

平水中全抵抗と波浪中抵抗増加の低減を目指した船型最適化の研究

—実数値遺伝的アルゴリズムを用いた多目的船型最適化—

正員 平山明仁* 正員 安東潤**

Study on Multiobjective Hull Optimization for Reducing Resistance in Still Water and Added Resistance in Waves
- Multiobjective Optimization using Real-coded Genetic Algorithm -

by Akihito Hirayama, Member Jun Ando, Member

Summary

Practical ships need to have low total resistance in waves. The present paper proposes a hull optimization method for reducing resistance in still water and added resistance in wave, using the real-coded genetic algorithms. The real-coded genetic algorithm of the optimization method, employs the crossover operator for combining of the methods called the LUNDX- m (LUNDX on m Latent Variables) and the EDX (Extrapolation-Directed Crossover), and employs the modified POSS (Pareto Optimal Selection Strategy) as a generation-alternation model. The panel-shift type Rankine source method is used for the calculation of wave-making resistance. The estimate formula based on statistical analysis is used for the form factor. Takahashi's formula and Maruo's formula are used for added resistance in waves. The hull optimization for KRISO 3000TEU container ship is carried out using the program which is based on the present method. In the optimization, many Pareto solutions are obtained. It is confirmed that these hull forms have low total resistance in still water and added resistance in waves comparing with the original form.

1. 緒言

近年の大型コンテナ船や LNG 船は、肥大度が大きくなっており方形係数 C_B が 0.6 を超え、運航速度も高くフルード数も高い値になっている。このような船種では、造波抵抗と粘性抵抗のどちらかを主に改良すれば性能の良い船型を得ることができるということにはならず、粘性抵抗と造波抵抗双方の性能改善を図らないと良い船型を得ることができない。また、実海域における推進性能を高めるには、平水中の抵抗のみでなく、波浪中抵抗増加の低減も必要であることは疑問の余地がない。また、近年の造船業における近隣諸国との激しい競争の中で、その合理化の波は船型設計の部門にも押し寄せており、短期間に高性能な船を設計する必要性が非常に高まっている。

実海域での波浪中抵抗増加を含む全抵抗の低い大型コンテナ船や LNG 船の船型設計を効率良く行うためには、造波抵抗、粘性抵抗および波浪中抵抗増加を同時に低減すること

ができる効果的な船型改良手法が必要である。

このような要求実現のための手法の研究例をいくつか挙げる事ができる。Sakamoto らは、線形計画法を用いて、平水中造波抵抗と反射波起因波浪中抵抗増加の和を目的関数とした単目的最適化を、楕円柱や船首水線面形状に対して試みている¹⁾。また、Peri らは DTMB Model5415²⁾を改良対象として、ポテンシャル流計算法と実験式を用いた平水中抵抗およびストリップ法による波浪中船体動揺を目的関数として、勾配法を用いた多目的船型最適化を試みている³⁾。しかし、一般商船の波浪中全抵抗を改善する有効な手法の提案は未だなされていない。

平水中全抵抗と波浪中抵抗増加を同時に低減することを目的とする場合、どちらかを改善したからといって、他方が必ずしも改善できないことは明らかである。例えば、200m 以上の船型では、波浪中抵抗増加を小さくするためには、柏木らの研究⁴⁾等からみて、浮心位置を後方に移した方が良いと思われるが、単純に浮心位置を後方へ移すことは、多くは粘性抵抗の増加を引き起こし、横断面積を適切に設計できなければ造波抵抗の造波も引き起こしてしまう。このように、時に対立する改善項目を同時に改善するためには、トレードオフの関係を適切に取り扱うことのできる最適値探索手法を用いた多目的最適化を行なう必要がある。このような非線形多目的最適化問題の解法として有効な手法として知られるのが、実数値遺伝的アルゴリズム(実数値 GA : Real-coded

* 株式会社三井造船昭島研究所

** 九州大学大学院工学研究院

Genetic Algorithm)である。この最適化手法は、船舶の改良にも適用されその有効性が確認されている⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾。

本論文では、平水中全抵抗および波浪中抵抗増加の低減を目指した実数値遺伝的アルゴリズムを用いる多目的船型最適手法の枠組みを提案する。提案する枠組みのそれぞれの部分については、将来的には、より高精度な手法が利用可能となった段階で、取り替えながら発展させていくことを考えるが、評価項目の計算手法については、実際の船型設計現場でよく使われる手法で取り扱い易い手法で構成することを主眼として船型最適化手法を構成した。その手法を用いて行なった船型最適化例を紹介する。船型最適化は、原型に KRISO 3000TEU container ship⁹⁾を選び試みた。

2. 評価項目の計算方法

ここで取り扱おうとしている船型改良の最終目標は“原型に比べ、平水中全抵抗が低く、かつ波浪中抵抗増加が少ない船型を得る”ことである。したがって、この改良時に行う評価の項目(目的関数)は、実船の平水中全抵抗と波浪中抵抗増加の2項目となる。より厳密な意味での最適船型を得るためには、最適化に用いる評価項目の計算方法についても、より細かな船型を表現でき、高い精度で評価項目の値を計算できる方法を用いるべきであるが、1つ1つの評価項目の計算時間が非常に長くなると、最適化の過程で行う計算回数が非常に長くなり、実用的な時間内に意味のある改良船型を得ることができないことになる。それでは効率良い船型改良手法の提案という目的に反するので、計算時間が長くない計算手法を選択することとした。

以下に、本最適化手法に於いて用いた評価項目の計算法を示す。

2.1 平水中全抵抗

1つ目の評価項目は平水中全抵抗である。平水中全抵抗 R_T は(1)式の様を書くことができる。

$$R_T = C_T \cdot 1/2 \rho U^2 S \tag{1}$$

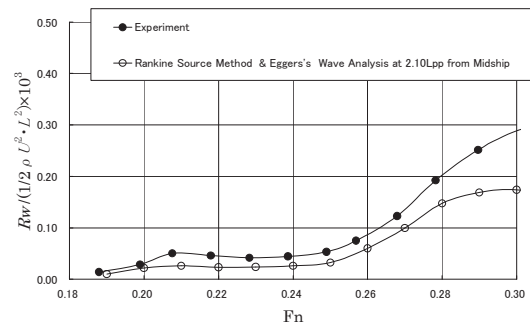
$$C_T = C_w + (1+k) \cdot C_{F0} + \Delta C_F$$

C_T は実船の全抵抗係数、 C_w は造波抵抗係数、 k は形状影響係数、 C_{F0} は Schoenherr の平板摩擦抵抗係数、 ΔC_F は粗度修正係数、 ρ は水の密度、 U は船速、 S は船の浸水面積をそれぞれ示す。粗度修正係数 ΔC_F は、 $\Delta C_F = 0.20 \times 10^{-3}$ を用いた。

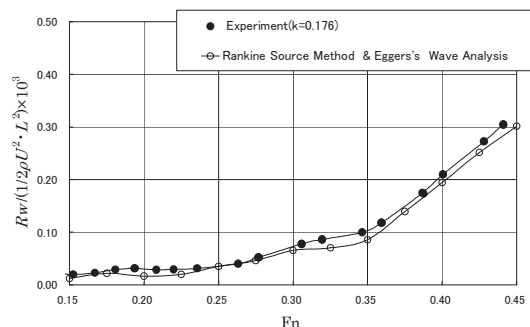
造波抵抗については Rankine source 法を用い、形状影響係数 k については富田の式を用いることとした。後述する形状

影響係数 k の推定式は、フレームライン形状の影響を加味することができないが、形状影響係数を導入したことで2つの効果が期待できる。1つ目は、浸水面積の過度な増加を防ぐ効果である。造波抵抗や波浪中抵抗増加のみを改良の対象とした時に現れる過度に浸水面積の多い船型の生成が抑えられる。2つ目は、浮心位置の影響を取り入れる効果である。波浪中抵抗増加は浮心位置を後方に移動させると低下することが知られているが、過度に浮心位置を後方へ移動させることは、平水中粘性抵抗の増加につながる。形状影響係数 k を導入することで、浮心位置の影響の適正な評価が期待できる。

造波抵抗係数 C_w は、パネルシフト型 Rankine source 法¹¹⁾¹²⁾で得られた波形に対して Eggers ら¹³⁾の横切波形解析の手法を適用することにより求める。GA 等を用いた多目的最適化においては、評価項目をかなりの回数に渡って評価する必要がある。したがって、目的関数の計算に長時間を要すると、最適化の実用度が大きく損なわれてしまう。そこで、ある程度の精度を持ちながら、比較的短い時間で計算が実行可能なパネルシフト型 Rankine source 法を用いることとした。



a) Series60(C_B=0.6)



b) DTMB Model5415

Fig.1 Comparison of wave-making resistance coefficient curves between experiment and computation

Fig.1 に、Series60(C_B=0.6)および DTMB Model5415 について行なった造波抵抗計算結果と水槽試験結果¹⁴⁾²⁾の比較を示

す。縦軸は船長 L の 2 乗を代表面積として無次元化された係数である。

計算において特異点を分布させるパネルは、船体表面については前後方向を 40 分割およびガース方向を 10 分割したものをを用いており、自由表面については、船首端から前方へ 0.25 船長の位置から、船体中央から後方へ 2.5 船長の位置までを、一辺が 1/40 船長の正方形のパネルで分割し、有意な波高の存在しない領域のパネルを取り除いたものを用いている。Eggers の横切波形解析は、船体中央から後方へ 2.0 船長の位置の波形を用いて行った。造波抵抗係数計算値は、若干の差が認められるものの造波抵抗係数曲線の傾向を良く捉えている。

形状影響係数 k は、笹島の方法を参考に作られた(2)式に示す富田の式¹⁵⁾を用いた。

$$k = (\nabla^{1/3}/L) \cdot (0.5C_B + 2\gamma^{1.3}/C_B) \quad (2)$$

$$\gamma = (B/L) / \{1.3(1 - C_B) - 0.031 \cdot l_{cb}\}$$

∇ は排水容積、 L は船長、 B は船幅、 C_B は方形係数、 γ は笹島の船尾肥大度、 l_{cb} は浮心位置をそれぞれ示す。

船型差による形状影響係数 k の違いをより正確に求めるためには、RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 法などの方法を用いることも考えられるが、造波抵抗の計算法と同じように 1 船型当たりの計算時間を短くすることを考え、形状影響係数 k は、計算負荷の掛からない簡便な(2)式を用いた。また、富田の計算の適用例¹⁵⁾によると、かなりの数の船型の形状影響係数 k が(2)式の予測値を中心に分布しており、船体の要目および浮心位置 l_{cb} が、形状影響係数 k に対し支配的であることが分かる。フレームライン形状の最適化という面からは、粘性抵抗の考慮が充分とは言えないが、浮心位置と浸水面積の粘性抵抗への影響については考慮できて、初期検討に用いる場合等に於いては有効であると考えられる。

この平水中抵抗計算方法を用いて、船型最適化の原型とする KRISO 3000TEU container ship の模型船全抵抗係数 C_T および剰余抵抗係数 C_R を計算した。公表されている実験値¹⁰⁾では、模型試験が行なわれたレイノルズ数 $Rn=1.4 \times 10^7$ 、フルード数 $Fn=0.26$ において、 $C_T=3.56 \times 10^{-3}$ 、 $C_R=0.731 \times 10^{-3}$ である。それに対して、ここで示した計算法による推定結果は、 $C_T=3.635 \times 10^{-3}$ 、 $C_R=0.748 \times 10^{-3}$ であり、まずまずの一致度を示すことが確認された。ただし、平板摩擦抵抗係数は公開されている実験値に合わせて ITTC1957 の式を用いている。

2.2 波浪中抵抗増加

2 つ目の評価項目である波浪中抵抗増加 R_{Aw} は、高橋の考え方¹⁶⁾に倣い、船体運動に起因する抵抗増加 R_{AWm} と反射波に起因する抵抗増加 R_{Awr} の和で表されると考える。

規則波中の船体運動に起因する抵抗増加 R_{AWm} は、(3)式および(4)式に示す丸尾の式¹⁷⁾で求める。

$$R_{AWm} = 4\pi\rho \left[-\int_{-\infty}^{m_4} + \int_{m_3}^{\infty} \right] \frac{(m+k_w\tau)^2 \cdot (m-k_w \cdot \cos\chi)}{\sqrt{(m+k_w\tau)^4 - k_w^2 \cdot m^2}} \times |H(m)|^2 dm \quad (\text{in case of } \tau > 1/4) \quad (3)$$

$$R_{AWm} = 4\pi\rho \left[-\int_{-\infty}^{m_4} + \int_{m_3}^{m_2} + \int_{m_1}^{\infty} \right] \frac{(m+k_w\tau)^2 \cdot (m-k_w \cdot \cos\chi)}{\sqrt{(m+k_w\tau)^4 - k_w^2 \cdot m^2}} \times |H(m)|^2 dm \quad (\text{in case of } 0 < \tau < 1/4)$$

$$\tau = U \cdot \omega_e / g$$

$$k_w = g / U^2$$

$$m_{1,2} = k_w / 2 \cdot (1 - 2\tau \pm \sqrt{1 - 4\tau})$$

$$m_{3,4} = -k_w / 2 \cdot (1 + 2\tau \mp \sqrt{1 + 4\tau})$$

$$|H(m)|^2 = |H_1(m)|^2 + |H_2(m)|^2$$

$$H_1(m) = \int_{-L/2}^{L/2} \sigma(x) \exp\left(-\frac{(m+k_w\tau)^2}{k_w} z_\sigma\right) \exp(imx) dx \quad (4)$$

$$H_2(m) = i \frac{\sqrt{(m+k_w\tau)^4 - k_w^2 m^2}}{k_w} \times \int_{-L/2}^{L/2} i\mu(x) \exp\left(-\frac{(m+k_w\tau)^2}{k_w} z_\mu\right) \exp(imx) dx$$

ここで、 k_w は波数、 U は船速、 B は船幅、 l_w は横揺れ減衰モーメントレバー、 β は水線面傾斜角、 χ は入射波方向、 θ は発散波の伝播方向、 h_A は波振幅、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 ω_e は、出会波円周波数、 i は虚数単位である。 $\sigma(x)$ および $\mu(x)$ は、静水面からの深度 z_σ および z_μ に船長方向に分布する吹出し分布および二重吹出し分布を示す。

船体運動に起因する抵抗増加 R_{AWm} の計算に用いる吹出し分布と二重吹出し分布は、丸尾ら^{18) 19)}による(5)式を用いた。

$$\sigma(x) = -\frac{1}{4\pi} \frac{ig}{\omega_e^2} A_H(x) \left[\frac{1}{b(x)} \left(i\omega_e - U \frac{\partial}{\partial x} \right) \{b(x) z_r(x)\} \right]$$

$$\mu(x) = -\frac{1}{8\pi} \frac{g^2}{\omega_e^4} A_S(x) \left[\frac{1}{b(x)} \left(i\omega_e - U \frac{\partial}{\partial x} \right) \{b(x) y_r(x)\} \right]$$

$$y_r(x) = \overline{\eta_2} - (z - l_w) \overline{\eta_4} + (x - x_G) \overline{\eta_6} - \overline{\eta_w} \quad (5)$$

$$z_r(x) = \overline{\eta_3} - (x - x_G) \overline{\eta_5} - \overline{\zeta_w}$$

$$\overline{\eta_w} = ih_A \sin \chi \cdot \exp(-ik_w x \cos \chi - k_w z_\mu)$$

$$\overline{\zeta_w} = h_A \exp(-ik_w x \cos \chi - k_w z_\sigma)$$

$A_H(x)$ および $A_S(x)$ は、2次元断面の上下揺れ、左右揺れによる発散波の複素振幅であり、船体表面上に特異点分布を用いたストリップ法により求められる。 $b(x)$ は断面の半幅、 $\eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5, \eta_6$ は船体運動の複素振幅である。その他の文字式は前述の通りである。特異点の分布深度は、 $z_\sigma/L=0.12$ 、 $z_\mu/L=0.17$ とした。

規則波中の反射波に起因する抵抗増加 R_{AW_r} を(6)に示す高橋の式¹⁵⁾でそれぞれ求める。

$$R_{AW_r} = \alpha_1(1 + \alpha_2) 1/2 \rho g h_A^2 B \overline{\sin^2(\beta - \chi)}$$

$$\alpha_1 = \frac{\pi^2 I^2 (1.5 k_w d)}{\pi^2 I^2 (1.5 k_w d) + K^2 (1.5 k_w d)} \quad (6)$$

$$\alpha_2 = 3.5 \sqrt{Fn} (-\cos \chi)$$

$$\overline{\sin^2(\beta - \chi)} = 1/B \left[\int \sin^2(\beta - \chi) dy + \int \sin^2(-\beta - \chi) dy \right]$$

ここで、 I, K は変形ベッセル関数、 d は喫水、 β は水線面傾斜角、 χ は波方向、 h_A は波振幅であり、その他の文字式は前述の通りである。

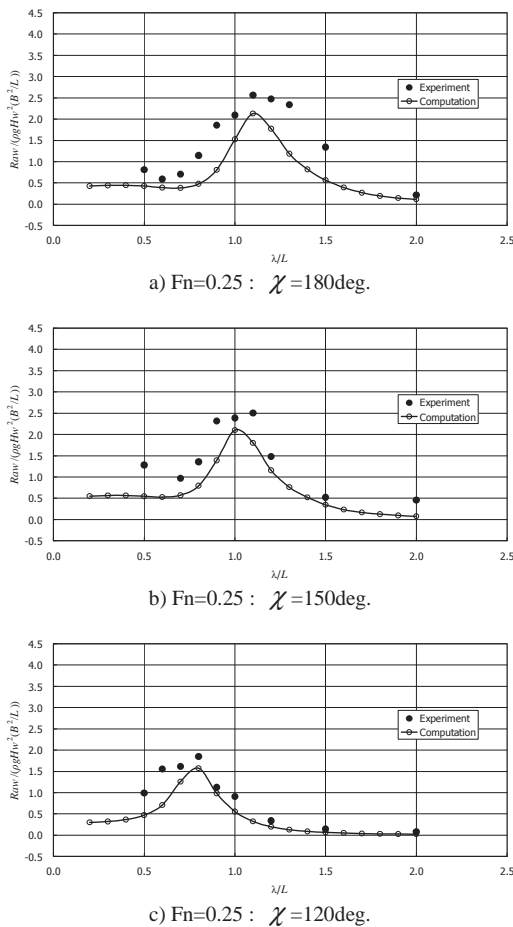


Fig.2 Comparison of added resistance in waves between experiment and computation

Fig.2 に、規則波中について、丸尾の式と高橋の式によって求められた船体運動起因の抵抗増加 R_{AW_m} と反射波起因の抵抗増加 R_{AW_r} の和と実験値の比較を示す。計算は SR108 船型²⁰⁾²¹⁾について行った。

Fig.2 を見ると、絶対値としては差が認められるが、大きな傾向を良く捉えることができていることが分かる。高橋らの研究¹⁶⁾によると、5船型について同様な方法で計算を行い実験結果と比較しているが、船型差を良く捉えることができている。

不規則波中の短波頂短期海象の抵抗増加は、規則波中の船体運動に起因する抵抗増加 R_{AW_m} と反射波に起因する抵抗増加 R_{AW_r} を合算したものをを用いて、波スペクトラムに ISSC(1964)を用い、方向分布が $\cos^2 \chi$ であるとして算出する。

3. 最適化手法の検討

ここで取り扱おうとしている船型改良では、平水中全抵抗と波浪中抵抗増加の2項目の低減を目指した多目的船型最適化を行うことになる。この最適化問題に適した最適化手法を検討する。

3.1 交叉方法

最適化には、 κ -tablet 構造を持つような最適値探索の難しい問題に対しても効果的に最適値を探索可能な適用確率変化型 LUNDX- m +EDX⁸⁾を用いる。

適用確率変化型 LUNDX- m +EDX とは、LUNDX- m (UNDX on m Latent Variables) および EDX (Extrapolation-Directed Crossover) という2つの交叉法を組み合わせた手法²²⁾である。交叉により生成される子個体の表現型空間内のベクトルで標記すると(7)式のようなになる。(7)式中の x^L は LUNDX- m で生成される個体のベクトル、 x^E は EDX で生成される個体のベクトル、 x^i は親個体のベクトル、 p は親個体のベクトルの重心、 d^i は親個体のベクトルと個体群の重心の差ベクトル、 D は d^i に直交するベクトルの大きさ、 e_i は d^i に直交する単位ベクトル、 w_i および v_i は正規乱数をそれぞれ表している。また、LUNDX- m で用いられる親個体数は $m+2$ 個体であり、 n は設計変数の数である。以前の検討結果⁸⁾を踏まえ m は $m=4$ を採用した。

$$x^L = p + \sum_{i=1}^m w_i d^i \quad (7)$$

$$x^E = x^1 + \sum_{i=1}^{n-1} v_i D e_i$$

また、それぞれの世代で適用される交叉方法は、次のように選択される。最適値や極値周辺に個体群が分布している解の

更新時が頻繁に行われる場合は、個体群分布内の最適値を重点的に行うために LUNDX- m を適用する確率を高め、極値周辺での探索が十分に行われて解の更新が行われなくなった場合は、探索域を広げるために EDX を適用する確率を高めるといった交叉を行う交叉法⁷⁾である。最適化に用いる適用確率変化型 LUNDX- m +EDX においては、EDX の適用確率を、解の更新状況がなされない場合を最大の 75% とし、解の更新が連続的に行われている場合を最小の 25% として、段階的に変化させている。

3.2 世代交代方法 POSS

世代交代方法として非パレート淘汰戦略²²⁾ (Pareto Optimal Selection Strategy : POSS) に改良を加えたものを用いる。

POSS とは、世代交代の際に Pareto 解の集団を次の世代として残すという世代交代モデルであり、他の全ての解と比較した際に、少なくとも 1 つ以上優れた目的関数評価値を持っている解以外を淘汰し次世代の個体集団が形成される。単目的最適化では、集団の多様性維持すなわち遺伝情報の質と量を維持するために、集団を次世代へ残していた。一方、多目的最適化では引き継がれる集団を Pareto 解の集合とすることで、次世代へ引き継がれる集団のひとつひとつの個体全てが最適解としての意味を持たせることができる。

ただし、この手法にも問題が無い訳ではない。改良の過程で著しく良好な解が発生して、集団のほとんどの解を淘汰してしまい多様性が喪失して親個体と似たような個体ばかりしか生成されないという状態を引き起こす可能性がある。特に、設計変数を無作為に変化させて生成される個体が、同じような目標関数評価値をもつ場合は、その様な事態に陥る可能性が非常に高くなる。本研究においては、この弱点を補うため世代交代モデルに改良を施した。Deb らの方法²³⁾を参考に、集団個体数が 5 個体以下になった場合は、ランク 2 およびランク 3 の Pareto 解を次世代の集団に加えるように、POSS に変更を加えた。ランク 2 の Pareto 解とは集団から通常の Pareto 解 (ランク 1 の Pareto 解) を取り除いた集団内の Pareto 解であり、ランク 3 の Pareto 解とは集団から通常の Pareto 解とランク 2 の Pareto 解を取り除いた集団内の Pareto 解のことを指す。

3.3 設計変数および原型

最適化の過程で生成される船型のオフセットを示す関数を $f(x, z)$ 、鈴木ら²⁴⁾の方法に倣い(8)式のように定義する。(8)式での座標系は、 x 軸は船尾方向が、 y 軸は右舷方向が、 z 軸は船底方向がそれぞれ正で、原点は、船体中央、船体中心線、静水面となっている。また、 $f_0(x, z)$ は原型のオフセットを表す関数、 L は船長、 d は喫水、 z_{0a} 、 z_{0f} は船尾側船首側の変形を行う上下方向の上端位置を表す。最適化問題として

の設計変数は、 A_{mn} 、 B_{mn} の 18 種、および z_{0a} 、 z_{0f} の 2 種の合計 20 種である。

$$f(x, z) = f_0(x, z) \times w_a(x, z) \quad (8)$$

$$w_a(x, z) = 1 - \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 A_{mn} \sin \left\{ \pi \left(\frac{x}{L/2} \right)^{m+2} \right\} \sin \left\{ \pi \left(\frac{z_{0a} - z}{z_{0a} + d} \right)^{n+2} \right\}$$

$$w_f(x, z) = 1 - \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 B_{mn} \sin \left\{ \pi \left(\frac{-x}{L/2} \right)^{m+2} \right\} \sin \left\{ \pi \left(\frac{z_{0f} - z}{z_{0f} + d} \right)^{n+2} \right\}$$

$$m=1,2,3, \quad n=1,2,3$$

船型最適化の原型として KRISO 3000TEU container ship を用いる。KRISO 3000TEU container ship は、船長 $L=230\text{m}$ 、船幅 $B=32.2\text{m}$ 、喫水 $d=10.8\text{m}$ 、方形係数 $C_B=0.6505$ 、浮心位置 $l_{cb}=1.65\%L$ 、設計船速 $V_s=24\text{knots}$ ($Fn=0.26$) である。

また、GA の特徴として、全ての探索の段階において個体集団が必要であり、それは初期の段階でも同様である。初期に存在する船型群 (初期集団) は、上述の(8)式を用い KRISO 3000TEU container ship を原型に 50 種生成する。船型表示式内のパラメータ A_{mn} 、 B_{mn} および z_{0a} 、 z_{0f} は決められた範囲内で乱数を発生させて決定する。

3.4 制約条件充足法

制約条件の充足方法として、広く行われている方法は、制約条件を充足されていない度合いを評価できる関数を導入し、その関数にペナルティ係数を乗じて評価関数に足し加えて新たに作られた関数を目的関数とし、最適化を行うという方法である。このような方法の問題点は、制約条件をよりよく満たしている個体が良い個体だと評価されて最適化が進められてしまうことである。通常最適化問題において、最適化したいのは、評価関数であり制約条件ではない。制約条件は、十分に余裕を持っていたとしても、全く余裕が無い状態であったとしても、充足されていれどちらでも構わない場合が多い。そこで、制約条件は、最適化の過程で生成された船型が制約条件を満足しているかどうかのチェックを行って満足していなければ、最適化の対象とせず、替わりの船型を生成するという制約条件充足方法を採用した。

最適化の制約条件としては、(9)式の 3 条件を課した。なお、 ∇ は改良船型の排水容積、 ∇_0 は原型の排水容積、 A_w は改良船型の水線面積、 A_{w0} は原型の水線面積である。

$$B/2 \geq f(x, z) \geq 0.0$$

$$1.00 \leq \nabla/\nabla_0 \leq 1.05$$

$$1.00 \leq A_w/A_{w0} \leq 1.05$$

つまり “船体オフセットが、最大幅以上および負の値にならない”、 “排水容積が大きく変化しない” および “水線面積

が大きく変化しない”の3条件である。コンテナ船においては、復原性の要求が厳しく水線面積を小さくすることが難しいが、性能への影響が大きく制約条件に加えないと、全く有り得ない船型になってしまう可能性があるため加えた。

(9)式の制約条件に合致しない船型が子個体として生成された場合は、無条件に破棄され、条件を満たす船型が生成し直される。

3.5 目的関数の取扱い

評価項目を、平水中の全抵抗係数および波浪中抵抗増加とすることとしたが、実数値 GA の中で取り扱う目的関数としては、途中生成される船型の2つの評価項目の評価関数を、原型のそれぞれの値で除したものを使うこととする。

この処理により、各パラメータの目的関数に対する感度が大きく異なるような場合に起こる最適化問題の悪スケール性が緩和されることが期待される。

4. 船型最適化例

前章での検討結果を受けて、実際に多目的最適化を行うプログラムを作成し、KRISO 3000TEU container ship を原船型とした船型最適化を行った。

平水中全抵抗 R_T および波浪中抵抗増加 R_{AW} はフルード数 $Fn=0.26$ の値を用いることとした。不規則波中抵抗増加の計算を行った波浪条件は、北太平洋や北大西洋で最も出現頻度が高いと思われる Sea State4 の平均有義波高 1.88m と最も出現頻度の高い平均周期 8.8s を用いた²⁶⁾²⁷⁾。

最適化の結果得られた各世代の Pareto 解を Fig.7 に示す。Fig.7 の横軸は全抵抗 R_T の原船型の値 R_{T0} との比、縦軸は波浪中抵抗増加 R_{AW} の原船型の値 R_{AW0} との比である。

Fig.7 には、50 世代までの進化の結果が表されている。初期集団は、設計変数を乱数を用いて決定した船型より成るが、主に原型の波浪中抵抗増加とほとんど同じ抵抗値の船型が $R_{AW}/R_{AW0} = 1.0$ 付近に帯状に分布している。設計変数を無作為に変化させても、波浪中抵抗増加は大きく変化しないことが、また他方を改善すれば他方が必ず改善するというような単純な関係に無いことが分かる。また、Pareto 解は世代が進むにつれ、徐々に明確な Pareto 面を形成し目的関数の値が小さな値へと移り変わっていくのが確認できる。十分に改良を進めた船型同士を比較した場合、平水中全抵抗と波浪中抵抗増加は、明らかなトレードオフの関係があつて Pareto 面を正しく取り扱うことのできる最適化手法を用いる必要のあったことが改めて確認できる。

1 世代目では 10 個体が選択されて残されている。通常の Pareto 解のみを選択する世代交代モデルを用いた場合は、わ

ずか 5 個体しか選択されないが、多様性を失わないよう工夫された世代交代モデルを用いたため、ランク 2 の Pareto 解も通常の Pareto 解と合わせて次世代へ残されている。

50 世代目では、平水中全抵抗と波浪中抵抗増加の双方が原船型よりも改善された船型を 53 船型得ることができた。より平水中の推進性能を重視するのであれば平水中全抵抗が小さな船型を、波浪中での性能を重視するのであれば波浪中抵抗増加の小さな船型を、この 53 船型から状況にあわせて船型を選ぶことができる。

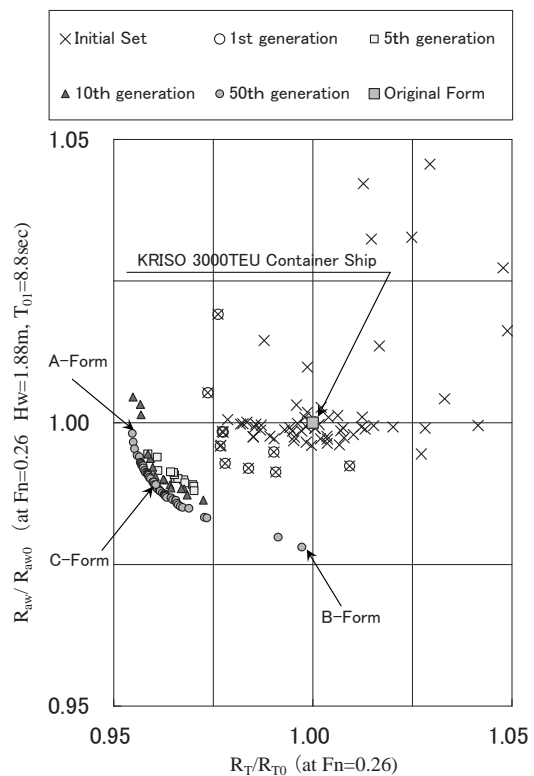


Fig.7 Pareto solutions in objective function field

Fig.7 に示された原船型よりも平水中全抵抗 R_T と波浪中抵抗増加 R_{AW} の双方が改善した改良船型の中から、船速 24knots($Fn=0.26$)での平水中全抵抗 R_T が最も改善した A-Form、Sea State4 に於けるフルード数 $Fn=0.26$ での波浪中抵抗増加 R_{AW} が最も改善した B-Form、そして、Pareto 面の中ほどに位置する C-Form の 3 船型を選びその特徴を見てみる。Sea State4、船速 24knots($Fn=0.26$)における平水中全抵抗 R_T 、造波抵抗 R_W および波浪中抵抗増加 R_{AW} の比率は、波浪中全抵抗を 100 とすると、 $R_V : R_W : R_{AW} = 65.3 : 9.9 : 24.8$ である。粘性抵抗 R_V の内、形状影響係数 k による成分は 12.9% である。

Table 1 に、各改良船型の平水中全抵抗 R_T 、造波抵抗 R_W 、粘性抵抗 R_V 、波浪中抵抗増加 R_{AW} 、反射波起因の波浪中抵抗増加 R_{AWr} 、船体動揺起因の波浪中抵抗増加 R_{AWm} 、浸水面

積 S および排水容積 ∇ の計算値の原型の値との比を示し、浮心位置 l_{cb} を船長 L に対する % 表示で示す。

Table 1 を見ると、A-Form は、原船型に対して波浪中抵抗増加はほとんど低下していないが、平水中全抵抗 R_T がおよそ 4% 低減している。B-Form は、原型に対して平水中抵抗はほとんど低下していないが、波浪中抵抗増加 R_{AW} がおよそ 2% 低減されている。C-Form は、平水中全抵抗 R_T 、波浪中抵抗増加 R_{AW} の双方で有意な抵抗低減ができてることが分かる。どの船型も平水中造波抵抗係数 C_w が、原型に対して大きく低減されており、平水中全抵抗の低減は主に造波抵抗の低減によっている。

Table 1 Comparison of optimization results

	A-Form	B-Form	C-Form
R_T/R_{T0}	0.955	0.997	0.961
R_W/R_{W0}	0.652	0.777	0.666
R_V/R_{V0}	1.000	1.030	1.005
R_{AW}/R_{AW0}	0.998	0.978	0.989
R_{AWr}/R_{AWr0}	1.000	1.000	1.000
R_{AWm}/R_{AWm0}	0.995	0.940	0.970
S/S_0	1.014	1.042	1.019
$l_{cb} (\%L)$	-0.114	-0.115	-0.204
∇/∇_0	1.00	1.01	1.00

浸水面積は、どの船型も原型に比べて増加しており、抵抗上は不利な変化であるが、他の要素が改善されるよう船型を適切に変更すれば抵抗低減が実現できることを示している。粘性抵抗を評価関数に取り入れたことにより、造波抵抗のみを目的関数とした場合に現れやすい変曲点の多い浸水面積が極端に大きくなる船型の出現が抑えられていることがうかがわれる。

浮心位置は、どの船型も原型に比べて前方へ移動している。浮心位置が前方へ移動することは必ずしも、有利なことばかりではなく、船首水線面のプラントネス係数が増加し波浪中抵抗増加に繋がるが、形状影響係数の面で有利であり、このような結果になったと考えられる。

本最適化手法ではフレームライン形状の粘性抵抗への影響を考慮できないので、別途 Kodama の方法²⁸⁾に基づく RANS 法²⁹⁾を用いて形状影響係数 k の変化を計算した。船体表面上で、前後方向に 100 分割、ガース方向に 40 分割された計算格子を用いている。Table 2 に、形状影響係数 k の (2)式および RANS 法による計算結果を示す。

Table 2 Comparison of form-factor

	Original	A-Form	B-Form	C-Form
k with (2)	0.170	0.153	0.155	0.152
k with RANS	0.150	0.138	0.199	0.144

(2)式の計算値と RANS による計算値の差が大きかった B-Form で、この計算値の差による抵抗値の差分は波浪中全抵抗の 1.2% 程度である。ただし、今回用いた形状影響係数 k の計算方法は、フレームライン形状の影響を加味できないので、この点の改良は今後の課題である。

各船型の横断面積 A/A_{max} の原船型との比較を Fig.8 に示す。横断面積曲線の変化を見てみると、どの船型も原型と比べて、排水量分布がかなり前方へ移動し、船首バルブの容積が大きく拡大していることが確認できる。

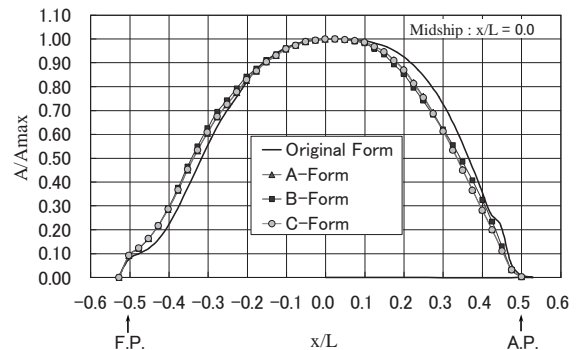


Fig.8 Comparison of sectional area curves

各船型の水線面形状の原船型との比較を Fig.9 に示す。水線面形状には大きな変化は見受けられない。これは、波浪中抵抗増加を最適化項目の対象としたことにより、その大きな部分を占める反射波起因の抵抗増加を小さくするため船首水線面の傾きの積分値が小さくなる方向への淘汰圧が働いたことと、水線面面積を変化させないという拘束条件を課した二つの要因が重なったためだと思われる。

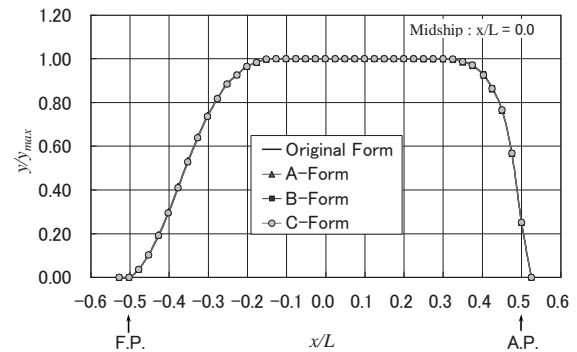


Fig.9 Comparison of water lines

船型最適化によって船首水線面形状は大きく変化しなかったが、B-Form では波浪中抵抗増加はおよそ 2% 程度低減されている。向波中の反射波起因の波浪中抵抗増加は、船首水線面形状で決まるので、この波浪中抵抗増加の低減は、船体

運動による抵抗増加が低減したためである。反射波起因の抵抗増加の成分が多いと思われる海象条件であっても、船体運動起因の抵抗増加を軽視すべきでないことが分かる。

各改良船型と原船型の Body plan の比較を Fig.10 に示す。Body plan を比べると、どの船型も、船首では船首バルブ後方の船体がバルブを後方へ延長するかのように膨らんでおり、船尾においては、スケグ状になっている部分を中心に細くなっている。

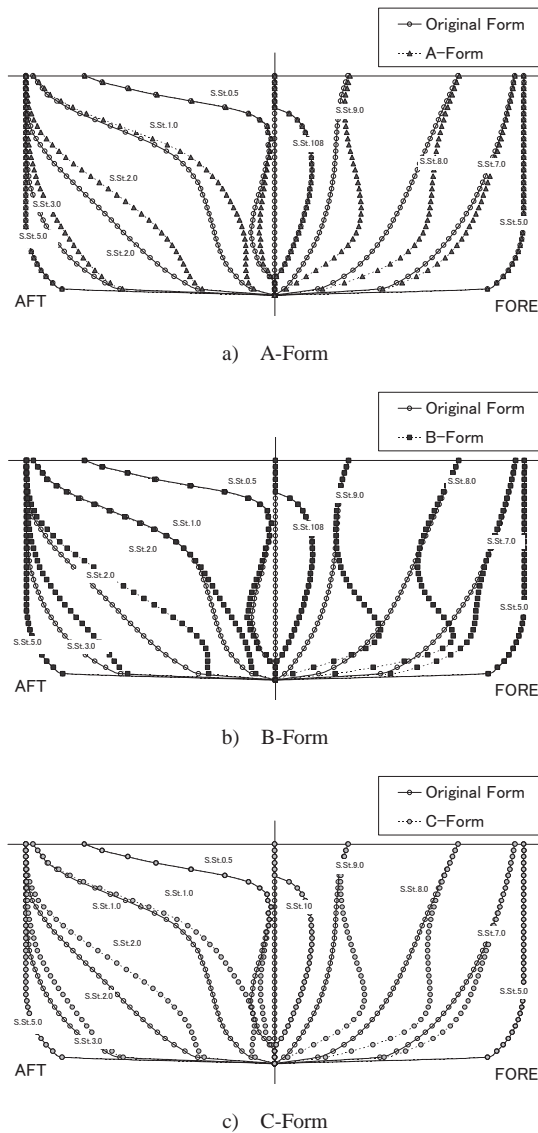


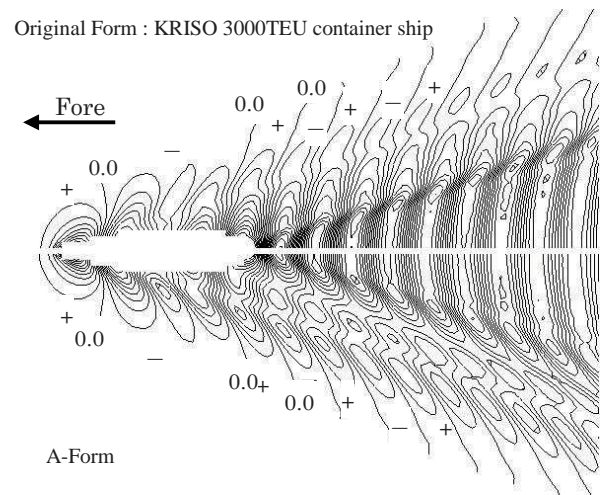
Fig.10 Comparison of hull forms

特徴的な変化は、B-Form の船首部で、船首部のバルブ状の膨らみが最も大きくなっており、この効果により船体運動起因の抵抗増加が小さくなったと考えられる。ただし、B-Form のような船型は、今回の最適化手法では十分に考慮されていない船首形状の粘性抵抗への影響なども考えると、実用船型として採用するには適当では無いと考えられる。実用船型として採用するのであれば、より現実的で平水中抵抗

の小さな A-Form や C-Form に近い傾向の船型に修正すべきである。

平水中全抵抗係数 C_T が最も低減した A-Form と原船型のフルード数 $Fn=0.26$ における波高分布の比較を Fig.11 に示す。

A-Form と原型のフルード数 $Fn=0.26$ での波高分布を比較すると、A-Form は、いわゆる船首波は増加しているものの船尾波が大きく低減しており、全体として造波抵抗が低減できているのが分かる。船尾波が低減した最大の理由は、Fig.8 の横断面積曲線の比較で明らかのように、船尾の排水量が小さくなったことと、 $x/L = 0.45$ 付近の不連続な前後方向の排水量変化が無くなったためだと思われる。



Froude No.: 0.26, Pitch: $\Delta\zeta/L = 0.5 \times 10^{-3}$

Fig.11 Comparison of wave patterns

改良船型と原船型の平水中全抵抗の比較を Fig.12 に示す。Fig.12 は、浸水面積の変化もあるので、船長の 2 乗を代表面積とした平水中抵抗係数で示している。

フルード数 $Fn=0.26$ より高いフルード数では、どの船型も原型よりも、平水中全抵抗 R_T が低減している。

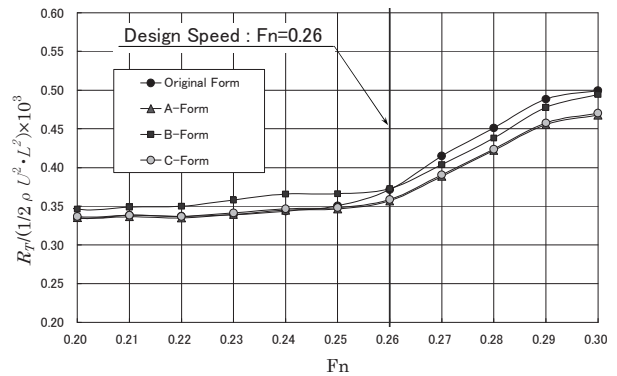
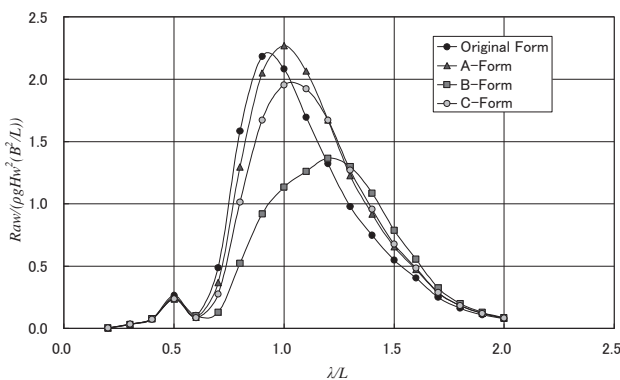


Fig.12 Comparison of wave-making resistance coefficient curves

各船型の規則波正面向波中の抵抗増加 R_{Aw} の応答関数を原船型のものと比較して Fig.13 に示す。抵抗増加の計算を行った海象条件は、前述の通り平均有義波高 1.88m、平均周期 8.8s の不規則波であり、フルード数は $Fn=0.26$ である。

どの船型も、抵抗増加を計算している波浪条件で最も出現頻度の高い波長（波周期：8.8s、波長船長比 $\lambda/L=0.525$ ）での応答関数に大きな差はないものの、B-Form や C-Form は、応答関数のピーク値が大きく低減しており、その影響が現れて不規則波中の抵抗増加の短期予測値が小さくなったことが分かる。



Sea State 4, Froude No.: 0.26, $\beta=180$ deg.

Fig.13 Comparison of added resistance in waves

本研究においては、平水中全抵抗と波浪中抵抗増加を同時に低減させることを目的とした多目的最適化を行ったが、もし、平水中全抵抗のみの低減を取り扱ったとすれば、横断面積曲線の変化などから見て、船首水線面の広がったブラントネス係数の大きな船型が得られ、その波浪中抵抗増加は大きくなるという結果が得られたと考えられる。しかし、波浪中抵抗増加も評価関数として加えられた最適化が行われたため、そのような船型とはなっていない。ある性能を改善しようとして他の性能を悪化させるという様な不都合な状況となるのを避けるために、複数の評価項目を同時に改善する多目的最適化を行うことが非常に有効であることが分かる。

また、船型最適化によって得られた船型は、浸水面積や浮心位置等に、直感的には必ずしも有利とは言えない船型変化も見られたが、最終的には平水中全抵抗や波浪中抵抗増加が低減されている。これは様々な船型要素の影響を総合的に評価できないと、効果的な船型改良が難しいことを表していると思われる。

今回得られた船型は、船型設計者が評価項目（目的関数）の特徴を理解して、船型変更と評価関数の計算を繰り返せば、同じような船型を得ることができたと考えられる。本最適化手法では、目的関数の特徴を踏まえた最適船型探索法などの

工夫は一切施していないが、それにも関わらず、あたかも船型改良の知見を有する設計者が探索を行なったかの様に、自動的に最適化例として挙げた船型を得ることができている。これは人間が行なうのと同じ様な作業をコンピュータ上で自動的に行うことができるということを示しており、本船型最適化手法は船型設計者の設計業務への負荷の低減という面から優れた方法であると思われる。

5. 結言

本研究では、船舶の平水中全抵抗 R_T と波浪中抵抗増加 R_{Aw} の双方の低減を狙った多目的船型最適化手法を提案した。最適化手法で用いる交叉方法については、適用確率変更型 LUNDX- m +EDX を用い、世代交代モデルについては POSS に改良を施したものをを用いた。また、目的関数となる平水中全抵抗および波浪中抵抗増加の計算法、設計変数となる船型パラメータ、制約条件などを決め最適化問題の定式化を行い、提案した最適化手法による船型最適化を行うプログラムを作成して、KRISO 3000TEU container ship を原型とした船型最適化を試みた。その結果、次のことが確認された。

- 1) 設計変数を変更して作成した船型のほとんどが、原型とほとんど同じ波浪中抵抗増加を示し、設計変数を無作為に変化させても、波浪中抵抗増加は大きく変化しないことが確認できた。
- 2) 最適化は世代が進むにつれ、徐々に明確な Pareto 面を形成し始め、評価項目である平水中全抵抗 R_T と波浪中抵抗増加 R_{Aw} が小さな値へと移り変わっており、世代毎に着実に船型最適化が達成されているのが確認できた。
- 3) 試みられた船型最適化では、50 世代目で平水中全抵抗 R_T と波浪中抵抗増加 R_{Aw} の双方の値が、原船型 KRISO 3000TEU container ship の値よりも低減された船型を 53 種得ることができた。

今後の課題としては、

- 1) 本研究で用いた形状影響係数計算法は、フレームライン形状の影響を考慮できないものを用いたが、フレームライン形状を含む船型差を正確に評価できる形状影響係数計算法を、計算速度の高速化を行って導入する必要がある。
- 2) 制動馬力のレベルで推進性能を改良できるように、自航要素の評価方法を目的関数へ導入する。
- 3) 幅広い海象条件での波浪中抵抗増加を改善できるように、さらに次元を増やした多目的最適化へ拡張するなどを行うことができる。

参考文献

- 1) Sakamoto, T. et al.: Minimization of Resistance of Slowly Moving Full Hull Forms in Short Waves, 16th Symposium on NAVAL HYDRODYNAMICS, pp.598-613, 1986
- 2) NAVSEA WARFARE CENTERS Carderock Division
<http://www.dt.navy.mil/hyd/sur-shi-mod/index.html>
- 3) Periet, D. al.: Multidisciplinary Design Optimization of a Naval Surface Combatant, Journal of Ship Research, Vol.47, No. 1, pp.1-12, 2003
- 4) Kashiwagi, M. and Sumi, K.: Development of Hull Form of a Ship with High Performance in Waves, Proc. of International Conf. on Fast Sea Transportation 2005 CD-ROM, 2005.
- 5) Chen, S. et al.: Multi-Objective Optimization of Ship Hull Form for Wavemaking Resistance, Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects, No.106, pp. 191-200, 2003.
- 6) 安東潤, 中武一明: 双胴船の造波抵抗低減の一試み—実数値遺伝的アルゴリズムによる船型改良—, 西部造船会会報, 第107号, pp.1-13, 2004.
- 7) 平山明仁, 安東潤: 複数の載貨状態における造波抵抗低減に関する研究—実数値遺伝的アルゴリズムを用いた多目的船型最適化—, 日本船舶海洋工学会論文集, 第3号, pp.189-195, 2006.
- 8) 平山明仁, 安東潤: 造波抵抗と碎波の低減を目的とした船型改良法に関する研究—実数値遺伝的アルゴリズムを用いた多目的船型最適化—, 日本船舶海洋工学会論文集, 第5号, pp.185-193, 2007.
- 9) Hirayama, A. and Ando, J.: Study on Reduction of Wave-making Resistance in Multiple Load Conditions using Real-coded Genetic Algorithm, PRADS2007, Vol.2, pp.1050-1056, 2007.
- 10) KRISO 3000TEU container ship (KCS)
http://www.nmri.go.jp/cfd/cfdws05/Detail/KCS/KRISO_3000TEU_container_ship.html
- 11) 安東潤他: Rankine Source 法による波流れの一計算法, 西部造船会会報, 第75号, pp.13-20, 1988.
- 12) 安東潤他: 船の推進性能に及ぼす自由表面の影響(第三報), 西部造船会会報, 第79号, pp.13-20, 1990.
- 13) Eggers, K.W.H. , et al. : An Assessment of Some Experimental Methods for Determining the Wave-making Characteristics of a Ship Form, Trans. of SNAME, Vol. 75, pp.112-157, 1967.
- 14) 18th International Towing Tank Conference, Proceedings Vol.1, pp.50-92, 1987.
- 15) 富田哲治郎: 船舶基本設計論, 丸善出版サービスセンター, pp.78-82, 1982.
- 16) 高橋雄: 波浪中抵抗増加の実用的推定法とその船型計画への応用, 西部造船会会報, 第75号, pp.75-95, 1988.
- 17) 丸尾孟: 波浪中の船体抵抗増加に関する研究(第2報 抵抗増加の本質について), 造船協会論文集, 第108号, pp.5-13, 1960.
- 18) 丸尾孟, 石井昭良: 簡易化公式による向い波中抵抗増加の計算, 日本造船学会論文集, 第140号, pp.136-141, 1976.
- 19) 丸尾孟, 岩瀬和夫: 斜波における抵抗増加の計算, 日本造船学会論文集, 第147号, pp.79-84, 1981.
- 20) 研究資料 No.110, 第108 研究部会“高速貨物船の波浪中における諸性能に関する研究”報告書, pp.32-40, 1970.
- 21) 研究資料 No.143, 第125 研究部会“超高速コンテナ船の耐航性に関する研究”報告書, pp.75-84, 1978.
- 22) 佐久間淳他: 高次元 κ -tablet 構造を考慮した実数値 GA, 人工知能学会論文誌, 19 卷1号 D, pp.28-37, 2004.
- 23) 佐藤浩他: 遺伝的アルゴリズムにおける世代交替モデルの提案と評価, 人工知能学会, Vol.12 No.5, pp.734-744, 1997
- 24) Deb, K. et al. : A Fast Elistist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization : NSGA-2, KamGAL Report, No.200001, 2000.
- 25) 鈴木和夫他: Rankine Source 法に基づく造波抵抗最小船型の計算, 日本造船学会論文集, 第185号, pp.9-19, 1999.
- 26) Bales, S.L. : Designing Ships to Natural Environment, Nav. Eng. Jnl., Vol.95, No.2, 1983.
- 27) 17th International Towing Tank Conference, Proceedings Vol.1, pp.482, 1984.
- 28) Kodama, Y. : Computation of Ship's Resistance Using an NS Solver with Global Conservation - Flat Plate and Series60($C_B=0.6$) Hull -, Journal of the society of naval architects of Japan, Vol.172, pp.147-155, 1992.
- 29) Fujii, A. et al. : Application of hull form design system using CFD, Proceedings of International Conference on Marine Research and Transportation 2005, pp.139-146, 2005.