# 応答曲面法を用いた実海域性能を考慮した 船型形状最適化について

海上安全研究領域 耐航・復原性能研究グループ 南 佳成

## 1.はじめに

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実海域性 能の評価を行うことが可能になった。筆書らは、 実海域性能を考慮して船型最適化を行うために、 まず推進性能、耐航性能を同時に評価できる最適 化手法の開発を目指した。この結果、品質工学等 でも用いられている応答曲面法を用いた船型最適 化手法を開発した。応答曲面法 (Response Surface Methodology: RSM) 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)を近似多項式で表現する方法 である。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>。前報では、数式船型を元に応答曲面 法を用いた船型最適化手法の妥当性について検証 を行った<sup>4)</sup>。本論文では、有効性が確認された応 答曲面法を用いた船型最適化手法により実用船型 (シリーズ60船型)を対象に船型最適化を実施 し、本最適化手法の実用性について検討した結果 について報告する。

#### 2.設計システムの概要

本研究で開発した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 対する性能評価の計算結果から応答曲面法を用い



## 図1 応答曲面手法を用いた船型設計フロー

て近似多項式を作成する。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。船型設計シ ステムの中で、船型変更法は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。

## 3. 応答曲面法

代表的な最適化手法の一つである勾配法は、図 2に示すように、感度解析及び直線検索時に解析 計算を実施しなければならず、さらに収束するま でこのプロセスを繰り返さなければならない。こ のため、解析計算時間が非常に大きくなる傾向が ある。一方、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実施できる利点があ る。感度解析や繰り返し計算がないために最適化 の計算コストを把握できるために、現実的な設計 スケジュールを構築しやすいと言える。設計パラ メータも実験計画法を用いるために、全変数の組 み合わせを考えずに必要最低限の変数で行うこと ができる。



#### 図2 最適化手法の違い

これにより、応答曲面法はある程度多変数になっ ても十分対応できる。さらに、応答曲面法を用い た船型設計は、設計ミッションの変更に対しても 各評価関数の近似多項式が既に求まっているため に、再計算しなくても目的関数の重み係数を変更 するだけで新たな最適値を求めることができる。 応答曲面法の中で、設計変数 x, から予想される応 答 y の近似式を以下のように表現する。

$$y = f(x_1, x_2, \cdots, x_n) + \varepsilon$$
<sup>(1)</sup>

ここで、 *ε* は近似誤差である。 本論文では、 2 次の多項式で近似する場合を考 える。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。これより、 m個の設 計変数がある場合には以下のようになる。

$$y = c_0 + \sum_{1 \le j \le m} c_j x_j + \sum_{1 \le j \le k \le m} c_{j_k} x_j x_k$$
(2)

(2)式をマトリック表示で表現すると、

$$\mathbf{y} = \mathbf{c}^T \mathbf{x} \tag{3}$$

本論文では、応答曲面を作成するために用いる設 計変数の選定にD値最適基準を用いた。D値最適 基準は最小二乗法の(2)式の係数を同定するため に用いる最小二乗法の推定誤差を最小化する手法 である<sup>5)</sup>。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、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。

$$\mathbf{O} = w_1 \times \left| \frac{f^{(1)}(x)}{\mathbf{f}_1} \right| + \dots + w_i \times \left| \frac{f^{(i)}(x)}{\mathbf{f}_i} \right|$$
(4)

ここで、O は各評価値のトレード・オフされた 値である。 $f^{(i)}(x)$ は船型設計で用いる各評価値を 応答曲面法で近似した多項式、 $w_i$ は設計者が決定 する重み係数、 $f_i$ は各評価値を無次元化するた めに定義した基準値である。これにより、オーダ ーが違う各評価関数が無次元化された単一目的関 数になっている。最適化プロセスの過程では、ト レード・オフ値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 なっており、多目的最適を行う場合非線形計画法 (SQP)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 C p カー プ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。 この開発した船型変更手法の概念図を図3に示す。

まず、船型変更を2段階に分けて、最初にCp カープの変形をし、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。

$$\begin{cases} Cp(x) = Cp(x)_{orignal} + \Delta C_{pf}(x_{f}') & ,-0.5 \le x \le x_{f} \\ Cp(x) = Cp(x)_{orignal} + \Delta C_{pa}(x_{a}') & ,x_{a} \le x \le 0.5 \end{cases}$$
(5)

$$\begin{cases} \Delta C p_f(x) = C_f \cdot A_m \cdot \sin^3(x_f') & ,-0.5 \le x \le x_f \\ \Delta C p_a(x) = C_a \cdot A_m \cdot \sin^3(x_a') & , x_a \le x \le 0.5 \end{cases}$$
(6)

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。

$$C_a = -\frac{(0.5 - x_a)}{(0.5 + x_f)} C_f$$
(7)

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。

$$y(x, y) = y_0(x, z) \cdot W(x, y)$$
 (8)

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、×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。 $d_{cf}, d_{ca}$ は、船首部分 及び船尾部分の変更範囲における喫水方向の最大 変化の位置を示す。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。

$$W(x, z) = \frac{3d_m}{4\pi} \Delta C p_f(x) \cdot \sin^3(\pi z) \qquad \begin{cases} z' = \frac{-z}{(d_m + d_{cf})} & z \prec d_{cf} \\ z' = \frac{-z}{(d_m + d_{cf})} & z \ge d_{cf} \end{cases}$$

$$W(x, z) = \frac{3d_m}{4\pi} \Delta C p_a(x) \cdot \sin^3(\pi z') \qquad \begin{cases} z' = \frac{-z}{(d_m + d_{ca})} & z \prec d_{ca} \\ z' = \frac{-z}{d_{ca}} & z \ge d_{ca} \end{cases}$$





図3 船型変更手法

## 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>6)</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。CFD計算ツールの検証は、文献6) で実施しているために本論文内での検証は省略す 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、抵抗増加は丸尾の近似式を用い て推定している<sup>7).8)</sup>。

## 6.応答曲面法を用いた試設計結果

船型最適化システムの有効性を検証するために、 シリーズ60船型を対象に船型最適化を行った。 評価関数は平水中抵抗係数*c*<sub>t</sub>、波浪中抵抗増加係 数 C<sub>now</sub>、上下揺れの無次元振幅値 z' 及び縦揺れの 無次元振幅値 θ' で構成される。これらの評価関数 に重み係数をかけて単一化した目的関数を最小に する船型を求める。設計変数としては、上記船型 変更システムの中で示した $x_f, C_f, x_a, d_{cf}, d_{ca}$ の5 変数を用いた。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-0型格子を用い、 格子数は105×57×33である。計算に用いた座表 系を図4に示す

## 表1 設計変数の変更範囲及び固定値

Design Variables	Range or Value
$x_f$	$0.10 \le x_f \le 0.40$
x <sub>a</sub>	$-0.40 \le x_a \le -0.10$
$C_f$	$-0.01 \le C_f \le 0.01$
d <sub>cf</sub>	$-0.04 \le d_{cf} \le -0.01$
$d_{ca}$	$-0.04 \le d_{ca} \le -0.01$



図4 試設計に用いた座標系

シリーズ 60 船型の主要目は、模型船のサイズで 長さ 7.0 m、幅 0.933m、喫水 0.373m、方形係数 C<sub>R</sub>は 0.6 である。まず、各評価関数ごとに応答曲 面を構築するために、各設計変数に対して等間隔 に設計変数値を5個づつ選出する。設計変数の組 み合わせは 3125 個になる。今回、応答曲面法は文 献4)で検証した二次モデルを採用しており、二 次モデルの係数は5つの設計変数に対して21個を 求める必要がある。 したがって、我々は、D 値最 適基準を用いて、推定精度の確保のために必要な 係数の数の2倍にあたる 42 個のデザインパラメ タを選定した。 これらの 42 個の設計変数値に対 して CFD 計算及びストリップ法計算を実施する。 この計算結果を基に最小二乗法を用いて応答曲面 の2次モデルの係数を決定する。応答曲面法によ り各評価関数の近似式が求まれば、あとは従来の 最適化手法(非線形計画法等)を用いて重み係数 により単一化された目的関数の最小値を簡単に短 時間で求めることができる。また、設計変数の変 更範囲が幾何学制約条件で決定しているので、最 適化プロセスの過程で制約条件は考えていない。

まず、船の総合性能を向上させるために、評価 関数である平水中抵抗係数*c*<sub>t</sub>、波浪中抵抗増加係 数*C*<sub>raw</sub>、上下揺れの無次元振幅値 <sup>z'</sup> 及び縦揺れの 無次元振幅値 θ' に対する重み係数を 均一に (*w*<sub>1</sub>,*w*<sub>2</sub>,*w*<sub>3</sub>,*w*<sub>4</sub>)=(1、1、1、1)とした。各評価関数 の応答近似式を求めるために、上記説明にあるよ うに42回のCFD計算及びストリップ法による 耐航性計算を実施した。この計算結果をもとに、 最小二乗法により各評価関数の応答近似式を構築 した。この近似式を最小化する設計変数の組み合 わせを非線形二次計画法により検索した。総合性 能の最適化に対する結果として、各設計変数は  $(x_f, C_f, x_a, d_{ef} d_{ca}) = (-0.35, -0.01, 0, 35,$ -0.025、-0.040)になった。このときの各評価値 の値を表2に示す。平水中抵抗係数が原船型と比 べて約2%減少していることが分かる。また、ピ ッチ角も約1%の減少になっている。波浪中抵抗 増加係数については、今回水線面形状を変更して いないためにあまり改善が見られなかった。総合 性能を重視して最適した船型を図5に示す。実線 原船型で破線が最適船型を表現している。この

# 表 2 総合性能を重視した船型最適化による各評 価関値の比較





# 図5 総合性能を重視した船型最適化による 船型の違い

図から、船首前半部分でくぼみができて船体下部 でバルブ上のふくらが見られる。なるべく、船首 部分を細くバルバスバウのような形状に近づけて 造波抵抗を小さくなるようにしていると考えられ る。

次に、波浪中船体運動のみを最小化することを 検討した。この場合、重み係数を推進性能に関す る平水中抵抗係数、波浪中抵抗増加係数を除く、 上下揺れの無次元振幅値 z' 及び縦揺れの無次元振 幅値 θ' に対して相対的に重み付けを大きくする。 各重み係数は(w1,w2,w3,w4)=(1、1、10、10)とした。 応答曲面法を用いた船型最適化手法では、船体運 動の最小化するために新たにCFD計算や耐航性 計算を実施する必要がない。上記総合性能の最適 化で求めた応答近似式を用いて重み係数だけを変 えて単一化された目的関数を最適化(最小化)す れば良く、設計検討にかかる計算コストは大幅に 削減できる。重み係数を変えた目的関数を用いた 最適化結果は、設計変数( $x_f, C_f, x_a, d_{cf}, d_{ca}$ ) = (-0.1、-0.01、0.1、-0.04、-0.01) になった。こ のときの各評価値の値を表3に示す。平水中抵抗

表3 船体運動のみ減少を目的とした船型最適化 による各評価関値の比較





図6 船体運動のみを減少を目的とした船型 最適化による船型の違い

係数、波浪中抵抗増加係数は若干増加しているが 原船型とほとんど同じである。船体運動に関して は、上下揺れの無次元振幅値 z' は改善されていな いが、縦揺れの無次元振幅値 θ' は原船型に比べて 約5%減少していることが分かった。船体運動の 最小化に対して設計された船型を図6に示す。船 首部分はV字船型、船尾部分はU字船型なるよう に変更されている傾向が分かる。この傾向は、耐 航性能に対する船型開発で言われている傾向に合 っている。また、船尾部分では喫水付近にふくら みを持ってきて船体動揺に伴う減衰効果を大きく していると考えられる。このように、応答曲面法 で選定した設計変数の組み合わせに対してCFD 計算等の解析計算を実施すれば、応答近似式が求 まり、様々設計仕様 (ニーズ)の変更に簡単に対 応できることが検証できた。

## 7.まとめ

本論文では、実海域性能を向上させるために、 推進性能だけでなく耐航性能も同時に評価できる 船型最適化として、応答曲面法を用いた最適化手 法について検討を行った。本最適化手法の有効性 を検証するために、実用的な船型としてシリーズ 60船型を用いて船型最適化した結果から以下の ようなことが分った。

- (1) 従来行われていた局所的な船型変更ではな く、全体的に船型を変更できる簡易な船型変 更手法を開発し、実用船型で試設計を行い検 証した。これにより、推進性能、耐航性能を 考慮した船型変更を実用的に行えることが 確認できた。
- (2) 設計変数を5変数とした場合、応答曲面法を 用いた船型最適化では従来の最適化手法と 比べて感度解析のための繰り返し計算が不 要のために、CFD計算等の大規模計算を数 十回程度実施するだけで船型最適化が可能 であることが分かった。
- (3) 応答曲面法を用いた船型最適化では、設計ニ ーズに対応して一度CFD等の計算を実施し て応答近似式を求めていれば、目的関数の重

み係数を変えるだけで、最適船型を求めるこ とができ、実用的な最適化手法であることが 分かった。

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) Guinta, 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
- 3) 轟章、鈴木洋之、島村佳伸:電気ポテンシャル法による層間はく離検出への応答曲面法の適用、日本機会学会第11回計算力学講演会論文集、1998
- 4)南 佳成、日夏宗彦:多目的最適化手法を用 いた船型設計手法について、第2回海上技術 安全研究所研究発表会講演集、2002
- 5 ) Myera,R.H. and Montgomery,D.C. "Response Surface Methodology, Process and Product Optimization Using Design Experimets", pp.1-141, 279-401,462-480,John Willey & Sons, (1995)
- 6) Hirata, N. and Hino, T.:"An Efficient Algorithm for Simulating Free-Surface Tublent Flows around an Advancing Ship", Journal of the society of Naval Architects of Japan, Vol.185, pp.1-8, 1999
- 7)丸尾孟他: 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、 1976
- 8)丸尾孟他: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、1980