

# 非圧縮性流体計算における C-HSMAC法と SOLA 法の収束特性

牛島 省<sup>1</sup>・奥山 洋平<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 正会員 工博 京都大学大学院 助教授 社会基盤工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>2</sup> 学生員 京都大学大学院 環境地球工学専攻 修士課程

SOLA 法と C-HSMAC 法の解法と収束特性を比較することを目的として、両手法の解法の手順や反復計算の主要な部分を示し、それらの相違を明らかにした。SOLA 法と C-HSMAC 法では、圧力の連立 1 次方程式に対して、対角成分のみを考慮するか、あるいは反復計算によりその数値解を求めるか、という点で解法の相違がある。また、SOLA 法の反復計算は、収束性能が比較的低い解法に基づいている。これに対して、C-HSMAC 法では圧力の数値解を求める方法としてより高速の解法を選択できるため、収束特性を向上させることが可能である。3 次元非圧縮性流体計算に両手法を用いた結果、計算セル数の増加とともに C-HSMAC 法の収束性能は相対的に向上し、SOLA 法よりも高速な計算が行えることが示された。

**Key Words :** C-HSMAC method, SOLA method, incompressible fluid, iterative method, collocated grid

## 1. 緒言

河川や貯水池などの流況を把握するために、非圧縮性流れの数値解法を利用することが近年一般的となっている。非圧縮性流れの計算においては、流体の連続性を満足するような流速場と圧力場を求めることが必要である。そのような数値解を求めるための一般的な手法である MAC 系の解法では、流速の推定値を求め(予測段階)，これを用いて連続性を満足する流速場と圧力場を計算し(圧力計算段階)，次ステップの流速と圧力を得る(修正段階)，という手順を取る。

圧力計算段階において、流体の連続性に対する誤差を収束判定基準として用いることはきわめて合理的であり、そのような手法として HSMAC 法が提案されている。HSMAC 法は、別名 SOLA 法<sup>1)</sup>ともいわれ<sup>2)</sup>(以下両者を SOLA 法と表記)，計算セルごとの流体の連続性に対する誤差をその収束判定条件として用いることができるという点で、SMAC 法や fractional step 法と比較して有効な手法とされる。

著者は、SOLA 法に基づき、一般座標系におけるコロケート格子で用いられる C-HSMAC 法を提案した<sup>3)</sup>。C-HSMAC 法と SMAC 法あるいは fractional step 法との比較に関しては、既報<sup>4)</sup>で検討を加えている。一方、C-HSMAC 法は、単にコロケート格子で用いられる SOLA 法という位置づけでなく、SOLA 法と解法上の相違があり、これが両者の収束特性あるいは

は計算速度に関係している。本報では、両者の解法を具体的に比較するとともに、反復解法の本質的な部分の相違を明らかにする。さらに、3 次元非圧縮性流体計算に両手法を適用し、C-HSMAC 法の収束特性は、SOLA 法より良好であることを示す。

非圧縮性流体の計算では、圧力計算段階の負荷が高いため、全体の計算時間を短縮化するためにも C-HSMAC 法が有効である。また、C-HSMAC 法はスタガード格子系でも利用可能で、本報の結果と同様の収束特性が得られると考えられる。

## 2. SOLA 法と C-HSMAC 法の解法の比較

### (1) 非圧縮性流体計算における解法の手順

本報では非圧縮性流体を対象とし、基礎方程式として次の連続式と Navier-Stokes 式を扱う。

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2)$$

ここに、 $u_i$  と  $F_i$  はそれぞれ  $x_i$  方向の流速成分と外力、 $\rho$  は流体の密度、 $p$  は圧力、 $\nu$  は動粘性係数である。本報では  $\nu$  と  $\rho$  は時間的・空間的に変化しない定数とする。

圧力計算で用いられる関係式を明確にするため、既報<sup>3)</sup>と部分的に重複する記述となるが、以下でそれら

を誘導する。直交座標系上でコロケート格子配置を用いる場合には、MAC 系解法における流速の予測段階の計算が次式によりセル中心で行われる。

$$u_{ci}^* = u_i^n + \left[ F_i - \frac{\partial(u_i^n u_j^n)}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial u_i^n}{\partial x_j} \right] \Delta t \quad (3)$$

ここで、式(3)は時間方向にのみ離散化されており、 $u_{ci}^*$  はセル中心における流速の推定値の  $x_i$  方向成分、 $\Delta t$  は時間増分である。式(3)は圧力振動を防ぐため、圧力勾配を含まない CBP スキーム<sup>4)</sup>に基づいて導かれたものである。式(3)で得られた  $u_{ci}^*$  はセル境界へ空間内挿され、そこで次のように圧力勾配が考慮される。

$$u_{bi}^* = \hat{u}_{bi}^* - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\partial p^n}{\partial x_i} \quad (4)$$

ここに、 $\hat{u}_{bi}^*$  はセル境界上へ空間内挿された  $u_{ci}^*$  であり、 $u_{bi}^*$  はセル境界における流速の推定値である。式(4)に対して、 $n+1$  ステップの圧力  $p^{n+1}$  とセル境界の流速成分  $u_{bi}^{n+1}$  を用いると、次式が成り立つとする。

$$u_{bi}^{n+1} = \hat{u}_{bi}^* - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} \quad (5)$$

式(4)と式(5)より、次式を得る。

$$u_{bi}^{n+1} = u_{bi}^* - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \quad (6)$$

ここに、 $\phi = p^{n+1} - p^n$  である。一方、 $n+1$  ステップのセル境界上の流速成分が連続式を満たすとすれば、次式が成り立つ。

$$\frac{\partial u_{bi}^{n+1}}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

式(6)および式(7)より、次の関係が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} = \frac{\rho}{\Delta t} \frac{\partial u_{bi}^*}{\partial x_i} \quad (8)$$

C-HSMAC 法は、式(6)と式(8)に基づく以下の 2 式を利用して、反復計算の  $k$  ステップにおける  $u_{bi}^k$  と  $\phi^k$  を求め、連続性を満足する流速成分と圧力場を最終的に得る方法である。

$$u_{bi}^{k+1} = u_{bi}^k - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\partial \phi^k}{\partial x_i} \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \phi^{k+1}}{\partial x_i} = \frac{\rho}{\Delta t} \frac{\partial u_{bi}^{k+1}}{\partial x_i} \quad (10)$$

なお、スタガード格子を用いる場合には、上記の  $u_{bi}^k$  として、セル境界に配置されている各流速成分の推定値を用いれば、以下に示す C-HSMAC 法を同様に利用することが可能である。

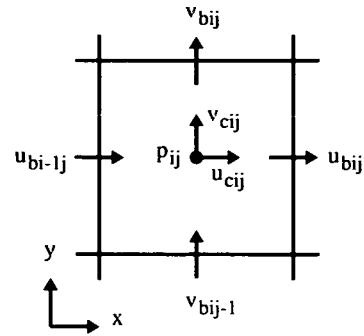


図-1 2 次元計算セルにおける変数の配置

一方、SOLA 法では、式(5)および式(7)より得られる関係式と、式(5)から得られる次の 2 式を利用する。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial p^k}{\partial x_i} = \frac{\rho}{\Delta t} \frac{\partial u_{bi}^k}{\partial x_i} \quad (11)$$

$$u_{bi}^{k+1} = u_{bi}^k - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\partial p^k}{\partial x_i} \quad (12)$$

SOLA 法の特徴となるのは、式(11)を離散化して得られる  $p^k$  の連立 1 次方程式に対して、対角成分のみを考慮した関係式を利用する点である。

両手法の解法の相違を比較するため、2 次元直交座標系において等間隔セルが用いられる場合を対象として、離散化式と解法の手順を以下に示す。 $x_1 = x$ ,  $x_2 = y$  とし、流速成分は  $u_{b1} = u_b$ 、また  $u_{b2} = v_b$  と表す。下添字  $ij$  が付される場合、これは格子点番号を表す。代表的な変数の配置は図-1 に示す通りである。

SOLA 法では、次の手順による反復計算を行う。

1)  $p^k = p^n$ ,  $u_b^k = \hat{u}_b^*$ 、また  $v_b^k = \hat{v}_b^*$  とする。ここに  $k = 1$ 。

2)  $u_b^k$  と  $v_b^k$  を用いて、次式より  $D_{ij}^k$  を求める。

$$D_{ij}^k = \frac{u_{bij}^k - u_{bi-1j}^k}{\Delta x} + \frac{v_{bij}^k - v_{bij-1}^k}{\Delta y} \quad (13)$$

3) 得られた  $D_{ij}^k$  が  $\max\{|D_{ij}^k|\} < D_0$  等の収束条件を満足していれば終了、そうでなければ下記の手順を実行する。

4) 式(11)を離散化して得られる  $p^k$  の連立 1 次方程式の対角成分のみを考慮した次の関係式より、 $\delta p_{ij}$  を求める。

$$\delta p_{ij} = -\frac{\rho}{2\Delta t} \frac{D_{ij}^k}{1/\Delta x^2 + 1/\Delta y^2} \quad (14)$$

なお、SOLA 法では、式(14)の右辺に加速係数  $\beta_0$  を乗ずる場合がある。 $\beta_0$  の定め方には明確な根拠はないが、値は 1.7 前後とされている<sup>1)</sup>。

5) 得られた  $\delta p_{ij}$  を用いて、 $u_{bij}^{k+1}$  を次のように求める。

$$u_{bij}^{k+1} = u_{bij}^k - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\delta p_{i+1j} - \delta p_{ij}}{\Delta x},$$

$$v_{bij}^{k+1} = v_{bij}^k - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\delta p_{ij+1} - \delta p_{ij}}{\Delta y} \quad (15)$$

6) さらに、 $p_{ij}^{k+1}$  を次式より求める。

$$p_{ij}^{k+1} = p_{ij}^k + \delta p_{ij} \quad (16)$$

7)  $p^{k+1}$  を  $p^k$ 、また  $k+1$  ステップの流速成分を  $k$  ステップの値として、圧力と流速成分を更新する。

8) 上記の手順 2) へ戻る。

一方、C-HSMAC 法では、既報<sup>3)</sup>に示されるように、以下の手順で計算が行われる。

1)  $\phi^k = 0$ ,  $p^k = p^n$ ,  $u_b^k = u_b^*$ 、また  $v_b^k = v_b^*$  とする。ここに  $k = 1$ 。

2) 式 (9) より、 $u_b^{k+1}$  と  $v_b^{k+1}$  を求める。

3)  $u_b^{k+1}$  と  $v_b^{k+1}$  を用いて、式 (13) と同様に  $D_{ij}^{k+1}$  を求める。

4) 得られた  $D_{ij}^{k+1}$  が収束条件を満足していれば終了。そうでなければ下記の手順を実行する。

5) 式 (10) を離散化して得られる  $\phi^{k+1}$  の連立 1 次方程式の数値解を求める。

6)  $p^{k+1} = p^k + \phi^k$  として、圧力を更新する。

7)  $\phi^{k+1}$  を  $\phi^k$ 、また  $k+1$  ステップの流速成分を  $k$  ステップの値として、圧力と流速成分を更新する。

8)  $\phi$  の連立 1 次方程式の数値解に対するしきい値を 0 へ近づける。

9) 上記の手順 2) へ戻る。

SOLA 法と C-HSMAC 法のどちらにおいても、反復計算終了後に得られる流速ベクトルの発散値はしきい値  $D_0$  より小さくなる。このように、連続性の誤差に基づいて圧力計算の終了判定を行えることが、SMAC 法や Fractional Step 法に対する両手法の利点となる。

上記の 2 つの手法では、解法において次の相違がある。すなわち、(1) 圧力を  $p$  あるいは時間変化分  $\phi$  として扱うか、(2)  $p$  あるいは  $\phi$  の連立 1 次方程式において、対角成分のみを扱うか、あるいは方程式の求解を行うか、という 2 点である。このうち、(1) は本質的な相違ではなく、SOLA 法でも  $\phi$  を用いる反復計算が可能である。したがって、上記 (2) の相違が両手法を特徴づける点となる。

## (2) 各解法における反復計算

前節で示された SOLA 法と C-HSMAC 法の相違をより明確に把握するため、図-2 に示す 1 次元場を対象とした反復計算の過程を考える。初期条件として、流速と圧力が 0 である 1 次元場 ( $0 \leq x \leq 1$ ) に対して、

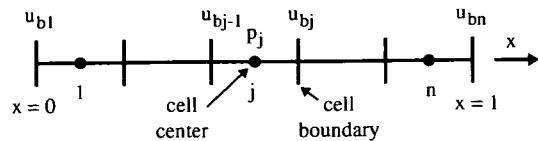


図-2 1 次元計算セルと計算領域

$u_b = 1.0$  ( $x = 0$ ) および  $\partial u_b / \partial x = 0$  ( $x = 1$ ) なる境界条件が与えられた場合、圧力計算終了後には、全てのセル境界で  $u_{bj} = 1.0$  となる非圧縮性流体では自明な数値解が得られる。この場合の両手法における圧力計算の過程を以下で検討する。

流速ベクトルの発散  $D_j^k$  は次式より求められる。

$$D_j^k = \frac{u_{bj}^k - u_{bj-1}^k}{\Delta x} \quad (17)$$

SOLA 法では、式 (16) を 1 次元化した関係式より  $p^k$  が得られ、 $\beta_0 = 1$  とするとき、 $u_{bj}^{k+1}$  が次のように求められる。

$$u_{bj}^{k+1} = \frac{u_{bj+1}^k - u_{bj-1}^k}{2} \quad (18)$$

すなわち、SOLA 法では、図-3 に概略的に示すように、連続性を満足しない流速の影響が、反復計算によって隣接するセルに一つずつ伝搬して修正されていく。

一方、C-HSMAC 法では、式 (17) の  $D_j^k$  を用いた次の数値解が求められる。

$$\phi_{j+1}^k - 2\phi_j^k + \phi_{j-1}^k = \frac{\rho \Delta x^2}{\Delta t} D_j^k \quad (19)$$

反復法などで得られた式 (19) の解を  $\tilde{\phi}_j^k$ 、またこのときの残差を  $e_j^k$  とすると、次の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} \tilde{\phi}_{j+1}^k - 2\tilde{\phi}_j^k + \tilde{\phi}_{j-1}^k &= \frac{\rho \Delta x^2}{\Delta t} D_j^k + e_j^k \\ &= \frac{\rho \Delta x^2}{\Delta t} (D_j^k + \epsilon_j^k) \end{aligned} \quad (20)$$

ここに、 $\epsilon_j^k = (\Delta t / \rho \Delta x^2) e_j^k$  である。得られた  $\tilde{\phi}_j^k$  を用いて 1 次元場で導かれた式 (9) から  $u_j^{k+1}$  を求め、これより  $D_j^{k+1}$  を計算すると次の結果が得られる。

$$D_j^{k+1} = -\epsilon_j^k \quad (21)$$

すなわち、反復計算の  $k+1$  ステップにおける  $D_j^{k+1}$  は、 $\epsilon_j^k$  のオーダーとなるので、式 (19) の求解が十分精度良く行われたとすると、比較的少ない反復回数で収束解が得されることになる。以上の計算過程を概略的に示すのが図-4 である。C-HSMAC 法では、 $D_j^k$  に基づいて  $\phi_j$  の分布が求められ、これより  $u_{bj}^{k+1}$  が得られ

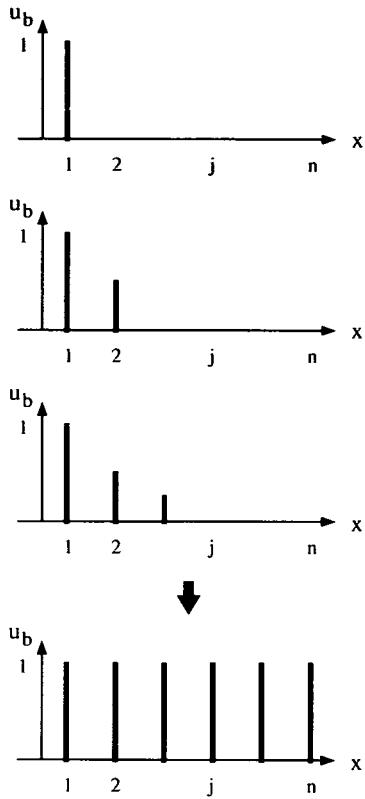


図-3 SOLA 法における流速の緩和過程の概略図

る。 $u_{bj}^{k+1}$  の連続性の誤差は、 $\phi_j$  の数値解の残差から計算される  $\epsilon_j^k$  と同程度となっている。収束条件を満足しない場合には、図-4 の手順が繰り返される。

以上の検討結果から、各解法の収束特性という点に着目すると、以下のような考察が行える。SOLA 法では式(18)、また C-HSMAC 法では式(19)の求解が反復計算の主要な部分と考えられる。両式を解くことは、いずれも連立 1 次方程式の解を求める問題に相当しており、式(18)の反復解法は、収束速度が遅いヤコビ法<sup>5)</sup>に相当する。一方、式(19)に対する解法は自由に選択することができ、より高速の反復解法を利用することが可能である。このため、式(19)に高速の解法を用いれば、C-HSMAC 法の収束特性は、SOLA 法のそれより優れたものになると予想される。この傾向は、多次元で計算格子点数が多い場合により顕著になると考えられる。

ところで、C-HSMAC 法において導かれた式(21)は、等間隔格子上で同様の差分法を利用する場合には、多次元でも成立する。式(21)は、 $\phi$  の連立 1 次方程式の数値解に対する残差が、更新した流速成分の連続性の誤差と直接関係するという重要な関係を示してい

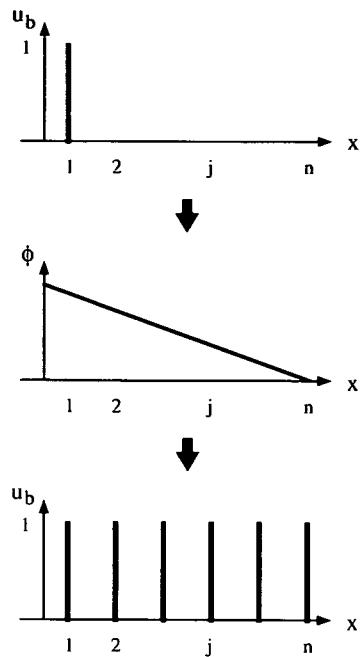


図-4 C-HSMAC 法における収束過程の概略図

る。既報<sup>6)</sup>では、 $\phi$  の求解における収束判定条件を、C-HSMAC 法の反復計算ごとに厳しくすることが有効であるとしたが、式(19)の関係は、この収束判定の方法が適切であることを理論的に裏付けている。

なお、収束特性以外の両手法の相違点として、SOLA 法では式(11)の対角成分以外の項を落としているため、対角成分以外の項を考慮しないことによる数値的な影響が生ずる可能性がある。この影響は、特に一般座標系上で導かれた基礎式の計算を行う場合などには検討が必要と考えられる。

### 3. 非圧縮性流体計算における比較

#### (1) 計算条件

SOLA 法と C-HSMAC 法の収束特性を定量的に把握するため、両手法を用いて非圧縮性流体計算を行い、計算時間等を比較する。

計算対象は、これまで複数の数値解が得られており、結果の検証がある程度正確に行える 3 次元キャビティ流れ<sup>7)</sup>とする。この計算では、図-5 に示されるように、一辺が 1.0 の立方体の計算領域に非圧縮性の粘性流体が満たされ、上部の壁面が 1.0 の速度で移動する。流速の境界条件は、移動する壁面以外では、壁面上の流速値を 0 とする。また、圧力境界条件はすべての壁面の法線方向の勾配が 0 であるとする。この計算では側壁面における壁面摩擦の影響がある 3 次元流れとな

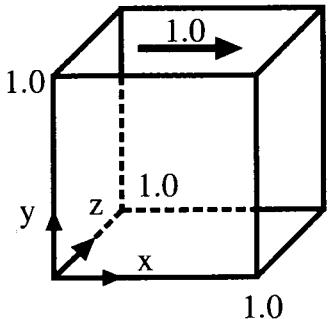


図-5 3次元キャビティと座標系

ため、Ghia ら<sup>8)</sup>が行った2次元キャビティ流れとは異なる流速分布が生ずる。レイノルズ数は、一辺の長さと壁面の移動速度に基づき、 $Re = 1/\nu$ で定義される。

SOLA 法および C-HSMAC 法の収束特性を比較するため、圧力計算以外はすべて同一の解法を用いて、流速と圧力がすべて 0 である初期条件から同一直接法までの非定常計算を行った。SOLA 法および C-HSMAC 法の収束条件は、いずれも  $D_0 = 1.0 \times 10^{-10}$  とした。計算時間を測定する際には、MPI<sup>9)</sup>の時間計測関数 (MPI\_wtime) を利用して、SOLA 法あるいは C-HSMAC 法の計算処理のみに要する時間の累積値を求めた。なお、C-HSMAC 法における  $\phi$  の連立 1 次方程式の反復解法には Bi-CGSTAB 法を用いた。既報<sup>6)</sup>で示したように、 $\phi$  の連立 1 次方程式の収束判定条件  $\epsilon$  は  $\epsilon = \alpha^{k-1} \epsilon_0$  とし、 $\alpha = 0.1$  および  $\epsilon_0 = 1.0 \times 10^{-2}$  とした。ここに  $k$  は C-HSMAC 法の反復計算回数 ( $k = 1, 2, \dots$ ) である。また、SOLA 法では加速係数  $\beta_0$  を 1.7 とした<sup>1)</sup>。なお、座標系としては 3 次元直交座標系を用い、等間隔の計算セルを利用する。なお、計算には、CPU が PentiumIII 1GHz の Linux PC を利用した。

## (2) 計算結果と収束特性の比較

SOLA 法と C-HSMAC 法の収束特性を比較するため、計算セル数  $N$  を変化させた場合の計算時間を求めた。それぞれの解法の収束計算に要する計算時間を  $T_{sola}$  および  $T_c$  とし、その比と  $N$  の関係を求めた結果を図-6 に示す。 $N$  の増加とともに計算時間の比は増大しており、C-HSMAC 法の収束特性が SOLA 法よりも良好であることが明確に示されている。

非圧縮性流体の計算では、全体の計算処理の中で圧力計算の負荷が相対的に高い。例えば、図-6 に示した計算セル数が  $32 \times 32 \times 32$  という条件では、SOLA 法と C-HSMAC 法に要する計算時間はそれぞれ全体の

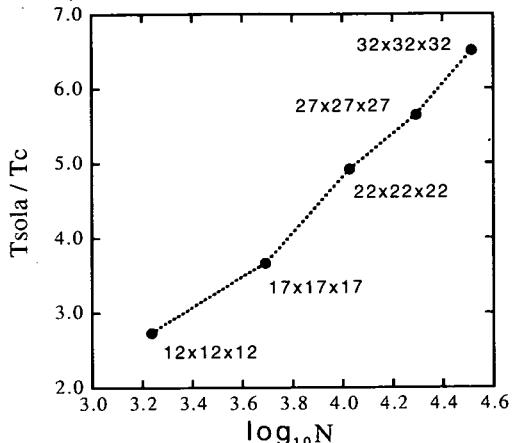


図-6 SOLA 法と C-HSMAC 法の計算時間の比(図中の数値は各方向の計算セル数を表す)

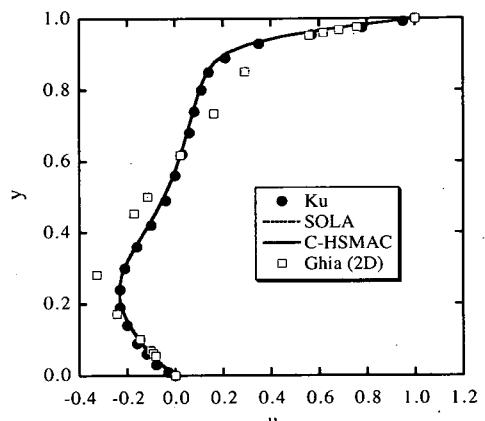


図-7  $u$  の分布 ( $Re = 400$ )

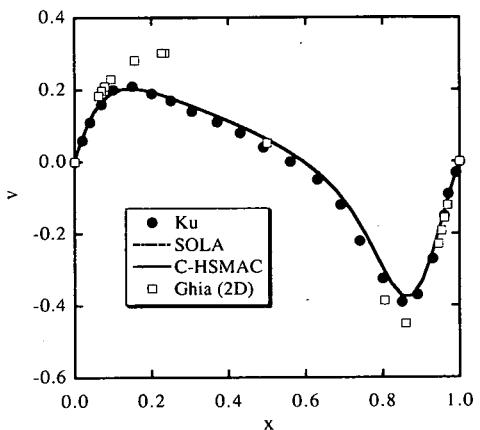


図-8  $v$  の分布 ( $Re = 400$ )

約 94% および約 70% を占めている。ここでは、移流項に QSI スキーム<sup>10)</sup>を用いたが、低次スキームを用いる場合にはさらにその割合は増加する。このように、負荷が大きい圧力計算に対して、収束特性の良好な C-HSMAC 法を用いることは、全体の計算時間を短縮化するためにも極めて有効である。

図-7 および図-8 に、それぞれ  $x = z = 0.5$  における  $u$  の分布と  $y = z = 0.5$  における  $v$  の分布を示す。図中の計算結果は、SOLA 法と C-HSMAC 法を用いて  $Re = 400$  に対して得られた定常解であり、計算セル数は  $32 \times 32 \times 32$  である。3 次元計算の結果は、参考として示した Ghia ら<sup>8)</sup> の 2 次元計算の流速分布とは異なるものとなっている。本手法による計算結果は、同様の 3 次元キャビティ流れを対象とした Ku ら<sup>7)</sup> の疑似スペクトル法による計算結果とほぼ一致している。

#### 4. 結言

本報では、SOLA 法と C-HSMAC 法の解法と収束特性を比較することを目的として、両手法の解法の手順や反復計算の主要な部分を示し、それらの相違を明らかにした。さらに、3 次元非圧縮性流体計算に両手法を適用して、計算時間と収束特性を把握した。得られた結果は以下のように要約される。

- 1) SOLA 法と C-HSMAC 法では、圧力 ( $p$  あるいは  $\phi$ ) の連立 1 次方程式に対して、対角成分のみを考慮するか、あるいは反復計算によりその数値解を求めるか、という点で解法の相違がある。
- 2) SOLA 法の反復計算は、収束性能の低い解法に基づいているが、C-HSMAC 法では  $\phi$  の数値解を求める方法としてより高速の解法を選択できるため、収束特性を向上させることができる。
- 3) 3 次元非圧縮性流体計算に両手法を用いた結果、計算セル数の増加とともに C-HSMAC 法の収束性能は相対的に向上し、SOLA 法よりも高速な計算が行えることが示された。

本文中に示したように、C-HSMAC 法はスタガード格子でも利用可能である。また、近年水理現象における 3 次元流れの予測が非圧縮性流体計算法に基づいて行われるようになったが、格子点数の大きい大規模な計算を行う際には、SOLA 法より収束特性が優れた C-HSMAC 法を用いることが有効であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) Hirt, C. W. and Cook, J. L.: Calculating three-dimensional flows around structures and over rough terrain, *J. Comp. Phys.*, Vol. 10, pp. 324–340, 1972.
- 2) 富山明男, 平野雅司: SOLA 法の改良, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 58, No. 551, pp. 2171–3618, 1992.
- 3) 牛島省, 榎津家久: 移動一般座標系を用いたコロケート格子による自由水面流れの数値解析手法, 土木学会論文集, No. 698/II-58, pp. 11–19, 2002.
- 4) 牛島省, 竹村雅樹, 榎津家久: コロケート格子配置を用いた MAC 系解法の計算スキームに関する考察, 土木学会論文集, No. 719/II-61, pp. 11–19, 2002.
- 5) 小国 力 編著: 行列計算ソフトウエア, 丸善, 1991.
- 6) 牛島省, 奥山洋平, 竹村雅樹, 榎津家久: 3 次元一般座標系における圧力場の並列計算法の提案, 水工学論文集, Vol. 47, pp. 385–390, 2003.
- 7) Ku, H. C., Hirsh, R. S. and Taylor, T. D.: A pseudospectral methods for solution of the three-dimensional incompressible Navier-Stokes equations, *Journal of Computational Physics*, Vol. 70, pp. 439–462, 1987.
- 8) Ghia, U., Ghia, K. N. and Shin, C. T.: High-Re solutions for incompressible flow using the Navier-Stokes equations and a multigrid method, *J. Comput. Phys.*, Vol. 48, pp. 387–411, 1982.
- 9) Lusk, W. G. E. and Skjellum, A.: *Using MPI*, The MIT Press, 1994.
- 10) 牛島省, 榎津家久, 山上路生, 坂根由季子: 局所 5 次スプライン内挿法 (QSI 法) を利用したコロケート格子による流体解析手法, 土木学会論文集, No. 691/II-57, pp. 73–83, 2001.

(2003.4.1 受付)

## COMPARISON OF C-HSMAC AND SOLA METHODS FOR PRESSURE COMPUTATION OF INCOMPRESSIBLE FLUIDS

Satoru USHIJIMA and Yohei OKUYAMA

The convergence and computational-speed of the C-HSMAC and SOLA methods were discussed and compared in detail. It was shown that only the diagonal elements in the pressure matrix are taken into account in the SOLA method, while the numerical solutions of the matrix equation are obtained in the C-HSMAC method. In addition, the iterative numerical procedures in the SOLA method are based on the classical Jacobi method, while a high-performance iterative method can be available to solve the pressure matrix in the C-HSMAC method. As a result of the computation of 3D cavity flows, it was confirmed that the computational performance of the C-HSMAC method is higher than that of the SOLA method.