

マルチグリッド加速手法を応用した マルチブロック並列流体計算による室内気流解析

Parallel Numerical Simulation of indoor air flow with MultBlock System based on Multi grid method

三浦 靖弘*・加藤 信介*

Nobuhiro MIURA and Shinsuke KATO

1. はじめに

筆者らは、コロケーション格子を採用した3次元一般曲線座標系コード^{1,2,3)}を基礎コードとし、既報^{4,5)}で並列処理および大規模計算に欠かすことのできないマルチブロック流体解析における収束性改善手法として、マルチグリッド加速手法の概念を応用した手法について報告した。前報⁶⁾では、本手法を並列計算機 SP-2^{注1)}に適用し、チャンネル流れを対象とした検討結果を報告した。本報では、チャンネル流とともに、実際問題への適用を考慮して、吸込み、吹出し口を有する矩形室モデルを対象として、本手法の効果を検討したので報告する。本計算は k-ε 型モデルを基礎とする定常解法 (SIMPLE) に関して行う。

2. マルチブロック並列流体計算

2.1 並列処理手法

流体計算の並列処理は大きく分けて、①離散化された多元連立方程式の並列処理による方法⁷⁾と②物理的流れ場を領域分割して行う方法の2種類がある。①の大規模なマトリックス演算を並列処理する方法は、各並列計算機のアーキテクチャの影響を大きく受け、HPF (並列計算処理を行わせる FORTRAN) 等の効率的な汎用の並列化ツールが未だ完全でない現状は、並列計算効率の良いコードを作成するのは必ずしも容易ではない。本研究では、流体計算の並列計算方針として②の領域分割法を考察する。

2.2 ブロック間データ交換手法

マルチブロック (領域分割型) 並列流体計算では、分割ブロック境界におけるデータ交換が必要で、①計算領域全体を一つのマトリックスとみなし、緩和計算の内部に必要なデータを交換する方法、②各ブロックの境界を流れ解析の仮の境界条件としてブロック内の計算は独立して行い各

ベクトル、スカラー方程式のそれぞれの緩和計算 (1 サイクル) が終了した段階でデータ交換を行う方法、③各ブロックのすべての方程式の緩和計算 (1 サイクル) が終了した段階でデータ交換を行う方法の、3方法が考えられる。現在①の方法が主流となっているが、本計算では、データ交換負荷の軽減による並列計算の粒度が向上する点とプログラム作成の簡易性等を考慮し③の方法を採用する。

3. 並列流体計算の収束性

3.1 収束性の検討

解析領域を1つのブロックとして計算する場合と領域を複数のブロックに分割し、各ブロック毎に独立して緩和計算 (1 サイクル) を行い、これが終了した段階で境界データの交換を行う方法では、並列計算の収束性に差が生じ、当然後者は劣るものと考えられる。すなわち、後者の方法では各緩和計算ステップで各ブロックが完全に独立した状態で計算されるため、解析領域全体としての情報伝達が遅くなること、隣接ブロックより別々に受けとった境界値がそのブロック全体の境界での連続性を必ずしも満足していないこと等の収束性悪化の要素が生じる。本研究では、大規模な流体計算における緩和計算加速手法であるマルチグリッド法の概念を適用して、収束性の向上を計る^{注2)}。

3.2 収束加速手法

本報では、緩和計算の過程で (1 サイクル毎に) ブロック領域単位に連続性を満たすことを収束緩和計算過程に強制的に課して、収束性の向上を計ることを検討する。すなわち、図1に示すように (簡単化のため2次元の例を示す) ブロック境界の計算格子風速の平均値をブロック境界風速 ($U_{i,j}, V_{i,j}$)、ブロック内計算格子圧力の平均値をブロック内圧力 ($P_{i,j}$) と定義し、各ブロックを一種のセルと見なし各ブロックが連続条件を満足するようブロック境界風速およびブロック内圧力を同時に修正する。本報では、

*東京大学生産技術研究所 第5部

研究速報

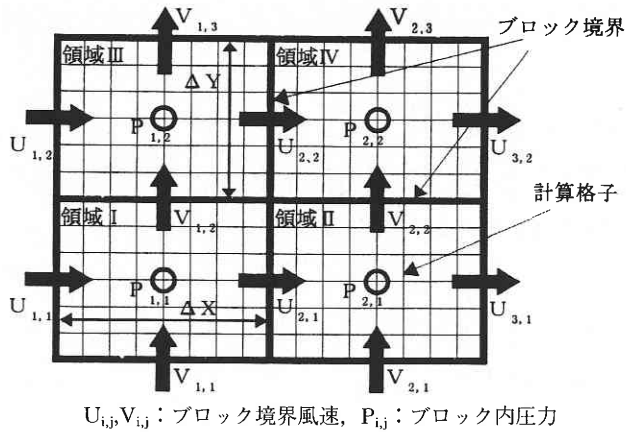
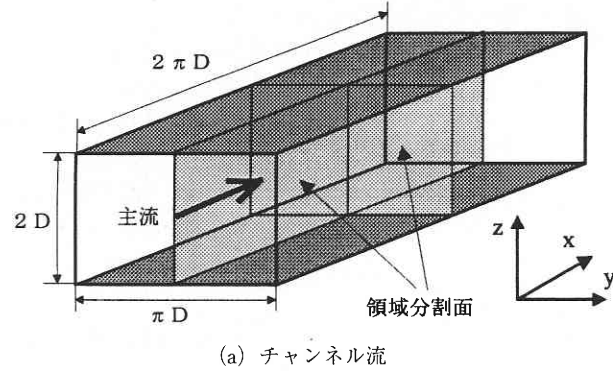
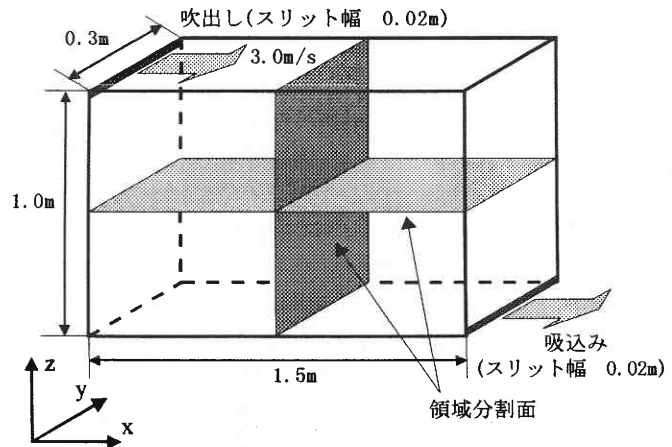


図1 ブロック境界風速及びブロック内圧力 (2次元)
 U_{ij}, V_{ij} : ブロック境界風速, P_{ij} : ブロック内圧力



(a) チャンネル流



(b) 矩形室モデル
 図2 計算対象の概要

境界風速およびブロック内圧力の修正法として HSMAC 法⁸⁾を適用する。

4. 計算対象と計算条件

4.1 チャンネル流

計算対象1は、図2 (a) に示すような Channel Flow ($Re = 40000$) である。主流は一定の圧力勾配 ($\partial p / \partial x = 1$) により駆動されている。境界条件は、流れ方向 (x 方向)、スパン方向 (y 方向) には周期境界条件を課し、壁面では壁法則を用いている。計算領域は、 $2\pi D \times \pi D \times 2D$ で、格子分割数は $30 \times 20 \times 30$ とし、x, y 方向は均等メッシュ分割、z 方向は壁面近傍でメッシュ間隔が細くなるように設定した。

4.2 矩形室モデル

計算対象2は、図2 (b) に示すような吹き出し、吸い込み口を有する矩形室モデル⁹⁾である。吹き出し口における風速は $3.0 [m/s]$ 、乱れは実験結果と一致させている。モデルサイズは $1.5 [m] \times 1 [m] \times 0.3 [m]$ 、吹き出し、吸い込み口のスリット幅は $0.02 [m]$ である。境界条件は、流出面では速度は mass flux 境界^{注3)}、その他はフリースリップとし、壁面では壁法則を用いている。格子分割数は $70 \times 20 \times 60$ で、壁面近傍でメッシュ間隔が細くなる不等間隔メッシュを用いた。本報ではブロック分割は4とし、xy 断面および yz 断面で均等分割した。

5. 計算結果と考察

5.1 チャンネル流

図3にチャンネル流の収束過程を示す。ブロックに連続条件を課す収束加速アルゴリズムを導入しない4ブロック計算は1ブロック計算と比較して、iteration 回数が2倍近く増加し収束性が悪くなっている。これに対し収束加速ア

ルゴリズムを導入したものは、明らかに収束が加速されており、収束加速の効果が認められる。なお、実計算時間 (計算開始から終了までの経過時間) は、4ブロック計算の場合4台の並列計算により、1ブロック計算と比較し約20%となった。ブロック間のデータ交換に伴うCPUのアイドル時間はほとんど生じておらず、収束加速により、同一収束条件に至るまでの実計算時間が短くなる効果が明らかに認められた。

5.2 矩形室モデル

図4に1ブロック計算の流線を示す^{注4)}。図5 (a), (b) に流れ場中央断面の x 方向速度分布、z 方向速度分布を、1ブロック計算と4ブロック計算 (収束加速有り) それぞれについて示している。いずれもよく一致しており4ブロック計算 (収束加速有り) の解の精度は十分保たれている。図6 (a) (b) に4ブロック計算でブロック毎に連続条件を課す収束加速アルゴリズムを導入したもの (b) と導入していないもの (a) の収束過程を1ブロック計算のそれと比較して示す。縦軸は計算領域内の圧力修正量の最大値 (4ブロックの場合にはブロック毎に示す)、横軸は

iteration 回数である。収束加速しないものは、吸い込み口ブロックの収束過程が1ブロック計算とほぼ同じ傾向を示し、他のブロックはこれより速やかに収束する。これは、吸い込み口周辺での緩和計算の効率が悪く、ここでの収束過程が流れ場全体の収束過程をほぼ支配していることを示す。収束加速する4ブロック計算は収束加速しない4ブ

ロック計算と比較して、各ブロックの収束過程が均質化する傾向は示すが、明らかな高速化はみられない。これは、吸い込み口ブロックの収束過程が1ブロック解析の収束過程とほぼ一致していることから演繹されるように、本計算対象の収束性が吸い込み口近傍の性状に特徴づけられ、収束加速アルゴリズムを導入して流れ場全体の低波長の誤差の緩和を計っても、これによる収束性改善の効果が現れず、吸い込み口ブロックの収束性状が直接流れ場全体の収束性状を支配していることを示している。すなわち、今回解析したような流れ場は、流出口に周期境界条件を課しななら流出口境界条件が流れ場の収束条件に影響を与えなかった場合と異なり、流出口の境界条件が流れ場の収束性に強い影響を与えていることが示唆された。なおこの解析では、収束加速の効果は現れなかったが、プロセッサ間通信量が少なく、実計算時間に関し4台の並列計算による4ブロック計算は1ブロック計算の約25%となった。

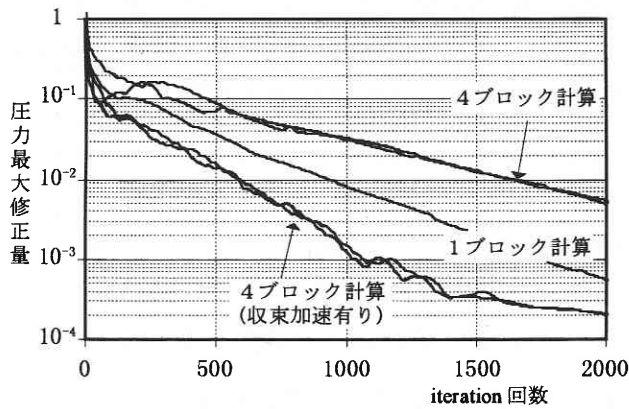
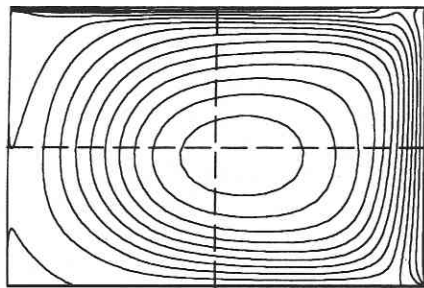
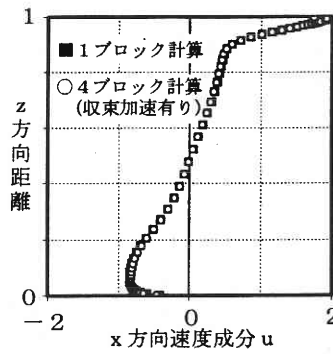


図3 収束過程 (チャンネル流)

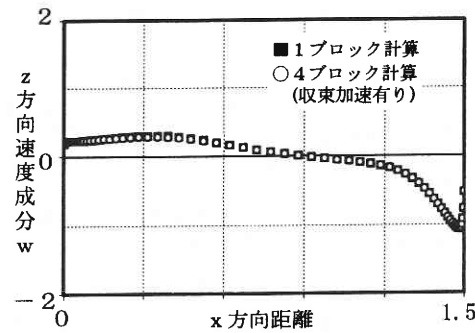


波線は図5における各速度成分分布を算出したラインを示す

図4 流線 (1ブロック計算)

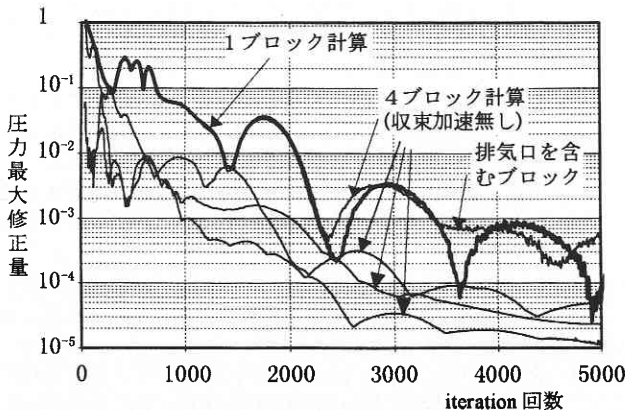


(a) u成分鉛直分布

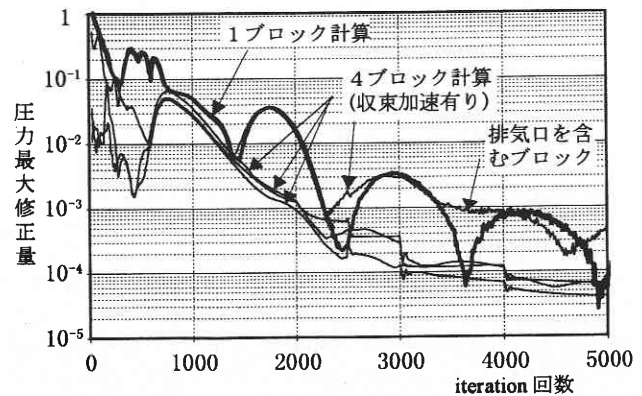


(b) w成分水平分布

図5 y方向中心断面速度分布 (図4参照)



(a) 4ブロック計算 (収束加速無し)



(b) 4ブロック計算 (収束加速有り)

図6 収束過程 (矩形室モデル)

研究速報

6. ま と め

並列計算機 SP-2 を用いて、マルチブロックシステムによるチャンネル流および矩形室モデルの解析を行い、各ブロックの連続条件を満たすよう境界値に修正を加える収束加速アルゴリズムを導入した場合と導入しない場合に関して収束性を比較した。矩形室モデルでは、収束加速アルゴリズムを導入することで、各ブロックの収束性の均質化がみられたが、解析モデルの収束性状を代表する領域を含むブロック（吸い込み口を含む領域）の収束性が他ブロックに大きく影響を与え、明らかな収束高速化はみられなかった。しかし、チャンネル流では明らかに収束が加速されており領域分割ブロック単位での流れ場の境界条件の強制による収束性の改善手法は有効であると考えられる。今後、吸い込み口の境界条件が収束性に及ぼす影響を検討する他、本方式をより多分割のブロックに適用し検討する予定である。

注

注1) 以下に並列計算機 SP-2 (IBM 製) の概要とデータ転送のプログラム例を示す。一般に SP-2 では既存のコードからの書き換えの便宜から、各ノードは全く同じプログラム(手続き)を実行するようプログラムを作成することが推奨されている。すなわち、各ノード毎に異なるプログラムをロードして並列計算を行うことは可能であるが、並列計算の制御等もより難しくなることからあまり使われない。

Table with 2 columns: Component (CPU, メモリ, データ転送, ピーク転送能力) and Value (power 2 プロセッサ, 256MB/1NODE (分散メモリ型), ハイ・パフォーマンス・スイッチ (HPS), 40MB/s (イーサネットの約30倍))

以下の領域 I, II 間で速度 u のデータを授受する場合である。

```
DIMENSION U(NI,NJ,NK)
CALL MP_ENVIRON(NTASKS,ID) (1)
C
DEST=REGION2
MSRC=REGION1
BLEN=REALSIZE*NI
OSET=REALSIZE*NI*NJ
BNUM=NK
TYPE=BOUNDARY12
C
IF (ID.EQ.REGION1) THEN
CALL MP_BVSEND(U(NI-1,1,1),BLEN,OSET,BNUM,DEST,TYPE) (3)
ELSE IF (ID.EQ.REGION2) THEN
CALL MP_BVRECV(U(1,1,1),BLEN,OSET,BNUM,MSRC,TYPE,BYTE) (4)
END IF
```

SP-2 におけるノード間のデータ授受は、上記プログラム例に示すように専用のメッセージ交換ライブラリ (MPL) をコールする事で実行する。上記例では、先ず (1) で並列管理システムより各計算ノードが担当する領域を識別するための ID を取得する。

(ノードと領域の領域の対応は並列計算管理システムにより管理されており、ノード番号と領域番号とは必ずしも一致しない。これよりプログラムは、IF 文を用いて全てのノードに対応できるような形で作成する。) 次に (2) でデータ転送、転送元、データのメモリ上の並び情報等を設定し、(3)、(4) で各ノードが自 ID を基に転送データを指定してそれぞれのデータ転送サブルーチンをコールする。(3) は領域 I 担当ノードから領域 II ノードへの送信命令、(4) は領域 II 担当ノードにおける領域 I 担当からの受信命令である。(実際はこれらの手続きを全てのノード間で行うことになる。)

注2) 本報で用いた収束加速手報は緩和法の加速法としてよく用いられるマルチグリッド法に類似しており、ブロック境界がマルチグリッド法における粗格子、計算格子が同様にマルチグリッド法における細格子とみなせる。すなわちブロック境界の境界条件の強制が粗格子を用いた低波数誤差の緩和に対応して収束計算の加速を行う。ただし、今回用いた方法は、連続条件のみを考慮しており運動方程式に対する考慮はしていない。今後の検討課題としたい。

注3) 流出口で固定的に速度を与えるだけでなく、流れの連続条件(質量保存則)を考慮して、流入流出口の質量流量をバランスさせるよう、流出口の速度を与える境界条件である。

注4) 流れ場が3次元性を示すので、流れ場を y 方向に積分平均し、その平均風速より求めた流れ関数分布を示す。

(1996年10月31日受理)

参 考 文 献

1) 村上, 加藤, 石田: 一般曲線座標系による室内気流数値シミュレーション その3, 日本建築学会計画系論文報告集, 第400号, 1989.
2) 村上, 加藤, 石田: 一般曲線座標系による室内気流数値シミュレーション その4, 日本建築学会計画系論文報告集, 第400号, 1989.
3) F.S. Lien, M.A Leschziner; Computational Modeling of 3D Flow in Complex Ducts and Passages, UMIST, Feb. 1992.
4) 三浦, 村上, 加藤; 並列計算機を用いた流れ場のダイレクトシミュレーション その4, 日本建築学会関東支部研究報告集, 1995.
5) 三浦, 加藤, 村上; マルチプロセッサによる流体シミュレーション並列計算の高速化, 第9回数値流体力学シンポジウム講演文集, 1995.
6) 三浦, 加藤, 村上; 並列計算機を用いた流れ場のダイレクトシミュレーション その5, 日本建築学会学術講演梗概集, 1996.
7) 加藤, 村上, 張, 岡本, 三浦; HXnet 型並列計算機を用いた SIMPLE 法による3次元流れ場の並列処理, 第7回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 1993.
8) J.A Viacelli; A Computing Method for Incompressible Flows Bounded by Moving Walls, J. of Comp. Physics, 8, 1992.
9) 鈴木, 伊藤, 加藤, 村上, 小林, 林: 不完全混合室内の居住域喚起効率の評価に関する研究 その3, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 1996.