

並列化による大規模3次元Navier-Stokes解析の試み

岸本 琢司*

A Large Scale 3D Navier-Stokes Analysis using NAL-NWT

by

Takuji Kishimoto
Gifu Technical Institute,
Kawasaki Heavy Industries, LTD.

ABSTRACT

Parallelization of 3D Navier-Stokes analysis using a structured multi-block grid has been achieved by a domain decomposition method with message passing procedure. Modification of existent solver can be done easily, because added procedures for parallelization are only the domain decomposition routine and the interdomain communication of boundary conditions between each neighboring subdomains, that is message passing procedure, and there is no need to modify main routines.

NWT (Numerical Wind Tunnel) of National Aerospace Laboratory (NAL) was used in order to investigate the effect of parallelization.

A parallelized flow analysis around alone swept wing using about 1 million grid points and 4PE (Processor Element)s was accelerated about 3 times faster than using single PE. We also got the result that a larger scale flow analysis around complete configuration of ONERA-M5 model using over 5 million grid points and 16PEs was accelerated about 12 times faster than using FACOM VP-400.

1. はじめに

当社では、これまでにNAL-KHI共同研究の下で3次元Navier-Stokes解析システムを構築し、STOL実験機「飛鳥」^{1, 2)}をはじめとして、宇宙往還機HOPE³⁾、次世代SST⁴⁾、超音速インターク⁵⁾等、実際の航空機の開発・設計の場においても多くの成果を上げてきた。

しかし、本解析システムではマルチブロック型の計算格子を採用しているため、複雑な形状に対する適合性にすぐれている反面、広く用いられているC、O型格子に比べて多くの格子点を必要とし、その結果多大な計算時間を要する場合が多い。また、解析の高精度

化への要求や化学反応、燃焼等の複雑な物理の導入などにより、解析の大規模化の傾向は今後一層拍車がかかるものと予想される。そのため、格子点数を多く必要とする我々の解析システムを実際の設計の場で有効に活用していくためには、計算効率の改善が非常に重要なポイントになってきている。そこで、我々はこれまでに、計算効率の改善のための1つのアプローチとして、本解析システムへのマルチグリッド法の適用を試み、一定の成果を得ることができた⁶⁾。

さらに本研究では、航空宇宙技術研究所へのNWT並列計算機導入を1つのきっかけとして、計算効率改善のもう1つのアプローチである解析システムの並列化を行なったので、以下その概略について報告する。

* 川崎重工業(株) 岐阜技術研究所

2. NAL-NWT の概略⁷⁾

本研究では、並列計算機として航空宇宙技術研究所のNWT (Numerical Wind Tunnel) 並列計算機を利用させていただいた。そこで、ここではNAL-NWT の概略について紹介する。

NAL-NWT は、ベクトル計算機を 140台結合した分散主記憶型の並列計算機 (図1) で、その能力の概要は以下のとおりである。

- ・ 処理速度 : 1.7 GFLOPS/PE
- ・ 主記憶容量 : 256 MBytes/PE
- ・ PE結合方法 : クロスバー・ネットワーク
(PE : Processor Element , 計算機要素)

このような能力を持つNWTの特色として、そのメモリー構造 (図2) が挙げられる。NWTは、分散主記憶型の並列計算機であるので、各PEごとにメモリーを持っているが、そのメモリーはローカルメモリーと名づけられ、他のPEから直接アクセスすることはできない。そこで、他のPEが持つデータを参照するためには、仮想的に作られたグローバルメモリーと呼ばれる領域を経由しなければならない。そして、グローバルメモリーへのアクセス速度は、各PE内部でのローカルメモリーへのアクセス速度に比べて遅い (図2) ため、並列化の効率について考える場合、グローバルメモリーへのアクセス方法に注意を払う必要がでてくる。

3. 解析手法の概要¹⁻⁴⁾

ここでは、並列化のベースとなる解析システムの概要について説明する。

(1) 計算格子

我々が現在用いている計算格子は、Transfinite Interpolation を利用した代数的手法により生成されるマルチブロック型の構造格子である。この計算格子は、形状適合性が高いにもかかわらず、単一構造格子という非常にシンプルな形に帰着するため、ベクトル化はもちろんのこと、並列化についても比較的容易に行うことができる。

(2) ソルバー

- ・ 基礎方程式 : 薄層近似 Navier-Stokes方程式
- ・ 乱流モデル : $q-\omega$ 2 方程式モデル
- ・ 離散化 : 有限体積法にもとづく
TVD風上差分法 (空間2次精度)
- ・ 数値流束 : Roe の近似 Riemann解法
- ・ 時間積分 : 平面对称Gauss-Seidel緩和法による陰的時間積分 (時間1次精度)

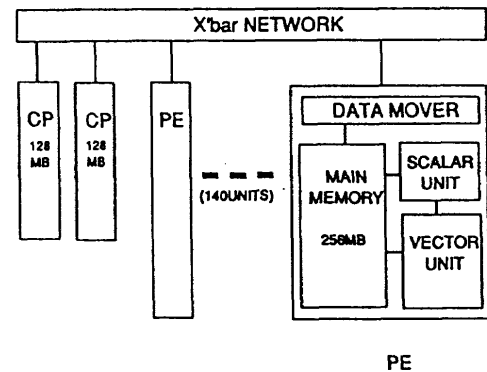


図1. NAL-NWT システム構成図

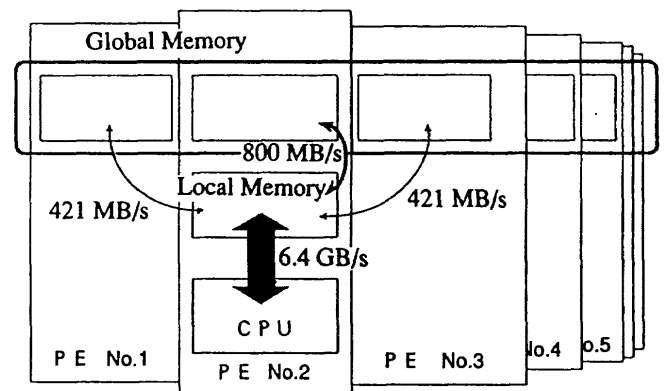


図2. NAL-NWT メモリー構成

4. 並列化手法

我々は、今回の解析システムの並列化にあたってプログラム修正の容易さ、他の並列計算機システムへの拡張性を考慮した結果、並列化手法として領域分割法 (Domain Decomposition Method) を採用した (図3)。これは、計算空間 (= 計算格子) を複数個の領域に分割し、分割されたそれぞれの領域の解析を各PEにより同時に行うものである。この時、各領域間に設けられたOverlap 部分において、Message Passing とよばれる境界条件の交換を行うことにより、分割された領域間のつながりを保証している。ただし、今回の並列化においては、領域分割は主流方向のみに対して行っており、PEの2次元あるいは3次元割り当ては行っていない。

このような方針の下でNAL-NWT 上での解析の並列化を実現するためには、プログラムをNWT-FORTRAN という並列化用言語で記述しなければならない。最も普通にNWT-FORTRAN を用いて上に述べたような領域分割を表現するには、配列およびDO Loop の分割を行う必要がある。しかし、この方法にのって並列化を行うと、プログラム全体にわたって修正を施す必要がある

ため修正作業が煩雑になるうえ、他システムへの拡張性が損われるおそれがある。そこで我々は、領域分割部分および分割された領域間の境界条件の転送 (Message Passing) 部分を陽に書き表すこととした。その結果、各領域内での解析に関するプログラムの主要部分には、ほとんど修正を加えることなく並列化を行うことができた。また、他の並列計算機システムへの拡張性についても、これらの部分のみをそのシステムに対応した並列化用言語あるいはライブラリに合わせて修正するだけで対応することができる。さらに、このように書き加えられた領域分割の部分では、計算領域を自動的にほぼ等間隔に分割するようになっているので、各PEのLoad Balanceも良好である。

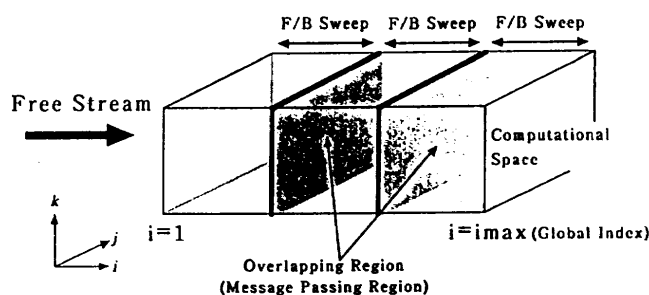


図3. 領域分割法概念図

5. 並列化の効果

本研究では、解析の並列化の効果を調べるために、3次元後退翼まわりの粘性流解析およびONERA-M5全機形態まわりの粘性流解析を行なった。

(1) 後退翼まわりの粘性流解析

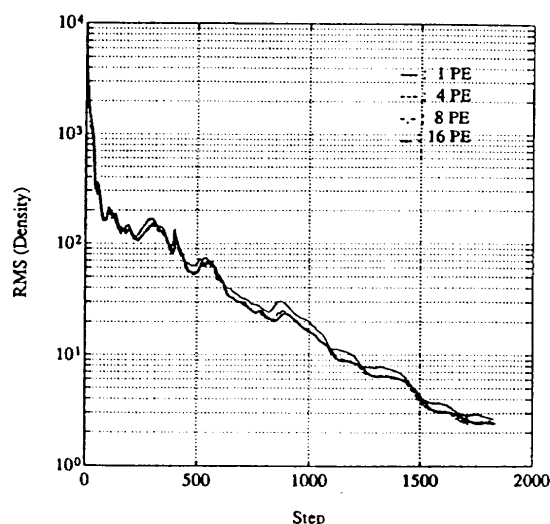
ここでは、ONERA-M5標準模型の主翼のみを取り出して、単独翼まわりの流れ解析を行なった。解析条件は以下のとおりである。

- ・格子点数： $141 \times 81 \times 91 = 1,039,311$ 点
- ・PE台数： 1, 4, 8, 16台の4ケース
- ・一様流条件
マッハ数： 0.84
迎角： -1°
レイノルズ数： 1.0×10^6

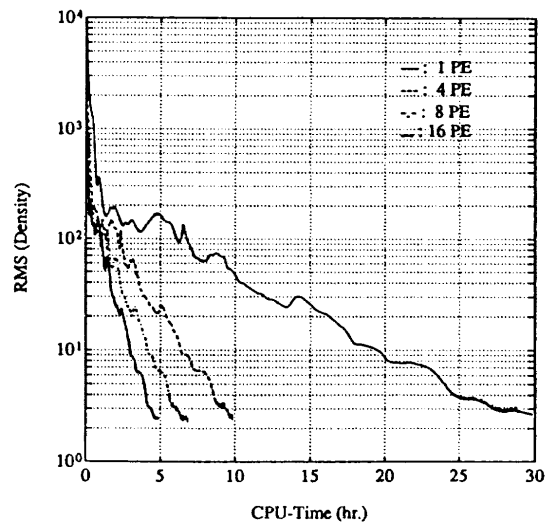
図4の収束履歴をみると、計算ステップに対する残差のふるまいは、1~16PEまでどれもほぼ同様であるのに対して、CPU-Timeに対する収束状況では各

PE台数に応じた違いが生じており、並列化の効果が明確に現れている。4PEでの解析では、1PEの場合に比べて3倍程度収束が加速されており、良好な並列化の効果が得られていると考えている。ただし、4PEからさらにPE台数を増やしていても、PE台数に比例して収束が加速されているわけではない。これは、PE台数が増えるにつれて、データの入出力、領域分割、Message Passing等データ転送速度の遅いグローバルメモリーへのアクセスをとまなう作業（これらは並列化の恩恵を受けない—Message Passingについては、現状の分割方法では各領域間でのデータ転送量はPE台数によらない）に要する時間が、解析作業全体の中で相対的に増加してくるためである。

なお得られた解析結果についても、当然のことながら、1PEでの解析と並列計算との間で、（特に分割された領域間の境界付近等において）大きな違いは生じていない（図5, 6）。



(1) Step ~ RMS



(2) CPU-Time ~ RMS

図4. 単独翼まわりの粘性流解析収束履歴

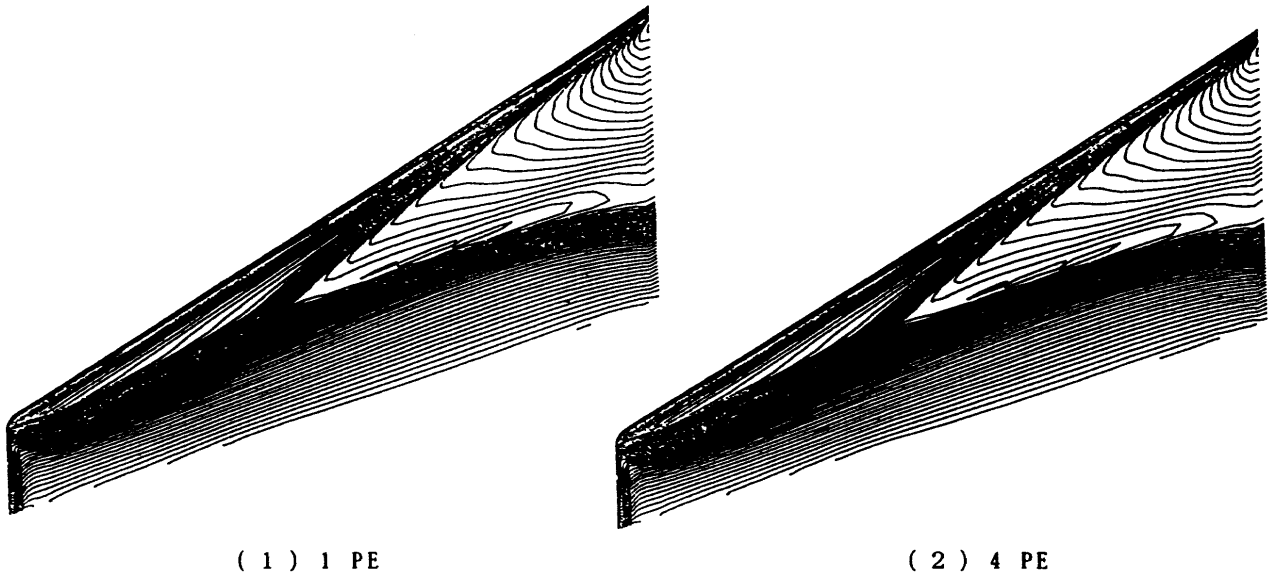


図5. 翼上面等圧線図 (単独翼解析結果)

(2) ONERA-M5全機形態まわりの粘性流解析

ここでは、より大規模な並列計算の例として、ONERA-M5全機まわりの粘性流解析を紹介する。これは、第10回航空機計算空気力学シンポジウムの中のCFDワークショップにおいて、我々が当時のVP-400を用いて行なった解析⁹⁾と同一のものである。解析条件は、以下のとおりである。

- ・格子点数： $256 \times 116 \times 176 = 5,226,496$ 点
- ・PE台数： 16 台
- ・一様流条件
 - マッハ数： 0.84
 - 迎角： -1°
 - レイノルズ数： 1.0×10^6

この解析は、主記憶容量として最低でも約1ギガバイト程度必要なので、1PEの解析との直接の比較はできないが、VP-400およびNWTのそれぞれにおいて1回のJOBで計算されるステップ数等から類推すると、解析の並列化により、その実行速度はVP-400に比べて約12倍程度高速化されたものと予想される。

並列計算により得られた結果についても、ONERA標準模型で特徴的な主翼上面での三重衝撃波も捕らえられており、並列化による解の精度の低下などは生じていないことが確認できた(図6, 7)。

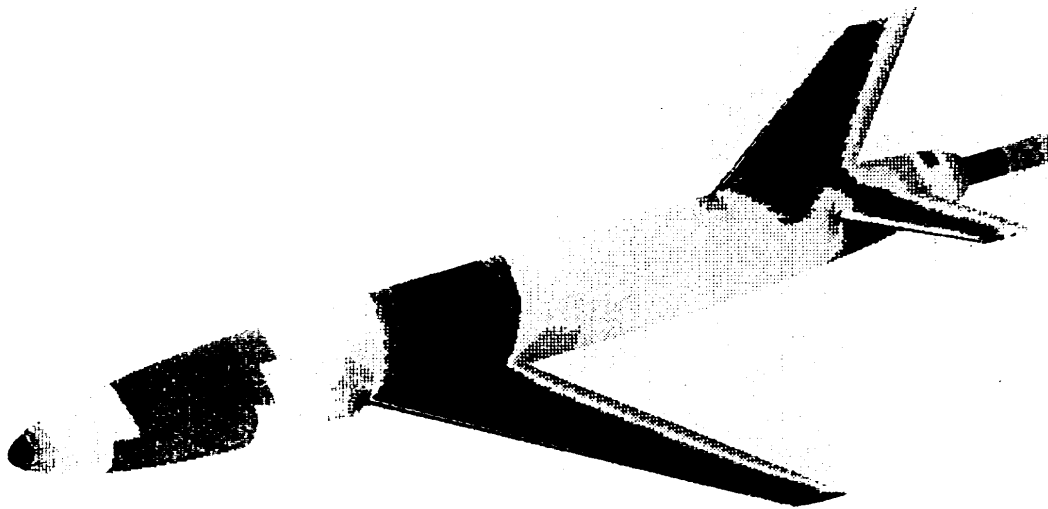


図6. ONERA-M5機体表面圧力分布

6. おわりに

これまでに述べてきたように、マルチブロック型構造格子を用いた3次元Navier-Stokes 解析システムを並列化することにより、計算効率の改善を図ることができた。今後さらにNAL-NWT 上で並列化の効率の向上を図っていくためには、データ入出力方法の改善、領域分割の多次元化等が必要となってくるものと思われる。また、並列化にともなう解析の大規模化に対応して、格子生成、作画等の解析の前後処理の方法についても検討していくことにより、より実用的な空力解析システムを構築することができるものと考えている。

なお、今回の並列化作業にあたって、多くの有益なアドバイスをいただいた航空宇宙技術研究所 数理解析部の方々に心から感謝の意を表します。

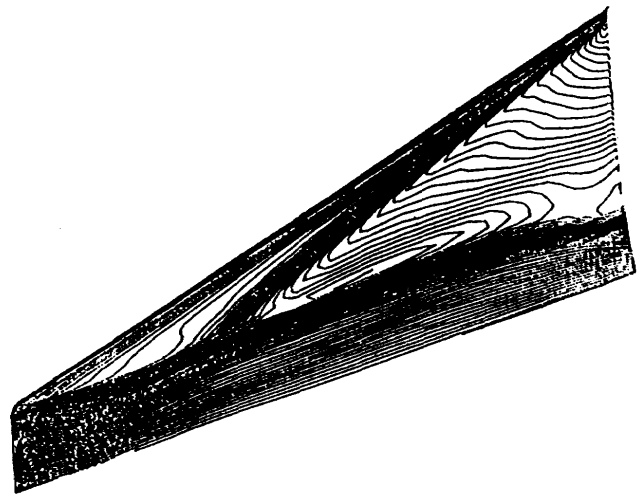


図7. 主翼上面等圧線図（全機形態解析結果）

参考文献

- 1) Sawada, K., and Takanashi, S., "A Numerical Investigation on Wing/Nacelle Interferences of USB Configuration", AIAA paper 87-0455, 1987.
- 2) 高梨進, 沢田恵介, "完全航空機形態に対するナビエ・ストークスシミュレーション", 第8回航空機計算空気力学シンポジウム論文集, NAL SP-14, 1990.
- 3) 岸本琢司, 花光明, "設計における数値解析の活用について(その9) - 極超音速平衡流の解析 -", 第9回航空機計算空気力学シンポジウム論文集, NAL SP-16, 1991.
- 4) Sawada, K., "Aerodynamics of Supersonic Transport - Navier-Stokes Simulation of SST Configuration", 第27回飛行機シンポジウム講演集, 1989.
- 5) Fujimoto, A., Niwa, N., and Sawada, K., "Numerical Investigation of Supersonic Inlet with Realistic Bleed and Bypass Systems", AIAA paper 91-0127, 1991.
- 6) 半田智宏, 嶋英志, "設計における数値解析の活用について(その11) - マルチグリッド法のマルチブロック法への適用の試み -", 第11回航空機計算空気力学シンポジウム論文集, NAL SP-22, 1994.
- 7) 中村孝, 吉田正廣, 福田正大, 中村修一, 村瀬丈夫, 松崎達哉, "NWT 並列FORTRAN に基づく並列評価", 第10回航空機計算空気力学シンポジウム論文集, NAL SP-19, 1992.
- 8) 岸本琢司, "ONERA M5全機形態まわりの流れ解析", 第10回航空機計算空気力学シンポジウム論文集 特別企画/CFDワークショップ, NAL SP-20, 1993.

