

構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTRによる並列接触解析

末光 啓二* 袁 熙*

Parallel Contact Analysis of Advance/FrontSTR

Keiji Suemitsu* and Xi Yuan*

Advance/FrontSTR による接触解析において、反復解法の並列処理機能を開発した。本稿では、並列処理化の基本概念、実装方法の概要、および解析事例を紹介する。

Key word: 構造、接触解析、反復法、並列

1. はじめに

Advance/FrontSTR の構造解析機能の 1 つとして接触解析がある。接触解析のアルゴリズムとしては、Penalty 法あるいは Lagrange 未定乗数法が一般的であるが、Advance/FrontSTR ではその母体である FrontISTR の設計方針 [1]を引き継いで、拡張 Lagrange 法を採用している。拡張 Lagrange 法は反復解法に適したアルゴリズムであるが、反復解法の大きな特長である大規模並列解析に対応するためには、接触解析特有の問題点を解決する必要がある。この問題点を解決するための手法を新たに考案し、Advance/FrontSTR への実装を行った。本稿では、その手法の基本概念とそれに基づく実装方法の概要、さらに並列化の有効性を検証するために実施した解析事例について述べる。

2. 接触解析の並列処理化

2.1. 並列処理化に対する問題点

Advance/FrontSTR における反復解法の並列処理は、解析対象メッシュの領域分割をベースとして実現されている。一方、接触解析ではスレーブ節点に対するマスター面要素の接触を接触判定条件としている。この両者が相まって、接触解析の並列処理では図 1 に示す問題が発生する。

Advance/FrontSTR の並列処理時のデータ構

*アドバンスソフト株式会社 第 1 事業部

Computational Science and Engineering Division I,
AdvanceSoft Corporation

造では、マスター面を指定する面グループデータは、自領域内データと領域分割線上の共有要素データのみ保持する。したがって、有限すべりによりスレーブ節点が保持する面グループデータ外に移動した場合は、接触判定が不能となる。

これは、大きな変形が発生した後の初期接触判定でも同様である。

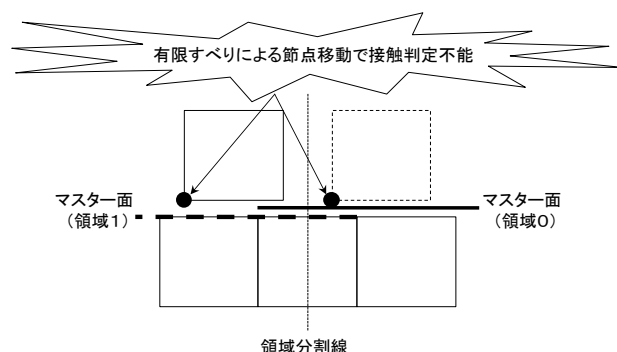


図 1 接触解析の並列処理化に対する問題点

2.2. 並列処理化の基本概念

前節で述べた問題点を解決する方法は、解析に必要な面グループデータをそれぞれが拡張して保持することである。

拡張された面グループデータを保持する方法として 2 つ考えられた。1 つは、領域分割線に関する共有要素を複数層保持する方法である。これには、現状のデータ構造および領域分割ツールが対応しており、プログラムの変更範囲を少なくすることができる。しかし、予め何層の共有要素を保持するかは解析ケースごとに異なるため、ユー

ザーの利便性が損なわれる。また、汎用性を維持するためにも、本開発ではスレーブ節点对应する面グループデータをそれぞれの領域ですべて保持することを基本方針とした。一方、スレーブ節点を指定する節点グループは現状どおりの領域分割を行い、自領域にあるスレーブ節点についてそれぞれの領域が接触計算を行うこととした。

拡張された面グループデータに対して接触計算を行うためには、自領域の責任分界外の変位データが必要となる。このため、接触計算を行う前に、必要な変位データを責任分界となる領域からインポート通信する。接触計算を行い得られた接触剛性や接触反力のうち、自領域の責任分界外のマスター節点に関するデータは責任分界となる領域へエクスポート通信する。

以上が、本開発における並列処理化の基本概念である。これを模式的に表して、図2に示す。

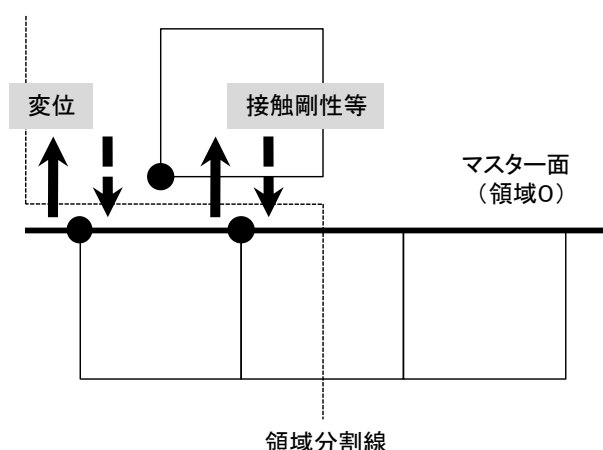


図2 接触解析の並列処理化の基本概念

2.3. 実装方法の概要

前節の基本概念に基づく主要な実装項目は以下の2点である。

- ①データ構造および通信テーブルの拡張
- ②行列・ベクトル積計算ルーティンの変更

従来のメッシュデータ構造では、マスター面を指定する面グループはそれぞれの領域に属するデータのみを保持していた。これを拡張し、すべてのデータを保持するように新たな構造体メンバーを定義した。また、変位のインポート通信および接触剛性等のエクスポート通信を制御する

通信テーブルをデータ構造に追加した。これらのデータ生成はメッシュ領域分割ツールで行い、分散領域メッシュデータファイルを介して、構造解析ソフトウェアに渡される。

接触解析における剛性行列では、連続体として定義される非ゼロ要素以外にスレーブ節点とマスター面要素の接触による非ゼロ要素が行列の任意の場所に発生する。したがって、接触剛性を足しこんだ剛性行列を生成して反復解法の収束計算を行おうとすると、非線形の収束計算過程で接触状態が変化するとに非ゼロ要素で構成される剛性行列を再生成する必要がある。

Advance/FrontSTRでは、これを避けるために、ベクトル積を行う段階で接触剛性による行列・ベクトル積を別途行い、積を元の値に足しこむ実装をとっている。本開発における並列処理でもこれを踏襲した。ただし、スレーブ節点とマスター面要素が異なる領域に属する場合、分類が必要となる。この行列・ベクトル積を模式的に表して、図3に示す。

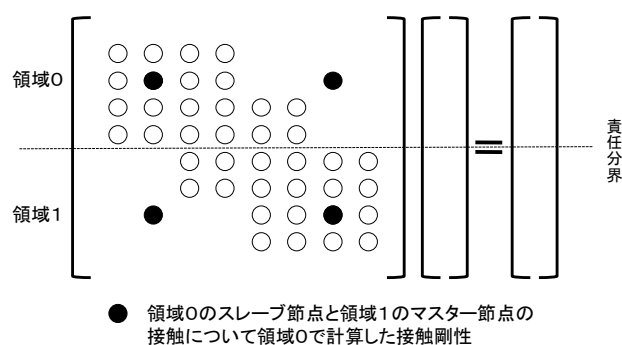


図3 並列接触解析における行列・ベクトル積

並列処理の場合、自領域のスレーブ節点と他領域のマスター節点の行列・ベクトル積は以下の4通りがある。

- ・自領域の変位を用い、自領域の行に足す
- ・他領域の変位を用い、自領域の行に足す
- ・自領域の変位を用い、他領域の行に足す
- ・他領域の変位を用い、他領域の行に足す

これに対応するために、行列・ベクトル積ルーティンの冒頭で、他領域にあるマスター面節点の変位をインポートし、計算された積のうち他領域

の行に足しこむものはエクスポートするように実装した。これにより、接触解析の並列処理時は、逐次処理に比べて反復計算ごとにプロセス間通信が2回増加する。なお、スレーブ節点を指定する節点グループは領域分割されているため、領域分割に対応した負荷分散となる。

上記の主要な実装項目の他に、並列処理に対応するための実装として、以下の項目があった。

- ③接触探索における変位のインポート通信
- ④計算された接触反力のエクスポート通信
- ⑤接触面の一部を変位拘束した場合の、変位拘束条件のインポート通信
- ⑥反復解法前処理ルーティンにおける接触剛性のエクスポート通信
- ⑦各領域が同期した収束判定

反復解法前処理ルーティンのうち ILU については、スレーブ節点の通信が必要となるため除外し、対角ブロックスケーリングのみに対応した。

3. 並列接触解析の検証計算

開発した並列接触解析の有効性を検証するための計算を実施した。

解析対象は、チュートリアルに含まれている2重円筒の押し込み問題である。解析に用いたメッシュを図4に示す。メッシュ規模は、六面体要素で要素数184,832、節点数201,586である。

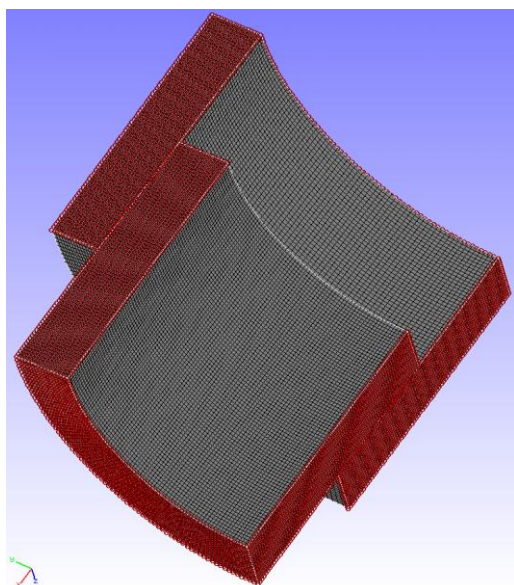


図4 解析対象のメッシュ

解析対象は円筒であるため、円周を4分割したモデルとし、分割面に対称条件を、外側の円筒の端面に全拘束条件を、内側の円筒の反対端面に強制変位条件を設定した。接触面は外側円筒の内面と内側円筒の外面である。

本解析モデルについて、並列コア数が1、2、4、8、12（1ノード）、24（2ノード）の6通りについて計算を実施した。各並列数におけるメッシュ領域形状を図5に示す。

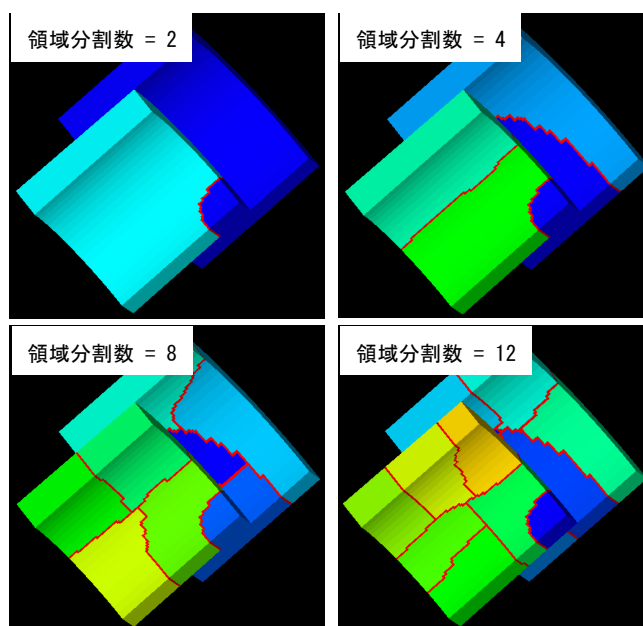


図5 各並列数におけるメッシュ領域形状

計算には、自社のPCクラスター計算機を使用した。使用した計算機の仕様を表1に示す。

表1 使用計算機の仕様

CPU	Intel Xeon X5660 2.80GHz
ノード構成	2CPU（2×6コア）
メモリ	96GB／ノード
OS	CentOS release 5.7
コンパイラ	Intel
MPI	Intel

解析結果の一例として、並列数=24の場合のミーゼス応力分布を図6に示す。当然ながら、解析結果は並列数に依らず同一である。

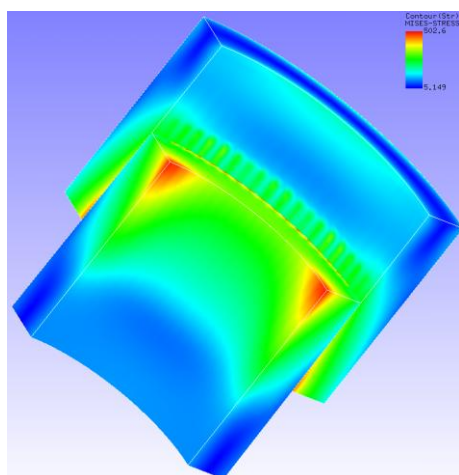


図5 ミーゼス応力分布

並列数による実行性能の比較を表2に示す。本計算は接触解析であるため、線形ソルバーCG法の反復ループの上位にNewton Raphson法の反復ループがあり、さらに拡張Lagrange法の反復ループが形成される。また、荷重条件のサブステップ数は3である。Newton Raphson法の反復回数は合計で41、拡張Lagrange法の反復回数は合計で24とすべての並列数において同一であった。表2における総経過時間は計算開始～終了までの経過時間を、CG法総経過時間はCG法開始～終了までの経過時間の41回分を合計した値である。

表2 並列数による実行性能の比較

コア数	総経過時間 (分)	CG法		
		総経過時間	平均反復回数	平均 work ratio
1	245.8	221.6	4069	96.0%
2	110.9	96.3	4064	95.0%
4	86.1	78.6	4065	96.2%
8	62.3	57.9	4064	96.1%
12	59.2	56.1	4062	95.8%
24	44.5	42.6	4060	91.9%

表2のCG法平均反復回数（1回あたり）をみると、並列数による差は数回以内であり、正確で安定した並列処理が行われていることを裏付ける。

CG法の収束状況の一例を、最大反復回数および最少反復回数の場合について図6に示す。いずれも安定した収束状況が得られている。

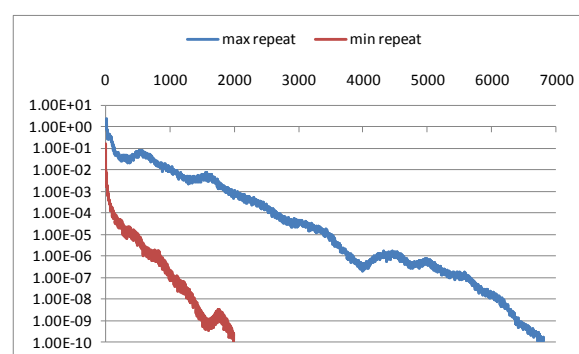


図6 CG法の収束状況の一例

並列処理性能について、総経過時間とCG法総経過時間を逐次処理（並列数=1）に対する比率として図7に示す。

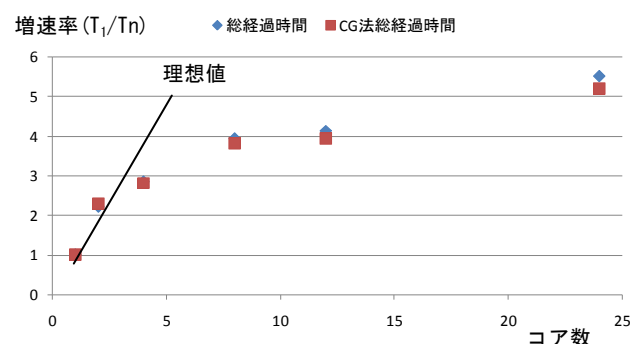


図7 並列接触解析の実行性能

図7をみると、並列数が4までは良好な実行性能が得られているが、その後頭打ちの傾向にある。これは、本解析対象のメッシュ規模がそれほど大きくないことによるものであり、1コアあたりの節点数が少なくなると、線形静解析でも同様の傾向となる。

4. まとめ

本開発により、従来困難とされてきた反復解法による接触解析の並列処理化を可能とした。今後、大規模接触モデルの大規模並列解析の事例を積み上げるとともに、収束性や計算効率の向上に継続的に取り組む所存である。

参考文献

- [1] 佐々木 隆行、奥田 洋司 “拡張ラグランジアン法による並列有限要素法接触解析”，計算力学講演会講演論文集 2004(17), p821-822, 日本機械学会