

B05 粘性抵抗低減を考慮した 船体中央断面最適化システムの構築

新井 大介 (指導教員：柴原正和, 池田良穂)

Development of System for Optimization of Mid-ship Section to Reduce
Viscosity Resistance

by Daisuke Arai

Abstract

Minimum resistance is one of the most important factors in hull form design. If a completed optimization method of hull design with minimum resistance could be developed, time to design would be shorted dramatically and this method would help the naval architect.

In this paper, we focus on the optimization of hull form design for minimization of viscosity resistance. Viscosity resistance takes the greater part of resistance in full hull form. So, reducing viscosity resistance is very important in designing hull form.

There are many design variables and complicated constraint conditions in ship structure design. Moreover, their relations are so complicated and some of them rely on the designer's tacit knowledge.

The proposed method is applied into the real ship structure and genetic algorithm is adopted as an optimization method.

1. 緒 言

地球の環境破壊や温暖化が問題視されている今、環境保護やCO₂排出の抑制が急務と考えられ、さらに原油価格の持続的な上昇トレンドが重要なポイントとなっている。いずれも船の省エネ化をさらに進めることを必要としているが、次世代の船舶を考えるためには、現在の船のもつ問題点を明らかにして、その解消を図ることが重要となる。

最近の船の断面が矩形に近い船殻形状をしているのは、船の長さ、幅、喫水に関する制約条件に対し、最も大量の貨物が積める船殻形状が矩形の横断面であることや、建造の容易さが主な理由と考えられる。しかし粘性摩擦抵抗を低減するためには矩形形状の船殻断面から円状に近い船殻断面にすることが効果的である。断面が丸いことで波による船体運動性能の低下が指摘される一方、復元力の取り方や減衰力の付加によって解決できることも提案されている¹⁾。そこで本研究では、遺伝的アルゴリズムを用いて粘性抵抗低減を考慮した船体断面形状の最適化システムを構築し、開発した最適化システムを用いてタンカーの中央断面形状の最適化を実施することで、提案手法の有効性、妥当性を示す。

2. 船殻形状の最適化

本研究では、造船の設計・生産問題の最適化において有効とされている遺伝的アルゴリズム(以下 GA と略す)を最適化手法として用い、船体中央断面設計などの大規模な最適化システムを構築した。まず始めに、ロンジ部材を等価板厚としてモデル化する。計算した等価板厚を一定と仮定し、船殻形状の最適化を行う。ここでは、浸

水表面積の最小化を目的とする。次に求めた船殻形状を使用し、等価板厚をロンジ材へと戻す。その際、ロンジサイズとロンジ間隔の最適化を行う。ここでは、縦通部材重量最小化を目的とする。このように2度に分けてGAによる解析を行うことで、浸水表面積最小を最優先とし、さらにその船殻形状の中で最も縦通部材重量が小さい船体中央断面形状を決定することができる。

2.2 等価板厚を用いた浸水表面積最小化

2.2.1 解析モデル

Fig.1の左図は従来船シングルタンカーの縦通部材を図示したものである。ここでは、縦通防撓材の付いた外壁、隔壁部分を重量が等しくなるような等価板厚としてモデル化した。その等価板厚寸法をFig.1の中央に記載する。また本研究では、断面係数を縦曲げ強度の評価に使用しているので、モデル化した際の計算誤差を調べるために、設計図データの断面係数とモデル化後の断面係数を比較した。その結果、2%以内の差であることを確認した。新型船を設計するにあたって設計変数は、より一般的な断面形状を表現するために、Fig.1の右図のように船側直線部長さ $a(m)$ 、曲線部半径 $r(m)$ 、船底直線部長さ $b(m)$ 、の3つを仮定し、それぞれの最適値をGAにより求めた。新型船の等価板厚は、従来船と対応したものを使用した。

2.2.2 解析条件

ここでは、縦部材の重量とその他の重量に分けて考え、従来船のその他の重量は新型船のその他の重量と等しくすることで載荷重量は一定であると仮定した。GAで使用したパラメータは、遺伝子数：1000個、世代数：1000世代、交叉確率：0.7、突然変異確立：0.03と設定した。一般に遅い速度で進行する船の場合、全流体抵抗の中で粘

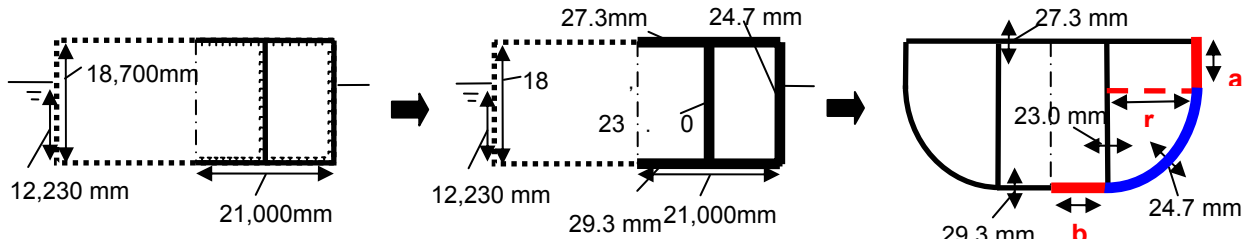


Fig. 1 Model of mid-ship section.

性摩擦抵抗の割合が大きいことから、粘性摩擦抵抗を最小にすることで全流体抵抗を大幅に低下させることが可能になると考えられる。そこで、浸水表面積の最小化を目的関数とする。制約条件は、新型船に十分な縦曲げ強度を保持させるために、新型船の断面係数を従来船の断面係数よりも大きな値になるように制限し解析を行った。さらに、水深の関係から船舶の喫水には制限があり、現在の喫水制限は 13~14m となっていることから、喫水を 13m に制限し解析を行った。

2.2.3 浸水表面積最小化解析結果

Table 1 に 2.2.2 項の解析条件下の浸水表面積最小化解析結果を示す。ここで、中立軸位置はアッパーデッキからの距離を表すこととし、浸水表面積は船体の長さ方向を 1mm とした時の没水下表面積であると仮定した。新型船型は、従来船と比べ、幅と喫水が少し大きな設計となるが浸水表面積は約 10% 減るという結果が得られた。喫水を制限したことによって、幅は従来船に対して 7% 増えるという結果となった。また、構造上の問題として断面形状を曲線形状にすることによって、船底部の応力を受け持つ断面積が減少し、中立軸位置の上昇や断面係数が減少する可能性があるが、船底直線部を 9.8m 確保することでボトムデッキに関して、従来船と同等の縦曲げ強度を得ることができた。Fig. 2 は浸水表面積と喫水との関係を表したグラフである。喫水が 10m よりも小さい時には制約条件を満たす解が存在せず、喫水が約 18m の時に最小値となっている。

Fig. 3 は喫水制限を入れない時の、幅や深さが浸水表面積最小値に及ぼす影響について示した図である。左下の部分は、制約条件を満たす解析解が存在せず、浸水表面積が 0 となっている。また、幅が約 36m、深さが 30m 付近で最小値をとることが分かった。喫水制限なしの場合による最適化では、浸水表面積が従来船と比べ 14% の減少となり、流体抵抗の大幅な削減に期待できる。

ここでは、浸水表面積を最小化することで、粘性摩擦抵抗を最小化する船殻形状を決定した。次に、等価板厚ではなくロンジ材が付いた船体中央断面の最適化を実施する。

2.3 ロンジサイズ、ロンジ間隔の最適化

2.3.1 解析モデル

船殻形状は、2.2 節で求めた船側直線部長さ 10.7m、船底直線部長さ 9.8m、円弧半径 12.6m、喫水が 13m の粘性摩擦抵抗最小化モデルを用いる。ここでは、外板の板厚は一定とし、ロンジサイズ、ロンジ間隔の最適化を行う。

本節では、ロンジサイズ、ロンジ数の 2 種類を最適化における設計変数として設定した。ロンジサイズについては Table 2 に示すように、予め Web 長さ、Face 長さ、板厚が異なる、8 種類の T 字ロンジ材を用意し、これら

Table 1 Optimization analysis result

	existing ship	new ship
radius of the circle r(m)		12.6
straight portion length of side ship a(m)		10.7
straight portion length of bottom ship b(m)		9.8
depth D (m)	18.7	23.2
breadth B (m)	42	44.9
position to the neutral axis (m)	9.5	10.8
submerged area A ($\times 10^4 \text{ mm}^2/\text{mm}$)	6.6	6.0
weight of longitudinal stiffener (kgf/mm)	32.5	34.0
draft d (m)	12.2	13.0
Ztop ($\times 10^{10} \text{ mm}^3$)	2.7	3.2
Zbottom ($\times 10^{10} \text{ mm}^3$)	2.8	2.8

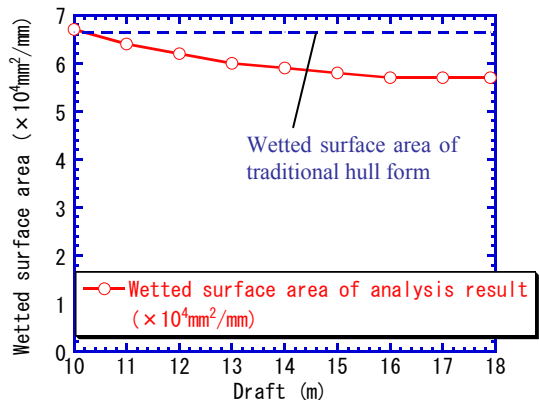


Fig. 2 Relationship between wetted surface area and draft

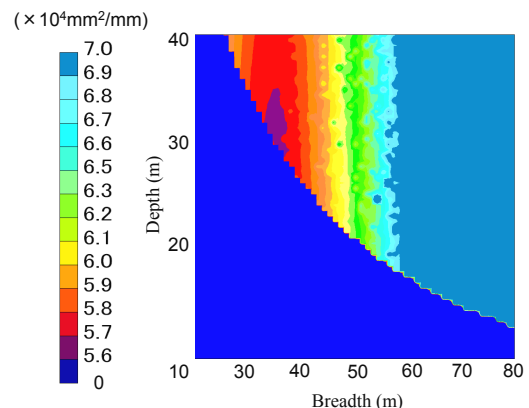


Fig. 3 Distribution of object function

から選択することにした²⁾。これらのロンジ材は番号が大きくなるに従って、重量や断面二次モーメントが大きくなるように設定している。解析対象は、従来船と性質が大きく異なる円弧部分においてロンジサイズ、ロンジ間隔の最適化を行う。その他のロンジサイズは、Table 2 の①番のロンジサイズ番号を用い、ロンジ間隔に関しては、船底直線部を 11 等分、バルクヘッドを 21 等分、デッキ部分を 11 等分となるように縦通部材を配置した。

2.3.2 解析条件

GA で使用するパラメータは 2.2.2 項で使ったものと同じ値とした。また、目的関数に関して、部材重量を最小にすることを目的とする。制約条件は 4.3 節と同じく、新型船の断面係数が従来船の断面係数よりも大きくなるように制限し、さらに日本海事協会、鋼船規則 C 編 7 章によりロンジ材の断面係数を制限した³⁾。

一般に縦通防撓材同士の間隔を広くした場合、各ロンジ間の板部材と各ロンジが受け持つ荷重の範囲が増え、板厚の増加やロンジのサイズアップに繋がる。逆にロンジの間隔を密にした場合、ロンジのサイズを抑えることができるが、ロンジの本数が多くなり全体の縦通部材重量が大きくなる。次項には、縦通部材重量が最小となる最適なロンジサイズ、ロンジ間隔の組み合わせを GA による解析で求めた結果を示す。

2.3.3 ロンジサイズ、ロンジ間隔の最適化結果

縦通部材重量の最小化解析結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 に記載したロンジサイズ番号は Table 2 のロンジサイズ番号と対応しており、本解析により求められた結果である。船底曲線部のロンジ数は 13 本となり円弧部分を 14 分割するようなロンジ間隔となった。また、中立軸からの距離が大きくなるほど鋼船規則による断面係数の要求値が大きくなるが Table 2 に示す通り、各ロンジ材の断面 2 次モーメント I_z が I_y に比べて 1/10 以下となっており、船側に近づくほど、T 字の傾き角が大きくなってロンジ部材の断面係数が小さくなる。Fig. 5 に、鋼船規則によるロンジの断面係数の要求値と各ロンジ番号位置でのロンジの断面係数を示す。Fig. 5 を見ると断面形状の要求値以上となり重量が最小となる組み合わせとなっていることがわかる。ただし、ロンジサイズ番号②と③の断面係数の違いは小さいため、②番の断面係数が要求値に満たない場合、③番を超えて④番のロンジサイズを選ぶという結果となり、要求値から少し離れた値の断面係数となった。Table 3 は、ロンジ材が付いた状態での各パラメータの解析値である。従来船の縦通部材重量とほぼ等しい値となり、2.2.3 項の等価板厚での解析結果と比べると、縦通防

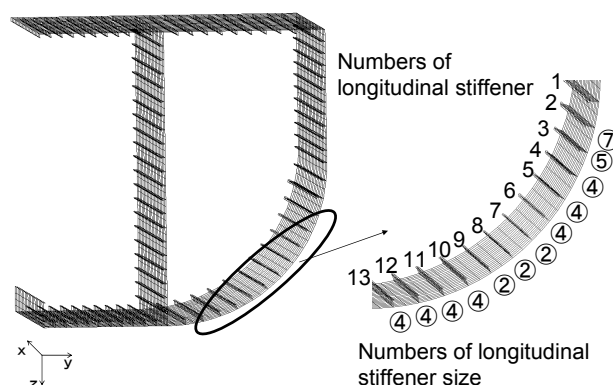


Fig. 4 Optimization result

Table 3 Optimization analysis result

	existing ship	new ship
position to the neutral axis (m)	9.5	11.3
weight of longitudinal stiffener (kgf/mm)	32.5	32.6
Ztop ($\times 10^{10} \text{mm}^3$)	2.7	3.1
Zbottom ($\times 10^{10} \text{mm}^3$)	2.8	2.9

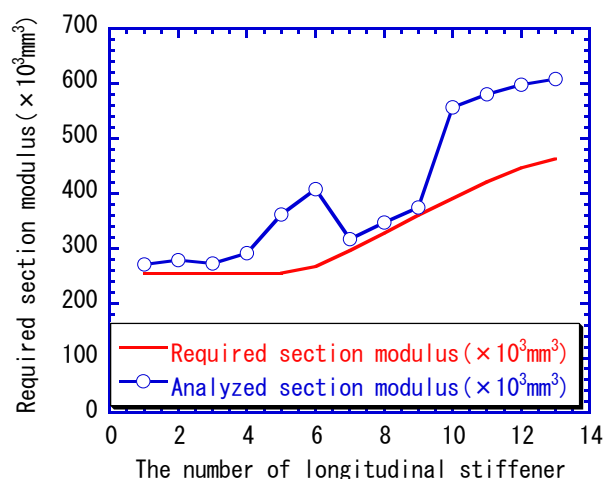


Fig. 5 Section modulus of longitudinal stiffener

Table 2 Setting the longitudinal stiffener size

Numbers of longitudinal stiffener	Longitudinal stiffener size (mm)	Stiffener weight (gf/mm)	I_y ($\times 10^7 \text{mm}^4$)	I_z ($\times 10^7 \text{mm}^4$)
①	300*90*13/12(t)	39.2	4.8	0.1
②	350*110*15/18(t)	56.9	9.8	0.2
③	350*130*15/18(t)	59.8	10.3	0.3
④	400*160*15/21(t)	73.7	16.6	0.7
⑤	450*180*15/22(t)	84.3	24.0	1.1
⑥	450*200*15/22(t)	87.8	24.9	1.5
⑦	500*220*15/25(t)	102.4	35.5	2.2
⑧	550*240*15/27(t)	116.0	48.3	3.1

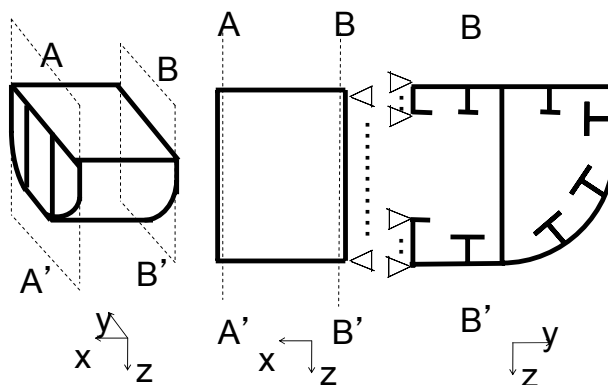


Fig. 6 Condition of constraint

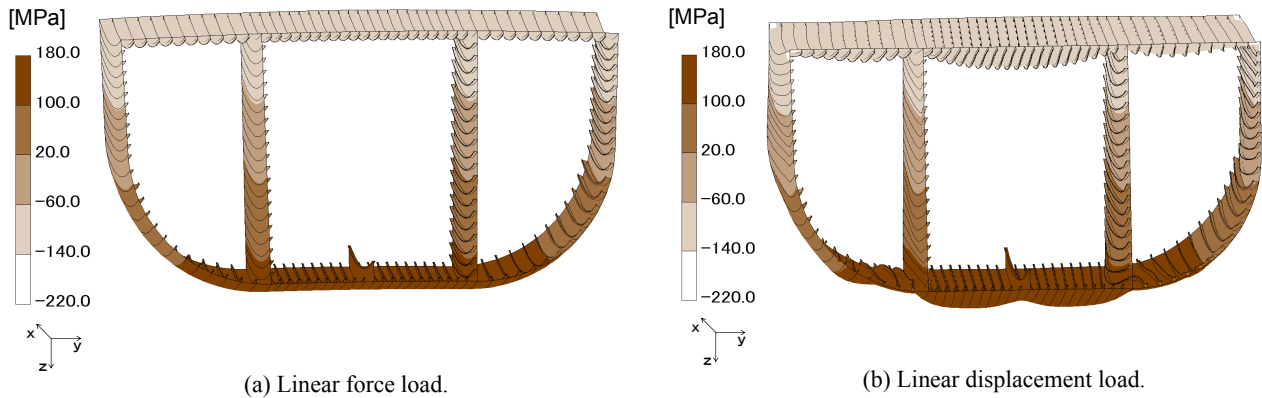


Fig. 7 Stress distribution with deformation.

撓材の重量が 4% 減少した。また、2.2.3 項の解析結果と比べ、中立軸下方における縦通部材重量の割合が高くなったことで、中立軸位置が z 方向に 5% 増加し、デッキでの断面係数 Z_{top} が 4% 減少した。

ここでは、決定した船殻形状の等価板厚部分をロンジ材へと戻すことで、ロンジ材の配置による中立軸位置の移動や、断面係数への影響を確認することができ、より詳細な船体中央断面の最適化解析への可能性を示した。

3. FEM 解析による検討

2 章では、縦曲げ強度を評価する際に、断面係数を要求値以上とすることで、最適化を行ってきた。しかし、解析対象となる断面に作用する外力は多様であり、局所的な集中荷重が発生する場合もある。そこで、2 章により得られた断面形状を使って、FEM 解析を行う。FEM 解析を導入することで、局所的な応力や変位を求めることはもちろんのこと、座屈解析が行えるなどより詳細な解析が可能となる、設計において重要なことである。

3.1 FEM 解析をする上での境界条件

本研究では、船体構造における縦曲げ強度を解析する際に Fig. 6 の左図に示すような船体中央断面付近の 1 スパンを解析対象とする。この解析対象は連続防撓構造から切り出された一部分であるため、境界となるモデル両端の断面における部材の境界条件について考慮し、切り出す必要がある。そこで本研究では、平面 A-A'、B-B' にトランス部材が存在するような 1 スパンモデルを切り出し、その境界条件を考える⁴⁾。トランス材が存在する断面では縦通部材の面外の剛性は非常に大きい変形を考慮する必要はないものと仮定する。以下に詳細な拘束条件を記載する。Fig. 6 の中央に示す通り横断面の全節点を x 方向に固定し、Fig. 6 の右図に示すように、縦断面の境界は、全節点を y 方向に変位を固定した。また、平面 A-A'、B-B' に平面保持を仮定した場合と仮定しない場合について比較検討した。荷重は平面 A-A' に曲げ応力を等価節点荷重として入力した。その際、曲げモーメントは日本海事協会、鋼船規則 C 編 15 章による波浪縦曲げモーメントを使用した。

3.2 新型船の FEM 解析結果

Fig. 7(a)は平面保持をしない場合の、Fig. 7(b)には平面保持を行った場合の FEM 解析結果(x 方向変位分布)を示

す。平面保持をした(b)の場合は、平面保持をしない(a)と比べ局所的な応力が発生していることが確認できる。また、平面保持を行った断面の一部で応力集中がみられた。さらに変位に関しては船底のセンターホールドでは、 z 方向に大きな撓みが発生し、この影響でバルクヘッドが内側に撓み、サイドホールドでは $-z$ 方向の撓みが発生していることがわかる。このように本手法を用いることで、応力集中や、局所変位を解析することができた。

4. 結 言

縦曲げ強度を保持し、船体にかかる粘性摩擦抵抗低減を目的とした船体断面形状最適化システムを開発した。さらにシングルハルタンカーを解析対象とし、本手法を適用することで以下の結論を得た。

- (1) シングルタンカーの断面係数を制約条件として、浸水表面積最小化を目的関数とする船殻形状最適化問題を解析することで、縦曲げ強度を保持し、船体にかかる摩擦抵抗を低減する船殻形状を得ることができた。
- (2) 浸水表面積最小化により得られた船殻形状を使用し、縦通部材重量の最小化を目的関数とするロンジサイズ、ロンジ間隔の最適化解析を行うことで、浸水表面積最小化し、なおかつ最も縦通部材重量が小さい船体断面形状を得ることができた。
- (3) 本解析手法でシングルハルタンカーの船体断面形状の最適化を行い、さらに FEM 解析を行うことで局所的な集中応力や変位分布を示すことができた。

参 考 文 献

- 1) 池田良穂, 姫野洋司, 田中紀男: 「横揺れ減衰力について—摩擦成分とビルジキールの直圧力成分—」 関西造船協会誌第 165 号 pp.31-40, (1977)
- 2) 中森隆一, 北村充, 濱田邦裕: 「船首尾部のロンジ配置最適化に関する研究」, 日本船舶海洋工学会論文 第 7 号 pp.81-88, (2008)
- 3) 日本海事協会 鋼船規則 C 編 pp.40, pp.70, (2002)
- 4) 矢尾哲也: 船体構造の縦曲げ強度に関する研究の歴史と現状—主として船体梁の縦曲げ最終強度に関連して— 西部造船学会会報 第 91 号 pp.221-252, (1996)