原子力施設全体規模の構造解析に向けた要素毎有限要素接触解析手法: 性能改善のための並列化手法開発

An element-by-element Finite Element Contact Analysis Method toward Structural Analyses of an Entire Nuclear Facility: Development of Parallelization Technique for Performance Improvement

*鈴木 喜雄[1]

[1]原子力機構

原子力施設全体規模の構造解析に向けて実施した、要素毎有限要素接触解析手法の研究開発の成果について報告する。これまでに提案した、Lagrange 未定乗数法と Multiple Front 法を用いて並列かつ省メモリに解析可能な要素毎有限要素接触解析手法について、性能改善のための並列化手法の開発を実施した。

キーワード：有限要素法、接触解析、不整合メッシュ、Lagrange 未定乗数法、Multiple Front 法

1. 緒言

原子力施設全体規模の構造解析に向けて、大規模複雑構造物を構成している複数部品をそれぞれ個別にメッシュ生成した場合に、整合メッシュのみならず不整合メッシュを用いた場合でも解析可能な、要素毎有限要素接触解析手法の研究開発を進めている。特に、剛体変位の取り扱い、接触拘束の厳密さ、求解の安定性向上、大規模問題への対応（省メモリかつ並列）を満たすために、有限変形理論に基づく有限要素法をベースとし、接触解析には Lagrange 未定乗数法を用いるとともに、行列解法には直接法の一種である Multiple Front 法[1]を用いている。ここで、Lagrange 未定乗数法を用いることにより、全体剛性行列に対して新たな行列成分が追加された形の係数行列を用いる必要が生じるため、Multiple Front 法を用いるには新たな工夫が必要となるが、これまでに、新たに追加される行列成分を要素剛性行列生成と同時に組み入れるとともに、これらの成分を含む行と列をインタフェース行列[1]として扱う方法を提案し、解決した。

ところで、Multiple Front 法は、全体剛性行列を作成することなく（部品に対応付けできる）部分剛性行列を並列処理できる一方で、(部品間の接触面に対応付けできる）インタフェース行列を解く処理が並列化されておらず、ボトルネックとなる場合があることが知られているが、これまで十分な解決策が提案されていない。そこで、本研究ではこの解決を図った。

2. 提案手法

開発中のコードは、Computational Methods for Plasticity[2]に付属の有限要素法コード HYPLAS を 3D に拡張し、Lagrange 未定乗数法のアルゴリズムを追加したものである。Multiple Front 法には、hsl_mp42-2.0.0[3]を用い、これを改良して組み込んでいる。まず、本コードにおいて、実際にインタフェース行列を解く処理がボトルネックとなるかどうかを評価し、ボトルネックとなる場合があることを確認した。そこで、この処理の並列化により性能改善を試みており、これまで二通りの方法を試している。

まず、インタフェース行列を解く処理の中でも特にどの部分が問題となっているかを調査し、BLAS（Basic Linear Algebra Subprograms）の daxpy を含むループが処理時間を要していることを確認した。そこで、一つ目の提案手法として、本ループを並列化する方法を試みた。次に、インタフェース行列を解く処理方法そのものを変更することを考えた。従来の処理方法は、ある一部品の行列に対し他の部品の行列を一つずつ追加しては処理するプロセスを繰り返す逐次的な方法であり並列化されていない。そこで、二つ目の提案手法として、部品二つずつ行列をそれぞれ追加して処理し、さらにその部品の塊二つずつの行列をそれぞれ追加して処理するプロセスを繰り返す階層的な方法を試みた。例えば、部品数が N の場合、逐次的な方法では、追加と処理を N-1 回繰り返すことになるが、提案手法では、並列に処理できる回数を 1 回と数えると $\log_2 N$ 回程度の追加と処理で済むために性能改善が期待できると考えた。

3. 結果

第一段階として、直方体の下面を固定し上面に荷重するという簡単なモデルを用いて、性能評価を実施している。ここで、直方体を複数の部品に分割し、各部品を各コアに分担させるように並列化している。現状は、2、4、8、16、32 分割の五通りを対象としている。評価の結果、一つ目の提案手法では、あまり効果が得られておらず、二つ目の提案手法では、効果が得られている場合とそうでない場合がある。講演では、これらの結果について、より詳細に報告を行う予定である。

参考文献

[1] “The use of multiple front in Gaussian elimination”, I. S. Duff and J.A. Scott, RAL-94-040 (1994).
[2] “Computational Methods for Plasticity; Theory and Applications”, E.A. de Souza Neto, D. Peric, and D. R. J. Owen (2008).
[3] HSL, a collection of Fortran codes for large-scale scientific computation, See http://www.hsl.rl.ac.jk/

*Yoshio Suzuki[1]

[1]JAEA