

室内気流解析の並列演算処理に関する検討 ——マルチカラー法の適用と通信時間の低減——

Study on Parallel Processing of Computational Fluid Dynamics
——The Reduction of Communcation Time and The Implementation of Red/Black Partitioning——

村上 周三*・加藤 信介**・内海 康雄***・水谷 国男****
Shuzo MURAKAMI, Shinsuke KATO, Yasuo UTSUMI and Kunio MIZUTANI

1. 背景と目的

乱流の数値解析では一般に、大規模かつ微細な流れ場の解析が必要となる。たとえば市街地の建物周辺流や室内の気流分布に関するLESやDNSによる次世代の計算のためには、計算速度1 TeraFLOPS、メモリ容量100 GigaWORD以上の能力が要望されている¹⁾。一方、現状で利用可能な最高速のベクトル計算機は約10Giga-FLOPSであり、このタイプの計算機の計算速度の上限は100GFLOPS程度と予測されている。より高速かつ大規模な計算のためには多数のプロセッサを疎結合させた超並列計算機が必要と考えられており²⁾、近年並列計算機による流体解析の例も見られるようになった³⁾。しかし、並列計算のためのソフトウェアについては、一部を除いて、現在のベクトル計算機で提供される自動ベクトル化コンパイラのような自動並列化処理は開発されていない。すなわち計算機利用者が対象とする問題に応じて個別に並列処理プログラムを開発しているのが現状である⁴⁾。以上より、本研究では並列計算機での数値実験を基に、流体解析の並列化における基本的課題を検討する。特に、プロセッサ間の通信方法の変更やマルチカラー法の適用が並列処理速度に及ぼす影響について検討する。

2. 流体計算の並列化

2.1 領域分割

流体現象は同じ支配方程式で記述された現象が並列に生じているので、計算領域をプロセッサ数に応じて分割し、分割領域をおのおの計算することにより容易に並列化が可能である⁵⁾。しかし、より大きい計算処理速度を実現するためには、粒度(=プロセッサが独立に進めることのできる処理の長さ/プロセッサ間通信に要する時間)

を大きくする必要がある。各プロセッサが担当するメッシュ数を多くすれば粒度は大きくなるので、LESやDNSなど大きなメッシュ数を用いる計算の差異には多数のプロセッサで領域分割しても粒度はそれほど低下しない。

2.2 通信時間

プロセッサ数が増えると、1プロセッサ当りの通信データ量は減少するが、同期を取る必要のあるプロセッサが増加し、通信待ちの発生頻度が多くなるため、通信時間は減少しない場合がある。プロセッサ間の通信時間の存在が処理速度の向上を妨げており、プロセッサ数が増えたとこの影響はさらに大きくなる⁵⁾。

3. 並列計算機による気流計算

3.1 対象とする流れ場

吹出口と吸込口を一つずつ持つ閉空間(図1参照)に

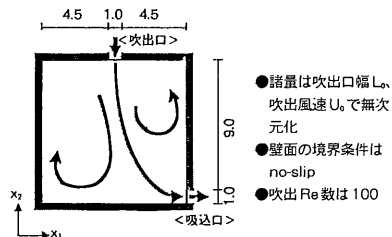


図1 計算対象流れ場の概要(2次元室内気流、層流)

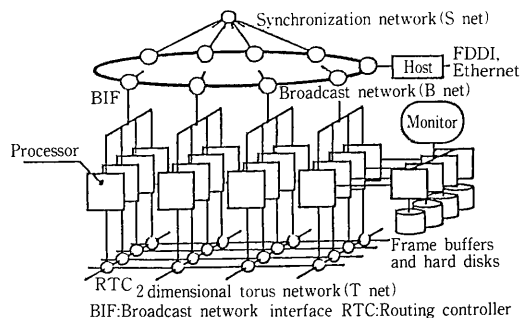


図2 使用した並列計算機(富士通AP 1000)のハードウェア構成⁶⁾

*東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター

**東京大学生産技術研究所 第5部

***協力研究員(宮城工業高等専門学校 建築学科)

****民間等共同研究員(三建設備工業㈱)

研究速報
 おける2次元層流計算を行う。レイノルズ数は100(代表長さは吹出口の幅, 代表速度は吹き出し風速)であり, 計算の時間ステップは0.001である。計算領域をセル数242×242 (=58564個)に分割している。解法は, 時間積分にAdams-Bashforthスキームを用いたABMAC法を用いている。

3.2 使用した計算システム(富士通AP 1000)の概要

使用した並列計算機(富士通AP 1000)は分散メモリを持つ疎結合タイプ(MIMD)である(図2)⁹⁾。プロセッサは最大1024個まで集積でき, ピーク性能8.53 GFLOPS(最大構成時)である。本研究では最大64個(ピーク性能530 MFLOPS)の構成で使用した。通信のネットワークは, 同期専用のS-net, 全体の通信用のB-net, プロセッサ間通信用のT-netの3種を持つ。基本ソフトウェアとしては, 通信や同期等の並列処理特有の機能が並列ライブラリとして提供されている。

3.3 適用された並列化の手法

(1) プロセッサへのデータ割当: 計算領域の全セルをプロセッサに均等に割り付け, 負荷の均一化を図った。プロセッサ数を1 (=1×1), 4 (=2×2), 16 (=4×4), 36 (=6×6), 64 (=8×8)と順次増加させて, 並列度の上昇に伴うさまざまな問題を検討した。各分割におけるプロセッサ当りの計算セル数, 通信セル数(プロセッサ間の通信に使われるセル数)等を表1に示す。

(2) アルゴリズムの並列化: 既存の逐次処理プログラムを基に, データの入出力以外の計算部分を並列化する。逐次処理と並列処理の計算の流れを図3に示す。

(3) プロセッサ間の同期と通信の方法: 圧力速度緩和の反復計算における送信と受信の方法に関して次のような工夫を考える。すなわち, (a)通信回数を直接低減する: 反復計算中のプロセッサ間の通信を毎回行わず, 何回かに1回だけ行って通信回数を直接少なくする。(b)通信手順を変更する: 送信と受信を交互に行うと各プロセッサでは受信を終るまで送信ができず, 結果的に全プロセッサにわたる同期通信的な扱いとなり, 通信待ちによる処理の遅れを生じさせる。プロセッサ間の通信は通信バッファを経由して実行されるので, 送信と受信をまとめて行うことができる。この場合受信時にほかのプロセッサの送信を待つ時間が減少でき, 処理速度が速くなる可能性がある。ただし, 1回の通信量は通信用のバッファの容量を越えないように注意する必要がある。

(4) マルチカラー法の適用: 圧力速度緩和の計算にマルチカラー法を適用し, 処理効率を高めることが考えられる⁷⁻⁹⁾。この方法は, 各プロセッサ領域の内部をさらに何色かに領域分割し, 計算と通信を各色ごとに行う。

各色の計算終了後の待ち時間を細分化して, 全体の処理効率の向上を図るものである。ただし, 通信回数(色数-1)だけ増加するというオーバーヘッドがある。

4. 計算条件

計算条件を表2に示す。通信回数を直接低減する方法の効果をj知るために, 圧力速度緩和における反復計算ごとに毎回と5回に1回の通信の2種類を行う。ただし, 反復回数は今回, 通信手順変更の効果を単純に計測するため, 500回で固定している。通信手順は, 以下の3種を用いる。すなわち, 手順A: 速度と圧力について送受信を交互に行う場合, 手順B: 速度と圧力についておのおの送受信をまとめて行う場合, 手順C: 速度と圧力ともに送受信をまとめて行う場合の3種。マルチカラー法は, 今回は圧力速度緩和の部分にのみ2色を用いる。

5. 計算結果

5.1 計算処理速度の向上比

計算により得られた流線の分布を図4に示す。また各実験の計算時間等を表3に示す。速度向上比 S_p は,

$$S_p = \frac{\text{プロセッサ1個で計算した場合の処理時間}}{\text{多数のプロセッサでの処理時間の1個当りの平均値}}$$

表1 計算セルと通信セルの個数(1プロセッサ当り)

プロセッサ数	1	4	16	36	64
計算セル数	57600	14400	3600	1600	900
通信セル数	0	240	180	133	105
通信セル数 計算セル数 (%)	0	1.7	5.0	8.3	11.7

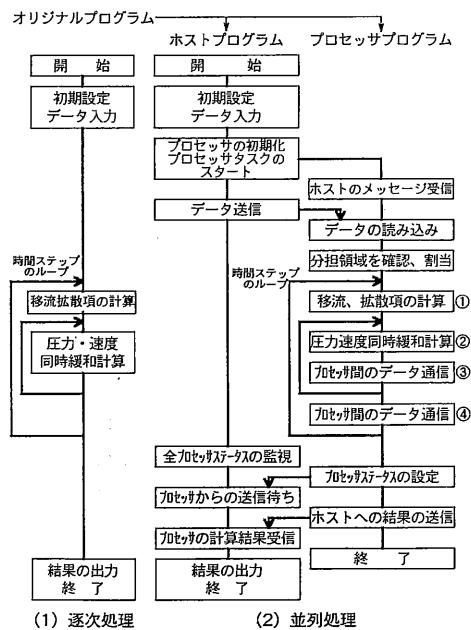


図3 流体計算の逐次処理と並列処理のフローチャート

研究速報

で求めている。ここで、処理時間(図3①~④)=正味計算時間(図3①,②)+通信時間(図3③,④)であり、ホストとの間のデータ通信および計算の前処理等の時間は含んでいない。各実験の速度向上比(Sp)とプロセッサ数の関係を図5に、正味計算時間および通信時間を図6に示す。全てのケースについてプロセッサ数が増えると計算処理速度は向上するが、増加の割合は緩やかになる。各ケースごとの正味計算時間は、プロセッサ数にほぼ比例して減少するが、通信時間はあまり変化しない。このために並列処理効率が低下していると考えられる。

また圧力速度緩和の反復中の通信回数を5回に1回としてマルチカラー法を用いた場合、今回の実験ケースでは並列処理効率が最大106%となった。正味計算時間のみで計算した並列処理効率は全ての実験で100%を越えており、通信時間が0に近くなれば並列処理効率は100%以上となり得ることがわかる(図5)。なお、並列処理効率が100%を越えるのは、各プロセッサのキャッシュメモリのヒット率が向上するためと考えられる。

5.2 データ通信の順序の変化による通信時間の低減

プロセッサ数が同じ場合、通信手順をA, B, C(ケース2, 3, 4)と変えると、通信時間が減少し、手順Cは手順Aの約半分となった(表3, 図6)。プロセッサ間の通信量がバッファ容量を越えなければ、送信と受信をまとめるという単純な通信手順の変更でも、通信時間が大幅に低減する可能性がある。

圧力速度緩和の差異の反復において通信を毎回行った場合(ケース1, 5)と5回に1回行った場合(ケース2, 6)をそれぞれ比較すると、通信時間は1/5強となった(表3, 図6)。通信回数を減らすとほぼ比例した通信時間の低減効果が得られた。

5.3 マルチカラー法による通信時間の低減

マルチカラー法を適用したケース6をケース4(通信手順(C)と通信回数(1/5)は同じ)と比較すると、正味計算時間はほぼ同じであるが通信時間は約1/2となっている(表3, 図6)。マルチカラー法における計算時間と通信時間の細分化の効果が現れている。

また、ケース6(64プロセッサ)の通信時間はケース

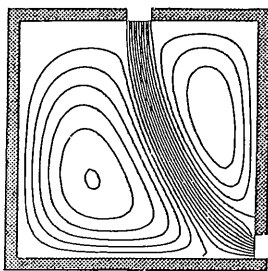


図4 計算モデルの流線の分布

5(通信回数:毎回, マルチカラー)の約1/4であり、マルチカラー法と通信回数低減の効果は独立に現れている。

5.4 1セル当りの正味計算時間と通信時間の比較

各実験における1セル当りの正味計算時間と通信時間を表3および図7, 図8に示す。各ケースについてプロセッサ数が多くなって計算セル数が減ると1セル当りの正味計算時間はやや減少する(図7)。キャッシュメモリのヒット率の向上が寄与しているものと思われる。1セル当りの通信時間は各ケースともプロセッサ数が4から64に増加すると2倍程度に増える(図8)。プロセッサ数が多くなったため、通信の差異の待ち時間が増えたと考えられる。手順の変更については、手順A, B, Cの順に減少し手順Cのケース4, 6ではセル当りの通信時間がセル当りの計算時間のオーダーになっている(表3)。この通信時間の減少により並列処理効率の大きな向上が達成されている。

6. ま と め

計算領域に割り当てるプロセッサ数を順次変更し、また通信回数と通信手順をいくつかに変えて計算した結果、

表2 計算条件と実験番号

計算ケース	通信手順	通信回数	マルチカラー	実験番号(合計22の実験)				
				(1)	(4)	(16)	(36)	(64)
1	A	1/1	X	1	2	3	4	5
2	A	1/5	X	-	6	7	8	9
3	B	1/5	X	-	10	11	12	13
4	C	1/5	X	-	14	15	16	17
5	C	1/1	O	-	-	-	-	18
6	C	1/5	O	-	19	20	21	22

表3 各計算ケースの正味計算時間と通信時間(秒/step)

計算ケース	実験番号	プロセッサ数	正味計算時間*1)	通信時間*1)	処理時間*1)	速度向上比*2)	並列処理効率率(%)*3)	通信順序	セル当たり時間*10 ⁻³ s	計算	通信
1	1	1	361.9	0	361.9	1.0	100.0	A	6.3	0	
	2	4	89.23	9.31	98.53	3.7	91.8	A	6.2	38.8	
	3	16	22.06	8.10	30.16	12.0	75.0	A	6.1	45.0	
	4	36	9.67	8.46	18.13	20.0	55.4	A	6.0	63.6	
	5	64	5.31	9.07	14.38	25.2	39.3	A	5.9	86.4	
2	6	4	89.09	2.02	91.10	4.0	99.3	A	6.2	8.4	
	7	16	21.98	1.85	23.83	15.2	94.9	A	6.1	10.3	
	8	36	9.64	1.69	11.33	32.0	88.8	A	6.0	12.7	
	9	64	5.28	1.97	7.25	49.9	78.0	A	5.9	18.8	
3	10	4	89.36	1.56	90.92	4.0	99.5	B	6.2	6.5	
	11	16	22.18	1.53	23.70	15.3	95.4	B	6.2	8.5	
	12	36	9.68	1.48	11.15	32.4	90.1	B	6.0	11.1	
	13	64	5.27	1.60	6.87	52.7	82.3	B	5.9	15.2	
4	14	4	89.47	0.97	90.43	4.0	100.0	C	6.2	4.0	
	15	16	21.98	0.93	22.91	15.8	98.7	C	6.1	5.1	
	16	36	9.63	0.85	10.47	34.5	96.0	C	6.0	6.4	
	17	64	5.29	1.01	6.30	57.4	89.7	C	5.9	9.6	
5	18	64	4.99	1.51	6.50	55.7	87.0	C	5.5	14.4	
	19	4	84.29	0.55	84.84	4.3	106.6	C	5.9	2.3	
6	20	16	20.90	0.46	21.36	16.9	105.9	C	5.8	2.6	
	21	36	9.20	0.46	9.66	37.5	104.1	C	5.8	3.4	
	22	64	5.13	0.38	5.51	65.7	102.7	C	5.7	3.6	

* 1) 処理時間(図3①~④)=正味計算時間(図3①,②)+通信時間(図3③,④)
 * 2) 速度向上比(Sp) = プロセッサ数が1個の時の処理時間/処理時間
 * 3) 並列処理効率率=速度向上比(Sp) / プロセッサ数

研究速報

①送信と受信をまとめるという単純な通信手順の変更によりプロセッサ当りの通信時間が約1/2になった。②マル

チカラー法によりプロセッサ当りの通信時間が約1/2になった。③今回の実験では、プロセッサ数64個で最大103%の並列処理効果が得られた。

今回、緩和計算の反復回数は固定して考察した。今後この条件を課さない場合について検討を進める。また、3次元計算やLESによる乱流計算への適用と、プログラム全体の処理効率の向上を図るための、領域分割と機能分割の併用や負荷の平均化について検討する予定である。

謝 辞

本研究は東京大学生産技術研究所選定研究費の助成により行われた。また数値実験は富士通並列処理研究センターの並列計算機AP1000を用いて行い、同社計算科学研究部各位の協力を得た。記して謝意を表します。

(1991年11月25日受理)

参 考 文 献

- 1) S. Murakami: The Future of CFD in Civil Engineering, Large-Scale Computation with Vector and Massive Parallel Computers: US-Korea-Japan Trilateral Seminar on Frontier R&D for Constructed Facilities, 1991
- 2) 関口, 小柳: 科学技術計算における並列化技術: 情報処理, Vol. 27, No. 9, 985-994, 1986
- 3) 向井, 池川, 植西: 並列プロセッサ方式による乱流シミュレータの開発(第三報 有限要素法による3次元乱流解析): 第3回数値流体シンポジウム論文集, 205-208, 1989
- 4) 幾留: 並列処理コンピュータのソフトウェア: bit, Vol. 23, No. 11, 1476-1488, 1991
- 5) 水谷, 村上, 加藤, 内海: 流体シミュレーションの並列演算処理に関する基礎的研究: 日本建築学会関東支部研究報告書, 1991
- 6) 石畑, 稲野, 堀江, 清水, 加藤: 高並列計算機CAPIIの構成とメモリシステム: 計算機アーキテクチャ, 83-37, 217-222, 1990. 7
- 7) 関口, 嶋田: 科学技術用データ駆動計算機SIGMA-1における並列計算アルゴリズム: 情報処理学会第31回全国大会161-162, 1985
- 8) 横山: 複数の加速係数を使用する連立一次方程式のSBOR解法: 情報処理学会論文紙, Vol. 26, No. 3, 1985. 5
- 9) 藤野, 竹内: 多点近似式における最小色分け問題のベクトル並列化について: 数値解析, Vol. 37, No. 13, 99-106, 1991

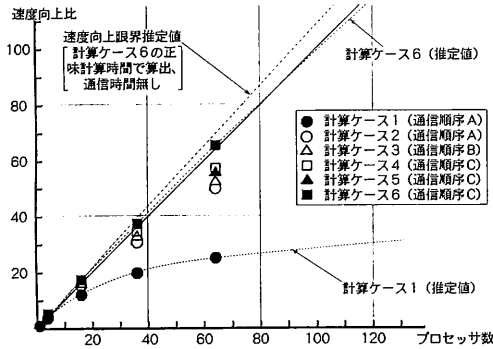


図5 速度向上比とプロセッサ数の関係

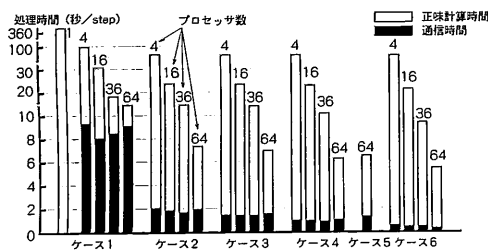


図6 正味計算時間および通信時間とプロセッサ数の関係

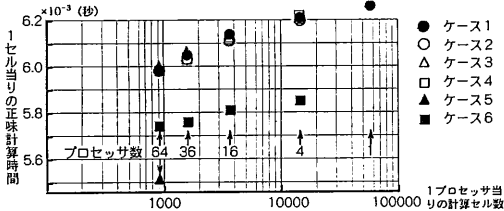


図7 1セル当りの正味計算時間と計算セル数の関係

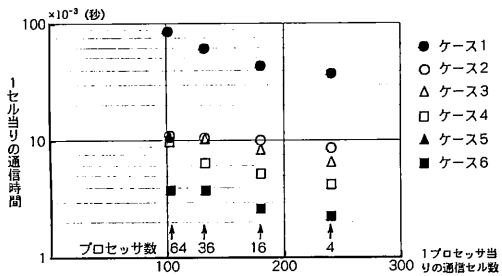


図8 1セル当りの通信時間と通信セル数の関係