解強制置換法を用いた船体周りの流場計算法

正員 川 北 千 春* 正員 石 川 暁*
佐々木 壮一** 林 秀千人**

Application of Fortified Solution Algorithm to Ship Flow

by Chiharu Kawakita, *Member* Satoru Ishikawa, *Member*
Souichi Sasaki Hidechito Hayashi

Summary

This paper describes a numerical method to calculate viscous ship flow with the overset composite grid approach based on fortified solution algorithm concept. Communication among the grids is achieved by interpolation based on small volume elements. In the present computation, the composite grid consists of three component grids. The primary grid is constructed with respect to the ship hull, and the subsidiary grids are generated about propeller and rudder. Propeller effect is considered using equivalent body force distribution in propeller grid. The individual grids overset and, once combined, cover the entire computational domain. This feature allows computational grids to be generated quickly and easily. The hydrodynamic force characteristics on a tanker [ESSO OSAKA], moving with constant rudder angle, agree well with the model experiments. It is shown that the present method can be an effective CFD tool for complex body configurations.

1. 緒　　言

現在船舶の分野で使用している数値流体力学（CFD）技術は、計算空間を一つの計算領域として構造格子を用いる手法（以下、単一格子）が主流であり、船体のみの計算や、船体・プロペラ・舵の 3 者間干渉計算が実施されている[1]。一方、実用船舶周りの流場解析へ CFD の援用を行う場合、舵角を取った状態、及びシャフトブラケットなどの船体付加物付きの複雑な形状を計算対象とする必要があるが、形状が複雑になればなるほど、格子生成に要する労力は増大し、格子生成が現実的には不可能な場合もある。

* 三菱重工業株式会社 長崎研究所
** 長崎大学 工学部

原稿受理 平成 11 年 7 月 9 日
秋季講演会において講演 平成 11 年 11 月 18，19 日

このような複雑形状まわりの格子生成に関する問題点を解決するためのアプローチは複合格子[2]と非構造格子[3]に大別される。複合格子は計算領域をいくつかの領域に分割し、それぞれ独立した構造格子を生成することで複雑形状を表現する方法であり、領域の重なりを許さない接合格子と重なりを許す重合格子という、大きく分けて２つの分類が存在する。接合格子は単一の格子群を張り合わせて流れ場を格子で覆うやり方で、代表的な手法としてマルチブロック法[4]が知られている。接合格子では境界における接続法の取り扱いの工夫によっては保存則を維持することが可能であるが、形状の複雑性が高まると格子分割は必ずしも容易でない。それに対し重合格子は格子同士の重複を許し自由度を高めたもので、各々の格子は独立に分布できるため、かなり複雑な形状に対しても適用可能である。重合格子は一般に内挿を伴うため保存則を満足しないこと、また、内挿による計算時間の増加を伴う点が問題点と言われている。

本論文では複雑形状に対する格子生成の自由度の高い重合格子により格子生成を行い、格子間の流場情報の交換に解強制置換法（FSA：Fortified Solution Algorithm）を用いた船体周りの流場計算法について述べる。本計算法を船体・プロペラ・舵の干渉計算に適用し、その有効性を示す。

2. 重合格子を用いた解強制置換法

解強制置換法は領域分割を用いて複雑な物体形状を取り扱ったり、局所的に格子を配することで物理現象の大切な部分のみ格子分解能を向上させる一方法である。基本的な概念は、Navier-Stokes 方程式（以下、N-S 方程式）の解法を改善することを目的として Van-Dalsem と Steger[5),6)]により提案された。重合格子を用いた解法として良く知られている Chimera 法[7)]を発展させたものと考えられる。Fujii ら[8)]は解強制置換法を重合格子へ適用したいくつかの例を示し、複雑な物体周りの流れに対して有効な数値計算法であること、適用を誤らなければ内挿による保存則を満足しない弊害はあまり感じられないことを述べている。

重合格子を用いた解強制置換法では、対象とする形状毎に適した単一格子を生成し、それらの格子間で交互に N-S 方程式を解き、解強制置換法により格子間の情報伝達を行いながら、全体の流れ場を求める。このため、単一格子に用いていた計算プログラムに、格子間の位置情報を検索する機能及び格子間の特性量を補間する機能を追加するだけで、比較的容易に計算プログラムの拡張が可能である。

2.1 解強制置換法の基礎式

解強制置換法に重合格子を用いる場合は、格子の重ね合わせ部分で異なる格子同士の流れ場の特性量について適合を行う必要がある。この場合、解強制置換法の支配方程式は N-S 方程式の右辺に強制項を加えた式(1)のように表現される。

$$\frac{\partial q}{\partial t}+\frac{\partial F}{\partial x}+\frac{\partial G}{\partial y}+\frac{\partial H}{\partial z}+\frac{\partial F_v}{\partial x}+\frac{\partial G_v}{\partial y}+\frac{\partial H_v}{\partial z}=\chi\left(q_f-q\right) \tag{1}$$

ただし

$$q=\begin{bmatrix}u\\v\\w\\p\end{bmatrix},F=\begin{bmatrix}u^2+p\\uv\\uw\\\beta u\end{bmatrix},G=\begin{bmatrix}vu\\v^2+p\\vw\\\beta v\end{bmatrix},H=\begin{bmatrix}wu\\wv\\w^2+p\\\beta w\end{bmatrix},$$

$$F_v=-\nu\begin{bmatrix}\tau'_{xx}\\\tau'_{xy}\\\tau'_{xz}\\0\end{bmatrix},G_v=-\nu\begin{bmatrix}\tau'_{xy}\\\tau'_{yy}\\\tau'_{yz}\\0\end{bmatrix},H_v=-\nu\begin{bmatrix}\tau'_{xz}\\\tau'_{yz}\\\tau'_{zz}\\0\end{bmatrix}$$

ここで、基礎方程式はベクトル形の保存形で表示されている。q は非定常項、F,G,H は慣性項と外力項、F_v,G_v,H_v は粘性項である。各ベクトルの第 4 行目は擬似圧縮パラメーター β を考慮した連続の式である。右辺は強制項であり χ は強制パラメータ、q_f は他の格子系から強制的にあてはめる特性量である。この強制パラメータ χ を格子の適合条件に応じて分布させることにより、複合格子の適切な解析を行うことができる。

本論文における流れ場の数値計算には、Kodama[9)]により提案された有限体積法のスキーム（NICE 法：NS-Solver using Implicit Cell-Centered Formulation）を用いた。各微小要素 V について式(1)を積分し、左辺第1項と右辺を要素中心で近似すると式(2)を得る。

$$V\frac{\partial q}{\partial t}+\iiint_V\left(\frac{\partial F}{\partial x}+\frac{\partial G}{\partial y}+\frac{\partial H}{\partial z}+\frac{\partial F_v}{\partial x}+\frac{\partial G_v}{\partial y}+\frac{\partial H_v}{\partial z}\right)dV$$
$$=V\cdot\chi\left(q_f-q\right) \tag{2}$$

式(2)の時間微分を Pade の時間差分で近似すると、式(3)のように変形できる。

$$\Delta q\left(1+\theta\Delta t\cdot\chi\right)+$$
$$\Delta t\frac{1+\theta\Delta}{V}\iiint_V\left(\frac{\partial F}{\partial x}+\frac{\partial G}{\partial y}+\frac{\partial H}{\partial z}+\frac{\partial F_v}{\partial x}+\frac{\partial G_v}{\partial y}+\frac{\partial H_v}{\partial z}\right)dV$$
$$=\Delta t\chi\left(q_f-q\right) \tag{3}$$

ここで、Δ は差分演算子である。また、θ は演算パラメータで 1 のとき陰解法、0 のとき陽解法となる。以上より、式(3)を流れの特性量の時間増分 Δq について解く。ここで、χ が十分大きいならば $q_f-q=0$ となり、特性量が強制値へ置き換えられる。格子内部の流れ場の計算を行うところは $\chi=0$ として、ここでは通常の N-S 方程式を解くことになる。また、両者のつなぎの要素には χ を中程度に設定することで、強制解から N-S 方程式の解へと両者の連続性が保たれる。

2.2 強制項の設定

平板を対象に重合格子の構成例を Fig.1 に示す。重合格子は、流れ場の全体を捉える全体格子（Global grid）と局所的な流れを計算する部分格子（Local grid）からなる。全体格子においては、部分格子と重複しない部分を $\chi=0$ として N-S 方程式を解く。また、全体格子が部分格子と重複する境界部分 A の要素に χ を分布させる。大きな χ の要素では式(3)の右辺が支配的となり、流れの特性量は強制置換量 q_f に置き換えられる。この場合、強制置換量は部分格子の計算から得られる特性量で定める。一方、部分格子では外端に境界条件が必要である。この境界条件は全体格子の計算から得られる特性量から補間して定める。

Fig.2.は Fig.1 における A 部の拡大図であり、全体格

子と部分格子の重複領域の境界部分を示している。本解法には 2 要素分の境界条件が必要である。そこで部分格子の端から 2 要素はこれを境界条件として与え（図中の○印）、それに続く 2 要素（△印）に中程度の大きさの強制パラメータ χ を分布させた。さらにその内側の格子（□印）は χ=0 とおく計算領域である。また、全体格子は部分格子の流れ場の計算する要素と重複する部分（×印）に非常に大きな χ を与え、それに続く 2 要素（△印）には中程度の大きさの χ の分布を持たせた。その他は χ=0 として計算を行う領域としている。

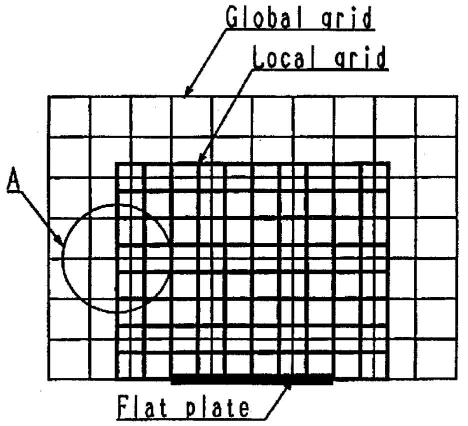


Fig.1　Schematic view of overset grids

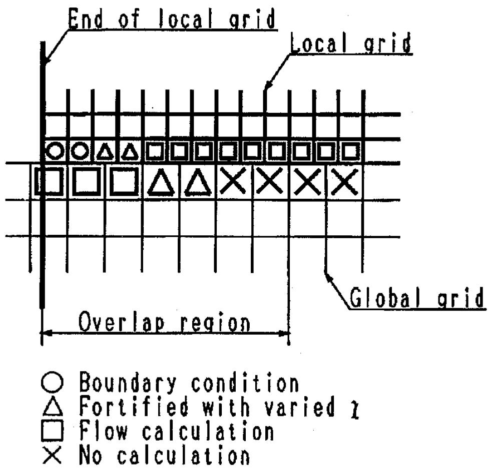


Fig. 2　Overlap region of overset grids

2. 3 格子間位置情報の検索

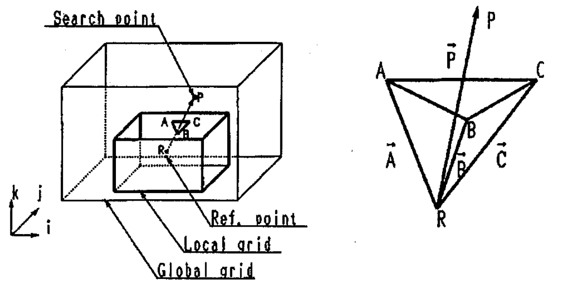
重合格子では、上述の強制パラメーター χ の分布を与えることや流れ場の特性量を補間するために、全体格子のうち部分格子に関係する領域を明確にする必要がある。Fig.3 は全体格子のうち部分格子に関係する領域を見つけ出す様子を示したものである。Fig.3(a)のように部分格子の内部に基準点 R を取り、その点と全体格子の任意の点 P とを線分で結ぶ。この線分が部分格子の境界面と交点を持つならば、点 P は部分格子の外側にあることになる。全体格子の各要素の境界面を多数の微小な三角形（A,B,C）に分割して、交点の有無を調べる。Fig. 3 (b)は点 R から点 P への線分と境界面の一部として三角形(A,B,C)で指定される平面との関係を示している。基準点 R から点 P へのベクトル $\vec{P}$ は、3 頂点までのベクトル $\vec{A},\vec{B},\vec{C}$ を用いて式(4)で表される。

$$\vec{P} = s\cdot\vec{A} + t\cdot\vec{B} + u\cdot\vec{C} \tag{4}$$

ただし、s,t,u は任意の係数である。ここで、点 P が三角形(A,B,C)と交点を持つときは、これらのパラメータは式（5）を満足する。

$$s > 0,\ t > 0,\ u > 0,\ s + t + u \geq 1 \tag{5}$$

これを全体格子の全ての要素について調べ、部分格子との対応を取る。



(a)　(b)

Fig.3　Relation of boundary surface and search point
(a) Global grid and local grid
(b) Small triangle ABC and examined vector RP

2. 4 微小体積要素を用いた特性量の補間

重合格子では異なる格子間における流れの特性量の置換が、両格子の重なる境界部分でスムーズに行われなければならない。差分法では格子点での特性量が求められるために、関数近似による補間によって比較的精度良く境界部分の特性量のやり取りができる。一方、有限体積法では格子の節点ではなく要素を代表する特性量が求められるために、関数近似による補間では精度の良い特性量を見積もることが困難と考えられる。従って、本計算法では重複する格子要素について以下に示す微小体積要素を用いた特性量の補間を行った。

二次元の場合を例にした全体格子と部分格子の重なりの様子を Fig.4 に示す。格子 A の要素と格子 B の要素が重複する割合を調べるために、格子 A の要素を微小に分割する。この微小に分割した各部分が格子 B のどの要素に属するのかを調べることで、格子 A と格子 B の関係を知ることができる。図の例では、格子 A の要素(i,j)を微小に分割すると、微小部分 P は格子 B の要素(I,J)に属し

Q は$(I+1,J)$に属することが分かる。このようにして格子Aの要素(i,j)を微小に分割した全ての部分について、それが格子Bのどの要素に属するかを検出する。

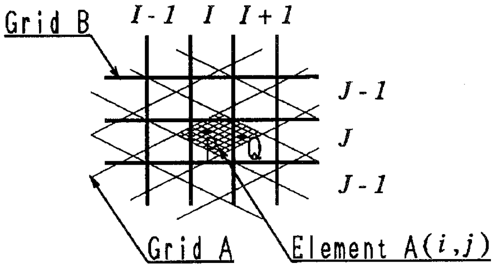


Fig. 4　Relationship of a segment of element in grid A to element in grid B

三次元の場合について上述のような微小の分割の方法を示した図を Fig.5 に示す。三次元の場合、要素は六面体をしている。Fig.5(a)で示すように、物理座標系では各要素のそれぞれの面は曲面で形成されている。そこで要素を適確に分割するために、Fig.5(b)のように六面体要素を単位寸法の立方体に写像する。そこで要素を等分割して再び逆写像することにより微小部分の任意の位置を求めることにした。この時、六面体要素内の任意の位置(x,y,z)と写像した立方体の座標の関係は式(6)となる。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \sum_{i}^{8} \begin{pmatrix} \frac{1}{8}(1+\xi_0)(1+\eta_0)(1+\zeta_0)\cdot x_i \\ \frac{1}{8}(1+\xi_0)(1+\eta_0)(1+\zeta_0)\cdot y_i \\ \frac{1}{8}(1+\xi_0)(1+\eta_0)(1+\zeta_0)\cdot z_i \end{pmatrix} \begin{matrix} \xi_0 = \xi\cdot\xi_i \\ ,\eta_0 = \eta\cdot\eta_i \\ \zeta_0 = \zeta\cdot\zeta_i \end{matrix} \qquad (6)$$

ここで、x_i, y_i, z_i は 6 面体の各頂点の座標である。ξ_i, η_i, ζ_i は写像した立方体の頂点の座標である。ξ, η, ζ はそれぞれ-1から+1で変化し、この立方体を分割することによって六面体の微小部分が式(6)から求まる。ここでは、微小部分の座標はその中心座標 P で代表させた。また、この微小部分の体積は写像関数のヤコビアンを取る事で求まる。

次に、中心座標 P によって代表される微小部分が格子 B のいずれの要素に属するかの関係を調べる。微小部分 P とそれを含む格子 B の一つの要素との関係を Fig.6 に示す。格子Bの要素の頂点1から8の内4つの頂点を取り、Fig.6(b)の四面体を 6 つ作る。この場合も、微小部分へのベクトル $\vec{P}$ は辺ベクトル $\vec{A},\vec{B},\vec{C}$ を用いて式(4)で表わされる。その時パラメーターが式(7)を満たすならば微小部分が四面体に属していることになる。

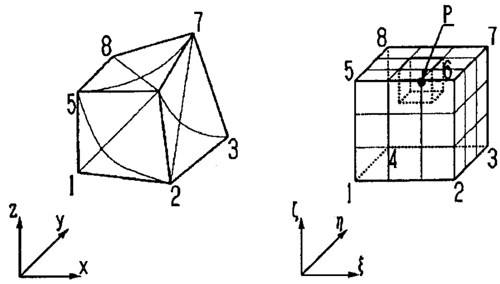
$$s>0,\ t>0,\ u>0,\ s+t+u\le 1 \qquad (7)$$

この時、格子 B の 6 個の四面体の内一つでも式(7)の条件を満足すれば、微小部分は格子 B の要素に存在することになる。これを格子 A の 1 つの要素の微小部分全てについて行ない、格子 B の各要素にそれぞれ対応する微小部分の数 n_l を全微小部分数で割り、重複割合を式(8)から算出する。

$$r_l = \frac{n_l}{20\times 20\times 20} \qquad (8)$$

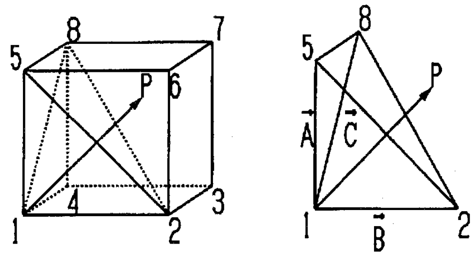
ここで、r_lは格子 A の格子 B の要素 l への重複割合を示す影響係数である。本論文では、要素の微小分割はξ, η, ζ 方向にそれぞれ 20 分割し全部で 8000 分割した。格子Aの流れの特性量 q_Aから格子Bの流れの特性量 q_Bを式(9)から算出した。

$$q_B = \sum_{l=1}^{overlap} r_l\cdot(q_A)_l \qquad (9)$$



(a)　(b)

Fig.5　Schematic view of transformation of coordinates
(a)　Physical coordinates
(b)　Computational coordinates



(a)　(b)

Fig.6　Relation of point P and an element in grid B
(a)　Hexahedral element
(b)　Tetrahedral part

3. 平板周りの流れ

3.1 計算条件

平板周りの流れを対象に本計算法の精度検証を行った。計算に用いた単一格子及び重合格子を Fig.7(a)と(b)に示す。いずれの格子も、平板は z/C=0 において x 方向の座標が x/C=0 から x/C=1.0 の間に位置している。Fig. 7 (b)の重合格子では、流れ場の全体を囲む全体格子と平板近

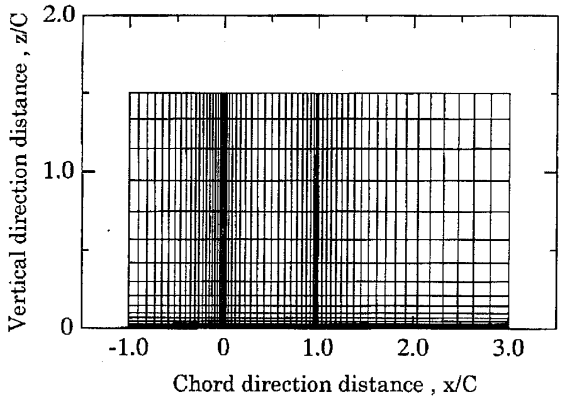
傍の詳細な解析を必要とする部分格子を設けている。単一格子及び重合格子における全体格子と部分格子の節点数と最小格子間隔Δ_{min}を Table 1 に示す。部分格子はより詳細に流れの解析ができるように細かな格子形成となっており、部分格子の流れの変化が大きい平板の前縁と後縁近傍を密にしている。垂直方向の最小格子間隔は、$\Delta_{min}=10^{-5}$程度とし、境界層内部の速度分布を解析できるように設定した。

3.2 計算結果

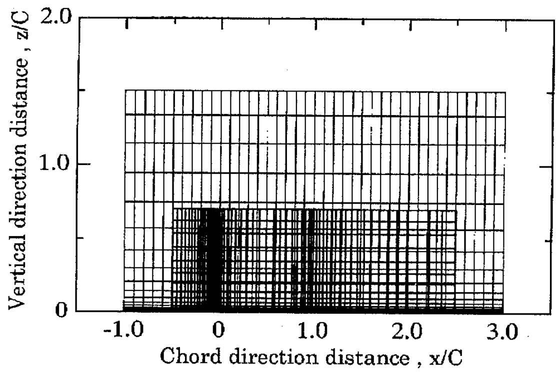
平板上に発達する層流境界層の流速分布を比較して Fig.8 に示す。レイノルズ数(Re)は 10^4 として計算した。いずれの結果も平板中心付近（x/C≒0.5）の速度分布を示している。図中の実線は Blasius の厳密解[10]である。

Table 1 Number of cell-node and a minimum grid space

Grid	Global grid			Local grid		
	im	jm	km	im	jm	km
Single grid	61	5	31			
Overset grids	41	5	31	61	5	31
	$\Delta_{min}\times10^{-5}$			$\Delta_{min}\times10^{-5}$		
Single grid	1.507					
Overset grids	1.507			0.703		



(a) Single grid



(b) Overset grids

Fig. 7 Computational Grid for a Flat Plate

計算の結果は、全ての格子で流速分布が厳密解に一致する。これは重合格子を用いた数値計算の解が高精度に得られることを示している。さらに、図中には重合格子について強制パラメーターχの分布が異なる場合を示している。格子の境界($\chi=10^7$または$\chi=10^5$)から計算領域（$\chi=0$）へ減少するようなχの分布を与えたが、その差は速度分布に見られない。平板周りの流れのように流れ場の変化がそれほど急激に変化しない場合は、χの分布について大きな注意を払わなくても安定して計算出来ることが分かった。

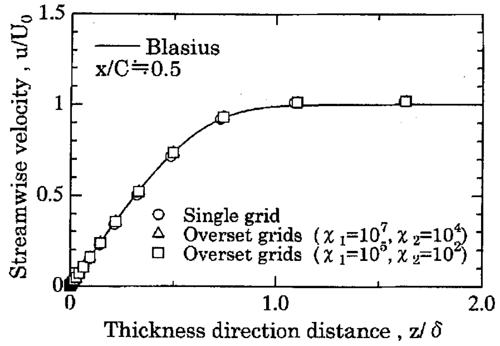


Fig. 8 Velocity distribution of laminar boundary layer

平板の壁面摩擦抵抗係数 C_fを Schoenherr 式と比較した結果を Fig.9 に示す。乱流モデルには Baldwin-Lomax モデル[11]を使用し、遷移条件は考慮せずに全て乱流計算とした。本計算結果は、Schoenherr 式よりも若干高めに計算されているが、概ね良く一致している。最小格子間隔がレイノルズ数に対して大きかったために壁面摩擦抵抗係数が高めに計算されたものと考えられる[12]。重合格子を用いた本計算法で、レイノルズ数変化による壁面摩擦抵抗係数の変化を精度良く推定できることが分かった。

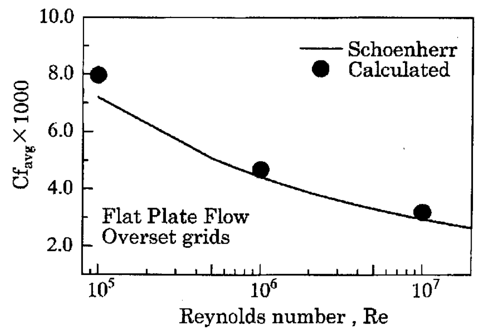


Fig. 9 Skin friction coefficients for a flat plate

レイノルズ数が 10^6 における平板上の後縁近く（x/C=0.877）の乱流境界層の流速分布について本計算結果と壁法則の値を比較して Fig.10 に示す。縦軸、横軸ともに、粘性底層の流速分布 $u^+=y^+$の関係より壁面近傍

での速度をもとに求めた局所摩擦係数 C_f に基づく壁面せん断応力 τ_0 を用いて無次元化している。計算結果を基にした乱流境界層内の速度分布は、粘性底層と内層壁法則に非常に良くあっていることが分かる。

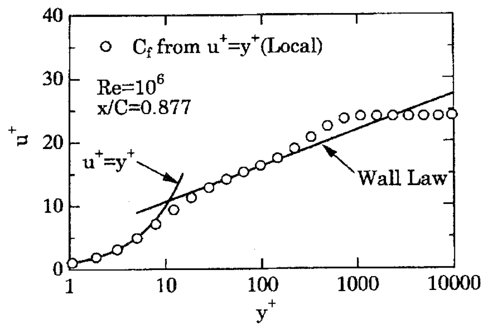


Fig. 10 Velocity distribution of turbulent boundary layer

4. 船体・プロペラ・舵の干渉計算

4.1 計算法概要

解強制置換法を用いた船体・プロペラ・舵の相互干渉計算法の流れを Fig.11 に示す。計算領域は、船体、プロペラ及び舵の 3 ブロックに分割し、それぞれの計算ブロックに適した格子分割を行う。船体格子には H-H 型格子を、プロペラ格子には H-O 型格子を、舵格子には C-H 型格子を用いた。相互干渉計算の初期流場には、船体ブロックに対する計算結果を用いた。船体ブロックから補間されたプロペラ面位置における流速分布をもとに、無限翼数プロペラ理論で評価された等価な体積力をプロペラブロック中のプロペラ面に与えることにより、プロペラによる流れの加速・旋回影響を流場に与えた [1]。船体＋舵の抵抗がプロペラの発生する推力と釣り合うまで、3 ブロック間の繰り返し計算を行った。本計算では、プロペラ回転数は一定として計算を行った。

4.2 計算条件

計算の対象とした船型は、舵角を取った際の船体、プロペラ及び舵に作用する流体力に関する豊富な模型試験結果のある 278,000DWT タンカー「ESSO OSAKA」とした。計算レイノルズ数は模型試験に相当する $Re=2.5\times10^6$ とした。重合格子を用いた船体＋プロペラ＋舵の全体格子図を Fig.12 に、プロペラ及び舵ブロックと船体との位置関係を Fig.13 に示す。舵角 0° 及び 35° の場合の船体格子と舵格子のオーバラップの様子を舵の半高さ位置における水平断面図として Fig.14 に示す。重合格子の特徴として、舵角を取った計算を実施する場合、計算格子を再度生成し直す必要がない。船体、プロペラ及び舵ブロックの計算格子数には以下の値を用いた。

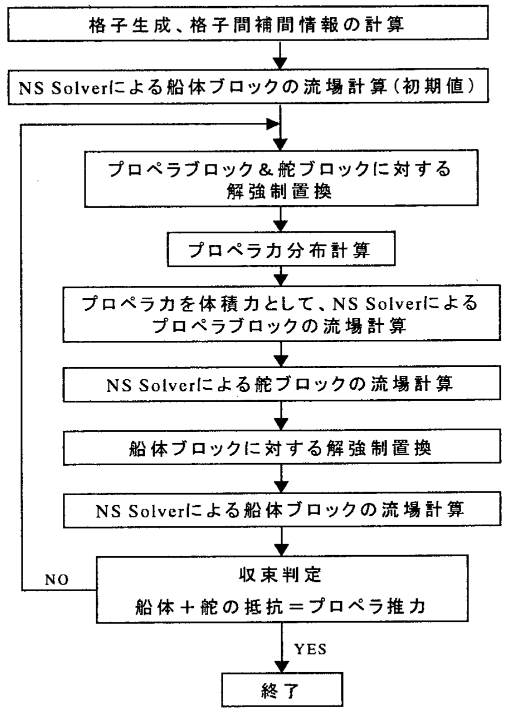


Fig.11 Flow chart for calculation

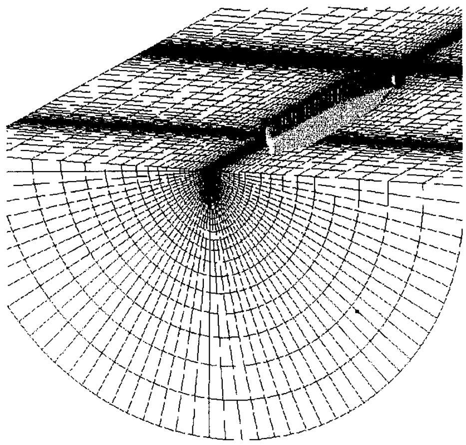


Fig.12 Global Grid for Hull, Propeller and Rudder

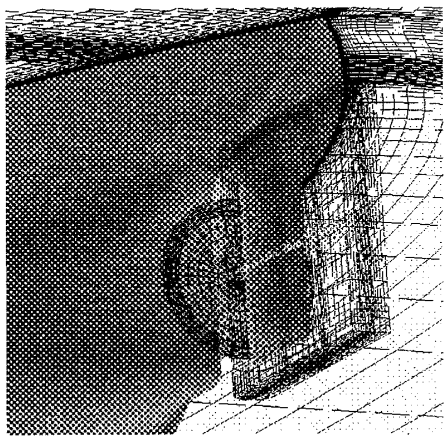


Fig.13 Local Grid for Propeller and Rudder

・船体ブロック格子数

　船長方向×幅方向×周方向＝120×49×31

・プロペラブロック格子数

　船長方向×周方向×半径方向＝21×37×18

・舵部ブロック格子数

　周方向×幅方向×高さ方向＝107×29×31

船体、プロペラ、舵に作用する前後方向流体力 X 及び横方向流体力 Yは、次式に示す前後力係数 X'及び横力係数 Y'で表した。

$$X' = \frac{X}{\frac{1}{2}\rho L d V^2},\quad Y' = \frac{Y}{\frac{1}{2}\rho L d V^2}$$

ここで、ρは流体密度、L は船長、d は喫水、V は船速である。その他の計算条件は、当社で実施した舵角変更試験に対応する条件にて計算を行った。

4.3 計算結果

プロペラブロック及び舵ブロックで計算した流場情報が、船体ブロックの境界条件として適切に強制置換されているかどうかを検証するために、舵角 0° におけるプロペラ前方及びプロペラ後方横断面における速度ベクトルを比較して Fig.15、16 に示す。プロペラ前方流場において、船体ブロックで計算された船体後流の速度ベクトル（図中点線矢印）は、プロペラブロックにおける速度ベクトル（図中実線矢印）と方向・大きさともほぼ一致している。プロペラ後方流場（プロペラと舵の間）において、プロペラブロックで計算された速度ベクトルは、プロペラの影響で回転流（図中実線矢印）となり、その影響が適切に補間され船体ブロックにプロペラ回転流の影響（図中点線矢印）が表れている。この結果、解強制置換は適切に行われている（境界条件が適切に与えられている）と考えられる。

舵角を取った際に船体、プロペラ、舵に発生する前後力及び横力の計算結果を実験結果と比較して Fig.17、18 に示す。船体及びプロペラに作用する前後力及び横力は、舵角を大きくとっても定量的に良い一致を示している。また、舵角が 10° までは、舵に作用する流体力も精度良く計算されており、単一格子では計算が困難な舵角を取った際の船体・プロペラ・舵の相互干渉流体力を本計算法により精度良く推定可能であることが分かる。

ただし、舵に作用する前後力及び横力は、舵角が大きくなるほど舵力の計算精度が悪化している。横力は、舵角の増加に比例して計算精度が悪化しているように見える。この原因として、プロペラの影響による回転流場中で舵角を大きく取った際の計算には、本論文で使用した Baldwin-Lomax 乱流モデルでは現象を精度良くとらえることが出いないこと、及び舵角を大きく取ると船体格子の粗い領域に舵部の重なり領域が発生するため、格子間の補間精度が悪化することが計算精度悪化の一因と思われる。

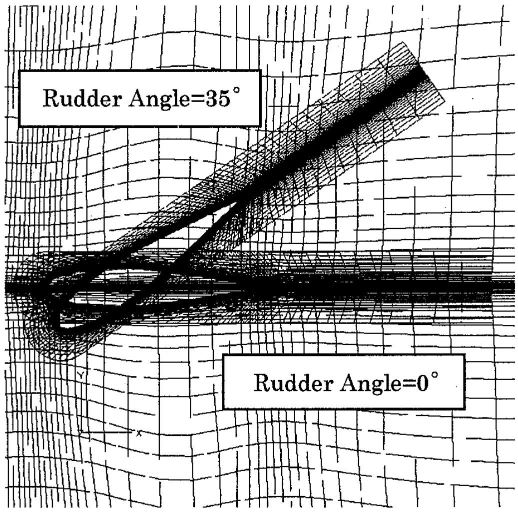


Fig.14　Local Grid for Rudder

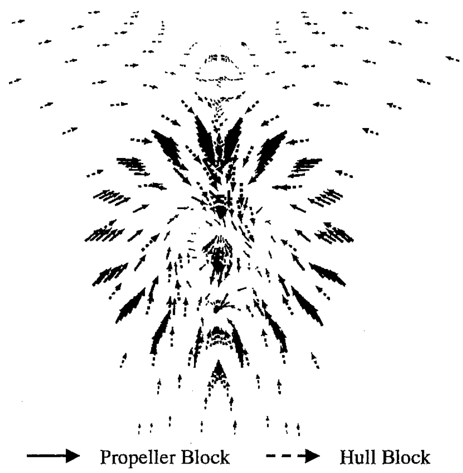


Fig.15 Comparison of velocity vector before propeller

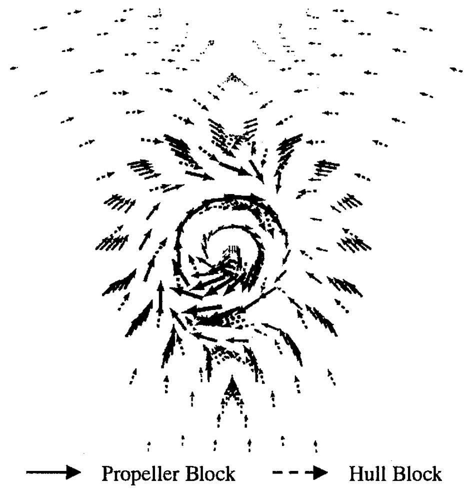


Fig.16 Comparison of velocity vector behind propeller

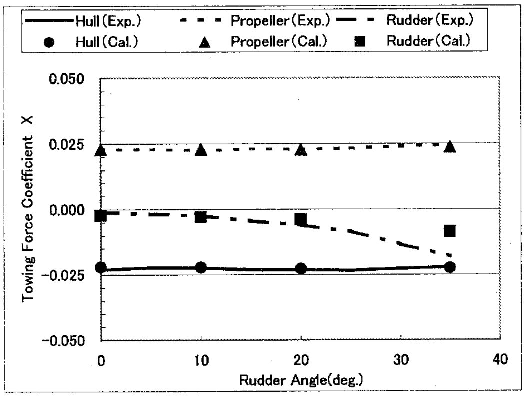


Fig.17 Comparison of towing force coefficient X'

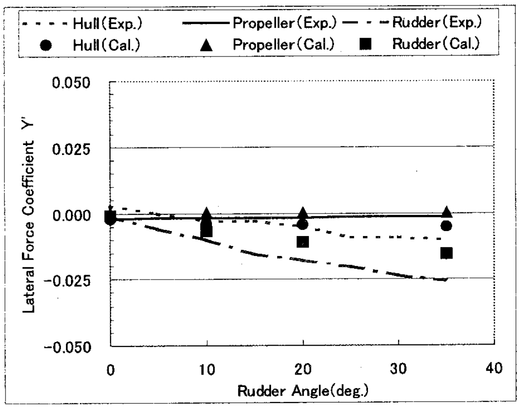


Fig.18 Comparison of lateral force coefficient Y'

5. 結 言

実用船舶周りの流場解析へ CFD を援用することを目的に、複雑形状に対する格子生成の自由度の高い重合格子により格子生成を行い、格子間の流場情報の交換に解強制置換法を用いた船体周りの流場計算法の開発を行い、以下の成果を得た。

(1) 重合格子を用いた解強制置換法により、単一格子に比べ格子生成時間の大幅な短縮が可能となった。また、本計算法で開発した微小体積要素を用いた特性量の補間方法は、実用上問題なく色々な計算格子の組み合わせに対応できることが分かった。

(2) 平板周りの流れでは、速度分布、局所摩擦抵抗係数及び摩擦抵抗係数とも精度の良い解が得られることが分かった。

(3) 本論文で示した船体・プロペラ・舵の相互干渉計算法は、単一格子では計算が困難である舵角を大きく取った場合の計算が簡便に実施可能であり、本計算法が複雑な計算対象に対し有効であることが分かった。舵角の小さい場合は、船体・プロペラ・舵に作用する流体力を精度良く推定可能である。しかし、舵角を 35° 程度に大きくした場合、計算精度が悪化する傾向のあることが分かった。精度悪化の原因と考えられる乱流モデルの改良、及び格子の重なり領域における実用上問題とならない格子サイズの把握が今後の課題である。

謝 辞

計算プログラムの作成に関し、長菱エンジニアリング株式会社 錦戸祐子殿に尽力頂いた。ここに記し、感謝の意を表します。

参 考 文 献

1) 例えば, 日夏宗彦他, 自航状態における舵付き船体周りの流れの数値シミュレーション, 西部造船会々報, 第88号, (1994).
2) 例えば, 増子章, 船舶粘性流計算における複合格子法の応用（第 2 報 船尾水平フィン付き船体周りの粘性流シミュレーション）, 日本造船学会論文集, 第180号, (1996).
3) 例えば、Hino, T., A 3D Unstructured Grid Method for Incompressible Viscous Flow, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.182, (December 1997), pp.9-15.
4) 例えば, 児玉良明, 船首尾バルブ付き船型のマルチブロック格子表現法, 関西造船協会誌, 第 226 号, (1996).
5) Van Dalsem, W. R. and Steger, J. L., Using the Boundary-Layer equations in Three-Dimensional Viscous Flow Simulations, Proc. AGARD Fluid Dynamics Panel Symposium on Application of CFD in Aeronautics, (1986).
6) Van Dalsem, W. R. and Steger, J. L., Study of VSTOL Flows Using the Fortified Navier-Stokes Approach, AIAA paper 87-2279, (1987).
7) Benek, J.A.,Buning, P.G. and Steger, J.L., A 3-D Chimera Grid Embedding Technique, AIAA Paper, No.85-1523, (1985).
8) Fujii, K., Tamura, Y. and Kuroda, S., Unified Zonal Method Based on the Fortified Navier-Stokes Concept, AIAA paper 91-1558-CP, (1991).
9) Kodama, Y., A Cell-centered, Finite-Volume Upwind Scheme with Global Conservation, J. of the Society of Naval Architects of Japan, vol. 168, (December 1990), pp. 21-30.
10) H. Blasius, Grenzschichten in Flussigkeiten mit kleiner Reibung. Z. Math. u. Phys. 56, 1-37(1908). Engl. transl. in NACA TM 1256.
11) Baldwin, B.S. and Lomax, H., Thin Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows, AIAA paper 78-257, (1978).
12) 石川 暁, CFD による船体周りの流場ならびに推進性能の尺度影響に関する検討, 西部造船学会々報, 第91号, (1996).