

## 理想化陽解法 FEM による超高速大規模解析

大阪府立大学大学院

○柴原 正和, 生島 一樹

### Ultra High Speed and Large Scale Computation Using Idealized Explicit FEM

by Masakazu SHIBAHARA, Kazuki IKUSHIMA

#### 1. 緒言

近年における科学技術の進歩により, 実用構造物の力学解析に, 有限要素法をはじめとする数値シミュレーション手法が幅広く活用されるようになってきた. 特に有限要素法は, 設計・生産の分野において幅広く導入が進められているところである. しかし, 溶接問題への適用を考えた場合には, その適用範囲が溶接継手レベルに限られる場合が多く, 大規模問題への適用は少ないのが現状である. この理由としては, 溶接問題が強非線形の過渡問題である点が挙げられ, 変形を含めた 3 次元応力・変形挙動を精度よくシミュレートするには, 静的陰解法 FEM を用いる必要があり, その場合, 解析規模が大きくなると, メモリ使用量および計算時間の点において問題となる場合がある. そこで著者らは, これまでに, 理想化陽解法 FEM の開発を行うことにより, 高速かつ省メモリな解析を実現した<sup>1)</sup>.

理想化陽解法 FEM は, 動的陽解法 FEM を採用しているため, 要素毎, 解析自由度毎に独立した計算のみで解析を進めることが可能である. すなわち, 並列化に非常に適していると考えられる. そこで, 本研究では, 近年, 数値計算の並列化手法として注目されつつある GPU(Graphics Processing Unit)を導入することで, 新しい並列化理想化陽解法 FEM の開発を行った. さらに, 開発手法を多層溶接時における 3 次元移動熱源問題に適用することにより, 本手法の妥当性及び有用性について検討を行った. その結果, 商用 FEM ソフトウェアでは解析が非常に困難な 1600 万自由度を超える大規模な解析を, 1 台の市販 PC のみの計算で実行可能であることを示した.

#### 2. 理想化陽解法 FEM の基本原理

本章では, FEM 熱弾塑性解析法を大規模・高速化した「理想化陽解法 FEM」について, その解析手法の概要および解析結果について説明する.

既往の溶接力学解析では, 慣性力や減衰力の影響は小さいと考え, 静的陰解法 FEM を用いて問題を解く方法がほとんどである. すなわち, 次に示す式(1)<sup>2)</sup>における第 1 項(慣性項)と第 2 項(減衰項)の影響は無視できる程度に小さい準静的な現象であるとし, 増分型で記述された全体剛性方程式  $[K]\{\Delta u\} = \{\Delta F\}$  を解くものである.

$$[M]\{\ddot{u}\}_t + [C]\{\dot{u}\}_t + [K]\{u\}_t = \{F\}_t \quad (1)$$

一方, 理想化陽解法 FEM では, 外力として, 熱伝導解析により得られた温度増分を用い, この温度増分による荷重を式(1)に与え, 最適化された質量マトリックス  $[M]$ , 減衰マトリックス  $[C]$  を用いて同式を解くことで次のステップにおける変位を求める. 理想化陽解法 FEM では変位の計算を動的陽解法 FEM の計算ステップ, すなわち式(1)を解くことで計算を進める. 計算ステップを進めることで, 変位がある値に収束していき, 得られた変位が静的平衡状態, すなわち  $[K]\{u\} = \{F\}$  を満たすまでこれを繰り返す. 静的平衡状態が得られた後は, 次の温度ステップにおける変位の計算へと移る. このように, 荷重ステップにおける変位の計算を擬似的な動的問題と捉え, 擬似的な時間ステップに分割して解析を進めることから, 計算するステップ数自体は増加するが, 大規模問題になれば, 各計算ステップにおける計算量が静的陰解法 FEM と比べてはるかに小さいことから, 全体としては計算時間の短縮につながると考えられる.

このような手法をとることで, 動的陽解法 FEM によって変位を計算しながらも, 現象の持続時間に依存す

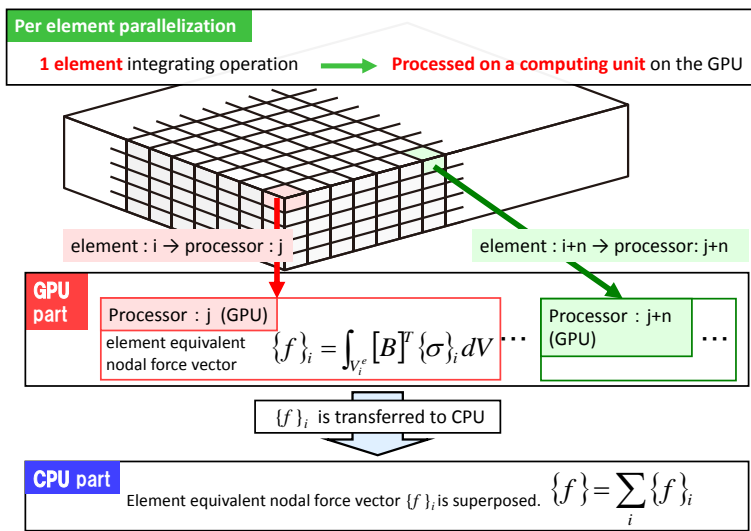


Fig. 1 Schematic illustration of GPU parallelization.

ることなく解析を進めることができることから、特に溶接問題における冷却過程のように現象の持続時間が長い問題に対して本手法は有効になると考えられる。また、従来の動的陽解法では解析精度の点において問題となる場合があるが、理想化陽解法 FEM においては、各荷重ステップにおいて静的平衡状態を満たす解析を行うため、静的陰解法 FEM とほぼ同等の精度を有する解析結果が得られる。

### 3. GPU による並列化を用いた高速化

#### 3. 1 理想化陽解法 FEM への GPU 並列化の導入

理想化陽解法 FEM では、動的陽解法 FEM に基づき変位を求め、得られた変位を用いて応力を算出し、得られた応力場より残差力を算出する。そして、この計算過程を残差力が十分小さくなるまで繰り返すことで精度の高い解を得ることを実現しているため、要素の応力積分を行う箇所の計算負荷が非常に高くなる。そこで、本研究では、GPU 上で要素の応力積分を行う手法を採用した。GPU は、従来からコンピュータグラフィックス(CG)処理に用いられてきた計算プロセッサであるが、近年の CG 技術の向上を受け、非常に高速かつ汎用化されており、数値計算に応用可能であることが示されている<sup>3)</sup>。

本研究で採用した手法では、Fig.1 に示すように、GPU 上の 1 つの計算ユニットで 1 つの要素の応力を算出し、その応力を積分することで、要素毎の等価節点力を算出する。算出された要素毎の等価節点力は、CPU 上ですべての要素等価節点力を足し合わせることで、解析領域全体の残差力ベクトルを作成する。また、変位の算出に関しても、CPU 上で計算した結果を GPU に転送する際の転送時間を考慮して、GPU の 1 プロセッサ毎に 1 自由度の処理を行うような方法で計算するものとした。以上の解析手順をフロー形式で表したものを Fig.2 に示す。

このような手法を採ることで、理想化陽解法 FEM において、計算コストがもっとも高い、要素毎の計算、並びに自由度毎の計算を並列化することが可能となり、高速化が達成されるものと考えられる。

### 4. 大規模移動熱源多層溶接解析への適用

前章において、GPU を用いた並列化理想化陽解法 FEM の解析精度および優位性について検証した。そこで本章では、約 130 万自由度、約 43 万節点、33 パスという汎用 FEM コードでは非常に解析困難な大規模移動熱源多層溶接問題に対し、本手法の適用を試みる。

#### 4. 1 解析モデル

解析に用いた要素分割は、Fig. 3 に示す通りであり、自由度数を 1,283,205、節点数を 427,735、要素数を 412,400 とした。溶接条件としては、溶接電圧を 17 V、溶接電流を 120 A、溶接速度を 6.66 mm/s、熱効率を

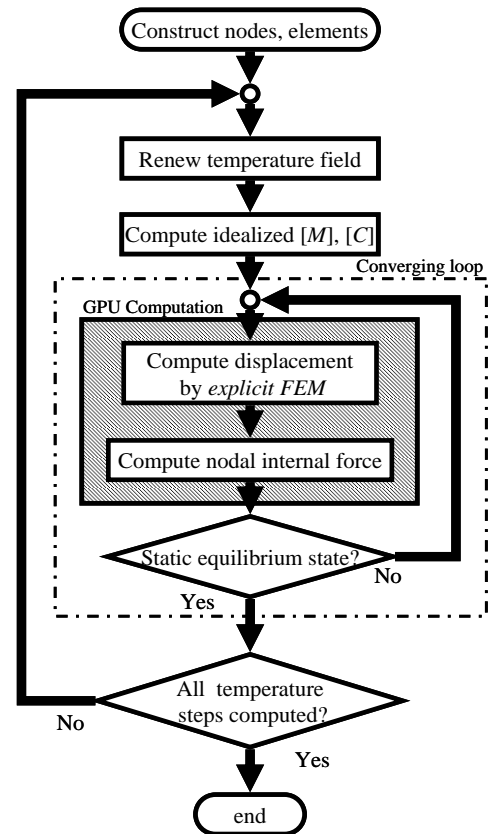


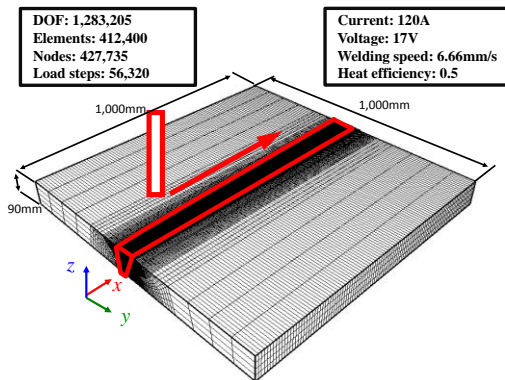
Fig. 2 Computing flow of Parallelized Idealized Explicit FEM using GPU.

0.5 とし、パス間温度を 250°C とした。また、溶接パス数は 33 パスであり、溶接の施工順序は Fig. 4 に示す通りとした。なお、解析に際しては、マシンスペック Core i7 2.66GHz, 12GB, 1 プロセッサあたり 240 計算コアを有している GeForce GTX 285 プロセッサを 3 基用いた計算機を使用した。また、熱伝導解析の結果、全温度ステップ数は 56,320 となり、全ステップを GPU を用いた並列化理想化陽解法 FEM により解析を行った。

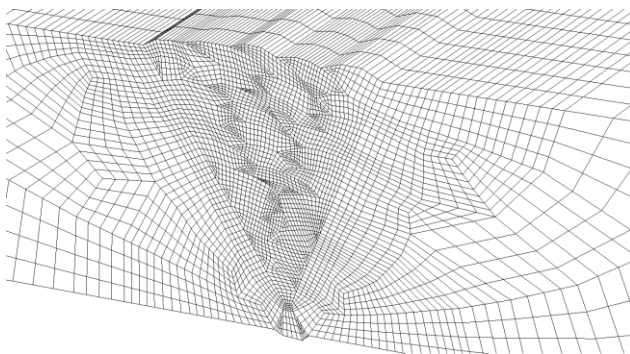
#### 4. 2 大規模移動熱源多層溶接の解析結果

Fig. 5 に溶接中央断面および中央断面から終端側表面部における溶接線方向応力  $\sigma_y$  の分布を示す。同図(a) は 1 パス溶接終了時における溶接線方向応力  $\sigma_y$  の分布を示し、(b)から(f)はそれぞれ、8 パス、15 パス、22 パス、29 パス、33 パス終了時における  $\sigma_y$  の分布を示す。同図より、パスが進むに従い、肉盛が行われ、応力分布が詳細に解析されている様子が確認できる。その特徴としては、溶接直後のパスの肉盛部近傍において、比較的高い応力が生じていることが確認できる。なお、本章における、自由度数 1,283,205、節点数 427,735、33 パスの移動熱源の変形・応力解析に要した計算時間は約 108 時間であり、実用上十分可能であると言える。

表面部および裏面部の多層溶接時におけるこのような応力は、原子炉配管溶接時における応力腐食割れや、各種構造物の遅れ割れおよび疲労き裂の原因になる場合があり、本章における解析のように、パス毎の溶接過渡状態における応力挙動を詳細に検討することは重要と考えられることから、本手法の有用性を示す事ができたと言える。



(a) Overall mesh division



(b) Zoomed mesh division

Fig. 3 FE mesh division of multi-pass welding model.

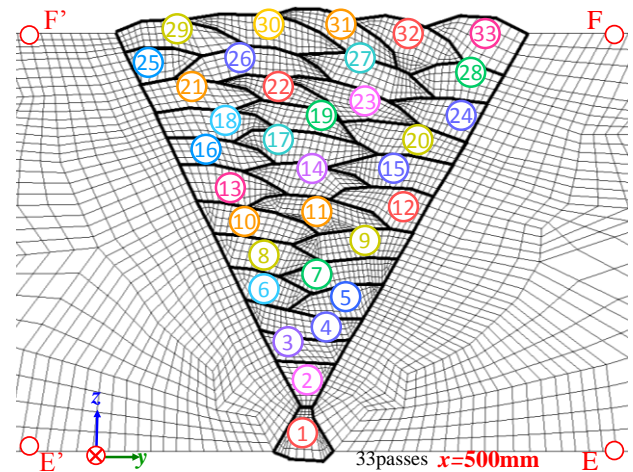


Fig. 4 Welding sequence of multi-pass welding.

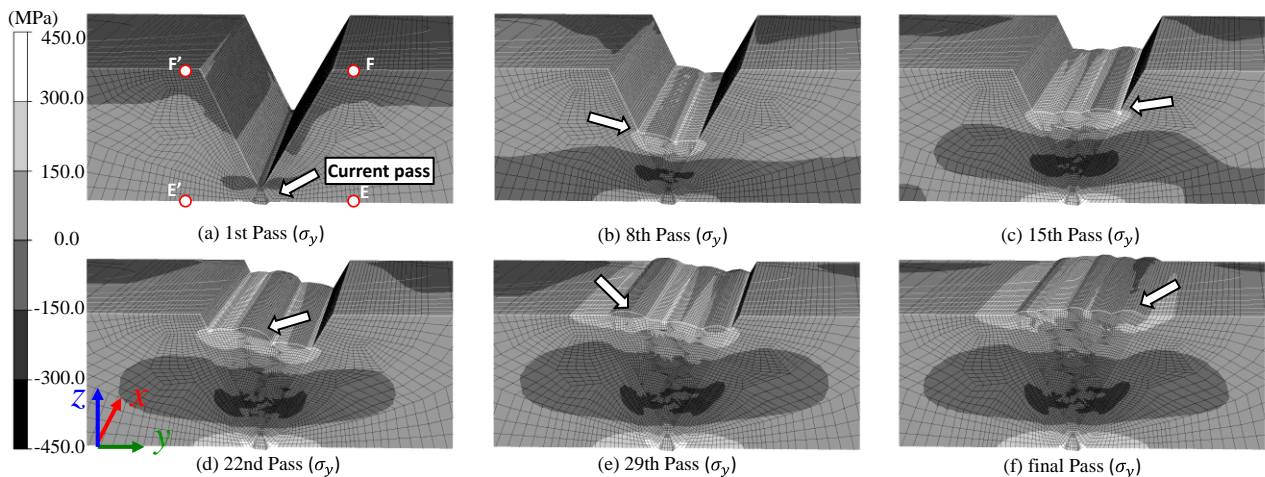


Fig. 5 Distribution of stress  $\sigma_y$  at interpass temperature on transverse cross section.

## 5. 船体二重底ブロックの溶接組み立て工程の解析

### 5. 1 解析モデル及び溶接条件

本解析ではバルクキャリアの船体二重底ブロックの建造工程を模擬した解析を実施した。解析においては、GPUを用いた並列化理想化陽解法に対し、新たに、反復サブストラクチャー法を適用した手法を用いた。

バルクキャリアなどの大型船体の建造においては、部材の切り出しにはじまり、小規模な部材同士を溶接する小組工程、小組工程により作成された部材同士を溶接し大型ブロックを製作する大組工程を経て、最後にドック内にて大型ブロックを船体へ搭載するといったブロック建造方式が主流である。本解析では、このうち、二重底ブロックを建造する際の小組工程と大組工程を解析対象とし、溶接工程の過渡の溶接変形・応力を、開発手法を用いて詳細に解析する。解析モデルは Fig. 6 に示す通り、総要素数は約 440 万要素、総自由度数は約 1650 万である。解析上の組み立ては同図に示すような以下の順序で行った。

1. スキンプレートと補剛材を溶接する小組工程 (Fig. 6 中の sub-assembly 1, 2, 3, 4)
2. 小組によって得られた部材に対して、ロンジ材、トランス材を溶接する大組工程 (同 assembly 1, 2)
3. 大組で得られた部材同士を溶接し二重底ブロックを建造

なお、部材同士を溶接する際は、十分に仮付けがなされているものと仮定した。また、Fig. 6 の小組工程 1, 2, 3, 4 に関しては、それぞれが互いに影響を持たない工程であるので、4 台の計算機を用いて並列に解析を行い、次の工程である大組においては、使用する小組部材の解析により得られた変位や応力を計算機上で統合してから解析を行った。大組工程 1, 2 に関しても同様のことが言えるので、この工程に関しても 2 台の計算機を用いて解析を行い、最終的には 1 台の計算機上で大組 1, 2 の解析データを統合し、二重底ブロックの解析を行った。

### 5. 2 解析結果

Fig. 7 に小組工程 1~4 が終了した段階における部材の変位分布を示す。小組工程 1, 2 はともに補剛材とスキンプレートを溶接する工程であり、比較的小さい入熱量での溶接となるため、数 mm 程度の変形となっていることが分かる。また、小組工程 1 と 2 はほぼ同等の溶接条件であるため、同様の変形傾向を示している。また、小組 3, 4 に関しても、補剛材とスキンプレートを溶接するのみであるため、比較的小さな変形となっていることが分かる。また、小組 3 は曲り部を有しているため、溶接始端側の曲り部が内側にたわむなど、他の部材とは若干異なる変形挙動がみられる。

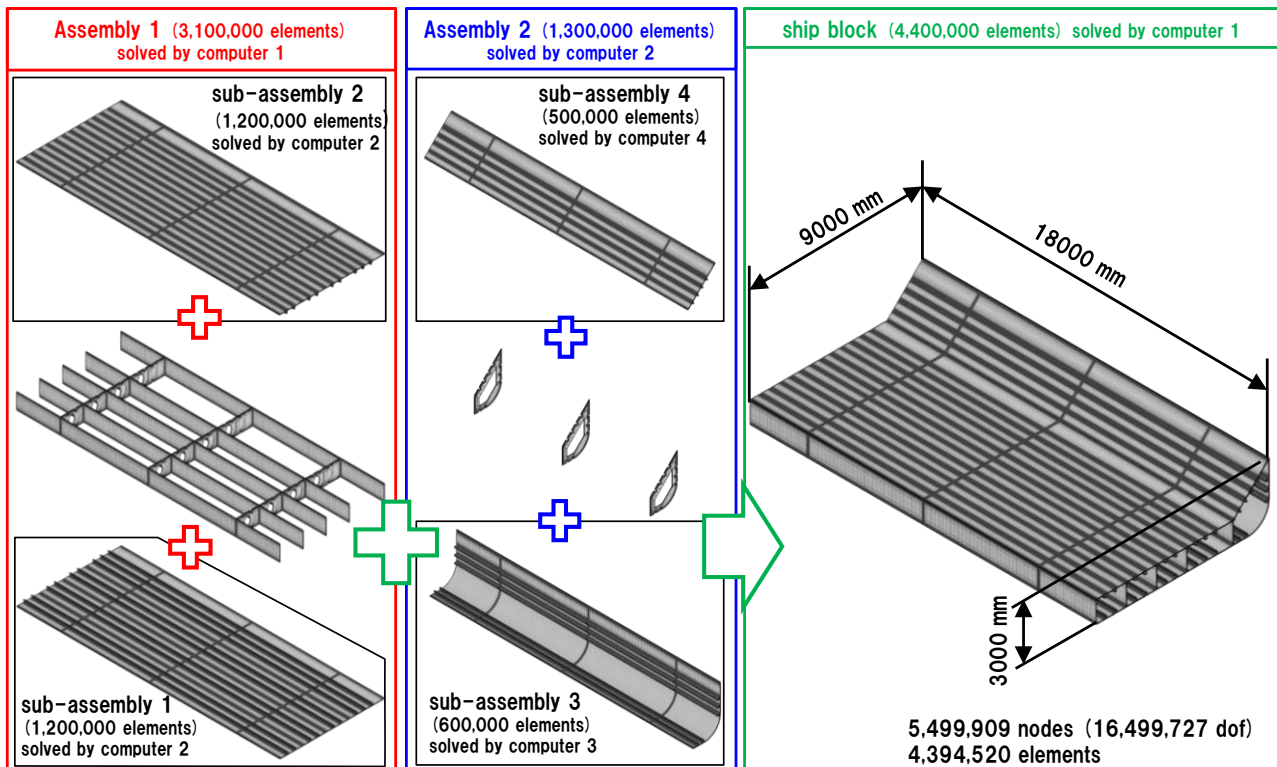


Fig. 6 Analysis model and assembly sequence of ship block model.

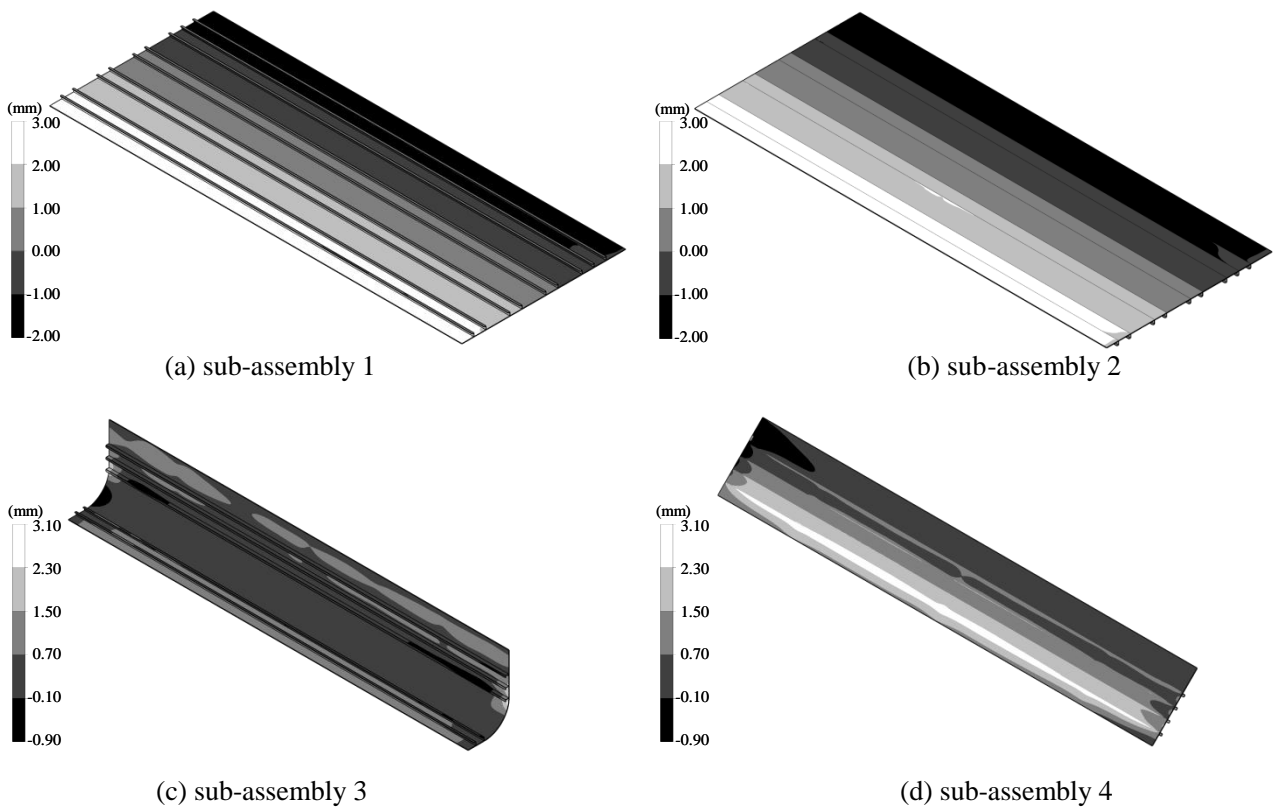


Fig. 7 Distribution of displacement after sub-assembly 1-4.

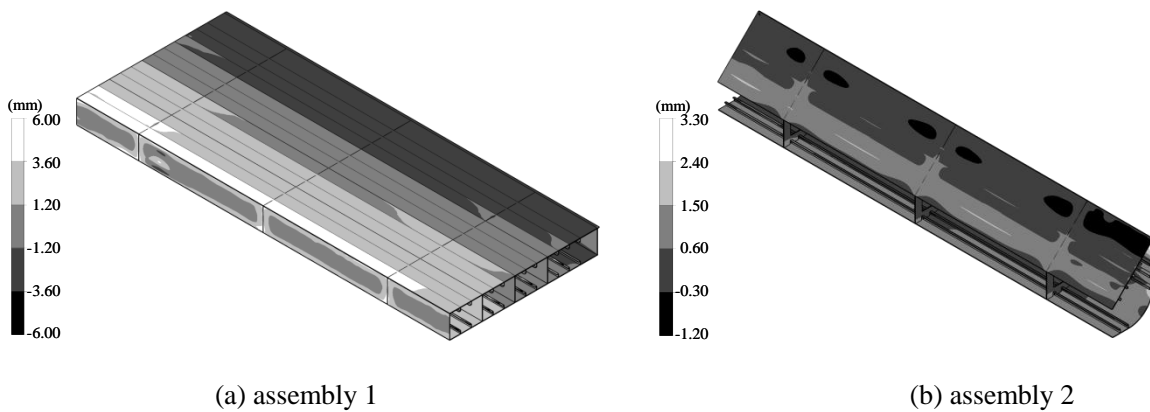


Fig. 8 Distribution of displacement after assembly 1-2.

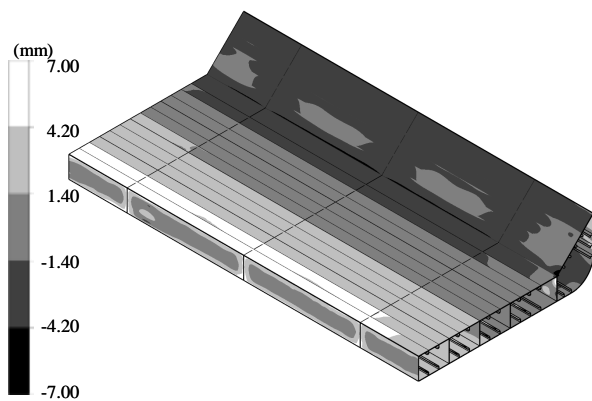


Fig. 9 Distribution of displacement all assembly.

以上の小組工程を経て、小組部材同士を溶接する大組の解析結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 (a)は小組 1 と小組 2 にロンジ材及びトランス材を溶接し、大組 1 の組立工程が終了した段階における変形分布を示したものである。同様に、Fig. 8 (b)は小組 3 と小組 4 にトランス材を溶接し、大組 2 の組立工程が終了した段階での変位分布を示したものである。Fig. 8(a), (b)より、大組 1, 大組 2 共に、小組工程における変形量に比べ、大組工程後の変形量の方が大きくなっていることが確認できる。

最後に、大組 1, 2 を溶接し二重底ブロックを組上げた際における変位分布を Fig. 9 に示す。同図より、ブロック同士を溶接することで、大組工程よりも大きな変形が生じており、また、その量は、y 方向変位量において最も大きくなることが確認できる。な

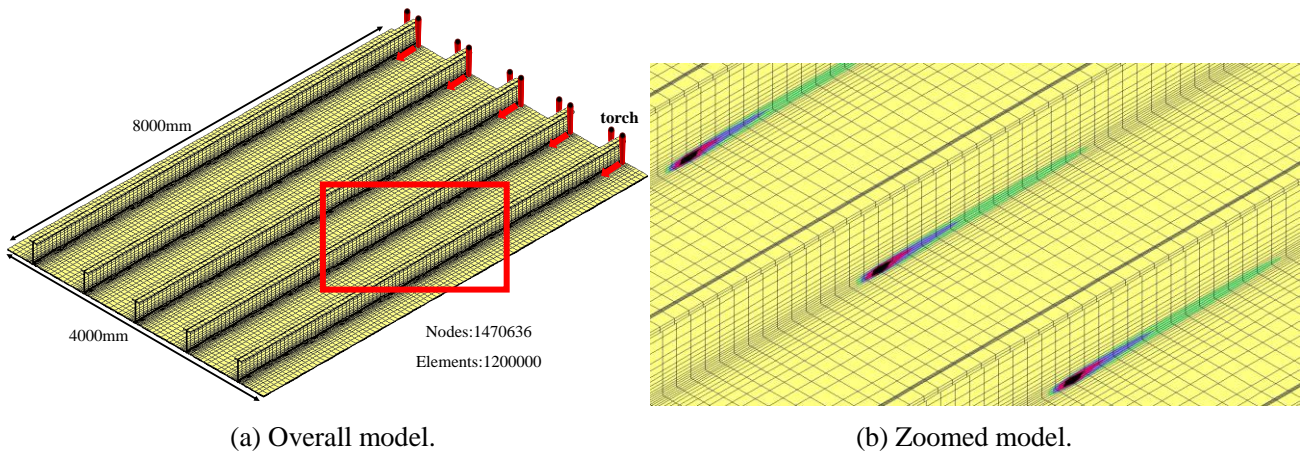


Fig.10 Temperature distribution of the ship plate model.

お、全工程の解析に要した計算時間は、約 11 日であり、約 550 万節点、全 69 パスの熱弾塑性解析においても、実現可能な計算時間で解析可能であることが示された。このことより、開発手法を用いることで、これまで実現不可能であった 500 万要素を超えるような超大規模溶接変形問題を解析することができた。

### 5. 理想化陽解法の熱伝導問題への適用

解析全体の高速化を達成するためには、温度場の逐次予測に関しても高速化、省メモリ化を行う必要があると考えられる。そこで、本研究では熱伝導解析に対しても理想化陽解法 FEM を適用することで、大規模問題においても高速に温度場を解析することが可能な手法を開発した。本章では約 150 万節点の移動熱源非定常熱伝導解析に開発手法を適用し、開発手法の大規模モデルへの適用可能性を示す。

解析対象は、船体の外板の自動溶接を想定した大規模構造物モデルである。本解析モデルは縦 8,000mm、幅 4,000mm のスキンプレートに対して、補剛材を 5 本の両側を同時隅肉溶接で接合するものである。本解析ではこのモデルを要素数 1,200,000、節点数 1,470,636 に要素分割し解析を行った。また、本解析には、CPU が Intel Xeon 2.53 GHz、メモリが 32 GByte の計算機を使用した。

Fig. 10 に溶接開始より 400 秒後の温度分布を示す。同図より、本手法を用いることで、節点数が 150 万を超える解析の過渡の温度分布が良好に解析できていることが分かる。

以上の解析に要した計算時間は約 50 時間であり、現実的な計算時間で解析を終えることができた。

### 6. 計測結果との比較による理想化陽解法 FEM の妥当性検証

GPU を用いた並列化理想化陽解法 FEM の妥当性について検証するために、解析結果を固有ひずみ法および DHD 法による計測結果<sup>4)</sup>と比較した。解析対象は、異材多層溶接継手の残留応力問題とした。解析モデルを Fig.11 に示し、溶接順序を Fig.12 に示す。

Fig.13(a)に軸方向（溶接線直角方向）応力分布の比較を示し、同図(b)に周方向（溶接線方向）応力分布の比較を示す。両図より、GPU を用いた並列化理想化陽解法 FEM と固有ひずみ法および DHD 法による計測結果が定量的によく一致していることが確認できる。また、周方向の残留応力の解析結果においても、GPU により並列

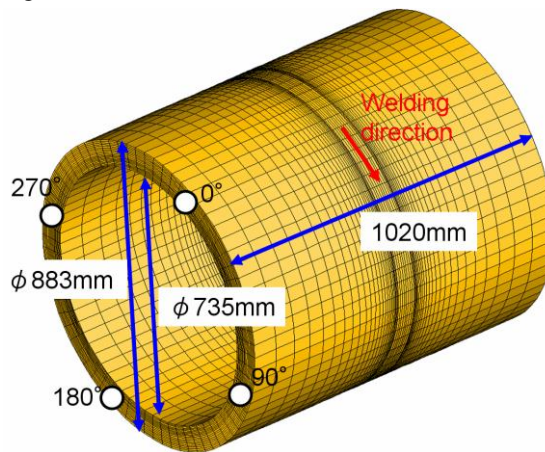


Fig.11 FE mesh division.

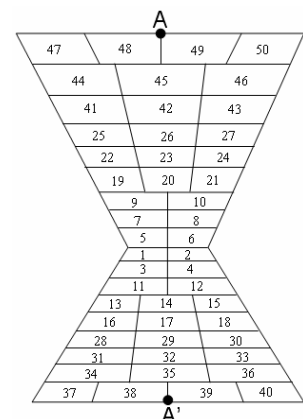


Fig.12 Welding pass sequence of standard type (i).

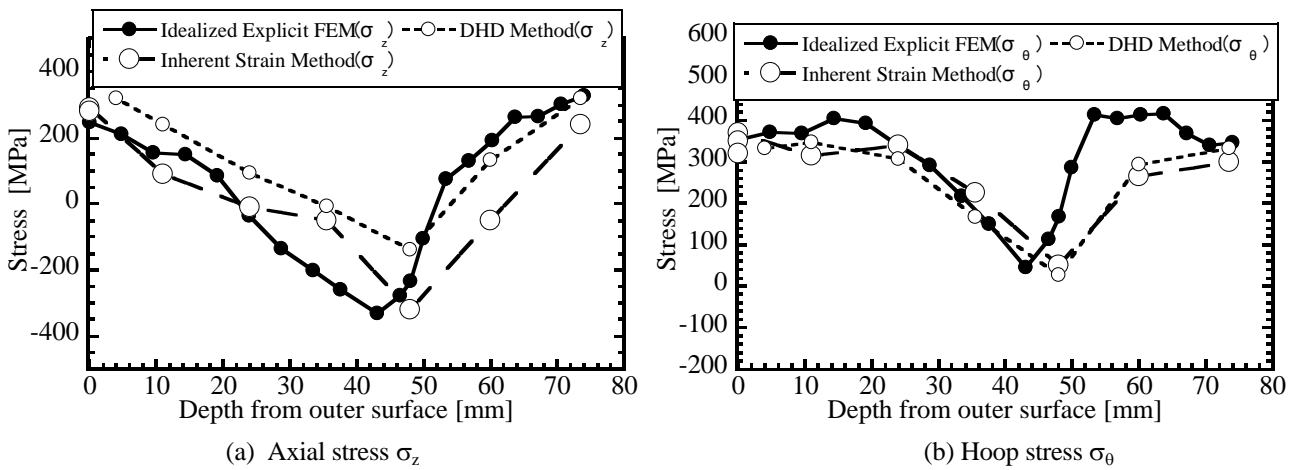


Fig.13 Comparison of stress distribution between measurement and FE analysis

化した理想化陽解法 FEM と二つの実験結果は定量的に一致していることがわかる. これより GPU を用いて並列化した理想化陽解法 FEM は多層溶接継手の残留応力解析が良好な精度で解析可能であることを示すことが出来た.

## 7. 計算時間およびメモリ使用量の比較

本章では, 理想化陽解法 FEM の性能について評価するため, ビードオンプレート溶接問題を対象とした計算時間およびメモリ使用量の比較を行った. 計算に用いた GPU は, NVIDIA GeForce 285GTX で, 計算ユニット数は 240 である. 計算時間は, 解析開始から 100 温度ステップまでの解析時間とした. Fig.14 および Fig.15

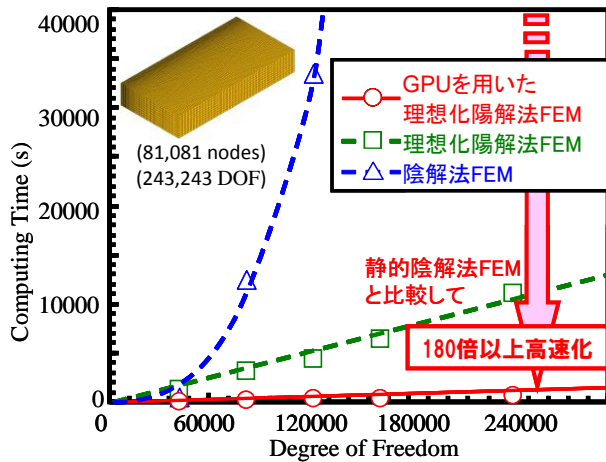


Fig.14 Comparison of computational time.

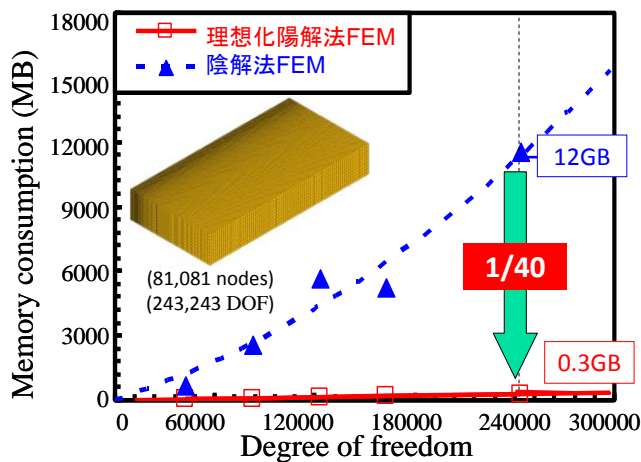


Fig.15 Comparison of memory consumption

にビードオンプレート溶接を対象とした解析時間および使用メモリと解析自由度の関係を示す. これらの結果より明らかなように, 理想化陽解法 FEM はスカイラインソルバーを実装した陰解法 FEM と比べ, 約 8 万節点(約 24 万自由度)の解析において, 解析時間が約 1/180, メモリ使用量が約 1/40 に低減であることが分かり, また, 本手法は, 大規模解析ほど圧倒的に優位であることが分かった.

さらに, 過去 40 年にわたる解析規模について調べた図が Fig.16 である. 同図より, 第 4 章で示した 1650 万という解析規模は, 過去 40 年の解析規模の進化の延長線と比較して 2 桁以上も向上しているこ

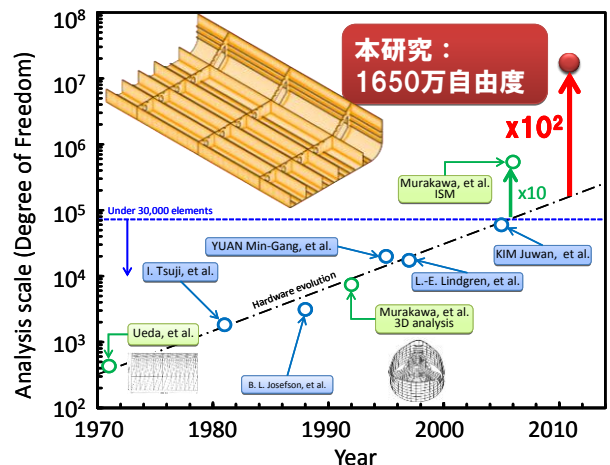


Fig.16 History of analysis scale of thermal elastic plastic FEM

とが分かる。言い換えると、本手法の開発により、約 30 年分の解析規模の向上を果たしたと言える。

## 4. 結 言

本研究では、溶接力学問題の超高速・大規模解析手法として、GPU を用いた並列化理想化陽解法 FEM を開発した。本手法を溶接諸問題に適用し、その有用性および妥当性について検討した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 約 43 万節点、33 パスの円筒異材多層溶接継手の残留応力問題に対し、本手法を適用した結果、約 108 時間で解析することができた。
- 2) 本手法に対し、反復サブストラクチャー法を導入した新しい手法により、船体二重底ブロックの建造工程を模擬した溶接変形問題を解析した結果、同手法を用いる事で、全 69 パス、約 1650 万自由度を有する大規模モデルの溶接変形解析が約 11 日で解析することができた。
- 3) 船体の外板を模擬した 150 万要素を超える大規模モデルの熱伝導解析に、理想化陽解法 FEM を適用した結果、市販の PC 一台のみを用いて移動熱源の 3 次元非定常熱伝導解析を、現実的な計算時間で解析可能であることを示した。
- 4) 円筒異材多層溶接継手の残留応力問題に対し、本手法を適用した結果、解析結果と固有ひずみ法および DHD 法による計測結果が定量的によく一致することが分かった。このことは、提案手法を用いることで、実用上十分な精度で解析可能であることを示唆するものである。
- 5) ビードオンプレート溶接問題に対し、本手法を適用した結果、本手法はスカイラインソルバーを実装した陰解法 FEM と比べ、約 8 万節点(約 24 万自由度)の解析において、解析時間が約 180、メモリ使用量が約 1/40 になることが分かり、また、本手法は、大規模解析ほど圧倒的に優位であることが分かった。

## 参考文献

- 1) M. Shibahara, K. Ikushima, S. Itoh, K. Masaoka: Computational Method for Transient Welding Deformation and Stress for Large Scale Structure Based on Dynamic Explicit FEM, QJWS, Vol.29, No.1, (2011) 1-9 .
- 2) 菊池：有限要素法の数値計算，科学技術出版(1979)
- 3) 藤沢，奥田：計算工学での GPU コンピューティングの現状と課題，計算工学，Vol.15, No.4, 5-6 (2010)
- 4) I. Muroya, Y. Iwamoto, N. Ogawa, K. Hojo and K. Ogawa: Residual Stress Evaluation of Dissimilar Weld Joint Using Reactor Vessel Outlet Nozzle Mock-Up Model (Report-1), ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2008), July 27–31, 2008 , Chicago, Illinois, USA, Paper no. PVP2008-61829 pp. 613-623