

平成 26 年度 TSUBAME 産業利用トライアルユース 成果報告書

利用課題名 数値振動台開発を目的とした大規模 FEM 解析の FS  
英文: Feasibility Study for Developing Numerical Simulators of Shaking Table利用課題責任者 熊谷 仁志  
Hitoshi Kumagai清水建設株式会社 技術研究所  
Institute of Technology, Shimizu Corporation  
<http://www.shimz.co.jp>

弊社技術研究所では、大型振動台の運用に際し、振動実験の予備解析やパラメトリックスタディを含めた実験後の解析的検討等を実施できる数値振動台の開発を目指している。そのハードウェア/ソフトウェア環境を検討するため、TSUBAME を用いて、商用 FEM ソフトウェア Marc による大規模構造解析の実現性を調査する FS を行った。具体的には、接触による境界非線形、及び大変形による幾何学的非線形性を含む大規模非線形解析を実施し、その実現性を確認した。また、DDM (Domain Decomposition Method) をはじめとする Marc 並列化機能のスケラビリティを調査し、大規模 FEM 解析における有効性を検討した。

We are trying to develop numerical simulators of shaking table. The numerical simulators of shaking table should be applied in exploratory analyses of shaking experiments, parametric studies and other analytical studies, which require high computational efficiency and large-scale analyses. Through the TSUBAME trial use, we conducted a feasibility study to examine Marc, the finite element analysis solution of MSC Software, for the applicability to the numerical simulators. Specifically, we carried out large scale nonlinear analysis of large deformation contact problem, and researched the scalability of parallel algorithms of Marc, such as Domain Decomposition Method and multithreading.

*Keywords:* Marc, Domain Decomposition Method, Nonlinear Analysis, Finite Element Method

#### 背景と目的

我が国は地震国であり、2011 年の東日本大震災をはじめとする過去の地震被害を踏まえ、建築・土木構造物、並びに設備・内外装等の耐震性向上が要求されている。大型振動台における振動実験は耐震性実証に最も有効なツールであるが、実験用試験体の規模に制約があり、相当の費用や時間を要するため、数値シミュレーションを併用して研究開発を行うことが重要となる。そこで弊社技術研究所では、保有している大型振動台における振動実験の予備解析に加え、実験結果を応用した実大規模構造物のシミュレーション・パラメトリックスタディも実施できる「数値振動台」の開発を目指している。

解析は大規模なものとなるため、数値振動台の開発に必要となるハードウェア・ソフトウェア環境の検討が急務である。本利用課題では、エムエスシーソフトウェア株式会社の FEM 解析ソフト Marc を使用し、数値振動台のための大規模並列 FEM 解析の実現性・有効性

に関する FS を実施する。前年度も同様の FS を行っており、基本的な動的問題に対し、Marc 並列機能の有効性を確認した。本利用課題では、より複雑かつ大規模なケースの検討として、1 億自由度以上の大規模非線形解析における Marc の計算性能を把握することが目的である。

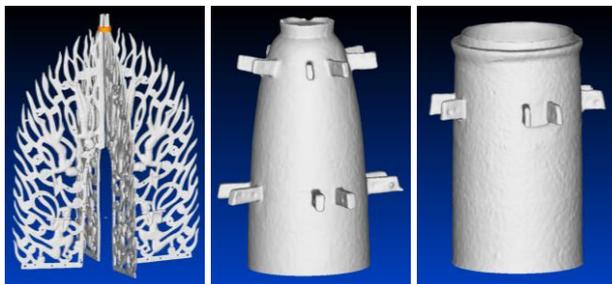
#### 概要

数値振動台では、材料非線形に限らず、接触や大変形等の様々な非線形問題を扱うことが想定される。線形解析では、一般に、反復法が計算速度・メモリ負荷共に他の手法(直接法・DDM)より優れている。しかしながら、接触等で強い非線形性を有する問題においては、反復法の収束性は基本的に悪化し、解が得られなくなる場合も起こり得る。そのため、多様な大規模非線形解析に対する適用性が比較的期待できる DDM を対象として、その実現性・計算性能を検証することとした。

検討した Marc の並列化機能は、DDM (Domain



図 1 解析モデル(全体)



(a) 部材 A (b) 部材 B (c) 部材 C

図 2 解析モデル(各部材)

Decomposition Method) 及びマルチスレッディングの 2 種類である。DDM は解析対象を複数のドメインに分割し、ドメイン内を直接法で計算した上で、ドメイン間の境界を反復法により収束させるものである(Marc の機能としては、ドメイン内・ドメイン間両方を直接法または反復法で解くこともソルバーによっては可能である。)。マルチスレッディングは、剛性マトリクス作成や応力更新、マトリクスソルバーの一部をマルチスレッド化することで、DDM と組み合わせることにより、各ドメインに対しマルチスレッディングを適用することも可能である。尚、Marc は上記に加え、マトリクスソルバーの一部等を GPGPU で解く機能も有しているが、GPU メモリ不足のため今回は使用していない。

## 結果および考察

### 1. 大変形接触問題の大規模非線形解析

解析モデルを図 1～図 3 に、解析諸元を表 1 に各々示す。同図より、解析対象は 3 つの独立した部材で構

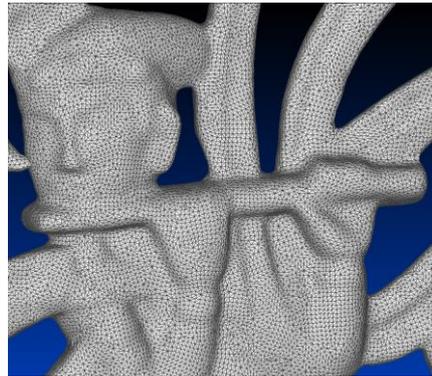
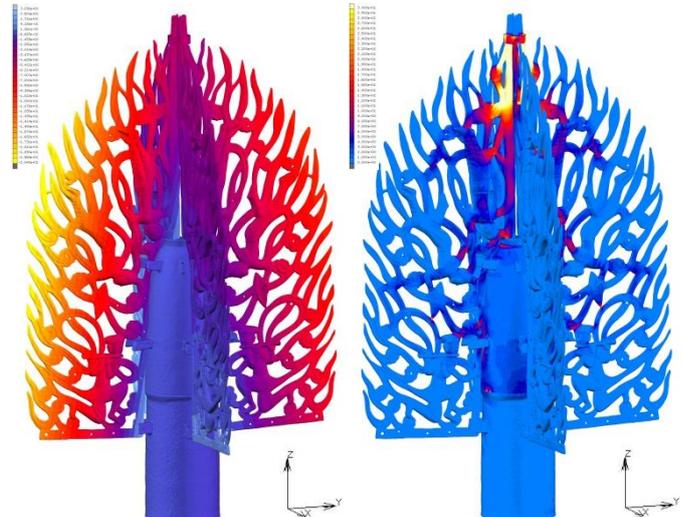


図 3 メッシュ分割(拡大)

表 1 解析諸元

節点数: 41,796,577
要素数: 28,413,950
要素タイプ: 四面体 2 次要素
構成則: 線形弾性
摩擦: Coulomb 摩擦
増分解法: 完全 Newton-Raphson
ソルバー: マルチフロンタルスパース



(a) X 方向変位 (b) Mises 応力

図 4 解析結果

成され、下から C・B・A の順に部材を積み上げている。部材 A については、4 枚の板状物体が図 2(a) 中橙で示した頂部のリングで剛結されている。境界条件として部材 C の底面を固定し、各部材の自重による平衡状態を求めた後、部材 A の板状物体表面 (X 軸に直交する 2 枚) に風荷重を想定した X 方向圧力を与える静的解析である。各部材が相互に接触定義され、また剛体変形を生じる大変形問題であるため、境界非線形と幾何学的非線形を有する大規模 FEM 解析となる。

並列計算は DDM とマルチスレッディングを併用し、DDM64ドメインにドメイン当たり 8 スレッドを用いて、合計 512 並列とした。尚、本利用課題の解析では、後述するメモリ負荷分散の問題から、Thin ノードよりメモリの大きい Medium・Fat ノードを利用している。

解析結果を図 4 に示す。同図において、Z 軸回りの剛体回転及び各部材の接触が発生しており、大変形・接触解析が有効であることが分かる。同図(b)より、剛結部である部材 A リング周辺や部材 A 板状物体で弱断

表 2 検討結果

## (a) 線形解析

DDM ドメイン数	スレッド/ ドメイン	合計 並列数	メモリ 合計(GB)	経過時間(hour)	ソルバー 時間比(%)	領域間反復回数	領域間 節点数
32	1	32	1786	5.3	94.9	154	91613
	2	64	1786	3.5	93.4		
	4	128	1786	3.3	93.6		
	8	256	1787	3.0	94.0		
64	1	64	1847	3.5	92.9	138	153080
	2	128	1847	2.7	91.6		
	4	256	1847	2.4	95.1		
	8	512	1848	2.3	95.4		
128	1	128	2071	3.3	93.1	111	251665
	2	256	2072	2.4	93.9		
	4	512	2072	2.5	96.4		
256	1	256	2774	3.5	95.4	72	400347
	2	512	2774	3.2	95.0		

## (b) 非線形解析

DDM ドメイン数	スレッド/ ドメイン	合計 並列数	メモリ 合計(GB)	経過時間(hour)		ソルバー 時間比(%)	領域間反復回数			領域間 節点数
				合計	平均		最大	最小	平均	
64	8	512	2207	114.0	2.1	93.8	235	85	123	153080

面となる箇所その他、各部材相互の接触部で応力の増大が確認できる。

## 2. 大規模線形解析を含むスケーラビリティ検討

次に、問題を単純化した大規模線形解析におけるスケーラビリティを調査し、さらに非線形解析と比較することで非線形性が並列計算性能に与える影響を推察する。大規模線形解析の対象として、図 1～図 3 に示したモデルの各部材(部材 A リング上面、部材 B・C 底面)を固定し、接触を無視した自重解析を考える。

検討ケース及び検討結果を表 2(a)に示す。ここで、ソルバー時間比は経過時間に対しマトリクスソルバーが占める割合、領域間反復回数は DDM 領域間処理の反復法における反復回数、領域間節点数は DDM 領域分割境界上の節点数である。パラメータは DDM 領域分割とドメイン当たりのスレッド数の 2 種類を定め、各 DDM 領域分割に対しドメイン当たりのスレッド数を変化させてその影響を調査した。尚、並列化を行わないケース等、32ドメインより少ない DDM 領域分割については、メモリ不足のため実施不可能であった。

検討結果より、線形解析の経過時間比較を図 5 に示す。同図をドメイン数で比較すると、ドメイン当たりのスレッド数が 2 以下の場合、計算速度は 128ドメインで最大となり、256ドメインで逆に効率が低下する。これは、

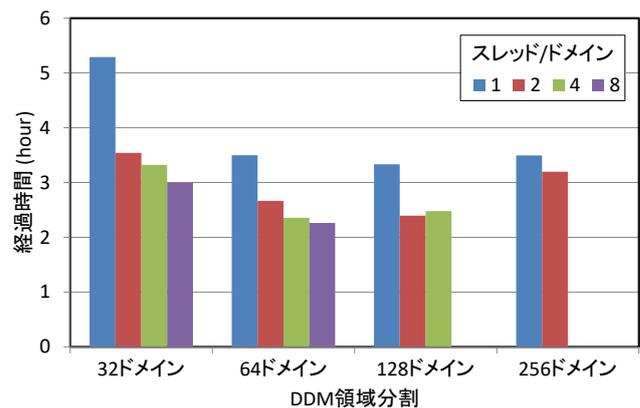


図 5 線形解析 経過時間比較

前年度の検討でも見られた傾向であり、領域内(直接法)と領域間(反復法)処理における計算コストのトレードオフによって、DDM の計算効率が最大となるドメイン数が定まると考えられる。また、合計並列数が 128 のケースで比較すると、64ドメイン各 2スレッドが最も高速であり、DDM とマルチスレッディングの併用により、計算効率を最適化するドメイン数が変化し得る。これも同様に、マルチスレッディングにより領域内処理の計算コストが低下し、トレードオフの均衡が変化することを示唆している。

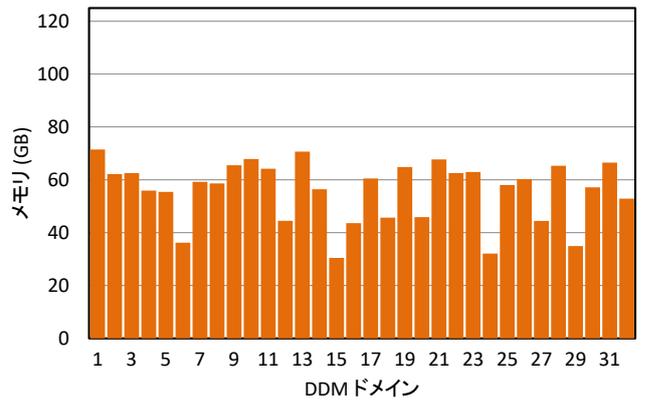
前項で述べた非線形解析の計算性能を表 2(b)に示し、厳密な比較ではないが、線形解析との比較により非線形解析の計算効率を検討する。ここで、平均経過時間は経過時間をマトリクスソルバー求解回数で除したもの

である。同表より、非線形解析の平均経過時間と 64 ドメイン各 8 スレッドにおける線形解析の経過時間は同程度であり、Newton-Raphson 法や解離・摩擦等による収斂計算を除けば、非線形解析による計算効率の低下は小さいと推測される。この理由としては、まず、非線形解析で解離判定等の接触処理に要する時間は経過時間の 5(%) 以下であり、線形・非線形問わずマトリクスソルバーが経過時間の大部分を占めることが挙げられる。次に、非線形解析において、領域間反復回数の最大値はやはり線形解析以上となるものの、平均を見ると同程度であり、非線形性によって DDM 領域間処理の計算コストがあまり増大しないといえる。したがって、非線形性による DDM の計算効率低下はほとんど見られず、本課題の非線形解析に対し、DDM は線形解析と同等に有効であると見込まれる。

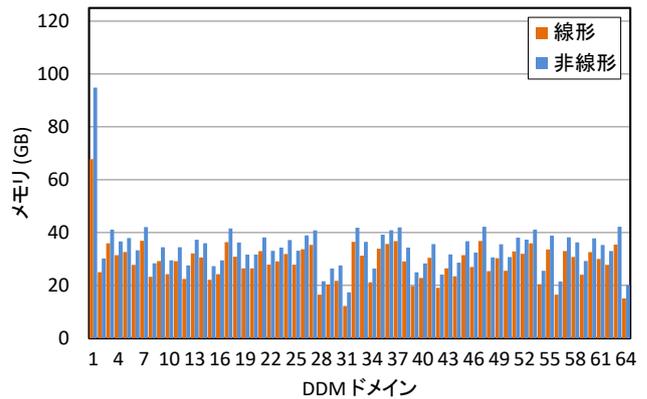
各ドメインのメモリ使用量を図 6 に示す。尚、同図中の線形解析はドメイン当たり 1 スレッドのケースである。同図より、DDM 領域分割の増大に伴い、ドメイン 2 以降のメモリが低減するのに対し、ドメイン 1 (MPI ランク 0) のみ逆にメモリが突出して増大することが分かる。これは、ドメイン数に応じて領域間節点数、つまり反復法のマトリクスサイズが増大し、それをドメイン 1 のプロセスが負担するためと考えられる。したがって、特に大規模解析において、領域分割を増やし領域間処理の計算コストが増大すると、メモリ負荷分散が不十分となる。また、ユーザー CPU 時間の負荷分散も悪化するものと推測される。同様の理由により、表 2 中のメモリ合計使用量も、ドメイン数と共に増大することが確認できる。

まとめ、今後の課題

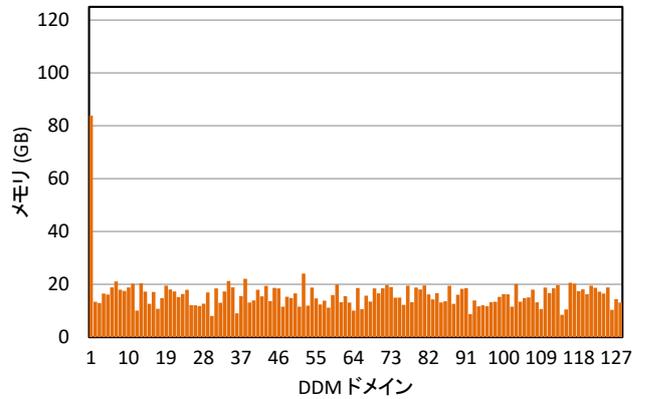
Marc を用いて 1 億自由度以上の大規模非線形 FEM 解析が実行可能であることを確認し、線形解析によって DDM の大規模並列計算性能を調査した。しかし、非線形解析の実現性・計算性能は個々の問題に大きく依存すると予想されるため、今後も種々の問題に対する検証が求められる。また、本報では省略したが、同一ドメイン数で領域分割方法が異なる場合に計算速度の有意な変化が見られた。特に大規模解析においては、領域間処理を最適化する DDM 領域分割制御の検討が必要と考えられる。



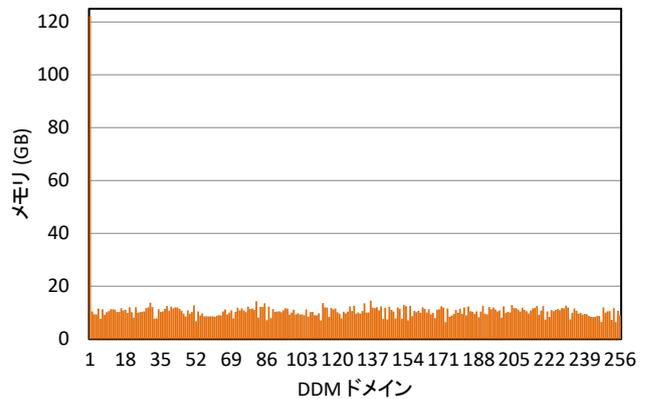
(a) 32 ドメイン



(b) 64 ドメイン



(c) 128 ドメイン



(d) 256 ドメイン

図 6 線形解析 メモリ負荷分散