

# 24 多目的最適化手法を用いた船型設計手法について

海上安全領域 耐航・復原性能研究グループ  
CFD 研究開発センター

\*南 佳成  
日夏 宗彦

## 1. はじめに

最近、アジアの経済の成長に伴い、海上輸送における貨物の重要性も増してきている。海上輸送が物流システムの一部を担うには、定時性の確保や運航サービスの安定供給が必要不可欠である。また、物流コスト削減も大きな課題である。

そこで、筆者らは船型設計の段階からも上記の問題を考慮するべきであり、定時性に関連する耐航性能、物流コストにも関連する推進性能をそれぞれの性能を総合的に評価できる船型設計システムが必要であると考えている。しかし、従来の船型設計は平水中の推進性能が中心に行われ、耐航性能の影響についてまでは十分考慮されていなかった。最近のシミュレーション技術の進歩により、推進性能の分野ではCFD（数値流体力学）を用いて造波抵抗、粘性抵抗の最適化など船型設計に適用される例も出てきており、耐航性能の分野ではストリップ法が実用的なツールとして定着している<sup>[1]</sup>。これらの二つのツールを利用すれば、船型設計の基本設計段階でも総合性能の評価を行うことが可能になった。実海域での性能評価を行う場合、CFD計算や不規則波中での短期予測計算は計算時間やパラメータが多くなり計算コストが大きくなることが問題である。さらに、船型設計における船型の最適化プロセスで各船型の性能評価を繰り返し行われなければならないため、それに伴い計算時間が増大する。

本研究では、最適化プロセスでの性能評価のための解析回数を減らすために、解析回数が少ない多目的最適化手法の開発することを目的とした。品質工学等で用いられている応答曲面法を船型設計の最適化プロセスとの中に導入した。応答曲面法とは、最小二乗法、実験計画法により、設計変数による応答（目的関数）の変化（特性）を実近似多項式で表現する方法である。応答曲面法は、一度近似多項式を構築すれば大規模計算を行わなくても広範囲の設計

変数の変化に対する性能評価が行える利点がある。応答曲面法を用いた形状最適化の研究は、材料工学、航空工学の分野で適用された例がいくつかあり、応答曲面法が形状設計にも適用されつつある<sup>[2][3]</sup>。

本論文では、応答曲面法の有効性について検討するために、応答曲面法を用いた船型設計システムを簡単な数式船型に適用して多目的関数に対する最適化を行った結果について報告する。

## 2. 設計システムの概要

筆者らが開発した多目的船型設計システムの流れを図-1に示す。船型設計システムでは、まず初期船型を与え、その船型をベースに変更していく方法を用いている。船型最適化過程での性能評価には、推進性能と耐航性能について評価を行う。システム最適化の過程では、各設計変数の組み合わせに対す

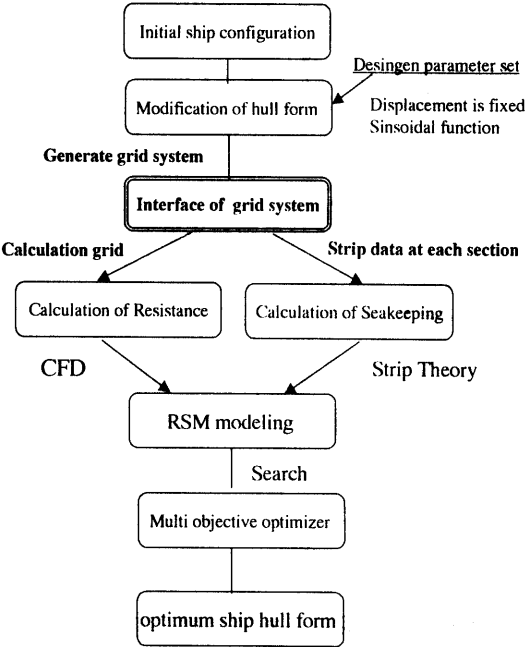


図-1 応答曲面手法を用いた船型設計フロー

る性能評価の計算結果から応答曲面法を用いて近似多式を作成する。この近似式をもとに最適化計算を行い、最適船型を求める。船型変更法がその船の性能に大きく影響するために重要になってくる。本論文では、船型変更する部分の境界上で滑らかに接するように3次のsin関数を用いることにした。さらに、船型最適化の過程では、排水量一定の条件が課せられることが多いため、船型変更関数にあらかじめ排水量一定の条件で変更するように形状変更関数の係数を決定した。推進性能を推定するときに使用する計算格子は、設計変数が変更される度に再構築される。耐航性能計算ツールであるストリップ法に用いるデータも、この計算格子に合わせて自動的に変更されるようにした。

### 3. 応答曲面法

応答曲面法は、 $n$ 個の予想変数 $x$ から予想される応答 $y$ の関係式を近似したものである。

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon$ は近似誤差である。

本論文では、多項式で近似する方法を用い、2次の多項式で近似する場合を考える。 $m$ 個の設計変数がある場合には以下ようになる。

$$y = c_0 + \sum_{1 \leq j \leq m} c_j x_j + \sum_{1 \leq j < k \leq m} c_{jk} x_j x_k \quad (2)$$

この近似多項式では、二次の項を $x_m = x_1 x_2$ 等と置き換えて線形表示する。設計変数のパラメータ数を $l$ 、変数と応答の組み合わせの総数を $k$ とし、(2)は以下のように表現できる。

$$y = \mathbf{c}^T \mathbf{X} + \varepsilon \quad (3)$$

$$\mathbf{c} = [c_0, c_1, \dots, c_k]$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1l} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{k1} & \dots & x_{kl} \end{bmatrix}$$

この近似多項式を求めるためには、係数 $\mathbf{c}$ を決めなければならない。応答曲面法では、係数 $\mathbf{c}$ を求める

ために最小二乗法を用いる場合が一般的であり、係数 $\mathbf{c}$ の最小二乗推定量 $\hat{\mathbf{c}}$ は、次式で表すことができる。

$$\hat{\mathbf{c}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (4)$$

この $\mathbf{c}$ の各成分の推定精度が高くなければ、回帰性の高い近似式を求めることができないため、 $\mathbf{c}$ の各成分の分散を小さくする必要がある。本論文では、応答曲面を作成するために用いる設計変数の組み合わせをD最適基準を用いた。D最適基準は最小二乗推定量の式(4)の行列式 $|\mathbf{X}^T \mathbf{X}|$ を最大化する設計変数の組み合わせを求める最適基準である<sup>[4]</sup>。

この行列式を最大化する設計変数の組み合わせは、式(4)の $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$ の各成分を相対的に小さくすることができ、それに対応する $\mathbf{c}$ の各分散は最小になる。これを利用すれば回帰性の高い近似多項式の係数を効率的に推定することが可能となる。

近似多項式の最小値を求める過程で、多目的最適化では各評価値間のトレード・オフが必要になる。そこで、各評価値を設計者などが要求する目標値で無次元化した値をベクトル表示し、そのノルムを最小にするように最適化した。

$$\mathbf{O} = w_1 \times \left| \frac{f^{(1)}(x) - \mathbf{f}_1}{\mathbf{f}_1} \right| + \dots + w_i \times \left| \frac{f^{(i)}(x) - \mathbf{f}_i}{\mathbf{f}_i} \right| \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{O}$ は各評価値のトレード・オフ関数である。 $f^{(i)}(x)$ は船型設計で用いる各評価値を応答曲面法で近似された多項式、 $w_i$ は設計者が決定する重み係数、 $\mathbf{f}_i$ は設計者が各評価関数に要求する目標値である。これにより、 $\mathbf{O}$ は、オーダーが違う各評価関数に対して設計者の目標要求値で無次元化されている。多目的最適化の過程では、トレード・オフ関数 $\mathbf{O}$ を最小化して最適船型を決定する。

トレード・オフ関数の最小値の検索手法としては、各評価関数における設計変数の最適値は異っており、多目的最適を行う場合非線形計画法などの局所的な検索手法では検索効率が悪いいため、大局的な検索手法の一つである遺伝アルゴリズム(GA)を用いることにした。

#### 4. 船型変更手法

最適化の過程では、船型変更関数の選択が船型の性能に非常に影響するために重要である。船型設計の研究では、船尾部分、バルブ及びCpカーブなどとの局所的な変更について検討される例は多く見られるが、実際の船の運航性能を最適化する場合には船型全体での変更が必要と考えられる。筆者らは船型全体を変更する変更方法を開発した。まず、船型変更を2段階に分けて、最初にCpカーブの変形をし、その後船型のオフセットをy方向に変更する。

Cpカーブの変更は、船首部分と船尾部分を変更する。このとき、変更関数は3次のsin関数を用いる。3次のsin関数は、変更する部分の境界上で1階微分、2階微分が0となり、原船型から滑らかに変更できる利点がある。

$$\begin{cases} Cp(x) = Cp(x)_{original} + \Delta Cp_f(x'_f) & -0.5 \leq x \leq x_f \\ Cp(x) = Cp(x)_{original} + \Delta Cp_a(x'_a) & x_a \leq x \leq 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Delta Cp_f(x) = C_f \cdot A_m \cdot \sin^3(x'_f) & , -0.5 \leq x \leq x_f \\ \Delta Cp_a(x) = C_a \cdot A_m \cdot \sin^3(x'_a) & , x_a \leq x \leq 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 $x'_f = \frac{x}{(0.5+x_f)}$   $x'_a = -\frac{x}{(0.5-x_a)}$  である。

$x_f$  は船首部の船型の変更する範囲の船長方向の開始位置、 $x_a$  は船尾部の変更する範囲の船長方向の開始位置である。また、 $d_m$  は喫水、 $B$  は船幅を表す。 $A_m$  は中央部断面積 ( $d_m \times B$ ) を表す。 $C_f$ 、 $C_a$  は船首部、船尾部での各変更関数の係数を表す。ただし、 $x=-0.5$  が F. P. に  $x=0.5$  が A. P. に対応するようにスケール換算している。一般的に、船型変更時の拘束条件として排水量一定とするが、変更関数自体が排水量一定の拘束条件を満たした形の関数にすれば、この拘束条件を考慮する工数を減らすことができる。船首部での変更される面積と船尾部での変更される面積が相殺されるように、係数  $C_f$ 、 $C_a$  の関係式を決める。

$$C_a = -\frac{(0.5-x_a)}{(0.5+x_f)} C_f \quad (8)$$

次に、各断面形状の変更を行う。上記変更関数より、

Cpカーブ上での変更される面積が求められる。y方向の変更量は重み関数の形で与えることにする。

$$y(x, y) = y_0(x, z) \cdot W(x, y) \quad (9)$$

ここで、 $y_0(x, z)$  は原船型の形状、 $W(x, y)$  はy方向への変更に対する重み関数を表す。重み関数は、Cpカーブのときと同様に3次のsin関数を用いる。重み関数は、x座標の位置に対して船首部分と船尾部分の変更範囲に分けて以下のように表現される。式の中の係数は、Cpカーブの変更される面積に対応して各yz断面で変更される面積が同じになるように求めた。

$$W(x, z) = \frac{3d_m}{4\pi} \Delta Cp_f(x) \cdot \sin^3(\pi z') \quad \begin{cases} z' = \frac{-z}{(d_m + d_{cf})} & z < d_{cf} \\ z' = \frac{-z}{d_{cf}} & z \geq d_{cf} \end{cases}$$

$$W(x, z) = \frac{3d_m}{4\pi} \Delta Cp_a(x) \cdot \sin^3(\pi z') \quad \begin{cases} z' = \frac{-z}{(d_m + d_{ca})} & z < d_{ca} \\ z' = \frac{-z}{d_{ca}} & z \geq d_{ca} \end{cases} \quad (10)$$

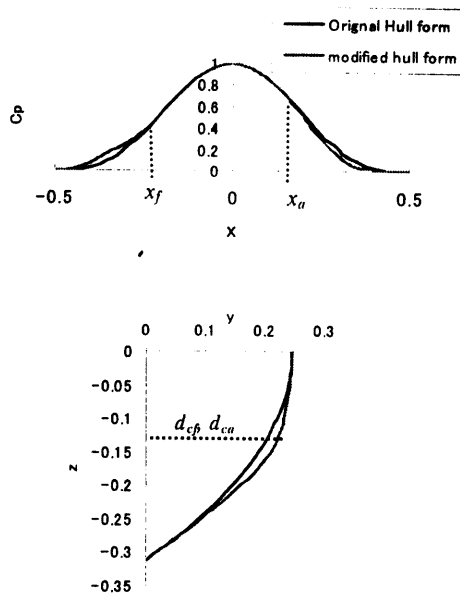


図-2 船型変更手法

これより、本設計システムでは設計変数は  $x_f, x_a, C_f, d_{cf}, d_{ca}$  の5個となる。

5. 最適化過程における性能評価ツール

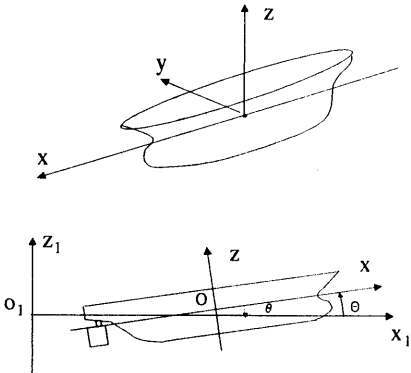
本システムでは、推進性能評価手法として海上技術研究所で開発された NEPTUNE と呼ばれる NS ソルバーを用いた<sup>[5]</sup>。これは、有限体積法によって離散化された疑似圧縮性 NS 方程式を準ニュートン緩和法と多重格子法を用いて解く方法であり、船体周りの粘性流れの定常解を効率よく求めることができる。耐航性能計算としては、流体力の推定にストリップ法を用い、抵抗増加は丸尾の式を用いて推定している。

6. 応答曲面法を用いた試設計結果

本論文では、多目的関数は平水中抵抗係数  $c_t$ 、波浪中抵抗増加係数  $C_{raw}$ 、上下揺れの無次元振幅値  $z'$  及び縦揺れの無次元振幅値  $\theta'$  で構成される。これらの多目的関数を最小にする船型を求める。応答曲面法を用いた最適化手法の有効性を確認するために、設計変数を2個とする。設計変数が2個の場合は、

Table 1 設計変数の変更範囲及び固定値

| Design Variables | Range or Value             |
|------------------|----------------------------|
| $x_f'$           | -0.3 (fixed)               |
| $x_a'$           | $0.10 \leq x_a \leq 0.40$  |
| $C_f$            | $-0.10 \leq C_f \leq 0.10$ |
| $d_{cf}$         | -0.03125 (Fixed)           |
| $d_{ca}$         | -0.03125 (Fixed)           |



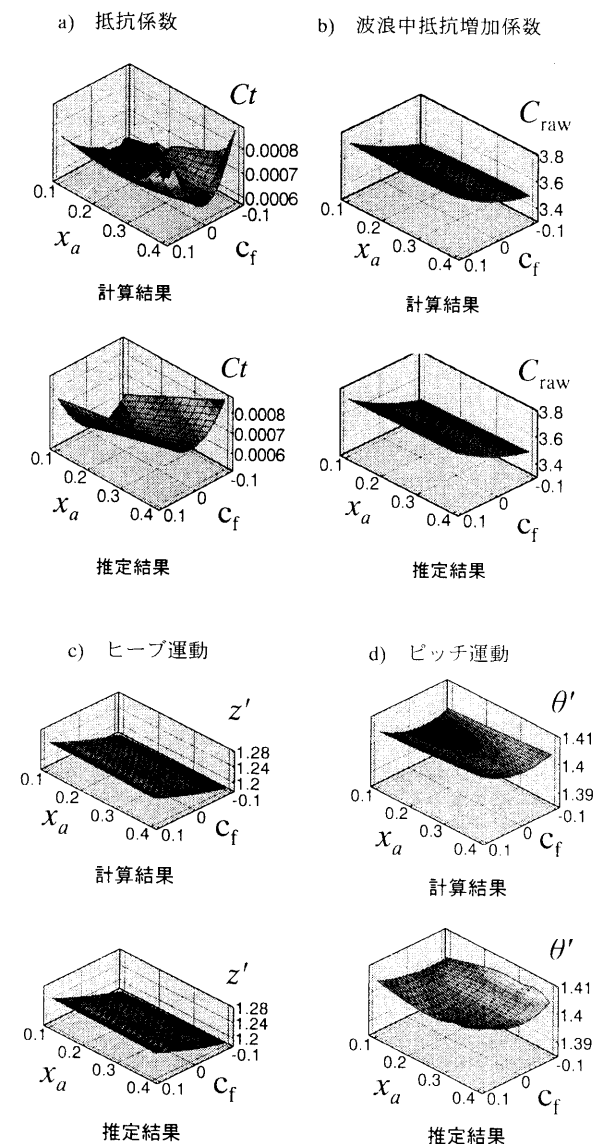
図－3 試設計に用いた座標系

視覚的にも理解できる利点がある。今回、設計変数は、 $C_f$  と  $x_a$  とし、他の設計変数は固定した。対象船型は、船型表現が簡単に行う。Wigley 船型で行った。Wigley 船型の主要目は、5.0m、幅 0.5m、喫水 0.3125mである。

設計変数の範囲は、幾何学的な拘束条件から変型した船型が船幅 B を超えず、0 にならにように設定した。各設計変数の値及び範囲を Table 1 に示す。設計条件はフルード数を 0.25、波浪状態は規則波中で波長船長比は 1.0、波高波長比を 1/50、波向きを 180 度（向い波）の 1 条件とする。計算に用いた格子は H-O 型格子を用い、格子数は 105×33×33 である。計算に用いた座表系を図－3 に示す。

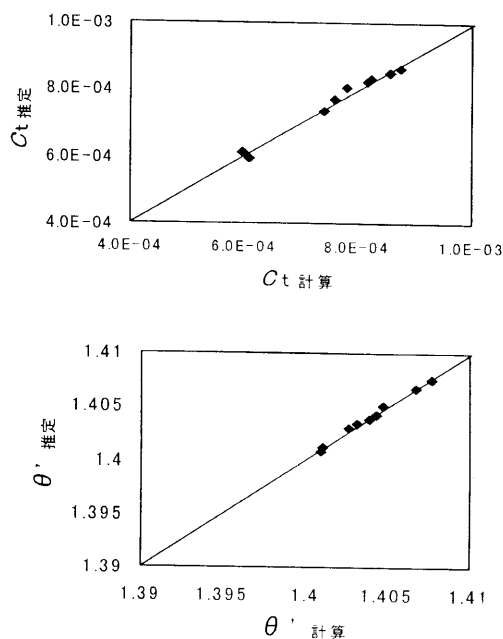
今回の設計では、近似モデルには 2 次多項式を用い、2 個の設計変数の範囲から 20 等分割のデータ候補点を選定した。設計変数の組み合わせの総数は 400 個（20×20）となる。応答曲面法の 2 次モデルの係数は 12 個あり、最低限 12 個以上は必要である。モデルを推定するために、1.5 倍～2.5 倍以上ある方がいいという研究例があるため、今回は設計パラメータの組み合わせを最低限必要なパラメータの数の 2 倍になる 24 個とした<sup>[6]</sup>。24 個の設計パラメータを選ぶために D 最適値基準を用いた。

応答曲面法の有効性を検討するために、設計変数の組み合わせを総当りで計算して得られた応答曲面と応答曲面法で求めた近似多項式による推定値を用いた応答曲面を比較した結果を図－4 に示す。抵抗値においては、計算結果の最小値と応答曲面法による推定の最小値はほぼ同じ位置にあることが分る。また、計算結果も二次曲面になっており、二次の応答曲面で十分特性を捉えていることが分る。同様に、ピッチ運動の振幅も、二次の応答曲面になっている。ただ、今回の設計変数の変更ではピッチ運動の振幅変化がわずかで設計変数に対する感度が低いことが言える。抵抗増加係数、ヒープ運動の振幅値においては、計算値と応答曲面の最小値はほぼ同じ位置にあることが分る。これらの評価関数は、設計変数に対して二次曲面にはならず、 $x_a$  による影響はほとんどなく、 $C_f$  の変化に影響が大きいことが分った。



図－４ 応答曲面法を用いた推定値と計算ツールで計算した計算結果を用いた応答曲面の比較

次に、定量的にも評価するために、計算結果と応答曲面による推定値との相関関係を調べた。一例として、抵抗係数とピッチ運動の振幅の相関関係を図－５に示す。推定値が、図にある直線上にあれば推定値と計算値が一致していることになる。図－５をみると、抵抗値は若干ばらついているが、直線上に分布していることが分る。ピッチ運動の振幅値は、直線上にあるので推定精度が良いことが分る。

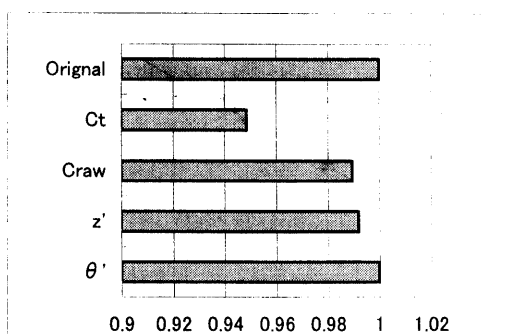


図－５ 応答曲面法による推定値と計算結果の相関関係

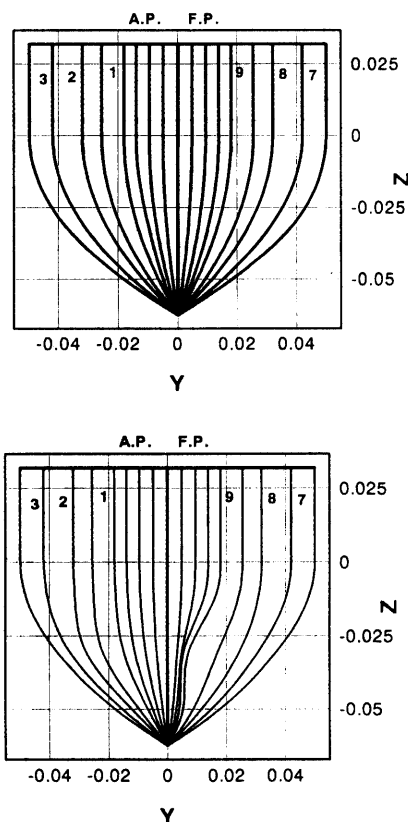
定量的評価の結果から、応答曲面法による近似手法が十分設計にも用いることができることが分った。

この結果を踏まえ、多目的最適化設計の一例として、(5)のトレード・オフの重み関数をすべて 1.0 にして多目的最適化を実施した。最適化の結果を、原船型の性能を 1.0 として各目的関数の原船型と最適船型の相対比を図－６に示す。平水中抵抗は、原船型より 5.0%減少しており、波浪中抵抗増加係数は 1.0%の減少である。他の船体運動に関する値もわずかに減少していることが分った。最適化された船型の形状を原船型と比較した結果を図－７に示す。船首部分が凹形になってV型に近くなっており、船尾部分全体にわたってわずかにふくらんだ形状になっていることが分る。船体運動の面からは、一般的に船首部がV型の方がいいと言われていることから定性的な傾向は合っていると考えられる。

応答曲面法を用いた最適化手法により、各評価関数の値を減少させることができた。この応答曲面法を用いた多目的最適化計算では、200 回程度の計算回数で収束し、計算時間はPC上で数分であり、実用的なツールであることが分った。



図－6 多目的最適化手法により最適化船型の



図－7 最適化された船型と原船型の比較

## 7. まとめ

本論文では、総合的な運航性能を向上させるために、船型設計に応答曲面法を用いた多目的最適化手法の適用した。数式船型を用いて試設計をした結果から以下のようなことが分った。

(1) 応答曲面法を用いた推定値と実際に CFD 等で

計算した結果を比較し、推定値と計算値が良く一致しており、応答曲面法が船型設計に有効なツールであることが分った。

- (2) 試設計結果から、船型設計に用いる応答曲面法は二次のモデルでも、十分定性的に性能を推定できることが分った。
- (3) 応答曲面を用いると、多目的最適化の繰り返し回数を大幅に削減でき、実用的な時間で最適解を求めることができた。

今後、実用的な船型への適用を行うために、設計変数をさらに増やしたケースについても検討していく。さらに、実海域での性能を評価するためには、馬力推定に必要なプロペラ影響、定時性評価に関連する短期予測などの確率的評価も性能評価ツールの中に加えていく予定である。

## 8. 参考文献

- [1] 船型設計と流力最適化問題、試験水槽委員会シンポジウム、2000
- [2] 轟章、鈴木洋之、島村佳伸：電気ポテンシャル法による層間かく離検出への応答曲面法の適用、日本機械学会第 11 回計算力学講演会論文集、1998、(<http://florida.mes.titech.ac.jp/research-tj.html>)
- [3] A. A. Giunta, V. Balabanov, S. Burgee, B. Geossmann, R.T.Haftka, W.H. Mason, and L. T. Watoan, "Multidisciplinary optimization of a super sonic transport using design of experiments theory and response surface modeling", Aeronautical J., vol.101 (1008), pp.357-356, 1997.
- [4] Myera, R.H. and Montgomery, D.C. "Response Surface Methodology, Process and Product Optimization Using Design Experiments", pp.1-141, 279-401, 462-480, John Willey & Sons, (1995)
- [5] Hirata, N. and Hino, T.: "An Efficient Algorithm for Simulating Free-Surface Turbulent Flows around an Advancing Ship", Journal of the society of Naval Architects of Japan, Vol.185, pp.1-8, 1999
- [6] Giunta, A.A., Dudley, J.M., Narducci, R., Grossman, B., Haftka, R. T., Mason, W. H., and Watson, L. T. : "Noisy Aerodynamic Response and Smooth Approximations in HSCT Design", Proceeding of the 5th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, pp. 1117-1128, Panama City Branch, FL, AIAA Paper 94-4376, 1994