

2008年度

コンテナ船の環境性能技術鑑定サービス業務の開発
－実海域性能評価指標 (海の10モード)の研究－

報 告 書



2009年3月

財団法人 日本船舶技術研究協会

緒言

2007年度からスタートした本研究は(財)日本船舶技術研究協会(以下船技協と略)が、(財)日本海事協会(以下NKと略)の委託を受け、研究期間 2 年間の計画で「コンテナ船の環境性能技術鑑定サービス業務の開発」として(独)海上技術安全研究所(以下海技研と略)、他関係機関の協力を得て行ったものである。

本研究は、現在官民あげて進めている実海域性能評価指標の研究(海の 10 モードの研究)の根幹をなすものであり、この研究の成果をベースに従来から造船業界に於いて研究されてきた耐航性能に関する技術、および海運業界において蓄積されてきた運航に関する知見、そして新たに海技研が行ってきた同研究の成果の提供を受け、本研究においてこれらを含む新たな実用的な指標を構築するものである。

これにより平水中のみならず、実海域での性能に優れた船舶の計画、建造の推進指標となり、また実海域でのよりの確かな性能把握を可能とし、運航経済性の向上に役に立つものと期待される。

さらに、これらの成果はNKの環境性能技術鑑定サービス業務として新たな認証システムの中に組み込まれ、客観的に定量評価できる第 3 者認証の指標として広く活用される計画である。

また地球温暖化防止のための国際的取り組みの中で、国際海運からの CO₂ 排出削減が緊急の課題として IMO 等で審議されている。これに日本政府からも CO₂ 排出量を算定するデザインインデックスを提案する等の積極的な取り組みをしている。

2007 年度から続けてきた本研究の成果はこうした国際的な動きにも貢献できるものと思われる。

1. 目的

燃料油価格の高騰を背景として、計画段階において、風、波、潮流の共存する「実海域」で船舶の性能を把握し、当該性能の優れた船舶を建造、運航することによって、一層の燃費向上を図りたいという極めて強い海運会社のニーズが存在していた。しかしながら、船舶性能は、通常、平水中での評価を基本とし、実海域での船舶性能については統一的に評価する仕組みがないのが現状であった。

他方、「より性能の良い船舶の普及を通じた環境保全の推進」を図る国の政策展開の中で、効果的なインセンティブスキームを構築していく上では、その目安となる性能指標が不可欠であった。

このため、自動車の「10モード燃費」のように、決められた条件下での船舶性能を客観的に明示可能とする統一的な評価指標を策定し、計画段階で、実海域における船舶性能が客観的かつ統一的に評価できる枠組みを構築することを目標とした。

2. 目標

本研究においては、目標を下記のように定めた。

①船舶の実海域における性能を評価する

「シンプルな性能評価指標(海の10モード性能評価指標)」を確立する。

②水槽試験の結果とシミュレーション計算により、計画段階で(建造前)に性能評価ができる手法を確立する。

3. 研究の内容及び成果

3. 1. 指標が必要とする要件

1) ニーズへの対応

実海域性能を建造前に予測し、燃費性能の精度を向上させ、指標を利用して経済的な運航を計画すること。また海上輸送量が増大する中で、海上輸送量が増大する以上、トンマイルあたり CO₂ 排出量を省エネ技術によって削減すること。指標はこれらのニーズに応えなくてはならない。

2) 分かり易さ

指標は分かり易いということも重要である。船社が自社運航船を評価する場合に日常的に使用されている基準に基づいているとか、同一速力におけるシーマージン評価とか、実際に利用されている評価技術に即した指標が好ましい。

3) 必要とされる精度

指標の目的は実海域における燃費性能を正確に表現することにある。そのためには水面下の船型はもちろん、水面上の形状、主機の特性、風圧抵抗などを正しく評価する必要がある。

就航中の 2 隻のコンテナ船の燃費性能を比較したところ、主要目も主機もほとんど同じであるにも関わらず、実海域の燃費性能が 10% 近く異なる例がある。一方で、試運転等で比較的環境が良い海域でも同一馬力における速力誤差は 0.1 ノット程度と考えられる。従って狙うべき燃費指標も、それに近い数値が望ましい。

3. 2. 指標「海の 10 モード」

1) 船の状態

計画満載喫水、主機出力は常用出力一定で、針路を一定に保持し定常航行している状態とし、海潮流の影響は、考慮しない。

2) 設定海象モード

計算を実施する設定海象モードは、表 1. に示す BF0 と BF3 から BF7 までの全方位平均と正面向かい波、風(0 方位)の 10 モードである。

表1. 計算対象とする海象モード

	平均風速 $U_{wind}(m/s)$	平均風向, 主波向 $\gamma, \theta (deg)$	有義波高 $H(m)$	平均波周期 $T(s)$
BF0	0	-	0	-
BF3	4.4	全方位, 0方位	0.6	3.0
BF4	6.9	全方位, 0方位	1.0	3.9
BF5	9.8	全方位, 0方位	2.0	5.5
BF6	12.6	全方位, 0方位	3.0	6.7
BF7	15.7	全方位, 0方位	4.0	7.7

3) 指標の計算方法

指標は水槽試験と理論計算のハイブリッド法に基づいて算出されるが、必要な試験を正面規則波による抵抗増加試験だけで可能とするのが最大の特徴である。

コンテナ船のような痩せ型高速船になると、運動が小さい短波長領域においては、抵抗増加量の計算値が試験を大幅に下回る場合がある。正面規則波中の試験を行うことで、このような欠点を補うことが出来ると考えている。

4) 検討対象コンテナ船

燃費指標を検討するために就航中の大型コンテナ船を想定した模型線図を作成し、種々の水槽試験や理論計算を行った。図 2. は横軸をコンテナ数とした場合の船長と船幅を示した図であり、今後パナマ運河が拡張された際には主力船隊になると予想されるのポストパナマックス型コンテナ(垂線間長 300m、6500TEU: 図中の丸印)を選んだ。図中の丸印の垂線間長 300mのオーバーパナマックス型コンテナ船(6500TEU)を対象船として選んだ。

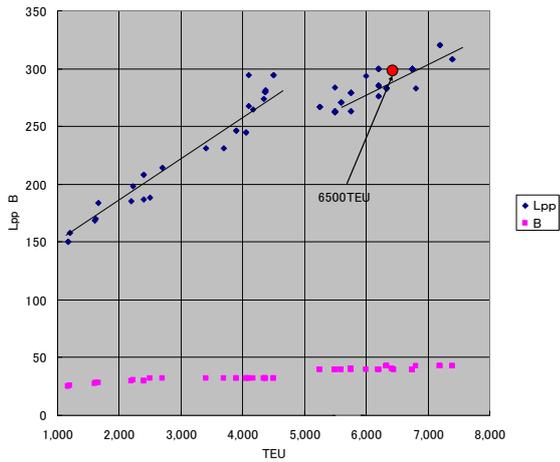


図 2. 要目選定根拠

5) 平水中性能

抵抗自航試験は、その実施を(財)日本造船技術センター(以降 SRC と略す)へ委託し、国内で実施される他のコンテナ船などと解析方法も含め同一の精度レベルで実施した。プロペラ特性は自航試験を実施して得られた自航要素を基にあらたにプロペラ設計を実施し、その実船推定特性を用いた。SRC の標準的な解析法に基づいて算出された馬力計算結果を図 3. に示す。

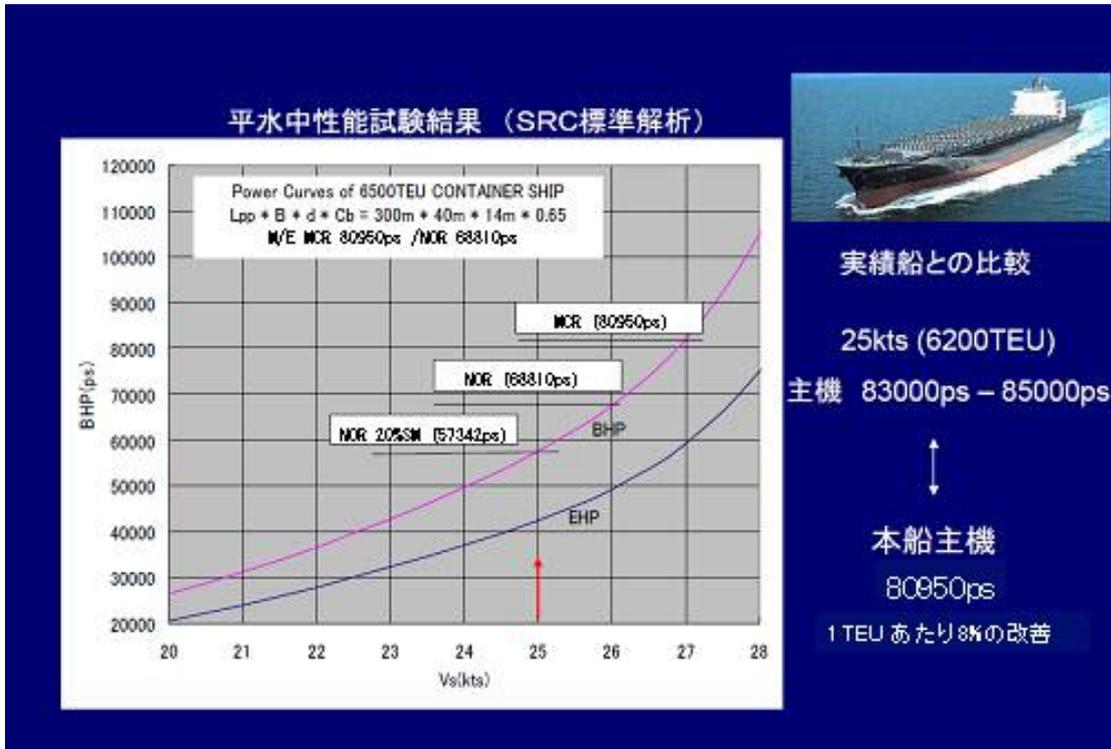


図 3. 平水中試験に基づく馬力曲線

3. 3. 試験値を利用したハイブリッド計算法

実海域での船舶性能を評価するため速力低下を対象に理論計算法の開発を行った。理論計算法では中高速船の短波長域での抵抗増加の推定精度が不十分である点を踏まえ、波浪中水槽試験

によるデータ取得を行い、これを理論計算法に組み込むことで、精度の向上を図った。
 ハイブリッド計算法の開発にあたっては、波浪中水槽試験のコストと評価に必要な精度とのバランスをとり、1 短波長の規則波中の抵抗試験を複数の速度で行うこととした。また波浪中試験を理論計算法に組み込むことにより、現在の理論では評価が困難な波浪中抵抗増加に対する水面上形状の影響を導入することが容易に可能となった。

1) 速力低下量の算定法

通常行われている平水中の主機馬力-速力の算定手順に、設定海象から定まる波による力、風による力、斜航による力、当舵による力を外力として加え、プロペラ回転数、斜航角、舵角が釣り合う状態を数値的に求め、その状態の主機馬力-速力を算定する。そして、主機馬力が常用馬力となる速力(V_w)を求め、それから同様に求めた平水中速力(V_{ref})との差をとり、速力低下量(ΔV)を算定する。速力低下量の算定手順の流れ図を図 4. に示す。

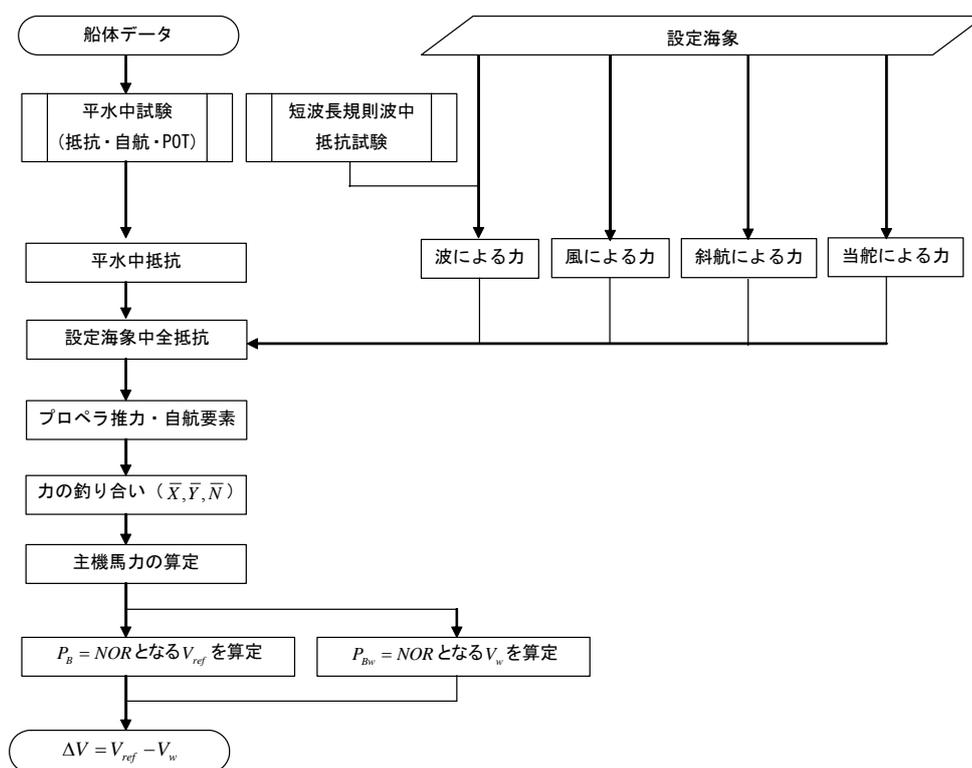


図4. 速力低下量算定の流れ図

2) 馬力と速力低下の関係

図 5. に示す平水中の主機馬力-速力関係において、設定する主機の制動馬力 (P)と一致する速力を V_{ref} とする。設定海象下の主機馬力-速力関係において、上記と同じ主機の制動馬力(P)と一致する速力を V_w とする。速力は、水深が充分あり、計画満載喫水、主機馬力は常用馬力一定で、針路を一定に保持し、定常航行している状態の値である。

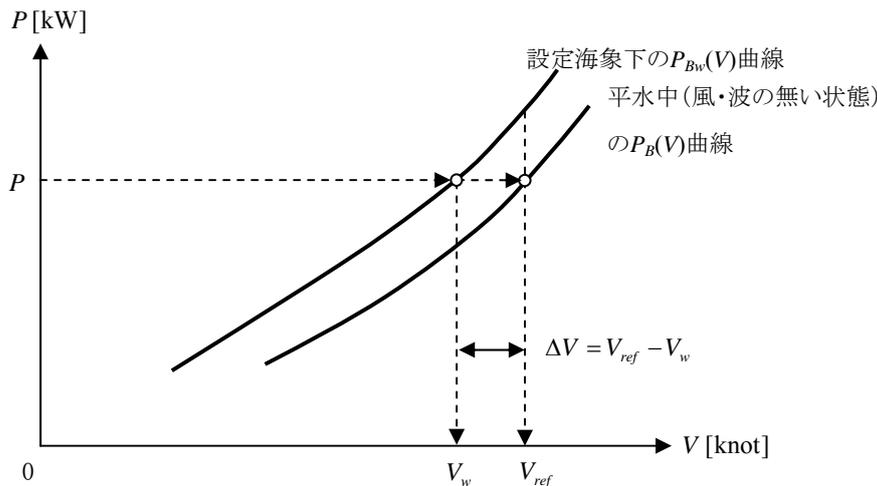


図5. 馬力と速力低下量の関係

設定海象中での速力低下量 (ΔV) は、次式により算定する。

$$\Delta V = V_{ref} - V_w$$

ただし、 $P_{Bw}(V_w) = P_B(V_{ref})$

3) 短波長規則波中の水槽試験

ハイブリッド計算法では、これまでコンテナ船等の中高速船にとって推定精度が不十分であった短波長域の規則波中で水槽試験を行い、その結果を計算法に取り入れ、計算精度向上を計っていることに特徴がある。

短波長域での抵抗増加は反射波抵抗増加が主であることから、短波長域の試験波長 ($0.5 L_{pp}$ 以下とする。 L_{pp} は垂線間長。) の 1 つに対して水槽試験を行う。また、試験速度は、設定された海象条件下で算出される速力を包含するフルード数の範囲から 3 種類以上の速力で行う。試験波高は、実船スケールで 3m に相当する規則波の値とする。ただし、模型や試験設備の制約等により上限又は下限として波高船長比 1/100 まで波高を調整できる。

4) 短波長規則波中の水槽試験から反射波抵抗増加の速度影響係数の算出

反射波抵抗増加の速度影響係数 (C_U) は、水槽試験により計測された規則波中抵抗増加値 (R_{wave}^{EXP}) と、計算される運動に基づく波浪中抵抗増加 (R_{wm}) を用い、次式により速度影響を試験速度毎に求める。

$$C_U F_n = \frac{R_{wave}^{EXP}(F_n) - R_{wm}(F_n)}{\frac{1}{2} \rho g \zeta_a^2 B B_f \alpha_d} - 1$$

ここで、 ρ : 流体密度、 g : 重力加速度、 ζ_a : 入射波の振幅、 B : 船幅、 B_f : ブラントネス係数、 α_d : 喫水周波数影響係数である。

複数の速度で水槽試験を行い得られた $C_U F_n$ について、フルード数 (F_n) に対する最小2乗法により、速度影響係数 (C_U) を原点を通る直線の傾きとして求める (図 6. 参照)。ただし、各フルード数で複数回試験を行った場合は、その計測値を平均して得られた $C_U F_n$ の値を用いる。

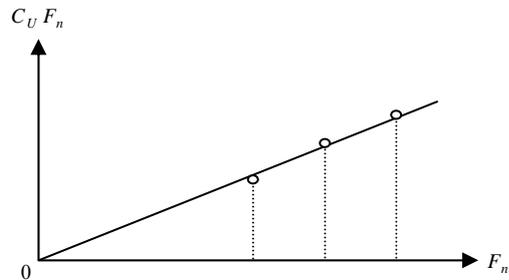


図 6. 反射波抵抗増加の速度影響とフルード数の関係

5) 計算結果例

船長 300m のコンテナ船を対象に、ハイブリッド計算法で向波規則波中抵抗増加を算定した結果を図 7. に示す。これから、フルード数を変えた場合でも精度良く計算されていることが分かる。

次に、ハイブリッド計算法により海の 10 モード指標を算定した結果を表 2. に示す。

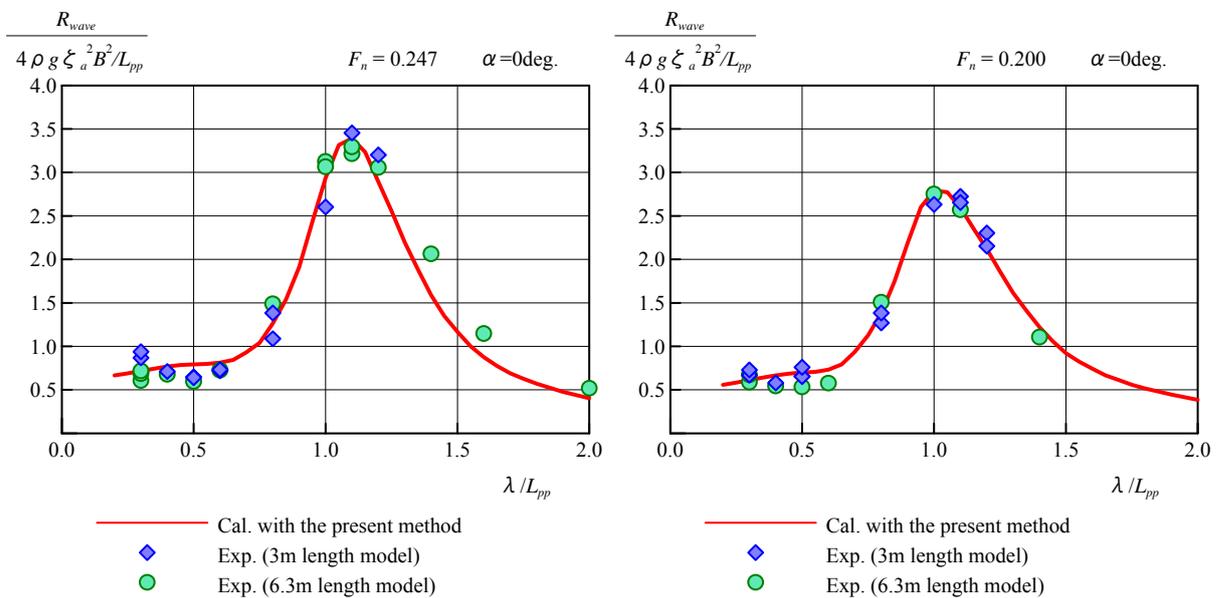


図 7. コンテナ船の向波規則波中抵抗増加 (左; $F_n = 0.247$ 、右; $F_n = 0.200$)

表 2. 海の 10 モード指標

weather	ship speed [knot]
BF0	25.88

weather	direction [deg.]	decrease of ship speed [knot]
BF3	0	0.20
BF4	0	0.36
BF5	0	0.73
BF6	0	1.31
BF7	0	2.35

weather	direction [deg.]	decrease of ship speed [knot]
BF3	average	0.07
BF4	average	0.13
BF5	average	0.28
BF6	average	0.53
BF7	average	0.98

指標の表記は仕様書等での速力表示の慣例から下 1 桁までとするのを標準とするが、必要があれば表 2. のように下 2 桁まで表示することができる。

6) ハイブリッド計算法の比較計算

ハイブリッド計算法の開発にあたり、計算精度の検証を行うため、船長 300m のコンテナ船を対象に BF6 向風・向波での船速低下について、標準プログラム(名称:SPICA)と各機関で保有するプログラムとの比較を行った。その結果を表 3. に示す。

その結果、ハイブリッド計算法の標準プログラムに対し

- (1) 水槽試験により短波長域の抵抗増加量の修正を行わない計算(以下 No correction という)により船速低下量を算定した結果、船速低下率($\Delta V/V_{ref}$)で約 1%の差が生じること。
- (2) ハイブリッド計算法に従い各機関で船速低下量の算定を行った場合、船速低下率($\Delta V/V_{ref}$)の違いは±0.5%以下程度であること。

以上の検討から、有効とされる精度は、BF6 向風・向波での船速低下率($\Delta V/V_{ref}$)の差が±0.5% (約 0.1knot)以内であることが示された。

表 3. 船速低下計算結果(BF6 向風・向波)

名称	SPICA	I	II	III		IV	V	No correction
λ / L_{pp} (試験点)	0.3	0.5	0.3	0.3	0.5	0.3	0.3, 0.5 (平均)	-
V_{ref} [knot]	25.88	25.88	25.88	25.88	25.88	25.88	25.86	25.88
V_w [knot]	24.57	24.58	24.56	24.59	24.66	24.57	24.58	24.84
$\Delta V = V_{ref} - V_w$ [knot]	1.31	1.30	1.31	1.29	1.22	1.31	1.28	1.03
$ \Delta V - \Delta V^{SPICA} $ [knot]	-	0.01	0.01	0.02	0.09	0.00	0.03	0.28
$\frac{ \Delta V - \Delta V^{SPICA} }{V_{ref}^{SPICA}}$	-	0.0%	0.0%	0.1%	0.4%	0.0%	0.1%	1.1%

V_{ref} : BF0 での速力、 V_{ref}^{SPICA} : 標準プログラム(SPICA)により計算された BF0 での速力

V_w : BF6(向風・向波)での速力

ΔV : 速力低下、 ΔV^{SPICA} : 標準プログラム(SPICA)により計算された速力低下

3. 4. 水槽試験法

1) 全般

対象コンテナ船の平水中・波浪中性能を把握するため、また、水槽試験法を検討するために H19 年度は 1 年間に渡って海技研内の 3 水槽を使用し、以下の試験を実施した。

- 6.3m 模型での抵抗・自航試験・波浪中抵抗増加試験
- 6.3m 模型の風・波中自由航走試験
- 3m 模型の波浪中抵抗増加試験
- 3m 模型の斜波中抵抗増加試験

さらに H20 年度では、水槽試験法の内容を検討するために、長水槽を有する国内 6 機関で同一コンテナ船模型(6.3m)を使用し、波浪中抵抗増加に関する比較水槽試験を実施した。

2) 波浪中抵抗増加試験

実海域の性能鑑定ガイドラインで必要と位置づけられる短波長域の波浪中抵抗増加試験の結果を図 9、図 10. に示す。2 種類の試験装置(平水中用と波浪中用)を用い、装置の違いから生じる結果への差違や波高影響について検討した。 σ_{Aw} は波浪中抵抗増加の無次元値である。

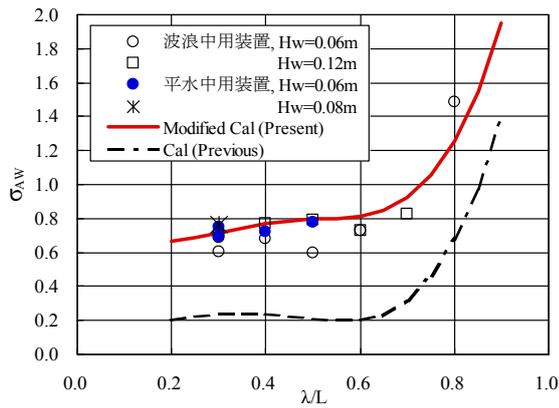


図 9. 抵抗増加試験結果
(λ/L ベース, $Fn=0.247$)

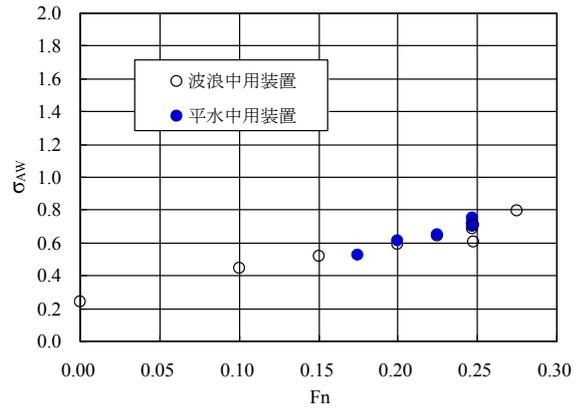


図 10. 抵抗増加試験結果
(Fn ベース, $\lambda/L=0.3$, $Hw=0.06m$)

従来の計算による結果(図中, Previous)は試験値と必ずしも一致しないことが確認されたため、性能鑑定ガイドラインでは、短波長域の計算値を補正した上(本会で示した方法による結果を図 9. 中, Present として示す。)、速力低下量の計算に使用することとした。

3) 風・波中自由航走試験

実海域での性能鑑定ガイドラインで示される計算方法の妥当性を確認するための一助として、風・波併存下での自由航走模型試験を実施し、船の速力低下量や斜航状態といった一定外乱下での航行状況を調べることにした。対象は本プロジェクトの供試船である満載状態の大型コンテナ船であり、試験を海技研の 400m 水槽で実施した。

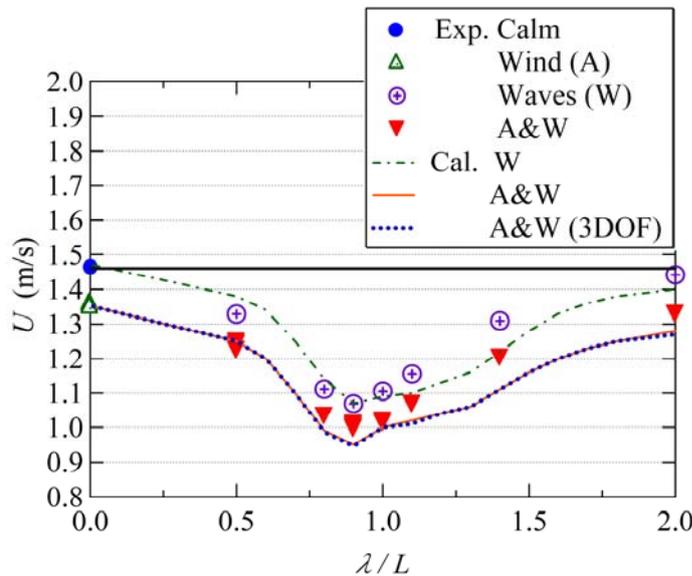


図 11. 風・波併存下での速力に関する試験値と計算値の比較

一例として速力に関する試験値と計算値の比較を図 11 に示す。試験値と計算値は概ね良好に一致している。

限られた条件下ではあるが、自由航走模型試験を通じて、風・波中でのコンテナ船の航行状態を明

らかにした。また、航行状態の推定計算を実施し、計算方法の妥当性を確認した。

4) 比較水槽試験

性能鑑定ガイドライン内に示されている波浪中抵抗増加試験を実施する上で困難さがないか、また、同程度の試験結果が得られるかどうかについて比較水槽試験を通じて確認することとした。本調査には、曳航試験水槽を有する国内の6試験機関が参加した。

波浪中抵抗増加の試験結果を使用し、性能鑑定ガイドラインに沿って速力低下量を計算した結果を図12、図13. に示す。試験機関ごとの結果の差は小さいことが確認できた。

これらの結果から、性能鑑定ガイドラインに示されている試験方法で問題が無いことを確認すると共に、水槽試験の実行を通じて後述する波浪中水槽試験の技術的留意点の検討に役立てた。

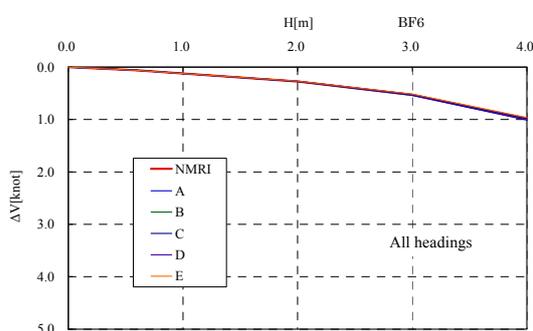


図12. 各試験機関で得られた試験データから求めた船速低下量(全方向平均)

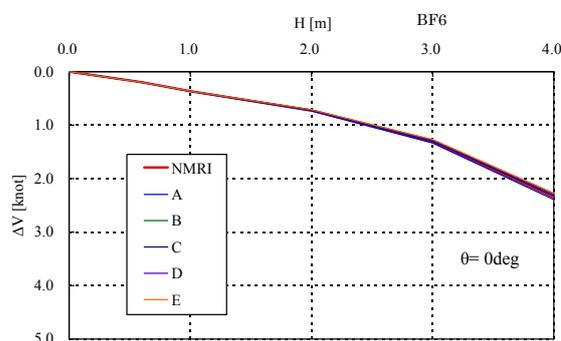


図13. 各試験機関で得られた試験データから求めた船速低下量(正面向風・波)

5) 水槽試験法

比較水槽試験の結果、船の状態、波の状態、計測・解析等、水槽試験を実施する上で留意すべき事項を取りまとめた。

性能鑑定ガイドラインで必要となる具体的な水槽試験内容は、ガイドライン内に記載した。

3. 5. 実船計測による検証

1) 対象船舶の選定

対象とする船舶はコンテナ船を対象とすることが適当であるが、信頼できるデータを得るための計測機器等を装備していることが必要となるため、コンテナ船以外も検討対象とすることとした。その結果、コンテナ船と船型等が大きく異ならないと考えられる自動車専用運搬船(PCC)を対象船舶として選定した。表 3. に対象船舶の主要目等と写真を示す。

表 3. 自動車専用運搬船主要目等

船種	全長	
全長(m)	199.9	
幅(m)	32.26	
計画喫水(m)	9.00	
総トン数(ton)	60320	
船級	NK	
主要航路	日本－欧州	
竣工時期	2008年10月	

2) 対象船舶選定の妥当性

コンテナ船に対して、代表的な自動車専用運搬船(PCC)、パナマックスサイズばら積み船(PXBC)の要目と計画フルード数およびブラントネス係数を表 4. に、前後風圧力係数を図 13. に、反射波に基づく抵抗増加の速度影響係数($1 + \alpha_v$)を図 15. にそれぞれ示す。いずれの比較においても、PXBCとは異なりPCCがコンテナ船と類似の傾向を示していることから、実船計測において自動車専用運搬船はコンテナ船により近い傾向の性能を示すと考えられる。

表 4. 船種と要目の比較

船種	コンテナ船	PCC	PXBC
全長 (m)	318.00	203.98	227.63
幅 (m)	40.0	32.26	32.26
計画フルード数	0.24	0.24	0.16
ブラントネス係数	0.06	0.08	0.39

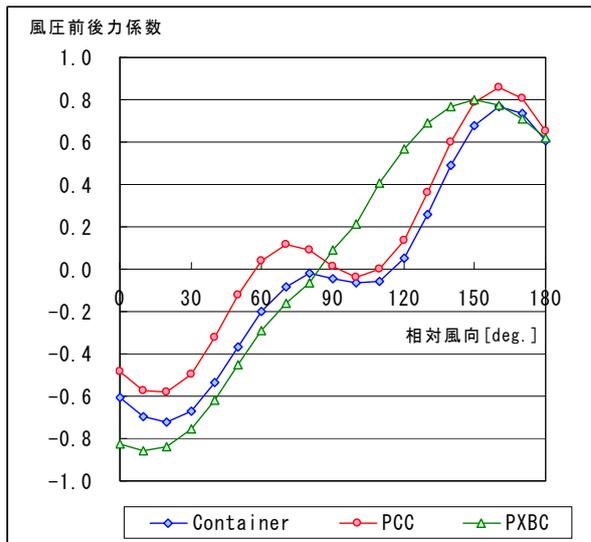


図 14. 前後風圧力係数と船種の関係

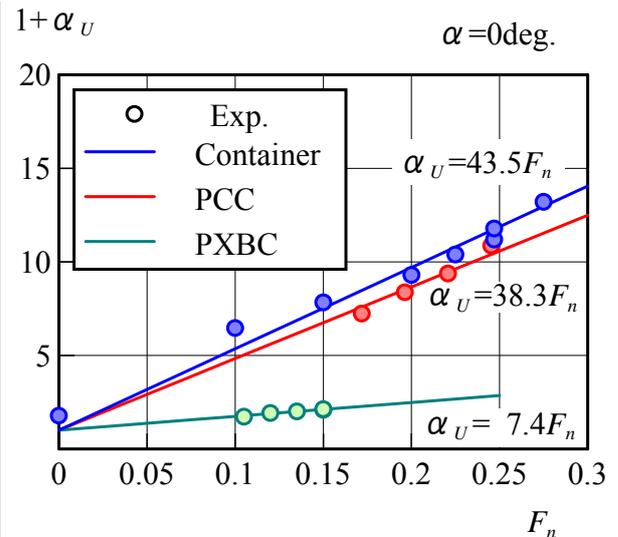


図 15. 反射波に基づく抵抗増加の速度
影響項と船種の関係

3) 計測の基本方針

計測項目は環境性能指標に直接関係する速力と燃料消費量、風向・風速のほか、これに関連する項目とした。対象船舶が装備している計測システムは長期の計測に耐える信頼性を持ち、簡素で堅牢かつ乗組員の支援を極力必要としないシステムである。

4) 計測項目と計測機器

対象船舶に装備されている計測機器からの出力を分岐して収録することを基本としており、船体運動を計測するための加速度計を内蔵したと光ファイバージャイロによる姿勢計測装置と軸馬力計、機関室温度・湿度・気圧計、レーダー式波浪計測装置が追加装備されている。主な基本計測項目と計測機器等は表 5. に示すとおりである。

このほか目視の波高等に関しても航海記録等からも情報を得ることとした。

表 5. 基本計測項目

計測項目	単位	計測機器等
日付・時刻・船位・対地速力	kt	GPS
対水速力	kt	ドップラーソナー
船首方位	deg	ジャイロコンパス
風向・風速	deg, m/s	風向風速計
船体運動(角度・角速度・加速度)	deg, deg/s, m/s ²	FOG姿勢計測装置
燃料流量・燃料温度	l, deg C.	流量計・温度計
軸馬力・回転数	kW, RPM	軸馬力計
機関室温度・湿度・気圧	deg C., %, hPa	機関室温度湿度気圧計
有義波高・平均波向き・平均波周期	m, deg, s	レーダー式波浪計測装置

5)実船計測結果の解析と評価

データ計測および解析対象の期間は2008年9月29日から同年12月18日までの名古屋ーヨーロッパ1往復とその後の名古屋ーシンガポール間である。計測単位は毎正時からの30分間である。外洋航行時や機器の状態等を考慮した有効計測点数は約1400点となった。陸上監視システムで取得したこの間の航跡を図16に示す。

主なデータとして対水船速と真風速の時系列を図17と図18に示す。真風速は見掛けの風向風速対地船速等からの換算値である。真風速と有義波高の関係を図19に、波向きと真風向の関係を図2にそれぞれ示す。図19中の△は表1の海象モードを表す。波向きと風向きは船首方向を0度とする相対方向で示した。図20の四隅と左下から右上にかけての対角線上のデータは波向きと風向きが一致している状態を表す。図の四隅と中央にデータが集中していることから、正面向波・正面向風状態と追波・追風状態が多いことがわかる。

有義波高の計測値に関してレーダー式波浪計測装置(Radar)と船首相対波高計(Level gauge at bow)、船員の目視記録(Visual)、波浪推算データ(気象予報; Forecast)とを比較した。図21に比較結果を示す。目視記録はある幅を持って階級分けされている中央値を取って図に示したため不連続な値をとる。有義波高に関する4つの計測値がほぼ同じ傾向を示していることからレーダー式波浪計測装置で得られる波浪情報はおおむね妥当なデータであると考えられる。

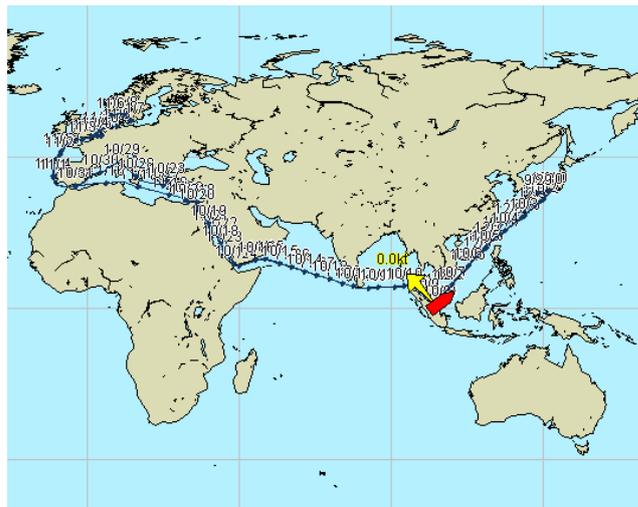


図16 対象船航路記録

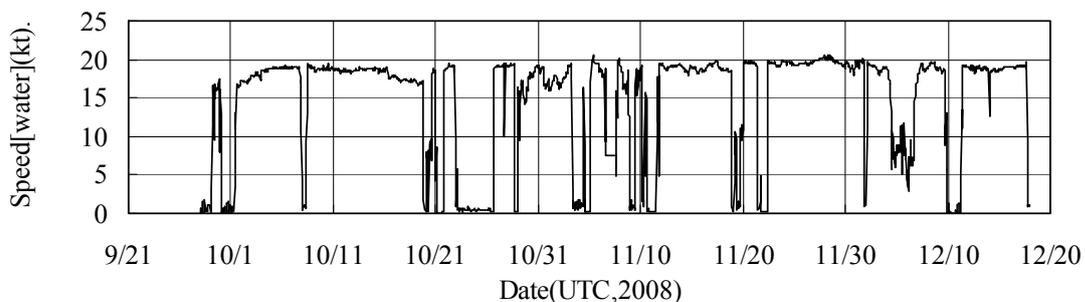


図17 対水速力

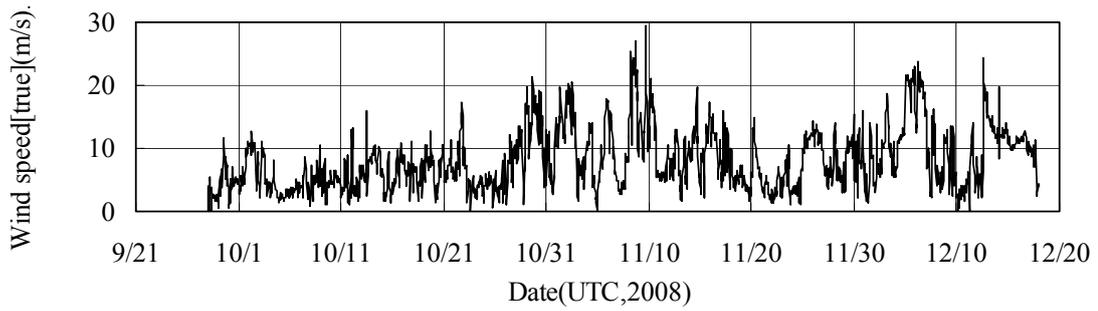


図18 真風速

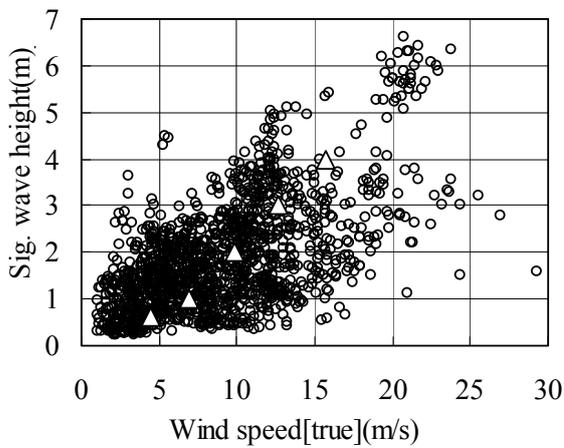


図19 真風速と有義波高の関係

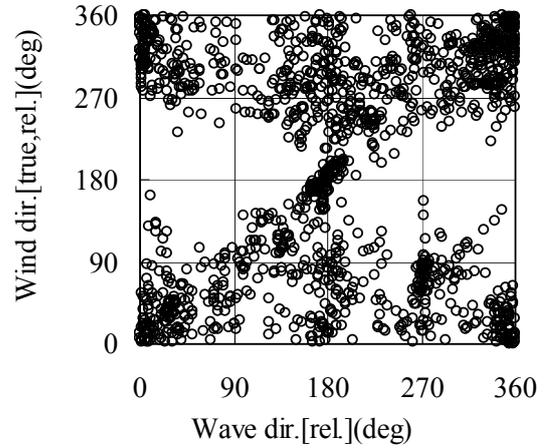


図20 波向き(相対)と真風向(相対)の関係

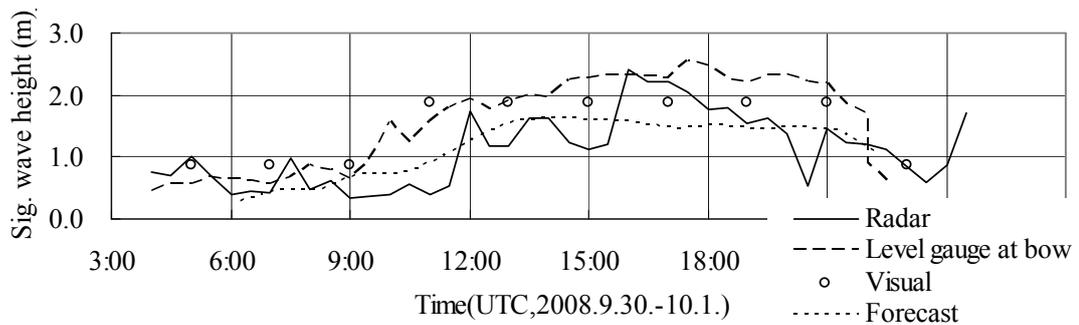


図21 有義波高の比較 (Radar:レーダー式波浪計測装置,

Level gauge at bow: 船首相対波高計, Visual: 船員目視波高, Forecast: 気象予報)

6) 計測データの解析結果と計算結果との比較検討

速力低下に関する計測データの解析結果と計算結果の比較検討をおこなった。平水時の速力は平穏な海象下での1往復半航行時の計測データの解析から求めた。速力低下の解析は軸馬力一定下の計測データを抽出しておこなった。その際の軸馬力は平水時速力を求めた計測時の軸馬力計測値とし、この値を中心に±5%の範囲に入る計測データとした。基準となる平水時の速力を V_0 、軸馬力を P_0 、推定排水量を W_r とし、任意の計測単位の対水速力計測値を V_m 、軸馬力計測値を P_m 、推定排

水量を W_m としたとき、次式で速力低下 δV_m を求めた。

$$\delta V_m = V_m - V_0 \left(\frac{P_m}{P_r} \right)^{1/3} \left(\frac{W_m}{W_r} \right)^{-2/9}$$

比較にあたっては正面向波・正面向風と斜め向波・斜め向風、横波・横風、斜め追波・斜め追風、追波・追風の各5状態に対応する計測単位を抽出して計算結果と比較することとした。図22に正面向波・正面向風状態の例を示す。ハイブリッド計算法による計算結果は計測データを用いた速力低下の解析結果と良い対応を示している。

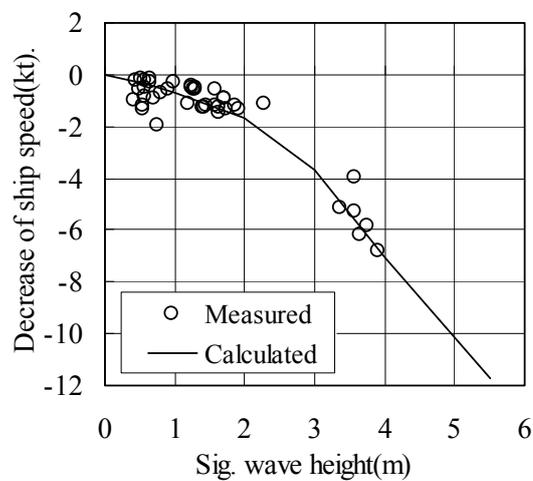


図22 正面向波・正面向風状態における有義波高と速力低下の関係

3. 6. 鑑定ガイドライン

鑑定ガイドラインはNKによる認証が実施される時にNKより発行される予定である。以下に現状での概要を示すが、詳細はNKより発行される正文に従うこと。

1) 目的及び適用

- ①鑑定ガイドラインは、風・波浪のある海象下でのコンテナ船の推進性能を評価するため、平水中速力(BF0)と下記に定める設定海象(BF3～7)における速力との速力差を求め、波浪中での性能評価指標(海の10モード指標)を算出する方法を提供する。
- ②鑑定ガイドラインは、平水中における船体抵抗、制動馬力が各水槽で標準的な方法に従い行われている水槽試験又はこれと同等の精度を有する手法で推定される全長150m以上のコンテナ船に適用される。
- ③鑑定ガイドラインは、NKが推奨する理論計算と水槽試験を組み合わせた実用的なハイブリッド計算法を基本としている。この中で定める規則波中抵抗試験は、反射波による抵抗増加が主な成分となる短波長域において、1つの短波長での試験として複数の速度で行うものであり、平水中における通常の水槽試験(抵抗、自航試験)に引き続いて行うことを原則とする。
- ④この他の水槽試験法または計算法で行う場合には、個別に審査して認めることができる。
- ⑤鑑定ガイドラインに沿って作成された実海域の性能評価指標を「海の10モード指標」と称すること。

2) 船舶の状態

- ①計画満載喫水、主機馬力は常用馬力一定で、針路一定に保持し、定常航行の状態
- ②海潮流の影響は考慮しない

3) 設定海象条件

設定海象条件は前記の表1.に示すと通りの平水中と風・波浪中の10モードとする。

- ①速力低下量は各風向・主波向での速力低下量(knots)の全方位にわたる平均値及び向風・向波での値とする。
- ②平均風向と主波向は同一方向とし、また全方位から同じ確率で吹くものとする。
- ③風は平均風速の定常風とする。
- ④波浪は不規則波とし有義波高と平均波周期は表に定める値とする。
- ⑤波の方向スペクトラムは周波数スペクトラムと方向分布関数に分けられるものとする。

4) 算定方法

鑑定ガイドラインの風・波浪中における速力低下算定方法は、NKが推奨する理論計算と波浪中水槽試験を組み合わせたハイブリッド計算法に基づいている。

速力低下量の算定にあたっては、鑑定プログラムはNKより提供される海技研が開発した鑑定プログラム「SPICA」を用いる。ただし、NKが提供する鑑定プログラム以外のプログラムについても、NKが指定するタイプシップに対して提供プログラムとの比較計算を行い、十分な精度を有することが示された場合には、使用することができる。

また鑑定プログラムに代えて、この他の水槽試験法又は計算法を採用すること、若しくは鑑定ガイド

ラインの算定式に代えて水槽および風洞試験等の試験結果を採用することができる。

①平水中全抵抗

- ・平水中全抵抗は平水中抵抗試験により求める。

②設定海象中で働く力及びモーメント

- ・全抵抗は平水中全抵抗に風による抵抗増加、波による抵抗増加、斜航抵抗及び当舵抵抗を加えて求める。
- ・横力及び回頭モーメントはそれぞれ風による横力、モーメント、斜航による横力、モーメント及び舵による横力、モーメントを加えて求める。
- ・船の進行方向に働く力及びモーメントの釣り合い状態から、船の進行方向の速力を求める。

③風による抵抗増加

風による抵抗増加、横力及びモーメントは、平均風速、平均風向に対し算定する。

④波による抵抗増加

- ・波による抵抗増加は波の方向スペクトラムと規則波中抵抗増加の周波数応答関数の線形重ね合わせにより算定する。
- ・規則波中抵抗増加は計算により求められた船体運動による規則波中抵抗増加に、試験値により補正された計算による反射波による規則波中抵抗増加を加えて求める。
- ・船体運動による規則波中抵抗増加は、算式により求める。
- ・反射波による規則波中抵抗増加は、算式により求める。
- ・速度影響係数は向波での規則波中抵抗増加試験から求める。
- ・速度影響係数は水槽試験により計測された規則波中抵抗増加値と、運動に基づく波浪中抵抗増加を用い、算式により速度影響を試験速度毎に求める。

⑤斜航による抵抗増加

- ・斜航による抵抗増加、横力及びモーメントは算式により算定する。

⑥当舵による抵抗増加

- ・当舵による抵抗増加、横力及びモーメントは算式により算定する。

4. 総括

1) 研究を取り巻く国内外の状況

船舶の燃費性能に関する研究は船舶に蒸気機関を搭載した当時から行われている古くて新しい問題である。特に二度の石油ショック以降は採算性の厳しい要求から様々な努力が払われ、大幅な燃費改善が行われた。また、最近では地球温暖化防止の観点から二酸化炭素排出量の削減に直結する燃費性能の向上が求められている。



従来、船舶の燃費改善の努力の多くは平水中燃費性能改善が中心であった。しかし、近年では平水中のみならず実海域、すなわち実際の運航では避けられない波や風の中での燃費についても改善の要求が高まっている。これらの要求に対し、SR208やSR244などの研究がおこなわれ、実海域中での船舶の性能評価法がある程度確立された。また、国内造船所では実海域中での性能向上を狙った船型の開発も行われるようになった。一方、船舶を運航する側でも実海域

で性能の良い船を購入したいという要望は潜在的に存在した。しかし、船舶の商習慣では船舶性能は試運転時に計測され、その際に得られた数値によって船主側の要求性能を満たしているかどうか判定されるため、実航海時における性能の評価が難しいことが指摘されてきた。

本研究では船級協会による認証という形で実海域における船舶性能評価技術を鑑定し、それに基づいて設計・建造される船舶に付加価値を与えようとするものである。このような付加価値がどのように商習慣の中に取り込まれていくのかは本研究の成果が世に広まるのを待たねばならないが、実海域における船舶の性能を付加価値として商習慣の中に具体的形で反映させようという画期的試みであることは間違いない。

一方、国際的には地球温暖化の原因である地球温暖化ガスの削減に対する要望が国際世論として益々強くなってきている。この様な状況に鑑み IMO でも国際海運から排出される温暖化ガスの削減に関する議論が加速されている。2008年10月に開催されたMEPC58では本研究を基礎とした日本提案が、今後の技術的検討を要するという条件つきではあるが採択され、本研究の必要性が国際的にも認められることとなった。IMOでの議論は技術レベルの低い発展途上国で建造される船舶にも適用できる基準作りのため、本研究で開発された方法とは多少趣を異にするが、その根本精神は同じものである。

このような国内外の情勢の下で本研究は実施された。本研究の期間内では、まずトン・マイルベースで燃料消費量の最も大きいコンテナ船に焦点が当てられこれについて鑑定技術が検討された。次項からは2年間にわたって検討された鑑定技術について項目毎に成果と問題点を纏めてみたい。

2) ハイブリッド計算法

本プロジェクトにおいて核となるのがハイブリッド計算法である。現在の技術レベルでは、船首付近の 3 次元形状の影響や速力の影響を合理的に取り入れて短波長域において重要な反射波の影響による抵抗増加を推定する実用計算法は未だに確立されていない。そのため、これらの影響をなるべく少ない試験データを用いてどのように同定するのが鍵であった。

従来の研究では、低速肥大船の短波長域における修正法が良く研究されており、藤井・高橋法として知られている。この方法は静止している柱状体に働く反射波成分を理論的基礎とし、反射波成分の前進速度影響を多数の試験データから同定したものである。本研究では、基本的にはこの方法を踏襲したが、比較的高速で航走する瘦型船型であるコンテナ船に適用するため、新しい反射波成分の喫水・周波数影響と前進速度影響の表し方を用いた。特に、反射波成分の前進速度影響は、単純な直線近似でコンテナ船の運航速度の範囲をカバーできることを見出した。また、反射波成分の前進速度影響は水槽試験から同定することとしており、水面上形状の影響を考慮することとなる。加えて、前進速度影響は関数形で表現しているため、少ない試験から波浪中抵抗増加を評価することが可能となった。

一方、斜波中での抵抗増加についても水面上形状の影響と速度影響を試験データに基づいて修正しなければならないが、斜波中試験を実施することは経費的な面から現実的でないため、正面向波中の値を用いて斜波中の値が推定できないかということが課題となった。これに関しては、速度影響係数が斜波で定義されたブラントネス係数の簡単な関数としてあらわされることが見出された。この関係を用いることにより、斜波中の抵抗増加値は正面向波で行われる試験データから精度よく推定できることが確認された。

これらの成果により波浪中抵抗増加を理論計算で精度良く推定するという難問が概ね解決された。残る問題点として、船体運動によって生じる波浪中抵抗増加の推定値の修正が挙げられたが、これについては最終的な速力低下にどの程度の影響を与えるのかが調べられ、海の 10 モードとして用いられる風力階級において今回対象としている船長 150m 以上のコンテナ船では殆ど影響を与えないことが確認された。

波浪中抵抗増加の推定の他に、風波の影響により船が斜航する際の抵抗増加についても理論的計算法が検討された。これには、従来の操縦性方程式(MMG モデル)を一部改善した新しい理論計算手法を提案した。しかし、計算結果によると斜航による抵抗増加値は最終的な速力低下にはあまり影響を与えないことが判明した。

波浪による影響以外に風による抵抗が重要なことが指摘されているが、本研究では風による抵抗増加についても簡便な推定式を採用し評価を行った。この推定には本研究以前に海技研で開発された藤原の方法が用いられた。藤原の方法はすでに多くの風洞試験結果と比較されてその精度が確かめられているため、本研究では改めて精度確認のための特別な試験を行わなかったが、曳航水槽において実施された風波併存中での自由航走試験で本方法の有効性が確認された。

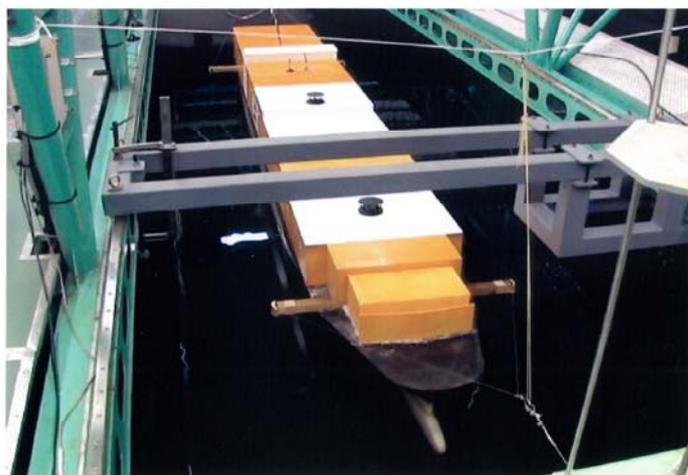
これらの成果はプログラムパッケージとして纏められ、利用者が使用し易い形の入出力ルーチンが付加された。また、本研究では成果が商習慣として広く利用されることを目指している性質上、計算時間が短いこと、誰が計算しても同じ結果が得られることを最重要視した。すなわち、ベースとなる計算法として、最新の CFD などを用いるのではなくストリップ法をベースとした比較的保守的な手法を採用した。前述の試験値とのハイブリッド法の採用により極めて完成度の高いプログラムパッケージを開発することができた。

しかし、各要素を眺めてみると、本研究によるプログラムパッケージは実海域における性能推定法を商習慣の中に取り入れるための第一歩という意味合いが強く、今後の発展に期待するところも多い。たとえば、波浪中抵抗増加推定法については、すでに水面上形状の影響なども取り入れた進んだ計算法が存在する。計算時間、計算精度の評価に今後の検討が必要であるが、それらを、バージョンアップ版として取り入れることが将来の課題であろう。

また、風による抵抗増加の推定はあくまで簡便法のため、最近各所で行われている隅切りなどによる抵抗低減は計算に反映させることはできない。このような不備は認証スキームの中で救われるように鑑定ガイドラインが設計されているため問題にはならないが、計算法としては将来に改善されるべき点であろう。

3) 水槽試験法

前節で述べたハイブリッド計算法では水槽試験結果を用いて水面上形状の影響や反射波成分の前進速度影響を同定するため、水槽試験法は計算法そのものとともに重要である。特に、商習慣として広めていくには水槽試験による費用負担の増大を避けることが大変重要である。そのため、本研究では如何に少ない試験点数で精度の良い推定が行えるのか、あるいは平水中抵抗試験装置を用いて波浪中抵抗増加を計測した場合の精度は如何なるものか、などを中心に検討をおこなった。これらのことを国内の主要な水槽で確認するため、造船各社の協力を得て、持ち回り試験を実施した。波浪中抵抗増加の計測を同一模型の持ち回りで計測した例は我が国でも初めてであり、そのような意味でも貴重な試験データを得ることができた。



これとは別に海技研では風波併存時の自由航走模型試験が実施され、風波併存時の抵抗自航要素に関する貴重なデータを得ることができた。これらのデータはハイブリッド計算法のバリデーションに供され、前節で述べた計算法の確立に大いに役立った。しかし、曳航水槽の制約から斜波中の試験は必ずしも全ての波浪条件を網羅したものではなかった。

また、風の影響についても送風機の性能上の問題から、風速分布にむらがあり、理論計算との対比において必ずしも適切とは言えない面もあった。これらの問題点は施設の能力に負うところが大きい。ため、現状では如何ともし難いが、海技研に建設中の実海域再現水槽ではこれらの問題点もある程度解決される予定であり、将来はさらに精度の高い試験が行われることが期待される。

水槽試験の結果は概ね期待どおりのものであり、ハイブリッド計算法の精度を試験的に保証するものとなった。

また、波浪中推進性能に関しては、従来の研究では S175 船型など旧式の船型で試験されたものが大多数であったが、今回は海技研オリジナル船型ではあるものの、近代的コンテナ船の特徴を取り入れた船型で試験が行われた。このような試験データを得たことは今後の計算法の進展や、実海域

における推進性能の検討に大きく貢献するものと期待できる。

一方、比較水槽試験では試験結果の再現性が一つの焦点となった。これは、ハイブリッド法の計算結果が水槽毎に異なるとは、認証スキームの在り方が大変難しくなるためである。しかし、比較水槽試験の結果からは、最終的な速力低下に及ぼす試験のばらつきの影響は精度の許容範囲内に収まるものであることが確認された。これにより、我が国の主要水槽あるいはそれと同レベルの実績を持つ水槽であれば本研究で提唱するハイブリッド計算法が全く問題なく実施できることが確かめられた。また、実績の乏しい水槽を使った結果が鑑定に持ち込まれた場合の取り扱いについては認証スキームの検討で議論された。

4) 性能評価指標の検証

性能評価指標の検証のために実船計測が計画された。実船計測は多額の費用が掛かるため、実運航に携わる船に計測装置を搭載して計測することとなった。そのため、海技研において本船搭載機器からの情報を最大限に利用する実船計測システムが開発され、2隻のPCCに搭載された。これらの実船計測からは、従来のアブログを用いた実海域性能の解析値に較べて、格段に精度の高いデータが得られた。

実船計測については、来年度以降も本研究とは別に他の船種についても実施される予定になっており、それらが全て終了した時点では実海域における船舶性能を明らかにする多数の貴重なデータが揃うものと期待される。

5) 認証スキーム

認証スキームは本研究の成果を実際の商習慣として根付かせるために大変重要であり、本研究が始まると同時に活発な議論が行われた。まず始めに、船舶の実海域性能を表す「海の10モード」とは何か議論された。「海の10モード」という言葉自体は国土交通省海事局が、実海域における船舶の性能評価指標を分かり易く説明した言葉であるが、当初は、委員の間でこの言葉に対するイメージが必ずしも一致してはいなかった。しかし、2年間のプロジェクト期間に渡る熱心な討議の末、実際の商習慣の中に根付く「海の10モード」のイメージは次第に明確にされていった。特に、ユーザーである船社と供給側の造船所の委員が同じテーブルについて議論し、イメージを共有したことは大変意義深いことであった。

これらの議論と、ハイブリッド計算法や水槽試験法の研究成果を基にして、鑑定ガイドラインが作成された。この鑑定ガイドラインの作成にあたっては、国際的に成果を拓げる意味で、海外の技術レベルが落ちる造船所からの申請も拾えるような配慮が行われた。もちろん、これには技術レベルの高い造船所の製品がそれに見合った高い評価を得られることが大前提であるので、そのような技術レベルの違いをどこで明確にするのかなどが討議された。

これらの討議の末に鑑定ガイドラインは作成された。この成果はハイブリッド計算法で使用される計算プログラムと共にNKの環境性能技術鑑定サービス業務として利用される予定である。

結語

本「実海域性能評価指標(海の10モード)の研究」は造船工学における重要な工学研究分野である耐航性能研究の一部であるとともに、これを単純なわかりやすい指標の形で表示して、運航経済性の向上と、環境影響の評価と改善のための指標とするという実用的な効果促進をねらった研究でもある。

この2面性を持つ研究を指導され、多くの多分野の関係者を束ねることにご尽力された東京大学高木教授に感謝いたします。

またこの研究の実務作業をご担当いただき、推進に多大のご努力をいただいた(独)海上技術安全研究所を始めとして、直接的あるいは間接的にご指導、ご協力いただいた国土交通省海事局、各大学、各研究機関、各関連業界団体、各企業等の多くの方々に感謝いたします。

この研究の成果を基にして、造船業界にとっては、耐航性能の「良い船」の評価の定着、建造の促進となり、また海運業界にとっては燃費の良い、即ちCO₂排出量の少ない運航促進につながることを期待します。

最後に本研究のために支援をいただいた(財)日本海事協会にお礼申し上げるとともに、今後NKの認証システムの中に組み込まれ、この「実海域の性能評価指標」が世界に先駆けてデファクトスタンダードとして実用化されようなることを期待いたします。

(財)日本船舶技術研究協会
プロジェクト事務局 一同