6	11.0
General cargo	5000–9999 100+ TEU	dwt, 7000	60%	13.4	243599799	13.8	17.5
General cargo	0–4999 100+ TEU	dwt, 4000	60%	11.7	120938043	15.5	19.8
Refrigerated cargo	All	6400	50%	20.0	392981809	12.9	12.9
Container	8000+ TEU	68600	70%	25.1	6968284047	11.1	12.5
Container	5000–7999 TEU	40355	70%	25.3	4233489679	15.2	16.6
Container	3000–4999 TEU	28784	70%	23.3	2820323533	15.2	16.6
Container	2000–2999 TEU	16800	70%	20.9	1480205694	18.3	20.0
Container	1000–1999 TEU	7000	70%	19.0	578339367	29.4	32.1
Container	0–999 TEU	3500	70%	17.0	179809363	33.3	36.3
Vehicle	4000+ ceu	7908	70%	19.4	732581677	25.2	32.0
Vehicle	0–3999 ceu	2808	70%	17.7	226545399	47.2	57.6
Ro-ro	2000+ lm	5154	70%	19.4	368202021	45.3	49.5
Ro-ro	0–1999 lm	1432	70%	13.2	57201146	55.2	60.3

注：「載荷効率」は、貨物を満載した船舶が航海速度/85%負荷の条件で航行した時の理論的 maximum 効率のこと。

満載時のエンジン負荷がバラスト航海及びその他航海も含む全平均よりも高いため、「載荷効率」と「総合効率」欄の違いは稼働率の差だけでは説明できない。

表 9-2 道路運送の CO₂ 効率

	CO ₂ 効率 (CO ₂ -g/ton-km)	推定方法	出典
重量物 輸送車輛	138	「National Road Traffic Survey」及び「Continuing Survey of Road Goods Transport」のデータを結合したものから計算	[3]
道路運送	127	トップダウン法。Trend Database。Eurostat のデータで EU 地域のみデータ	[3]
40 トン超えの トラック	80	190 台の車輛でサンプル調査	[1]
40 トン未満の トラック	181	44 台の車輛でサンプル調査	[1]
道路運送	153	トップダウン法。(National Transportation Statistics 2007; U.S. Department of Transportation, Research and Innovation Technology Administration: Washington, DC, 2007; and Energy Information Administration Annual Energy Outlook 2007 with Projections to 2030, Supplemental Transportation Tables) からのデータ	著者の 計算
道路運輸送	156	EU 統計に基づくトップダウン法で計算	[4]
2007 年 道路運送	144*	日本統計局データに基づくトップダウン法で計算	[5]

* 日本における 2007 年の 144 g/kW・h というトラック輸送効率は 2004 年の 174 g/kW・h よりもかなり良い。この 20%の改善は、日本で大事故の対策として全てのトラックに対して速度制限を実施したことが影響したと思われる。

鉄道輸送の CO₂ 効率

9.9 道路輸送及び海上輸送と異なり、鉄道輸送の主力エネルギー源は電力である。電車の CO₂ 効率を評価する場合、発電による CO₂ 排出量も考慮する必要がある。鉄道の輸送効率は、列車の速度、重量、長さのほか地形、貨物の種類、高さ制限、帰りの貨物の確保、空車輛を処理する物流効率などの影響を受ける。鉄道輸送の効率のデータを表 9-3 に示す。ここでは貨物の種類による影響が極めて重要となる。すなわち、バラ積み貨物は、コンテナのような一般的なインタモーダル貨物に比べてはるかに輸送効率がよい。また、石炭火力発電プラントの発電 (CO₂ 限界出力) 及び送電網の送電損失を考慮した場合に、電車はディーゼル車よりもわずかに効率がよいと評価される。

9.10 以上の結果、鉄道輸送の効率は 10 CO₂-g/ton-km から 119 CO₂-g/ton-km の範囲で変動し、代表値は 48 CO₂-g/ton-km であると結論づけられる。バラ積み貨物列車が効率のよい領域カバーし、インタモーダル列車が効率の悪い領域をカバーする。必然的に個々の列車の範囲はもっと広い。

表 9-3 鉄道輸送の CO₂ 効率

	CO ₂ 効率 (CO ₂ -g/ton-km)	推定方法	出典
ディーゼル機 関車	138	英国大気排出インベントリデータ (1990-2004)	[3]
鉄道運送	119	トップダウン法。Eurostat のデータ、EU 地域のみ のデータ	[3]
鉄道運送 (EU 平均)	81	トップダウン法。Eurostat のデータ	[4]
鉄道運送 (米国平均)	14	トップダウン法。(National Transportation Statistics 2007; U.S. Department of Transportation, Research and Innovation Technology Administration: Washington, DC, 2007; and Energy Information Administration Annual Energy Outlook 2007 with Projections to 2030, Supplemental Transportation Tables.) からのデータ	著者の 計算
ばら積み 貨物列車	10-14	バラ積み貨車の代表的な米国列車仕様 0.6-0.8 hp/s-ton (0.49-0.65 kW/m-ton) から計算	著者の 計算
インタモダ ル(コンテナ) 列車	35-50	バラ積み貨車の代表的な米国列車仕様 3-4 hp/s-ton (2.2 -2.9 kW/m-ton) から計算	著者の 計算

航空運送

9.11 航空貨物は速いが高価である。そして腐りやすい物及び、メール、緊急部品のような速さが絶対条件となる特殊な貨物に限定される。航空貨物は専用の貨物航空機で運ばれるが、一部は旅客機でも運ばれる。離陸及び上昇に燃料を使うため、長距離飛行になるほど効率がよい。しかしある距離になると、機体にかかる抵抗が重量とともに増えるため、燃料の重量による効率悪化を招く。また長距離飛行になると、燃料の重量が貨物の最大重量を制約する。広く利用されている2種類の貨物航空機の効率を表9-4に示す。機種による差は、エンジン技術の差と機体の大きさの違いによるものである。

表 9-4 航空貨物運送の CO₂ 効率

	CO ₂ 効率 (CO ₂ -g/ton-km)	推定方法	出典
Boeing 747 F	435-474	事例研究の直接計算。総重量：113 ton、平均稼働率：70%、 453-493 kJ/km (飛行距離による)	[8]
Ilyushin IL 76T	1100-1800	事例研究の直接計算。貨物重量：28-50 ton (飛行範囲によ る)、平均稼働率：70%、飛行範囲：500-5500 km	著者の計算 [9]のデータ

モードの比較

9.12 図 9-2 で船舶の効率を他のモードの効率と比較した。この図から、マルチモーダル輸送を増やすことによって CO₂ 効率の改善が図れることが分かる。この種の比較をする場合、貨物の種類による影響に注意する必要がある。海上輸送、鉄道輸送、道路輸送を問わず、鉄鋼、石炭、石油のような重い貨物（バラ積み貨物）は、軽い貨物（例えば製品）に比べてより効率的な搬送が可能となる。そのため高エネルギー効率搬送を達成するポテンシャルは、貨物の種類の影響が大きい。図 9-3 では同様の比較に航空輸送も含めた。

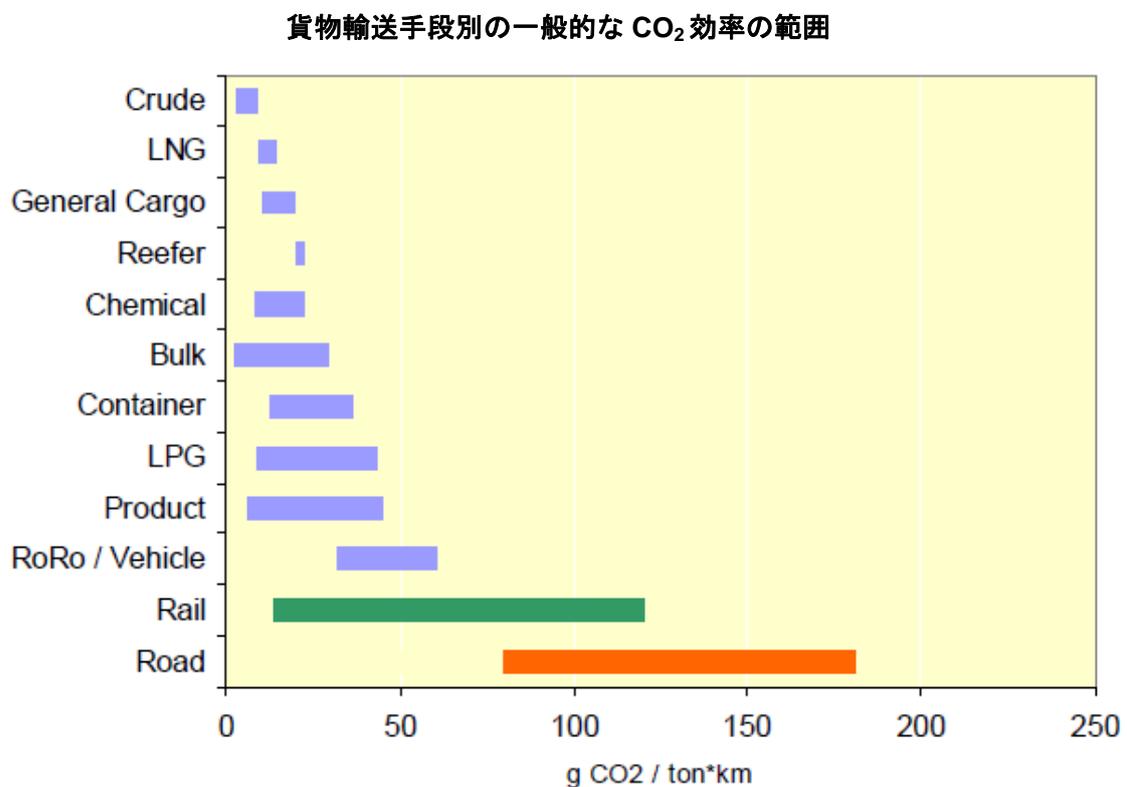


図 9-2 鉄道、道路運送と比較した船舶の CO₂ 効率の一般的な範囲

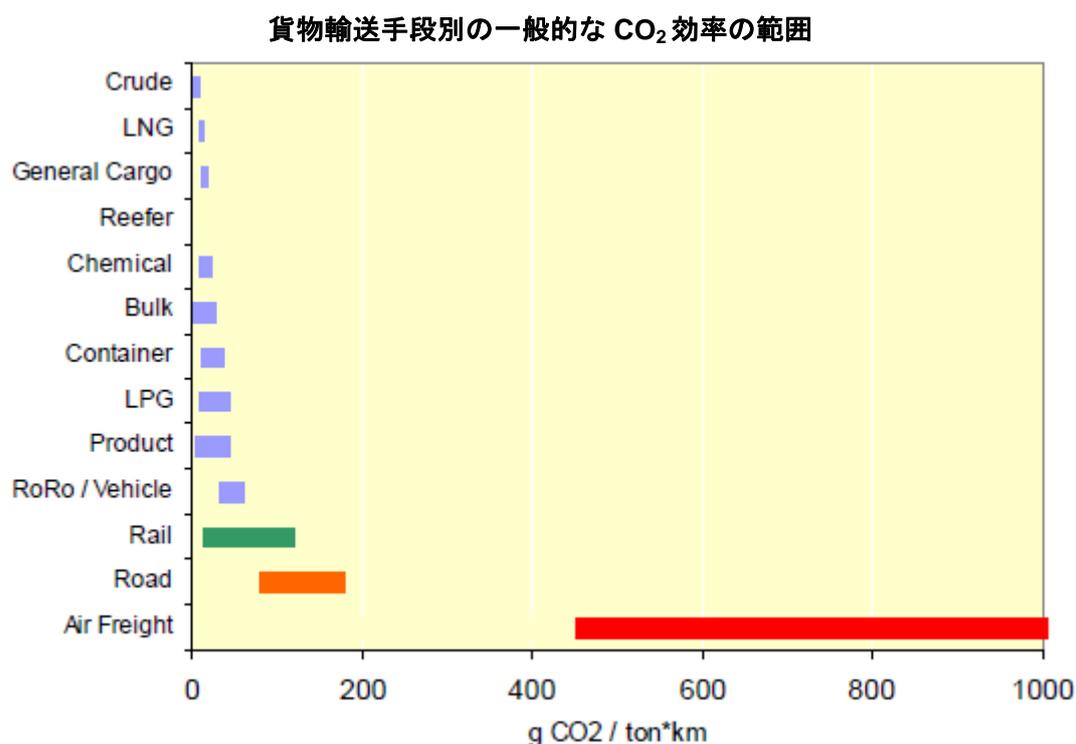


図 9-2 鉄道、道路、航空機運送と比較した船舶の CO₂ 効率の一般的な範囲

海運の過去の効率推移

9.13 技術の進歩と船舶の大型化によって、海上輸送効率が年々向上した。船舶の効率の過去の推移を見るため Lloyds Register - Fairplay のデータを分析した。ここでは、データベース中の DWT、速度、燃料消費のデータを使った燃料効率指標を設定した。平均の搬送負荷を全ての船舶および時代に対して DWT 数の 50%と仮定して、効率指標を計算した。効率指標は以下のように定義した。

$$\text{Efficiency index} = \frac{\text{Fuel consumption} \times 3.09}{0.5 \times \text{dwt} \times v}$$

ここで、燃料消費量の単位は g/h、船舶速度 v の単位はノットである。

9.14 この効率指標は傾向をみるために計算されたものであり、表 9-1 のデータと直接の比較はできない。データベース中の燃料消費量の数字は一般的には用船用の燃料消費量であり、補機の燃料消費量およびある程度の余裕が見込まれる。

9.15 燃料消費量のトレンドに関して船腹統計を分析する場合、技術の進歩によるもの、速度によるもの、大きさによるものといった要因別に改善効果を区分する試みが過去にもなされた。しかし傾向の特定が困難で、通常は何の知見も得られない。燃料消費量データの精度が低いことが主な理由である。にもかかわらず、この統計は、大きさ、

速度、技術進歩の効果を統合した総合効率の、船腹別最高値のはっきりした傾向を示している。。

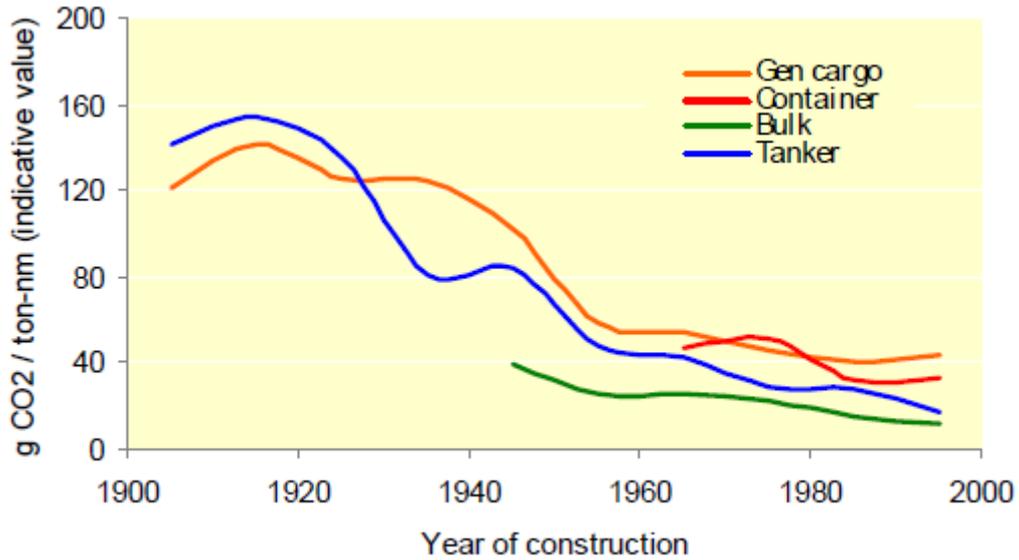


図 9-4 船舶設計輸送効率平均値の進歩

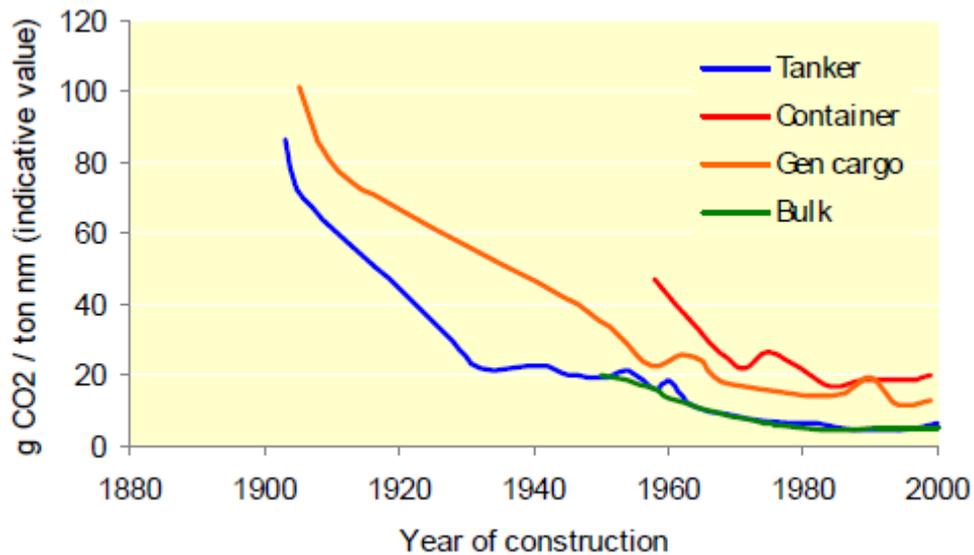


図 9-5 船舶設計輸送効率最高値の進展

輸送モード別総排出量

9.16 船舶からの CO₂ 総排出量を、IEA 統計[7]で報告された他部門の燃料消費量データを基

に、他の輸送モードと比較してある。Appendix 1 で取り上げるように、グローバルな統計に内在するいくつかの問題点は各輸送モードの燃料消費量統計にも当てはまるけれども、国内航海と国際航海の区別、沖合での燃料補給の可能性などに関連する問題点が海運及び航空固有のものとして存在する。

- 9.17 航空機の飛行は、出力、総重量、上昇飛行の要件を満たすため、1回の燃料補給による飛行回数が少ないという特性を持つが、航空燃料の消費量は船用バンカー重油統計と同様に分類した。もし船舶が航海ごとに燃料補給をするのであれば、IEAの船用燃料統計もさらにより正確なものになるであろう。しかしながら数週間に及ぶ航海で複数の港に寄港する場合、船舶は主要な燃料市場の所在地で給油する。
- 9.18 IEAが集計した国内限定の道路及び鉄道輸送の統計は、国内輸送と国際輸送間の区別、燃料販売記録のIEA方針の遵守度、など集計上の食い違いがない。また、道路輸送の燃料使用量は船舶の使用量に比べるとはるかに多い。これらは、IEAが各国から集めた燃料データの統計的な信頼性を比較した場合に、道路輸送及び鉄道輸送の方が海上輸送よりも高いことを意味する。国内で販売される燃料が課税対象で国際船用燃料が非課税である状況で、国際船用燃料に比べて国内の燃料販売に対する販売量の精度及び見直しに対する要求がより強まると思われる。航空の場合は、燃料の重量及び飛行距離が飛行計画及びその許可にとって重要な要素であるため、燃料消費量は厳密に監視される。
- 9.19 IEAのグローバルなデータは2005年までが利用可能であるため、船舶排出量のデータも2005年のものを使用した。この比較結果を表9-5、図9-6、図9-7に示した。「道路ディーゼル」は道路輸送に販売されたディーゼル燃料の総量であるが、貨物運送、旅客輸送、ディーゼル車で使用されたものも含まれる。

表 9-5 輸送モード別 CO₂ 排出量 (2005 年、100 万トン)

Rail (IEA)	Road diesel (IEA)	Aviation (IEA)	International shipping	Domestic shipping/ fishing
133	4757	735	774	157

輸送モード別 CO₂ 排出量 (2005 年)

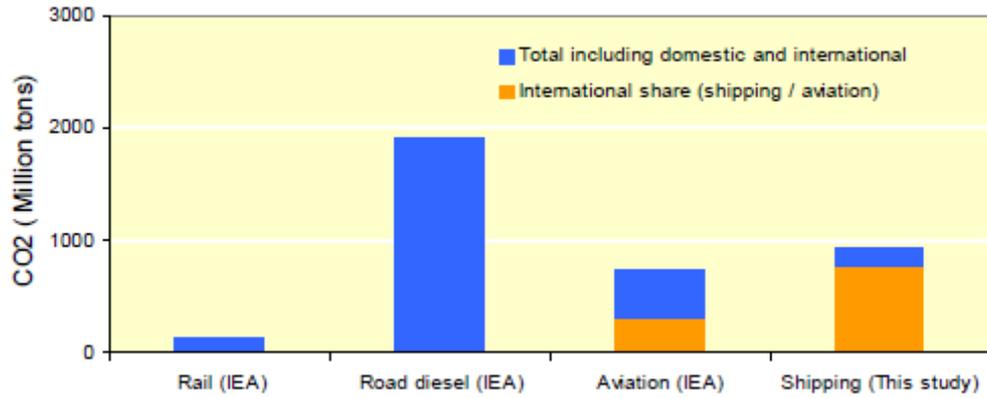


図 9-6 海運による CO₂ 排出量と他の輸送モードの比較 (2005 年)

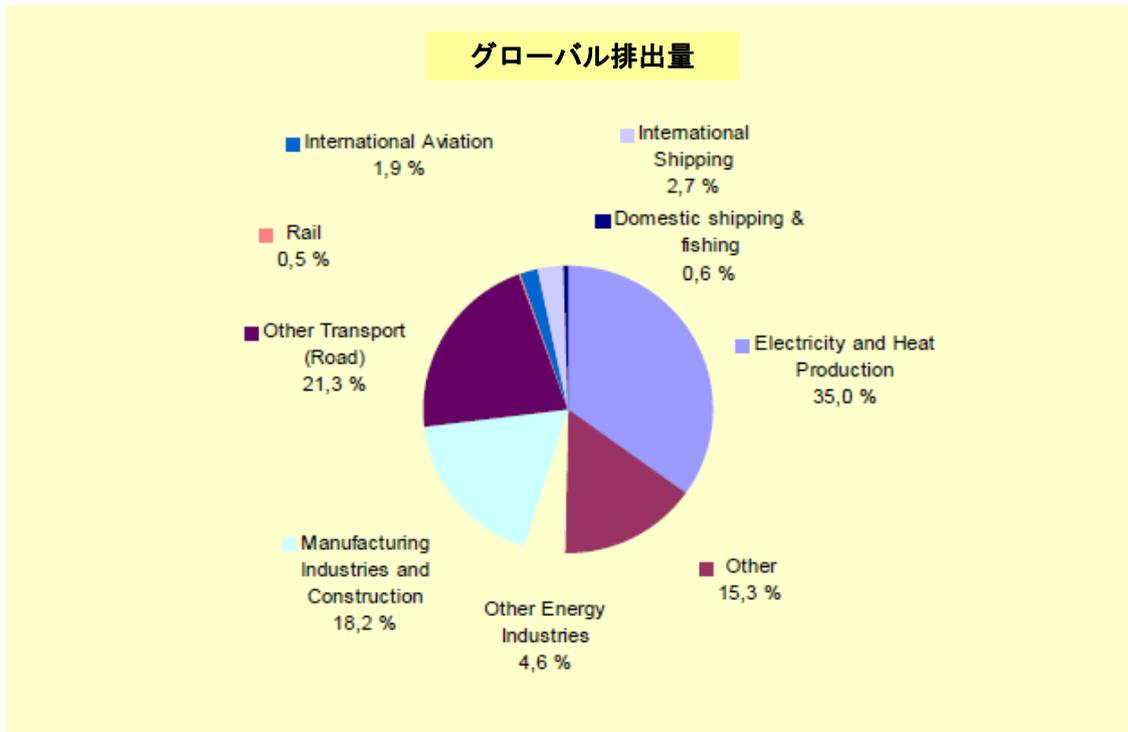


図 9-7 CO₂ のグローバル排出量と海運による排出量の比較

Appendix 1 国際海運による 2007 年燃料消費量の推定

はじめに

A1.1 この付属書では、2007 年の船舶燃料消費量を次の 2 通りの方法で推定する。

- .1 活動量データ基準
- .2 燃料統計データ基準

A1.2 推定結果を比較・考察して、国際海運及び全ての海運活動による 2007 年の燃料消費量の総意の推定値を決定する。

活動量データ基準による船舶の燃料消費量の推定

推定方法

A1.3 燃料消費量の推定には、これまでの推定値に差があることで分かるようにかなりの不確かさを伴う（Corbett 他 1997^[15]、Corbett と Kohler 2003^[1]、Endresen 他 2003 2007^[5, 6]、Eyring 他 2005a^[3]、Olivier 他 2001^[11]、Skjolsvik 他 2000^[12]、Gunner 2007^[8]）。

A1.4 世界船腹の燃料消費量を「活動量基準・ボトムアップ法」によって推定した。ここでは船舶カテゴリ別に消費量を推定し、次いで各推定値を集計してグローバルな総消費量を求めた。このインベントリ用の船舶カテゴリは、大きさだけでなく典型的な運航パターンの観点からも明確な区分となるよう選定した。それによって活動データの確認及び評価がしやすくなる。

A1.5 ある船舶カテゴリの主エンジン（ME）の燃料消費量を推定するには、まずカテゴリの船舶数に平均 ME 出力を掛けて、カテゴリ別の装備出力（kw）を求める。次いでその装備出力にカテゴリ固有の推定値である主エンジン稼働時間とエンジンの平均負荷係数を掛けて、年間の出力仕事量（kWh）を求める。最後に、出力仕事量にそのカテゴリのエンジンの燃料消費率（g/kWh）を掛けることによって総燃料消費量が求められる。燃料消費量を推定するプロセスを図 A1-1 に示す。同じ原則を補助エンジンの燃料消費量にも適用した。

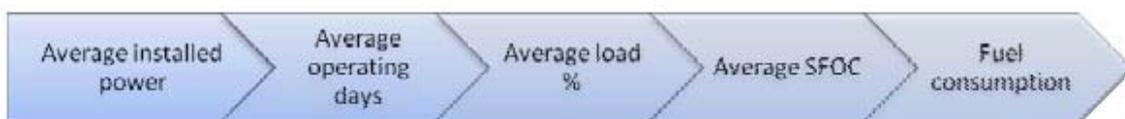


図 A1-1 燃料消費量の計算

排出インベントリモデルの入力データ

A1.6 排出インベントリには船舶カテゴリ別に以下のデータを必要とする。

- .1 船舶数
- .2 主エンジン及び補助エンジンの平均出力 (kw)
- .3 主エンジンの平均使用年数 (年) (燃料消費量の推定精度をあげるため)
- .4 船舶の平均設計速度 (ノット) (AIS データから負荷を推定する際に使用)
- .5 主エンジン、補助エンジンの平均燃料消費率 (g/kwh)
- .6 主エンジン、補助エンジンの平均稼働時間 (日)
- .7 主エンジン、補助エンジンの平均負荷 (%MCR)
- .8 蒸気ボイラの平均燃料消費量 (ton/年)
- .9 ボイラの平均燃料消費量 (ton/年)
- .10 燃料の平均炭素含有率 (C-g/燃料-g)

船舶数及び技術仕様

A1.7 2007 年の世界船腹に関する統計データが Lloyd's Register-Fairplay データベースによって提供されている。このデータベースには 100 GT を超える全船舶の情報が含まれている。補助エンジン出力や船舶の設計速度などの補足的な技術データも掲載された Lloyd's Register-Fairplay データベースの拡大バージョンを使用した^[16]。この拡大バージョンでは技術データに関していくつかの欠如が散見される。従って、特定の分野及び用途においては、統計的な関係式から求めた推定値を投入したデータセットも含まれているようだ。これは、補足的なデータ (補助エンジン出力や船舶の設計速度など) の正確さがコアデータ (船舶数、トン数、主エンジン出力など) に比べると劣ることを意味する。本調査報告書で使用した主なデータを表 A1-8 に示す。

主エンジン、補助エンジンの平均燃料消費率

A1.8 燃料消費率 (SFOC) とは、仕事量当たりの燃料消費量をいい、通常は g/kWh の単位で示す。この燃料消費率は、エンジンの大きさ、年齢、燃料のエネルギー密度などいろいろなパラメータによって決まる。燃料消費量に関するデータは、試験台での試験結果、海上試運転中の測定データなどから得られ、さらにある程度は用船契約や船舶の運航データベースに記載された毎日の燃料消費量も参考になる。SFOC は、熱力学第一法則とエンジン特性から計算することも可能である。燃料消費率 (SFOC) の代表的な数字を表 A1-1 に示す。この表は、CIMAC 新聞^[25]、メーカーカタログ、Diesel & Gas Turbine Worldwide^[18]などを参考に作成した。表では、年齢による約 10% の差、大きさによる約 20% の差が表れている。

表 A1-1 燃料消費率の代表的な値 (g/kWh) ^[17]

Engine year of build	2-stroke low-speed	4-stroke medium-/high-speed (> 5000 kW)	4-stroke medium-/high-speed (1000–5000 kW)	4-stroke medium-/high-speed (< 1000 kW)
1970–1983	180–200	190–210	200–230	210–250
1984–2000	170–180	180–195	180–200	200–240
2001 to 2007	165–175	175–185	180–200	190–230

A1.9 燃料消費率はエンジン試験台で測定される。ただし超大型（2ストローク）エンジンだけは大きすぎて試験台に収まらないため例外となる。燃料消費量は ISO が標準化した試験方法及び試験条件（ISO 3046-1）に従って測定し、標準的な燃料エネルギー及び大気条件に修正する。燃料消費率の最高値はある一点の運転条件で得られる。

A1.10 実際の運転時の燃料消費率は試験台での測定値よりも増える。その理由は以下のとおりである。

- .1 エンジンが必ずしも最適運転点で運転されるとは限らない。
- .2 燃料のエネルギー含量が試験台のものよりも低い場合がある（残留燃料を使用した場合は、通常は約 5% の差となる）。
- .3 最高 SFOC 値は 5% の誤差を含む。
- .4 エンジンの摩耗、劣化、メンテナンス（インジェクタ及び噴射ポンプの摩耗、設定不良、ターボチャージャーの汚れ付着、オイルフィルタの詰まり、熱交換器の汚れ付着など）によって消費量が増える

A1.11 エンジンの新旧、平均使用年数による SFOC の差を考慮して、表 A1-2 の値をインベントリモデルに使用した。船舶データベースにはエンジンの気筒数、ストローク数の記載がないため、出力、気筒による微調整は加えず、さらに低速・中速の違いを考慮した微調整もおこなわなかった。

A1.12 LNG タンカーで使用される蒸気タービンは重油（HFO）ベースで 275 g/kWh を消費すると仮定した。この数字は、就航中のタービン駆動 LNG 船の燃料消費データを参考に設定した。補助エンジンの SFOC については、補助エンジンは主として部分負荷対応で運転されるという実態を考慮した。モデルで使用した値を表 A1-3 に示す。

表 A1-2 インベントリモデルに使用した主エンジン燃料消費率 (g/kWh)

Engine age	Above 15 000 kW	15 000–5000 kW	Below 5000 kW
before 1983	205	215	225
1984–2000	185	195	205
2001 to 2007	175	185	195

表 A1-2 インベントリモデルに使用した補助エンジン燃料消費率 (g/kWh)

Engine age	Above 800 kW	Below 800 kW
Any	220	230

活動量の入力データ

A1.13 排出モデルは船舶の活動量を表わす以下の入力データを必要とする。

- .1 主エンジン及び補助エンジンの平均稼働時間
- .2 主エンジン及び補助エンジンの平均負荷
- .3 蒸気ボイラの平均燃料消費量

A1.14 海運業界ではカテゴリごとの船腹量と輸送量需要の関係などの影響で年ごとに活動量変動するため、その推定がことさら難しい。過去の調査研究では、Lloyd's Marine Intelligence Unit が実施した船舶活動等に関する訪問調査のエンジン稼働時間のデータを使って活動量が推定された例がある。今回は、AISLive ネットワークの自動船舶識別システム (AIS) のデータを、活動量に関する独立性を持った新たな情報源として利用した。

AIS データ

A1.15 船舶自動識別システムは、船舶の識別番号とその船種、位置、航路、速度、航行状況（すなわち投錨中あるいはエンジン駆動により移動中などの）あるいはその他の安全に関する情報を適宜設置された地上局及び他の船舶や航空機に自動的に伝送する一種の安全装置である。

A1.16 海上における人命の安全のための国際条約 1974 (SOLAS) ^[28]は、国際航行に従事する 300 GWT 以上の船舶、国際航行に従事しない場合は 500 GWT 以上の船舶、及び大きさに関係なく全ての旅客船に対して AIS 応答装置を装備するよう求めた。この要請は 2004 年 12 月 31 日付で実施された。AIS を装備する船舶は、国際協定、国際規則、国際標準などによって航海情報の保護が認められた海域を除いて常時 AIS を稼働状態に保たなければならない。

A1.17 AISLive は 100 カ国の 2000 カ所を超える基地をカバーする AIS 地上受信機のネットワークである。このネットワークは AIS データの収集・処理をおこない、その情報をさまざまな解析目的の利用に対してコマーシャルベースで提供する。今回の調査報告では、2007 年に 1 時間ごとに記録された AIS 観測記録を全て包含するデータベースを使用した。受信機の設置場所を図 A1-2 に示す。この図で、緑色の四角が AIS ネットワークのベース基地が置かれた場所である。オレンジ、黄色、赤の四角形は受信機が密集した地域を示す。

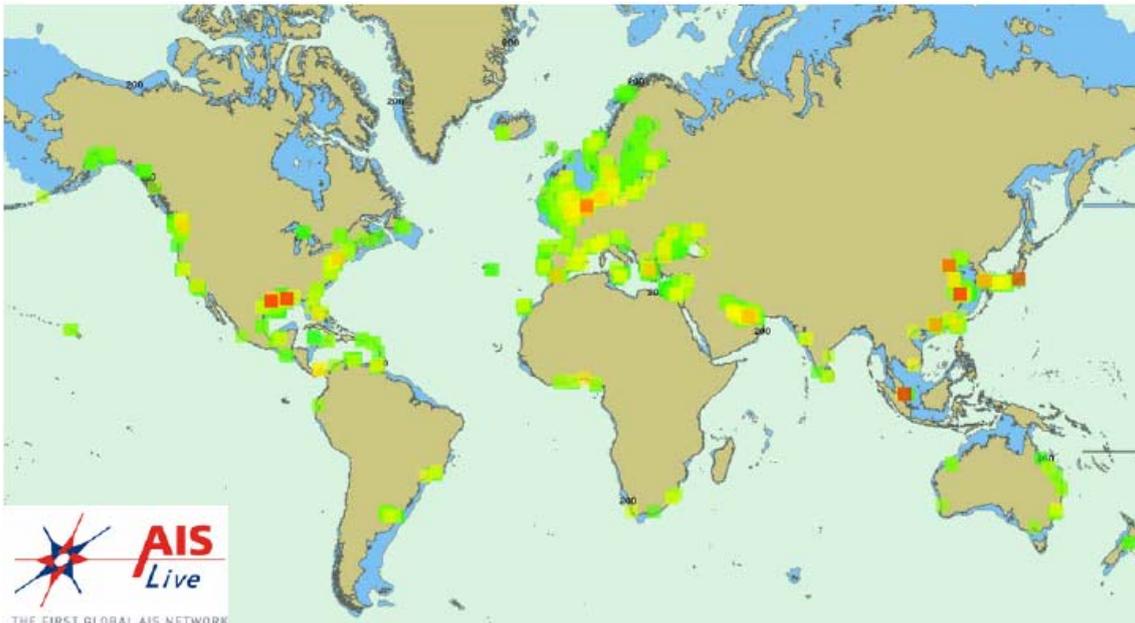


図 A1-2 AISLive ネットワークの地上受信基地の配置状況(Lloyd's Register- Fairplay)

- A1.18 AIS の地上基地は、基地の近くにいる船舶の存在を連続的に検知することができ、併せて船舶の軌跡および速度も把握可能である。ただしその範囲は限定される（アンテナの高さや大気の状態などによるが、一般的にはおよそ 100 km 以内）。そのため AIS は港間の船舶の追跡はできない。しかし、船舶の身元が送信されるため、ある船舶が AIS ネットワーク内のある港のカバーエリアから消えた時と別のカバーエリアに現れた時の間の時間を記録できる。船舶がこれらの港間を直線的に航行したと仮定すれば、これらのデータから船舶が洋上にいた時間と平均速度が分かる。残念なことに、船舶が迂回をした場合、あるいは AIS ネットワークがカバーしない港に寄港した場合はそれが分からない。
- A1.19 ネットワークで検知された船舶が以下の状態で過ごした時間数を 2007 年のデータから集計することによってデータを整理した。
- .1 AIS ネットワークのカバーエリア内で、ステイタスが「入港中」
 - .2 AIS ネットワークのカバーエリア内で、入港中ではないがステイタスが「投錨中」
 - .3 AIS ネットワークのカバーエリア内で、航行中
 - .4 AIS ネットワークのカバーエリア外

船舶が AIS ネットワークのカバーエリア外に出た場合、観測地点間の最短経路をたどったものと仮定して、別のエリアに再び現れるまでの時間から平均速度を計算するために使用した。この計算は陸塊の存在を考慮していないため、場合によっては距離に関するかなりの推定誤差を生む可能性がある。しかし船舶は出発港・到着港のみで検知されるのではなく、他の港あるいは AIS ネットワークがカ

バーする戦略的な拠点（例えばスエズ、パナマ、ジブラルタル、マラッカ海峡、アラスカ半島、スリランカの南）を通過する際も検知されるため、直線ルートの推定による誤差が緩和される。

- A1.20 計算による平均速度が、その船舶の航海速度（service speed）（拡大 Fairplay データベースで与えられる）の 80%を超える航海は「正常」のカテゴリに分類され、航海速度の 80%未満の航海は「低速」に分類される。この手順で船舶の活動を表 A1-4 に示す 4 種類のカテゴリに区分した。

表 A1-4 データカテゴリの定義

カテゴリ	説明
入港	AIS ネットワークエリア内で、航行ステータスが「係留」
投錨	AIS ネットワークエリア内で、航行ステータスが「投錨中」
低速	AIS ネットワークエリア内外で、計算された平均速度が航海速度の 80%未満
正常	AIS ネットワークエリア内外で、計算された平均速度が航海速度の 80%超え

- A1.21 入カ一覧表（表 A1-5）（**訳注：表 A1-8 の誤り？**）に、AISLive ネットワークが 2007 年に検知した船舶数（独自集計）を示した。2008 年 4 月のデータベースに掲載された船舶数と、そのうち少なくとも一度は AIS ネットワークで検知された船舶の割合（カバー率）も示した。表にあるカバー率は、全般的に大型貨物船で高く、小型船（特に漁船）で低い。この理由は、小型船は小さな港に度々寄港して AISLive ネットワークのカバーエリア外となりがちな海域を航行するためとみてほぼ間違いない。

- A1.22 場合によっては、統計の数字以上の船舶が AIS に検知されているケースもある。これは、船腹サイズの減少、統計の修正遅れ、その他誤差によるものであろう。

洋上日数及び平均出力の推定

- A1.23 インベントリモデルでは、カテゴリ別に船舶が海上を移動しながら過ごす平均日数を推定しなければならない。AIS データを使って海上日数を推定するためには、まずデータの解釈が必要である。AIS データのサンプルを表 A1-5 に示す。

表 A1-5 AIS データのサンプル（船舶カテゴリ別累積時間）

Type	Size	Port (h)	Anchor (h)	Slow (h)	Normal (h)	Total (h)
Bulker	100 000–199 999 dwt	225 065	348 160	728 101	2 860 034	4 161 360
Type	Size	Service speed (knot)	Cut-off speed “slow” (knot)	Average speed “slow” (knot)	Average speed “normal” (knot)	
Bulker	100 000–199 999 dwt	14.1	11.3	7.6	12.8	

- A1.24 「入港」及び「投錨」で過ごす時間は海上で過ごす時間ではない。「低速」カテゴリでカウントされた時間には、移動中の時間のみならず、港内で遠回りを正当化するための時間が含まれることがあり、平均速度が異常に低い場合などはこの可能性がある。低速航海の別の理由として、AIS データによる距離の計算では予測できない陸地を迂回した可能性もある。「正常」カテゴリの時間には、理論上は入港中の時間や迂回時間も含まれる。しかし平均観測速度と航海速度の差は、混雑海域における一時的な減速、天候あるいは他の自然現象による迂回などの原因も考えられる。この調査報告の目的に照らして、「正常」の速度カテゴリに記録された時間は全て海上で過ごす時間と仮定した。残るのは、Lloyd's/AIS のデータ分析の「低速」で記録された時間の解釈である。
- A1.25 「低速」航海が、AIS カバー範囲内の二つの港の間にある港に停泊した結果であり、海上での速度が「正常」航海で観測される平均速度と同じであると仮定すると、海上での時間は次のように計算される。

$$Total\ time\ at\ sea = Time_{normal} + Time_{slow} \times \frac{Average\ speed_{slow}}{Average\ speed_{normal}}$$

航路途中に追加的に寄港したとの仮定は特に理不尽ではない。なぜなら航海のかなりの割合で沿岸を航行し、迂回ではなくそこに立ち寄る可能性があるためだ。しかし船舶が大幅に迂回をし、寄港地が通常の航路途中とはいえない場所であれば、上記の計算は誤差を生じ、洋上時間を過小に推定する。当然ながら、海上時間の推定精度は仮定の有効性だけでなく、このデータが全体としてその船舶カテゴリを代表するものかどうかによって変わる。

- A1.26 AISデータを使って平均エンジン負荷の推定が可能である。すなわち、出力と速度の間に出力が速度の3乗に比例するとの関係が成り立つと仮定し、全ての船舶のサービスマージンを10%と見込んで、海上で観測された平均速度を船舶の航海速度と比較することによって行なわれる（表 1-6 に例を示す）。この表は、10%のサービスマージン¹⁶を見て、船体がクリーンで、かつ天候が平穏な状態で、フル計画喫水において得られる最大速度（即ち、100%速度）が90%MCRに相当することを示している。速度を落とすと、プロペラ負荷及びエンジン負荷がそれに応じて下がる。そこで、AIS観測速度と船舶の最高速度を比較することによって平均負荷を求めることができる。ただしこの推定値は単なる指標に過ぎない。なぜなら多くの重要なパラメータ（途中の速度変動、風、波、船体の劣化、ドラフトの変化が平均負荷に及ぼす影響）を含んでいないためである。

¹⁶ サービスマージンは船体の極端な汚れ、悪天候の際のエンジンオーバーロード防止のために使用する。

表 A1-6 クリーンな船体、平穏な海上条件での計画喫水における船舶速度と典型的なエンジン及びプロペラ負荷の関係

Ship speed	50%	75%	80%	90%	95%	100%
Propeller load (% kW)	13%	42%	51%	73%	86%	100%
Engine MCR (% MCR)	11%	38%	46%	66%	77%	90%

A1.27 上記の手順に従って、AIS データ及び船腹統計を使ってインベントリの船舶カテゴリごとに海上日数と主エンジン負荷を推定した。海上日数の推定結果は、過去の調査データ及びロジスティック分析などの他のデータと照合しながら後でチェックした。次いで、他のデータソース及びこの手法では正確に予測しにくいバラストや低負荷運転の影響を考慮に入れながら、主エンジンの平均負荷を推定した。海上日数、負荷ともに修正を数回加えた。特に小型船の場合は AIS のカバー率が低く、海上日数の推定値が他のデータと比べてかなり高く出たため、全てのカテゴリに対して修正を加えた。結果的なインプットデータは表 A1-8 に示す。

補助エンジンの平均負荷及び稼働時間

A1.28 補助エンジンの燃料消費量を計算するために、補助エンジンの平均負荷と稼働時間が必要である。負荷と稼働時間は船種によって大きく異なる。通常は、さらに Lloyd's データによると、船舶は少なくとも 3 基の発電機を装備している。1 基が運転用、1 基が予備、そして 1 基がメンテナンス用として使われる。発電機は通常、稼働時間を均一化するため、交代で運転される。予備の発電機は高負荷運転時、あるいは高負荷ピークのリスクがある場合、例えば操船のためにスラストを使用する場合、大型のポンプ、ウィンチ、クレーンを運転する場合などに使用される。この代表的なケースが港に到着した時である。船舶によっては換気や冷凍など貨物の保管上、電力を必要とするものもある。シャフトジェネレーターを使用する船舶もあるが、この場合、補助エンジンは通常海上では運転されない。このような考察を踏まえて、当調査チームは補助エンジンの年間稼働時間と負荷係数に関して予測をたてた。その際、主エンジンと補助エンジンの消費量の相対比率も判断材料とし船舶カテゴリ別に代表的な運転データと比較した。

蒸気ボイラの平均燃料消費量

A1.29 残留燃料油を使用する全ての船舶はそれを液体として保つために燃料の加熱を必要とする。船舶が海上に居る間は、通常、蒸気ボイラで排熱を回収することによって燃料加熱の熱源とする。そのため新たな燃料を消費することはない。しかし港の中では主エンジンが停止中であるため、船舶は油炊きの補助ボイラを使って蒸気を発生させなければならない。全体的には燃料加熱のための燃料消費は取るに足りないと考えられる。貨物の加熱やポンプ作動のために蒸気を使うタンカーの場合、蒸気ボイラの燃料消費量はもはや取るに足りないなどといえる程度ではない。これらの船舶のために、IMO 専門家グループの検討 (BLG 12/INF.10) ^[4] を

参考にしてボイラの燃料消費量を推定した。

.1 VLCC タンカー

超大型原油輸送タンカー (VLCC, DWT 200 000+) は年間 10 航海をおこない、うち 5 回が載荷航海と仮定する。よって毎年 5 回の荷揚げが実行される。荷揚げごとに 1 隻の VLCC (DWT 200 000+) が主ポンプを駆動するために 250 ton の燃料を消費する。

.2 スエズマックスタンカー

スエズマックス (120 000-200 000 DWT) 原油タンカーは年間 12 航海をおこない、うち 6 回が載荷航海と仮定する。よって毎年 6 回の荷揚げがある。載荷航海ごとにスエズマックスは、移送ポンプの駆動および貨物の加熱のため 150 ton のボイラ燃料油を消費する。

.3 アフラマックスタンカー

アフラマックス (80 000-120 000 DWT) 原油タンカーは年間 50 日、加熱の必要な原油を輸送すると推定される。加熱のため 1 日 60 ton のボイラ燃料油を必要とする。

.4 小型原油タンカー

より小型の原油タンカー (60 000–79 999 DWT、10 000–59 999 DWT、<9999 DWT) は年間 100 日、加熱の必要な原油を輸送すると推定される。加熱のためそれぞれ 1 日 30、15、5 ton のボイラ燃料油を消費する。

.5 プロダクトタンカー

プロダクトタンカーには以下の仮定をする

- プロダクトタンカーの 40% が加熱の必要な荷物を輸送する。
- これらの荷物は年間 150 日をかけて輸送される。
- インベントリモデル中のサイズカテゴリごとに、それぞれ 1 日 5、15、30、50、60 ton のボイラ燃料油を消費する。

.6 LNG タンカー

整合性と将来シナリオのモデル化を簡単にするために、ボイラの消費量は主エンジンの消費量としてモデル化する。モデル化の際に、蒸気ボイラの低い効率と燃料中の LNG ボイルオフによる燃料の炭素係数の変化を考慮する。

信頼性及び不確かさ

A1.30 活動基準による船用燃料消費量の推定は、一連の入力値がベースとなる。不確かさはすべてこれら入力値に起因する。入力項目の一覧とその信頼性の定性評価、および入力値の不確かさを表 A1-9 及び表 A1-10 に示す。

A1.31 これまでの調査によって、この種のボトムアップ活動モデルにおける不確かさの最大の原因となる入力変数は、エンジン負荷係数 (負荷サイクル) と海上日数 (エンジン稼働時間) であることがわかっている^[1]。今回の調査では世界規模の AIS データをこれらの入力値の評価を支えるために使用した。それでもなお、この種のインベントリにはかなりの不確かさが残る。過去の調査研究で使われた主要な入力データと比較すればこれが明らかである。主要パラメータの推定値及び過去の

調査研究のデータソースを表 A1-7 に示した。表 A1-7 に示すように、各種データソース及び評価結果によってモデル入力に差が生じ、それによって異なる推定が生まれる。引用した数字は、代表的な入力の指標的な数字であるが、カテゴリの分け方の違い、入力の定義の違いなどによって完全な対応が取れるものではない。

A1.32 不確かさをより正しく把握するために、モデル入力データを 2 セット用意して燃料消費量の予測の上下限を求めた。ここでは、海上日数と平均負荷係数のみを操作した。カテゴリごとに、それぞれ燃料消費量の上下限を示す海上日数と負荷の組合せを特定した。上下限を生む組み合わせは実現可能性があるものと考えられるが、今回の総意の推定に比べればかなり低いと思われる。求められた上下限は絶対的な限界ではない。

表 A1-7 バンカー燃料の活動基準インベントリの比較
(結果の比較は A1-19 を参照)

	活動データの主な出所	船舶カテゴリ： 主エンジン 平均稼働時間 (日/年)	主エンジン 平均 SFOC (g/kWh)	主エンジン 平均%MCR
Corbett 他 2003 ^[1]	ディーゼルエンジン大手メーカーの提供によるエンジン稼働時間及び運転データ	貨物船： 229-292 (平均 271)	貨物船： 平均 206 (範囲 185-225)	貨物船： 65-70%定格出力に対する平均負荷 55-80% Max 全ての船舶 加重平均 63%
Eyring 他 2005 ^[3]	ディーゼルエンジン大手メーカーの提供によるエンジン稼働時間及び運転データ	貨物船： 225-275	貨物船： 平均 210	貨物船： 平均 70-80%
IMO 専門家グループ 2007 ^[4]	20 の大手船主を選んでアンケート	全ての船舶 175-310 (加重平均 226)	全ての船舶 加重平均 185	全ての船舶 62-90% (加重平均 80%)
Endresen 他 2007 ^[5]	海上貿易搬送距離、係船船腹、搬送能力稼働率、航行速度に関する発表済みデータ	貨物船： 平均 181	貨物船： 平均 221	貨物船： 平均 70%
本調査研究の総意の推定値	AIS データを船腹統計及び従来の調査結果と組合せた。上記で協力いただいた方々も今回の見直し作業に参画された。	全ての船舶 100-285 (加重平均 240)	全ての船舶の加重平均 196	貨物船： 65-80% (加重平均 70%) 全ての船舶： 16-80% (加重平均 64%)

表 A1-8 インベントリ入力データ一覧表

Category	Size / type	No. of ships (2007)	Ave. GT	Ave. ME kW	Ave. per engine Aux kW	AIS unique counts (4)	AIS coverage (5)	Days at sea (1) Modelled	Avg. ME load Modelled	Avg. AUX running days (2)	Avg. AUX load Modelled	Fuel type (3)
Crude oil tanker	200,000+ dwt	494	155 685	24 610	1 034	514	99%	274	73%	450	50%	HFO
Crude oil tanker	120,000–199,999 dwt	353	80 711	17 075	1 232	368	100%	271	80%	450	50%	HFO
Crude oil tanker	80,000–119,999 dwt	651	56 921	12 726	769	685	101%	254	80%	450	50%	HFO
Crude oil tanker	60,000–79,999 dwt	180	39 498	10 529	731	190	101%	238	70%	400	50%	HFO
Crude oil tanker	10,000–59,999 dwt	245	24 290	7 889	729	229	91%	238	70%	400	50%	HFO
Crude oil tanker	0–9,999 dwt	114	2 085	1 865	222	49	41%	180	65%	400	50%	MDO/HFO
Products tanker	60,000+ dwt	198	46 775	12 644	780	215	99%	171	80%	450	50%	HFO
Products tanker	20,000–59,999 dwt	456	24 262	8 482	736	455	96%	171	66%	450	50%	HFO
Products tanker	10,000–19,999 dwt	193	9 723	4 640	535	147	75%	183	70%	400	50%	HFO
Products tanker	5000–9,999 dwt	466	4 264	2 691	291	306	63%	177	75%	400	50%	MDO/HFO
Products tanker	0–4999 dwt	3 959	1 056	1 032	123	909	23%	175	65%	400	50%	MDO/HFO
Chemical tanker	20,000+ dwt	1 010	24 917	9 027	837	1059	100%	251	80%	450	50%	HFO
Chemical tanker	10,000–19,999 dwt	584	9 357	5 161	623	621	95%	246	80%	400	50%	HFO
Chemical tanker	5000–9999 dwt	642	4 651	3 252	416	615	92%	246	76%	400	50%	MDO/HFO
Chemical tanker	0–4999 dwt	1 659	1 331	1 257	216	668	40%	180	65%	400	50%	MDO/HFO
LPG tanker	50,000+ cbm	138	43 784	13 494	1 004	147	103%	273	70%	450	50%	HFO
LPG tanker	0–49,999 cbm	943	4 834	3 225	436	697	72%	180	65%	400	50%	MDO/HFO
LNG tanker	200,000+ cbm	4	135 846	37 322	3 210	8	100%	260	70%	450	50%	HFO
LNG tanker	0–199,999 cbm	239	90 933	24 592	2 610	251	98%	274	70%	400	50%	HFO
Other tanker	Other	402	2 030	1 522	210	163	41%	180	65%	400	50%	MDO/HFO
Bulk	200,000+ dwt	119	114 519	17 224	794	101	97%	281	71%	450	60%	HFO

Category	Size / type	No. of ships (2007)	Ave. GT	Ave. ME kW	Ave. per engine Aux kW	AIS unique counts (4)	AIS coverage (5)	Days at sea (1) Modelled	Avg. ME load Modelled	Avg. AUX running days (2)	Avg. AUX load Modelled	Fuel type (3)
Bulk	100,000–199,999 dwt	686	83 619	15 108	697	695	99%	279	70%	450	60%	HFO
Bulk	60,000–99,999 dwt	1 513	39 568	9 912	549	1509	98%	271	70%	450	60%	HFO
Bulk	35,000–59,999 dwt	1 864	27 596	8 209	533	1859	96%	262	70%	425	60%	HFO
Bulk	10,000–34,999 dwt	2 090	15 351	6 436	458	1915	90%	258	70%	400	70%	HFO
Bulk	0–9999 dwt	1 120	1 942	1 532	237	382	34%	180	65%	400	60%	MDO/HFO
General cargo	10,000+ dwt	674	11 382	5 914	414	491	71%	260	80%	410	60%	HFO
General cargo	5000–9999 dwt	1 528	4 704	2 939	235	1171	76%	272	80%	410	60%	MDO/HFO
General cargo	0–4999 dwt	11 006	1 061	868	90	3553	32%	180	65%	380	50%	MDO/HFO
General cargo	10,000+ dwt, 100+ TEU	1225	15 641	7 882	628	1160	94%	240	65%	410	50%	HFO
General cargo	5000–9999 dwt, 100+ TEU	1 089	5 294	3 720	401	969	88%	180	65%	380	50%	MDO/HFO
General cargo	0–4999 dwt, 100+ TEU	1 486	2 724	1 860	249	1321	88%	180	65%	380	70%	MDO/HFO
Other dry	Reefer	1 239	4 998	4 941	551	930	75%	256	69%	360	60%	MDO/HFO
Other dry	Special	228	12 201	5 787	511	174	78%	235	65%	360	60%	MDO/HFO
Container	8000+ TEU	118	100 082	68 477	3 081	145	94%	241	67%	600	60%	HFO
Container	5000–7999 TEU	417	70 290	55 681	2 433	438	97%	247	65%	600	60%	HFO
Container	3000–4999 TEU	711	45 317	34 934	1 782	732	99%	250	65%	500	60%	HFO
Container	2000–2999 TEU	667	29 363	21 462	1 359	695	99%	251	65%	500	60%	HFO
Container	1000–1999 TEU	1 115	16 438	12 364	985	1157	98%	259	65%	450	60%	HFO
Container	0–999 TEU	1 110	6 967	5 703	600	1025	90%	180	65%	400	60%	MDO/HFO
Vehicle	4000+ ceu	398	51 549	13 137	1 034	419	97%	284	76%	300	70%	HFO
Vehicle	0–3999 ceu	337	20 561	7 971	671	289	86%	271	73%	300	60%	HFO

Category	Size / type	No. of ships (2007)	Ave. GT	Ave. ME kW	Ave. per engine Aux kW	AIS unique counts (4)	AIS coverage (5)	Days at sea (1) Modelled	Avg. ME load Modelled	Avg. AUX running days (2)	Avg. AUX load Modelled	Fuel type (3)
Roro	2000+ lm	194	25 725	15 736	1 293	186	96%	219	65%	360	50%	HFO
Roro	0-1999 lm	1 517	3 557	2 934	381	602	40%	180	65%	360	50%	MDO/HFO
Ferry	Pax Only, 25 kn +	984	302	3 113	60	244	25%	262	65%	360	60%	MDO/HFO
Ferry	Pax Only, <25 kn	2 108	392	1 213	79	215	10%	258	80%	360	60%	MDO/HFO
Ferry	RoPax, 25 kn +	177	12 119	27 395	785	125	71%	232	65%	360	70%	MDO/HFO
Ferry	RoPax, <25 kn	3 144	4 723	4 891	469	1054	34%	254	74%	360	70%	MDO/HFO
Cruise	100,000+ gt	24	119 041	66 523	1 500	16	67%	262	65%	360	70%	HFO
Cruise	60,000-99,999 gt	69	79 541	49 779	3 269	46	67%	227	65%	360	70%	HFO
Cruise	10,000-59,999 gt	130	29 559	19 048	1 780	87	67%	227	65%	360	70%	HFO
Cruise	2000-9999 gt	74	4 851	4 026	702	47	64%	227	65%	360	70%	HFO
Cruise	0-1999 gt	202	664	945	143	129	64%	180	65%	360	70%	MDO
Yacht	Yacht	1 051	560	2 285	141	467	44%	100	50%	360	70%	MDO/HFO
Offshore	Crew/supply vessel	607	246	2 546	69	187	30%	232	25%	360	60%	MDO/HFO
Offshore	Platform supply	1 733	1 127	2 527	316	956	54%	191	30%	360	60%	MDO/HFO
Offshore	Tug/supply ship	550	905	3 218	253	285	52%	205	16%	360	60%	MDO/HFO
Offshore	Anchor handling T/S	1 190	1 545	5 266	574	810	66%	210	31%	360	50%	MDO/HFO
Offshore	Support/safety	487	1 486	2 504	291	265	54%	194	34%	360	70%	MDO/HFO
Offshore	Pipe (various)	246	6 657	6 195	667	115	47%	233	16%	360	70%	MDO/HFO
Service	Research	895	1 641	2 386	367	372	41%	187	49%	360	60%	MDO/HFO

Category	Size / type	No. of ships (2007)	Ave. GT	Ave. ME kW	Ave. per engine Aux kW	AIS unique counts (4)	AIS coverage (5)	Days at sea (1) Modelled	Avg. ME load Modelled	Avg. AUX running days (2)	Avg. AUX load Modelled	Fuel type (3)
Service	Tug	12 330	281	1 903	96	2186	18%	215	40%	360	50%	MDO/HFO
Service	Dredging	1 206	2 191	2 614	516	374	31%	175	43%	360	50%	MDO/HFO
Service	SAR & Patrol	992	523	2 597	145	171	17%	180	28%	360	70%	MDO/HFO
Service	Workboats	1 067	1 559	2 077	174	266	25%	161	25%	360	60%	MDO/HFO
Service	Other	813	1 360	2 613	194	201	25%	156	51%	360	60%	MDO/HFO
Misc	Fishing	12 849	313	687	164	484	4%	285	26%	360	70%	MDO/HFO
Misc	Trawlers	9 709	601	956	319	776	8%	261	58%	360	70%	MDO/HFO
Misc	Other fishing	1 291	1 296	1 388	236	322	25%	249	77%	360	70%	MDO/HFO
Misc	Other	667	11 497	9 000	647	168	25%	153	65%	360	70%	MDO/HFO

備考 1: 「海上日数」は、総累積海上日数を表わす。船舶がその日の一部を洋上で過ごしたという日数はさらに多くなる。短距離航行をする小型船、フェリーなどの場合にこの差異は無視できないものとなる。

備考 2: 「平均 AUX 稼働日数」は、複数のエンジンの合計のため、年間の稼働日数が 365 日を超える。

備考 3: 「燃料の種類」は、主エンジンと補助エンジンの代表的な燃料を表わす。複数の燃料表記は、主エンジンと補助エンジンの使用頻度の差あるいはこのカテゴリの一部の船舶が両方の燃料を使用することを意味する。

備考 4: 「AIS 独特のカウント」は、年間 1 回以上検知された船舶の数をいう。

備考 5: 「AIS カバー率」は、使用したデータベースに登録された船舶数に対して、少なくとも年間 1 回以上検知された船舶の比率をいう。

表 A1-9 主エンジン燃料消費量計算の信頼性と不確かさ

入力	データソース	信頼性	備考
カテゴリ別船舶数	Fairplay データベース	非常に高いとの定評あり	登録船の精度が高い。全ての船舶が活発に活動しているかどうか、あるいはあるカテゴリのある船舶が係船中かどうか、などに不確かさがある。
主エンジン平均サイズ	Fairplay データベース	非常に高いとの定評あり	高精度と思われる
主エンジン平均稼働日数	AIS データから計算した。ただし、AIS カバー率が低い船種は除いた。	中位のレベル しかし不確かさの主要因である	精度は以下の精度の影響を受ける。すなわち、AIS 集計システム、AIS ネットワークエリア内の港間を移動する船の全体の代表程度、船舶の動きに対する仮定、データのカットオフ及びフィルタリング、平均非稼働/係船日数の仮定、港間距離の計算、船舶設計速度、など
主エンジン平均負荷	AIS 平均速度及び Fairplay 設計速度データからデフォルト値を計算。他のデータあるいは特殊条件によってより適正と思われる場合は、デフォルトを置き換えた。	中位のレベル 不確かさの二次要因となる	計算は、拡大 Lloyd's データベースの船舶設計速度データ及び AIS データから推定した海上速度の誤差に影響されやすい。船舶がバラスト航行あるいは軽荷航行の場合、負荷を過大評価しやすい。他のデータとの比較で妥当性が疑わしい場合は、専門家の判断により置き換えた。
平均非稼働/係船日数	仮定	中位のレベル 主エンジンの稼働日数に影響する。	全ての船舶に対して有効歴日を 355 日と仮定した（平均して 10 日が非稼働日）
AIS 観測点間の距離の計算	AIS の協力の下で計算	中位のレベル	AIS データの平均速度の計算に使用。AIS 受信基地間の最短ルート途中に陸塊があると精度に影響する。他のデータとの比較で妥当性が疑わしい場合は、専門家の判断により置き換えた。
船舶設計速度	拡大 Fairplay データベース	中位のレベル	「正常」航海と「低速（異常）」航海の区別に使用。海上での出力係数の推定にも使用
主エンジン平均 SFOC	試験台データ及び他の測定データから推定	高いとの定評が運航者及び製造者からある	エンジン間のばらつきがあるが、それに比べると平均値の精度は高いと思われる。

表 A1-10 補助エンジン燃料消費量計算の信頼性と不確かさ

入力	データソース	信頼性	備考
カテゴリ別 船舶数	Fairplay データベース	非常に高いとの定評あり	登録船の精度が高い。全ての船舶が活発に活動しているかどうか、あるいはあるカテゴリのある船舶が係船中であるかどうか、などに不確かさがある。
補助エンジン 平均サイズ	拡大 Fairplay データベース	高いがデータ間にギャップ有り	主エンジンよりはデータの精度が少し劣る。しかし一般的には精度が高いと思われる。
補助エンジン 平均稼働日数	専門家の判断と運航者との 相談による	中位のレベル： 船舶稼働日数と補助エンジンに対する需要による。	船舶の出力需要及び運航慣行にばらつきがあるため、評価が難しい。信頼性は中位のレベルだが、トータルインベントリに対する影響は小さい。
補助エンジン 平均負荷	専門家の判断と運航者との 相談による	中位のレベル： 船舶の運航条件と需要による。	船舶の出力需要及び運航慣行にばらつきがあるため、予測が難しい。
補助エンジン 平均 SFOC	試験台データ及び他の測定 データから推定	高いとの定評が運航者 及び製造者からあり	エンジン間のばらつきがあるが、それに比べると平均値の精度は高いと思われる。

蒸気ボイラの燃料消費量推定値の信頼性は「中位のレベル」であるが、全体のインベントリに対する影響はほとんどない。

活動基準モデルに基づく国際海運によるバンカー燃料消費量の推定

- A1.33 本調査報告で使用した活動基準モデルは、国際海運と国内海運の排出量を区別できない。活動基準モデルによって国際海運の排出量を推定するためには、漁船の排出量をインベントリから除外し、国内海運の排出量を（燃料統計に報告されているように）全海運による排出量から差し引かなければならない。
- A1.34 活動基準モデルと表 A1-8 に示した入力を使って、2007 年の軍事を除く全海運活動による総燃料消費量（**訳注：原稿は排出量**）は表 A1-11 のように推定される。

表 A1-11 軍事を除く海運活動による総燃料消費量（2007 年、100 万トン）

	Low bound	Best	High bound
Total fuel consumption	279	333	400

- A1.35 上下限値は、総意の推定値に比べるとはるかに起こりそうにない「可能性ある極端」を表わすものだ。上記の数字は軍事を除く全ての船舶の消費量である。プロダクション船やリグのようなオフショア固定設備も除外した。これらの数字には、すでに国内海運及び漁業によるものとして登録された消費量（= 排出量）が含まれている。
- A1.36 漁業による排出量は漁船固有のものであり、活動基準インベントリから差し引くことが可能である。表 A1-12 では既に差し引いてある。

表 A1-12 漁船を除く全船腹による総燃料消費量（2007 年、100 万トン）

	Low	Consensus	High
Total fleet inventory	279	333	400
Activity-based fishing estimate	18	21	23
Total less activity-based fishing emissions	261	312	377

- A1.37 IEA^[26]の記録に基づく 2005 年の国内海運の燃料消費量を表 A1-13 に示す。表には、A1.50 項から A1.53 項で説明する世界全体の海上貿易量に関する Fernleys データを使って 2007 年に換算した消費量も合わせて記載した。

表 A1-13 IEA データによる国内海運の燃料消費量 (100 万トン)

	2005	2007 (estimated)
HFO	13.3	14.6
MDO	19.7	21.6
Total	33.1	36.2

A1.38 2007 年の国際海運による燃料消費量、すなわち国内分として集計されない軍事と漁業を除いた燃料消費量を表 A1-14 のように推定した。

表 A1-14 国際海運による燃料消費量 (2007 年、100 万トン)

	Low bound	Consensus	High bound
Inventory total less fishing	261	312	377
IEA domestic shipping	36	36	36
International shipping	225	276	340

*統計には国内と漁業は含まれていない

バンカー燃料統計に基づく船舶による燃料消費量の推定

はじめに

A1.39 「船舶による GHG 調査報告 2000」は、燃料基準インベントリ法によって排出量を推定した。この方法は、バンカー燃料の世界販売量が総消費量に等しいとの暗黙の前提を置いた。2000 年の船舶による GHG 排出報告書では、IEA 及び米国エネルギー情報局 (EIA) などの船用バンカー燃料の世界消費量に関するデータソースをチェックした。その時多くの矛盾点が発見された。

A1.40 バンカー燃料の世界販売量は、各国が異なるカテゴリで報告した船用燃料のデータを集計しなければならない (例えば国内と海外のバンカー燃料販売量)。これを世界的な規模で集計するのは非常に難しい課題である。なぜなら大部分のエネルギーインベントリは IEA のエネルギー分類基準に準拠した集計方法を採用しているが^[13]、一部の統計ソースでは国際船用燃料の定義が異なるためである^[10]。このセクションでは現状の燃料統計データについて簡単に説明し、A1.54 項から A1.68 項では燃料基準によって推定したインベントリを提示して、A1.3 項から A1.38 項で作成した今回のより明確な活動基準インベントリと比較する。

IEA の統計及び報告慣行

A1.41 国際エネルギー機関（IEA）は、船舶による燃料消費量の記録を含むエネルギーデータベースを管理する。IEA は経済協力開発機構（OECD）によって設立された。IEA に加盟する政府は、石油供給の緊急事態に対処するための共同措置を講ずることを約束した。さらにエネルギー情報を共有し、エネルギー政策を融和させ、エネルギーの安全を確保し、経済成長を促し、環境保護を保証する分別あるエネルギー開発で協力することに合意した。これらの規定は「国際エネルギー計画に関する協定」として具体化され、その協定に基づいて 1974 年に IEA が設立された。IEA データベースには、重油（HFO）及び船用留出油を次の三つのカテゴリに分けて記録した需要（販売量）に関するデータが含まれる。

- .1 国際船用バンカー油
- .2 国内航行
- .3 漁業

用語は IEA によって以下のように定義された。

- .1 「国際船用バンカー」は国際航行に従事する全ての旗国の船舶に供給された量を対象とする。国際航行は、海上、内陸の湖と水路、沿岸水域で行われる。国内航行に従事する船舶の消費量は除外する。国内/国際の分割は、出発港と到着港によって決定され、船舶の旗国あるいは国籍によって決まるものではない。漁船及び軍艦による消費量は除く。
- .2 「国内航行」は、国際航行に従事しない全ての旗国の船舶に供給された燃料を対象とする。国内/国際の分割は、出発港と到着港によって決定され、船舶の旗国あるいは国籍によって決まるものではない。外洋、沿岸、内陸部での漁業及び軍事による消費は除く。
- .3 「漁業」は、内陸、外洋、沿岸、での漁業に使用される燃料を含む。「漁業」は、その国で給油される全ての旗国の船舶に供給される燃料のみならず、漁業で使用されるエネルギーも対象とする。
- .4 「重油」（HFO）は、蒸留残滓を調合した油と定義される。重油には調合によって作られる全ての残留燃料油が含まれる。その動粘性は 80 度で 10 cSt 以上である。引火点は常に 50C 以上、密度は 0.9 kg/l 以上とする。
- .5 「船用留出油」（MDO）は、船舶に供給される軽油及びディーゼル油を指す。それらには重質軽油も含まれる。用途によっては数種のグレードが利用できる。例えば、ディーゼル圧縮点火用のディーゼル油（車、トラック、船用）、工業用、商業用の灯油、その他の軽油など。

A1.42 実際面で、燃料消費量の国内/国際の分割が意味するところは、船舶が燃料を積み込む場合、次の寄港地が同じ国の港であれば燃料の全量が「国内」として登録されるということである。それ以外は、燃料は「国際」として登録されることになる。

IEA 統計データの分析

A1.43 IEA は加盟国、非加盟国を問わず統計データを管理する。そのため IEA はグローバルなエネルギーデータを提供できる。しかし非加盟国は固有の方法及び基準に従ったデータの報告を IEA 条約によって義務付けられていないため、非加盟国に関して IEA が収集したデータは精度が劣る。

A1.44 IEA のバンカー統計データの品質について判断するため、「国際船用バンカー」と「国内船用バンカー」の入力データを、IEA データにある全ての国のものについて評価した。1 年の間の大幅な変化が報告される場合もあれば、同じ量が毎年報告される場合もあった。これが真実で現実を反映したものとも考えられる場合もあるが、このような例が多く見られるということは、燃料消費量の報告にミスやずさんさが含まれることを意味する。概してこのような例は供給量が少ない国で多く見られた。まとめを表 A1-15 及び表 A1-16 に示す。

表 A1-15 表 IEA に対する報告：国際船用バンカー（1971 年－2005 年）

	年間供給量が 25% 以上変化したとの報告が少なくとも 1 度あった国の数*	25% 以上変化したとの報告の回数	連続してゼロ以外の同じ数字を報告した国の数
供給国トップ 10 (全報告量の 61%)	9 (90%)	63 (18%)	1 (10%)
次の 20 カ国 (全報告量の 29%)	17 (85%)	121 (17%)	8 (40%)
次の 44 カ国 (全報告量の 6%)	40 (100%)	485 (31%)	27 (59%)

* これらは概して同じ年には起きていない。

表 A1-16 表 IEA に対する報告：国内船用バンカー（1971 年－2005 年）

	年間供給量が 25% 以上変化したとの報告が少なくとも 1 度あった国の数*	25% 以上変化したとの報告の回数	連続してゼロ以外の同じ数字を報告した国の数
供給国トップ 10 (全報告量の 53%)	7 (70%)	46 (13%)	2 (20%)
次の 20 カ国 (全報告量の 25%)	10 (50%)	107 (15%)	6 (30%)
次の 44 カ国 (全報告量の 10%)	21 (48%)	146 (9%)	16 (36%)

* これらは概して同じ年には起きていない。

A1.45 ある年から翌年にかけての変化は、急激な需要の変化によって引き起こされるが、国ごとの集計の定義と実施方法の変更の結果でもある。またダブルカウントを避けるために、燃料の売上の報告は1回に限定する必要がある。そこで、陸上用として販売された燃料がその後に船舶用に転売される場合、この燃料はバンカー売上の統計への登録を回避される可能性がある。また、燃料が輸出された後に船舶に販売される場合も登録されない可能性がある。

A1.46 2005年のIEAデータは、世界の船用燃料の55%がOECD諸国で販売されたことを示している。船用燃料の世界販売量に占めるOECD諸国のシェアは65%のピーク値を記録した1991年以降は低下してきた。漁業向けではOECD諸国の報告が99%を占めることになるが、これは非OECD国における漁業向けの燃料販売が他のカテゴリとして報告されているか、全く報告されていないかのいずれかだと思わせる。漁業の燃料消費量が、海運以外の例えば農林業のカテゴリに含まれている可能性もある。OECD諸国ではこの後者の扱いが以前は慣行とされてきた。

IEA 統計に基づく燃料消費量の推定

A1.47 報告期間の1971年からの2005年までの間の年間燃料消費量のデータがIEAデータベースから入手できる^[26]。全ての国を対象としたさまざまなカテゴリの燃料データを集計して図A1-3を作成した。

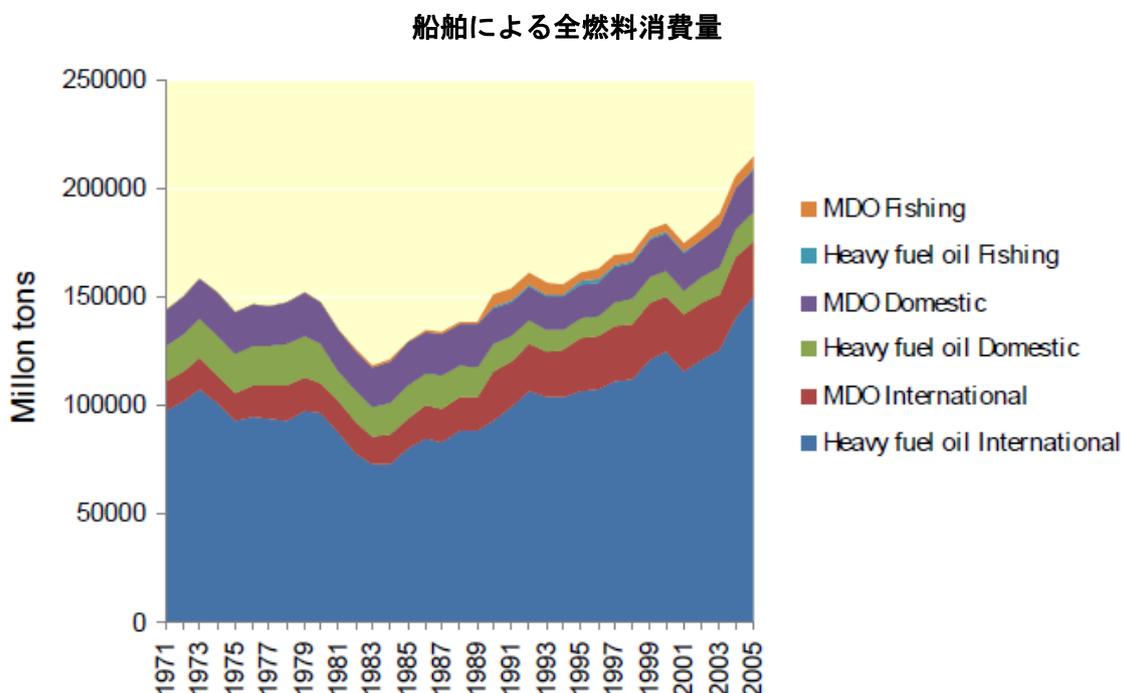


図 A1-3 船舶による全燃料消費量 (IEA 統計に基づく)

A1.48 2005 年の HFO 及び MDO 燃料のトータル消費量及びそれから類推した（輸送 ton-mile 基準で）2007 年の消費量を表 A1-17 に示す。

表 A1-17 IEA の船用燃料消費量データ^[26] (100 万トン)

		2005	2007 (estimated)
International marine bunkers	HFO	150	159
	MDO	26	27
Domestic navigation	HFO	13	14
	MDO	20	21
Fishing	HFO	0	1
	MDO	5	6
Total		214	234

EIA 統計データに基づく燃料消費量

A1.49 EIA はバンカー燃料の世界統計を提供する。バンカー燃料には、船用及び航空用として国内外を問わず供給される燃料が含まれ、船用の残留油と留出油及び航空用のケロシンベースのジェット燃料が主たるものとなる^[27]。「IMO 船舶 GHG 調査報告 2000」は、IEA と EIA データは OECD 諸国の場合は似ているが、その当時の EIA データ内の国際ジェット燃料の量が少なすぎると結論付けた。その後の調査報告は、IEA データと EIA データは大体が重なり、限定的ではあるが国によっては大幅な差があると結論付けた^[29]。最近の IEA と EIA データの比較を表 A1-18 に示す。IEA データには国内航行と漁業が含まれる。EIA データは、エネルギー情報年鑑でいうバンカー燃料である^[27]。表 A1-18 は、EIA と IEA データが数字の上ではさほど違いがないことを示す。この 5 年間で、EIA データは、留出油が常に多めで、合計が 5 年間の内の 4 年で多い。

表 A1-18 IEA^[26]と EIA^[27]燃料データの比較 (100 万トン)

Year	Residual		Distillate		Total	
	IEA	EIA	IEA	EIA	IEA	EIA
2000	136	120	48	52	184	172
2001	127	129	47	63	175	192
2002	133	126	48	56	181	182
2003	138	129	50	74	188	202
2004	154	144	51	82	205	226

燃料消費量の推定の将来予測と過去類推

- A1.50 年が異なる燃料消費量の推定値を比較するために、世界貿易量の伸びと輸送効率の改善を考慮して数字を調整しなければならない。
- A1.51 過去 30 年の間、燃料消費量と海上貿易量 (ton-mile) の間には明快で説得性ある相関関係が観測されている。すなわち世界貿易で行なわれる仕事量と必要エネルギーは比例関係にある (Skjolsvik 他 2000^[12]、Corbett 他 2007^[2]、Endresen 他 2007^[5])。海上貿易量 (ton-mile) の最近の年間成長率は、2002 年から 2007 年の平均が 5.2% となり、その前の 10 年間に比べるとはるかに高い (Fearnleys 2007^[7])。そのため、2001 年から 2006 年ではトータルの設備能力 (トータル出力) も 25% 増加し (Lloyd's Register – Fairplay 2006^[9])、燃料消費量が著しく増加した。
- A1.52 報告書本文で示したように新建造船の効率は年々改善されてきた。この効率改善は、技術の進歩及び市場の変化がもたらした代表的な進歩である。1985 年と 1995 年に建造された船舶の比較では、バルク船及びタンカーの平均効率が向上し、一方で一般貨物船とコンテナ船の平均効率はわずかに低下した。船腹平均効率は計算していない、しかし正味の変化は、同じ期間で倍増した貿易量 (ton-mile) に比べてかなり低いと思われる。
- A1.53 従って、年が異なる燃料消費量の推定値を比較するため、また 1990 年から 2007 年までの排出量の推移を計算するために、ある時点の推定値を基準にしてそれ以前とそれ以後の排出量を、Fearnleys^[7]による年間総輸送量 (ton-mile) を尺度とする海上貿易量の年間伸び率を基準にして類推した。

バンカー燃料消費量推定値の比較

- A1.54 「IMO 船舶 GHG 調査報告 2000」は、バンカー燃料の世界販売統計を使った。Corbett 他^[1]、Eyring 他^[3]、IMO 専門家グループ^[4]、Endresen 他^[5]の調査は、船舶活動量の推定値を基準としている。
- A1.55 上記の各調査は異なる年の燃料消費量と排出量値を予測した (2000 年、2001 年、2007 年)。これらを今回の調査報告 (2007 年) の結果と比較するために、各推定点を基準にして「それ以前とそれ以後の類推」 (backcasts and forecasts) をおこなう必要がある。A1.50 項から A1.53 項で概説したように、これらの推定点の「それ以前とそれ以後の類推」は、Fearnleys^[7]の輸送 ton-mile 量に基づく時間展開法によって計算した。結果を図 A1-4 に示すが、その図には国際バンカー販売統計^[26]、および Eyring 他 (2005a)、Endresen 他^[5]の推定による 1950 年から 2007 年までの推移も併記した。これらの研究報告のいくつかは、軍艦の排出量も含んでいるため、それらの船からの排出量を差し引いた。また必要に応じて比較できるように、ボイラと補助エンジンの推定消費量も表 A1-19 に併記した。
- A1.56 今回の調査報告による活動基準による総意の推定値を図 A1-4 に青い点で示した。

この点から延長した水色の縦棒は、上下限予測によって求めた不確かさの範囲を示すものだ。この図で分かるように、今回の調査報告の総意の推定値は；

- .1 IMO 専門家グループの推定値よりも低い
- .2 Eyring 他（2005b）（軍艦は除いた）の 2020 年排出量予測から線形内挿した類推値よりも高い、但し総意の推定値は、
- .3 A1.50 項から A1.53 項で概説した運賃傾向法による Eyring 他（2005a）の推定値を基準とした「以後の推定値」よりも低い
- .4 元の数値から軍艦分を除いた Corbett 他の予測に近い
- .5 Endresen 他（2007）^[5]に基づく推定値よりも高い

A1.57 Endresen 他（2007）^[5]の場合、総意の推定値は、勾配の差によって 1985 年付近で一致する。

表 A1-19 既存インベントリの比較のための修正

	Base year	Total (Mt)	Military (Mt)	Auxiliary (Mt)	Boiler (Mt)	Adjusted total (Mt)	2007 (estimated) (Mt)
Eyring <i>et al.</i> , 2005 [3]	2001	280	-9.4	Included	5.9 ⁽¹⁾	277	361
Corbett <i>et al.</i> , 2003 [1]	2001	289	-40.5	Included	5.9 ⁽¹⁾	254	339
Endresen <i>et al.</i> , 2007 [5]	2000	195	Not included	14.9 ⁽²⁾	5.9 ⁽¹⁾	210	282
IMO Expert Group [4]	2007	369	Not included	Included	Included	369	369
IEA total marine sales	2005	214	Not included	Included	Included	214	234
EIA bunker	2004	225	Not corrected	Included	Included	225	260

(1) 今回の調査に基づく推定値

(2) Corbett 他 2003^[1]に基づく推定値

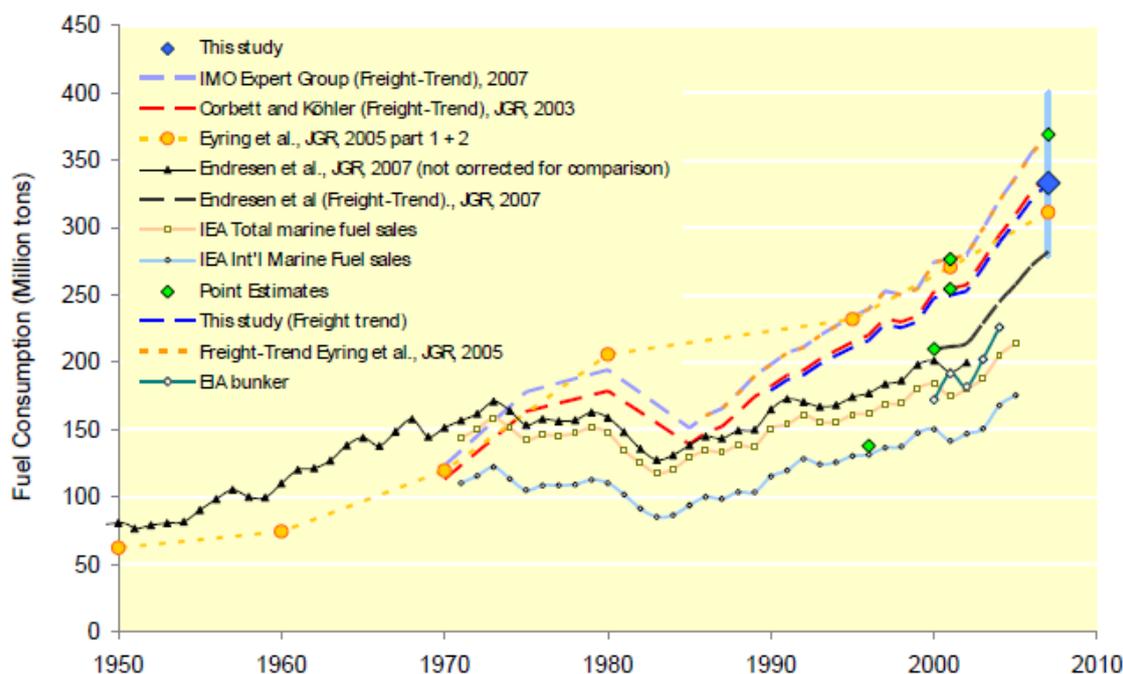


図 A1-4 船舶活動量及び統計に基づく世界船腹燃料消費量（軍艦は除く）

シンボルマークは、各年のオリジナルの推定値を表わし、実線は、傾向のオリジナルの推定値を表わす。破線は、原点推定値から輸送 ton-mile ベースで時間展開した「以前と以後の推定」を表わす。青い四角は、今回の調査報告の活動基準による推定値をし、青い縦棒は、推定の上下限範囲を表わす。

考察

A1.58 IEA と EIA データはほとんどが重なる、しかし、一部の国ではあるが推定値に大幅な差がみられる^[29]。そこで IEA 統計中の全ての国の「国際船用バンカー」と「国内船用バンカー」の入力データを再チェックした。バンカー燃料統計を編さんするには、異なるカテゴリ（国内または国際バンカー燃料などの）で報告された燃料データの統合が必要となる。大部分のエネルギーインベントリは IEA のエネルギー分類基準^[13]に準拠した集計方法を採用しているが、いくつかの船用燃料統計データは国際船用燃料の定義が異なるため^[10]、この作業を世界規模で実行するのはかなり困難である。外洋海運で消費されるエネルギーのどの範囲が国際船用燃料販売統計に示されているかを理解するのは、各国間のエネルギー協力及びその報告実態を歴史的に把握する必要がある。このセクションでは IEA のこれまでの歴史及び船用燃料の過去の需要に対する現在の調査という観点から関連する背景について述べる。

A1.59 IEA は OECD の枠組みの中で 1974 年に設立され、その狙いの一つに「全ての国のために、安定した国際エネルギー取引体制の確立及び世界のエネルギー源の合理的な管理と利用を視野に産油国と消費国の連携を推進する」ことを掲げた^[19]。国際エネルギー計画（IEP）に関する IEA 協定は、「供給の安全、長期方針、情報の透明性、エネルギーと環境、研究開発、国際的なエネルギー取引などの課題に

対して工業国間のエネルギー政策の連携をとるための原点」となるよう設定された^[19]。

- A1.60 このためエネルギー統計、特に 1973 年の石油危機の間に混乱した石油供給に関する統計の整備が必要とされた。エネルギーの安定確保（石油共有制度など）を目的として、この統計が調印国の間における緊急割り当ての基準となった。IEA 協定^[19]によれば、燃料が (a) はしけ、(b) 沿岸航行のタンカー、(c) 港内のオイルタンカー、(d) 内航船バンカー、などの中に貯蔵されている場合は国内の「石油備蓄」に含まれる。燃料が (a) 洋上航行中の船舶の中、(b) 海上のタンカーの中、にある場合は国内備蓄から除外される。
- A1.61 国際船用燃料統計は、世界貿易に従事する船舶が消費する総エネルギーを把握するためのものではない。むしろこれらのデータは、ある国の国内備蓄に該当する燃料を、石油緊急事態共有制度における緊急割当量の計算にふさわしくないものと区別するために使われるものである。さらに説明すれば、IEP 協定において「緊急時における船用バンカーの取り扱いの共通ルール、備蓄対象とする消費量に船用バンカーを含める共通ルールを検討する」という課題が緊急時問題常設作業部会に与えられた^[19]。その後 IEA は、「各国の船用燃料備蓄は、それらが国際船用バンカーとして保管されるのであればカウントされない。なぜなら緊急時管理マニュアル（EMM）に取り入れられた 1976 年理事会で、そのようなバンカーは輸出として扱うことにされている」ことを明確にした^[19]。
- A1.62 それ以来、この IEA の定義は、IPCC の下での報告指針に一致するものとの評価を受けている^[22]。現状では、IEA は「国際船用バンカー（燃料）は、軍艦を含む全ての旗国の海上航行船舶に供給された量を対象とする。内陸及び沿岸水路の輸送に従事する船舶による消費は含まない」と定義している。IEA は国内航行を「内陸及び沿岸航行（国際船用バンカー契約の下で必要なバンカーを購入しない小型船舶及び沿岸航行船舶を含む）とし、外洋、沿岸、内陸での漁業に使われる燃料は農業に含む」と定義した。
- A1.63 この用語法により、船舶活動データとの整合性に欠けるために、「国際船用燃料」という用語が環境アセスメントとの間で分類上の齟齬を招くようになった。さらに IEA に対して報告される船用燃料売上の集計データが、国によってあるいは時期によってその質にばらつきがある。例えば非加盟国は、IEA 独自の方法及び基準に基づくデータ報告さえ IEA 条約による義務付けがない。非加盟国に関して IEA が集めたデータは精度が劣る。IEA データに一貫性が欠けることの影響は、消費量の過小評価として表れる。これは特に IEA の非加盟国に当てはまる。非加盟国は先ず燃料売上の報告という原点の義務を負わず、データ報告に関しても所定の基準や定義を使用する必要がない。
- A1.64 時としてある 1 年と次の 1 年の間で大きな変化が報告される、あるいは毎年同じ数字が報告されるといったケースが見受けられるが、これが多発するということは燃料消費量の誤差あるいは精度の悪さを意味する。IEA 統計に「船用燃料」と

して集計されたエネルギーのトータル量は、国による報告データの質のばらつきを含んでおり、船用燃料の国際販売と国内販売の区別も信頼性に欠ける。

- A1.65 歴史的な販売データが、国際貿易に従事する船舶（すなわち国際登録簿にある船腹）が消費したエネルギー量と完全に一致すると誤って解釈されるならば、この国際/国内の区分を頼ることによって、船腹が消費するトータルエネルギーに関して大幅な推定誤差を生じる。例えば、1997年と1999年の調査報告では Corbett も Fischbeck も、国際船用燃料の販売量が消費量を表わすとの前提に立っている^[23, 15]。「2000年のIMO 船舶 GHG 調査報告」もまた燃料ベースの排出量推定にこれらのデータを使用した。その後の調査研究で活動基準による推定手法が生み出され、最新のグローバル排出量を計算するための最適な方法を特定する指針となった^[13, 20, 21, 22]。
- A1.66 2003年と2004年に Corbett と Koehler, Endresen 他は、これらの販売量基準による推定を活動基準による船舶エネルギー需要の推定に置き換え、その結果、販売量統計の偏りを明らかにし、誤差の範囲が貨物船の場合で25%、世界船腹全体では2倍になる可能性を示唆した^[1]。これらの独立した研究によって、活動基準の推定方法の妥当性が十分に裏付けられた^[4, 5, 6]。（そして世界の船腹のエネルギー需要は国際船用燃料販売+国内に割り付けられた販売の合計であると見方が支持された^[5, 6]。）これらの境界線上にある世界燃料消費量の推定に関するさらなる議論が続くが、活動基準インベントリの手法的な要素は幅広く受け入れられてきた。

1990年から2007年の年間排出量の総意の推定

- A1.67 従来までの燃料消費量の推定とその後検討された推定を比較した結果、今回の調査報告作業にあたった技術者の国際チームは、詳細の活動データによる活動基準推定の方が、現状で利用可能な燃料統計を使った推定よりも船舶の総排出量の正しい値を示すという結論を下した。従って、当チームは以下の合意に達した。(1) 活動基準による推定を本調査報告の総意の推定として扱う、(2) 今回の調査報告による船腹別の燃料消費量と排出量の上下限範囲は、活動基準による排出量計算に対してもっとも現実性の高い入力パラメータを考慮した結果である、(3) IMO が今後使用する総意の推定値が求められた、の3点である。しかしながら、2007年以外はAISデータベースの利用が難しいため、年ごとのインベントリが作成できない。その代わりに、A1.50項からA1.53項で述べたような「以前の推定」の時間展開によってそれまでの排出量推移を構築した。
- A1.68 今回の調査報告による総意の推定値を表 A1-20 に示した。発生ソース別燃料消費量を表 A1-21 及び表 A1-22 に、歴史的な排出量推移を表 A1-23 及び図 A1-5 に示した。船舶カテゴリ別の燃料消費量は不確かさの範囲を示す縦棒とともに図 A1-6 に示した。さらに、沿岸航行と洋上航行に分けた燃料消費量および大分類の船舶カテゴリ別の燃料消費量を図 A1-7 及び表 A1-24 に示した。

表 A1-20 燃料消費量の総意の推定値 (2007 年、100 万トン)

2007	Low bound	Best	High bound
Total fuel consumption	279	333	400
International shipping	223	277	344

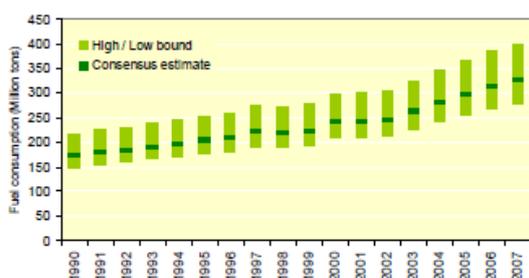
表 A1-21 ソース別総燃料消費量 (2007 年、100 万トン)

2007	Low bound	Best	High bound
Residual fuel	215	257	308
Distillate fuel	64	76	92
Slow-speed engines	181	215	259
Medium-speed engines	92	110	132
Boiler	7	8	9

表 A1-22 国際海運によるソース別燃料消費量 (2007 年、100 万トン)

2007	Low bound	Best	High bound
Residual fuel	172	213	265
Distillate fuel	51	64	79
Slow-speed engines	144	179	223
Medium-speed engines	73	91	113
Boiler	5	7	8

燃料消費量の総意の推定値 (軍艦を除く)
(1990 年—2007 年)



国際海運による燃料消費量の総意の推定値
(1990 年—2007 年)

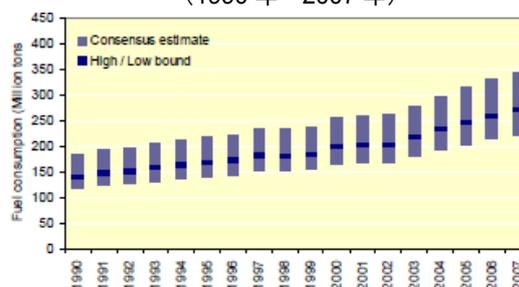


図 A1-5 燃料消費量の総意の推定値 (1990 年—2007 年)

表 A1-23 燃料消費量 (1990年-2007年、100万トン)

Year	Shipping total			International shipping		
	Low bound	Best	High bound	Low bound	Best	High bound
1990	150	179	215	120	149	185
1991	157	187	224	125	155	193
1992	160	191	229	128	159	197
1993	166	199	239	133	165	205
1994	172	205	246	137	170	212
1995	177	211	254	141	176	218
1996	181	216	260	145	180	223
1997	191	228	274	153	190	236
1998	189	226	271	151	188	233
1999	193	230	276	154	191	238
2000	208	248	298	166	206	256
2001	209	250	300	167	208	258
2002	212	253	304	169	210	261
2003	226	270	325	181	225	279
2004	242	289	347	193	240	298
2005	255	304	365	204	253	314
2006	269	321	385	215	267	331
2007	279	333	400	223	277	344

船舶カテゴリ別燃料消費量

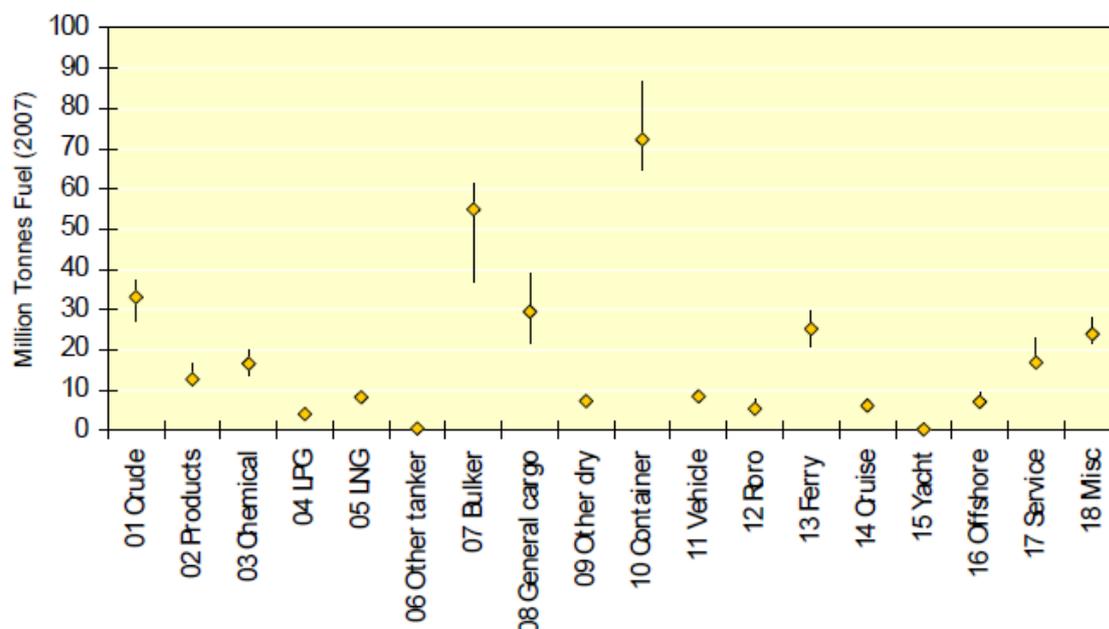


図 A1-6 主要船舶カテゴリ別燃料消費量推定と不確かさ範囲

(2007年、100万トン)

船舶カテゴリ別燃料消費量

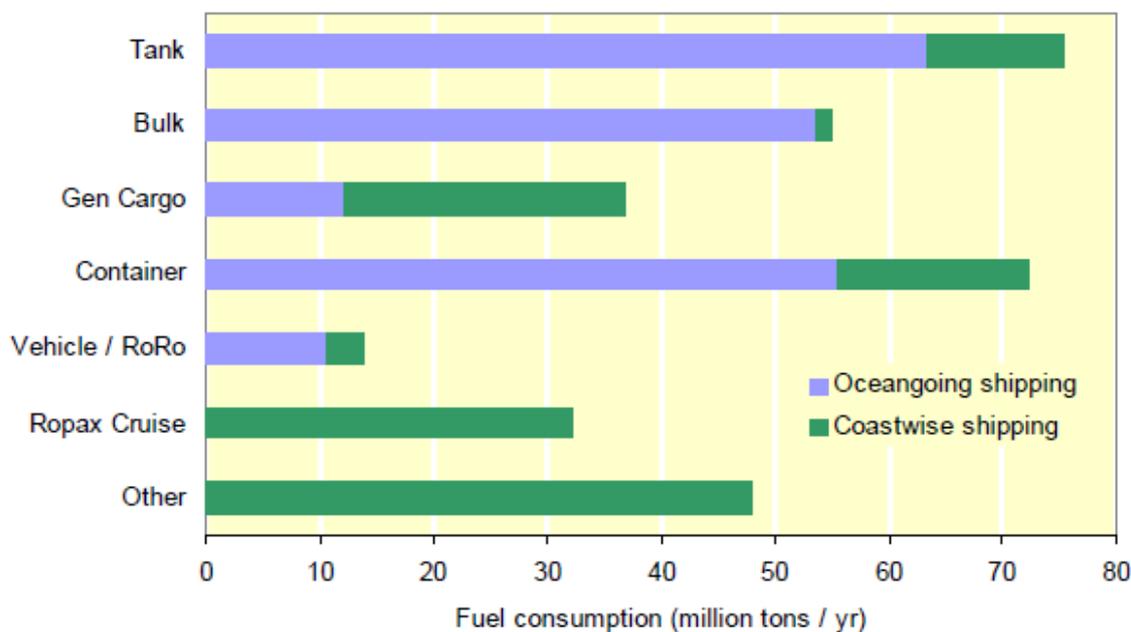


図 A1-7 主要船舶カテゴリ別・運航形態別燃料消費量（100 万トン）
（沿岸海運とは、15000DWT を超える Ro-R0 客船、クルーザ、サービス船、漁船を指す）

表 A1-24 燃料消費量の活動基準による推定（2007 年）

	Oceangoing	Coastwise	Other	Total
Bulk	54	1	0	55
Container	55	17	0	72
General cargo	12	25	0	37
Other	0	0	48	48
RoPax / Cruise	0	31	0	31
Tank	63	12	0	75
Vehicle/ro-ro	11	3	0	14
Grand total	195	89	48	333

表 A1-25 燃料消費量の総意の推定結果のまとめ (1000 トン)

Category	Size/Type	*	Ship Average fuel oil consumption (thousand tonnes)				Category Total fuel oil consumption (thousand tonnes)			
			Main Engine	Aux Engine	Boiler	Total	Main Engine	Aux Engine	Boiler	Total
Crude oil tanker	200,000+ dwt	O	21.8	1.2	1.3	24.3	10760.2	607.1	617.5	11984.8
Crude oil tanker	120,000–199,999 dwt	O	16.5	1.5	0.9	18.8	5810.8	516.6	317.7	6645.1
Crude oil tanker	80,000–119,999 dwt	O	12.2	1.0	3.0	16.1	7912.8	621.8	1953.0	10487.7
Crude oil tanker	60,000–79,999 dwt	O	8.2	0.8	3.0	12.0	1480.2	145.3	540.0	2165.5
Crude oil tanker	10,000–59,999 dwt	O	6.2	0.8	1.5	8.5	1506.4	196.8	366.8	2070.0
Crude oil tanker	0–9999 dwt	C	1.1	0.2	0.5	1.8	122.4	27.9	57.0	207.3
Products tanker	60,000+ dwt	O	7.7	1.0	3.6	12.2	1520.0	191.9	712.8	2424.8
Products tanker	20,000–59,999 dwt	O	4.5	0.9	3.0	8.4	2050.2	416.6	1366.5	3833.3
Products tanker	10,000–19,999 dwt	O	2.9	0.6	1.8	5.3	562.4	113.6	346.5	1022.5
Products tanker	5000–9999 dwt	C	1.8	0.3	0.9	3.0	821.3	149.3	419.0	1389.5
Products tanker	0–4999 dwt	C	0.6	0.1	0.3	1.0	2288.2	536.3	1187.7	4012.2
Chemical tanker	20,000+ dwt	O	8.5	1.0	0.0	9.5	8574.1	1004.0	0.0	9578.1
Chemical tanker	10,000–19,999 dwt	O	4.7	0.7	0.0	5.4	2771.6	401.7	0.0	3173.3
Chemical tanker	5000–9999 dwt	C	3.0	0.5	0.0	3.5	1924.4	294.6	0.0	2219.0
Chemical tanker	0–4999 dwt	C	0.7	0.2	0.0	1.0	1199.7	395.1	0.0	1594.8
LPG tanker	50,000+ cbm	O	12.1	1.2	0.0	13.3	1666.3	164.7	0.0	1830.9
LPG tanker	0–49,999 cbm	C	1.9	0.5	0.0	2.3	1749.7	453.6	0.0	2203.4
LNG tanker	200,000+ cbm	O	28.5	3.8	0.0	32.4	114.2	15.3	0.0	129.4
LNG tanker	0–199,999 cbm	O	31.1	2.8	0.0	33.8	7411.6	657.3	0.0	8068.9
Other tanker	Other	C	0.9	0.2	0.0	1.1	351.8	93.1	0.0	445.0
Bulk	200,000+ dwt	O	15.2	1.2	0.0	16.4	1811.0	140.8	0.0	1951.8

Category	Size/Type		Ship Average fuel oil consumption (thousand tonnes)				Category Total fuel oil consumption (thousand tonnes)			
Bulk	100,000–199,999 dwt	O	13.1	1.0	0.0	14.1	8982.5	712.4	0.0	9694.9
Bulk	60,000–99,999 dwt	O	8.8	0.8	0.0	9.6	13314.0	1237.4	0.0	14551.4
Bulk	35,000–59,999 dwt	O	7.0	0.8	0.0	7.8	13122.5	1397.3	0.0	14519.8
Bulk	10,000–34,999 dwt	O	5.4	0.7	0.0	6.1	11353.5	1479.7	0.0	12833.2
Bulk	0–9999 dwt	C	0.9	0.3	0.0	1.2	987.1	350.9	0.0	1338.0
General cargo	10,000+ dwt	O	5.8	0.6	0.0	6.3	3877.2	378.2	0.0	4255.5
General cargo	5000–9999 dwt	C	3.1	0.3	0.0	3.5	4801.9	487.0	0.0	5288.9
General cargo	0–4999 dwt	C	0.5	0.1	0.0	0.6	6036.4	1038.3	0.0	7074.7
General cargo	10,000+ dwt, 100+ TEU	O	5.8	0.7	0.0	6.5	7055.0	869.9	0.0	7925.0
General cargo	5000–9999 dwt, 100+ TEU	C	2.1	0.4	0.0	2.6	2332.0	458.1	0.0	2790.2
General cargo	0–4999 dwt, 100+ TEU	C	1.1	0.4	0.0	1.4	1590.5	542.5	0.0	2133.0
Other dry	Reefer	C	4.3	0.7	0.0	5.0	5348.9	813.0	0.0	6161.9
Other dry	Special	C	4.1	0.6	0.0	4.8	944.1	139.0	0.0	1083.0
Container	8000+ TEU	O	46.4	5.9	0.0	52.3	5457.1	688.1	0.0	6145.2
Container	5000–7999 TEU	O	37.5	4.6	0.0	42.1	15647.1	1928.8	0.0	17575.9
Container	3000–4999 TEU	O	25.2	2.8	0.0	28.0	17904.9	2006.5	0.0	19911.4
Container	2000–2999 TEU	O	15.6	2.2	0.0	17.7	10386.9	1436.3	0.0	11823.2
Container	1000–1999 TEU	C	9.7	1.4	0.0	11.1	10859.8	1565.3	0.0	12425.1
Container	0–999 TEU	C	3.1	0.8	0.0	3.9	3466.3	882.1	0.0	4348.3
Vehicle	4000+ ceu	O	13.2	1.1	0.0	14.4	5263.2	456.1	0.0	5719.3
Vehicle	0–3999 ceu	O	7.3	0.7	0.0	8.0	2472.6	224.7	0.0	2697.3
Roro	2000+ lm	O	10.0	1.2	0.0	11.2	1931.7	238.5	0.0	2170.1
Roro	0–1999 lm	C	1.7	0.4	0.0	2.1	2561.7	573.9	0.0	3135.6
Ferry	Pax Only, 25 kn+	C	2.6	0.1	0.0	2.7	2566.5	70.0	0.0	2636.5

Category	Size/Type		Ship Average fuel oil consumption (thousand tonnes)				Category Total fuel oil consumption (thousand tonnes)			
Ferry	Pax Only, <25 kn	C	1.2	0.1	0.0	1.3	2592.7	199.8	0.0	2792.5
Ferry	RoPax, 25 kn+	C	18.3	1.1	0.0	19.4	3241.4	193.3	0.0	3434.7
Ferry	RoPax, <25 kn	C	4.5	0.7	0.0	5.2	14259.5	2053.2	0.0	16312.7
Cruise	100,000+ gt	C	47.5	2.0	0.0	49.5	1141.1	47.9	0.0	1189.0
Cruise	60,000–99,999 gt	C	32.6	4.3	0.0	36.9	2247.1	300.1	0.0	2547.2
Cruise	10,000–59,999 gt	C	12.5	2.4	0.0	14.8	1620.0	307.8	0.0	1927.9
Cruise	2000–9999 gt	C	3.2	1.0	0.0	4.2	237.0	72.3	0.0	309.3
Cruise	0–1999 gt	C	0.5	0.2	0.0	0.7	109.8	40.2	0.0	150.1
Yacht	Yacht	N	0.6	0.2	0.0	0.8	590.7	205.7	0.0	796.4
Offshore	Crew/supply vessel	N	0.7	0.1	0.0	0.8	445.3	57.9	0.0	503.2
Offshore	Platform supply	N	0.7	0.4	0.0	1.1	1251.3	652.9	0.0	1904.2
Offshore	Tug/supply ship	N	0.5	0.3	0.0	0.8	290.0	165.9	0.0	455.9
Offshore	Anchor handling T/S	N	1.6	0.7	0.0	2.3	1895.4	814.7	0.0	2710.1
Offshore	Support/safety	N	0.8	0.3	0.0	1.1	394.9	140.5	0.0	535.4
Offshore	Pipe (various)	N	1.2	0.9	0.0	2.1	287.8	228.1	0.0	515.8
Service	Research	N	1.1	0.4	0.0	1.5	954.9	391.3	0.0	1346.3
Service	Tug	N	0.8	0.1	0.0	0.9	9949.8	1170.2	0.0	11120.0
Service	Dredging	N	1.0	0.5	0.0	1.5	1172.1	617.5	0.0	1789.6
Service	SAR & patrol	N	0.6	0.2	0.0	0.8	627.3	199.9	0.0	827.2
Service	Workboats	N	0.4	0.2	0.0	0.6	434.2	221.8	0.0	656.0
Service	Other	N	1.1	0.2	0.0	1.3	903.4	187.7	0.0	1091.1
Miscellaneous	Fishing	N	0.3	0.2	0.0	0.5	3599.5	2928.6	0.0	6528.1
Miscellaneous	Trawlers	N	0.8	0.4	0.0	1.2	7565.5	4303.7	0.0	11869.2
Miscellaneous	Other fishing	N	1.3	0.3	0.0	1.6	1685.8	422.8	0.0	2108.6
Miscellaneous	Other	N	4.2	0.9	0.0	5.1	2796.4	600.1	0.0	3396.5

- * 船舶の大きさによるカテゴリ O: 外洋航行船、C: 沿岸航行船、N: 非輸送船（沿岸航行船としてモデル化）
全てのコンテナ船は大きさに限らずシナリオ中では「コンテナ」としてモデル化した。
個々の船舶カテゴリの不確かさはトータル推定の不確かさよりも大きいことに注意されたい。

船舶通行量及び排出量の地理的分布

はじめに

- A1.69 活動基準のボトムアップ推定によるあるいは燃料販売統計基準の推定による燃料消費量及び排出量のグローバルインベントリを、グリッドセル当たりの船舶通行量度数に基づいて分布させることができる。船舶通行量度数とは、該当する船舶報告回数あるいは船舶の大きさにより加重平均した報告回数をいう。この場合の総排出量の精度を限定するものは先に述べたグローバル推定の不確かさであり、さらに排出量の配分精度(空間的精度)を限定するものは空間尺度の偏りである。

グローバルな船舶通行量の空間尺度

- A1.70 Corbett 他(1997)は、統合海洋気象データセット(COADS)から求めた船舶通行量度数を使って、船舶排出量のグローバル空間分布図を最初に作成した。COADSとは、船舶の位置とその海洋及び大気の観測結果の自主的な報告を受けた結果を記録したデータセットであり、自由に利用できる。Endresen 他(2003)は、自動相互船舶救助制度(AMVER)から求めた船舶の大きさ(GT)で加重平均した報告回数を使って、船舶排出量のグローバル空間分布図の精度を上げた。米国沿岸警備隊が主宰するAMVERには、さまざまな船種からの毎日の報告に基づく詳細の航海情報が蓄積されている。つい最近までは、AMVERに加入できるのは24時間以上の航海に従事する1000GT以上の商船に限定され、そのデータは厳格な機密扱いとされた。12,250隻の船舶がAMVERに加入しているが、実際に報告を寄せるのは約7,100隻である。Endresen 他(2003)は、COADSとAMVERから読み取れる地理的分布がたいそう異なることを観測した。Wang 他(2007)は、国際総合海洋気象データセット(ICOADS)とAMVERデータセット(この2つは世界的な船舶通行量度数を表す最も適切な手段だが)に内在する統計的および地理的なサンプリングの偏りに取り組み、ICOADSを使って過大報告と思われる船舶を調整することによってグローバルな尺度の表示を改善する方法を提示した。これによってサンプリングの偏り、サンプルデータセットの増加、船舶による情報の不均一性などの問題点が緩和された。
- A1.71 本プロジェクトの第1フェーズでは、排出量に地理的分布を反映させた計算はおこなわなかった。しかし、参考までにグローバルな船舶通行量の分布を図A1-8に示す。

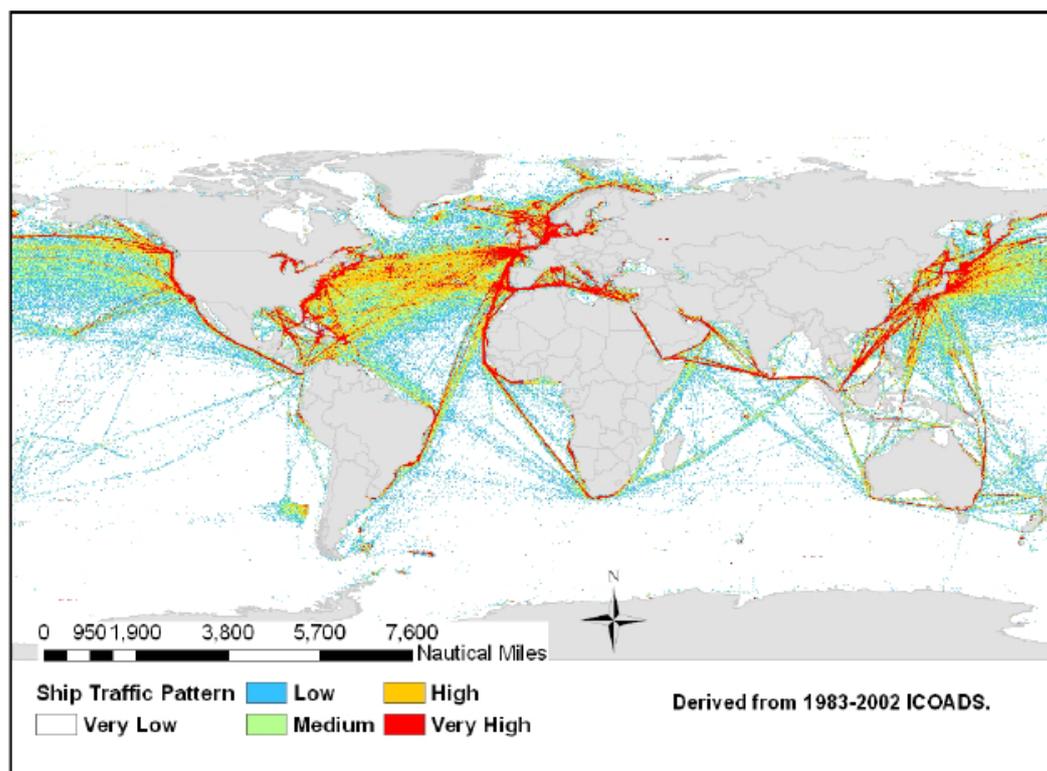


図 A1-8 ICOADS データに基づく船舶通行量分布

参考文献

- 1 Corbett, J.J., and Köhler, H.W. 2003. "Updated emissions from ocean shipping". *J. Geophys. Res.*, 108, D204650, doi:10.1029/2003JD003751.
- 2 Corbett, J.J., Firestone, J. and Wang, C. 2007. "Estimation, validation, and forecasts of regional commercial marine vessel inventories", Final Report for the California Air Resources Board and the California Environmental Protection Agency and for the Commission for Environmental Cooperation in North America, ARB Contract Number 04-346.
- 3 Eyring, V., Köhler, H.W., van Aardenne, J. and Lauer, A. 2005. "Emissions from International Shipping: 1. The last 50 Years". *J. Geophys. Res.* 110, D17305, doi:10.1029/2004JD005619.
- 4 Input from the four subgroups and individual experts to the final report of the Informal Cross Government/Industry Scientific Group of Experts, IMO documents BLG 12/INF.10 and BLG 12/6/1.
- 5 Endresen, Ø., Sørård, E., Behrens, H.L., Brett, P.O. and Isaksen, I.S.A. 2007. "A historical reconstruction of ships' fuel consumption and emissions". *J. Geophys. Res.* 112, D12301, doi:10.1029/2006JD007630.
- 6 Endresen, Ø., Sørård, E., Sundet, J.K., Dalsøren, S.B., Isaksen, I.S.A., Berglen, T.F. and Gravir, G. 2003. "Emission from international sea transportation and environmental impact". *J. Geophys. Res.* 108, D174560, doi:10.1029/2002JD002898.
- 7 Fearnleys, 2007. *Fearnleys Review 2007, The Tanker and Bulk Markets and Fleets*, Oslo, Norway.
- 8 Gunner, T. 2007 "Shipping, CO₂ and other Air Emissions", Technical workshop meeting on emissions from aviation and maritime transport, Oslo, Norway, October 2007. <http://www.eionet.europa.eu/training/bunkerfuelemissions>

- 9 Lloyd's Register – Fairplay (LRF). 2006. Extracts from the World merchant fleet database for 2001 to 2006 (all civil ocean-going cargo and passenger ships above or equal to 100 GT), provided by Lloyd's, UK.
- 10 Olivier, J.G.J. and Peters, J.A.H.W. 1999. "International marine and aviation bunker fuel: trends, ranking of countries and comparison with national CO₂ emissions". Netherlands Environmental Assessment Agency. RIVM report 773301 002.
- 11 Olivier, J.G.J., Berdowski, J.J.M., Peters, J.A.H.W., Bakker, J., Visschedijk, A.J.H. and Bloos, J.P.J. 2001. "Applications of EDGAR. Including a description of EDGAR 3.0: reference database with trend data for 1970–1995". RIVM, Bilthoven. RIVM report number 773301 001/NOP report number 410200 051.
- 12 Skjølvsvik, K.O., Andersen, A.B., Corbett, J.J. and Skjelvik, J.M. 2000. "Study of greenhouse gas emissions from ships" (MEPC 45/8 Report to International Maritime Organization on the outcome of the IMO Study on Greenhouse Gas Emissions from Ships. MARINTEK Sintef Group, Carnegie Mellon University, Center for Economic Analysis, and Det Norske Veritas: Trondheim, Norway).
- 13 Thomas, R., Lauretis, R.D., Fontelle, J.-P., Hill, N., Kilde, N. and Rypdal, K. 2002. Shipping Activities, Chapter B842, in EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook – October 2002 UPDATE, edited by K. Lavender, G. Reynolds, A. Webster, and K. Rypdal, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.
- 14 Wang, C., Corbett, J.J. and Firestone, J. 2008. "Improving spatial representation of global ship emissions inventories". *Environmental Science & Technology*, 42, 193–199, doi:10.1021/es0700799.
- 15 Corbett, J.J. and Fischbeck, P.S. 1997. "Emissions from ships". *Science*. 278 (5339), 823–824, doi:10.1126/science.278.5339.823.
- 16 Data provided by Lloyds Register – Fairplay Research, Sweden.
- 17 Data compiled by DonChool Lee, Mpocho National Maritime University, Korea.
- 18 Diesel & Gas Turbine Worldwide 2005. Diesel & Gas Turbine Publications. 20855 Watertown Road, Suite 220, Waukesha, WI 53186, USA.
- 19 Scott, R. 1994. "IEA: The First Twenty Years". Paris, France, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD).
- 20 ICF Consulting. 2005. "Best Practices in Preparing Port Emission Inventories: draft for review". Browning, L. and Bailey, K. Fairfax, Virginia, Prepared for Office of Policy, Economics and Innovation, United States Environmental Protection Agency. 39 pp.
- 21 UNFCCC and Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice. 2004. "Methodological issues relating to emissions from international aviation and maritime transport; Note by the secretariat". Prepared for 20th session, 16–25 June 2004, Bonn, Germany. United Nations Framework Convention on Climate Change, Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice. Document FCCC/SBSTA/2004/INF.5.
- 22 International Energy Agency. 1987. *Energy Statistics 1970–1985 and Main Series from 1960*. Paris, France, Organisation for Economic Co-operation and Development.
- 23 Houghton, J., Meira Filho, L. *et al.*, editors. 1997. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Bracknell, UK, IPCC WGI Technical Support Unit.
- 24 Corbett, J.J. and Fischbeck, P.S. 2000. "Emissions from waterborne commerce vessels in United States continental and inland waterways". *Environmental Science & Technology*. 34, 3254–3260.
- 25 CIMAC – International Council of Combustion Engines <http://www.cimac.com>
- 26 IEA Data Services, 2007 Energy Balances and Energy Statistics for OECD and non-OECD Countries.
- 27 Energy Information Administration International Energy Annual, Table 31 – various years: <http://www.eia.doe.gov/>

- 28 IMO. International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974. Chapter V – Safety of navigation.
- 29 Endresen, Ø., Bakke, J., Sørgård, E., Berglen, T.F. and Holmvang, P. 2005. “Improved modelling of ship SO₂ emissions – a fuel-based approach”. *Atmospheric Environment*. 39, 3621–3628.

Appendix 4 海運の CO2 限界削減費用の試算

はじめに

A4.1 海上輸送における CO2 排出量の削減に寄与する各種の対策は、限界削減費用カーブ (MACC: marginal abatement cost curve) の形に示すことができる。MACC は、相互に排除しない削減対策の最大削減ポテンシャルを費用効果順に並べて図示したものだ。このような MACC を 2020 年について作成したが (第 5 章および以下を参照)、そこには 25 項目の対策を以下の括りで取り込んだ。

- .1 プロペラのメンテナンス
- .2 プロペラ及び推進システムの性能向上
- .3 船体塗装及びメンテナンス
- .4 航海及び運航面の改善オプション
- .5 主エンジン改装
- .6 船体改造による性能向上
- .7 補助システム
- .8 その他改造
- .9 減速航行
- .10 エア潤滑

この括り方は、異なるグループに属する対策が相互に排除しないよう考慮した。同じグループに属する対策は相互に排除し合い、併用されることはない。また対象とした大部分の対策は船舶改造による適用が可能である。A4.22 項に対策項目の一覧を示す。

A4.2 MACC はグループごとの費用効果と最大削減ポテンシャルを提示している。費用効果及び最大削減ポテンシャルは対策ごとに試算したが、グループ単位での推定値を示した。これは不確かさが、特に削減対策の費用に関して、依然として非常に高いという事実によるものである。同じ理由で、対策グループごとに 3 種類の推定値、すなわち推定下限、推定上限、中央推定値を用いた。

A4.3 ここでは、最初にバンカー燃料価格が 500 US\$/ton、金利 4% という前提条件の下での MACC を提示し、さらにバンカー燃料価格の変動または金利の変動によってもたらされる MACC の変化について簡単に説明した。その後、各対策の費用効果及び最大削減ポテンシャルの試算方法について詳しい説明を加えた。

2020 年の限界 CO2 削減費用カーブ

A4.4 図 A4-1 に、燃料価格が 500 US\$/ton、金利を 4% と仮定した場合の 2020 年の限界 CO2 削減費用カーブを示す。

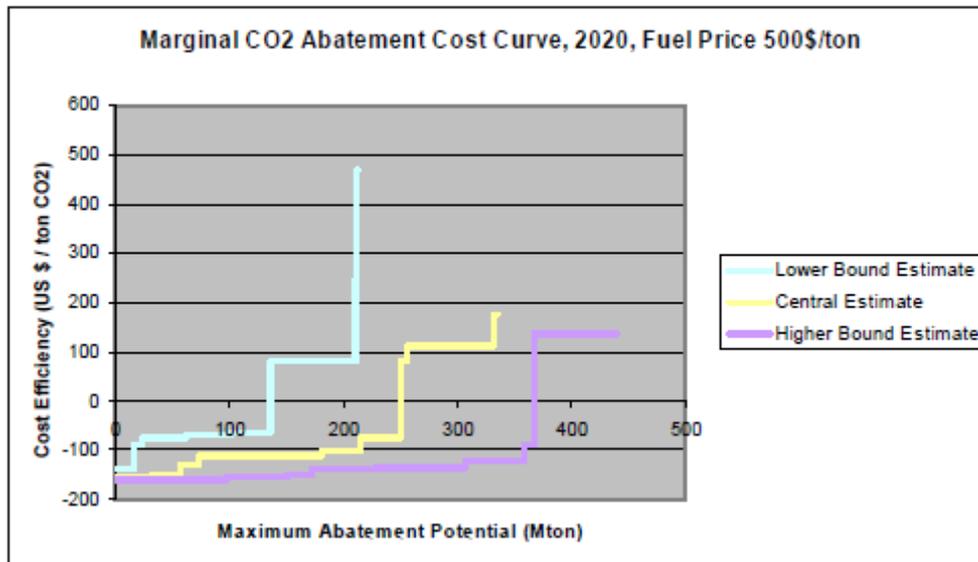


図 A4-1 限界 CO2 削減費用カーブ：2020 年
(燃料価格：500 US\$/ton、金利：4%)

- A4.5 考慮の対象とした対策の総最大削減ポテンシャルは、CO₂ が 210～440 Mtの範囲にあり、考慮の対象とした船種による推定総排出量の 15%から 30%に相当する¹。費用効果がマイナスを示す一連の対策があるが、それはこれらの対策がCO₂ 排出に対して値段がつかない場合でさえも採算が取れることを意味する。これら対策の総最大削減ポテンシャルはCO₂ が 135～365 Mtの範囲にあり、中央推定値はCO₂ が約 255 Mtとなった。表A4-1 に対策グループ別の費用効果及び最大削減ポテンシャルを示す。
- A4.6 減速措置、その他の改造策、プロペラ/推進システムの性能向上が、最も高い削減ポテンシャルを示し、船体改造対策、航海及び運航面の改善オプション、空気潤滑が最善の費用効果を示した。

¹ ベースラインとして、IMO 2020 予測 (IMO, 2008) の、需要レベルが中位で、減速レベル及び輸送効率が低位のシナリオである A1B シナリオを採用した。そのため、本調査報告 (これ以後を参照) において考慮の対象とした船種のトータルベースライン排出量は約 1,250 Mt となる。

	Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)	Maximum abatement potential (Mt)
	Central estimate (low bound estimate / high bound estimate)	
Retrofit hull measures	-155 (-140 / -160)	30 (10 / 55)
Voyage and operational options	-150 (-140 / -160)	25 (5 / 45)
Air lubrication	-130 (-90 / -150)	20 (10 / 25)
Propeller/propulsion upgrades	-115 (-70 / -155)	50 (45 / 60)
Other retrofit options	-110 (-75 / -135)	70 (40 / 100)
Hull coating and maintenance	-105 (-65 / -140)	40 (15 / 65)
Propeller maintenance	-75 (-65 / -120)	45 (25 / 65)
Auxiliary systems	80 (250 / -90)	5 (2 / 10)
Speed reduction	110 (80 / 135)	100 (90 / 110)
Main engine improvements	175 (470 / -120)	5 (1 / 10)

表A4-1 対策グループ別²の概算費用効果及び最大削減ポテンシャル
(2020年、燃料価格：500 US\$/ton、金利：4%)

A4.7 上記MACCは、バンカー燃料価格が500 US\$/tonという前提で試算したが、図A4-2は、燃料価格の変動がMACCに及ぼす影響を中央推定値に対して示したものだ。バンカー燃料価格によっても最大削減ポテンシャルは変化しないが、各対策の費用効果は改善される。これは、それぞれのCO₂削減レベルをより少ない費用で達成する事ができるようになること及び費用効果がプラスにならない範囲で実施可能な対策の最大削減ポテンシャルが増加することを意味する。燃料価格が1,500 US\$/tonという前提条件では、考慮の対象とした全ての対策の費用効果がマイナスになることに注目されたい。

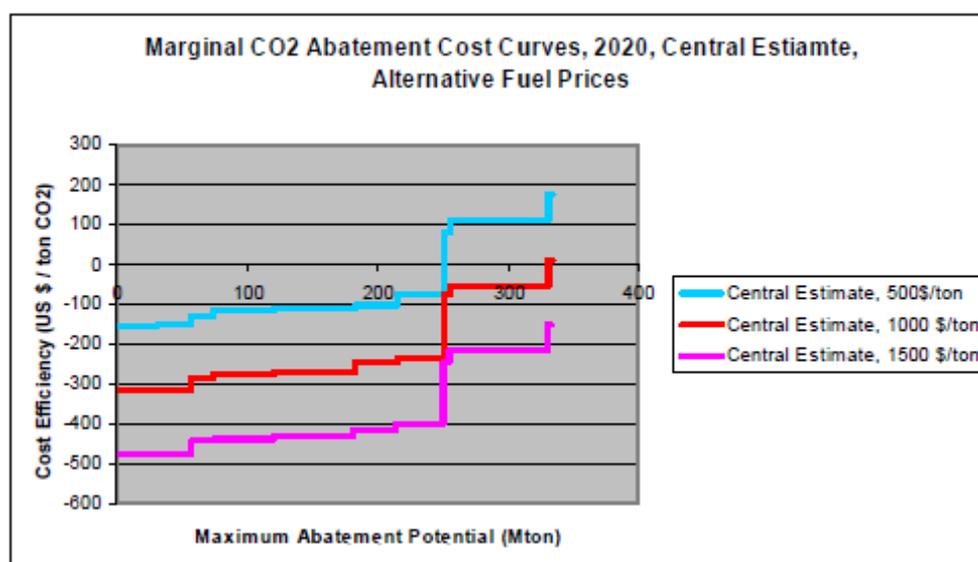


図 A4-2 燃料価格の変動が限界 CO₂ 削減費用カーブに与える影響（中央推定値のみを示す）

² 対策を費用効果の順に並べたので、対策の順番は異なる推定によって変わる。

A4.8 図A4-1 に示したMACCは、金利 4%に対して求めた。図A4-3 に金利が上昇した場合、この場合は 16%に上昇した場合のMACCの変化を示した。金利が上昇すると、対策の年間支払費用³を上昇させて費用効果の悪化を招き、MACCは上方向に移動する。

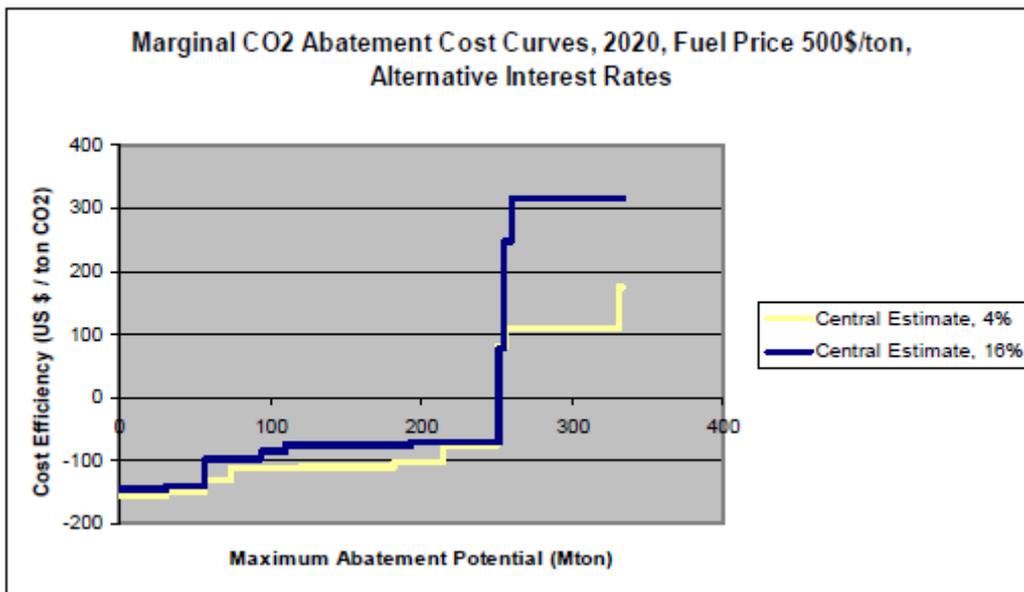


図 A4-3 燃料価格が 500 US\$/ton で金利が変動した場合の限界 CO2 削減費用カーブ
(中央推定値のみを示す)

費用効果及び最大削減ポテンシャル

試算方法及び共通の前提

A4.9 ある削減対策の費用効果とは、ある年に単位 CO2 排出量を削減するために必要なネット費用として定義される。ネット費用とは、その対策を適用するために必要な費用からその実行によって達成される省燃料の費用効果を差し引いたものである。この定義によれば、CO2 規制などが存在しなければ、対策は費用効果がマイナスの場合のみ採算が取れる。

A4.10 費用効果を計算する場合、各対策の削減ポテンシャルに関して上下限の幅を設定する。また以下に説明するように、対策の費用に関する不確かさも相対的に高いものがある。そのため費用についても推定上限と推定下限を扱うこととし、2通りの削減シナリオと相まって、結果的に一つの対策あたり 4 通りの費用効果が求

³ 以下で説明するように、ある対策の費用効果を計算する場合、削減対策のうち繰り返し発生しない費用は年間支払費用と考えられる。

められることになる⁴。費用の推定上下限は 2 通りの削減シナリオに対して同じものを用いる。

- A4.11 削減対策の費用に関しては、非繰り返し発生費用及び年間繰り返し発生費用を区別する。非繰り返し発生費用は、年間支払費用を計算することによって年間コストに変換される。投資の分散年数は、対策の推定耐用年数によって決まる。推定耐用年数及びそれに対して想定する投資分散年数の全体像を下表にまとめた。

表 A4-2 対策の推定耐用年数に対応する非繰り返し発生費用の分散年数

Expected lifetime of measure	Investment/non-recurring costs are spread over... years
≤ 10 years	actual expected lifetime
11–30 years	10 years
≥ 30 years	30 years

- A4.12 耐用年数が 10 年以下と推定される対策の場合、その推定耐用年数に投資を分散させる。耐用年数が 10 年から 30 年と推定される対策の場合は、10 年以降に再投資があるとの暗黙の仮定に基づき 10 年間に投資を分散させる⁵。耐用年数が 30 年以上と推定される対策の場合は、30 年間に投資を分散させる。

- A4.13 年間支払費用に算入する金利はモデルの中で変わる。

- A4.14 バンカー燃料消費量のデータは 2020 年 IMO 船腹予測から引用した⁶。金利と同様、バンカー燃料価格もモデルの中で変わる。燃料の品質レベルによる価格差は考えない。

- A4.15 ある対策の最大削減ポテンシャルとは、ある特定の年にその対策によって達成が可能な最大レベルの削減量、すなわちその対策の適用が可能なすべての船舶が実際にそれを利用した場合の削減レベルをいう。従ってある対策の最大削減ポテンシャルを計算するためには、その対策の適用が可能な船種及びその特定の年にその対策の適用が可能な船舶数を把握する必要がある。後者を把握するためには「改造による適用が可能な対策」と「改造による適用が不可能な対策」の仕分けが極めて重要である。改造による適用が不可能な対策は、新造船にのみ適用が可能と

⁴ A4.18 項から A4.69 項では、個々の対策の費用効果及び削減ポテンシャルを 4 通りのケースに対して求めた、すなわち「低削減ポテンシャルで低推定費用」「低削減ポテンシャルで高推定費用」「高削減ポテンシャルで低推定費用」「高削減ポテンシャルで高推定費用」である。MACC に取り込む 10 の対策グループの費用効果及び削減ポテンシャルの算定では、これらの数がベースとなる。しかしながら、ここでは、グループあたり 3 種類の推定量、すなわち下限、上限、中央推定値のみを示す。

⁵ 再投資は船舶の耐用年数が以後の 10 年間にも投資の分散が可能な場合に限って発生する（最大削減ポテンシャルに関する項も参照のこと）。

⁶ より具体的には、IMO 2020 年予測の、需要レベルが中位、減速レベル及び輸送効率レベルが低位の A1B シナリオを採用した。

なる。そこでその対策の市場への導入年と検討対象年の間に市場に参入する新造船の数を求めなければならない。IMO 船腹インベントリから、2007 年における船級別の稼働船舶総数が分かる。IMO の予測によって 2020 年における同様の情報も与えられている。ただしこの二つの年における船腹の船齢構成が不明であり、2008 年から 2020 年の期間中の船腹の年齢構成に関する情報もない。そこでこの溝を埋めるために以下の 4 つの前提を置いた。

- 1 2007 年には新造船の市場参入がない。
- 2 船級別の総船舶数は 2007 年と 2020 年の間は直線的に増減する。
- 3 すべての船舶は船齢 30 年まで使用され、31 年目に変った時点で廃棄される。
- 4 2007 年に船舶は船齢に関して均一に分布する。すなわち 2007 年の船舶の 1/30 が船齢 1 年、船舶の 1/30 が船齢 2 年、以下同様とする⁷。

このような前提の下では、ある年に市場に投入される新造船の数は、「その年の総船舶数」と「前年の総船舶数から 2007 年の総船舶数の 1/30 を引いたもの」の差と等しくなる。

- A4.16 年ごとの船腹のサイズ構成及び船齢構成が得られたことによって、ある改造対策が適用が可能な船舶数が決定される。改造対策が非常に古い船舶にまで適用されるというのは現実的でないため、その対策の予測される耐用年数に応じて、ある老朽度に達した船舶には排出削減設備を適用する改造は実行されないという前提も設けた。より具体的には、改造対策が適用されるのは、投資を年間支払い費用のベースとなる年数（上記参照）に完全に分散させることが可能な船舶寿命が残っている船舶に限ると仮定した。一例として、ある対策が 5 年間の推定耐用年数を有する場合、その非繰り返し発生費用は 5 年間に分散される。その対策が市場に投入される年に、船級の残存寿命が 4 年のものにはその改造対策は適用されない。
- A4.17 対策供給側の供給不足または需要側の説明のつかない行動などは、最大削減ポテンシャルの計算には考慮していない。

計算結果及び対策固有の前提

- A4.18 以下に、今回 MACC の考慮の対象とした各 CO₂ 削減対策の費用効果及び最大削減ポテンシャルの試算結果を提示する。対策ごとに、対策の適用性、これまでの適用例及び計算の基となる費用並びに削減ポテンシャルに関するデータも紹介する。その結果は海運部門全体の、すなわち全ての船種にわたって集計した値を提示する。ただし、部門レベルで採算が取れないと判明した対策であっても、ある特定の船種に対しては採算が取れる場合もあることに留意する必要がある。

⁷ 2007 年から 2020 年の期間に船舶数が 13/30 以上も減少する唯一の船種は、4,999 DWT 以下のケミカルタンカーである。ここでは、2007 年から 2020 年の間に市場に参入する新造船はないものと仮定した。

- A4.19 以下の試算結果は、一定の市中金利を前提に求めたものである。米国及びヨーロッパの10年もの国債の平均償還率は過去5年間で3%から5%の間で変動した。このため金利を4%で計算することとした。バンカー燃料価格は500 US\$/tonと仮定した。
- A4.20 考慮の対象とした船種をAppendix 1の表A1-8（国際海運による2007年燃料消費量推定）にリストアップした。ただし漁船、沖合作業補給船、業務用船舶（例えば調査船）及びヨットは対象外とした。
- A4.21 IMO調査報告2008によると、対象となる船舶のCO₂総排出量は2020年で約1,250 Mtである。
- A4.22 限界削減コストカーブを作成するため、25項目の対策を先に示したグループに分類した。異なるグループからの対策が相互に排除せず、同じグループからの対策は相互に排除し合い、併用されることがまずないようにグループの括り方を考慮した。以下のリストに示すように、試算対象とした対策のうち2項目のみが新造船に限って適用可能な対策であり、他の対策はすべて改造による適用が可能である。

.1 プロペラのメンテナンス

- プロペラ性能の監視
- プロペラのブラッシング（頻度の増加）
- プロペラのブラッシング

.2 プロペラ及び推進システムの性能向上

- プロペラ/舵の性能向上
- プロペラの性能向上（小翼、ノズル）
- プロペラボスキャップフィン

.3 船体塗装及びメンテナンス

- 船体性能監視
- 船体塗装（2種類）
- 船体ブラッシング
- 船体水圧ブラスト（水中）
- 乾ドックでの全面ブラスト（スポットブラストに代わるもの）

.4 航海及び運航面の改善

- 軸出力計（性能監視）
- 燃料消費量計（性能監視）
- ウェザールーティング
- 自動操舵装置の性能向上及び調整

- .5 主エンジン改装**
 - 主エンジンのチューニング
 - コモンレール改善
- .6 船体改造による性能向上**
 - サイドスラスト開口部（流れの最適化、グリッド）
- .7 補助システム**
 - 省エネルギー型低発熱照明
 - ポンプ及びファンの回転数制御
 - 出力管理（新造船に限定）
- .8 その他改造：風による曳航**
- .9 減速航行**
- .10 空気潤滑（新造船に限定）**

各対策について重要な前提条件及び費用効果並びに最大削減ポテンシャルを以下に提示する。対策は次の順番で提示する。すなわち最初に、後ろの3グループ（すなわち他の改造：風による曳航、減速航行、空気潤滑）並びに船体塗装について詳細に説明し、続いて他の対策について上記の順で簡単に説明する。

A4.23 その前に、個々の対策がどの船種に適用可能かという前提の概要を紹介する。

表 A4-3 分析の中で前提とした個々の削減対策の異なる船種への適用性

	Applicability of measures as assumed in the study
Propeller maintenance	
Propeller performance monitoring	All ship types.
Propeller brushing (increased frequency)	All ship types.
Propeller brushing	All ship types.
Propeller/propulsion system upgrades	
Propeller/rudder upgrade	All ship types other than ferries and cruise ships.
Propeller upgrade (winglet, nozzle)	Tankers (crude oil, product, chemical, LPG, LNG, and other) only.
Propeller boss cap fins	All ship types.
Hull coating and maintenance	
Hull performance monitoring	All ship types.
Hull coating (two types)	All ship types.
Hull brushing	All ship types.
Hull hydroblasting (underwater)	All ship types.
Dry-dock full blast (as opposed to spot blast)	All ship types; assumed to be applied to old ships only.
Voyage and operations options	
Shaft power meter (performance monitoring)	All ship types.
Fuel consumption meter (performance monitoring)	All ship types.
Weather routing	
Autopilot upgrade/adjustment	All ship types.
Main engine retrofit	All ship types other than ferries and cruise ships.
Main engine tuning	All ship types other than ferries and cruise ships.
Common rail upgrade	All ship types.
Retrofit hull improvements	
Transverse thruster opening (flow optimization, grids)	All ship types.
Auxiliary systems	
Low-energy/low-heat lighting	Ferries and cruise ships only.
Speed control pumps and fans	All ship types.
Power management	Newly built ships only; all ship types.
Other retrofit options	
Towing kite	Bulk carriers, tankers (crude oil, product, chemical, LPG, LNG, and other)
Speed reduction	
10% speed reduction of the entire fleet	All ship types.
Air lubrication	
Air lubrication	Newly built ships only; crude oil tankers and bulk carriers > 60,000 dwt, LPG tankers > 50,000 m ³ , all LNG tankers, full container vessels > 2000 TEU

他の改造オプション：風による曳航システム

- A4.24 曳航用の風はエンジン出力の代用として風力エネルギーを利用するものである。このシステムは改造による適用が可能だが、船長 30 m 以上の船舶に限定され、16 ノット以下の船舶で効率よく機能する。この速度制約のためにタンカー（原油、製品、化学品、LPG、LNG 他）及びバルクキャリアが適用先としての可能性を持つと考えられる（船種ごとの平均速度は Corbett 他 2006 を参照）。
- A4.25 現時点で（2008 年 12 月）貨物船、トロール漁船及びヨット用に最大面積 640 m² までの風が入手可能で、3 隻の船舶でこの曳航システムの装備実績がある。3 隻の内訳は試験用船舶が 1 隻と商船が 2 隻で、商船はともに多目的貨物船である。商船のうち 1 隻が新造船で、1 隻は改造によって設置され、両船舶とも 160 m² の風を取り付けた。現在、最大面積 5000 m² までの風が計画中である。風による曳航システムの費用効果及び最大削減ポテンシャルを試算するに当たっては、2020 年には最大面積 5000 m² の風が市場で入手できるものと予測した。表 A4-4 に、船種別に割り当てた風の寸法を示した。

表 A4-4 適用が予測される船種別の風の表面積（2020 年）

Ship type		Kites applied in 2020 (m ²)
Crude oil tanker	200,000+ dwt	5000
Crude oil tanker	120,000–199,999 dwt	2500
Crude oil tanker	80,000–119,999 dwt	1280
Crude oil tanker	60,000–79,999 dwt	1280
Crude oil tanker	10,000–59,999 dwt	640
Crude oil tanker	0–9999 dwt	160
Product tanker	60,000+ dwt	1280
Product tanker	20,000–59,999 dwt	640
Product tanker	10,000–19,999 dwt	320
Product tanker	5000–9999 dwt	320
Product tanker	0–4999 dwt	160
Chemical tanker	20,000+ dwt	1280
Chemical tanker	10,000–19,999 dwt	320
Chemical tanker	5000–9999 dwt	320
Chemical tanker	0–4999 dwt	160
LPG tanker	50,000+ m ³	640
LPG tanker	0–49,999 m ³	320
LNG tanker	200,000+ m ³	1280
LNG tanker	0–199,999 m ³	640
Other tanker	Other (small)	160
Bulk carrier	200,000+ dwt	2500
Bulk carrier	100,000–199,999 dwt	2500
Bulk carrier	60,000–99,999 dwt	1280
Bulk carrier	35,000–59,999 dwt	640
Bulk carrier	10,000–34,999 dwt	640
Bulk carrier	0–9999 dwt	160

A4.26 帆による曳航システム使用による燃料消費量削減（従ってCO2 排出削減）ポテンシャルの算定は難しい。なぜならポテンシャルは、適用される帆の面積のみに依存するのではなく、船舶が選ぶ航路及び個々の気象条件等に影響されるためである。表A4-5 に帆の寸法に対して今回使用したエンジンの等価出力を示す。これらの数字は、標準的な条件⁸の下で有効である。

表 A4-5 異なる帆の寸法に対応したエンジン等価出力の概算

Kite area (m ²)	Engine equivalent power under standard conditions (kW)
160	600
320	1200
640	2500
1280	4900
2500	9600
5000	19 200

A4.27 今回の試算に用いた費用に関するデータを表 A4-6 に示す。購入価格は使用する帆のシステムによって変わる。設置費用及び運航費用は、購入価格に対する一定の比率を占める。単純化のために、設置費用の比率は、改造システム及び新設システムともに同じとした。

表 A4-6 分析に使用した帆による曳航システムの費用概算

		Kite area (m ²)					
		320	640	1280	2500	5000	
Purchase price (US\$ thousand)		480	920	1755	2590	3430	
Installation costs	Assumed % of purchase price	7.5%	7.5%	7.5%	7.5%	7.5%	
	Resulting installation costs (US\$ thousand)	26	50	96	142	188	
Operational costs per annum	Assumed % of purchase price	5–7%	7–9%	9–11%	11–13%	13–15%	
	Resulting operational costs per annum (US\$ thousand)	Low	25	65	160	285	445
		High	35	85	195	335	515

A4.28 費用データは、船舶寿命、すなわち 30 年間の間に起こり得る再投資も含まれることに注意されたい。費用効果及び最大削減ポテンシャルの概算結果を表 A4-7 に示す。削減ポテンシャルの低（高）の各シナリオは、洋上日数のうち帆を使用できる日数の比率 1/3（2/3）に対応する。

⁸ 標準的な条件とは以下に定義される：真風を 130°の風向きに受けて 10 ノットの速度で航行する。風速は 25 ノット、波高は最大 60 cm、帆は動的に操縦される。

表 A4-7 風による曳航システムの費用効果及び最大削減ポテンシャルの概算
(パンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	-85	-75	37.1	3.0%
	High reduction potential	-135	-130	100.9	8.0%

減速航行

- A4.29 船舶による排出量は概して航行速度の 2 乗に比例する。そのため例えば 10%の減速航行によって排出量が ton-km 当たり 19%削減される。ただし減速航行はある期間内に船舶が輸送する貨物量に影響するため、運航者は輸送量のロスを避けるために追加の輸送能力を手当てしなければならない(AEA, 2008)。今回の分析では、追加の輸送能力は新造船によって供給されると仮定した。すなわち市場が余剰能力を持たないある種の平衡状態からスタートして、減速航行によっても負荷係数を高めることにはならないという基本前提を設けた。分析におけるもう一つの重要な前提は、市場にある全ての船舶が同じ比率だけ速度を落とし、その結果購入しなければならない新造船の数は、世界船腹が一人の船主に所有されるかのように決定されるというものである。購入が必要な船舶の割合は次式で求められる。式： $1 / (1 - \text{減速率}(\%)) - 1$ ；速度を半分に落とすと 2 倍の船腹が必要となる。
- A4.30 減速航行対策の非繰り返し発生費用は、追加する船舶の購入費である。繰り返し発生費用は、減速後の速度における消費燃料を含む追加船舶の年間運航費用である。当初から保有する船腹の排出削減量は、追加船舶の排出量と相殺しなければならない。
- A4.31 新造船の価格は UNCTAD (2008) データから推定した。過去 10 年を見た場合、新造船の価格は 2007 年を 10 年間の平均価格の年とすると、非常に不安定な傾向にあり、今回は 2007 年のデータに 0.7 の修正係数を適用した。
- A4.32 燃料費を除く船種ごとの運航費用を 1 日当たり 6,000 US\$から 8,000 US\$と推定した。次の 4 つの船種を適用対象から除いた。クルーズ船とフェリーは、航路/時間の枠組みに拘束されるため除外した。RORO 船及び車両運搬船も、UNCTAD (2008) にこれら船種の新造船の価格データが収録されていないため除外した。表 A4-8 に 10%の減速航行を実施した場合の試算結果を示す。

表 A4-8 適用対象の全ての船舶が 10%減速航行した場合の費用効果及び最大削減ポテンシャルの概算
(パンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	10% speed reduction of the entire fleet	80	135	98.7	7.9%

- A4.33 上記の数字は控えめな推定値であると考えなければならない。なぜならこの分析では、減速航行による影響が常に新造船の購入によって補正されることが前提となっているからである。実際には余剰能力の活用によってこの対策の費用効果が確実に改善されるであろう。
- A4.34 表 A4-8 に示した試算結果が船腹平均の数字であることも強調しなければならない。この試算結果は、船腹全体が 10%の減速航行を実施した場合の削減ポテンシャル及び費用効果を示すものである。10%の減速によって高い費用効果を得る船種が存在する一方で、そうでない船種もある。一般的には、より高速船及びより大型船の方が小型の低速船よりも費用効果が高い。

空気潤滑

- A4.35 船舶船体の摩擦抵抗を、いわゆる空気腔システム (ACS: Air Cavity System) によって削減できる。ACS は耐用年数が 30 年と推定されるが、改造による適用が不可能な対策だ。タンカー、バルクキャリア、コンテナ船がこのシステムを活用する可能性を持つ。全長 (LOA) が 225 m 以上の船舶でなければならず、適用候補として次の船舶を考えることとした。
- .1 60,000DWT を超える原油タンカー及びバルクキャリア
 - .2 容量 50,000 m³ 以上の LPG タンカー
 - .3 すべての LNG タンカー
 - .4 2000 TEU を超えるフルコンテナ船

最近、試験船による最初の海上試運転及び外海における航行試験が実施された。この技術は 2008 年の末には商品化される。

- A4.36 燃料消費量及び CO₂ 排出量の削減に関しては、メーカーによって以下の範囲が提示された。タンカー及びバルクキャリアの場合は 10~15%、コンテナの場合は 5~9%。今回の分析では、削減ポテンシャル下限としてこの下限の半分を、削減ポテンシャル上限としてメーカーの提示した値を採用した。
- A4.37 ACS の運航費用は海象条件にもよるが 0.3~0.5 ton/day の燃料費に相当する。ただし、空気腔システムのようなシステムの省燃料ポテンシャルは船体の滑らかさ

に大いに影響されるとのステッチン FOM 財団及びトウエンテ大学の研究者による指摘もある。すなわち省燃料計画値を実際に達成するためには良好なメンテナンスが要求される。ACS を適用することによりメンテナンスに必要な運航費用が上昇するが、この追加費用はここでは考慮に入れない。

- A4.38 増加する非繰り返し発生費用は、従来型の新造船（ACS 無し）の価格の 2~3%と予測される。
- A4.39 再び新造船の価格を 0.7 の修正係数を適用して UNCTAD（2008）から類推した。表 A4-9 に今回の分析に用いた価格の一覧を示す。

表 A4-9 UNCTAD（2008）から類推した新造船価格

		Deduced prices for newly built vessels in 2007 (\$US millions)
Crude oil tanker	200,000+ dwt	87
Crude oil tanker	120,000–199,999 dwt	59
Crude oil tanker	80,000–119,999 dwt	47
Crude oil tanker	60,000–79,999 dwt	41
LPG tanker	50,000+ m ³	63
LNG tanker	200,000+ m ³	168
LNG tanker	0–199,999 m ³	105
Bulk carrier	200,000+ dwt	149
Bulk carrier	100,000–199,999 dwt	60
Bulk carrier	60,000–99,999 dwt	37
Container vessel	8000+ TEU	120
Container vessel	5000–7999 TEU	104
Container vessel	3000–4999 TEU	91
Container vessel	2000–2999 TEU	46

- A4.40 この情報を考え合わせて試算した空気腔システムによる費用効果及び最大削減ポテンシャルを表 A4-10 に示す。

表 A4-10 空気腔システムによる概算の費用効果及び最大削減ポテンシャル
(バンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US \$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	-115	-90	7.5	0.9%
	High reduction potential	-150	-140	24.4	1.9%

付着防止船体塗装

- A4.41 船体の摩擦抵抗を減らすことにより、燃料油の消費量を減らし、結果的に CO2 排出量を削減できる。摩擦抵抗を減らす方法の一つとして、付着を防止及び抑制する塗装によって船体をより滑らかにする方法が挙げられる。
- A4.42 そこで 2 種類の塗装、以下それらを塗装 1 及び塗装 2 と呼ぶ、に対して費用効果及び最大削減ポテンシャルを試算した。そこでは通常の TBT フリー塗装と比較して、これらの塗装の適用による費用の増分及び得られるメリットの増分を算定しなければならない。以下において、それらの算定方法及び算定結果を簡単に紹介し、最後に、この塗装の費用効果と最大削減ポテンシャルを提示する。ただし、この試算結果は精密な計算によるものではなく、データ不足のためむしろ概算として考えるべきものといえる。
- A4.43 一般的な TBT フリー塗装と比較した塗装の増分費用を算定する基準としたのが、パナマックスバルクキャリアの塗装費用のデータである。これらの費用は、塗装 1 の場合で 43,000~51,600 US\$、塗装 2 の場合で 221,000~265,200 US\$ の範囲にあると推定される。
- A4.44 船舶カテゴリによって船体の塗装面積が異なるため、この増分費用は船舶カテゴリによって変わると思われる。船舶カテゴリ別の増分費用の算定に当たっては、パナマックスバルクキャリアの増分費用に対して、各船舶カテゴリの総トン数から計算した費用係数を掛けることにより求めることとした。費用係数は式： $(\text{総トン数}_{\text{船舶}i})^{2/3} / (\text{総トン数}_{\text{パナマックスバルカー}})^{2/3}$ によって計算したが、これは単純化のために、船体の塗装面積が船舶総トン数の 2/3 乗に比例し、増分費用はこの推定塗装面積に直線的に比例するとの前提に基づくものである。船舶カテゴリ別に求めた結果の増分費用の推定範囲を表 A4-11 に示す。
- A4.45 費用効果の算定に当たって、以下に示す燃料消費削減・排出量削減メリットを享受するためには上記で算定した費用を 5 年ごとに負担しなければならないと仮定した。また建造時あるいは改造時の塗装費用を単純化のため同じとした。

表 A4-11 2種類の船体塗装による概算の増分費用
(一般的な TBT フリー塗装との比較 : US\$)

		Coating 1		Coating 2	
		Low cost estimate	High cost estimate	Low cost estimate	High cost estimate
Crude oil tanker	200,000+ dwt	115,000	140,000	600,000	720,000
	120,000–199,999 dwt	75,000	85,000	380,000	455,000
	80,000–119,999 dwt	55,000	65,000	275,000	330,000
	60,000–79,999 dwt	40,000	50,000	220,000	260,000
	10,000–59,999 dwt	25,000	30,000	135,000	165,000
	0–9999 dwt	7,500	8,500	35,000	45,000
Product tanker	60,000+ dwt	50,000	60,000	250,000	300,000
	20,000–59,999 dwt	35,000	40,000	170,000	205,000
	10,000–19,999 dwt	20,000	25,000	115,000	135,000
	5000–9999 dwt	20,000	20,000	95,000	110,000
	0–4999 dwt	15,000	20,000	80,000	95,000
Chemical tanker	20,000+ dwt	35,000	40,000	170,000	205,000
	10,000–19,999 dwt	20,000	25,000	115,000	135,000
	5000–9999 dwt	20,000	20,000	95,000	110,000
	0–4999 dwt	15,000	20,000	80,000	95,000
LPG tanker	50,000+ cbm	45,000	55,000	235,000	285,000
	0–49,999 cbm	10,000	10,000	55,000	65,000
LNG tanker	200,000+ cbm	80,000	95,000	420,000	505,000
	0–199,999 cbm	60,000	70,000	305,000	365,000
Other tanker	Other	10,000	15,000	60,000	70,000
Bulk carrier	200,000+ dwt	85,000	100,000	435,000	520,000
	100,000–199,999 dwt	70,000	85,000	360,000	430,000
	60,000–99,999 dwt	50,000	55,000	250,000	295,000
	35,000–59,999 dwt	35,000	45,000	185,000	225,000
	10,000–34,999 dwt	25,000	30,000	135,000	160,000
	0–9999 dwt	15,000	20,000	85,000	105,000
General cargo	10,000+ dwt	25,000	30,000	130,000	155,000
	5000–9999 dwt	9,500	10,000	50,000	60,000
	0–4999 dwt	4,500	5,500	25,000	30,000
General cargo	10,000+ dwt, 100+ TEU	25,000	30,000	135,000	165,000
	5000–9999 dwt, 100+ TEU	10,000	10,000	50,000	60,000
	0–4999 dwt, 100+ TEU	5,000	6,000	25,000	30,000

		Coating 1		Coating 2	
Other dry bulk carrier	Reefer	10,000	15,000	55,000	65,000
	Special	10,000	15,000	65,000	75,000
Unitized container vessel	8,000+ TEU	85,000	105,000	445,000	535,000
	5000-7999 TEU	60,000	75,000	315,000	375,000
	3000-4999 TEU	45,000	50,000	225,000	275,000
	2000-2999 TEU	30,000	40,000	165,000	200,000
	1000-1999 TEU	25,000	25,000	120,000	140,000
Unitized vehicle carrier	0-999 TEU	10,000	15,000	55,000	70,000
	4000+ ceu	50,000	60,000	270,000	320,000
Ro-ro vessel	0-3999 ceu	25,000	30,000	130,000	155,000
	2000+ lm	50,000	60,000	255,000	305,000
Ferry	0-1999 lm	15,000	20,000	80,000	95,000
	Pax only, 25kn+	45,000	55,000	235,000	280,000
	Pax only, <25kn	10,000	10,000	50,000	60,000
	RoPax, 25kn+	35,000	40,000	175,000	210,000
Cruise ship	RoPax, <25kn	15,000	20,000	85,000	100,000
	100,000+ gt	115,000	135,000	580,000	695,000
	60,000-99,999 gt	70,000	85,000	360,000	435,000
	10,000-59,999 gt	40,000	50,000	210,000	250,000
	2000-9999 gt	10,000	15,000	65,000	75,000
	0-1999 gt	4,000	4,500	20,000	25,000

- A4.46 一般的な TBT フリー塗装と比較した増分メリットを算定する基準としたのもパナマックスバルクキャリアのデータである。これらの燃料消費削減量・CO2 削減量の増分は、塗装 1 の場合で 0.5~2%、塗装 2 の場合で 1~5%の範囲にあると推定される。
- A4.47 これらの削減メリットは船種によって変わるものと思われる。船種による燃料消費削減量対比のため、あるメーカーが保証したある塗装の最初の一定期間内の燃料消費削減量データを利用した。そこに示された船種間の差を、パナマックスバルクキャリアの燃料消費削減量の増分範囲に割り付けて、表 A4-12 に示す船種別の燃料消費削減量増分範囲を求めた。

表 A4-12 船種別の概算の燃料削減ポテンシャル増分

	Coating 1		Coating 2	
	Low estimate (%)	High estimate (%)	Low estimate (%)	High estimate (%)
Crude oil tanker	0.7	2.9	1.5	7.3
Product tanker	0.6	2.4	1.2	6.1
Chemical tanker	0.6	2.4	1.2	6.1
LPG tanker	0.4	1.7	0.9	4.3
LNG tanker	0.4	1.7	0.9	4.3
Other tanker	0.4	1.6	0.8	4.1
Bulk carrier	0.5	2.0	1.0	5.0
General cargo	0.5	2.0	1.0	5.0
Other dry bulk carrier	0.4	1.6	0.8	4.1
Unitized container vessel	0.6	2.2	1.1	5.5
Unitized vehicle carrier	0.4	1.6	0.8	4.1
RoRo vessel	0.4	1.6	0.8	4.1
Ferry	0.4	1.6	0.8	4.1
Cruise ship	0.4	1.6	0.8	4.1

- A4.48 適用性に関しては、両塗装ともどの船種にも使用可能、さらに改造による適用も可能と考えた。
- A4.49 引用したデータ及び上記に示した単純化された前提条件に基づいて試算した2種類の異なる塗装による費用効果及び最大削減ポテンシャルを表 A4-13 及び表 A4-14 に示す。

表 A4-13 船体塗装 1 による概算の費用効果及び最大削減ポテンシャル
(パンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	-115	-105	6.6	0.50%
	High reduction potential	-150	-150	26.1	2.10%

表 A4-14 船体塗装 2 による概算の費用効果及び最大削減ポテンシャル
(バンカー燃料価格 : 500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	-40	-15	13.2	1.10%
	High reduction potential	-140	-130	65.3	5.20%

A4.50 これからは、先に述べた括りの順で、その他の対策に関して簡単な説明を加える。いくつかの対策については、費用データが明確に示されていないが、それらのデータは Wärtsilä (2008) から引用した。このデータ集には対策ごとの削減ポテンシャル及び資金回収期間が示されている。このデータの前提となるバンカー燃料価格を 300 US\$/ton と仮定し、IMO の 2007 年の船腹燃料消費量データを利用して、船種別の相応対策費用を求めた。削減ポテンシャル及び資金回収期間は船種別に区別されておらず、一方燃料消費量は区別されているため、ある対策の費用は船種によって異なる。表 A4-15 に、各対策及び今回の試算で使用したそれらの平均削減ポテンシャル並びに資金回収期間を示す。耐用年数を投資の頻度で割った数値を三番目の欄に追記した。その他の対策に関してデータは、別に説明がない限り、コンソーシアムの専門家の判断に基づいた。

表 A4-15 各対策の費用算定に利用した平均削減ポテンシャル及び資金回収期間データ
(Wärtsilä 2008 から引用)

Measure	Average reduction potential	Payback time (years)	Lifetime/frequency of investment
Autopilot upgrade/adjustment	1.75%	0.5	10
Common rail upgrade	0.30%	5	10
Low-energy/low-heat lighting	0.45%	10	10
Main engine tuning	0.45%	10	10
Propeller brushing	3.50%	0.5	1
Propeller performance monitoring	2.25%	0.5	10
Propeller/rudder upgrade	4.00%	10	10
Propeller upgrade (winglet, nozzle)	2.50%	10	10
Speed control pumps and fans	0.60%	10	10
Power management (newbuilts only)	2.25%	10	30
Transverse thruster opening (flow optimization, grids)	3.00%	0.5	10

プロペラのメンテナンス

プロペラ性能の監視

表 A4-16 プロペラ性能監視による概算の費用効果及び最大削減ポテンシャル
(バンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	-135	-130	5.4	0.4%
	High reduction potential	-160	-160	42.5	3.4%

プロペラのブラッシング頻度の増加

A4.51 前提

- .1 費用推定下限：3,000 US\$、費用推定上限：4,500 US\$
- .2 費用データは5年周期で適用
- .3 費用は各船種とも同じ
- .4 削減ポテンシャル下限：0.5%、削減ポテンシャル上限：3%
- .5 全ての船種でこの対策を利用可能

表 A4-17 プロペラブラッシングの頻度増加による概算の費用効果及び最大削減ポテンシャル
(バンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	-160	-130	6.2	0.50%
	High reduction potential	-160	-160	36.7	2.90%

プロペラのブラッシング

表 A4-18 プロペラのブラッシングによる概算の費用効果及び最大削減ポテンシャル
(バンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	-75	-65	25.4	2.00%
	High reduction potential	-125	-120	62.8	5.00%

プロペラ及び推進システムの機能向上

プロペラ/舵の性能向上

表 A4-19 プロペラ/舵の性能向上による概算の費用効果及び最大削減ポテンシャル
(バンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	90	120	19.7	1.60%
	High reduction potential	-80	-70	58.5	4.70%

プロペラの性能向上 (小翼、ノズル)

表 A4-20 (各種の) プロペラ性能向上による概算の費用効果及び最大削減ポテンシャル
(バンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	530	600	1.3	0.10%
	High reduction potential	-90	-80	11.2	0.90%

プロペラボスキャップフィン

A4.52 前提

- .1 資本費用：20,000 US\$ (735 kW エンジン) ~146,000 US\$ (22,050 kW エンジン)、(Frey と Kuo, 2007)
- .2 価格は主エンジンの KW に正比例
- .3 繰り返し発生費用はゼロ
- .4 削減ポテンシャル： 4~5%
- .5 推定耐用年数：10 年
- .6 すべての船舶で利用可能

表 A4-21 プロペラボスキャップフィンによる概算の費用効果及び最大削減ポテンシャル
(バンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	-155	-150	42.9	3.40%
	High reduction potential	-155	-155	53.1	4.20%

船体塗装及びメンテナンス

船体性能監視

A4.53 前提

- .1 非繰り返し発生費用：45,000 US\$ (5年ごと)
- .2 年間運航費用：5,000 US\$
- .3 船種による費用差はない。
- .4 削減ポテンシャル：0.5～5%

表 A4-22 船体性能監視による概算の費用効果及び最大削減ポテンシャル
(バンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	-45	-45	6.2	0.50%
	High reduction potential	-150	-150	61.2	4.90%

船体ブラッシング

A4.54 前提

- .1 費用推定下限：26,000 US\$、費用推定上限：39,000 US\$
- .2 ブラッシングは5年ごとに実施する
- .3 船種別に費用を区別するため、船体塗装対策と同じ費用係数を適用する
- .4 削減ポテンシャル：1～10%
- .5 すべての船種に適用可能

表 A4-23 船体ブラッシングによる概算の費用効果及び最大削減ポテンシャル
(バンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	-95	-65	12.7	1.00%
	High reduction potential	-155	-150	125.6	10.00%

水中での船体水圧ブラスト

A4.55 前提

- .1 費用推定下限：33,000 US\$、費用推定上限：49,500 US\$
- .2 ブラッシングは5年ごとに実施する
- .3 船種別に費用を区別するため、船体塗装対策と同じ費用係数を適用する
- .4 削減ポテンシャル：1～10%
- .5 すべての船種に適用可能

表 A4-24 水中での水圧ブラストによる概算の費用効果及び最大削減ポテンシャル
(バンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	-80	-35	12.7	1.00%
	High reduction potential	-155	-150	125.6	10.00%

乾ドックでの全面ブラスト (スポットブラストに代わるもの)

A4.56 前提

- .1 費用推定下限：68,000 US\$、費用推定上限：81,600 US\$
- .2 船種別に費用を区別するため、船体塗装対策と同じ費用係数を適用する
- .3 削減ポテンシャル：5～10%
- .4 スポットブラストに代わる全面ブラストは、老朽化した船舶に対し状態修復のため1度のみ適用される (船齢25年の船舶を想定)。

表 A4-25 乾ドックでの全面ブラストによる概算の費用効果及び最大削減ポテンシャル
(パンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	-155	-150	8.2	0.60%
	High reduction potential	-160	-160	16.1	1.30%

航海及び運航面の改善オプション

性能監視： 軸出力計

A4.57 前提

- .1 費用推定下限： 26,000 US\$、費用推定上限： 31,200 US\$（出力計購入費）
- .2 すべての船種に対して同じ費用
- .3 出力計の推定耐用年数は 10 年
- .4 削減ポテンシャル： 0.5～2%
- .5 バラスト、積み荷、トリムを最適化することによるメリット
- .6 すべての船種に適用可能

表 A4-26 軸出力計による概算の費用効果及び最大削減ポテンシャル
(パンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	70	115	5.4	0.40%
	High reduction potential	-105	-95	21.3	1.70%

性能監視： 燃料消費計

A4.58 前提

- .1 費用推定下限： 46,000 US\$、費用推定上限： 55,200 US\$（燃料消費計購入費）
- .2 すべての船種で同じ費用
- .3 燃料消費計の推定耐用年数は 10 年
- .4 削減ポテンシャル： 0.5～2%
- .5 バラスト、積み荷、トリムを最適化することによるメリット
- .6 すべての船種に適用可能

表 A4-27 燃料消費計による概算の費用効果及び最大削減ポテンシャル
(バンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	245	330	5.4	0.40%
	High reduction potential	-60	-40	21.3	1.70%

ウェザールーティング

A4.59 前提

- .1 費用推定下限：800 US\$/年、費用推定上限：1,600 US\$/年
- .2 削減ポテンシャル：0.1～4%
- .3 航路選択に自由度を持つ外洋航行船舶に適用される。フェリー及びクルーズ船には適用されない。

表 A4-28 ウェザールーティングによる概算の費用効果及び最大削減ポテンシャル
(バンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	-130	-100	1.2	0.10%
	High reduction potential	-165	-160	46	3.70%

自動操舵装置の性能向上及び調整

表 A4-29 自動操舵装置の性能向上及び調整による概算の費用効果及び最大削減ポテンシャル
(バンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	-140	-140	5.4	0.40%
	High reduction potential	-160	-160	31.9	2.50%

主エンジン改装対策

コモンレール改善

表 A4-30 コモンレール改善による概算の費用効果及び最大削減ポテンシャル
(バンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	25	45	1.1	0.10%
	High reduction potential	-125	-120	5.3	0.40%

主エンジンのチューニング

表 A4-31 主エンジンのチューニングによる概算の費用効果及び最大削減ポテンシャル
(バンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	405	470	1.0	0.10%
	High reduction potential	-90	-85	7.8	0.60%

船体改造による性能向上

サイドスラスト開口部 (流れの最適化、グリッド)

表 A4-32 サイドスラスト開口部の改善による概算の費用効果及び最大削減ポテンシャル
(バンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	-145	-140	10.7	0.9%
	High reduction potential	-160	-160	53.1	4.2%

補助システム

省エネルギー型低発熱照明

表 A4-33 省エネルギー型低発熱照明による概算の費用効果及び最大削減ポテンシャル
(バンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	385	440	0.1	0.0%
	High reduction potential	-95	-85	0.6	0.0%

ポンプ及びファンの回転数制御

表 A4-34 ポンプ及びファンの回転数制御による概算の費用効果及び最大削減ポテンシャル
(バンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	210	250	2.1	0.2%
	High reduction potential	-90	-80	10.6	0.8%

出力管理

表 A4-31 出力管理による概算の費用効果及び最大削減ポテンシャル
(バンカー燃料価格：500 US\$/ton、金利 4%)

		Cost efficiency (US \$/tonne CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	% of total emissions
2020	Low reduction potential	100	130	0.1	0.0%
	High reduction potential	-130	-125	0.7	0.1%

参考文献

- 1 AEA (2008), Greenhouse gas emissions from shipping: trends, projections and abatement potential, Final report.
- 2 Corbett, J.J., Wang, C. and Firestone, J. (2006), Estimation, Validation, and Forecasts of Regional Commercial Vessel Inventories, Tasks 1 and 2: Baseline Inventory and Ports Comparison, Final Report.
- 3 De Nederlandsche Bank, Rendement 10-jaars staatsleningen eurogebied, VS en Japan, <http://www.statistics.dnb.nl/index.cgi?lang=nl&todo=Rentes>, (Accessed: 15 December 2008).
- 4 Frey, H.C. and Kuo, P.-Y. (2007) Best practices guidebook for greenhouse gas reductions in freight transportation. Report prepared for U.S. Department of Transportation.
- 5 IMO (2008), Updated Study on Greenhouse Gas Emissions from Ships, Phase 1 Report, 1st September 2008.
- 6 UNCTAD (2008), Review of Maritime Transport.
- 7 Wärtsilä (2008), Boosting energy efficiency, Energy efficiency catalogue.