6M－7

データ駆動計算機CYBERFLOWにおける構造解析の並列処理

川口正樹　三浦宏喜　清水雅久
三洋電機(株)　東京情報通信研究所

1．はじめに

我々は、データ駆動アーキテクチャに基づいた実用的な並列処理計算機の研究を進めている。これまでに64台規模の中規模の並列計算機システムCYBERFLOWを開発し、現在は256台規模の計算機システムを開発中である。今回、構造解析プログラムの並列化の検討を行い、実際にCYBERFLOWに構造解析プログラムを実装した。本論文では、この並列化アルゴリズムの評価を中心に、CYBERFLOW上における構造解析プログラムの性能評価について報告を行う。

2．データ駆動計算機CYBERFLOW

CYBERFLOWは複数の要素プロセッサが2次元トーラス状に相互結合された分散メモリ型並列計算機である。データ駆動モデルに基づき全ての要素プロセッサは同期式クロックで制御される、高並列データ駆動計算機である。各々の要素プロセッサは、我々が独自に開発したCMOSシングルチップのプロセッサLSIと、ローカルメモリのみで構成されている。このプロセッサLSIは、データ待ち合わせ機能、演算実行機能などの実行制御機能と共に、結合網の要素としてのプロセッサ間通信機能や、ベクトル演算制御機構を装備している。

現在、64台のプロセッサと演算結果をリアルタイムで表示可能なグラフィックス機構を装備し、これらを30×50×60cmのコンパクトな筐体に収めた中規模並列システムCYBERFLOW/64が稼働している。

3．領域分割法による構造計算の並列化

構造解析の処理は、1)剛性行列の作成、2)作成した剛性行列の求解処理、3)得られた解を基に応力、歪み等の算出、という手順で行なわれる。剛性行列の作成では、解析対象となる構造物を三角形要素、もしくは四角形要素を用いて有限要素化し、各要素を構成する各接点の変位に関する要素剛性行列から、全体剛性行列Kを組み立てる。この時、解析対象物に対する荷重ベクトルfとして表現される外力のもとで発生する変位ベクトルuは、

$Ku=f$　で表現され、この剛性行列を解くことにより、外力に対応した変位を求めることができる。

一般に剛性行列の求解処理は、構造解析全体の処理時間の大半を占める。特に行列式の次元数nに対し、ほぼnの3乗オーダーの計算量、及びnの2乗オーダーのメモリ量が必要と言われており、大規模な構造物の解析では、計算機への負荷が急速に増加する性質がある。[1]

こうした点を踏まえ、CYBERFLOWへプログラムを実装するに当たっては、領域分割法によるアルゴリズムを用いて並列化を行った。このアルゴリズムは、解析領域全体の剛性行列式をブロック毎に解くという従来からの部分構造法とは異なり、図1に示すように解析領域を複数の領域に分割し、分割した領域毎に剛性方程式を組み立てる点に特徴がある。

領域毎に組み立てた剛性方程式はそれぞれ独立かつ並列に解けるため並列度が高いこと、分割して各領域の小さな剛性行列を解くことによる計算量及び必要メモリ量の減少への期待から、高並列計算機に適したアルゴリズムと考えられている。[2][3]

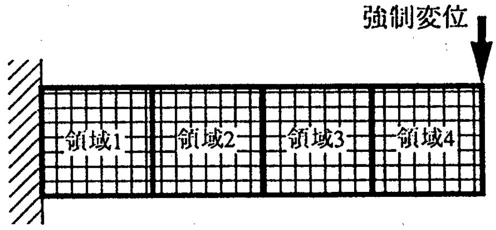


図1．解析領域の分割

4．領域分割法の問題点

領域分割法は、分割した領域の計算を行った後、領域間の境界条件の計算を行って領域間の境界条件の値を更新、この結果を基に各領域の再計算を行いながら解に収束させていく。

従って、以下の場合には高速化の効果が期待できなくなる可能性がある。1)分割する領域の数が少なく、解くべき行列式サイズの減少効果があまり大きくない場合。2)計算する各領域の大きさが小さくなり、境界条件の計算や通信処理のオーバーヘッドが相対的に大きくなるような場合。3)梁のような細長い構造物のように、分割数が一方向にのみ多く行われた結果、更新した境界値の影響が端まで伝播するのに多数の反復計算を要する場合。

こうした領域分割アルゴリズムの特性を明らかにするため、本論文では領域分割法による構造計算プログラムの作成、CYBERFLOWへの実装を行い、領域分割数の変化による計算時間及び解の収束特性の評価を行った。

Numnerical Calculation Performance of the Data Driven Computer "CYBERFLOW"
Masaki Kawaguchi, Hiroki Miura, Masahisa Shimizu
SANYO Electric Co., Ltd.

5．評価に使用したプログラム

今回の評価では、長方形の構造物を図1のように複数の領域に分割し、それぞれの領域の計算をCYBERFLOWの各プロセッサに割り当てることにより計算を行った。その際に領域間の境界部分に相当する節点データについては、図2に示すように節点データを各プロセッサ内でオーバーラップさせる形で持たせた。

具体的な計算ステップは以下の通りである。

1）オーバーラップさせた節点の変位を各領域の境界条件として、領域毎の剛性行列式を各プロセッサ内で並列に解く。2）図2で示した境界から一つ領域内部にある節点（黒丸で示した点）の変位を境界条件として、オーバーラップさせた領域境界の節点（白丸で示した点）の変位に関する剛性行列を解き、各領域の境界条件の更新を行う。3）更新された境界条件を基にして、1)、2)の計算を行い、境界条件の値が収束するまで反復する。

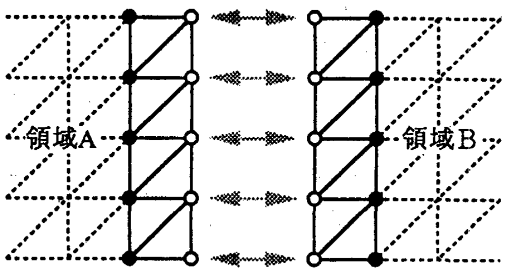


図2．節点データのオーバーラップ

6．評価結果

評価に使用した例題は、図1に示すような長方形構造物の一端を壁に固定し、もう一端に強制変位を加える問題である。節点数17×5、自由度2の2次元構造物を1、2、4、8個に分割し、各領域の計算は別々のプロセッサに割り当てている。結果をグラフ1、2に示す。

グラフ1は分割数の変化に伴う、反復計算一回あたりの時間変化を加速率の形でプロットしたものである。分割領域の計算時間と境界条件の計算時間との比が等しくなり、境界条件の計算のオーバーヘッドが増大する分割数8の場合を除けば、反復一回の計算処理に要する時間は急速に減少することが観察されている。

グラフ2は反復を重ねるに従い、境界値の相対誤差が収束していく様子をプロットしたものである。分割数が4から8へと2倍になった場合でも誤差の収束状況にはあまり変化の見られないことが観察される。また解に収束するまでに数十回の反復計算を要していることから、分割数が数個程度の小規模な問題では、加速率との関係から効果があまり現われないことが伺える。

7．結論

構造解析分野において、並列コンピュータに適しているとされる領域分割アルゴリズムを実際に並列計算機上に実装し、アルゴリズムの性能評価を行った。その結果、領域分割法は比較的小規模な問題よりも、分割数が多くかつ分割した各領域の剛性行列のサイズも大きくなる、大規模な構造解析に適する可能性が示された。

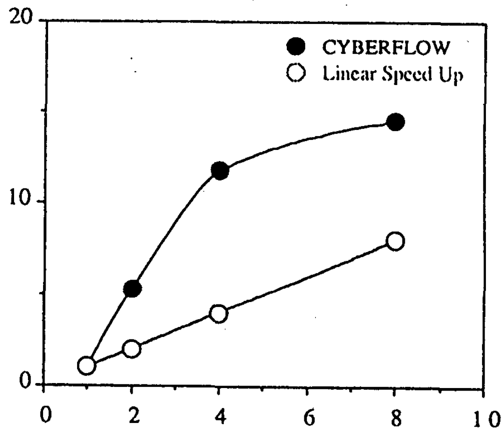
今後はより大規模な問題、特に3次元の構造計算問題を実行させた場合の領域分割法の評価を進めていくことにより、構造計算分野における並列コンピュータの応用の可能性を探っていきたいと考えている。

参考文献

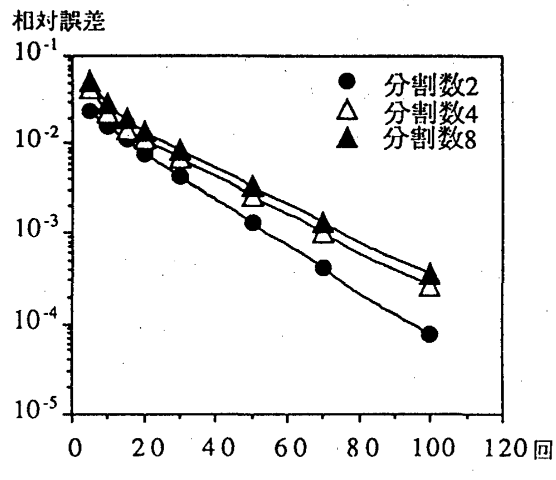
[1]小国力他："行列計算ソフトウエア"丸善1991

[2]R. GLOWINSKI他："Domain Decomosition Methods for Nonlinear Problems in Fluid Dynamics" Coput. Meths. Appl. Mech. Eng. 40(1983)P27-109

[3]吉岡顕他："大規模・超高速計算力学のためのネットワーク・コンピューティング手法の開発"日本機械学会論文集(A編)57巻541号(p22-30)



グラフ1. PE数の変化に伴う反復1回当りの処理性能



グラフ2. 分割数の変化に伴う誤差の収束状況