

ノンバラスト船の研究開発 研究成果概要報告書

平成 18 年 3 月

財団法人

日本船舶技術研究協会

「ノンバラスト船の研究開発」

は し が き

本研究開発事業は、独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構(平成 15 年 9 月 30 日までは運輸施設整備事業団)ならびに日本財団の助成事業として実施した。

平成 15、16 年度の 2 カ年は旧社団法人日本造船研究協会において「低環境負荷型外航船(グリーンシップ)の研究開発」の一環として実施してきた「ノンバラスト船の研究開発」事業を平成 17 年度に財団法人日本船舶技術研究協会が継承して実施しもので、本報告書は、平成 17 年度の事業内容も含めて 3 カ年間の研究成果概要を取りまとめたものである。

ノンバラスト船の研究開発委員会委員名簿

(敬称略、順不同、*印は出席時の所属を示す。)

委 員 長	上 田 徳	財団法人 日本海事協会
委 員	佐々木 高 幸	株式会社 アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド
	佐 藤 和 範	財団法人 日本造船技術センター -
	末 岡 英 利	三菱重工業株式会社 (*)
	武 隈 克 義	財団法人 日本造船技術センター -
	高 野 裕 文	財団法人 日本海事協会
	豊 田 宗 晴	株式会社 アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド
	原 田 秀 利	三菱重工業株式会社
	光 武 英 生	株式会社 アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド
	山 口 信 之	三菱重工業株式会社

討議参加者

池 田 陽 彦	日本造船技術センター - (*)	太 田 真	日本造船技術センター - (*)
金 井 健	日本造船技術センター -	塩 田 昭 男	日本造船技術センター - (*)
新 郷 将 司	日本造船技術センター -	時 繁 哲 治	日本海事協会
友 井 武 人	日本造船技術センター -	西 川 達 雄	日本造船技術センター -
林 竜 也	日本海事協会	福 島 寛 司	日本造船技術センター -
真 鍋 英 男	IHI マリンユナイテッド	三 宅 竜 二	日本海事協会
宮 島 省 吾	日本造船技術センター -	鷲 尾 祐 秀	日本造船技術センター -

オブザ - バ -

宮 武 宜 史	国土交通省海事局造船課	安 藤 裕 友	国土交通省海事局造船課(*)
西 山 裕 也	国土交通省海事局造船課(*)	諸 川 慎 治	国土交通省海事局造船課
大 上 圭	鉄道建設・運輸施設整備支援機構(*)	辻 村 一 郎	鉄道建設・運輸施設整備支援機構
松 本 友 宏	鉄道建設・運輸施設整備支援機構	吉 田 稔	鉄道建設・運輸施設整備支援機構(*)

事 務 局

田 中 圭	日本船舶技術研究協会	大 谷 雅 実	日本船舶技術研究協会
中 島 武 之	日本船舶技術研究協会	村 上 好 男	日本船舶技術研究協会
仁 平 一 幸	日本船舶技術研究協会		
横 山 勲	日本造船研究協会(*)	木 下 義 隆	日本造船研究協会(*)

目 次

要 約	1
1. ノンバラスト船型のコンセプト	3
2. 開発目標、予想された問題点	4
3. 船型、載貨状態	5
4. 推進性能	7
5. 波浪中船体運動	8
6. 波浪中縦曲げモ - メント	10
7. 波浪中船首船底衝撃	12
8. 波浪中抵抗増加	17
9. 操縦性能	18
10. 浅喫水対応推進システム	19
11. 船幅、満載喫水変更の検討	22
12. 試設計	23
13. 規則の適用	29
14. 経済性評価	31
15. まとめ	34

ノンバラスト船の研究開発

要 約

タンカー、バルクキャリア等の船舶が空荷状態で航行する場合、船首船底スラミングやプロペラレーシングを防止するため、バラスト水を搭載し一定の喫水を確保している。バラスト水は荷揚港で漲水され荷積港で排水されることから、他地域から船舶によって移送されてきたバラスト水中の海洋生物が排出された海域で繁殖して生態系変化、生態系破壊を引き起こしているという問題が指摘されている。

1982年の国連海洋法会議を契機として、1992年の国連環境会議から国際海事機関IMOに対して船舶のバラスト水排水に関する基準作成が要請された。IMOはこれを受け、1995年海洋環境保護委員会MEPCにおいて船舶のバラスト水管理条約新設の検討を始め、2004年2月にバラスト水の処理等に関する条約「船舶のバラスト水及び沈殿物の規制及び管理のための国際条約」を採択した。この条約に基づき、船舶には、今後、海洋生物含有量の少ない海水との洋上交換、バラスト水中生物を殺滅する処理装置設置等が義務付けられることとなった。

ノンバラスト船の研究開発は、平成15(2003)年度から、国の推進する研究開発として国土交通省主導の下、旧運輸施設整備事業団、(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構及び日本財団からの御支援も受け、(社)日本造船研究協会において研究開発が開始され、平成17(2005)年度からは(財)日本船舶技術研究協会が承継して、(財)日本造船技術センター、三菱重工業(株)、(株)アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド及び(財)日本海事協会に業務委託して進められたものである。

なお、本研究開発に先立って、(財)日本造船技術センターが、バラスト水問題に対する有効な対策の一つとして、バラスト水を搭載しなくとも空荷状態の船首船底スラミングやプロペラレーシングを防止するのに十分な喫水を確保できる船舶の設計概念“Non Ballast Water Ship(ノンバラスト船、NOBS) Concept”を考案し平成13(2001)年度から大型タンカー、バルクキャリア等を対象に研究開発を行ってきており、本研究開発は、これらの研究開発を受け継ぎ、拡大したものである。

以下に、この3カ年にわたるノンバラスト船型に関する研究開発の成果の要約を示す。

NOBSは、バラスト水を搭載せずに安全運航に必要な喫水を確保できる船型を目標としており、本研究開発では、船底傾斜船型を採用して所要喫水を確保し、これに伴う排水量減少の問題を幅広化の選択により解決した。つまり、本研究開発におけるNOBSは在来船型と比較して、船幅が広く船底傾斜の大きな横断面を有することを主な特徴としている。

事前検討の成果を踏まえ、バラスト水積載量が大きくNOBS化の効果が大きいと考えられる大型タンカー(スエズマックスタンカー及びVLCC)を対象として本研究開発を進めることとした。

本研究開発にあたっては、バラスト水の海域間移送をしないで済む船型として、バラスト水を積載

しない空荷状態(ノンバラスト状態)で在来船型の空荷状態(満載排水量の30~40%に相当するバラスト水を搭載するバラスト状態)と同等の耐航性能を有すること、及び経済性を満足することを目標とした。

これらの目標を達成するためには、載貨重量の確保と空荷状態の喫水確保の両立、船首船底スラミング対策、プロペラ没水深度確保、船首船底補強や縦曲げモーメント増加による船殻重量増大等の課題があり、これらを解決すべく本研究開発を進めた。

上記の対象船型、開発目標、予想される課題を考慮して、ノンバラスト船型のモデル船型について、平水中の推進性能、波浪荷重等に関する水槽試験、試設計等を実施し、以下の成果が確認された。

- 1) ノンバラスト船型の空荷状態の船首船底スラミング発生頻度と衝撃圧力、プロペラレーシングは、在来船型の空荷状態と同一レベルである。
- 2) 船体構造強度については、(財)日本海事協会の最新構造基準である“タンカーの構造強度に関するガイドライン(PrimeShip-Hull)”に基づいて評価を行った結果、十分な強度を保持し得る。
- 3) ノンバラスト船型の推進性能は、在来船型と比較して、満載状態では少し悪化するが、空荷状態では大幅に改善されることから、トータルで6%以上の向上を達成できる。
- 4) 操縦性能については、優れた針路安定性等、IMOの操縦性能基準を満足している。
- 5) 船体の幅広化及びこれによる縦曲げモーメント増加等のため、船体鋼材重量が増加し建造コストは相対的に増加するが、3)の推進性能向上により、これを相殺することができる。

主要寸法、船体形状及び推進装置の工夫により、これまで必要不可欠と考えられてきたバラスト水を搭載しなくとも安全に航海できるNOBSコンセプトに基づいて研究開発を行ってきたが、一連の調査研究、各種試験、試設計等を通じて、所期の開発目標を達成できた。

本研究開発は大型タンカーを対象として進めたが、一連の研究開発成果の多くは中小型タンカー、鉱石運搬船、バルクキャリア等に適用可能で、今後、これらの船型も含めて個々の航路・港湾条件に対応しつつノンバラスト船型開発を進めることが重要である。

バラスト水の処理等に関する条約に基づく詳細規定、及びこれらの規定を満足する処理装置の製品開発が実現していない現在、これらの処理装置の設置に必要なスペース、設置費用、運転費用等、不明である。他方、ノンバラスト船型は、これらの装置を装備することなく、あるいは必要最小限の容量でバラスト水移送に伴う海洋生物移動という海事産業に課せられた責務を解決する手段として有効であることから、環境に優しい全く新しい次世代型の船舶として、今後、できるだけ早くノンバラスト船型が建造され、海洋環境保全に大いに貢献することが期待される。

1 ノンバラスト船型のコンセプト

タンカーやバルクキャリア等の空荷状態においては、軽荷重量 + 燃料等のみでは軽すぎて十分な喫水が得られない問題がある。

図 1 にスエズマックスタンカーの例を示すが、バラスト水を搭載しないノンバラスト状態では船首喫水が極めて浅く、かつプロペラも半分近くが露出してしまふ。このため、

- ・船首船底に波浪による衝撃が発生する(船首船底スラミング)、
- ・プロペラが空中に露出しプロペラが空転する、かつ、波浪の山谷やそれによる船尾の上下動のためプロペラの没水深度が変化し、主機関のトルクや回転数が激しく変化する(プロペラレーシング)

という問題が発生する。そこで、従来から、空荷状態においてはバラストタンクにバラスト水を漲り安全航海に必要な喫水を確保している。図 1 に示したスエズマックスタンカーのバラスト状態の例では、約 43,000 トンのバラスト水を搭載している。



図1 在来船型 (スエズマックスタンカー)

このバラスト水は、荷揚港で漲水し荷積港で排水されることから、他海域から移送されてきたバラスト水中の海洋生物が排出された海域で繁殖して生態系変化・破壊を引き起こす、という問題が指摘されてきた。

本研究開発のノンバラスト船型は、上記のタンカーやバルクキャリアのバラスト水移送の問題を解決すべく、図 2 に示すように船体平行部においても大きな船底傾斜を設けることによって、空荷状態においてもバラスト水を漲水することなく安全航海に必要な喫水が得られる船型のことである。

このような船型では、図の塗りつぶした部分が無いので船体下部の排水量比率が小さく、小さい排水量でも比較的大きな喫水を確保することができる。しかしながら、その分、満載状態の排水量が減少することから、載貨重量も少なくなってしまう。その対策として、船の長さ、幅、満載喫水を大きくすることで載貨重量の不足分を補うことになるが、港湾事情による長さ制限、運河の通行幅からの幅制限、港湾事情、航路による喫水制限等を考慮する必要がある。

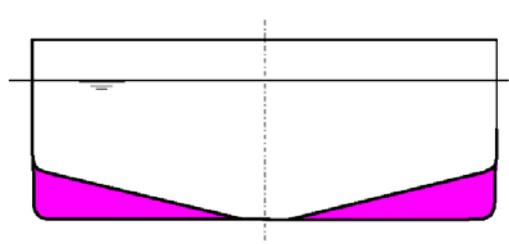


図2 ノンバラスト船型のコンセプト (船体中央の断面形状の違い)

本研究開発では、これらの制限が比較的少ない大型タンカー(スエズマックスタンカー及びVLC)を対象として、比較的制約の少ない船幅を増加させることでノンバラスト船型を確立することとした。

2 開発目標、課題

本研究開発におけるノンバラスト船型の開発目標を次のとおりとした。

ノンバラスト船型の開発目標

バラスト水の移送

バラスト水の海域間移送をしないで済む船型とする。

空荷状態の耐航性能

バラスト水を積載しないノンバラスト状態で、在来船型のバラスト状態と同等の耐航性能を有する。

経済性

満載状態と空荷状態の平均燃料費を、在来船型の満載状態と空荷状態の平均燃料費に対して5%以上節減する。

また、在来型タンカーが通常搭載するバラスト水量の1/4程度のバラスト水量を一時的に搭載して普通以上の荒天時においても安全航海が可能、との条件も付加した。

本開発目標を達成するために、予想される主な技術上の課題は次のとおりである。

- 1) 載貨重量の確保と空荷状態の喫水確保の両立
- 2) ノンバラスト船の船底傾斜を過大としないために空荷状態の喫水を在来船型のバラスト状態の喫水より小さくした場合の船首船底スラミング対策、プロペラ没水深度確保
- 3) スラミング対策として在来船型以上の船首船底補強が必要となること、また、幅広化により波浪中縦曲げモーメントが増加することから、全体的に船殻重量が増大すること
- 4) 船首喫水が浅いので船尾トリムが大きくなり前方視界が悪化すること
- 5) 幅広化により操縦性能が悪化する可能性があり、IMOの操縦性基準への適合性

3 船型、載貨状態

ノンバラスト船型の設計に当たっては、従来の知見・経験も踏まえて試行錯誤を繰り返した。設計における留意点は以下のとおりである。

- 1) ノンバラスト船型と在来船型は、長さ(全長)、載貨重量、満載喫水を同じとする。
- 2) 比較対象とする在来船型は、実績データを基に要目を決定した。バラスト状態の船尾喫水はプロペラ全没の条件から、船首喫水は実績を参考に決定した。バラスト量はバラスト状態の排水量から船殻重量、燃料等を差し引いたものである。
- 3) 船底傾斜による排水量減少は船幅増加のみで補う。
- 4) 空荷状態の船首喫水を3mとした。これは在来船型のバラスト状態の船首喫水の約半分であるが、船首船底スラミングの問題は船首部フレームラインのV型化で対処した。
- 5) 必要船尾喫水を小さくするためプロペラ直径を在来船型の10%減とした。このためプロペラ効率低下により数パーセントの馬力増加となる。
- 6) 空荷状態の喫水と排水量(軽荷重量と燃料等の合計)から船底傾斜が決定されるが、船底傾斜が小さい場合、空荷状態の喫水を確保するためにバラストが必要となる一方、船底傾斜が大きい場合、排水量減少を補うための船幅増加が大きくなる。

このようにして決定したスエズマックスタンカーのノンバラスト船型の形状と喫水を図3、4に示す。図4には在来船型の正面線図も示す。



図3 ノンバラスト船型 (スエズマックスタンカー)

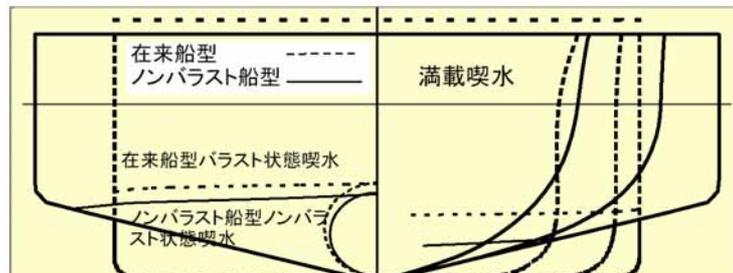


図4 正面線図の比較 (スエズマックスタンカー)

表1にスエズマックスタンカー及びVLCCの在来船型とノンバラスト船型の要目を示す。

図3、表1で示した荒天時バラスト状態とは通常以上の荒天に遭遇した際の航海を想定した喫水で、在来船型の通常のバラスト状態で搭載するバラスト水の1/4を搭載して船首喫水を深くした載貨状態である。

在来船型、ノンバラスト船型等の深さ方向排水量分布の比較を図5に示す。横軸は平均喫水の満載状態の喫水に対する比、縦軸は排水量の満載排水量に対する比である。

太い実線(ノンバラスト船型)を破線(在来船型)と比べて分かるように、ノンバラスト船型の空荷状態では船型と喫水の両方の工夫によりノンバラストの条件を確保していることが分かる。

表1 在来船型及びノンバラスト船型の要目

初期計画	スエズマックスタンカー		VLCC	
	在来船型	ノンバラスト船型	在来船型(類似船)	ノンバラスト船型
垂線間長 L_{pp} [m]	265.00	267.00	316.00	317.50
水線長 L_{wl} [m]	271.00		322.50	
型幅 B [m]	43.00	56.00	60.00	70.00
船底傾斜	0°	15.2°	0°	10.8°
型深さ D [m]	23.80	22.50	28.90	27.30
主機関(MCR)	16,740ps		36,960ps	
プロペラ直径 D_p	8.60	7.70	9.50	8.55
満載状態				
喫水 d_f [m]	16.00		19.10	
計画排水量 [t]	160,000	162,500	300,000	303,000
L_{pp}/B	6.16	4.77	5.27	4.54
B/d	2.69	3.50	3.14	3.66
C_B	0.856	0.663	0.808	0.696
$A_R/L_{pp}d$	1/51	1/71	1/57	1/66
空荷状態				
	バラスト状態	ノンバラスト状態	バラスト状態	ノンバラスト状態
船尾喫水 d_{AP} [m]	8.82	7.90	9.74	8.76
船首喫水 d_{FP} [m]	5.84	3.00	7.04	3.10
排水量 [t]	68,650	28,100	122,370	50,000
バラスト水 [t]	43,050	0	75,370	0
その他の載貨状態				
	ノンバラスト状態	荒天時バラスト状態	ノンバラスト状態	荒天時バラスト状態
船尾喫水 d_{AP} [m]	4.88	7.90	5.99	8.76
船首喫水 d_{FP} [m]	0.92	5.07	1.25	5.34
排水量 [t]	25,600	38,860	47,000	68,840
バラスト水 [t]	0	10,760	0	18,840

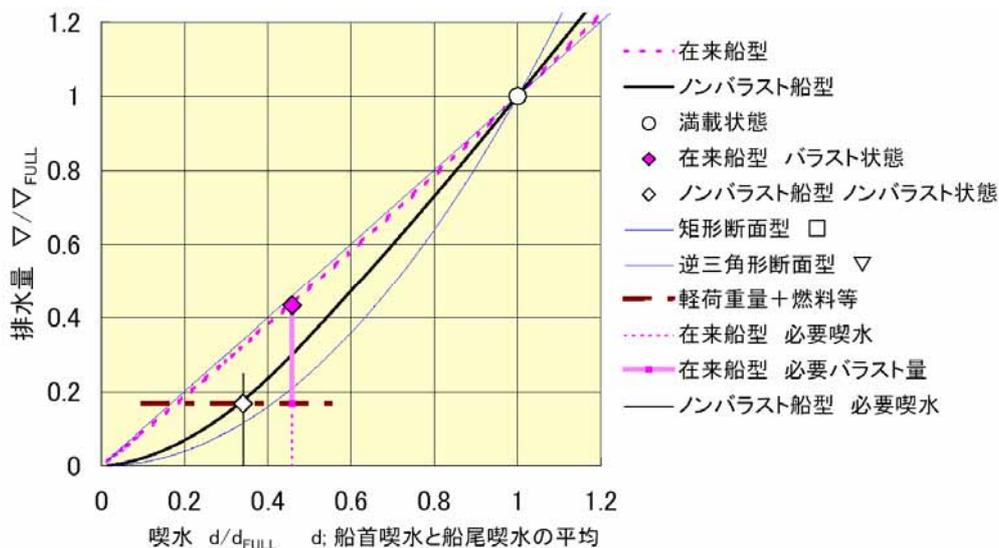


図5 深さ方向排水量分布 (スエズマックスタンカー)

4 推進性能

推進性能試験結果を図6, 7に示す。図6はスエズマックスタンカーの制動馬力である。図7はVLCCの制動馬力である。図中の在来船型の性能は、以前に日本造船技術センターで水槽試験を実

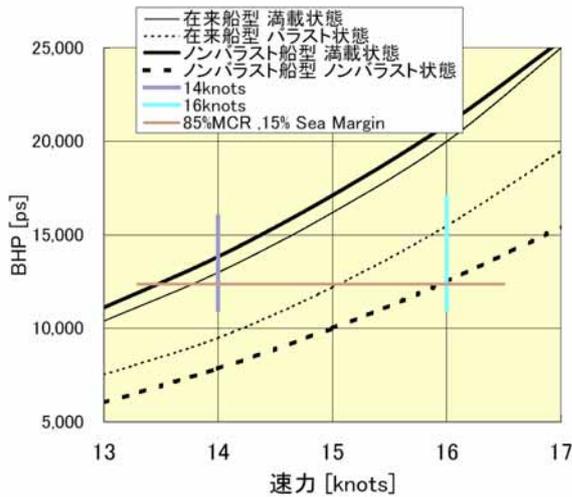


図6 スエズマックスタンカーの制動馬力
 在来船型 : 類似船型の平均性能
 ノンバラスト船型 : 6.2m 模型船

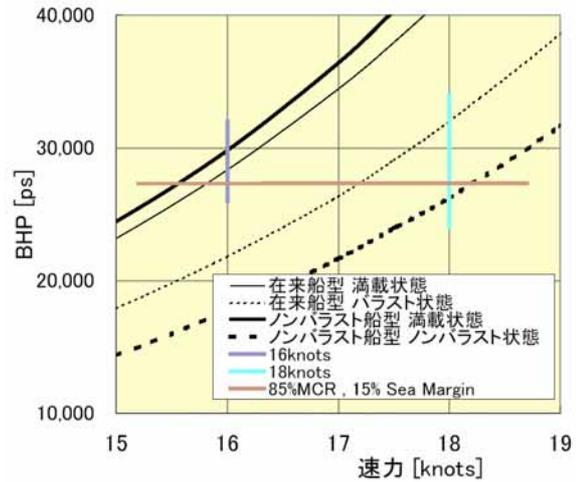


図7 VLCCの制動馬力
 在来船型 : 類似船型の平均性能
 ノンバラスト船型 : 6.2m 模型船

施していた類似船の平均的性能である。満載状態では、所要馬力が若干大きくなるものの、空荷状態では、大量なバラスト水が不要なことから、大幅な所要馬力削減が可能となっている。本図から、満載状態及び空荷状態を総合的に評価して、スエズマックスタンカーでは5~7%程度、VLCCでは6~7%程度、平均で6%以上の馬力削減が得られていることが分かった。

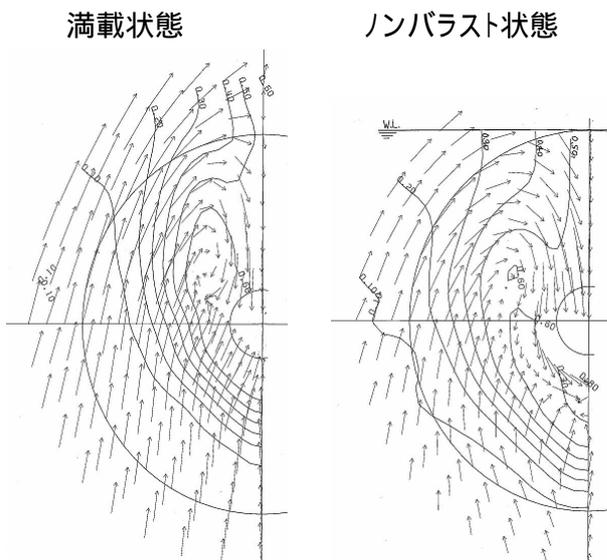


図8 スエズマックスタンカー ノンバラスト船型のプロペラ位置の伴流分布

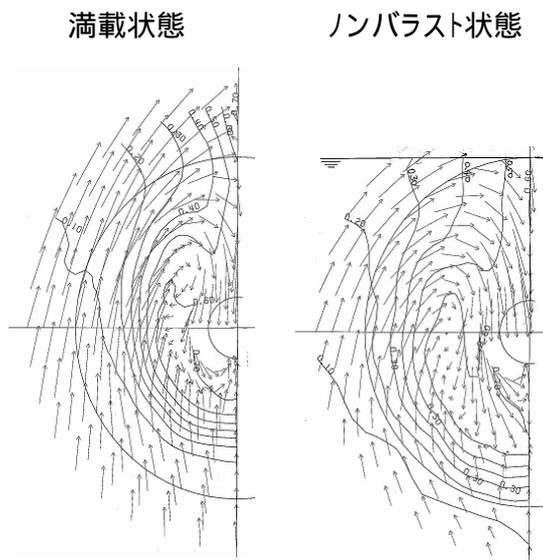


図9 VLCC ノンバラスト船型のプロペラ位置の伴流分布

図8, 9にスエズマックスタンカー、VLCCのプロペラ位置の伴流分布を示す。船底傾斜に伴う異常な流れは生じていない。流れの円周方向変化も穏やかでプロペラのキャビテーション性能に悪影響を及ぼすような点も認められない。

5 波浪中船体運動

ノンバラスト船型の波浪中諸性能を把握すべく、スエズマックスタンカーの在来船型とノンバラスト船型について各種の波浪中試験を実施した。波浪中性能は未だ絶対評価が難しいことから、主として在来船型に対する相対比較を行った。

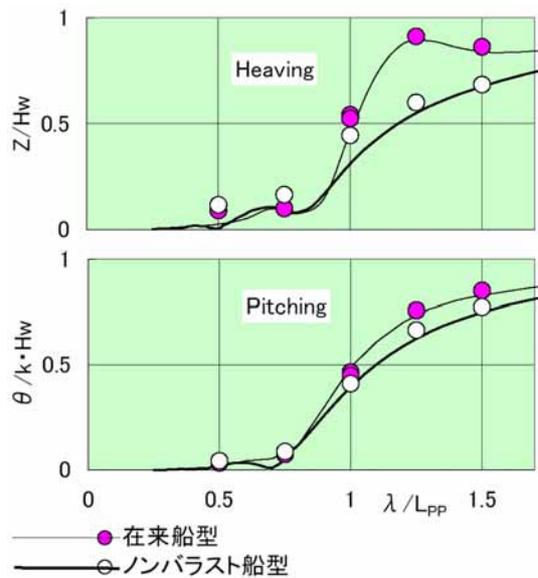


図10 満載状態の波浪中船体運動の比較
スエズマックスタンカー
4m模型船 正面向波

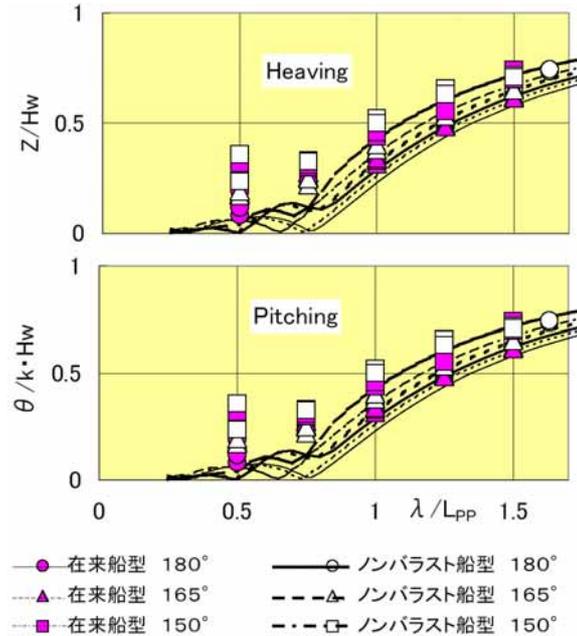


図11 空荷状態の波浪中船体運動の比較
スエズマックスタンカー
在来船型 : バラスト状態
ノンバラスト船型: ノンバラスト状態
4m模型船

波浪中の船体縦運動に関する模型試験結果、計算結果を図10、11に示す。印等は模型試験結果、実線等はストリップ法による計算結果である。図10は満載状態、図11は空荷状態の比較である。空荷状態においては波向を3種変えたときの比較を示している。これらの図によると、ノンバラスト船型の縦揺れは、満載状態では、在来船型に比べて小さいが、空荷状態では、在来船型に比べて少し大きい。しかし、その差は小さく、ノンバラスト船型の縦揺れは在来船型と同等であると言える。

次に、横揺れ性能の比較として自由横揺れ試験結果を図12に示す。在来船型にはビルジキールが設置されているが、ノンバラスト船型においてはビルジキールを付けても横揺れ特性がほとんど変化しなかったことから、本図にはビルジキールを装備しない場合のデータを示している。本図から、ノンバラスト船型の固有周期が在来船型に比べて小さく、2/3程度となっている。これはノンバラスト船型のメタセンタ半径が非常に大きいことによる。このため、乗り心地が悪くなることが予想されるが、図で示されるように、ノンバラスト船型の減衰が大きく、固有周期が短い問題はかなり緩和されるものと考えられる。

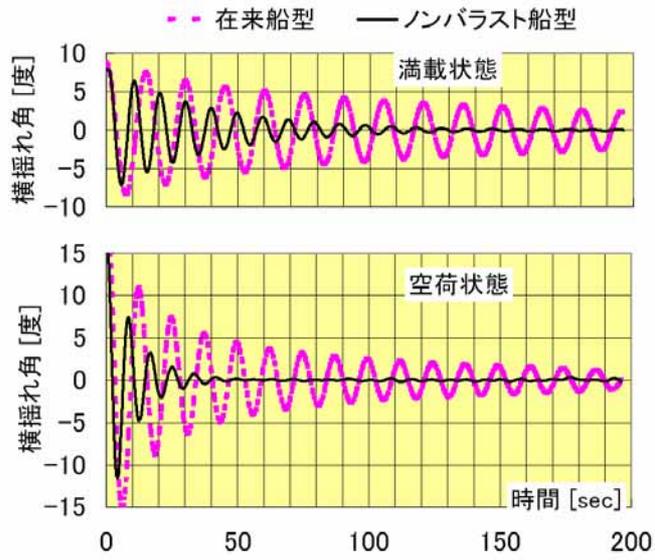


図12 自由横揺れ試験結果の比較

スエズマックスタンカー

空荷状態

在来船型 : バラスト状態

ノンバラスト船型: ノンバラスト状態

6.2m模型船 実船時間に換算

6 波浪中縦曲げモーメント

構造強度に重要な影響を与える船体中央の縦曲げモーメントについて、在来船型とノンバラスト船型を比較する。

図13の左図の 規則波中 は、在来船型、ノンバラスト船型の満載状態、空荷状態について、4m模型船を用いた規則波中の模型試験結果を示す。実線、点線はスラミング衝撃荷重推定システムによる計算結果(スラミングが発生しない小波高で計算。剛体)を示す。下の図は波高1m当たりの縦曲げモーメント、上の図は船の長さ、幅も用いた無次元係数である。

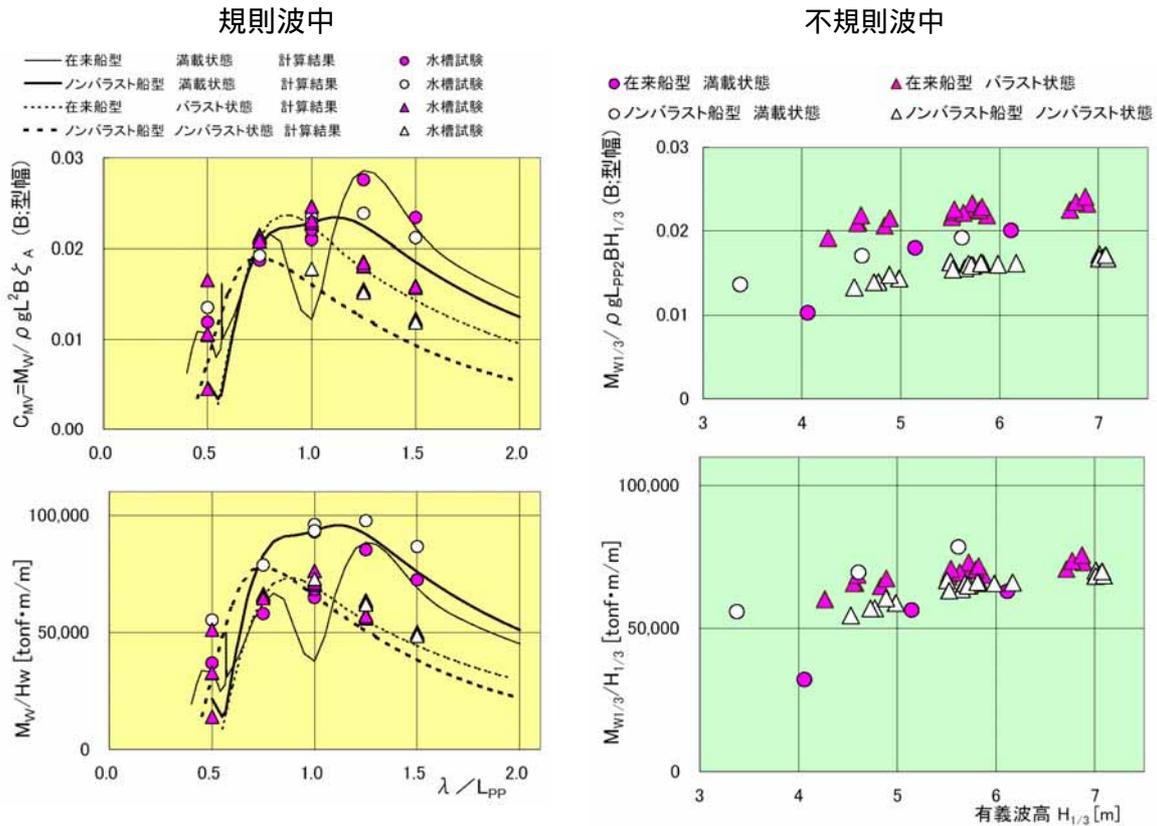


図13 船体中央の縦曲げモーメント(スエズマックスタンカー)

右図は同じ模型船を用いた不規則波中の模型試験結果を示す。横軸は有義波高である。縦曲げモーメントの無次元化等にも有義波高を用いた。縦軸の縦曲げモーメントも有義波高と同じ考えで1/3有義値で表わした。

満載状態においては、ノンバラスト船型の縦曲げモーメントは在来船型に比べて大きい。船長、船幅を用いた無次元係数では同程度であり、(船長)² × (船幅)に比例していると言える。

空荷状態の縦曲げモーメントを在来船型と比べると、規則波中の試験結果では同程度、不規則波中の試験結果ではノンバラスト船型の方が少し小さいことが判る。

以上の試験結果をノンバラスト船型全体へ一般化するにはデータ不足であり、更なる検討・研究が必要と考えられるが、本研究開発においては、ノンバラスト船型の波浪中縦曲げモーメントMwは在来船型のそれをベースに(船長)²×(船幅)に比例するとして算定することとした。試設計に使用したノンバラスト船型の縦曲げモーメントを在来船型のそれと併せて図14に示す。

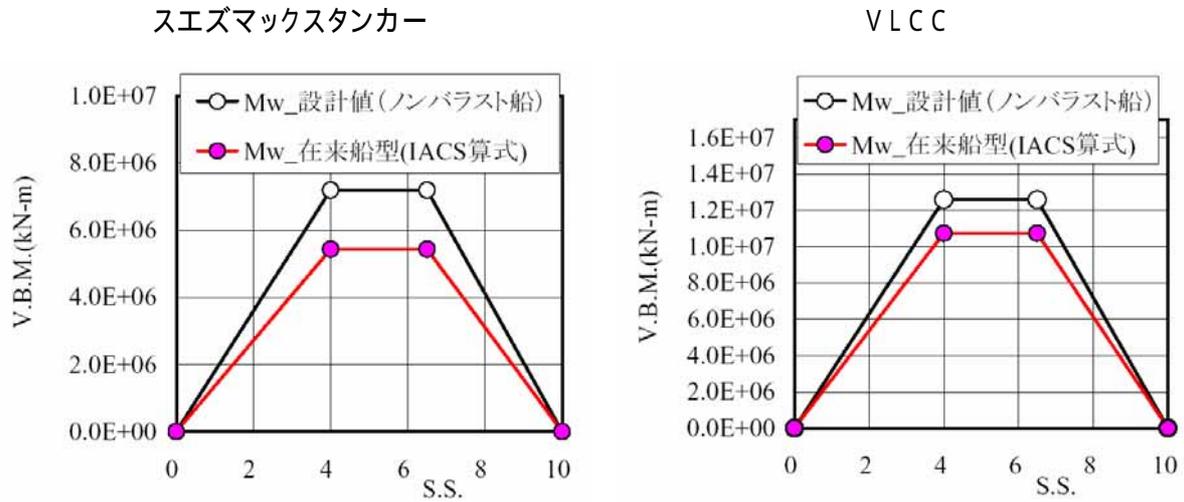


図14 在来船型の縦曲げモーメントと試設計に使用したノンバラスト船型の縦曲げモーメントの比較

7 波浪中船首船底衝撃

在来型スエズマックスタンカー空荷状態の船首喫水平均的値は、5.84m であり、これらの船舶では、バラスト水の搭載による船首喫水確保によって基本的には船底露出しないことを前提とした設計となっている。しかしながら、ノンバラスト船型の空荷状態では船首喫水が3m程度であることから、波浪中の船底露出が生じるものとして、水面突入時の衝撃が小さい船型、すなわちV型船首形状を採用した。以下、その効果について水槽試験結果と本研究開発で開発したスラミング衝撃荷重推定システムで評価する。

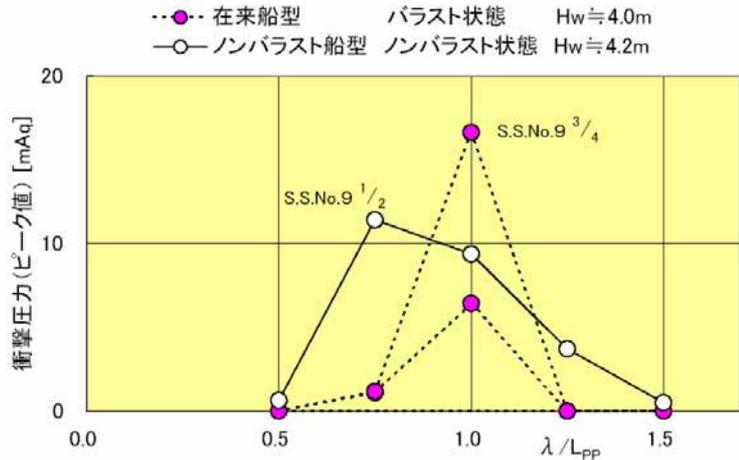


図15 船首船底衝撃圧力の規則波中試験結果の比較
スエズマックスタンカー ノンバラスト船型は A
6.2m 模型船 正面向波
複数点計測の内のピーク最大値

(1) 船型の比較

図15に在来船型とノンバラスト船型の規則波中の衝撃圧力計測結果を示す。船首船底付近に約10個の圧力変換器を設置して計測した圧力変動の最大ピーク値を示している。図では最大となった前後方向位置も示してある。ガス方向位置としては船体中心線付近の衝撃圧力が大きく、船側側に寄った位置の衝撃圧力は比較的小さかった。

本図から、最大となる波長、位置は船型によって異なるが、ピーク値の大きさは在来船型とノンバラスト船型では大差ないことが分かった。

図16に不規則波中衝撃圧力計測結果を示す。横軸は波数で縦軸はこの波数に対応する最大衝撃圧力である。ノンバラスト船型と在来船型には、大きな差異は認められないが、船首喫水が、ノンバラスト船型で3m、在来船型で5.84mであることを考慮すると、

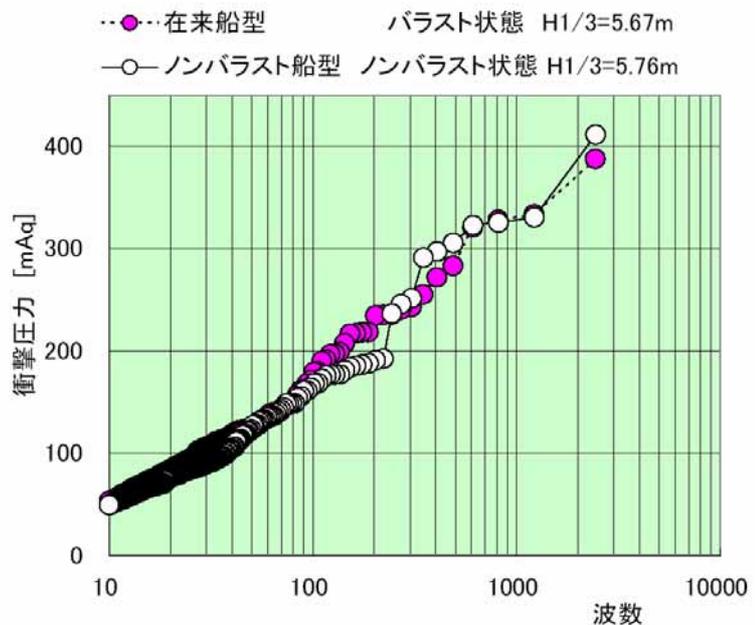


図16 船首船底衝撃圧力の不規則波中試験結果の比較
スエズマックスタンカー 4m模型船 正面向波
複数点計測の内のピーク最大値

V型船首形状を採用したノンバラスト船型の衝撃圧力に対する優位性は明確である。

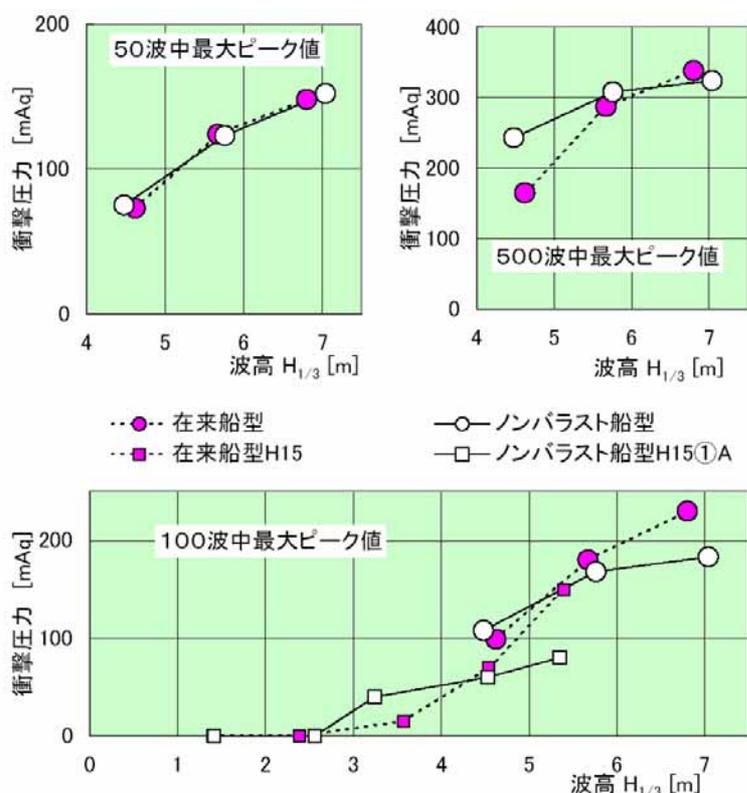


図17 船首船底衝撃圧力最大値の比較

スエズマックスタンカー
 在来船型 ; バラスト状態
 ノンバラスト船型 ; ノンバラスト状態
 正面向波 4m模型船(H15 データは 6.2m 模型船)

規則波中の水槽試験結果から、ノンバラスト船型の空荷状態の船首船底衝撃圧力は、在来船型のバラスト状態のそれと同程度であることが判った。

次に、ノンバラスト船型は船底傾斜を有することから、横揺れと縦揺れが連成した場合にスラミングが発生する可能性が懸念される。このため、ノンバラスト船型の空荷状態について斜めの規則波中の波浪中試験を実施した。その結果によると、波長、波向が変化しても衝撃圧力の最大値は波向が $= 180^\circ$ の場合と同程度であり、ノンバラスト船型においても、在来船型と同様、正面向波ないしそれに近い斜め波についての検討で足りることが分かった。

ストリップ法により求めた波高とノンバラスト船型空荷状態の S.S.No.9におけるスラミング発現確率との関係を図18に示す。ここでスラミングとは露出した船底と海面との衝突速度がある閾値を超える状態を意味し、日本海事協会の現行規則に合わせた。

発現確率 = 1/50 という日本海事協会規則のバックグラウンドによれば、ノンバラスト船型空荷状態の限界海象(有義波高)は、次のとおりとなる。

スエズマックスタンカー	5.76m
VLCC	6.51m

図17は図16等の水槽試験結果から得られたデータの内、幾つかの波数について有義波高ベースに衝撃圧力を示したものである。波高が小さい場合はノンバラスト船型の衝撃圧力が大きく、波高が高い場合には在来船型の衝撃圧力が大きいという傾向が見受けられる。これは、ノンバラスト船型の空荷状態は喫水が浅いことから在来船型よりも早くスラミングが発生するものの、船首形状がV型なので波高が高くなっても衝撃圧力は余り大きくならない、他方、在来船型は船首喫水が相対的に深いので一定波高までスラミングは発生しないが、船底が水平なので一旦スラミングが発生すると大きな衝撃圧力になってしまうことによると考えられる。

以上に示した規則波中、不規則波中の水槽試験結果から、ノンバラスト船型の空荷状態の船首船底衝撃圧力は、在来船型のバラスト状態のそれと同程度であることが判った。

- 西太平洋(* 1 AREA 4)
 - △ インド洋北部(* 1 AREA 7)
 - 北大西洋(IACS)
 - 北大西洋(* 1 AREA 2)
 - ◇ 北太平洋(* 1 AREA 3)
 - 北海道 松前小島(* 1)
- * 1 造船設計便覧第4版

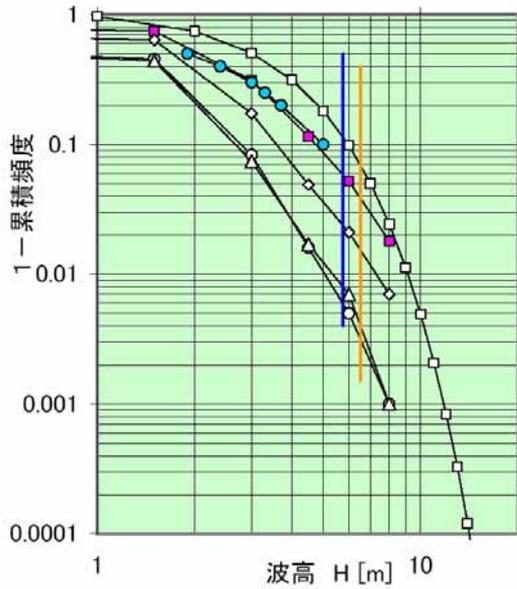
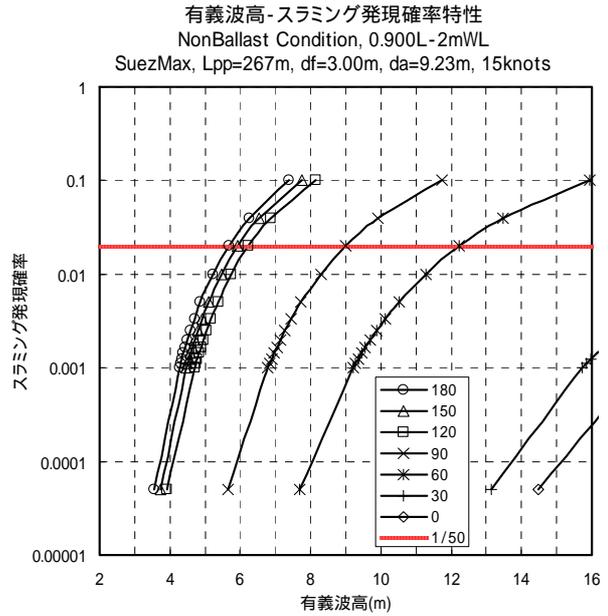


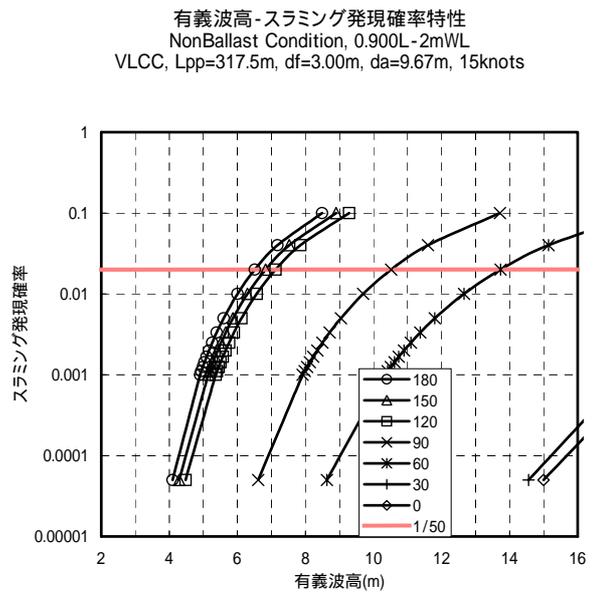
図19 波高頻度例

これを図19に示した実海面の波高分布に当てはめると、この限界海象を超える頻度は次のとおりである。

スエズマックスタンカーの 5.76m
VLCCの 6.51m



スエズマックスタンカー



VLCC

図18 ノンバラスト船型空荷状態のスラミング発現確率と有義波高

	インド洋北部	西太平洋	北大西洋(IACS)
スエズマックスタンカーの 5.76m	1%以下	1%以下	10%程度
VLCCの 6.51m	0.5%以下	0.5%以下	7%程度

なお、設計に使用した船首船底衝撃圧は、この空荷状態での限界海象及び荒天時バラスト状態(後述(2)参照)での通常オペレーション上遭遇しうる海象での最大値を使用しており、在来船型と同等の十分な補強を施している。

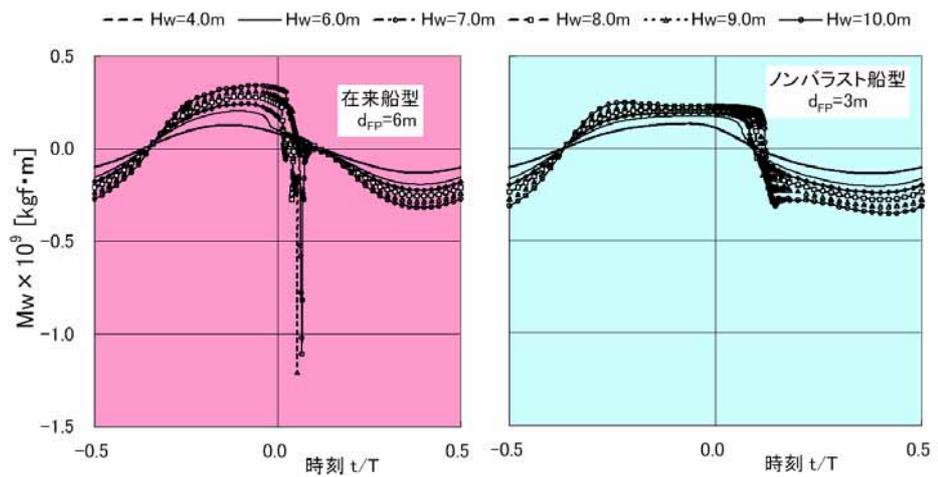


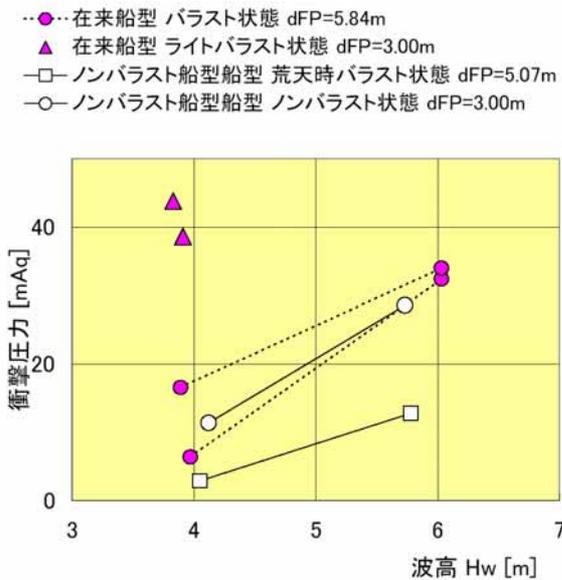
図20 船体中央の縦曲げモーメントの計算例

スエズマックスタンカー規則波 剛体
/ $L_{pp}=1.0$ 出会い波周期 $T=9.5$ 秒 A.P.に波の谷きたときを $t=0$

波高を広範囲に

変えたときの船体中央縦曲げモーメントについて、本研究開発で開発したスラミング衝撃荷重推定システムによる計算結果を図20に示す。何れも、空荷状態における計算結果を示す。この計算結果から、在来船型においては高波高時に船首船底衝撃荷重の影響によりインパルス状の縦曲げモーメントが発生しているが、ノンバラスト船型ではこのようなインパルス状の縦曲げモーメントは生じていない。

規則波中の最大ピーク値



100波中最大ピーク値

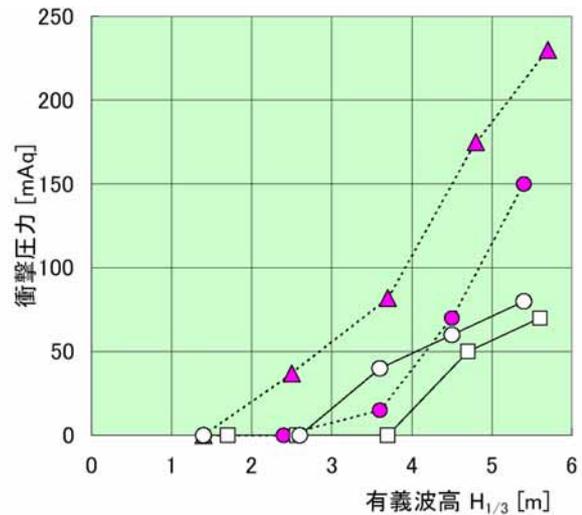


図21 載貨状態と船首船底衝撃圧力

スエズマックスタンカー 6.2m 模型船

(2) 船首喫水の影響

前項(1)で、波浪中におけるノンバラスト船型空荷状態の船首船底衝撃について検討し、在来船型の空荷状態に比べて同等程度の性能を示すことが判明した。しかしながら、頻度は少ないとしても、通常以上の荒天状態に遭遇する可能性がある。避航を行ってもやむを得ず遭遇する荒天の場合には、減速運転以外に、バラスト水を搭載して航海することにより、船首船底衝撃圧力を軽減することが可能である。ここでは、ノンバラスト船型に対して、バラスト水(在来船が通常積載するバラスト水の1/4程度)を積載した状態を荒天時バラスト状態として評価した。

図21に、船首喫水を変えた場合の船首船底衝撃圧力の計測結果を示す。ノンバラスト船型の空荷状態と荒天時バラスト状態とで同一衝撃圧力となる波高を比べると、平均的には1.5m程度の波高増に対応できることが判った。また、この図にはノンバラスト船型空荷状態の船首喫水と同じ船首喫水の在来船型の載貨状態(ライトバラスト状態)についても印で示しているが、この両者の間には、大きな違いがありノンバラスト船型のV型船首形状の効果が顕著に現れている。

次に、図22にはスラミング衝撃荷重推定システムによる計算結果として、船首船底の衝撃圧力が同一となる船首喫水と波高の組み合わせを示す。図中、 は在来船型とノンバラスト船型の空荷状態を示し、 はノンバラスト船型の荒天時バラスト状態の船首喫水に対応する点を示す。ノンバラスト船型の荒天時バラスト状態の船首船底衝撃が空荷状態のそれと同一となる波高差は、1.5mとなっており、前述の試験結果に合致している。

なお、図22から、このような衝撃圧力以下に対応する在来船型の船首喫水は約9mとなり、これに必要なバラスト水は約61,000トンと算定されるが、これは通常のスエズマックスタンカーが有する分離バラストタンクを最大限に使用したヘビーバラスト状態以上のバラスト量となっている。

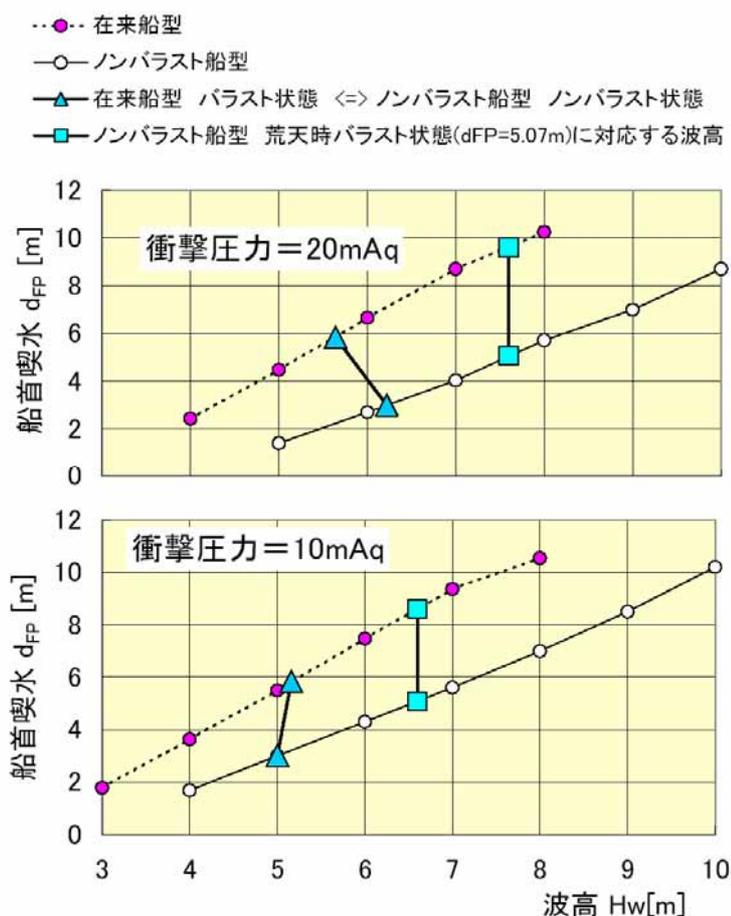


図22 船首船底衝撃圧力を一定値とした場合の波高と船首喫水

スラミング衝撃荷重推定システムによる計算結果
スエズマックスタンカー 規則波 $L_{pp} = 1.0$

8 波浪中抵抗増加

実海面における性能評価として、不規則波中の抵抗増加の模型試験結果を図23に示す。横軸は有義波高、縦軸は波浪中の抵抗増加を有効馬力に換算したものである。

満載状態ではノンバラスト船型の抵抗増加は在来船型に比べて14%大きい、ノンバラスト船型の空荷状態の抵抗増加は在来船型に比べて17%小さくなっている。平均的に見ると、ノンバラスト船型の方が良い傾向を示しているが、その違いは小さい。

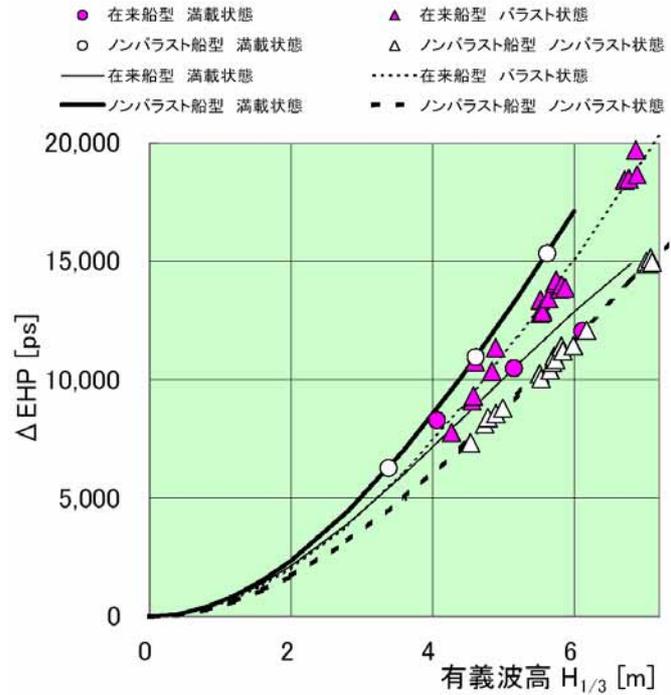


図23 波浪中抵抗増加

満載状態 : 14 knots

空荷状態 : 15 knots

4 m 模型船

抵抗値 (縮率 × 速度)² で実船換算

9 操縦性能

ノンバラスト船型は幅広船型となることから、操縦性能が悪化する懸念がある。スエズマックスタンカーのノンバラスト船型についてPMM試験を実施し、その結果を用いてシミュレーション計算で操縦性能を評価した。

表2にその結果を示すが、すべての性能がIMO基準を満たしていると共に、保針性能が非常に良いことが分かる。当初、ノンバラスト船型は、幅広化のため保針性能が悪くなるのではと心配されたが、長さ幅比 L_{pp}/B が小さくなった分だけ肥瘦係数 C_b も小さくなっていることから、悪化しなかったと考えられる。

図24はスエズマックスタンカーノンバラスト船型のスパイラル特性を他の肥大船(日本造船技術センターの最近の水槽試験結果、満載状態)と比較したものである。図に示すように通常の肥大船のスパイラル特性は不安定ループを有するが、ノンバラスト船型では不安定ループが無い。

表2 ノンバラスト船の操縦性能
PMM試験+シミュレーション計算による
スエズマックスタンカー 満載状態

旋回性能	$\delta = +35^\circ$	-35°	IMO基準
アドバンス/ L_{pp}	3.69	3.65	4.5以下
タクティカルダイヤメーター/ L_{pp}	4.34	4.30	5.0以下
初期旋回性能	$\delta = +10^\circ$	-10°	IMO基準
トラックリーチ/ L_{pp}	1.86	1.81	2.5以下
保針性能	$\delta = +10^\circ$ -10°	-10° $+10^\circ$	IMO基準
第一オーバーシュート角	4.3°	5.6°	20° 以下
第二オーバーシュート角	10.0°	8.0°	40° 以下
	$\delta = +20^\circ$ -20°	-20° $+20^\circ$	IMO基準
第一オーバーシュート角	8.4°	9.2°	25° 以下

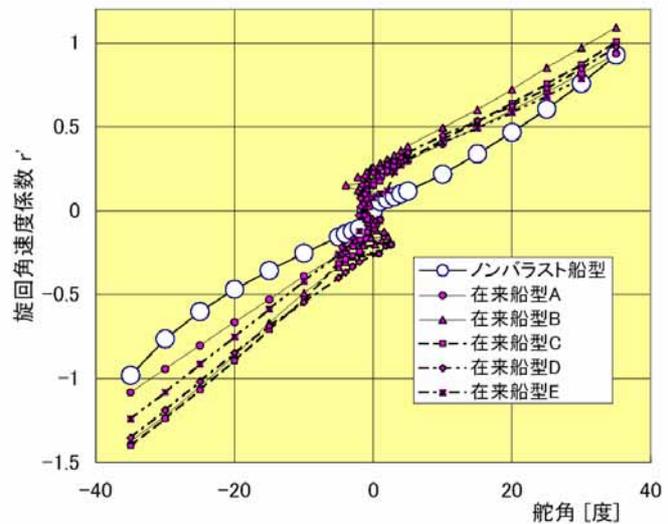


図24 スパイラル特性の在来型肥大船型との比較

10 浅喫水対応推進システム

ノンバラスト船型は、タンカーやバルクキャリアの空荷状態における喫水を確保するために搭載されているバラスト水を積載することなく喫水を確保すべく、大きな船底傾斜を付ける船型である。船底傾斜が過大にならないためにはプロペラ没水深度を確保するための船尾喫水が小さいことが望ましい。

空荷状態の船尾喫水を浅くした場合でも、プロペラ没水深度を確保できる推進システムとして、1) 小直径プロペラ(直径制限プロペラ、2) 可変レーキプロペラ、3) 水面盛上用フィン、4) 昇降式ポッド型推進器、5) 二重反転プロペラ、6) 2軸船について検討した。

1)の小直径プロペラとはプロペラ直径を最適直径より小さくすることによって、空荷の喫水が浅い載貨状態でもプロペラ没水深度を確保しようとする方法である。

本研究開発では、空荷状態の喫水の設定等においては、プロペラ直径を在来船型の10%減として、それに対応する喫水条件を設定した。

この方法は、プロペラ効率向上のためのいわゆるプロペラ大口径化とは逆の方向であり、プロペラ効率の多少の低下がある。

図25にプロペラ直径を変えた場合の諸性能の変化を示す。図中印のデータは、プロペラ回転数を与えてそのときの最適直径を求める通常的设计法で設計(以下、「最適直径法」という)したデータである。印のデータは、設計条件としてのプロペラ回転数を変更することな

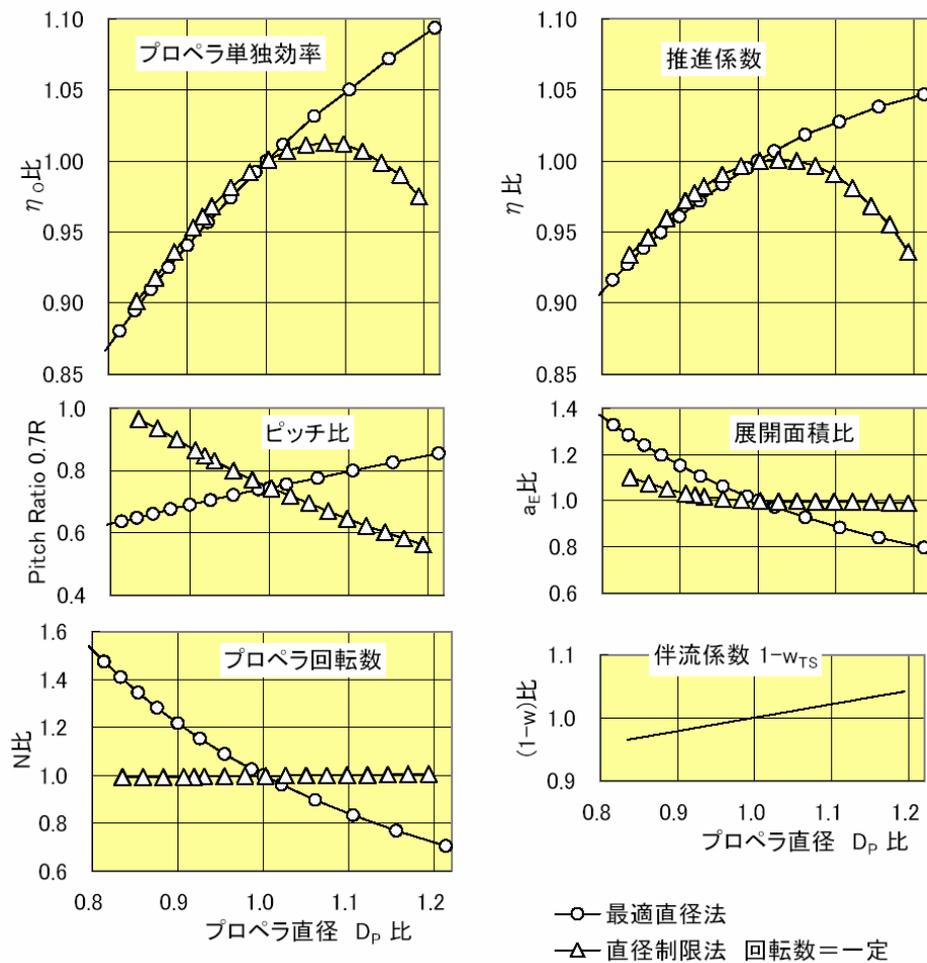


図25 プロペラ直径を変えた場合の諸性能
スエズマックスタンカー PDプロペラ設計システムにより設計

く、単にプロペラ直径を指定して設計した(以下、「直径制限法」という)データである。

本図から、最適直径法の場合は、最適直径が基準の場合の90%となるようなプロペラ回転数とした場合のプロペラ単独効率は5.9%の低下となっている。他方、直径制限法の場合のプロペラ単独効率は5.2%の低下となっており、効率低下が0.7%少ない。また、推進係数についてみると、傾向としては単独効率の場合と似ているが、伴流係数の違いにより減少率は2%小さくなり、プロペラ直径を基準の場合の90%とした場合の推進係数は最適直径法で3.9%低下、直径制限法で3.2%低下に留まっている。

図26に直径を最適直径プロペラの90%としたプロペラ(日本造船技術センターのPDプロペラ設

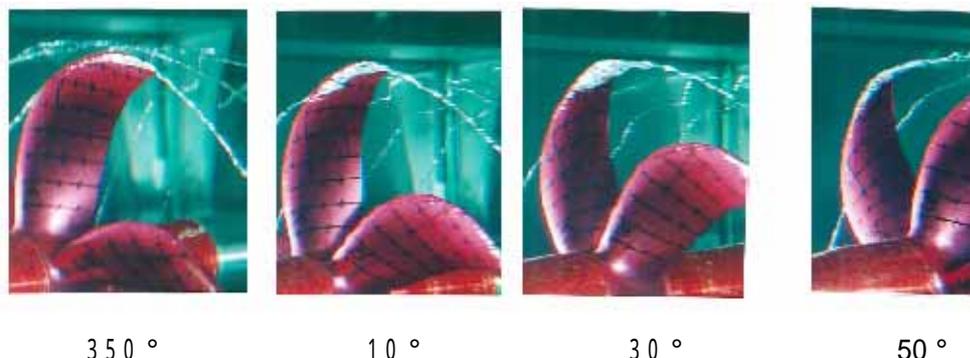


図26 直径制限プロペラのキャビテーション
スエズマックスタンカー 満載状態

計システムで設計)のキャビテーションを示す。空荷状態の喫水が浅くプロペラ没水深度が浅いためキャビテーション数が小さくなることに充分留意して設計すれば問題無いことが分かった。

2) 可変レーキプロペラとは、航海中に載貨状態、水深等に応じて翼レーキを大きくすることによってプロペラ直径を小さくし、プロペラ没水深度を確保しようとするプロペラである。



本プロペラの実用化にはレーキ可変機構の開発が必要であるが、従来から使用されている可変ピッチプロペラのピッチ可変機構と比べて同程度の複雑さと想定される。

翼レーキ可変機構を組み込んで試作した模型プロペラの単独性能試験結果によるとスラスト係数、プロペラ単独効率が著しく低下することが判明したので、翼レーキを大きくする運行を極小化する必要がある。



3) 水面盛上用フィンとは、プロペラ付近の水面を盛上げようとするものであるが、プロペラ没水深度対策としての効果は得られなかった。

4) 昇降式ポッド型推進器を採用することも考えられるが、電気推進のための発電機、電動機の合計損失が15%程度と見込まれるので、燃料費の面からポッド推進方式のメリットは小さい。

5) 二重反転プロペラは、回転流損失の回収によるプロペラ効率向上以外に、最適直径が小さいという特徴を有する。この直径が小さいという特徴がノンバラスト船型のプロペラ没水深度確保に向いていると言える。従来の研究成果から、二重反転機構の製作コストは効率向上によってほぼ回収できると言われているので、結果として直径が小さくなるというメリットのみが残ることになり、二重反転プロペラはノンバラスト船型用プロペラとして適用の可能性がある。

6) 2軸船は、1軸当たりの馬力が半分になるためプロペラ直径が小さくなるが、プロペラ軸支持用

ブラケットの抵抗、伴流利得減少、建造費増加があるので経済性からは2軸船の採用は難しい。

以上をまとめて、浅喫水対応型推進システムの検討結果の一覧を表3に示すが、ノンバラスト船型の浅喫水対応推進システムとしては、経済性、既存技術の成熟度を考慮して、プロペラ直径を最適直径の90%程度に制限したプロペラが最適なものと判断される。二重反転プロペラないし可変レーキプロペラについては、有力と判断されるものの、建造費増加が大きいこと及び今後の開発要素が残っていることを考慮して、以下の検討には含めなかった。

表3 ノンバラスト船型に適した推進システム

対策	在来型との比較	評価		
		プロペラ没水深度対策	建造費	所要馬力
(1) 小直径プロペラ 直径制限設計法 直径 10%減少	推進係数 3%減 プロペラ重量 2割減	○	○	△
(2) 可変レーキプロペラ	プロペラ効率(平均) 4%減 船速(平均) 2%低下 プロペラ製作費 増	○	△	△
(3) 水面盛上用フィン	フィン制作費 要	×	△	○
(4) 昇降式ポッド型推進器	エネルギー変換効率 85%	○	×	×
(5) 二重反転プロペラ (プロペラ回転数 ; 同一)	最適プロペラ直径 12%減 プロペラ効率 6%増 二重反転機構 建造費増	○	×	○
(6) 2軸船	プロペラ直径 14%減少 所要馬力 5%増 軸系建造費 増	○	×	△

11 船幅、満載喫水変更の検討

本研究開発におけるノンバラスト船型では船底傾斜による排水量減少を船幅増加のみで補ったが、縦曲げモーメントが大きくなること等から、船殻重量が在来船型に比べて大きくなる欠点がある。本章では、今後の具体的な船の計画、経済性評価等の参考とするために、船幅増加以外の対策についての検討を加えた。

具体的な対策としては、船幅だけではなく長さ、満載喫水の増加で補う、船幅の増加を抑え船底傾斜を小さくする(この場合、空荷状態の喫水を浅くできない場合は、多少のバラスト水が必要となる)等が考えられるが、図27に、船の型幅及び満載喫水を変化させた場合の必要バラスト量、軽荷重量、所要馬力の変化の概略推定結果を示した。ここで、印は前章までの水槽試験等を実施したスエズマックスタンカーの在来船型、ノンバラスト船型である。

本図により、船幅や満載喫水を変えた場合の必要バラスト量、軽荷重量、所要馬力の概略を見積もることができる。満載喫水を16mに維持したまま幅を56mより狭くするとバラスト水が必要となり、船幅を50m( 印)にすると、空荷状態で約9,000トンのバラスト水を必要とし、馬力が在来船型の4%程度の減少に留まる。他方、この船幅50mでも、満載喫水を約17mにすれば、空荷状態のバラスト水が不要となる( 印)。この場合、 B/d の増大も相まって馬力が在来船型に比べて10%程度減少する。

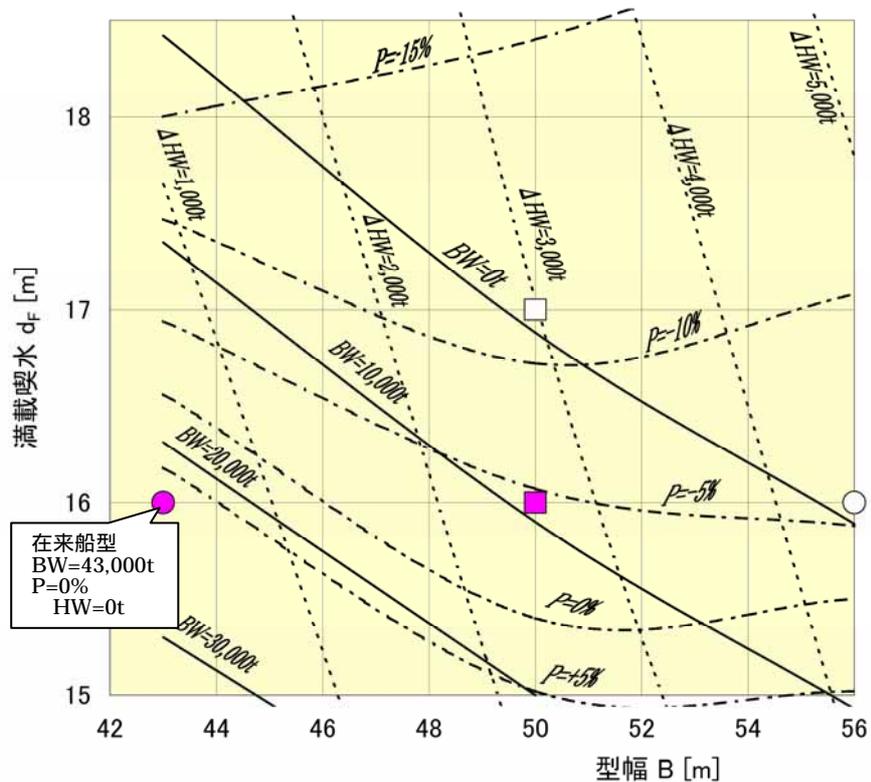


図27 満載喫水、船幅を変えたときのノンバラスト船型のバラスト量等

スエズマックスタンカー $L_{pp}=267\text{m}$ $DW=137,000\text{ton}$ $L_{pp}/B(1-C_p)>0.73$ $K=4\text{m}$
 空荷状態 $d_{Ap}=7.9\text{m}$ $d_{FP}=3.0\text{m}$
 BW : 必要バラスト量 = 空荷状態排水量 - 軽荷重量 - 燃料 1,800t
 HW : 船殻重量(在来船型に対する増加量)
 P : 所要馬力(在来船型に対する増加量、%) 所要馬力は満載状態(14ノット)、空荷状態(16ノット)の平均値

12 試設計

これまでの研究成果を基に、スエズマックスタンカー、VLCCについての試設計を行った。その概略仕様書を図28、29に、一般配置図を図30、31に、載貨重量等を表4に示す。また、載貨重量等の在来船型との比較を表5に示す。

試設計の過程で得られた知見は次のとおりである。

- 1) ノンバラスト船の経済性を上げるためにはその重量増を削減することが求められる。そのためには満載状態のサギングモーメントを下げるような配置上の工夫が必要であり、Inboard Ballast(Void) Tank(図32, 33参照)の採用や機関室、ポンプ室をより短く、後方に配置することなどが有効と考えられる。
- 2) 在来型スエズマックスタンカーでは2列タンクとなっているが、ノンバラスト船型では幅広化のため3列配置とした。最前部のサイドタンクで油を引けない部分ができることを回避するために2重底に傾斜を付ける等の工夫を要する。
- 3) 縦曲げモーメント算定については、従来の計算式の適用性が不明であることから、本研究開発では水槽試験結果を用いて算定した。しかし、今後は、水槽試験を実施しなくとも直接的に設計に利用できる計算手法の開発が望まれる。
- 4) ノンバラスト船型の横強度については日本海事協会の「タンカーの構造強度に関するガイドライン(PrimeShip-Hull)」で確認した。
- 5) 本研究開発の供試船型のように水面に対して凸になっている船型の船首船底スラミングに関しては、船首喫水を3mとしても、より喫水の深い在来船型のバラスト状態と同等であることが分かった。

NON-BALLAST TANKER (SUEZ MAX TYPE)PRINCIPAL PARTICULARS

Mareh, 2006
Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

1. KIND OF THE VESSEL:
Crude Oil Tanker (Double Hull Type)
2. CLASS:
Nippon Kaiji Kyokai NS-Tanker, Oils-Flashpoint below 60°C
MNS* M0
3. FLAG:
Panama
4. PRINCIPAL DIMENSIONS:
Length, o.a. abt. 280 m
Length, b.p. 267.00 m
Breadth, mid. 56.00 m
Depth, mid. 22.50 m
Design draught, mid. 16.00 m
5. DEADWEIGHT:
on scantling draught abt. 135,000 metric tons
6. GROSS TONNAGE:
(International admeasurement) abt. 82,500
7. CARGO CARRYING CAPABILITIES:
Cargo oil tanks (100% full) abt. 165,000 m³
incl slop tanks (100% full)
8. MAIN ENGINE AND AUXILIARY MACHINERY:
Main engine 1 set
Mitsubishi-UF 6UE68LSE
Maximum rating 15,300 kW (20,800 ps)³ x 84 rpm
Normal rating (85%) 13,000 kW (17,680 ps)³ x 79.6 rpm
Auxiliary boiler (80,000 kg/h) 1 set
Exhaust gas economizer
Forced circulating type
Generator
Diesel generator 3 sets
Emergency generator 1 set

———— MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. ————

DWG. No. GM0-Z00010-R1

9. SPEED, FUEL CONSUMPTION AND ENDURANCE:

Service speed on the designed draught at normal rating of main engine with 15% sea margin *
..... abt. 14.5 knots

Designed fuel consumption** at normal rating of main engine with the fuel oil of 10,200 kcal/kg in L.C.V. (IMO NOx code to be applied)
..... abt. 51.3 tons/day

Endurance** on the basis of above-mentioned service speed and fuel consumption
..... abt. 25,000 sea miles

Remarks : * Pre-set figure according to the usual ship design practice, therefore, actual service figure will be determined or justified by the Owner taking consideration of service route, sea condition, aging effect and other factors concerned.

** Endurance is based on the following Builder's standard calculation.
Endurance(s.m.)=F.O.T. Cap.(100% full) × 0.993 / F.O.C.(10,200 kcal/kg) × Vs(kn) × 24

10. PUMP:

Cargo oil pump
Steam turbine driven, vertical centrifugal pump 3 sets
3,500 m³/h x 110 m T.H.(S.W.)
Cargo and tank-cleaning pump
Water ballast pump
Electric motor driven, vertical centrifugal pump 2 sets
2,250 m³/h x 30 m T.H.(S.W.)
..... Cargo pump to be commonly used

11. COMPLEMENT:

Captain class 2
Senior officer class 2
Junior officer class 5
Petty officer class 3
Rating crew 13
Pilot 1
Spare (H/O class) 2
Spare (Crew class) 4
.....
Sum 32

12. INTENDED CARGOES TO BE CARRIED:

Crude oil grade "B" or lower grades.

———— MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. ————

1	Main Engine	2
<u>NON-BALLAST TANKER (VLCC TYPE)</u>		
<u>PRINCIPAL PARTICULARS</u>		
1. <u>Type of Vessel</u>	Diesel driven, single screw crude oil tanker with machinery space and accommodation including navigation bridge located aft	
2. <u>Classification</u>	Nippon Kaiji Kyokai and registered under the symbols of NS* (Tanker - Oils Flashing Point below 60°C), MINS*, M0	
3. <u>Flag</u>	Panama	
4. <u>General Arrangement</u>	Fore peak tank, boatswain store and chain lockers Five (5) - center cargo oil tanks Five (5) pair - wing cargo oil tanks One (1) pair - slop tanks Five (5) pair - double hull/bottom water ballast tanks Pump room and one (1) pair fuel oil tanks Engine room, diesel oil tank, drink water tank and fresh water tank Seven (7)-ter deck house with full midship width bridge wings Aft peak tank and steering gear room	
5. <u>Principal Dimensions</u>	Length, o.a. approx. 330.00 m Length, b.p. 317.50 m Breadth, mld. 70.00 m Depth, mld. 27.30 m Designed draught, mld. 19.10 m Scantling draught, mld. 20.20 m Gross tonnage (1969 Regulation) approx. 153,600	
6. <u>Loading Capacity</u>	Deadweight: at designed draught 259,000 t at scantling draught approx. 281,900 t Capacity: Cargo oil tank (including slop tanks, 100% full) 331,600 m ³ Water ballast tank (including peak tanks, 100% full) 101,500 m ³	
7. <u>Main Engine</u>	Type and number SULZER 7RT-flex84T 1 set Max. continuous output 24,400 kW at 71.4 rpm Normal output 20,740 kW at 57.6 rpm	
8. <u>Auxiliary Machinery</u>	Auxiliary boiler 1 set Exhaust gas economizer 1 set Main diesel generator 3 sets Emergency generator 1 set	
9. <u>Speed, Fuel Consumption and Endurance</u>	Speed at normal output of main engine with 15% sea margin at designed draught 15.00 kt Fuel oil consumption at normal output of main engine based on the lower calorific value of 42,700 kJ/kg 82.7 t/day Endurance at sea speed of 15.0 kt based on total fuel oil tank capacity, fuel oil consumption at the main engine normal output using fuel oil of 40,600 kJ/kg lower calorific value, and with 5 days sailing margin 27,000 nm	
10. <u>Pump</u>	Cargo oil pump Steam turbine driven, vertical centrifugal pump 5,000m ³ /h x 14.5m T.H. (S.W.) 3 sets Tank cleaning pump Steam turbine driven, vertical centrifugal pump 2,400m ³ /h x 14.5m T.H. (S.W.) 1 set Water ballast pump Electric motor driven, vertical centrifugal pump 3,000m ³ /h x 35m T.H. (S.W.) 2 sets	
11. <u>Complement</u>	Highest officer class 2 Senior officer class (Including 1-Spare) 3 Junior officer class (Including 4-Spare) 8 Petty officer class 3 Rating class (Including 2-Spare) 14 Worker (6)	Total on board 30

図29 VLCCの概略仕様書

OUTLINE ARRANGEMENT

Lpp x B x D - d(des.)
267.0 m x 56.0 m x 22.5 m - 16.0 m

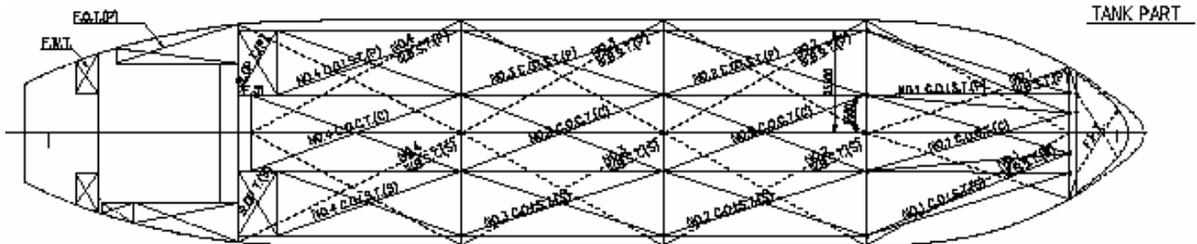
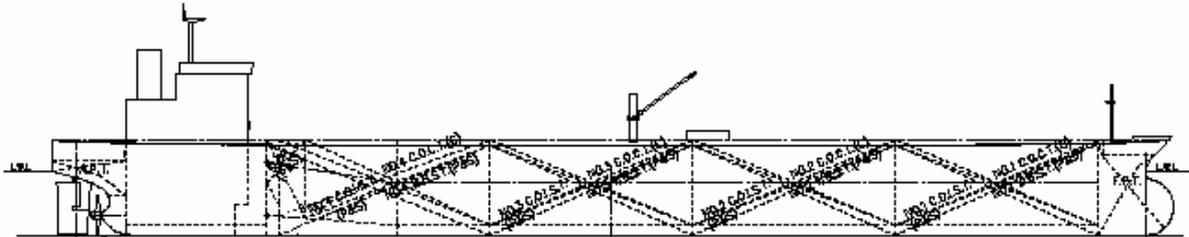
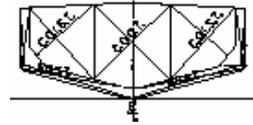


図30 スエズマックスタンカーの一般配置

ROUGH ARRANGEMENT

LENGTH (O.A.) APPROX. 330. M
LENGTH (S.P.) 317.50 M
BREADTH (MLD) 70.00 M
DEPTH (MLD) 27.30 M
DRAUGHT (MLD) DESIGN 19.10 M

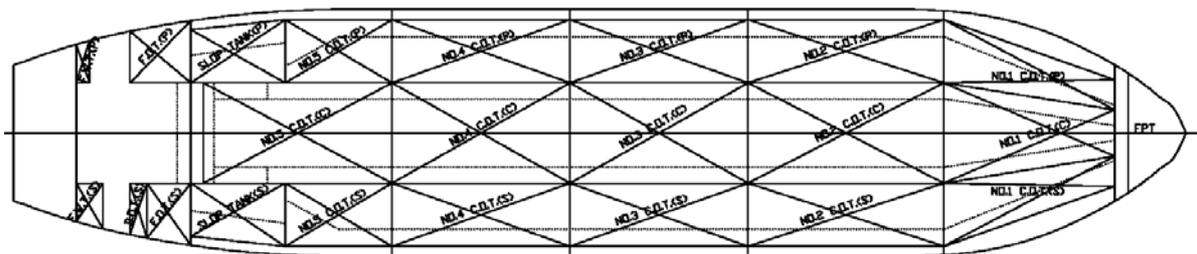
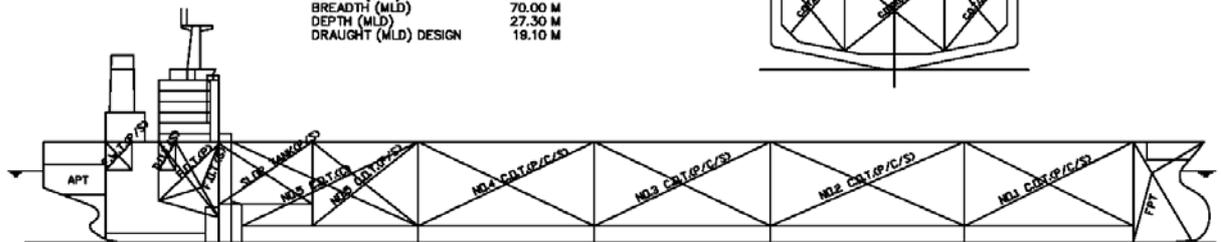
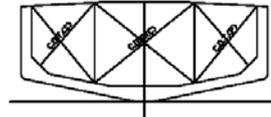


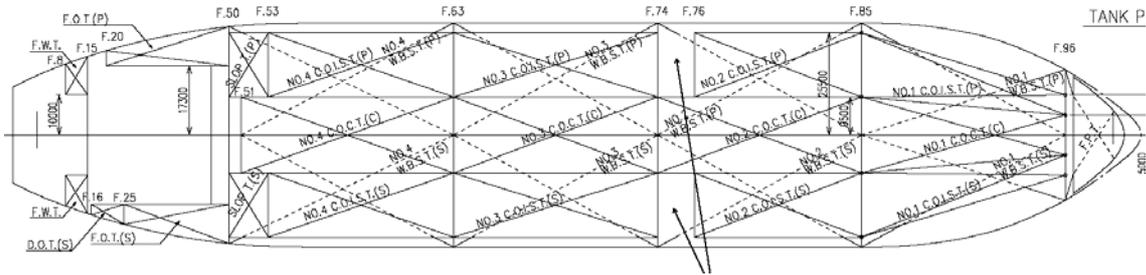
図31 VLCCの一般配置

表4 ノンバラスト船型の試設計の結果

		スエズマック スタンカー	V L C C
垂線間長さ	m	267.00	317.50
型幅	m	56.00	70.00
型深	m	22.50	27.30
喫水	m	16.00	19.10/20.20
載貨重量	ton	136,500	258,000 /281,960
軽荷重量	ton	27,350	44,340
L C G	m	9.50	7.52
K G	m	13.10	16.01
貨物油タンク	m ³	165,000	331,600
L C G	m	-13.21	-13.70
K G	m	14.47	17.30
バラストタンク	m ³	13,800	25,400
静水中縦曲げモーメント	GN・m	-5.44	-9.87
波浪縦曲げモーメント	GN・m	-7.19	-12.58
縦曲げモーメント設計値(合計)	GN・m	-12.63	-22.45
要求断面係数(36キロ高張力鋼)	m ³	51.9	92.4
船殻重量増加(対、在来船型)	ton	4,500	5,600
40キロ高張力鋼使用			
要求断面係数	m ³	50.5	87.2
船殻重量減少量	ton	約250	約600
Inboard Ballast Tank の採用			
船殻重量減少量	ton	約500	約700

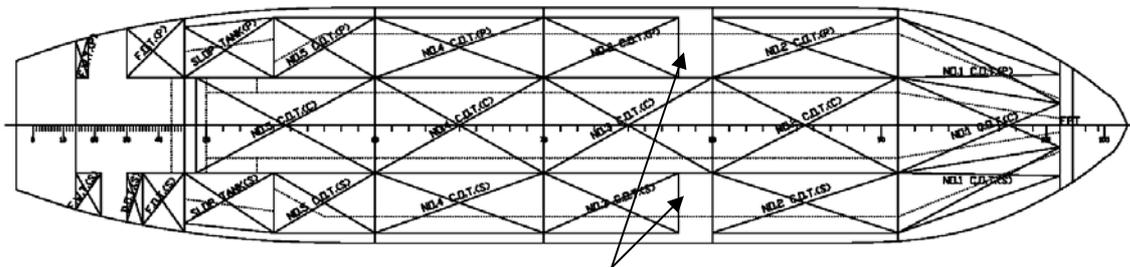
表5 載貨重量等の比較

		スエズマックスタンカー		VLCC	
		在来船型	ノンバラスト船型	在来船型	ノンバラスト船型
垂線間長さ	m	265.0	267.0	316.0	317.5
水線長さ	m	271.0		322.5	
型幅	m	43.0	546.0	60.0	70.0
型深	m	23.8	22.5	28.9	27.3
満載喫水	m	16.0		19.1	
載貨重量	ton	134,000	136,500	258,000	258,000
貨物油タンク	m ³	163,500	165,000	328,500	328,500
バラストタンク	m ³	55,000	13,800	101,500	25,400



Inboard Ballast(Void) Tank

図32 Inboard Ballast(Void) Tank の例 (スエズマックスタンカー)



Inboard Ballast(Void) Tank

図33 Inboard Ballast(Void) Tank の例 (VLCC)

13 規則の適用

ノンバラスト船型の実用化に向けて、安全上や海洋汚染防止の観点から、船級規則や国際条約の適用上、本船型の特有の問題となりそうな次の規則要件について検討を行った。尚、船級規則としては、日本海事協会の規則を想定した。

1) 航海船橋の視界 (SOLAS 条約 V 章 22 規則)

ノンバラスト船型は、空荷状態において船尾トリムが増加するため、船橋視界が悪化する事が予想される。これを解決する為には高い操舵室配置とする必要がある(スエズマックスタンカーの場合は従来船型より1層高くする必要がある)。

本問題については、他船種・船型にも共通の一般的な問題として、前方監視システム等の代替システムの実用化・規則化が国際的に認められれば、居住区配置の制約が減り、より柔軟な設計が可能となる。

2) 喫水/トリム要件 (MARPOL 条約 13 規則(2))

タンカーには、貨物油タンクにバラスト水を積載することなく安全なバラスト航海ができるよう、貨物タンクとは分離された分離バラストタンク(以下、SBTという。)の設置が求められ、その容積が定められている。ノンバラスト船では、バラスト水を積載しなくとも安全な空荷状態の航海が可能であり、しかも、より厳しい海象においても、前述に規定の喫水/トリム状態より浅い喫水で比較的安全に航行できる等の利点を有している。しかも、船体配置上、バラストタンクとして利用可能な十分なボイドスペースを有する本船型は、種々の空荷状態に対応できる柔軟性のある船型であると考えられる。

3) 船首船底スラミング強度

本ノンバラスト船型特有の船底傾斜及びV型船首形状は、通常最も厳しいと考えられる船首正面波に対しスラミング衝撃を緩和させる効果があるため、在来船型に較べて比較的浅い船首喫水においても十分安全に航行できることが分かった。一方、スラミング衝撃に対する船首船底部の強度は、損傷事例からの逆解析により荷重と強度評価算式が与えられ、これが永年の就航実績により見直され改善されてきたものである。この規則要件の背景には、荒天遭遇時に、船首喫水や船速の調整を行うという前提に条件が存在しているものの、これらの条件に関する指針は共有されていない。本研究開発では、これらの問題に対して、種々のバラスト状態への対応が可能であることから、より高い安全性を追求する為に、海象に応じた所要の船首船底強度及び船首喫水を与える方法を提案した。

4) 縦強度

船体を一本の梁としてその強度を規定する縦強度要件は、船体重量分布及び浮力分布により発生する静水中曲げモーメントに波浪変動圧分布により発生する波浪曲げモーメントを加えたものに対して、十分な船体梁としての強度、即ち、縦部材に発生する縦曲げ応力が許容応力内に収まり、且つこれが十分な座屈安全率を有する必要がある。従来船型に適用されてきた波浪縦曲げモーメントは、あくまで従来型船型に対してパラメトリックに算式を与えるものであり、本ノンバラスト船型の様に船底が広範囲に亘り傾斜する船型に適用できるか否か不明であることから、船体運動計算及び模型船を使用した水槽試験によって、本船型の設計波浪縦曲げモーメントを求め所要の縦強度要求値を示し、船体構造の試設計に反映した。

5) 横強度

従来船型に適用されてきたタンカー船体構造の横部材の寸法を与える算式は、あくまで、実績ある一般的な船型に対して定めたものであり、本船型に対しては、作用する波浪加重を修正して構造解析を行った上で、構造部材の寸法・配置を決める必要がある。本船型用に新たに求めた設計荷重を用いて、日本海事協会の「タンカー構造強度に関するガイドライン(PrimeShip-HULL)」に従って試験解析(3次元 FEM 解析)を実施し、必要な補強を行えば十分な横強度を得る船体構造設計が可能である事を確認した。

6) 疲労強度

疲労強度は、構造部材に作用する応力振幅とその作用回数並び作用方向に大きく影響を受ける。特に、構造不連続部における応力集中が応力振幅を大きくせしめる。本船型では、一般に最も疲労強度が厳しいと予想される船側縦通肋骨において、同部材が配置される二重船側区画(バラスタンク)の内圧の作用頻度が小さく、圧縮応力状態が多い為、従来船型より安全側であることが予想される。実船の設計においては、積付状態を特定した上で日本海事協会の「タンカー構造強度に関するガイドライン(PrimeShip-HULL)」に従って疲労強度計算を実施し、要すれば、ソフトブラケット取り付け等の応力集中緩和措置により、十分な疲労強度を有する構造の設計が可能と考えられる。

7) その他

実船の設計に向け、本ノンバラスト船型の利点を極力活かす実用的な設計を実現する為に、従来船型ではそれほど困難とならなかった機能要件を、従来船型と同等以上の安全性を確保しながら達成できるような規則開発が、今後必要となるものと思われる。

例として、1)で述べた前方監視システムによる船橋視界要件の代替、燃料消費に伴うトリム変化が少ない燃料油タンクの船体中央部付近(貨物エリア内)での配置等が考えられる。従来船型では、これら代替措置を採用せずとも容易に規則を満足することができることから、これら課題に対する検討が十分には行われていない。しかし、本船型においては、これら課題を適切に検討することにより、本船型の実現が比較的容易になるものと期待できる。今後、具体的且つ実際的な設計を行う過程でこれらの課題を解決していく事が、本船型の普及に役立つものとする。

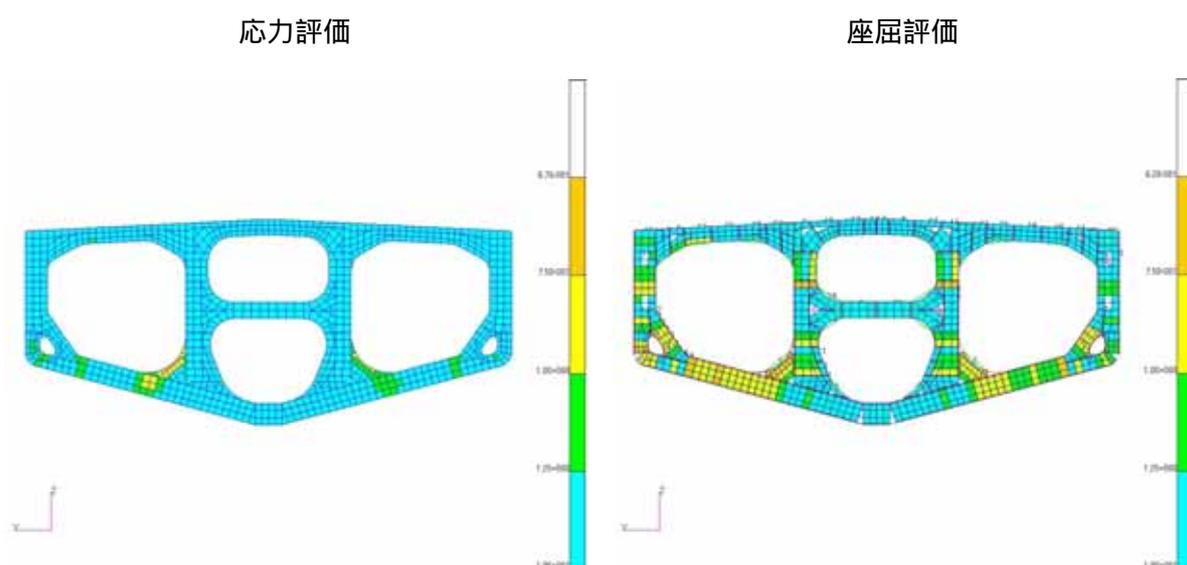


図34 応力評価、座屈評価の結果

14 経済性評価

ノンバラスト船型の経済性について検討するため、イニシャルコストである建造費と就航中のコストである年間収支を試算して比較した。

建造費試算

ノンバラスト船では船底傾斜による満載排水量減少を船幅大型化で補うことから、この大型化とそれに伴う縦曲げモーメント増加のため、船殻重量が増加する。第12章の試設計結果ではスエズマックスタンカーで4,500トン、VLC Cで5,400トンの船殻重量増加と推定され、これによる建造費増加は、各々6億円、7.5億円程度と見積もられる。

ノンバラスト船では、特別な船底形状に対する盤木の問題が指摘されるが、1隻のみの建造と、これら船舶の建造が一般化した時点での建造では、コストアップ要因は、大きな違いを生じることとなる。このため、本試算では、既存のインフラストラクチャーに整合させるための費用は、考慮しなかった。

他方、在来船型については、バラスト水処理装置搭載が義務付けられるが、それに関する装備基準、価格等が未決定であることから、それらの費用を加味していない。

以上から、建造費としては、ノンバラスト船型の船殻重量増加による建造費増加のみを考慮した。

年間収支試算

第4章でノンバラスト船型は在来船型に比べて推進性能が向上することを示したが、それによる年間収支向上を試算した。

試算の基礎となる燃料価格、為替レート等は変動するが、表6の計算条件に示す値を使用した。

この年間収支試算に当たっては、推進性能向上を馬力減少による燃料費減少として算定する方法、速力増加に反映させて航海数の増加による運賃収入増加として算定する方法等が考えられる。幾つかの試算結果を表6に示す。

試算1: 在来船型及びノンバラスト船型の満載状態の速力が同一となるように主機関馬力を選定するものとし、そのときの年間運賃収入差と年間燃料費差の違いを算定した。この場合、ノンバラスト船型の空荷状態の速力が在来船型に比べて大幅に向上するので、ノンバラスト船型の年当たりの航海数が多くなって運賃収入が増加する。表6に示すように、年間運賃収入差としてはスエズマックスタンカーで69百万円/年、VLC Cで86百万円/年の増加である。他方、年間燃料費差は、各々、14百万円/年、20百万円/年の増加で済むから差し引きの年間収支差は、スエズマックスタンカーで55百万円/年、VLC Cで66百万円/年となり、ノンバラスト船型は在来船型に比べて年間収支が改善されることが分かった。

試算2: 在来船型及びノンバラスト船型の主機関馬力を同じとした場合の試算である。ノンバラスト船型の空荷状態の速力は向上するが、満載状態の速力が在来船型に比べて少し低下するのでノンバラスト船型の年当たりの航海数増加が試算1に比べて若干少なくなり、年間収支改善は試算1に比べて小さい。

試算3及び4:試算法は試算2と同じであるが、図27に示した船幅を50mに抑えたケース(印)を試算3,4として表6に示す。試算3では、馬力減少が大きいので年間収支改善もかなり大きい。

表6 年間収支の試算

			スエズマックスタンカー	VLCC
計算条件	航路		アフリカ西岸 ～北米東岸	ベルシャ湾～ 日本
	航海距離 [Sea mile]		5,200	6,800
	燃費率 [g/ps/h]		125	123
	燃料単価 [\$/ton]		150	
	年間稼働日数 [day]		355	
	World Scale		150	100
	Flat Rate [\$/ton]		11.3	13
	為替レート [円/\$]		115	
	cargo [kton]		130	250
年間収支差 百万円	試算1 満載速力=一定	年間収入差	69	86
		年間燃料差	14	20
		年間収入差-年間燃料差	55	66
	試算2 機関馬力=一定	年収差	26	47
		年間燃料差	0	-1
		年収差-年間燃料差	26	48
	試算3 機関馬力=一定 B=50m,d _F =17m	年収差	55	
		年間燃料差	0	
		年収差-年間燃料差	54	
	試算4 機関馬力=一定 B=50m,d _F =16m	年収差	11	
		年間燃料差	0	
		年収差-年間燃料差	11	

以上の試算結果を併せて図35に示す。横軸は の建造費増加額、縦軸は の年間収支差である。図中の線は、現在価値法による回収所要年数を示す。年金利が3%の場合について回収所要年数が10年、20年の線を示している。図の左上が回収年数減少の方向である。なお、図中の試算3,4の建造費増加額は、図27に示した船殻重量増加量から、建造費増加額は船殻重量増加量に比例するとして求めた。

本図を見ると試算1の場合の回収年数は、スエズマックスタンカーで14年弱、VLCCで14年強である。また、図中に 印で示したように船幅を50mに抑えそれを満載喫水の1m増加で補うようなノンバラスト船型では10年弱で済むことが分かる。

以上の結果から、ノンバラスト船型は、在来船型で必要となるバラスト水処理装置の設備費及び運用費を考慮しなくても、在来船型に対して推進性能向上によって建造費増を賄うことが可能なことが判明した。図35で判るように、回収年数は船型の選定により変化すると共に、左上向きの矢印で示したように、船殻重量軽減、推進性能向上により改善することも可能である。なお、為替レート、燃料価格、運賃指標が変化すると、上記の結論も変わってくることに注意しなければならない。

なお、最近 IACS で採択された船体共通構造規則 CSR(Common Structural Rule)では、大型のバルクキャリア及びタンカーで在来船より船殻重量の増加を余儀なくされることが判明している。ノンバラスト船に CSR を適用した場合、更なる船殻重量増加の要素はあるものの、検討の結果、ノンバラスト船型は、在来船型に比べて、その影響が軽くなることが判明している。

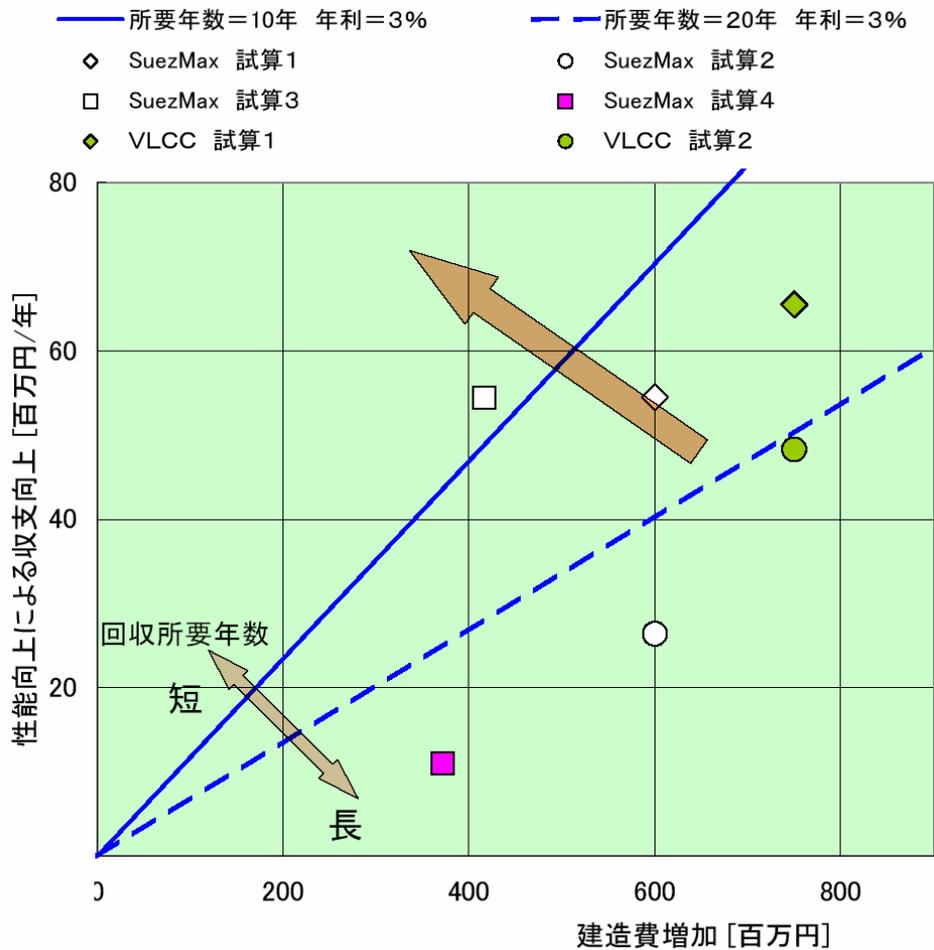


図35 ノンバラスト船型の経済性の検討
 現在価値法による回収所要年数の評価
 本図では、在来船型に必要となるバラスト水処理装置の設備費用、運転経費は考慮していない。

15 ま と め

本研究開発では、バラスト水に含まれる海洋生物の海域間移動による生態系破壊の防止を目的にバラスト水の海域間移送をしないで済む船型として、

- 1) バラスト水を積載しない空荷状態で、在来船型のバラスト状態と同等の耐航性能を有すること、
- 2) 経済性から燃費を5%以上節減すること

を目標として、

- 1) 大きな船底傾斜を有する幅広船型で、
- 2) V型船首形状を有し、直径が制限されたプロペラを備えた船型

を開発した。その主な結論は下記のとおりである。

a) 耐航性能

バラスト水を搭載しない空荷状態でも在来船型の空荷状態と同等の耐航性能を有する。

b) 推進性能

推進性能が在来船型に比べて6%以上向上した。

c) 操縦性能

IMO 操縦性基準を満たしている。

d) 船殻重量

船殻重量増加により建造費が増加するが推進性能向上により15年程度で回収できる。

以上のことから、本研究開発目標は達成したと考えられる。

バラスト水管理条約では、在来船型に対して、バラスト水処理設備の装備が義務付けられ、バラスト水の漲排水の都度、浄化作業が求められる。これに比べ、ノンバラスト船型は、バラスト水処理設備を装備しない状態の在来船型と同等の経済性を有していることが確認されたもので、バラスト水処理装置の装備、運用に要する経費、更にバラスト水洋上交換に要する労力を考えると、ノンバラスト船型の優位性は明らかである。

本研究開発では、スエズマックスタンカー及びVLCCをモデルとして比較検討を進めたが、推進性能、波浪中の安全性、操縦性能といった基礎的な条件について広範囲に検討を進めると共に、船幅と満載喫水を変えたときの諸性能の変化についても多くの知見が得られ、バラスト水を全く積載しないノンバラスト船型の応用として、経済性・運用面から、深い喫水の選定、小容量のバラスト水積載との併用といった選択肢についても、総合的な判断を加える一助となった。また、中小型タンカー、鉱石運搬船、バルクキャリア等の他の船型・船種への応用にも十分に役立つ研究であったといえる。

本研究開発は、革新的な技術の確立を求めたものであり、以下に示すような、既存のインフラストラクチャーによる制約は、十分には満足していない。(既存のインフラストラクチャーを前提とすれば、革新的な技術開発は阻害されることが多い。)

- ・既存の造船設備に対して船底傾斜部の建造、支持方法についての課題もあるが、船体中央部の平底部の幅の拡大、船首尾における船底形状の変更等、色々と考えられるので、実際の船の建造に際して十分な検討が望まれる。
- ・空荷状態では船底傾斜部が水面上に出て岸壁設備、曳船等との兼ね合いが不都合になる場合がある。これに対する最も安直な解決策はノンバラスト船側でのバラスト水積載による喫水増加であるが、ノンバラスト船型の特質を十分に生かすためには、岸壁設備・曳船側での対処が必要となる。

バラスト水の処理等に関する条約に基づく詳細規定、及びこれらの規定を満足する処理装置の製品開発が実現していない現在、これらの処理装置の設置に必要なスペース、設置費用、運転費用等、不明である。他方、ノンバラスト船型は、これらの装置を装備することなく、あるいは必要最小限の容量でバラスト水移送に伴う海洋生物移動という海事産業に課せられた責務を解決する手段として有効であることから、環境に優しい全く新しい次世代型の船舶として、今後、できるだけ早くノンバラスト船型が建造され、海洋環境保全に大いに貢献することが期待される。

最後に、本研究の実施にあたってご支援いただいた旧運輸施設整備事業団、(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構及び日本財団、また、ご指導いただいた国土交通省に厚く御礼申し上げます。

この報告書協定の交付による日本財団の助成金を受けて作成しました。

発行	平成 18 年 3 月
発行所	財団法人 日本船舶技術研究協会
住所	〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目 7 番 2 号 虎の門高木ビル 5 階
電話	総務グループ 03-3502-2132 企画・研究開発グループ 03-3502-2133
FAX	03-3504-2350

