- 1 地震応答解析へのPCクラスタ適用効果の分析

The Analysis of Application Effect of PC Cluster to the Earthquake Response Analysis

小林仁哉¹•塩見和利²

Kobayashi Jinya and Shiomi Kazutoshi

抄録: 近年, 数値解析の規模が膨大かつ複雑になるにつれて, 単一 CPU でのコンピュータ処理能力 も限界に近くなりつつある. そのため, 計算時間の短縮を目的とした並列計算手法の導入やその研究 が数多く進められている. 本研究では, 有限要素法の陽解法を用いた GeoFEM 線形弾性動的応答解 析機能(dynamic-linear)に地震動の基盤入力を加えたプログラムを開発し, PC クラスタの処理 時間, 通信時間, メモリー, CPU 利用率等を比較して並列計算の有効性を分析した. また, 適用効果を計 測した開発環境及び実行環境の環境設定, インストール手順を説明した.

キーワード: 並列計算, GeoFEM, 線形弾性動的応答解析, 有限要素法, PC クラスタ *Keywords* : Parallel Computing. GeoFEM. dynamic-linear. Finite Element Method. PC Cluster

1. はじめに

近年,数値解析の規模が膨大かつ複雑になるにつれ て,単一 CPU でのコンピュータ処理能力も限界に近く なりつつある.そのため,計算時間の短縮を目的とし た並列計算手法¹⁾の導入やその研究が数多く進められ ている.並列計算(Parallel Computing)は複数の CPU で1つのタスクを分散処理することができ,CPU の数 に比例して計算時間の短縮が期待できる.また,比較的 安価に構築可能であり,低コストで導入可能である.

本研究では、並列計算の研究として無償で公開され ている GeoFEM⁹線形弾性動的応答解析機能 (dynamic-linear)に地震動の基盤入力を加えたプロ グラムを開発し、地震応答解析時のPCクラスタの処理 時間、通信時間、メモリー、CPU利用率等を比較して並 列計算の有効性を分析する.また、適用効果を計測した 開発環境及び実行環境の環境設定、インストール手順 を説明する.

2. PCクラスタ環境設定

(1)システム構成

図-1にシステム構成図を示す. PE0はMpichのイン



ストール,環境設定,計算を行う「Master ノード」とし, その他の PE1~PE3 は計算のみを行う「Calculation ノ ード」とする.また,並列計算処理では各 PE に実行する プログラムが必要であり,かつ同じディレクトリ構成 であることが必須の設定である.

(2) MPI インストール

MPI は分散メモリ型並列処理を行うためのライブラ リ規格である.GeoFEM をインストールするためには MPIの実行環境が必要となる.以下に今回行ったMPIイ ンストールの手順を簡単に説明する.

- 1) MPIの入手³⁾ (mpich-1.2.7 をダウンロード)
- 2) r コマンドの設定
 - a) ネットワーク (ホスト名) の設定 「/etc/hosts」ファイルを編集する.
 - **b)** 許可 host の設定 「/etc/hosts.equiv」ファイルを編集する.
 - c) 許可 host・user の設定
 - 「[~]/. rhosts」ファイルを編集する.
- 3) MPICH コンパイル
 - a) mpich-1.2.7.tar.gzの展開
 - b) 環境変数の定義 (PGI compiler を使用) 設定内容の詳細を**表-1**に示す.
 - c) configure 実行
 - d) コンパイルとインストール make, make installを実行する.
 - f) マシンファイルの設定 「machines.LINUX」ファイルを編集する. (ホスト名(ノード名)を設定する)
 - g) パスの設定 設定内容の詳細を**表-2**に示す.

1: 非会員 富士通エフ・アイ・ピー(株) 科学技術システム部

(〒135-8686 東京都江東区青海 2-45 タイム 24 ビル, Tel: 03-5531-0224, E-mail: j.kobayashi@fip.fujitsu.com)

2: 正会員 富士通エフ・アイ・ピー(株) 科学技術システム部

表-1 環境変数の定義

	「.bashrc」の環境変数定義
export	FC = pgf77
export	F77 = pgf77
export	F90 = pgf90
export	CC = pgcc
export	CXX = pgCC
export	CFLAGS = "-Msignextend -tp px"
export	FFLAGS = "-fast -tp px"
export	F90FLAGS = "-fast -tp px"
export	CPP = "pgCC -E"
export	OPTFLAGS = "-fast"

※「source . bashrc」により設定の有効化を行う.

表-2 パスの設定 「.bashrc」のパス設定

export	MPIROOT = /usr/local/mpich-1.2.7
export	MPIBIN = \$MPIROOT/bin
export	PATH = \$MPIROOT: \$MPIBIN: \$PATH
export	PATH MPIROOT MPIBIN
_	

※「source .bashrc」によりパスの有効化を行う.

3. GeoFEM

(1) GeoFEM インストール

本研究では大規模解析を行うために GeoFEM を用い ている.GeoFEM のインストール環境を表-3に示す. なお,GeoFEM は MPI ライブラリとリンクされるように 設計されている.

(2)線形弾性動的応答解析

GeoFEM に含まれている線形弾性動的応答解析モジ ュール (dynamic_linear) に地震動の基盤入力を加え たものを解析に使用している.

(3)メッシュ生成

メッシュデータは各領域 (PE) 間で節点の通信が必 要となるため、各 PE 毎に用意する必要がある.各 PE のメッシュデータ作成には GeoFEM の領域分散サブシ ステム (partGeoFEM) を用いている.初期全体メッシュ データを用意し,このファイルを入力として partGeoFEMを実行することにより,各PEのメッシュデ ータを自動生成するとこができる.本研究では,分割方 法に RCB 法 (Recursive Coordinate Bisection) を採 用した.

4. 数值解析

(1) 陽解法による運動方程式の離散化

有限要素法により空間的な離散化を行った運動方程 式を以下に示す.

$$[M]{\ddot{u}+a}^{(n)}+[C]{\dot{u}}^{(n)}+{P}^{(n)}={f}^{(n)}\cdots\cdots\cdots(1)$$

表-3 GeoFEM インストール環境

環境	Makefile の環境変数		
Intel Pentium	MPIDIR = usr/local/mpich-1.2.7		
Cluster	MPICHLIBDIR = \$(MPIDIR)/1ib		
	<pre>MPICHBINDIR = \$(MPIDIR)/bin</pre>		
Redhat Linux 8.0	<pre>MPICHINCDIR = \$(MPIDIR)/include</pre>		
	MPILIBS = -1fmpich - 1mpich		
Fujitsu Fortran	INSTDIR = frt		
Compiler	CC = \$(MPICHBINDIR)/mpicc		
	F90 = \$(MPICHBINDIR)/mpif90		
	F900PTFLAGS = -0		
	OPTFLAGS = -O		
	RAINLIB = rainlib		
	AR = ar		
使用する config.h の種類			
Config.h.linux-ix86			

ここで、[M]は質量マトリクス、[C]は減衰マトリ クス、 $\{p\}^{(n)} & \{f\}^{(n)}$ は時刻tにおける内力ベクトル、 外力ベクトルになる.また、 $\{\dot{u}\}^{(n)} & \{\ddot{u}\}^{(n)}$ は変位ベク トル $\{u\}^{(n)}$ の時間的微分である速度と加速度であり、 $\{a\}^{(n)}$ は時刻tにおける入力加速度である.

時刻 t+ Δ t および t- Δ t での変位 $\{\dot{u}\}^{(n+1)}, \{\dot{u}\}^{(n-1)}$ を 時刻 t での変位 $\{\dot{u}\}^{(n)}$ の Taylor 展開により Δ t²までの 項で近似し、これを速度と加速度の中心差分式とする.

$$\{\dot{u}\}^{(n)} = \frac{1}{2\Delta t} \left\{ \{u\}^{(n+1)} - \{u\}^{(n-1)} \right\} \quad (2)$$

$$\{\ddot{u}\}^{(n)} = \frac{1}{\Delta t^2} \left\{ \{u\}^{(n+1)} - 2\{u\}^{(n)} + \{u\}^{(n-1)} \right\} \quad (3)$$

 Δt^{-1} これらを運動方程式(1)に代入し、 $\{u\}^{(n+1)}$ について 整理すると以下のように表わせる.

$$\{u\}^{(n+1)} = \left[\left[M \right] + \frac{\Delta t}{2} \left[C \right] \right]^{-1}$$

$$\{\Delta t^{2} \left[\{f\}^{(n)} - \{p\}^{(n)} \right] + 2 \left[M \right] \{u\}^{(n)}$$

$$- \left[\left[M \right] - \frac{\Delta t}{2} \left[C \right] \right] \{u\}^{(n-1)} - \Delta t^{2} \left[M \right] \{a\}^{(n)} \}$$

$$\dots \dots \dots \dots (4)$$

$$u_{i}^{(n+1)} = \left\{ \Delta t^{2} \left(f_{i}^{(n)} - p_{i}^{(n)} \right) + 2M_{ii} u_{i}^{(n)} + \left(M_{ii} - \frac{\Delta t}{2} \right) u_{i}^{(n-1)} - M_{ii} a^{(n)} \right\} / \left\{ M_{ii} + \frac{\Delta t}{2} C_{ii} \right\}$$
.....(5)

なお, クーラン条件は $\Delta t < \frac{l_e}{c}$ とする.

(1) 解析条件

図-2に示す解析モデルを用いて,表-4~表-6 の解析条件のもと,線形弾性動的応答解析を行い,並列 計算の検証を行った.モデルの寸法は,小規模モデルは 110m-1010m-110m,要素の一辺の長さを 10m,大規模モ デルは115m-1015m-115m,要素の一辺の長さを5mとし, 入力波として X 方向の全自由度に周期 1.0[秒]の正弦 波を与え,減衰は 5%として解析を行う.解析では,小規 模モデルと大規模モデルのそれぞれにおいて PE 数 1,2,4の処理効率を比較する.**図**-3にPE 数 2,PE 数 4 のモデルの分割方法を示す.(PE1 は分割なしのことで ある)また,境界条件は底面と側面 z 方向を固定とする. なお,結果の可視化には MicroAVS⁴⁾を利用している.

6. 並列計算結果

(1)小規模モデル

図ー4に観測点における変位の時刻歴を示す.また, **図ー5**はモデル領域の変位コンターを表したものであ







る.入力波の影響により変位し,1.0 秒以降,減衰によって減少していることが確認できる.この結果より入力波の加速度を正しく考慮することができたと言える. 次に,**表-7**に各 PE 数における処理効率,**図-6**に各 PE 数における処理時間と通信時間の和の比較を示す. PE 数の増加に伴い通信時間の和は増加するが,処理時間に比べその割合は小さく,最終的な全処理時間は大幅に時間は大幅に減少している.さらに,各 PE で分散処理することにより,1つの PE で使用するメモリー(配列変数用メモリー)を削減できることからも並列計算が有効である.

表-4 解析モデルの規模

	F 1 1 1 1		
モデル	Mesh サイズ[m]	節点数	自由度数
小規模	10-10-10	14,688	44,064
大規模	5-5-5	117, 504	352, 512

表-5 解析モデルの物性値

Vp	Vs	ρ	ν	Е
[m/sec]	[m/sec]	$[kg/m^3]$		$[kN/m^2]$
5,200	3,000	1,840	0.25	4.14E+7

表-6 解析時間の設定

モデル	解析時間 (秒)	時間増分(秒)	STEP 数
小規模	5.0	0.001	5,000
大規模	5.0	0.0005	10,000





図-5 モデル領域の変位コンター図

表-7処理効率(小規模モデル)

PE 数(領域数)	1	2	4
各領域の自由度数	44064	22464	13104
各領域の節点数	14688	7488	4368
各領域の要素数	12221	6171	3366
全 PE の全処理時間 の和[秒]	186.628	218. 51	257.216
全 PE の全通信時間 の和[秒]	0.446	8. 715	17.108
全 PE の演算時間 の和[秒]	186.18	209. 795	240.108
全処理時間[秒]	186.628	109.181	64.334
各 PE で使用した配列 変数用メモリーの 最大[Mbyte]	51.702	26. 319	15.206
CPU 利用率から求めた スピードアップ[倍]	0.998	1.922	3. 732
CPU 利用率[%]	99.761	96.077	93.306



図-6 処理時間と通信時間の和(小規模)

(2) 大規模モデル

小規模モデルと同様,表-8に各 PE 数における処理 効率, 図-7に処理時間と通信時間の和の比較を示 す. PE 数1と PE 数4を比較すると, 全処理時間は約4 分の1になっている.これは、小規模モデル(約3分の 1) に比べ処理時間が短縮されており,大規模モデルに なるほど並列計算の効率が上がっていることがわかる. このことから、並列計算処理が大規模モデルにおける 計算時間の短縮やメモリー削減に有効であることが確 認できた.また,CPU 利用率から求めたスピードアップ については,通信時間の影響があり PE 数倍とまではい かないが, CPU 利用率約 97%と非常に高い性能を得るこ とができた.

実務で利用する場合,一時間程度が計算処理待ちの 限界となるが,並列計算手法を用いることにより計算 処理時間を短縮できるため、10万節点程度のモデルで も実務で利用可能であることを示せた.

素-8 処理効率(大相構モデル)

PE 数(領域数)	1	2	4
各領域の自由度数	352512	177984	96408
各領域の節点数	117504	59328	32136
各領域の要素数	107387	53958	28152
全 PE の全処理時間 の和[秒]	3220.1	3141.2	3265.4
全 PE の全通信時間 の和[秒]	5. 393	27. 785	107.617
全 PE の演算時間 の和[秒]	3214.7	3113.4	3157.8
全処理時間[秒]	3220.1	1570.4	816.2
各 PE で使用した配列 変数用メモリーの 最大[Mbyte]	420. 311	212. 049	114. 185
CPU利用率から求めた スピードアップ[倍]	0.998	1. 983	3.869
CPU 利用率[%]	99.833	99.128	96.725



図-7 処理時間と通信時間の和(大規模)

7. あとがき

本研究では,PC クラスタを用いた並列計算により GeoFEM (dynamic-linear) に地震動の基盤入力を加え た大規模モデルの解析を行い,各 PE 数による計算効率 の比較を行った. 今後は, 本研究で用いた並列計算を複 雑なモデルや実モデルに適応させ,効率化を示すため に、大規模メッシュデータの作成方法や領域分割方法 についてさらなる研究が必要である.

参考文献

- 1) 矢川元基, 塩谷隆二: 超並列有限要素解析, (株) 朝倉 書店, 1998年10月.
- 2) 奥田洋司, 中島研吾: 並列有限要素解析[I]-クラスタ コンピューティング, (株) 培風館出版, 2004年7月.
- 3) mpich-1.2.7.tar.gz, <http://www-unix.mcs.anl.gov/mpi/mpich/>, (入手 2007.1.19).
- 4) (株)ケイ・ジー・ティー, Micro AVS 10.0, <http://www.kgt.co.jp/article/563/>, (入手 2007.4.25).