展 望

スーパーコンピュータによる大規模構造解析

Large Scale Structural Analysis by a Supercomputer

三好 俊郎

Toshiro MIYOSHI

- 1946年3月生まれ
- 有限要素法、破壊力学に関する研究を実施。現在、計算力学に従事
- 正員、東京大学工学部（〒113 東京都文京区本郷7-3-1）

1. はじめに

世界最初のスーパーコンピュータといわれる CDC 6600 (1964, 約 1 MFLOPS^(注1)) が生まれてから 25 年の年月が経過し⁽¹⁾, 最高速度のスーパーコンピュータはついに GFLOPS の演算速度を有する時代を迎えた。

スーパーコンピュータの普及により, 有限要素法 (FEM), 境界要素法 (BEM), 差分法 (FDM) などの計算力学の分野は新しい時代に向けてダイナミックな変貌を遂げつつある。これまで不可能と考えられていた精密・大規模な数値シミュレーションが可能となり, 未踏であった分野の開拓が始まっている。

本展望においては, 有限要素法による構造解析を対象とし, スーパーコンピュータによる大規模解析システムについて述べる。

2. スーパーコンピューティング

スーパーコンピュータを用いて高速・大規模な科学技術計算を行うことをスーパーコンピューティングという。

(注1) MFLOPS=Million Floating-point Operations Per Second の略。1秒間に百万回 (10⁶回) の浮動小数点演算を行う速さを1とする処理速度の単位。GFLOPS=10³ MFLOPS。

という。ここでは, スーパーコンピュータのハードウェアおよびソフトウェアについて概略を述べる。

現在, スーパーコンピュータの多くはベクトルパイプライン方式を採用しており, 図1に示すようにベクトル演算器によるベクトル処理によって高速性を達成している⁽²⁾。これに対し, 従来のはん用コンピュータの演算方式はスカラー処理とよばれている。プログラムの全演算に対するベクトル処理される演算の比率をベクトル化率という。また, ベクトル処理方式とスカラー処理方式による計算時間の比を加速率といい, とともにスーパーコンピュータ用プログラムの性能を評価する指標として用いられる^(注2)。一般に, ベクトル化率が90%を超えてはじめて十分な高速性が達せられるといわれている。

しかし, 従来のはん用コンピュータ用に作成されたプログラムをそのままスーパーコンピュータのコンパイラによる自動ベクトル化に頼って実行したのでは, 90%以上の高いベクトル化率を得るのは困難である。ハードウェアの性能を十分に活かすような計算技法, ソフトウェアの開発が必要とされる。

3. 計算技法

3.1 剛性方程式の解法 スーパーコンピュータを用いて有限要素解析を行う利点は高速性と大規模性の二点にある。筆者らの経験では, 有限

(注2) スーパーコンピュータは, ベクトル演算器によるベクトル処理方式で計算するのが普通であるが, はん用コンピュータのようなスカラー処理方式で計算することもできる。

要素法による構造解析においては計算時間の約70%程度が剛性方程式の解法に費やされており、剛性方程式の解法は有限要素解析のキーポイントである。そこで、本章では高速計算および大規模計算に適した剛性方程式の解法（ソルバー）であるスカイライン法、ICCG法について述べる。

3.2 パラレルスカイライン法 スカイライン法は消去法の一つであり、剛性マトリックスを

改訂コレスキー分解して解く方法である。スカイライン法の計算主要部はスーパーコンピュータが得意とする内積計算であり、高い加速率が得られる。

スカイライン法を改良し、複数のベクトル演算器を並列に動作させ、より高速性を得るために開発されたソルバーがパラレルスカイライン法⁽³⁾である。パラレルスカイライン法は、改訂コレスキー分解において3行3列同時分解（三次元構造解析の場合）を行うものであり、高速計算に適した解法である。

3.3 内積形式のスカイライン法 スーパーコンピュータの

発展の方向は、複数のCPUを有する並列方式のスーパーコンピュータである。そこで、並列コンピュータ向きのソルバーとして内積形式のスカイライン法⁽⁴⁾を紹介する。

従来のスカイライン法は、縁どり法⁽⁵⁾とよばれるアルゴリズムを用いている。縁どり法の場合、並列性は明示的ではない。一方、内積形式のスカイライン法では、最内側DOループはベクトル処理が可能であり、さらに一つ外側のDOループに関して並列化もできる。したがって、ベクトル化と並列化の相乗効果による高速化に適している。また、この場合も前述のパラレルスカイライン法と同様に3行3列同時分解による高速化が有効である⁽⁴⁾。

3.4 ICCG法 ICCG法⁽⁶⁾

は反復法の一つであり、前処理として剛性マトリックスに不完全コレスキー分解を施した後、共役こう配法を適用する解法である。ICCG法は、剛性マトリックスの非零成分のみを用いて計算を行うことができるためメモリ効率が良く、大規模計算に適している。

図1 スカラ処理とベクトル処理⁽²⁾

図2 ソルバーの適用範囲（三次元構造解析の場合）

図2は、東京大学大型計算機センターにおいて主記憶 28.5 MB, 外部記憶 128 MB を使用できるという環境を想定して作成したソルバーの適用範囲である。ICCG 法を用いることにより約 20 000 節点までの大規模解析が可能となる。

3・5 ベンチマークテスト スーパーコンピュータ用に作成した有限要素解析プログラム FEM 3 D/S⁽³⁾ および FEM 3 D/I⁽⁶⁾ を用いて各種スーパーコンピュータおよびはん用コンピュータによるベンチマークテストを行った結果について述べる⁽⁷⁾。FEM 3 D/S および FEM 3 D/I は、各々ソルバーとしてパラレルスカイライン法、ICCG 法を使用している。このベンチマークテストは日本機械学会 RC-74「非線形有限要素法の応用研究分科会」第4小委員会スーパーコンピュータワーキンググループの活動として行われた。

ベンチマーク問題は図3に示す三次元表面き裂材の一様引張り (190 要素, 970 節点) である。FEM 3 D/S による計算時間を表1に、FEM 3 D/I による計算時間を表2に示す。表1および表2は左半分がスーパーコンピュータ, 右半分がはん用コンピュータによる計算時間である。表1の CRAY X-MP/3 は CRAY X-MP/4 (4 CPU 構成の CRAY X-MP) の 3 CPU を用いて計算したことを示している。また、ベクトル化率の括弧

内は推定値である。

ベクトル化率は FEM 3 D/S, FEM 3 D/I ともに 90% 以上であり, 加速率は 3~15 程度である。また, はん用コンピュータと比較すると最高 100 倍程度の計算速度が得られている。

4. システムインテグレーション

スーパーコンピュータおよびこれに接続される端末などを含むコンピュータシステムの有効利用に関する事柄はシステムインテグレーションとよばれている。効率的なスーパーコンピューティングを実現するためにはシステムインテグレーションに関する研究は不可欠である。

3・5 節で示したように, スーパーコンピュータに対し適切な計算技法, ソフトウェアを用いることにより高速, 大規模な有限要素解析が行える。その結果, 膨大な入力データの作成 (プリプロセス) および計算結果の処理 (ポストプロセス) を効率良く行うことが重要な問題として浮上してくる。

図4にスーパーコンピュータによる大規模構造解析システム⁽⁸⁾の例を示す。本システムでは, 有限要素解析にスーパーコンピュータ HITAC S-820/80 を, プリ・ポストプロセスに EWS を用い

$$\begin{aligned} a/t &= 0.25 & 2c/W &= 0.2 \\ a/c &= 0.33 & W=L &= 52.5\text{mm} \end{aligned}$$

(a) 三次元表面き裂材の形状

(b) 要素分割 (190 要素, 970 節点)

図3 ベンチマーク問題 (三次元表面き裂材の引張り)

表 1 パラレルスカイライン法 (FEM 3 D/S) による計算時間

機 種	コンパイラ	計算時間(s)	ベクトル化率	機 種	コンパイラ	計算時間(s)
CRAY X-MP/1	CFT77 Rel.1.3	8.52	(92)	FACOM M-380Q	FORTTRAN77	174.45
CRAY X-MP/3	CFT77 Rel.1.3	3.34	(92)	FACOM M-380Q	VS FORTRAN	203.12
FACOM VP-50	FORTTRAN 77/VP	15.02	96.09	IBM 3081K	FORTTRAN77	311.41
FACOM VP-100	VP COMP V10/L20	10.11	93.50	IBM 3081K	VS FORTRAN	337.58
HITAC S-810/20	FORTTRAN 77/HAP	7.30	96.60	IBM 3090-200	VS FORTRAN	101.68
				HITAC M-682H	O Fort77	61.59
				HITAC M-682H (IAP)	O Fort77	25.06

表 2 ICCG 法 (FEM 3 D/I) による計算時間

機 種	コンパイラ	計算時間(s)	ベクトル化率	機 種	コンパイラ	計算時間(s)
CRAY X-MP/1	CFT77 Rel.1.3	14.09		DEC MICRO VAX-II	FORTTRAN V4.6	8 603.19
FACOM VP-50	FORTTRAN77/VP	24.26	93.22	FACOM M-380Q	FORTTRAN77	224.67
FACOM VP-100	VP COMP. V10/L30	21.40	94.40	FACOM M-380Q	VS FORTRAN	226.30
HITAC S-810/20	FORTTRAN 77/HAP	16.27		IBM 3081K	FORTTRAN77	310.16
HITAC S-820/80	FORTTRAN 77/HAP	6.75		IBM 3081K	VS FORTRAN	309.06
				IBM 3090-200	VS FORTRAN	99.83
				HITAC M-682H	O Fort77	57.98
				HITAC M-682H (IAP)	O Fort77	45.84

図 4 スーパーコンピュータによる大規模構造解析システム

図 5 要素分割図

図 7 応力図

図 6 変形図

ている。EWSはSONY NEWS NWS-830である。EWSとスーパーコンピュータは、LANにより接続されている。

本システムを用いて、軸方向圧縮を受けるクランク材の弾塑性解析を行った。要素数3456、節点数17605の大規模解析である。解析は4ステージ行い、計算時間はスーパーコンピュータHITAC S-810/20で1764sである。ポストプロセッサを用いて解析結果をカラーグラフィックス表示した結果を図5～7に示す。図5は要素分割図、図6は変形図、図7は応力図である。このように解析結果をビジュアルにとらえることにより、評価を効率良く行うことが可能となる。

5. おわりに

スーパーコンピュータによる大規模解析システムを実現するためのキーポイントとして、

(1) スーパーコンピュータのハードウェアの特徴を活かした計算技法とソフトウェア

(2) システムインテグレーションについて述べた。

今後の動向として、Parallel Computingは必要不可欠な計算技法であろう。複数のCPUを有する並列方式のスーパーコンピュータとしてはすでにCRAY, ETAなどがある。国産のスーパーコンピュータは単一CPUの性能は非常にすぐれているが、近い将来複数CPUへの移行が予想される。複数CPUのスーパーコンピュータを効率的に用いるため、有限要素法の分野においては内積形式のスカイライン法などの並列処理アルゴリズムの研究は重要な課題である。

一方、本稿においてはふれなかったが演算速度だけでなく高度なグラフィックス能力を兼ね備えたグラフィックススーパーコンピュータ⁽⁹⁾の登場は興味深い。これを用いて、解析結果のアニメーション化が容易に行えるシステムの開発なども期待される。

文 献

- (1) 村田・ほか2名, スーパーコンピュータ, (1985), 3, 丸善.
- (2) 加藤・大吉, 日本鋼構造協会構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 9 (1985-7), 61.
- (3) 三好・吉田, 機論, 53-486, A (1987), 255.
- (4) 三好・高野, 日本機械学会計算力学講演会講演概要集, No. 890-1 (1989-1), 18.
- (5) 文献(1)の106ページ.
- (6) 三好・ほか2名, 機論, 53-492, A (1987), 1607.
- (7) 三好・ほか2名, 日本機械学会計算力学講演会講演概要集, No. 890-1 (1989-1), 13.
- (8) 三好・ほか3名, 日本鋼構造協会構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 12 (1988-7), 133.
- (9) 鹿野, 情報処理, 29-10, (1988), 1117.

(原稿受付 1989年1月27日)