

II-18 PC クラスタ型並列計算システムのための大規模非線形解析システムの開発

三上 市藏¹
Ichizou MIKAMI

竹原 和夫²
Kazuo TAKEHARA

濱谷 秀一³
Shuichi HAMATANI

狩野 哲也⁴
Tetsuya KANO

【抄録】最近は構造解析の対象が大規模になり、また複雑な構造物の全体を解析する必要も生じている。それにはPC クラスタ型並列計算システムが適しているが、その性能を引き出すことは容易ではない。本研究では、SCore 5.0.1 を用いたPC クラスタ型並列計算システムを構築する。解析手法としては大規模非線形解析を実現することを目標に、場を有限要素法で離散化し、繰り返し計算には動的緩和法を用いる。これをもとにFortran プログラムを作成したのち、MPI 通信ライブラリを用いて並列化する。大規模な構造物モデルを考え、解析所要時間と通信時間、およびメモリ使用量について検討した。

1. まえがき

最近は構造解析の対象が大規模になり、また複雑な構造物の全体を解析する必要も生じている。大規模問題の解析が可能となれば、モデル全体を非常に細かいメッシュに分割することができるとともに、モデルの簡略化や仮想境界条件の設定が不要となる。また解析時間を短縮化できれば、パラメトリックスタディを数多く行うことが可能となるだけでなく、Computer リソースを有効利用することができる。さらに弾塑性解析や有限変位解析などの非線形解析を大規模問題に対して実行し、これを運用していくためには、スーパーコンピュータに匹敵する程度のメモリ量と計算速度の向上が不可欠である。

PC クラスタ型並列計算システム¹⁾²⁾ (以下、PC クラスタ) は複数の PC をネットワーク結合することで理論上 CPU 数とメモリ量を無限に増やすことができるため、解析時間と解析規模の問題を解決できるが、その性能を引き出すことは容易ではない³⁾。

一方、反復法の1つである動的緩和法(Dynamic Relaxation Method)^{4) 5)}は全体剛性マトリクスを求めることなく、各節点における力のつり合い式を振動問題に置換し、ベクトル計算により各節点の

変位を求める。したがって、解析モデルの自由度数の増加に対してメモリ使用量が線形にしか増加しないため、大規模解析をインコアで行うことが期待できる。さらにソースプログラムの D0 ループ構造が単純であるため、ソースプログラムの大部分を容易に並列化することができる。

著者ら⁶⁾は先に弾性微小変位理論に基づく有限要素法を適用した動的緩和法の定式化を行い、PC クラスタにおける大規模線形解析システムの開発を行った。しかし、このシステムはPC の台数増加に伴ってシステム管理が困難となるだけでなく、線形解析しか実現していない等の問題があった。

本研究では、PC クラスタの一括管理を容易にするとともに高速なデータ通信を実現するシステムソフトウェア SCore 5.0.1⁷⁾を用いて、PC クラスタを構築する。次に弾性有限変位理論に基づき、有限要素法を動的緩和法に適用する。そしてプログラミング言語 Fortran90 を用いたソースプログラムを作成したのち、MPI 通信ライブラリを用いて並列化を施して並列実行可能な解析ソルバを開発する。これを PC クラスタに実装し、実構造物モデルに対して数百万自由度規模の非線形解析を実現する。

1 工博 関西大学教授 工学部 都市環境工学科

2 JIP テクノサイエンス (株)

3 関西大学大学院博士課程前期課程

4 (株) ハルテック

(〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

(〒532-0011 大阪市淀川区西中島 2-12-11)

(〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

(〒551-0021 大阪府大阪市大正区南恩加島 6-20-34)

2. PC クラスタ型並列計算システムの構築

本研究では、PC クラスタを表-1 に示すようなスペックで構築した。クライアント PC は3 年間にわたって導入したので、850MHz と 1GHz の PentiumIII プロセッサを採用した。数百万自由度の

表-1 PC クラスタのスペック

	21 Processors		
	Server	Client	
Number	1	10	10
CPU	Pentium III 1.13GHz	Pentium III 850MHz	Pentium III 1.0GHz
Memory	2GB	1GB	
Network	100 BASE-TX Ethernet		
OS	Red Hat Linux 7.2		
System Software	SCore 5.0.1		
Fortran Compiler	mpif90		
Communicaton Library	MPICH/SCore 1.0		

インコア解析に耐えうる容量として各クライアント PC に 1GB のメモリを搭載した。ハードディスクの容量については、OS、SCore ならびに解析ソルバをインストールできる容量として 20GB とした。一方、一台設けたサーバ PC は、クライアント PC より高速な CPU として 1.13GHz PentiumIII プロセッサを採用し、メモリとしてクライアント PC からのデータを高速に収集するために 2GB を搭載する。ハードディスクとして、大規模計算のデータの蓄積に耐えうる容量として 70GB を搭載した。

PC クラスタに搭載する OS として、Red Hat Linux 7.2 を採用した。Linux はフリーウェアでありながら PC クラスタの構築に必要なアプリケーション群が提供されている。

システムソフトウェアとして SCore 5.0.1 を採用した。SCore 5.0.1 は PC クラスタの一括管理が可能となるため、クライアント PC の台数増加に伴うクライアント PC の管理の困難さを解決できる。

通信ライブラリとして MPI に準拠したライブラリ MPICH/SCore を採用した。これにより高速なデータ通信が可能となる。

3. 大規模非線形解析システムの開発

2.にて構築した PC クラスタを使って大規模非線形解析のためのシステムを開発した。

任意形状の構造物を解析するために場に関する離散化には有限要素法を用いた。ここでは1 節

点あたり 6 変位成分と 6 節点力成分をもつ四辺形板要素を考える。ひずみ－変位関係式には幾何学的非線形性を考慮した高次項を追加した。さらに節点の静的つりあい式に慣性項と減衰項を付加し、運動方程式⁹⁾が導かれる。この式を使って節点力から変位速度を求め、さらに変位速度から変位を得る。以上の反復手順を変位速度が収束するまで続ける。

動的緩和法は構造物全体の剛性方程式を作成せず、図-1 に示す節点変位－ひずみ関係式から節点力－変位速度関係式までを使って、代入計算するだけ

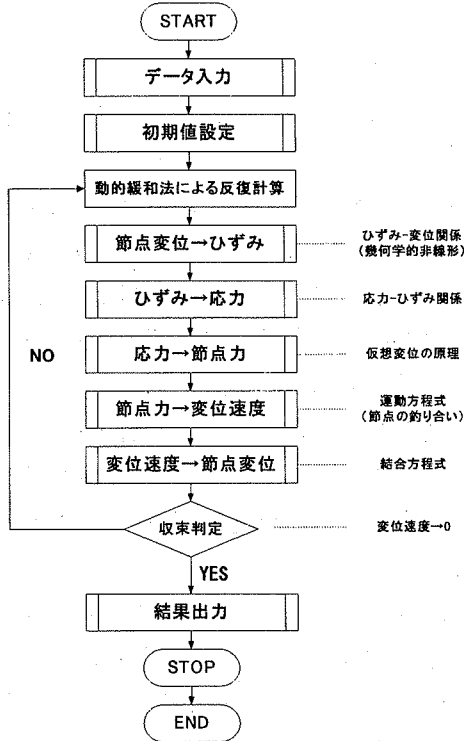


図-1 解析フロー

なので、ベクトル計算のみとなる。したがって、自由度数の増加に対してメモリ使用量が線形的に増加するのみで、大規模非線形解析をインコアで行うことができる。また、適切な時間間隔と減衰係数⁹⁾を用いることで容易に解を収束させることができる。幾何学的非線形は節点変位－ひずみ関係式のみで考慮するだけでよい。

開発には Fortran90 を用いた。動的緩和法はベクトル計算であるため、並列化に向けたプログラム構造となっており、容易に並列化を施すことができる。

並列化のためのツールとして MPI 通信ライブ

ラリを用いる。図-1 に示す節点変位－ひずみ関係式から変位速度－節点変位関係式までの各プロセスに対して、MPICH-SCore の内部サブルーチン MPI_BCAST を用いた並列化処理を施す。

4. 適用例

4.1 大規模解析モデル

大規模非線形解析問題に対する本解析システムの性能を調べる。そのために、図-2 に示す解析

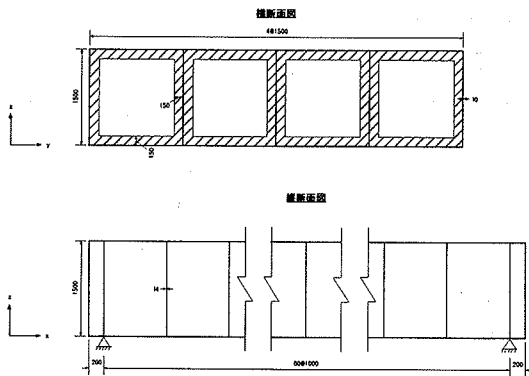


図-2 解析モデル

モデルに対し表-2 のようにメッシュ分割数が異なる 3 種類のモデルを作成した。材料特性はヤング率 $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ，ポアソン比 0.3 である。荷重条件としては，等分布線荷重を上フランジの全補剛材位置に載荷した。

表-2 モデルの要素数と節点数

	Model I	Model II	Model III
要素数	22,129	69,149	544,011
節点数	23,756	71,444	550,176

4.2 クライアント台数増加に伴う解析所要時間

Model I，Model II，Model III のそれぞれについて PC 台数を増やした場合の解析所要時間を調べると，図-3-a および図-3-b のようになる。

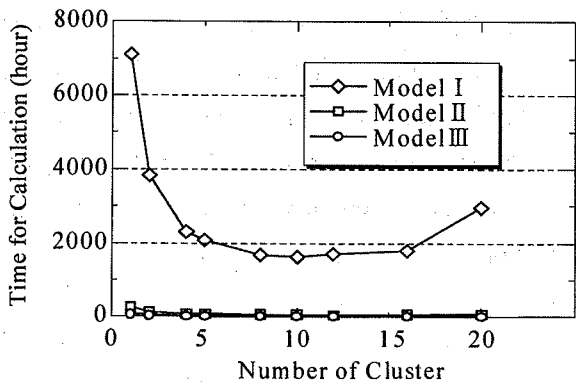


図-3-a 計算時間(1)

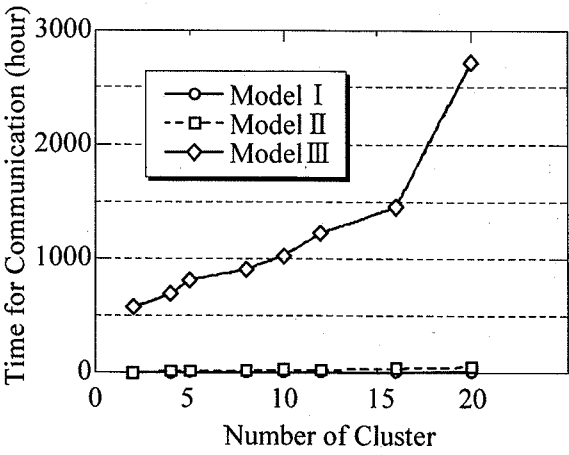


図-3-b 計算時間(2)

この場合は，クライアント PC には CPU1.0GHz の PC10 台を優先的に用いた。PC が 10 台までであれば，PC 台数の増加に伴って解析所要時間は減少することがわかる。いずれのモデルにおいても PC が 10 台以上になると，むしろ PC 台数増加に伴って解析所要時間が増加する。この原因については 4.3 において述べる。

一方，本 PC クラスタは CPU 能力の異なる PC が混在する構成となっている。11 台以上の PC を用いて計算を行う場合には能力の高い PC には待ち時間が生じ，能力の低い PC のみでクラスタを構成したことに同じになる。

4.3 通信時間の比較

PC 台数とデータ通信時間との関係を調べた。解析所要時間のうち通信に要した時間と PC 台数との関係は図-4-a および図-4-b のようになった。

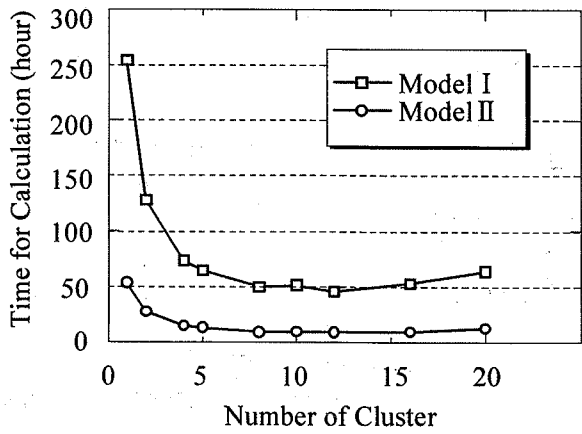


図-4-a 通信時間(1)

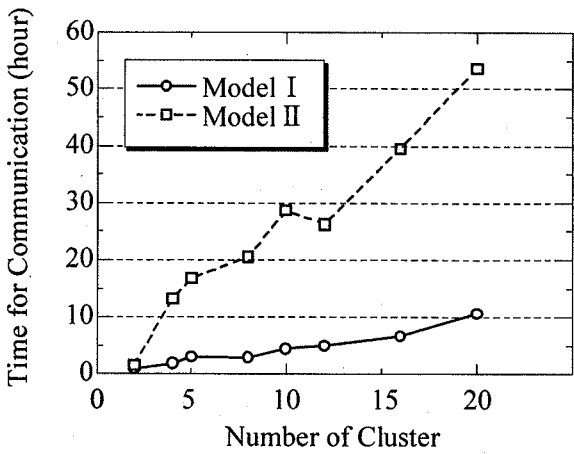


図-4-b 通信時間(2)

この結果から解析所要時間に対する通信時間の割合と PC 台数との関係を示すと図-4-c のようになった。各モデルとも台数が増加するに従って通信時間が増加している。また、台数と通信時間の割合とはほぼ比例していることがわかる。

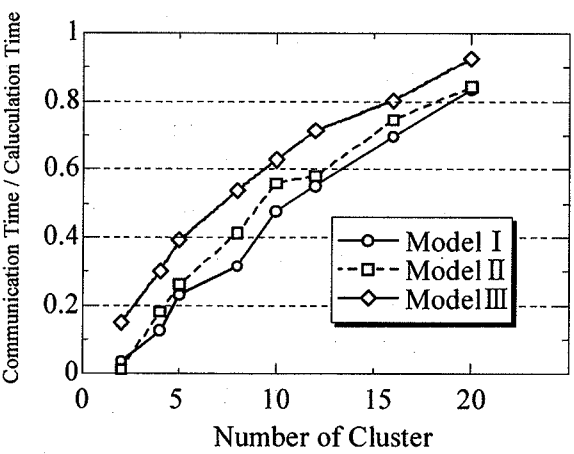


図-4-c 解析所要時間にしめる通信時間の割合

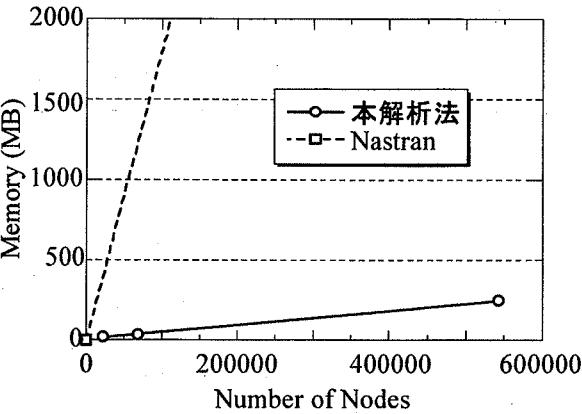


図-5 メモリ使用量

4.4 メモリ使用量

本解析に用いたモデルの節点数とメモリ使用量の関係を調べると図-5 のようになった。比較のために汎用 FEM 解析プログラム NASTRAN[®] のメモリ使用量を示した。本解析法は DRM を使っているため、NASTRAN に比べてメモリ使用量が極端に少なくてよいことがわかった。このことから本解析法は解析対象が巨大になった場合においてもインコア解析が可能になる。

5. あとがき

本研究では PC クラスタを構築し、大規模非線形解析システムを開発した。大規模モデルを例に解析所要時間と通信時間、およびメモリ使用量について検討した。

参考文献

- 1) 超並列計算研究会：PC クラスタ超入門，PC クラスタ型並列計算機の基礎と講習，1999.9.
- 2) 超並列計算研究会：PC クラスタ超入門，PC クラスタ型並列計算機の構築と利用，2000.9.
- 3) 青山幸也：並列プログラミング虎の巻 MPI 版，日本アイ・ビー・エム株式会社，2001.5.
- 4) Day, A.S. : An Introduction to dynamic relaxation, Engineer, Vol.219, pp.218-221
- 5) Otter, J.R.H. : Dynamic relaxation compared with other iterative finite difference methods, nuclear Engineering and Design, Vol.3, No.1, pp.183-185 1966.
- 6) 三上市蔵・竹原和夫・狩野哲也・濱谷秀一：有限要素法を適用した動的緩和法による PC クラスタ型並列計算処理，第 57 回年次学術講演会概要集，土木学会，CS7-008，2002.9.
- 7) 石川裕・佐藤三久・堀敦史・住元真司・原田浩・高橋俊行：Linux で並列計算しよう，2002.7.
- 8) MSC.Nastran 一般 Q&A 集 第 2 版，2001.11.
- 9) Al-Shawi, F.A.N.・Mardirosian, A.H. : An improve dynamic relaxation method for the analysis of plate bending problems, Computer and Structures, Vol.27, No.2, pp.237-240 1987.