

製品開発

船体抵抗低減技術の調査検討と主要目の最適化

夏城 力*

Riki Kashiro



船舶の性能向上と環境負荷低減を図るため、船体抵抗低減に関連する技術を幅広く調査し、船体主要目最適化、空気潤滑、境界層制御、バラスト状態の最適化等の抵抗低減策および各種方法の組み合わせを検討した。今回は、主に調査概要と主要目最適化に関する調査結果を報告する。

調査と検討した主な抵抗低減技術を各々列記し、紹介をする。また、主要目について、肥大度という設計変数を考える場合、船は大きい方が良いのか。その疑問を単位輸送量当たりのエネルギー消費とコストの視点で検討し、就航船実績データベースの分析から、抵抗・主機出力・載貨重量・コスト等の推定に基づくケーススタディまで試み、最適肥大度範囲等設計の知見を得た。

1. 調査検討の全体概要

船の設計において、船舶が前進する時に受ける船体抵抗を減らすことは、少ないエネルギーで早く走ることに繋がるため、恒久の省エネ課題である。近年、燃料消費量の低減は船主の運航経済性向上だけでなく、環境負荷低減にも寄与するため、益々重要になってきた。

昨年度に社内調査研究開発の一環として主に下記の調査検討を実施した。

- ① 船体抵抗低減に関連する技術の調査
- ② 船体主要目の最適化
- ③ バラスト状態の最適化
- ④ 段差による境界層制御
- ⑤ 空気潤滑法の応用
- ⑥ 各種抵抗低減技術の組み合わせ応用

この報告では、上記の概要を述べて、主に①と②の内容に焦点を当てて詳しく説明する。

2. 船体抵抗低減に関連する技術の調査

本調査検討では一般的な船型改良以外に、既に応用されている技術からまだ研究開発途中の技術まで、船舶の分野

から自動車・航空機等他分野まで、流体中に動く物体が受ける抵抗の低減技術^{1), 2), 3)}を広く調査した。特に弊社が主に建造するばら積み貨物船とタンカーに適用することに主眼を置いて調査内容を選定した。

現時点の検討結果では実用困難な技術でも、将来の技術進歩、環境条件の変化により実用できる可能性もあり、諦めずに今後もフォローし続けることが必要と考える。

今回はすべての抵抗低減技術を網羅するものではなく、調査したものを抜粋して概略紹介する。

① 船体主要目の最適化

長さ、幅、喫水、速力、方形係数等の主要目の選択によって船体抵抗がかなり異なる。単純に船体抵抗の絶対値だけではなく、単位輸送量当たりコスト等様々な視点で最適化することが考えられる¹⁾。船型開発の上流段階で、少ない費用で大きな改善効果を得る可能性がある。

3章で詳しい検討例を説明する。

② 吸い込み或いは吹き出しによる境界層制御

能動的な境界層制御として吸い込み或いは吹き出しによる剥離の防止で粘性抵抗を減らす方法があ

る^{2),3)}。一例として、飛行機の後方にプロペラを配置し、その吸い込み効果で機体後部の剥離を遅らせ、抵抗を減らす設計案^{4),5)}が発表されている。他にも、境界層制御に関わる抵抗低減技術がたくさん報告されており、以下③～⑥で幾つか紹介する。

③ 微細表面構造

古くから様々な微細表面構造を用いて摩擦抵抗を減らす研究報告があった。受動的な境界層制御としてはリブレット^{2),3)}、ナノサイズの超親水性或いは超撥水性表面構造^{6),7)}、弾性皮膜^{2),3)}、波状表面^{8),9)}等がある。表面構造に関して、生物模倣¹⁰⁾の視点から、蓮の葉、サメの肌等をヒントにした技術も報告されている。近年船舶への応用が増えている低摩擦塗料も微細表面構造を利用したものと理解できるが、表面粗度を小さくするものも、逆に微細凹凸を付けるものもある。船用低摩擦塗料は直接抵抗を減らす効果の外、更に生物付着防止の働きによって就航後の抵抗増抑制にも寄与すると考えられる。

④ 自然層流^{2), 3), 4)}

一般的に乱流状態に比べ、層流状態で摩擦抵抗が少ないため、できるだけ層流状態を長く保持する方法である。飛行機翼に応用する例があるが、船の場合、レイノルズ数 Re が高すぎるため、今までの研究報告¹¹⁾で適用困難とされている。

⑤ 乱流促進¹²⁾

摩擦抵抗を減らすため何故層流でなく、乱流にするのか。一見④と逆のようである。理由は、先ず船体後方で流れが剥離すると圧力抵抗が増える現象、それから、乱流は層流に比べ、摩擦抵抗係数が相対的に高いが、剥離しにくい性質があるためである。剥離が起りやすい後流で層流から乱流に変化させて剥離を遅らせ、全抵抗を減らせる可能性がある。例えば、ゴルフボール表面にディンプルがある。その理由のひとつはその凸凹で飛んでいるゴルフボール周りの空気流れに乱流を促進し、剥離の抑制による抵抗低減で飛距離を伸ばせることである。

⑥ 波動表面^{3), 13), 14)}

③で静止状態の波状表面に触れたが、流れの方向に進行する波状表面を用いて摩擦抵抗を低減する研究も報告されている。

⑦ 船体洗浄

海洋生物の付着等で船体表面が汚れ、抵抗が増える

ことは良く知られている。その対策として防汚塗料を使うのは言うまでもなく、定期的に表面を洗浄することは非常に効果的である。

3. 船体主要目の最適化

3. 1 市場要因と主要目の推移に関する調査

一般的に、貨物船は船速が早いほど船体抵抗が増え、主機出力、トータル燃料消費、単位輸送量（載貨重量×輸送距離、即ちトンマイル）当たりの燃料消費も多い。一方、載貨重量が大きいほど、船体抵抗、主機出力、トータル燃料消費が多くなるが、スケール効果で単位輸送量当たりの燃料消費も輸送コストも逆に安い傾向にある。

数年前から、原油・船用バンカー価格の高騰を背景に、一部の船の設計速力が若干低く設定されたが、変化幅は限定的であった（第1図、第2図）。一方、実運航において、市場の動きに敏感に反応して、減速運転の動きは拡大したが（第1表）、直近の一年でバンカー価格が下落したため、一部緩和された。尚、減速運転によって、同じ船型で同じ期間に同じ輸送量を実現するには、隻数を増やす必要があるが、トータル燃料消費はほぼ速度の二乗に比例して下を見ると見込まれるため、燃料節減と環境負荷低減の観点から、減速運転が好ましい。船の設計では市場の動向と顧客のニーズを捉えて設計速力、減速運転への対応能力を決定することは今後も重要である。

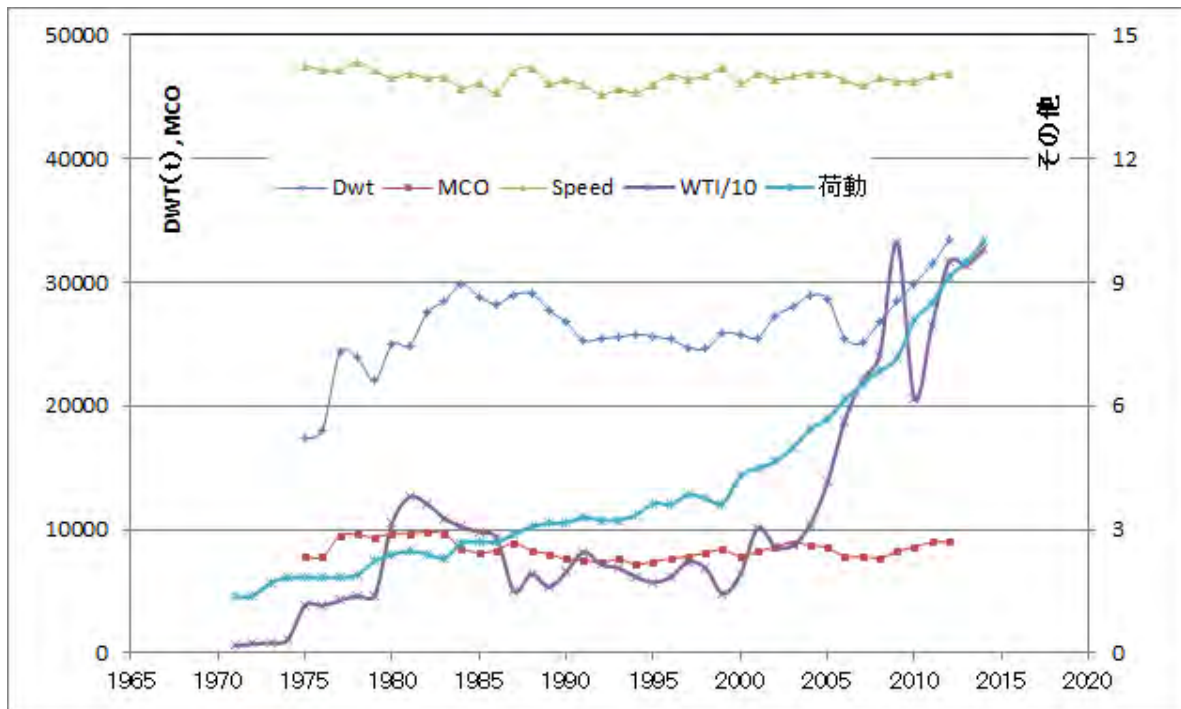
載貨重量に関しては、十年程前から新興国の著しい経済発展を背景に、海上輸送量が高い伸び率で増加し、特に2008年秋のリーマンショックまで海運・造船の好景気が続き、船型の大型化が急速に進んだ（第1図、第2図）。

例えば、従来のパナマックス型ばら積み貨物船は7万5千重量トン以内が主流だったが、7万7千重量トン前後の船が生まれて間もなく、更に8万重量トンを超える、いわゆるカムサマックスがシェアを伸ばして来た。

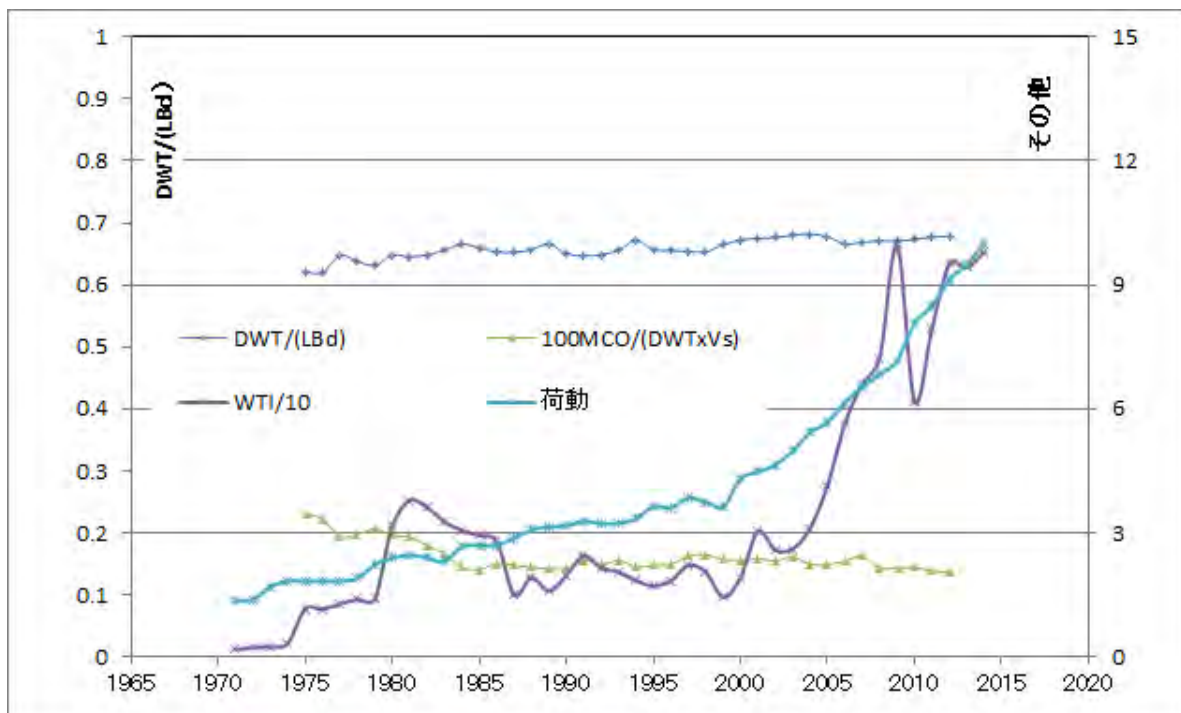
輸送効率向上のニーズと拡大する輸送需要を背景に、市場ではより大きい船を好む風潮がある。

新規則適用による軽荷重量増加への対応と載貨重量拡大の流れの中、主要寸法の長さ、幅、喫水の拡大を伴う場合もあれば、肥大度を上げる場合もあると考えられる。

本調査で、竣工年月に沿って市場要因として原油価格と荷動きを、主要設計変数として速力、載貨重量(DWT)、DWT肥大度、単位輸送量（トンマイル）当たり主機仕事量の推移を、プロットして（第1図、第2図）種々考察した。



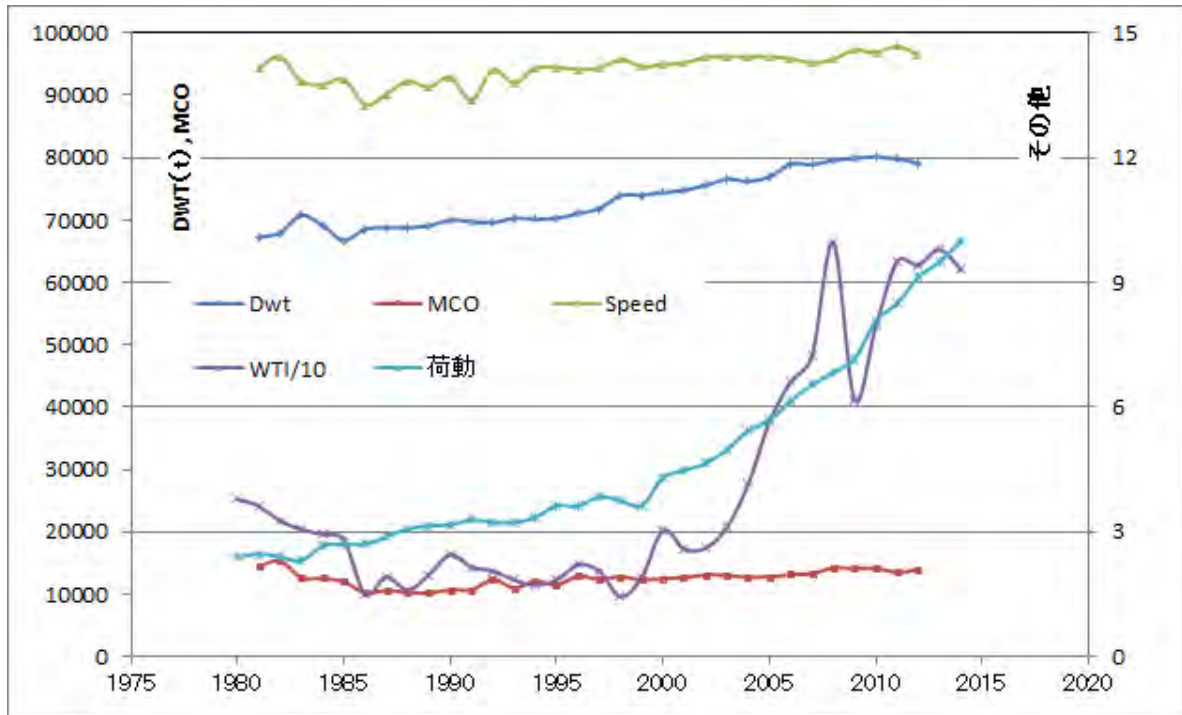
(1) 載貨重量 (DWT, トン), 主機出力(MCO, kW) , 設計速力(Speed, kt)



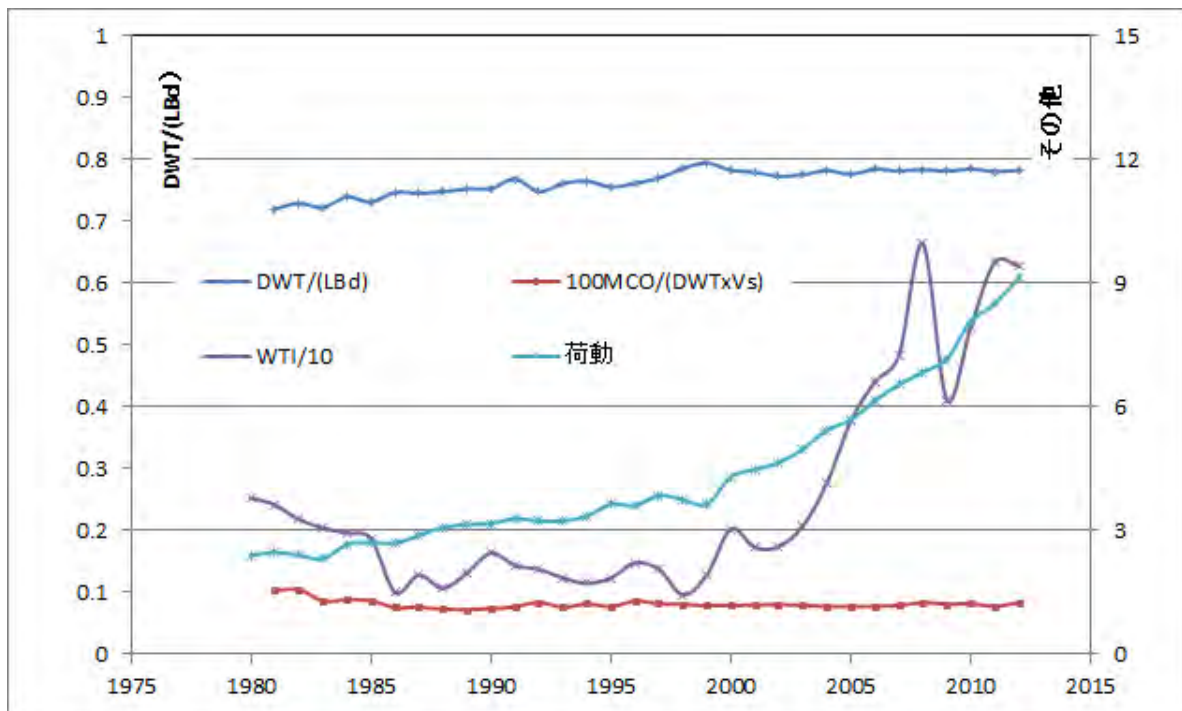
(2) DWT 肥大度=DWT/(LBd), トンマイル当たり主機仕事量=100MCO/(DWTxVs)

第1図*¹ 市場要因と1万トン以上4万トン以内のばら積み貨物船の設計諸変数の推移

(*1: Clarkson Ship Register に基づきデータを分析した)



(1) 載貨重量 (DWT, トン), 主機出力(MCO, kW) , 設計速力(Speed, kt)



(2) DWT 肥大度=DWT/(LBd), トンマイル当たり主機仕事量=100MCO/(DWTxVs)

第2図*1 市場要因と6.5万トン以上8.3万トン以内のばら積み貨物船の設計諸変数の推移

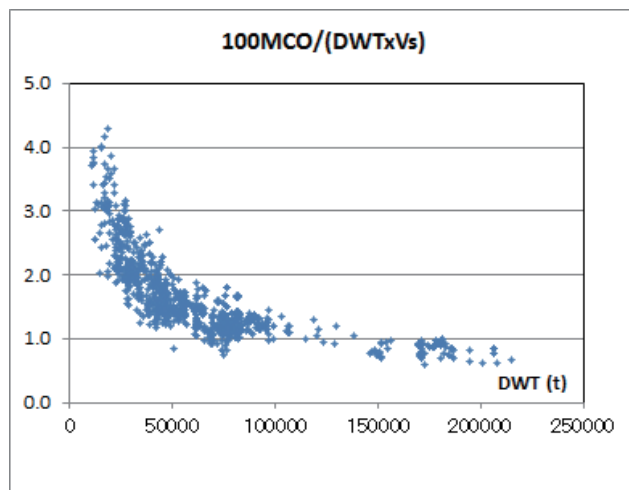
第1表 平均主機出力比(最大出力MCOに対する比率)の推移 (IMO MEPC 67/6 Annex に基づきデータを抜粋した)

船種	DWT範囲(t)	2007	2012
ばら積み 貨物船	0-9999	92%	70%
	10000-34999	68%	59%
	35000-59999	73%	58%
	60000-99999	78%	60%
	100000-199999	77%	57%
	200000以上	66%	62%
タンカー	0-4999	85%	67%
	5000-9999	64%	49%
	10000-19999	61%	49%
	20000-59999	72%	55%
	60000-79999	83%	57%
	80000-119999	81%	51%
	120000-199999	83%	49%
	200000以上	90%	54%

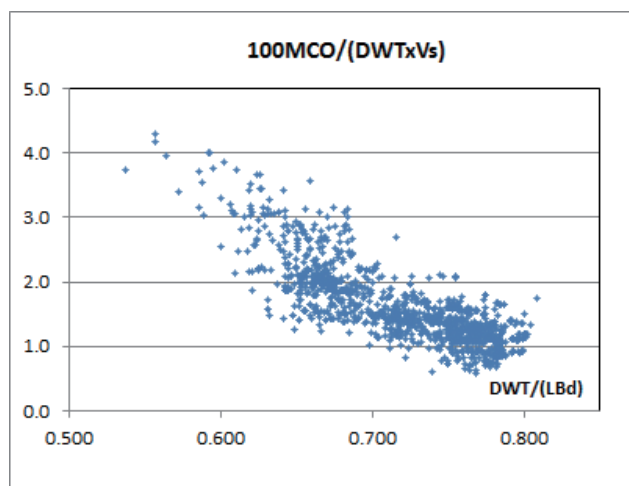
一般的に使う船の肥大度, 方形係数Cbは公表されるデータが殆どないため, ここではDWT/(LBd)という指標を導入し, DWT 肥大度と定義して本調査で肥大度の概略傾向を見る値とする. 荷動きは, トンマイルで表した国際海運輸送量を2014年のデータで割って10倍にした値である. 原油価格の指標はアラビアン・ライトの公示価格(\$/bbl)を10で割った値を使うが, 1980年以前の価格はブレンド, 1980年からの価格はWTIを使用した.

考察の一例として, 全体的な傾向で見ると, トンマイル当たり主機仕事量は載貨重量・肥大度の上昇, つまり船型の大型化に伴って小さくなり(第3図, 第4図), 燃費効率が改善するが, 細かいレンジで分析すると, ほぼ同じ主要寸法(船長, 船幅)の船型範疇で載貨重量・肥大度の上昇に伴い, 燃費効率が単調に変化する傾向は見られない(第5図, 第6図). 従って, 載貨重量の拡大は重要であるが, 寸法が制限される個別設計では, 載貨重量・肥大度は必ずしも大きければ良いとは限らないため, 十分吟味する必要がある.

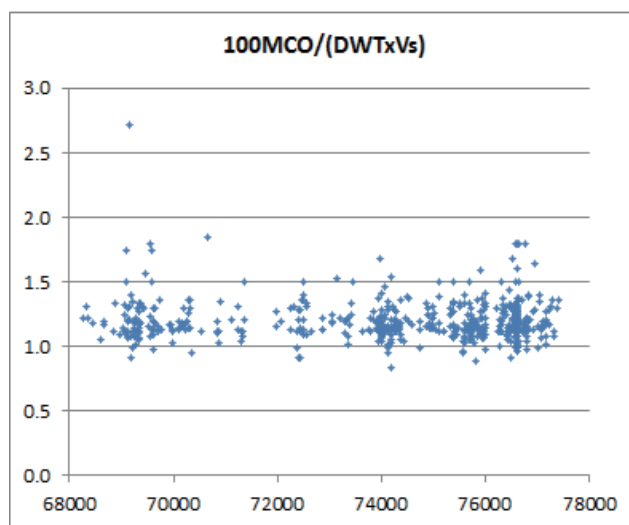
過去のデータは将来を完全に示すものではなく, 制約するものでもないが, 多くの実績の裏にたくさんの要因が複雑に絡み合って結果として出ているため参考になる.



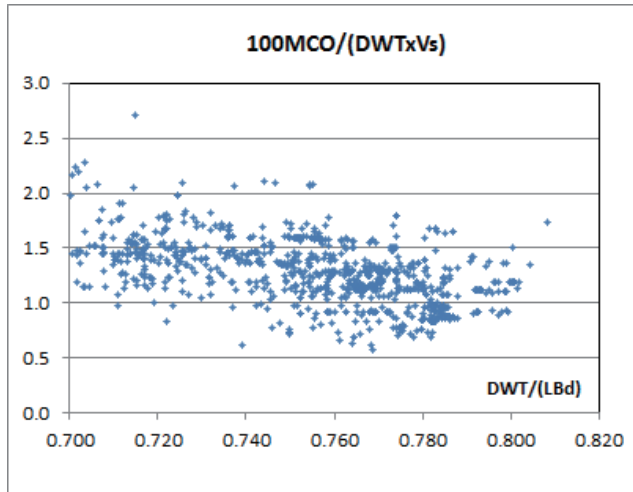
第3図*1 日韓主要造船所が建造したばら積み貨物船の燃費効率と載貨重量(広域)の相関



第4図*1 日韓主要造船所が建造したばら積み貨物船の燃費効率とDWT肥大度(広域)の相関



第5図*1 日本主要造船所が建造したパナマックス型ばら積み貨物船の燃費効率と載貨重量(狭域)の相関



第 6 図^{*1} 日韓主要造船所が建造したばら積み貨物船の燃費効率と DWT 肥大度 (狭域) の相関

3. 2 船体主要目最適化試計算

船の設計では、上流の段階ほど製品の性能・コストへの影響が大きい。船型の初期計画段階で、主要目を如何に最適化し、性能とコストのバランスを取るかが肝要である。船型サイズ (載貨重量) の拡大に当たり、長さ、幅、喫水と肥大度 (特に説明がない場合 C_b を指す) を大きくすることが考えられるが、長さ、幅、喫水は港湾・航路の制約を受ける場合が多い。一方、肥大度は、大きくなれば直接載貨重量の拡大に繋がるが、船体抵抗が増え、燃料消費も多くなり、単位輸送量当たりの燃料消費、或いは単位輸送量当たりのコストで考える輸送効率はどうか単純に判断できない。ここで上記主要寸法を固定し、肥大度のみを設計変数としてその最適化を考えてみる。

ケーブサイズばら積み貨物船を例に、主要寸法を一定に抑えた上で、肥大度を変化させ、載貨重量を増減させるケーススタディを行い、トンマイル当たりの燃料コスト及びトータル輸送コスト指数等の変化傾向を調べた。尚、このトンマイル当たり燃料コストはほぼトンマイル当たり主機仕事量にも EEDI にも比例する。船舶の輸送コストを正確に評価する情報は当方で十分把握していない故、初期コスト (船価) に関連する償却分、船員費を含む船舶管理費 (年間で定額と仮定)、運航費の中でウェイトの大きい燃料コストの合計をトンマイル当たりコストに換算した数値をトータル輸送コスト指数として使った。

バンカー価格レベルによってトータルコストの傾向が変わるため、バンカー価格を \$100 \sim 900/t\$ の間で幾つか設定

して傾向を調べた。詳細計算過程を省略するが、抵抗・主機出力・載貨重量・コスト推定に基づく最適化計算結果を第 7 図、第 8 図にまとめた。尚、別途行った石油価格動向分析から、昨年夏から今日までバンカー価格が低レベルで推移しているが、長期的に中レベル (\$400/t\$) 以上のバンカー価格で推移する可能性が高いと推測する。より正確な計算をすれば、また具体例によって若干数値が異なるが、大体の傾向はこの結果から掴めると考える。今回のこの計算から得た主な結論を下記する。

- トータル製造コストは、肥大度が小さい方が低く、単位載貨重量当たり製造コストは、肥大度が大きい方が低い。
- トンマイル当たりの燃料コストでみると、定性的な傾向はバンカー価格に関係なく、最適となる肥大度が存在し、恐らく最近の建造船より低いと推測する。
- トータル輸送コスト指数でみると、バンカー価格が低い (\$100/t\$) 場合、肥大度を上げて、載貨重量を大きく取ることが採算上有利、中間レベル (\$200 \sim 300/t\$) では肥大度の影響が小さく、バンカーが高い (\$450 \sim 900/t\$) 場合、採算が最適となる中レベルの肥大度が存在し、恐らく最近の建造船より低いと推測する。また、バンカー価格の上昇に伴って、最適値が若干小さくなる傾向が見られた。

4. その他主要検討内容の紹介

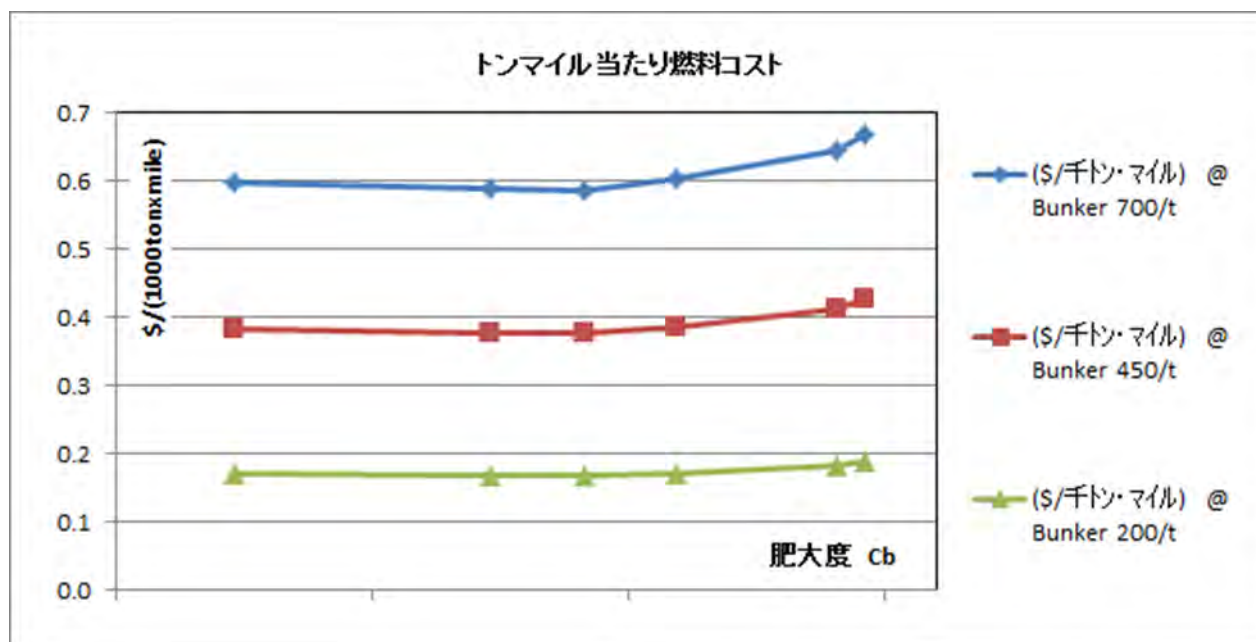
① バラスト状態の最適化¹⁾

バラスト状態で排水量を減らせれば、一般的に抵抗が少なくなると予想される。具体的には、第 15 号で紹介したバラスト水低減船型¹⁵⁾のような形状の工夫、喫水・トリム調整で実現可能である。

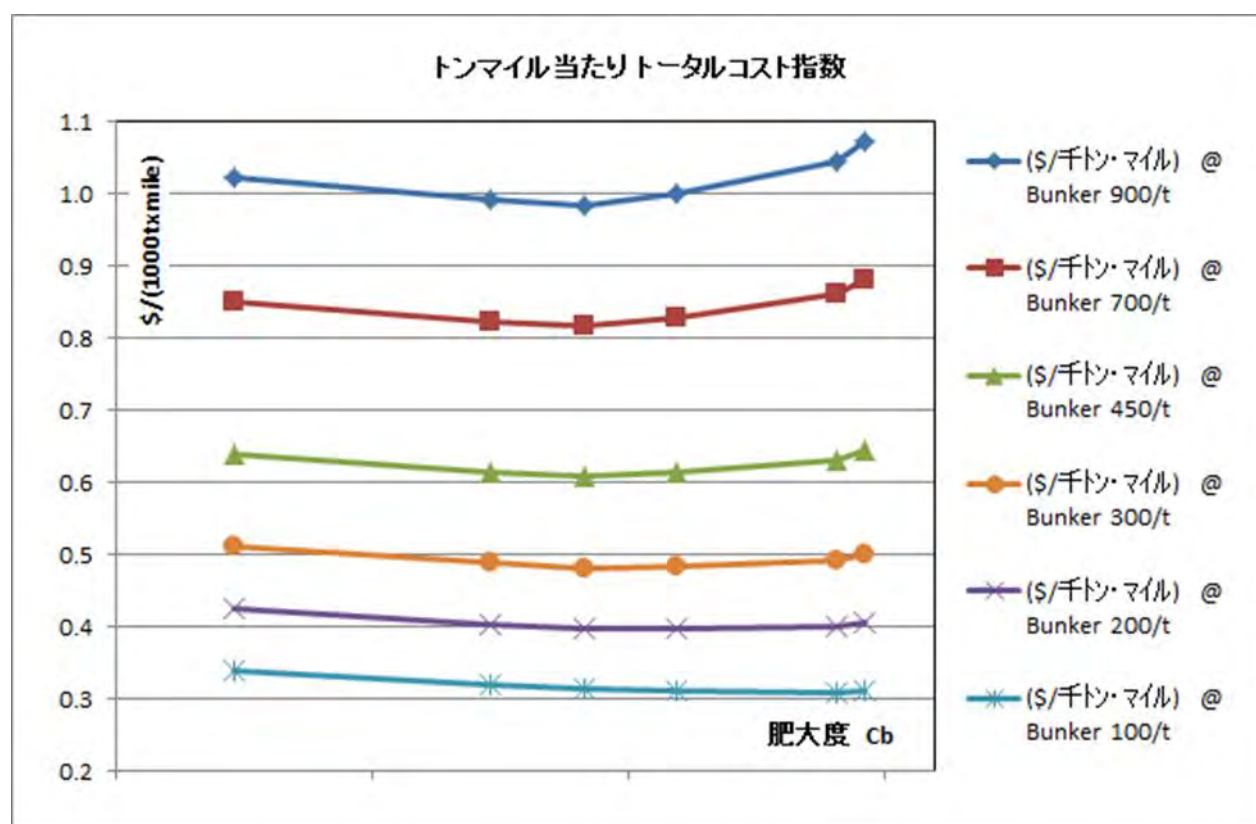
尚、今回の調査検討で、水槽試験を実施し、喫水・トリム調整により抵抗低減効果を確認した。また、喫水・トリム調整に対応する積み付け状態、船橋視界対策も検討した。

② 段差による境界層制御

境界層制御方法として、物体表面に段差 (バックステップ) を設けて、粘性抵抗低減を図る方法及び船体船首部に適用する可能性を検討した。それに関連して、公表された過去の平板等の実験や CFD 解析の報告を調査し、分析した。また、平板のケースについて CFD 解析による検証も試みた。



第7図 トンマイル当たりの燃料コストの変化傾向



第8図 トンマイル当たりのトータル輸送コスト指数の変化傾向

③ 空気潤滑法

船体表面付近の水に空気泡を混入させ、或いは空気膜層を作らせ、船体の受ける摩擦抵抗を減らす手法である^{2),3)}。各手法には混入する空気の形態、混入方法と効果等によって其々特徴があり、適用しやすい船が異なる。特に弊社が主に建造するばら積み貨物船とタンカーに適用することを目指して、各種方法を調べ、効果、問題点と対策を検討した。

④ 各種抵抗低減技術の組み合わせ応用

将来の抵抗低減コンセプトとして、船体全体には初期計画における主要目（特に肥大度、速力）と船型の最適化、トリム最適化（特にバラスト航海時）、低摩擦塗料の適用、船首部には空気潤滑法と段差による境界層制御、船尾にはプロペラによる境界層吸引効果の利用、という組み合わせ応用を検討した。

5. 提言

造船はよく経験工学と言われるが、古い経験のみでなく常に新しい技術にも挑戦し、経験の宝庫を増やして来た。成功も失敗も含めて過去の業界内外の経験を参考にして、新しい技術を創出することは造船技術者の責任であり、やり甲斐である。今回、異分野も意識して広く船体抵抗低減に関連する技術を調査し、それらの応用を検討すると共に将来の技術構築のヒントにもしたいと考える。

減速運転、喫水・トリム等積付状態の最適化、船体洗浄等の抵抗低減策は運航的手法であるため、造船所に関係ないと考えがちであるが、設計者としてはこれらの運航的手法が実施しやすいような船を目指し、設計を工夫すべきと考える。

今回の主要目最適化検討から、肥大度はトンマイル当たりの燃料コスト及びトータル輸送コストに大きく影響する傾向を確認できた。船型開発で経済性をよく評価して適切な肥大度と載貨重量を決定することは大変重要である。

参考文献

- 1) 村橋達也: 出力低減の方法 新しい造船学(日本造船学会 第6回夏季講座) 1980
- 2) 田古里哲夫: 粘性抵抗現象法 粘性抵抗シンポジウム 1973
- 3) 永松哲郎: 乱れや剥離の制御 船体まわりの流れと流体力(第3回推進性能研究委員会シンポジウム) 1989
- 4) (公益法人) 航空機国際共同開発促進基金: エコな航空機を実現するための空力技術 平成23年度航空機関連動向解説事項解説概要 23-5, 2011
- 5) MIT, et al.: NASA N+3 MIT Team Final Review (2010), http://aviationweek.typepad.com/files/mit_n3_final_presentation.pdf, 2010
- 6) Kripa K. Varanasi: Nano-engineered Surfaces & Coatings for Efficiency Enhancements, Ship Design Course by MIT & ABS, Ships of the Future, 2011
- 7) 高原淳: 生物の表面に学ぶ防汚・潤滑のための新しい高分子材料 日本マリンエンジニアリング学会(JIME)海洋環境研究委員会第1回研究会 2012
- 8) 笹島秀雄他: 波状粗面の摩擦抵抗 造船協会論文集第95号 昭和29年5月造船協会春季講演会 1954
- 9) Okuyama, et al.: Effect of wavelength on skin-friction drag in turbulent channel flow over sinusoidal wavy wall by PIV measurement, Proc. the 16th International Symposium on Flow Visualization (ISFV16), 2014
- 10) 科学技術動向研究センター: 生物の多様性に学ぶ新世代バイオメテック材料技術の新潮流 科学技術動向 2010年5月号 2010
- 11) 高田茂俊: 船体表面の境界層を層流に保つ事の可能性について 長崎船型試験場研究報告 1954
- 12) Levin Joseph Donnelly: Reduction of Ship Resistance through Induced Turbulent Boundary Layers, Florida Institute of Technology, 2009
- 13) 深瀬康二: 進行波状壁面入力による乱流摩擦抵抗低減 第60回応用力学講演会 2011
- 14) L. Shen, et al.: Turbulent Flow over a flexible wall undergoing a streamwise travelling wave motion, Journal of Fluid Mechanics Vol. 484, pp197-221, 2003
- 15) 夏城力: 燃費消費も環境負荷も少ない新船型コンセプト 名村テクニカルレビュー No. 15, pp. 16-21, 2012