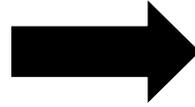

領域分割法を導入した 理想化陽解法FEMを用いた 大規模非線形構造解析手法の開発

Development of a Large-Scale Nonlinear Structural Analysis Method Using
Idealized Explicit FEM with Domain Decomposition Method

研究背景・目的

船体構造の大型化と問題点

コロナ以前は**大型客船**の需要も増加、新型コロナウイルスの影響で、遠距離貨物輸送用の**大型コンテナ船**の需要増加



- 安全面への需要増加
- 必然的に事故の増加

↓事故例

モーリシャス沖での300m級ばら積み貨物船「わかしお」が、座礁、燃料タンクに亀裂による環境汚染



引用：日本郵船株式会社



引用：長周新聞

大規模構造解析の必要性

- 設計段階での安全な設計が重要
- 大型構造物に対する**大規模な解析**が必要
- 大幅なメモリ消費が必要なためスーパーコンピュータなどのCPUを1万台近く積んだPCでの計算が主流
- 莫大な時間と費用が必要
- 市販のPCで大規模解析を行うことが目標

領域分割法に注目



引用：富士通株式会社



引用：富士通クライアントコンピューティング株式会社

- **理想化陽解法FEM**による大規模構造解析が提案されている
→本研究:GPUを**並列に使用**して市販のPCで高速な計算可能な手法の開発
- 構造物全体の变形や残留応力の予測には、さらなる大規模な解析が必要

理想化陽解法FEMに領域分割法を導入した手法を開発

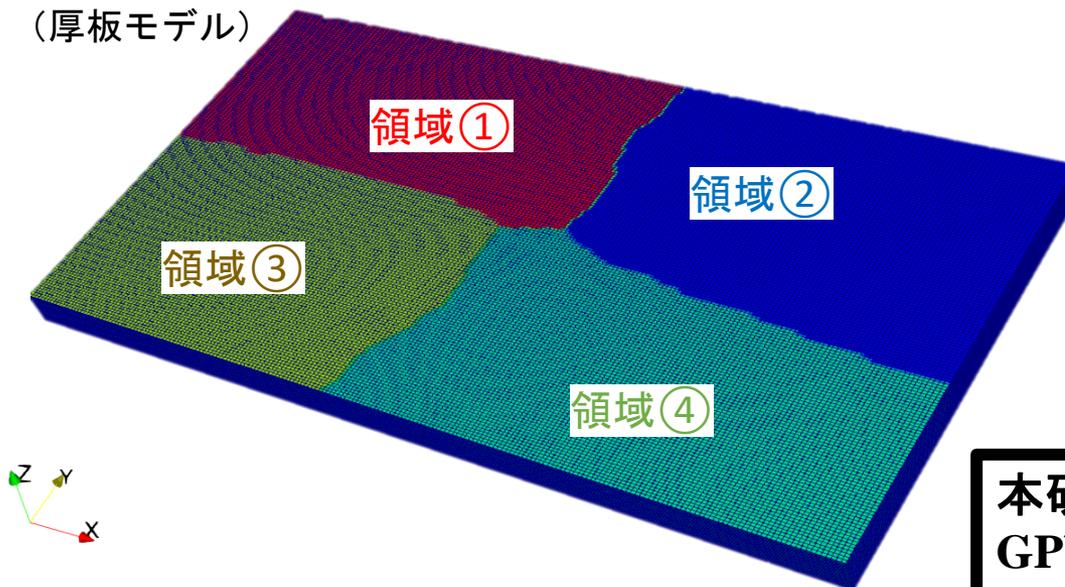
本研究の目的

- 手法の提案
- 弾性解析、弾塑性解析に対する提案手法の精度検証
および計算時間比較による有用性の検証
- **一億自由度規模**の超大規模問題に対する提案手法の有用性の提示

一般的な領域分割法と 提案手法の概要

- 解析領域(全体領域)をいくつかの小領域に分割(下図)
- 分割後のそれぞれ小領域を個別に同時に解析
 - 小領域において計算時間の短縮、小領域あたりのメモリ消費量の削減
- 各小領域を個別に解くままでは境界で解に不整合 (問題点)
- 全体領域に対し、解の整合性を保つ工夫を施す
 - 既存の手法: スーパーコンピュータ等の使用が一般的 = 多数のCPU(1,000CPU~)を使用
 - CPU数の分だけ小領域に分割(ADVENTURE等)→小領域が小さくGPUに対しては不適

領域分割の例
(厚板モデル)



全体領域 : 630,000要素



領域分割
(4分割)

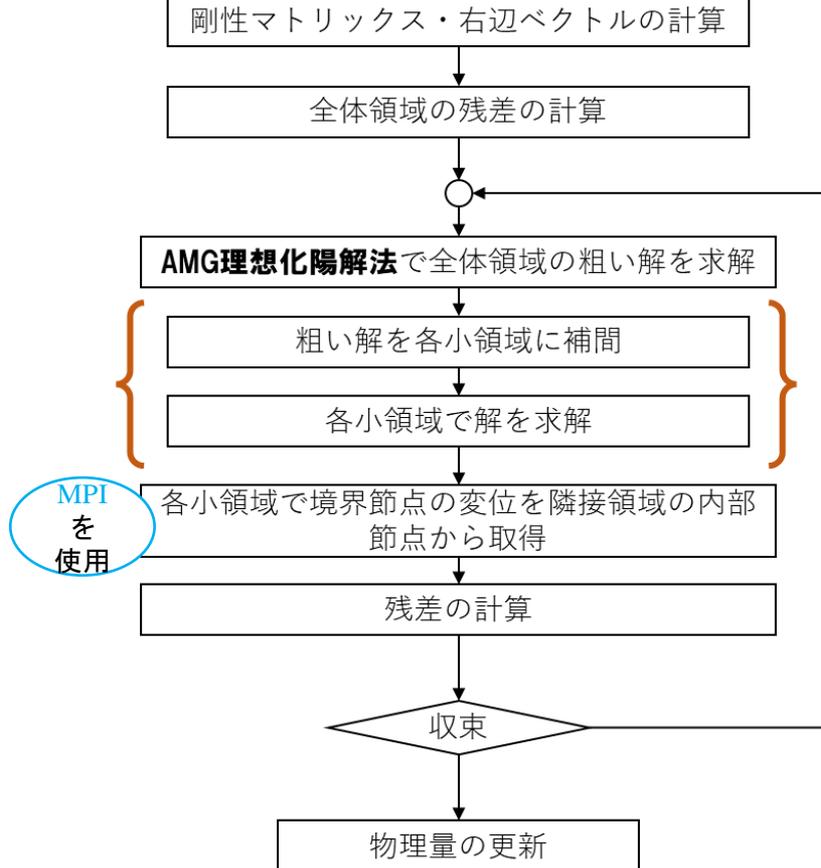
- 領域① : 155,095要素
- 領域② : 158,302要素
- 領域③ : 158,300要素
- 領域④ : 158,303要素

各小領域を個別に解析

本研究:
GPU並列化に適した領域分割法の導入
→小領域をなるべく大きく

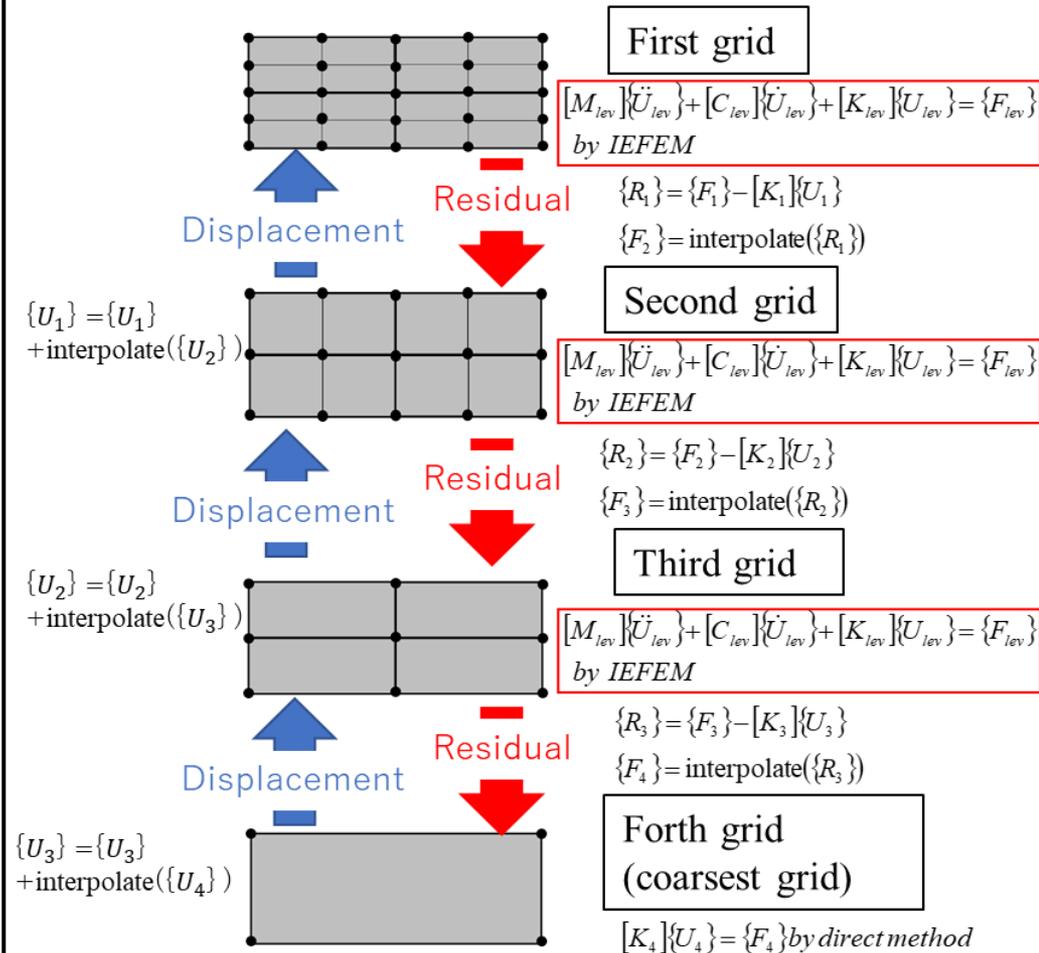
計算手順

収束計算フロー



1. 統合した全体剛性行列を用いて全体領域の解をAMG理想化陽解法で算出
2. 全体領域の解を初期値として各小領域でAMG理想化陽解法を実行し解を算出
3. 小領域の境界節点の変位を更新
→MPI(Message Passing Interface)による通信
4. 各小領域で残差力を算出し収束判定
5. 以上の処理を収束するまで反復

AMG理想化陽解法の概略



- 誤差の高周波成分を分割数の大きい格子で計算
- 誤差の低周波成分は分割数の小さい格子で計算
- 各階層の解を重ね合わせることで最終的な解を求解

全体領域の変形の考慮

領域分割法の問題点

- 境界節点の解を更新し反復計算
- 一度の反復では全体の変形が得られず収束性が悪化する可能性

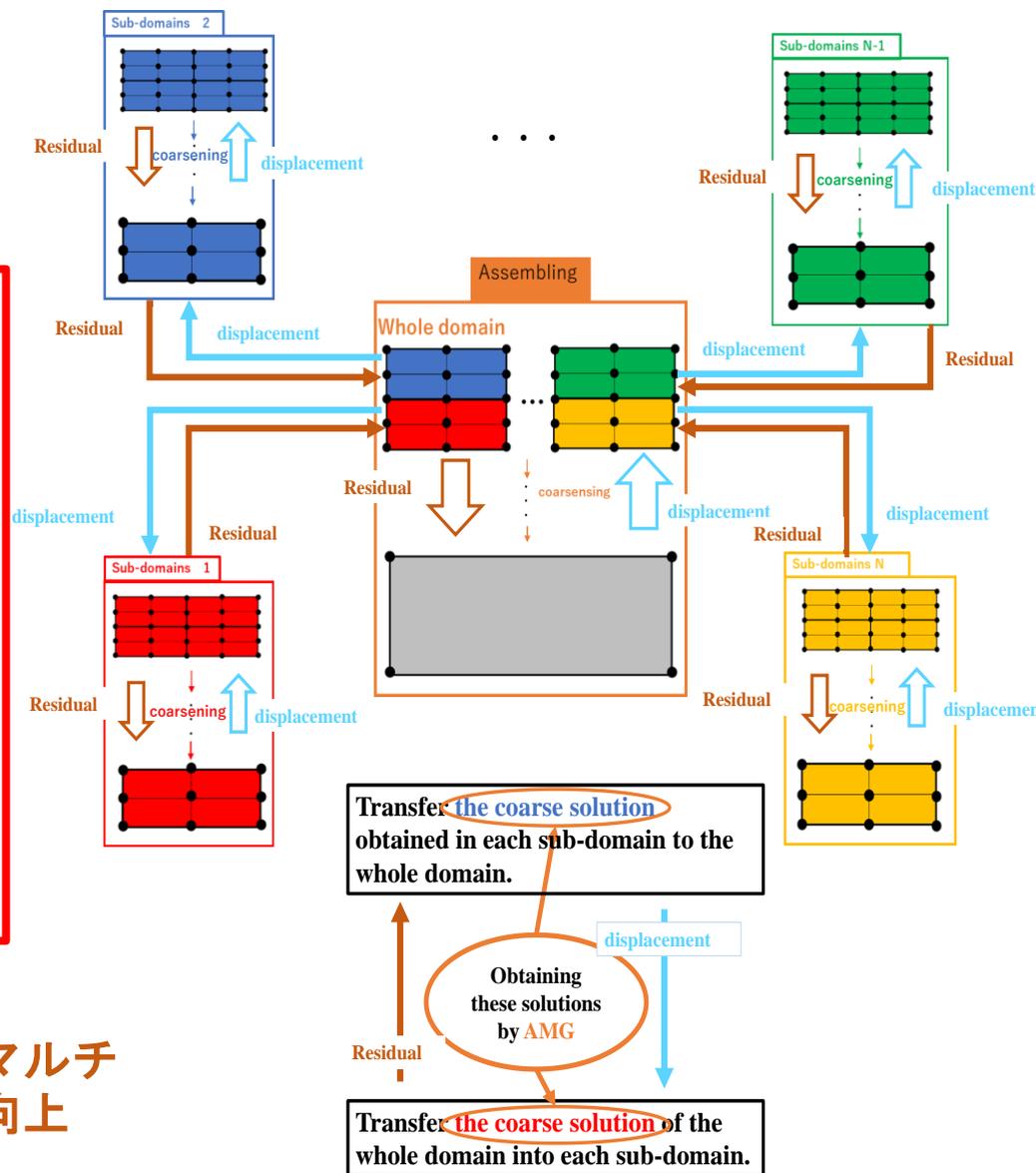
提案手法における変形の算出手順

- 各小領域で節点数が十分小さくなるまでマルチグリッド法を適用
- 各小領域の最も疎な層の剛性行列を全体剛性行列に統合
- 全体領域の節点数が十分小さくなるまで全体領域の剛性行列にマルチグリッド法を適用

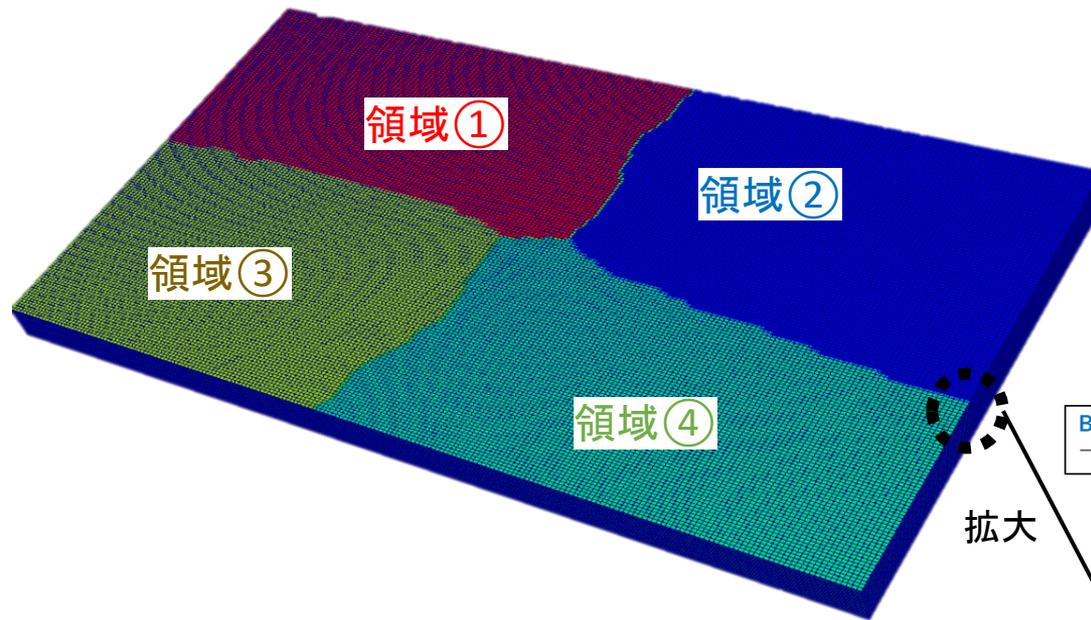
2段階のAMG法

全体領域を表す全体剛性行列を作成しマルチグリッド法を適用することで収束性を向上

全体変形算出の概念



節点(自由度)の領域分割例



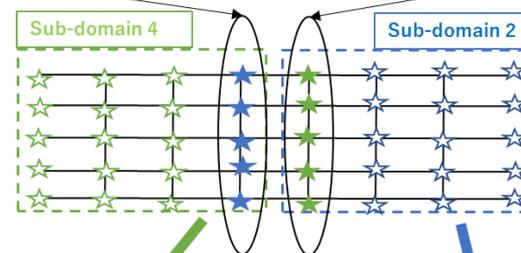
領域分割法

- グラフ分割ライブラリMETISを用いて節点をいずれかの小領域に所属させる
- 境界節点は小領域に隣接する別の小領域に属する節点とする(下図)
- 境界節点は完全に拘束

Boundary nodes in Sub-domain 2
→Nodes in sub-domain 4

Boundary nodes in Sub-domain 4
→Nodes in sub-domain 2

拡大



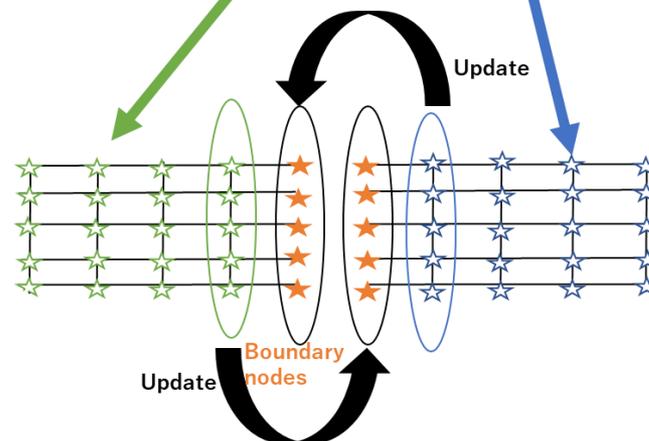
小領域間の境界節点の物理量の更新

小領域の境界節点から1つ内側の節点は隣接する小領域の境界節点に対応

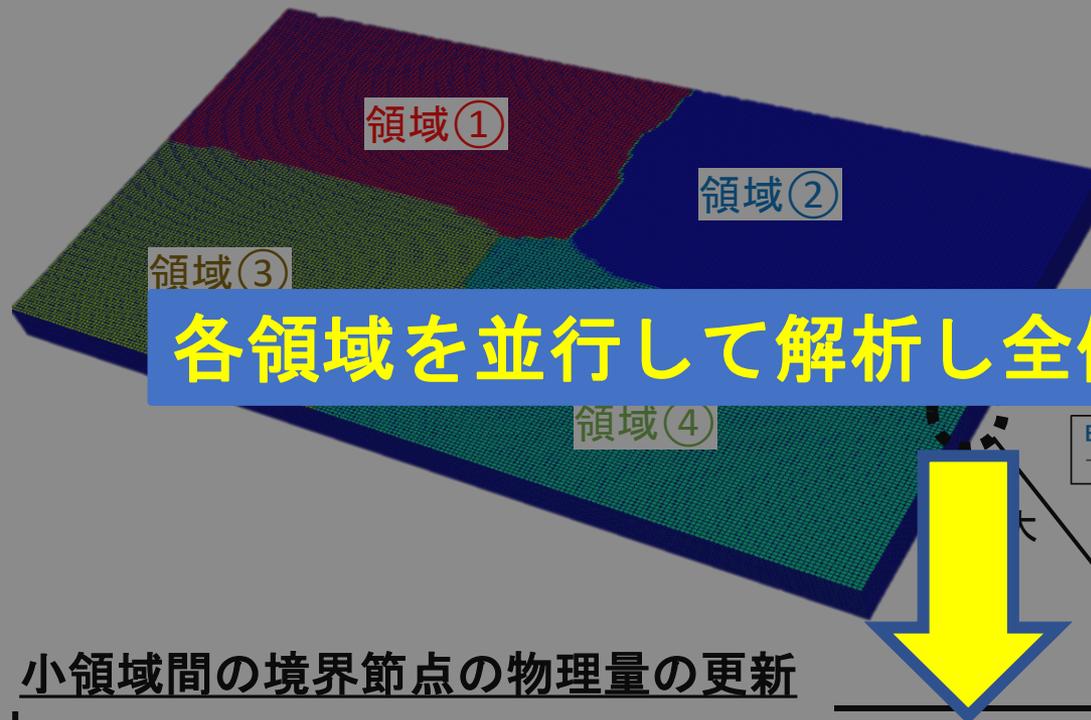


領域境界から1つ内側の節点の解を隣接領域の境界条件として物理量(変位)を転送

→小領域間の解の連続性を考慮



節点(自由度)の領域分割例



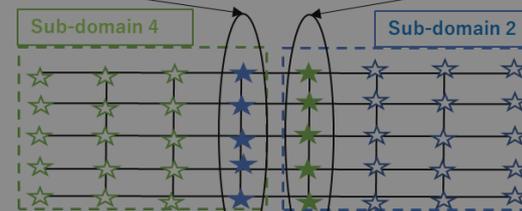
領域分割法

- グラフ分割ライブラリMETISを用いて節点をいずれかの小領域に所属させる
- 境界節点は小領域に隣接する別の小領域に属する節点とする(下図)

各領域を並行して解析し全体の解の収束を考慮

Boundary nodes in Sub-domain 2
→ Nodes in sub-domain 4

Boundary nodes in Sub-domain 4
→ Nodes in sub-domain 2



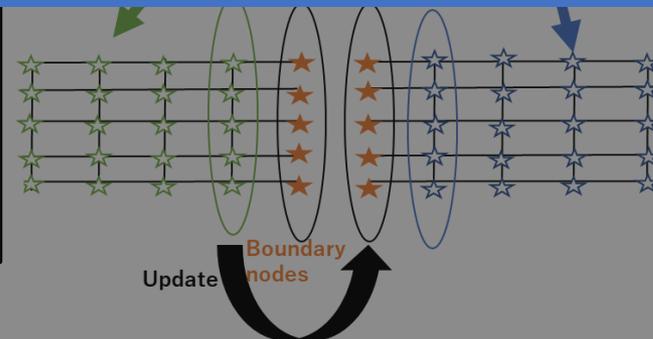
小領域間の境界節点の物理量の更新

小領域の境界節点から1つ内側の節点は隣接する小領域の

大規模な問題の解析が可能

領域境界から1つ内側の節点の解を隣接領域の境界条件として物理量(変位)を転送

→小領域間の解の連続性を考慮



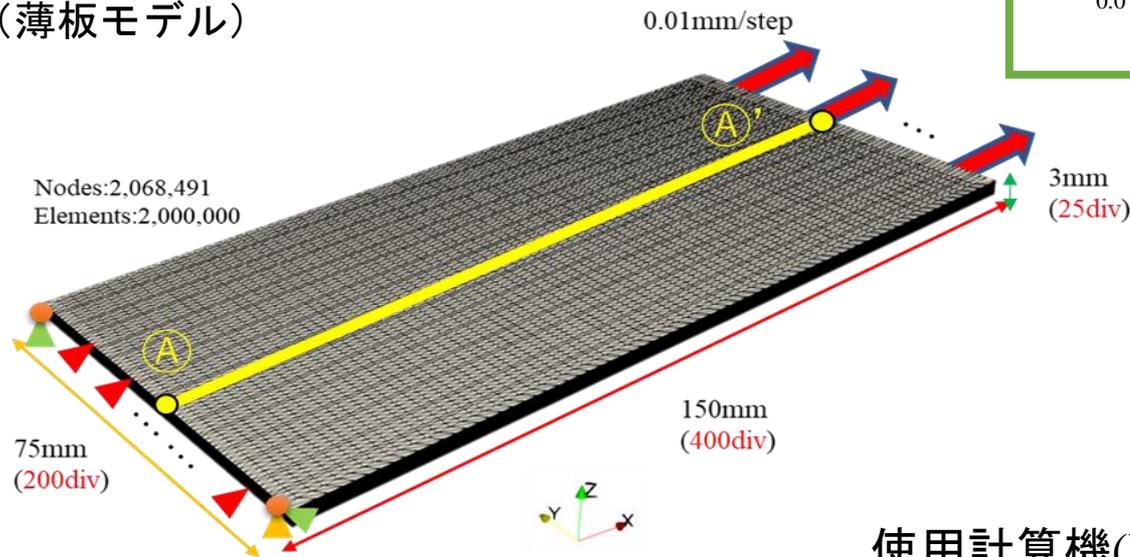
弾性問題における 提案手法の精度解析

適切な収束条件の導出

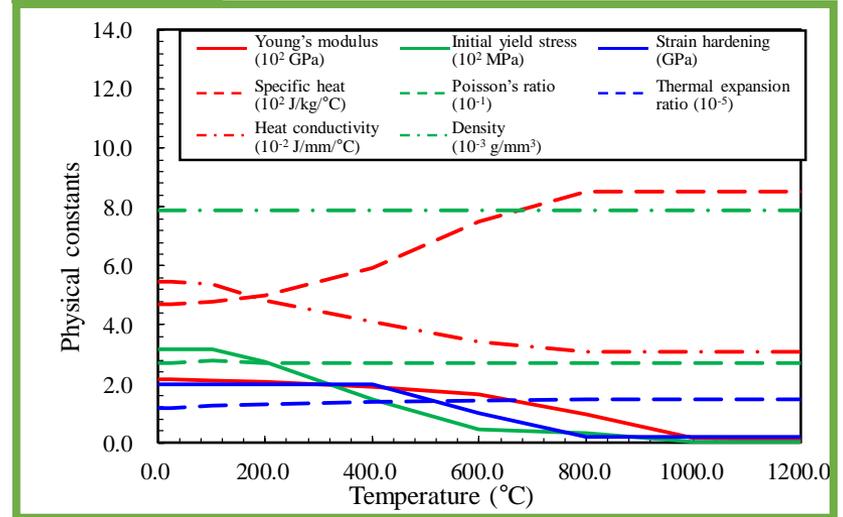
単軸引張問題の適切な収束条件の導出

提案手法の4分割を用いて、収束条件 $e-3 \sim e-8$ までの解析結果を比較し、単軸引張問題を行う上での適切な収束条件を検討

解析モデル (薄板モデル)



材料定数

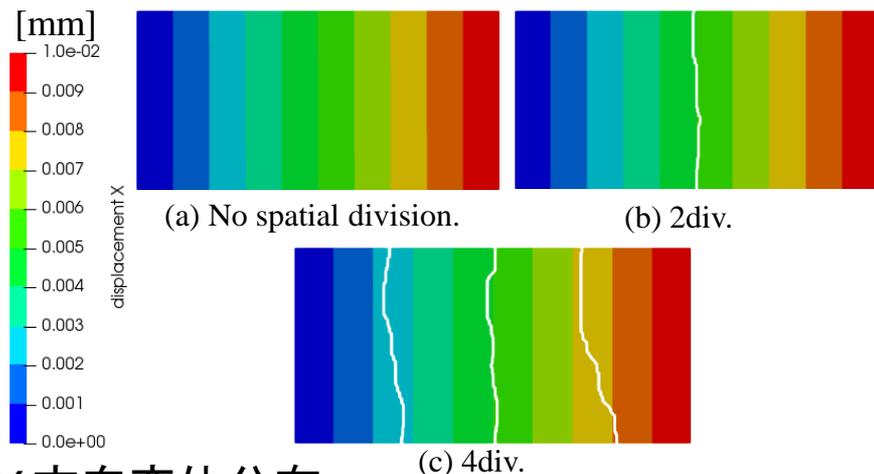


使用計算機(PC1台) :

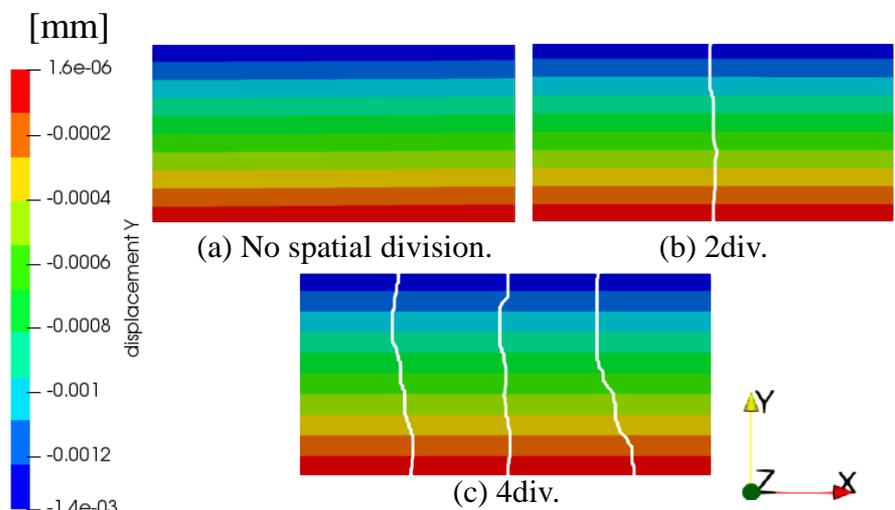
- CPU: Intel Xeon(R) W-2155 3.31GHz, RAM: 512GB
- GPU: NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti(11GB) **x7**

薄板引張

X方向変位分布

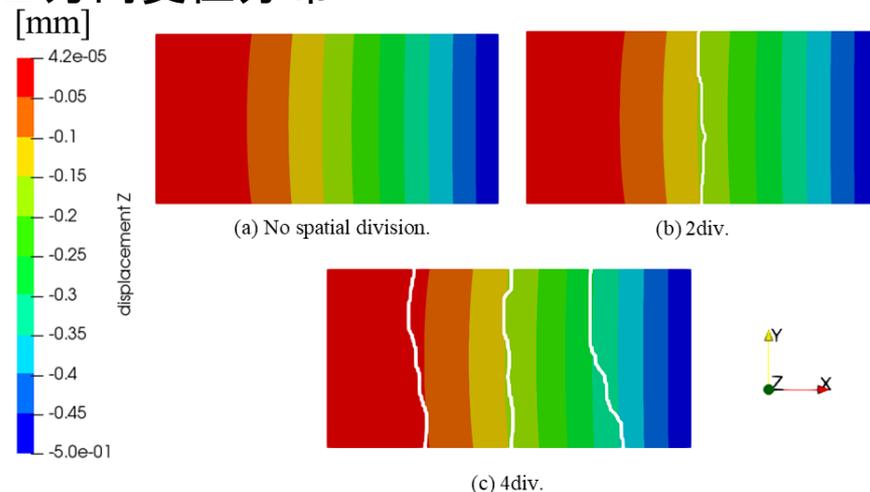


Y方向変位分布

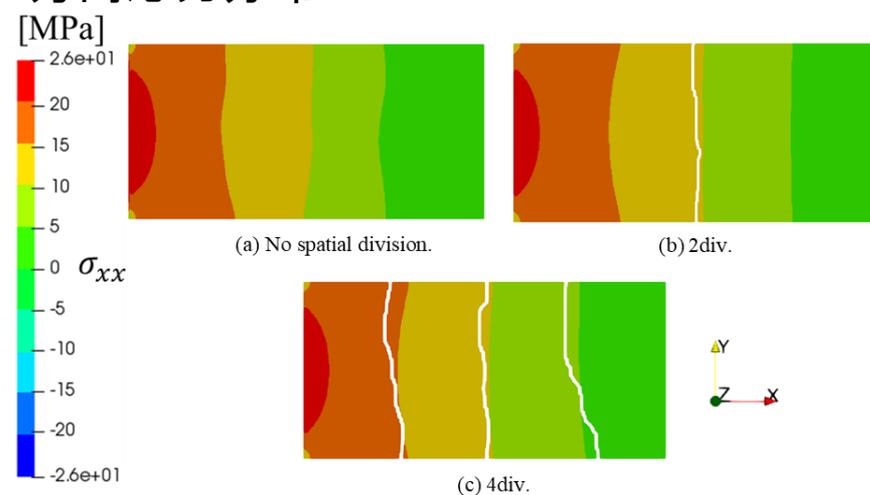


薄板曲げ

Z方向変位分布



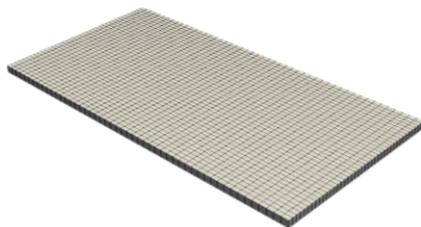
X方向応力分布



解析結果は**良好に一致**し、弾性解析への適用が認められる

弾性問題(曲げ問題)において計算時間計測に用いた薄板モデル

10,000要素



18,000要素



39,600要素



80,000要素



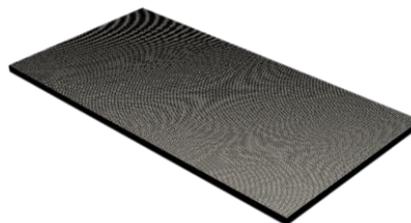
160,000要素



316,800要素



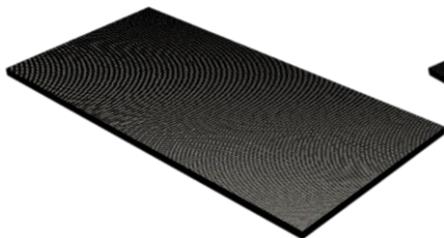
630,000要素



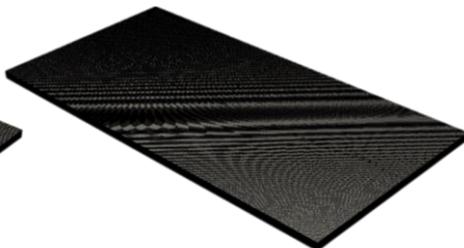
1,012,500要素



2,000,000要素



4,200,000要素



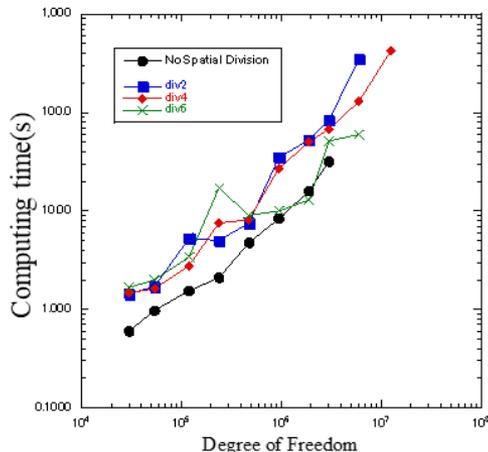
5,573,750要素



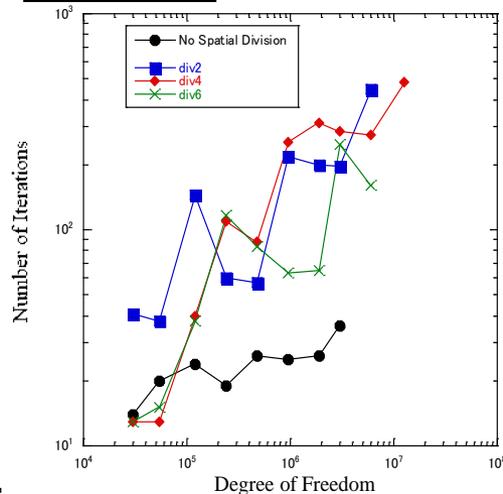
厚板モデル
でも同様

1step終了までの計算時間と反復回数

計算時間

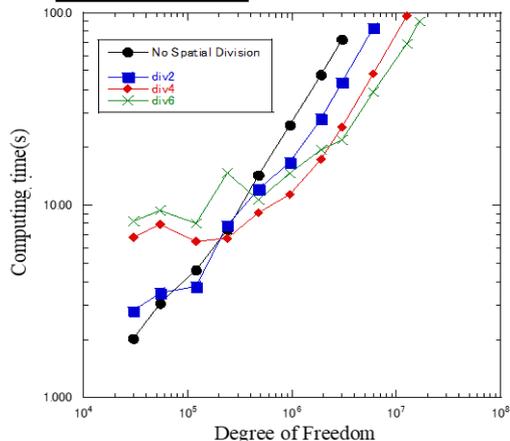


反復回数



反復回数100回までの計算時間と並列化効率

計算時間

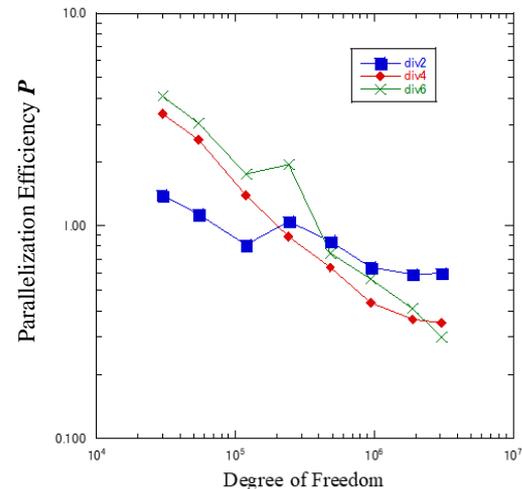


$$\text{並列化効率} : P = \frac{t_N}{t_0}$$

t_0 : No spatial divisionによる計算時間、
 t_N : N分割による計算時間

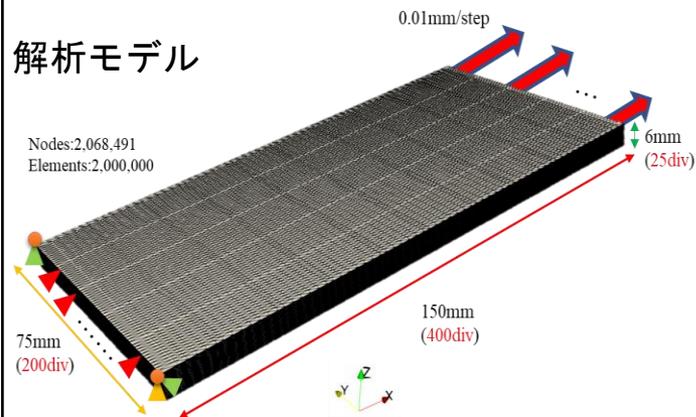
並列化効率Pが小さい
 ほうが計算時間が短い

並列化効率

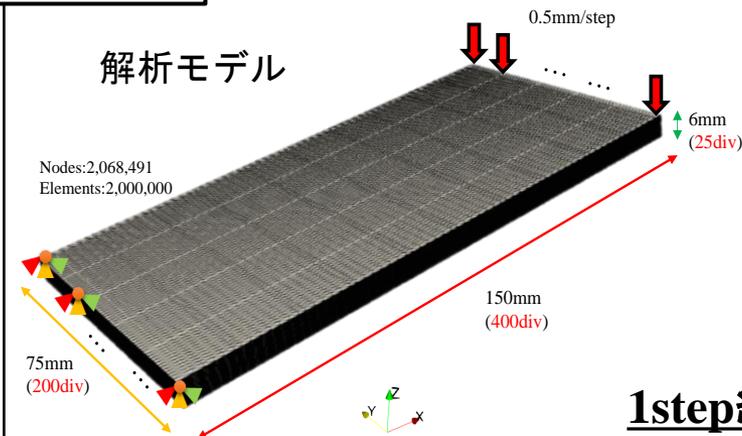


- 計算時間は要素が増えるごとに増加
- 並列化効率に注目すると、要素数が多ければ多いほど、分割数が多いほうが計算時間は減少

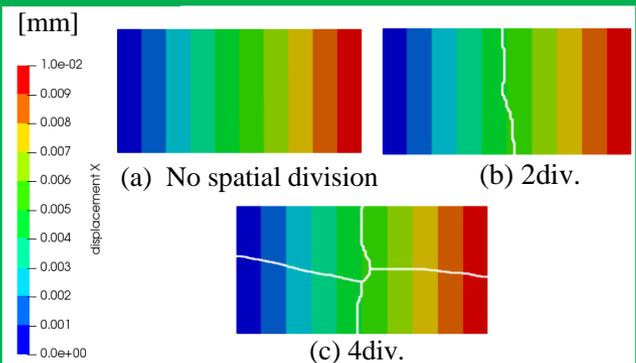
引張問題



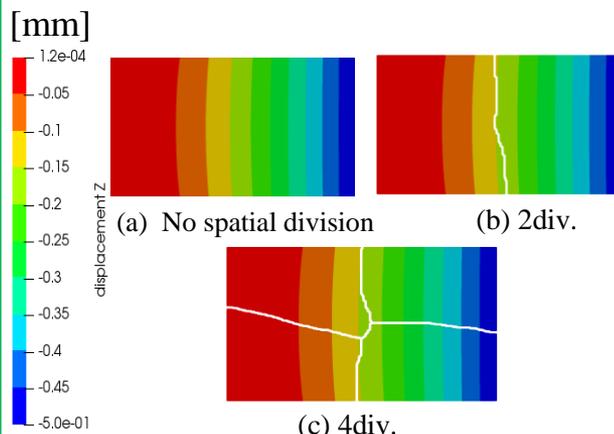
曲げ問題



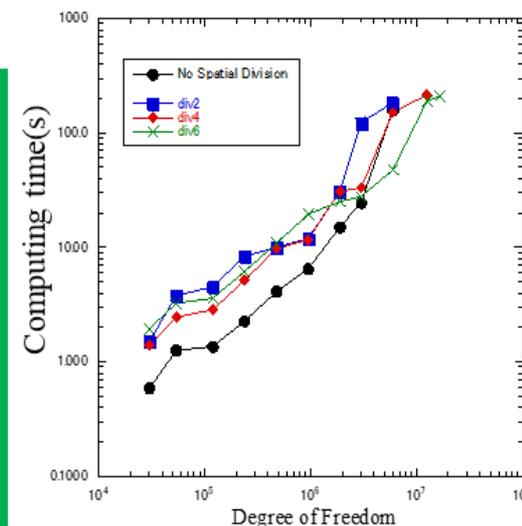
X方向変位



X方向変位



1step終了までの計算時間



- 引張問題においては理論通りの一様な応力分布(提案手法)
- 薄板モデルと同様に解析結果は**良好な一致**
- 厚板モデルに対しても提案手法を適用可
- 計算時間も薄板と同様の傾向

厚板モデル曲げ問題の計算時間

1step

弾性解析の結果

- 提案手法の精度を確認
- 大規模自由度に対する領域分割法の有用性を確認できた

Number of Elements	Degree of Freedom	Computing Time (s)	Parallelization efficiency (%)
10,000	30,000	2.166	2.092798
18,000	54,000	2.640	3.100646
39,600	162,000	3.531	4.036473
80,000	316,800	7.275	1.3375
160,000	630,000	10.769	2.755682
316,800	1,012,500	16.721	4.079167
630,000	1,890,000	209.762	-
1,012,500	3,037,500	-	254
2,000,000	6,000,000	-	-
4,200,000	12,600,000	-	-
5,573,750	16,721,250	-	-

反覆回数100回までの計算時間と並列化効率

Number of Elements	Degree of Freedom	Computing Time(s)				Parallelization efficiency (%)		
		No Spatial Division	div2	div4	div6	div2	div4	div6
10,000	30000	2.166	4.533	6.716	8.743	2.092798	3.100646	4.036473
18,000	54,000	2.640	3.531	7.275	10.769	1.3375	2.755682	4.079167
39,600	162,000	3.531	7.275	10.769	16.721	4.079167	-	-
80,000	316,800	7.275	10.769	16.721	209.762	-	-	-
160,000	630,000	10.769	16.721	209.762	-	-	-	-
316,800	1,012,500	16.721	209.762	-	-	-	-	-
630,000	1,890,000	209.762	-	-	-	-	-	-
1,012,500	3,037,500	-	-	-	-	-	-	-
2,000,000	6,000,000	-	-	-	-	-	-	-
4,200,000	12,600,000	-	-	-	-	-	-	-
5,573,750	16,721,250	-	-	-	-	-	-	-

提案手法の弾性問題解析への適用が可能

- 薄板モデル同様に要素数が多いほど、分割数を多くすると効率が良い
- 一定の要素数以上では分割数を上げないと解析が不可→領域分割法の有用性

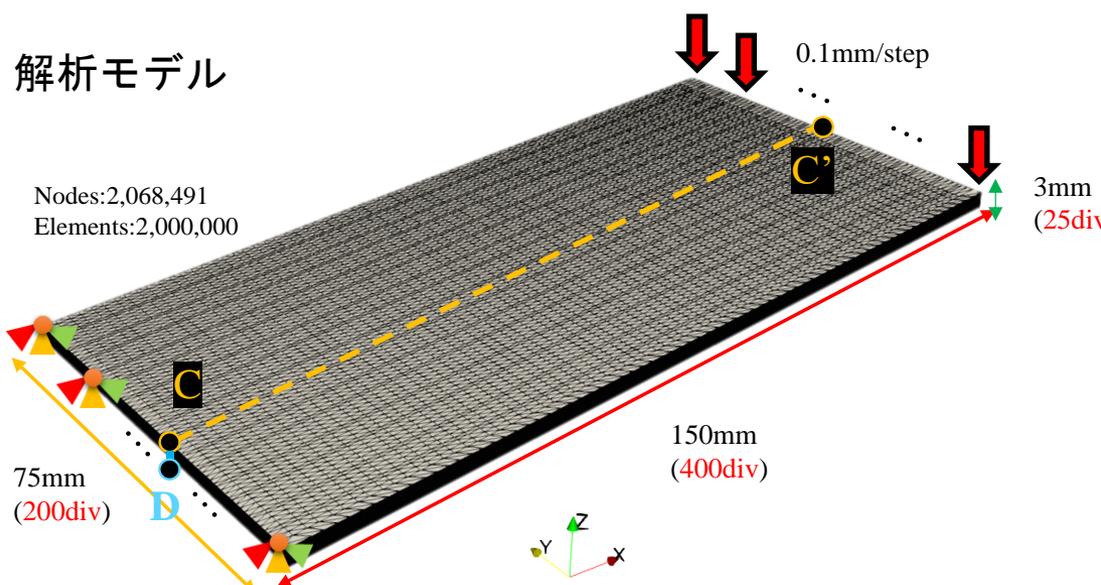


弾塑性問題における 提案手法の精度解析

弾塑性問題における精度検証

提案手法が弾塑性解析においても、正しい精度であるかを検証

解析モデル

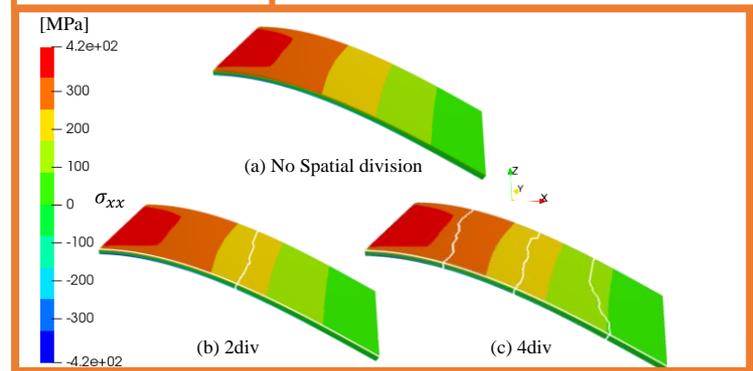


薄板の降伏点の変位

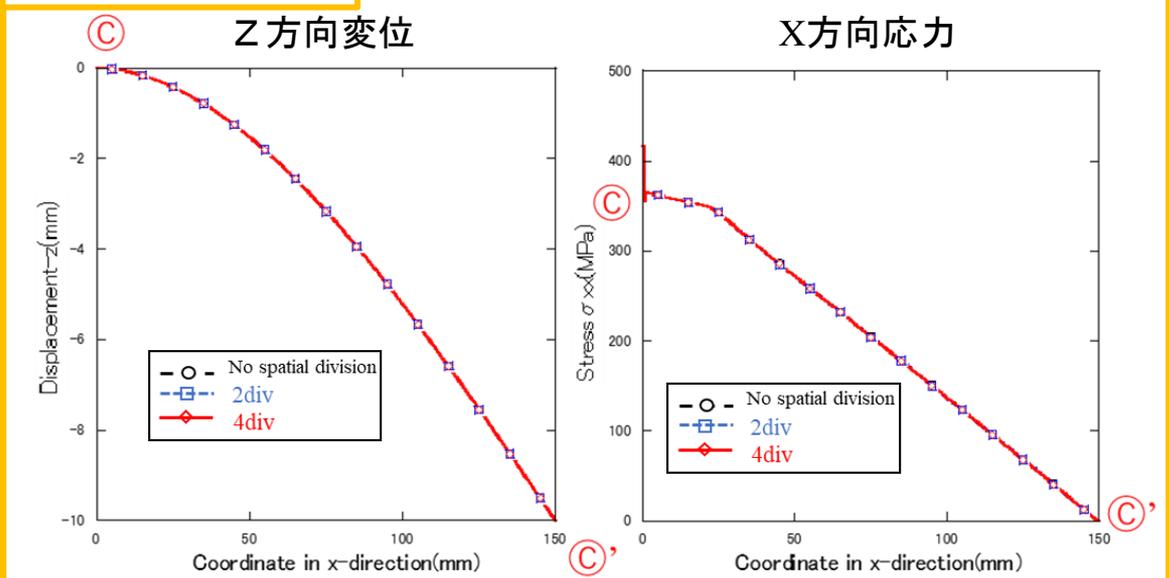
$$d = \frac{2 * 150 * 150 * 318.5}{3 * 213100 * 3} = 7.473017(\text{mm})$$

$$d = \frac{2l^2}{3Eh} \sigma$$

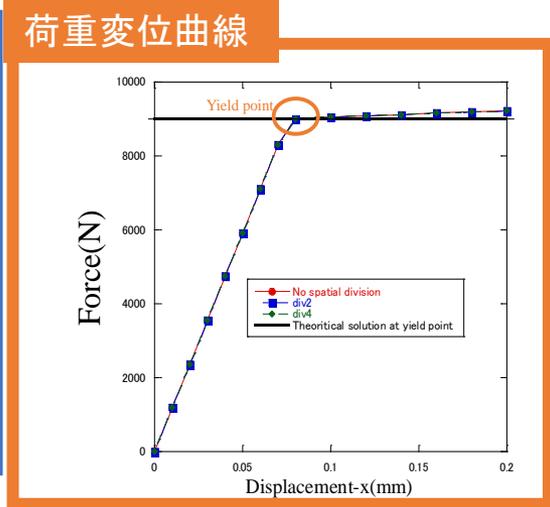
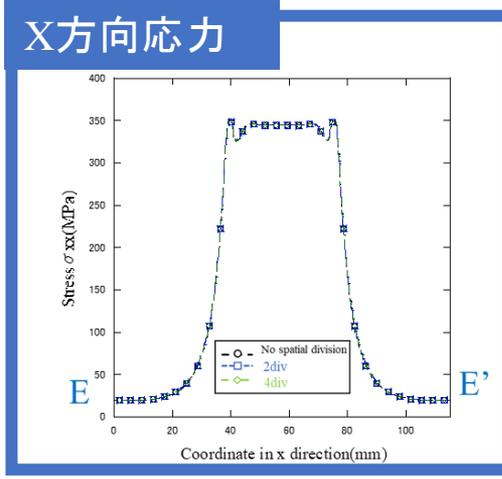
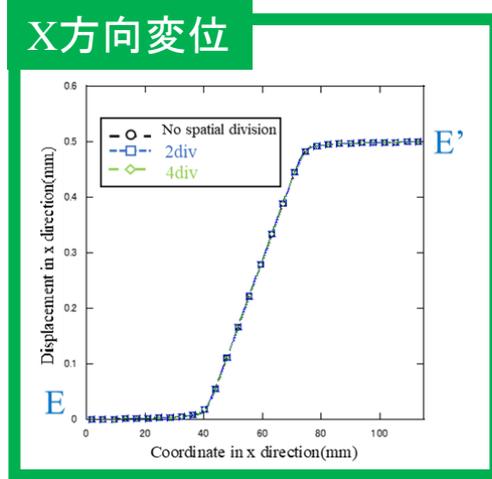
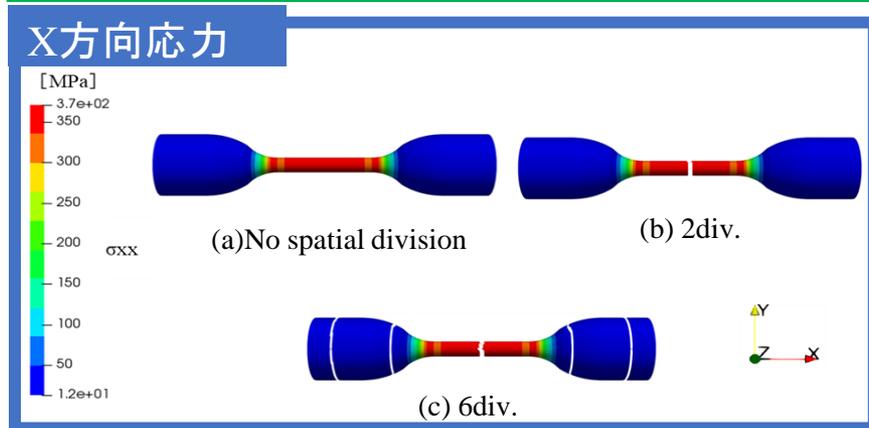
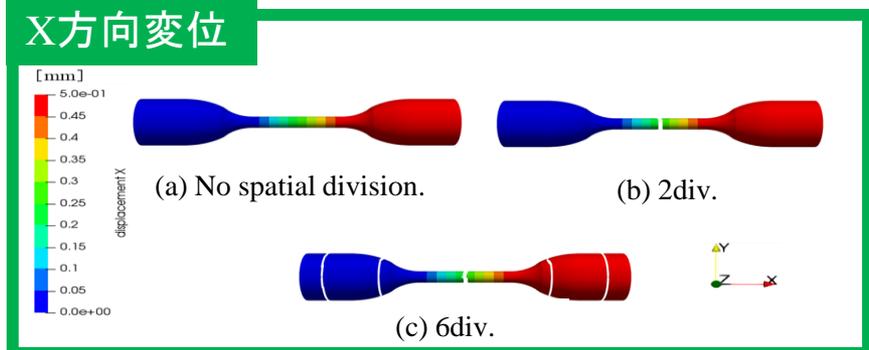
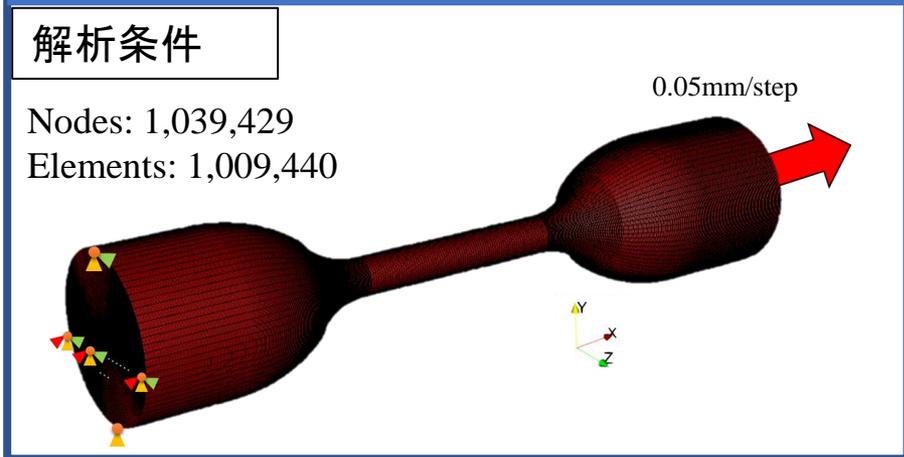
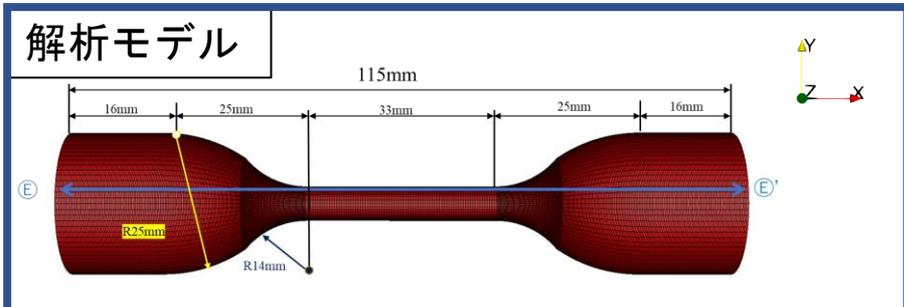
変形の様子



Along C-C' line



- 解析結果は**良好な一致**をしており、提案手法の基礎モデルに対する精度を確認
- 弾塑性問題においても、解の連続性を保つことが出来ている



理論通りの降伏点で降伏

↓

高い計算精度

解析モデル

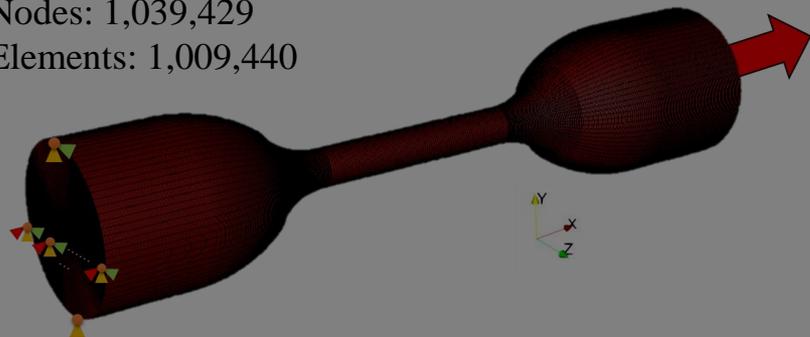


弾塑性解析の結果

- 提案手法の精度を確認
- 弾塑性特有の変形や理論通りの降伏点

解析条件

Nodes: 1,039,429
Elements: 1,009,440



X方向変位



応力分布

[MPa]

3.7e+02

350

300



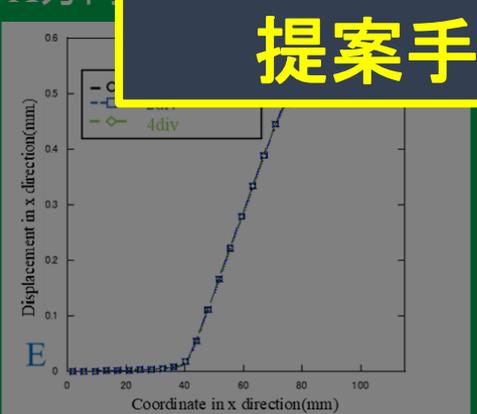
(a) No spatial division

(b) 2div.

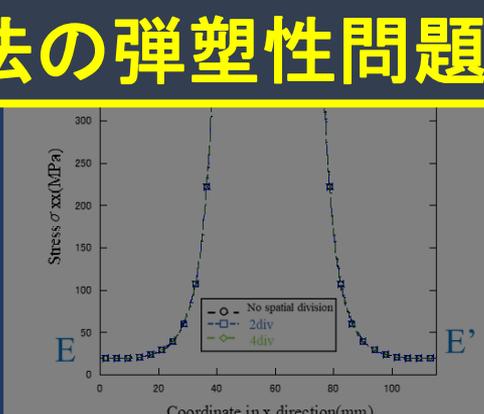


(c) 6div.

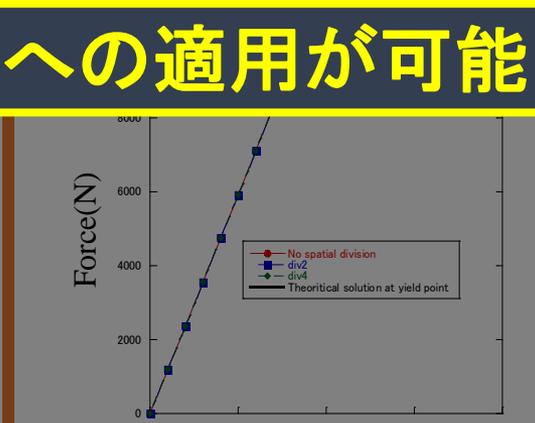
X方向変位



X方向応力



荷重変位曲線



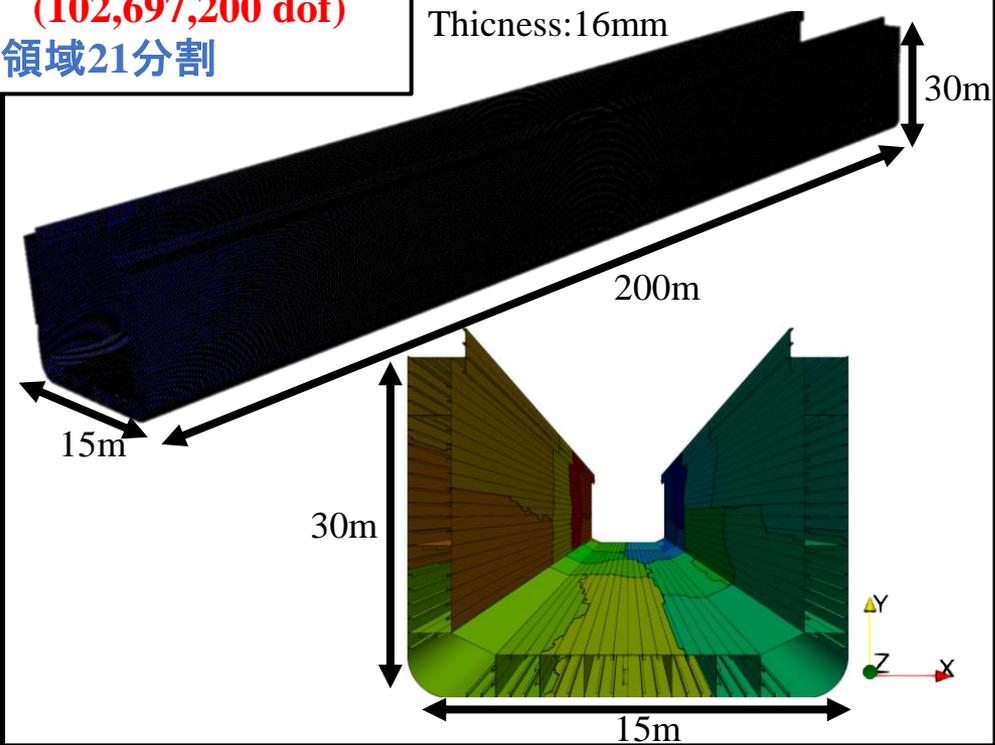
提案手法の弾塑性問題解析への適用が可能

提案手法による 超大規模問題の解析

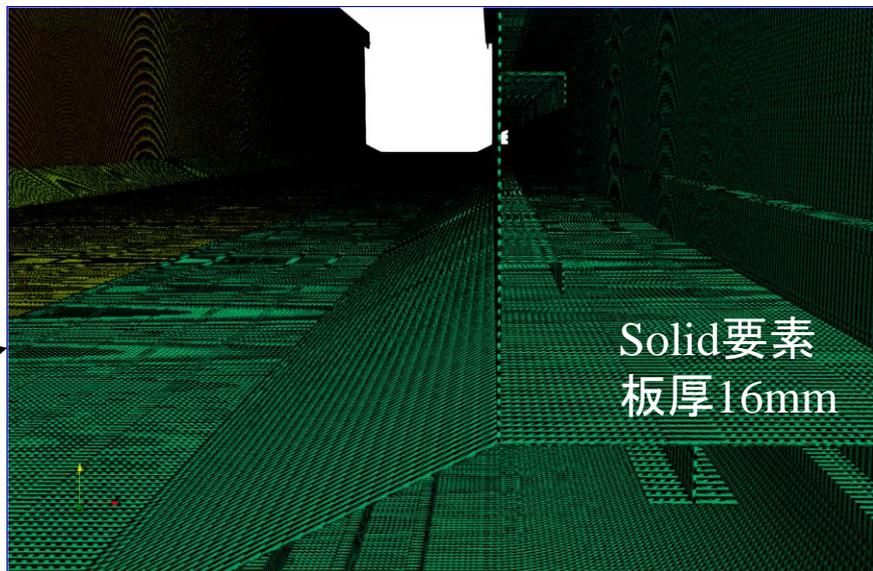
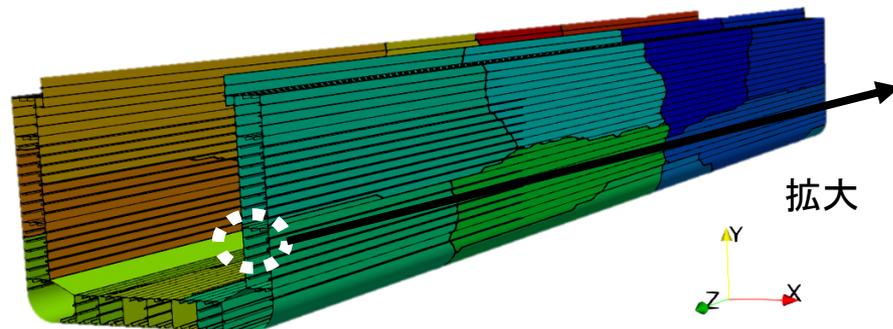
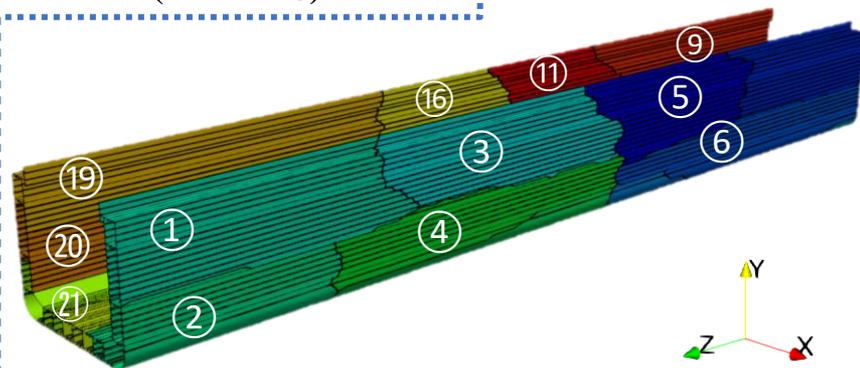
1億自由度をこえるモデルの解析

Nodes: 42,699,098
Elements: 34,232,400
(102,697,200 dof)
領域21分割

Thickness: 16mm



分割後の解析モデル
(21分割)



解析条件

- 片側全拘束, 片側y方向のみに変位1.0/step
- 領域21分割→1領域当たり約163万要素 (489万自由度)
- 計算機

GPUが NVIDIA社製のGeForce GTX 1080 Ti
11GBのGPU7台

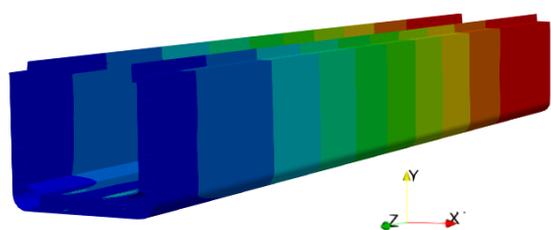
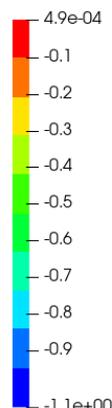


解析結果

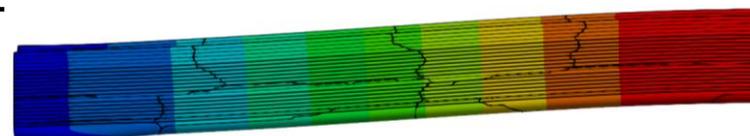
1step終了までの計算時間 : 3213.435(s) (約54分)

Displacement-y

[mm]



変形の様子



解析条件

- 片側全拘束、片側自由のみに変位1.0/4mm
- 命令
- 計算

超大規模問題解析の結果

- メモリ不足を回避し、市販のPCで1億自由度を超えるモデルの解析に成功

7つのGPUで21領域を扱う
→交互にGPUを使わせて解析

解析結果

1step終了までの計算時間：3213.435(s) (54分)

Displacement-y
[mm]

提案手法によってスパコン規模の大規模解析が可能

-0.8
-0.9
-1.1e+00

本研究では、AMG理想化陽解法FEMに対して、より大規模な解析を実施するために**領域分割法**による並列解析を導入した。

領域分割法においては、解析領域全体の解の収束性を考慮するために、分割した小領域で自由度が十分小さくなるまでAMGを適用し、その後、全体領域に統合した上でAMGを適用する、**2段階のAMG法**を導入した。以上の手法を用いて、基礎的な溶接力学問題の解析を実施した結果、以下の知見が得られた。

- 弾性解析および弾塑性解析を基礎モデルに対して適用した結果、領域の境界において連続的な解が得られていることを確認した。また、面外変位分布と残留応力分布において、従来手法とほぼ同等の解析結果が得られていることを確認した。
- 基礎モデルの要素分割を変更し、提案手法において計算時間の検討を行った。その結果、大規模自由度モデルに対して、提案手法の有用性が高いことを確認した。
- **1億自由度を超える超大規模自由度モデル**の解析をPC1台で行えることを確認した。