

自動変形機能と離散型 SQP 法による最適船型設計法の開発

正会員 金井 亮 浩* 正会員 田原 裕 介**

Development of hull shape design procedure by automatic shape deformation and discretized SQP optimization method

by Akihiro Kanai, Member Yusuke Tahara, Member

Key Words: Hull design, Optimization, Discretized SQP, Automatic deformation, CFD

1. 緒言

船型改良による燃費削減を達成させる手段として、CAD による船型変形と CFD による評価が必要不可欠なツールとなっているが、手作業による変形には、時間のコストがかかり、パラメータ変更によるシリーズ変形が難しくどの程度の変形が最適であるのかを判断することが困難である。本論文では、より効率的な船型設計を可能とするため、3次元の船型データから自由度の高い複雑なパラメータ変形を自動的に短時間で行うことができる機能を開発する。更に、船型性能の最適化には CFD による評価を行うが、従来の連続的なパラメータを対象とした逐次 2 次計画法 (SQP 法)¹⁾ に比べ大幅な時間短縮を実現するため、パラメータ空間を離散化し、離散化された船型を対象とした SQP 法を開発する。

2. パラメータ船型変形

3次元の船型データを元にパラメータによる形状変形を行う。ここでは、IGES フォーマットの NURBS データを取扱い、NURBS のコントロールポイントを移動させることで形状変形を実現するものである。変形量は、それぞれのパラメータ変形に対する指定した変形量と指定した変形領域内の関数とを掛け合わせた形で定義されるため、基本的に滑らかな変形分布を与えることになる。関数としては、スプライン関数、線形関数、三角関数を利用する。

パラメータとしては 28 種類の変形パターンを開発し、任意の組み合わせの変形が可能となっており、複雑な変形を実現できる。変形パターンを以下に列挙する。なお、船体前後方向を x 軸、幅方向を y 軸、上下方向を z 軸とする。

Scaling in x: 船型全体の比率による x 方向伸縮

Scaling in y: 船型全体の比率による y 方向伸縮

Scaling in z: 船型全体の比率による z 方向伸縮

Lcb change: Lcb 位置変更

Cp change: Cp カーブ変更

Fore Cp change: 前半部の Cp カーブ変更

Aft Cp change: 後半部の Cp カーブ変更

Section shift in specified area: 指定する x 方向 2 点間の前後方向移動

Section shift at specified x: 任意の x 方向位置における前後

方向移動量を与え、セクションを移動

Body sections: 指定する複数断面に変形後の形状を与え、その形状に合うよう指定する x 方向変形領域間で断面形状を変形

Bow profile: 船首プロファイル形状を与え変更

Fore profile: 船首プロファイルを上下に変形

Aft profile: 船尾プロファイルを上下に変形

Profile shift: プロファイルラインを最大喫水位置を中心に前後方向へ移動

Width in specified area: 指定領域の幅方向への変形

Height in specified area by scaling: 指定した x 方向領域における上下方向への変形

Waterline shift: 水線における最大幅位置を中心に前後方向へ移動

Flare in specified area: 断面形状のフレアーをコントロール

Frame in specified area: 断面形状の任意の角度方向へのフレームライン変更

Rotate at specified plane: 指定する x 軸に平行な平面から指定する距離内において、この平面上に指定する中心位置(y,z)から与えた角度だけ回転

Shift from specified plane: 指定する x 軸に平行な平面から指定する距離内において、この平面を中心に y 方向へ移動

Scaling from specified plane: 指定する x 軸に平行な平面から指定する距離内において、この平面を中心に平面の外側または内側を y 方向へ伸縮

Bulb length: 船首バルブ長さの変更

Mid width linear scaling: 最大幅位置から離れるに従い線形的に小さくなる分布で、幅方向へ伸縮

Mid draft linear scaling: 最大幅位置から離れるに従い線形的に小さくなる分布で、深さ方向へ伸縮

X shift with z distribution: 指定する z 方向の複数点で x 方向移動量を指定し、x 方向変形領域で変形

Cut at specified width: 指定した幅で船体をカット

Shift vertically in specified area: 指定した z 方向変形領域における上下方向への移動

例えば、Width in specified area を選択し、変形領域として、x 方向を x1 から x2 までをその中間で最大変形量、両端で変形量 0 とし、z 方向を z1 から z2 までを z1 で最大変形量、z2 で変形量 0 とし、補間関数は三角関数を利用した場合、この変形領域内の船体表面(x,z)での変形量 dy は、y 方向への最大変形量を Δ とすると(1)式のような関数で与えられる。

* (有)エイ・シー・ティー

** (独)海上技術安全研究所

原稿受付 (学会にて記入します)

春季講演会において講演 (学会にて記入します)

©日本船舶海洋工学会

$$dy = \Delta \times \frac{1}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{x - x1}{x2 - x1} \times 2\pi \right) \right) \times \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(\frac{z - z1}{z2 - z1} \times \pi \right) \right) \quad (1)$$

以下に5種類の変形パターンの詳細を述べる。

Section shift at specified x

任意の x 方向位置での前後方向移動量を与え、与えた値を三角関数またはスプライン関数で補間する。Fig.1 の例では、4点 (x=0, 50, 146, 196.922) での移動量をそれぞれ 0,-10,-10,0 と与え、黒色の形状から緑色の形状へ変更されている。また、グラフには4点間の補間方法の sin 関数と spline 関数の場合を示している。

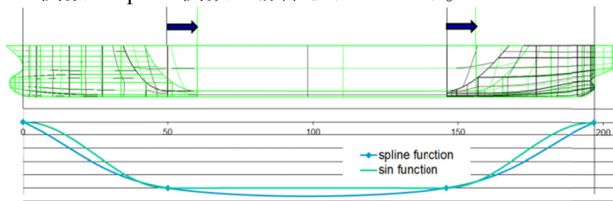


Fig.1 Example of the deformation by section shift at specified x

Aft profile

船尾から最大喫水位置までのプロファイルを上下させる。与える量が船尾後端における上下方向移動量であり、前方へ行くに従い移動量は線形的に小さくなる。変形領域として、x 方向の位置 (この位置より後方が変形される) 及び z 方向の位置 (この位置より上方が変形される) を指定する。Fig.2 の例では、x=197 より後方、z=-10 より上方の領域での変形となっている。

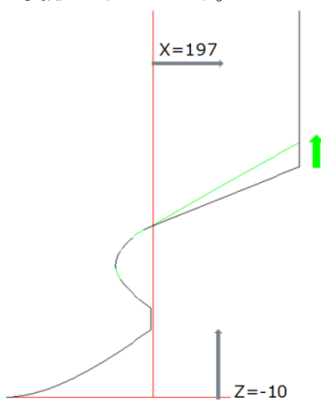


Fig.2 Example of the deformation by aft profile

Width in specified area

上述したように、x および z 方向で指定された直方体の変形領域を Fig.3 に示すように定義し、赤色のオリジナル船型から緑色の船型へ変形される。

Frame in specified area

x 方向の変形領域を指定し、その間の断面形状について、センターライン上の指定する高さの点を中心とするガス方向に角度を設定し、その方向を中心とする半径方向への変形を行う。Fig.4 の例では、ガス方向 50 度を中心とする 30 度から 90 度までの領域で半径方向へ赤色の形状から緑色の形状へ変形している。

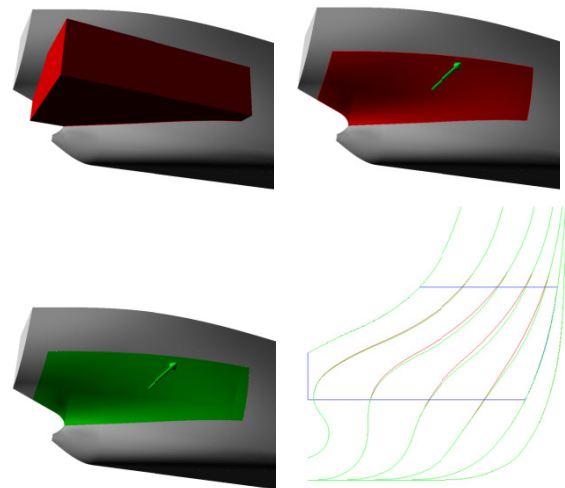


Fig.3 Example of the deformation by width in specified area

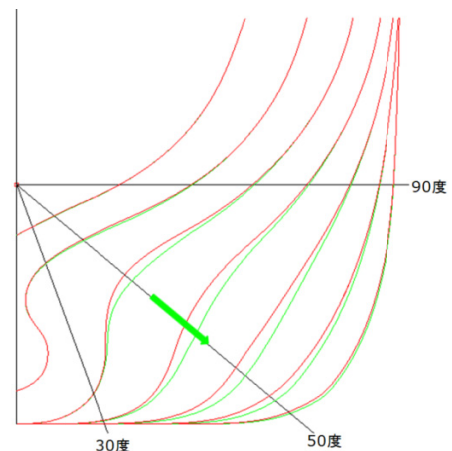


Fig.4 Example of the deformation by frame in specified area

Rotate at specified plane

x 方向の変形領域を指定し、その間の断面形状について、指定する位置 (y, z) を中心とした指定する角度だけ回転させる変形を行う。断面内の変形領域はこの中心点を通る x 軸に平行な平面を指定し、そこからの指定する距離内が範囲となる。Fig.5 では 2 軸線のスケグの角度を変更するような変形を行っている。

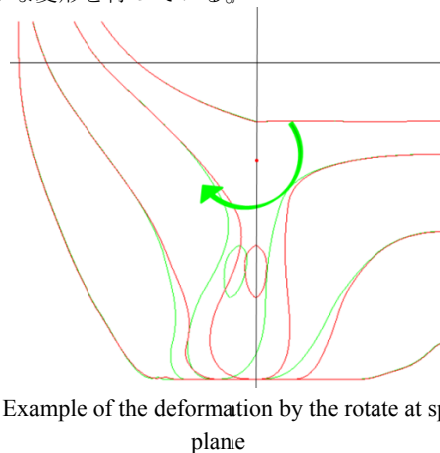


Fig.5 Example of the deformation by the rotate at specified plane

以上の変形パターンによる船型変更は、設計者に分かりやすい形となるよう AutoDes というプログラム上でユーザーインターフェース(GUI)を介して実行されるシステムとしている。

変形領域などの指定する値があるため、1回目の変形ではマニュアルによる指定が必要であるが、この操作はファイルに保存され、2回目以降の変形は自動的に変形を行うことが可能である。自動変形を行う際には、各変形パラメータを指定するステップ数で分割し、すべてのパラメータを同時に変更する方法、1つずつパラメータを変更する方法、すべての組み合わせのパラメータで変更する方法（マトリックス）の3通りの方法で、オリジナル船型から指定する最大変形の船型までの間の船型を自動で作成することができる。また、変形後の排水量は一般的にオリジナルとは異なるため、Cpカーブ変更による排水量調整を行う。この際、指定した排水量やLcb位置に合わせることもできるように設計した。

これらすべての作成した船型について、CFD計算による評価までを自動的に計算させるシステムとなっており、この際に、後述する離散型SQP法による最適化を行うことが可能である。CFD計算では、ダブルモデル計算、自由表面計算、自航計算から必要な計算を選択し実行できるため、評価関数として、EHPあるいはBHPを選択することができる。

3. 離散型SQP法

3.1 コンセプト

非線形計画問題に対して最も有効な方法の1つである逐次2次計画法（SQP法）を、前述したパラメータによる船型変形に適応させることで、最適な船型を見つけ出す方法を開発する。一般的なSQP法では、制約条件のもと目的関数が最小となる値を見つけ出すものであり、目的関数は連続関数である。船型開発の場合、EHPやBHPが目的関数となるが、CFDによりその目的関数を計算することは、1回の目的関数を求めるのに非常に長い時間を要することになる。したがって、設計に適応できるツールとして使用されるためには、できるだけ計算する船型数を減らすことが求められる。

連続関数を目的関数とした場合、収束付近において船型が近く目的関数の値が近いものを評価してしまい、無駄な計算となる可能性がある。船型開発において、指定したパラメータ空間の中で、目的関数が最小となる1点を求めることよりも、短時間で最小付近の船型が探索される方が有効であると思われるためである。CFD計算の誤差があることから最小値を求める必要性は低いと考えられる。

本開発では、パラメータ空間をいくつかのステップで分割し、評価関数を連続関数ではなく、分割により離散化された点で代表する方法を開発する。前述のパラメータによる船型変更でパラメータを指定するステップ数で分割する方法のうちマトリックスを利用し、この中から最適な船型を離散型SQP法により探索するものである。SQP法により評価が必要な点から、それに最も近い離散点を探し、その点での評価関数をSQP法により要求された点での評価関数とする考え方である。したがって、評価関数は階段状の値となっているため、SQP法のプロセスの中で同じ点の評価関数が必要となる場合があるが、この際には一度計算された値を利用し、再度の計算は行わない。これにより計算時間を大幅に短縮することができる。

本節の最後に、今回提案するSQP法の適用における理論的な数値精度と実用面に関する利便性について検討す

る。SQP法では非線形関数を二次形式で近似し、直線探索法と組み合わせて逐次的に目的関数の最小値を探索するが、その精度は目的関数もしくは制約条件の勾配評価精度に依存する。今回のようなCFDによる形状最適化問題においては勾配の解析的表現は不可能であるために有限差分近似が用いられることになるため、勾配近似精度すなわち近似ヘッセ行列の近似精度がそのまま手法の解像精度を決定すると考えられる。今回は離散的パラメータ空間でSQP法を適用するため、近似ヘッセ行列の数値精度は空間離散化精度 $O(\Delta)$ となり、また解の更新もパラメータの離散空間で行われるため、空間の解像精度がそのまま手法の精度となる。これは実際の設計におけるパラメータの解像精度を直観的にコントロールでき、また解空間を簡単に予め調べることもできるので、従来のCFD援用最適化で頻繁に指摘された解の収束精度の問題を回避できるという直接的な適用利点を享受できる点も重要であると考えられる。

3.2 計算例

バルクキャリア船型を対象とし、前述の変形パラメータのうちLcb changeとSection shift at specified xの2つによる変形を選択した。それぞれのパラメータを5ステップに分割したパラメータ空間を考える。したがって、オリジナル船型を含めて36船型が最適化の対象船型となる。CFDは抵抗計算、自航計算まで行い、BHPを目的関数とする。

まず初期値をパラメータ空間の中央として離散型SQP法の計算を行った。その結果をFig.6に示す。縦軸は評価関数であるBHPをオリジナル船型のBHPで無次元化した値である。横軸はCFD計算された船型を計算順に並べている。SQP法による探索過程での勾配を評価するために計算された点も含まれている。この結果より8船型の評価をすることで最適値が7番目に計算されたbulker_33船型という結果となった。オリジナル船型より約4.5%のBHP減少となっている。

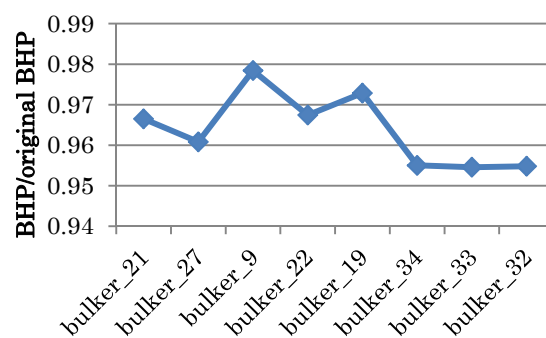


Fig.6 Results of the optimization by the discretized SQP method starting from the median in the parameter space

次に初期値をオリジナル船型に変更し、同じ船型に収束するかを確認する。Fig.7にその結果を示す。この場合、初期値を中央から始めた場合に比べ計算船型数はやや増加し10となったが、最適値は5番目に計算されたbulker_33と初期値を中央から始めた場合と同じ船型となった。計算回数が増加した理由は初期値が収束値からやや遠くなったためと考えられる。

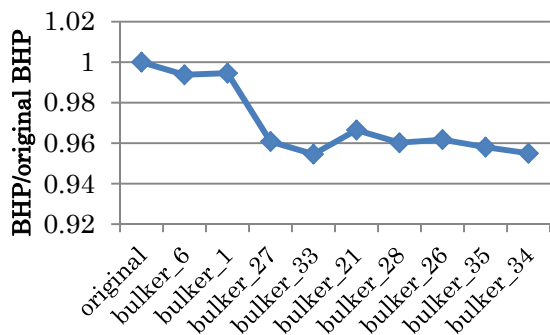


Fig.7 Results of the optimization by the discretized SQP method starting from the original hull in the parameter space

ここで、本当にこのパラメータ空間での最適値に収束しているかを確認するため、すべての船型の計算を行った。結果を Fig.8 に示す。この結果からも最適値は bulker_33 船型となり、離散型 SQP 法による最適化が正しく機能していることが確認された。

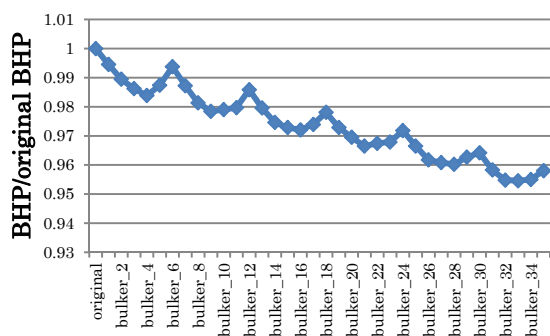


Fig.8 Results of all hulls in the parameter space

3.3 連続目的関数との比較

離散型 SQP 法により、一般的な SQP 法に比べ、どの程度の時間短縮となったかを明らかにするため、3.2 の計算例の場合で、Fig.8 の結果を利用し、このパラメータ空間の目的関数である BHP の値を補間することで、連続目的関数を作成する。したがって、SQP 法により評価が必要となる点での目的関数の値をこの補関数より求めることができる。これにより何点の評価関数を計算したかを見ることで、どの程度の時間削減となったかを推定できる。

まず収束半径など同じ条件での連続目的関数の SQP 法による結果では、47 点での目的関数の計算を行った。Fig.6 では 8 点での計算で最適値を探索できたことを考えると、約 8 倍もの計算量となっていることが分かる。

ここで、収束半径が小さすぎる可能性を考慮するため、収束半径を大きくしていくことで同じ最適値が求められる収束半径を見つける。収束半径に関する係数 EPS の値は、離散型 SQP 法では 0.001 としていたが、連続目的関数の SQP 法ではこの値を 0.002、0.003、0.005、0.01 の 4 通りに変更した計算を実施してみた。Fig.9 に EPS の値に対する目的関数の最適値を示す。EPS の値が 0.002 では 0.001 と同じ最適値が得られているが、0.003 よりも大きくなると最適値が大きくなってしまい、本来の最適な船型に収束できていないことがわかる。したがって、EPS は 0.002 が最低限必要となる。この場合の収束履歴を離散型 SQP 法の場合と合わせて Fig.10 に示す。連続目的関数

の場合には EPS が 0.001 と同じ 47 点での計算を行っている。履歴を見ると、16 点目の計算以降はかなり最適値に近いところとなっているが、収束判定のために最適値付近での無駄な計算が行われてしまっていることが分かる。また、EPS が 0.003 の場合でも 25 点での目的関数の計算を行っていた。以上のことより、離散型 SQP 法により大幅な時間短縮がなされていることが分かる。

4. 結言

船型開発のための 28 種類のパラメータによる変形パターンを用意し、この組み合わせで、複雑な変形パターンを短時間で容易に作成することのできるシステムを開発した。このシステムは GUI を通して操作され、変形に必要な情報はファイルに保存されることで、自動で変形させることが可能である。また、各変形パラメータを指定するステップ数で分割し、そのすべての組み合わせの船型を自動で作成し、新たに開発した離散型 SQP 法により、その中の最適な船型を、すべての船型を計算することなく、その 1/4 程度の計算数で、自動的に探索することができることを示した。また、連続目的関数の SQP 法に比べても、大幅な時間短縮が可能であり、本論文で計算した例では 1/8 にできることが示された。

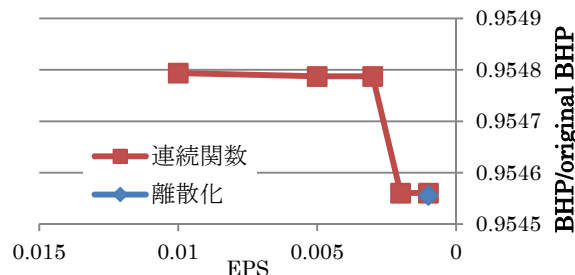


Fig.9 Optimized values of objective function for different EPS values

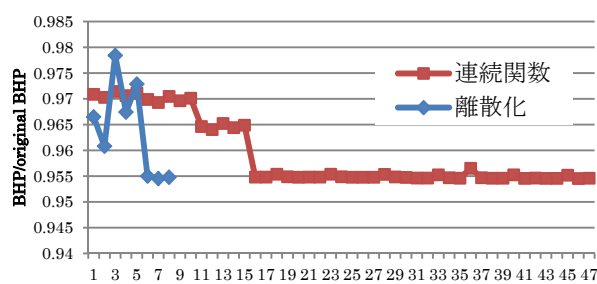


Fig.10 Convergence histories of optimization by both the continuous objective function and the discretized SQP method

謝 辞

本研究を行うにあたり種々のご助言ご協力をいただきました海上技術安全研究所流体性能評価系 CFD 研究グループ各位に感謝の意を表します。なお本研究の一部には文部科学省研究費補助金(2012-2014, Project Number 24360363)の援助を受けた事を記し、関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 茨木俊秀, 福島雅夫: FORTRAN77 最適化プログラミング, 岩波書店, 1991, pp.167-207