

動的陽解法 FEM を基にした大規模構造のための 溶接過渡変形・応力解析手法の提案*

柴原 正和**, 生島 一樹***, 伊藤 真介****, 正岡 孝治*****

Computational Method for Transient Welding Deformation and Stress for Large Scale Structure Based on Dynamic Explicit FEM*

by SHIBAHARA Masakazu**, IKUSHIMA Kazuki***, ITOH Shinsuke**** and MASAOKA Koji*****

In the analysis of welding mechanics, it is difficult to analyze large-scale structures because of welding-specific moving local nonlinearity. In this research, the authors proposed a new numerical method for welding mechanics based on the Dynamic Explicit FEM. In the proposed method, the temperature step is divided into hundreds of time steps as implicit FEM and the displacements are computed for each time step based on dynamic explicit FEM until the whole system reaches the static equilibrium state. And, to achieve the static equilibrium state faster, modified mass and damping matrix are introduced. The modified mass and damping matrix are based on the Courant condition and the vibration theory, respectively. The proposed method and static implicit FEM are compared at the final path of multilayer welding of thick bead-on-plate to verify validity and accuracy. The transient and residual deformation and stress distribution of the proposed method show good agreement with those of static implicit FEM. In addition, the computing time and memory consumption of the proposed method are 1/12 and 1/40 times shorter than those of static implicit FEM, respectively, in 243,243 degree of freedom model. It is found that the proposed method has an advantage in large-scale analysis whose nodal points are more than tens of thousands.

Key Words: Welding mechanics, Transient phenomenon, Numerical analysis, Thermal-elstic-plastic analysis, Dynamic explicit FEM, Static implicit FEM, Large scale structure

1. 緒 言

近年におけるコンピュータの演算能力および解析技術の著しい発展に伴い、実用構造物の力学解析に有限要素法 (Finite Element Method, 以下, FEM) をはじめとする数値シミュレーションがよく用いられるようになってきた^{1, 2)}。数値シミュレーションを用いることで、解くべき工学問題の物理的な状態を事前に把握することが可能となるため、研究のみならず設計段階においても幅広く導入されてきている。

しかし、溶接問題への適用を考えた場合には、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例が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、また、角

変形を含めた3次元応力・ひずみ・変形挙動を静的陰解法 FEM により解析する際には、メモリ使用量および計算時間の制約により、問題が生じる場合があるためと考えられている。

一方、衝撃問題等の動的な現象を数値解析する手法として、動的陽解法 FEM^{3, 4)}がある。この手法では、個々の節点に対して離散化された方程式を解くため、構造物全体に亘る大きな剛性マトリックスを作らなくて済み、メモリ使用量が少なく済むことから、大規模構造への適用が可能である点が大きな特徴として挙げられる。しかし、動的陽解法 FEM の解析では、クーラン条件と呼ばれる制約により、1ステップの解析において (応力の伝播速度) × (解析における時間増分) が最小有限要素を超えないように時間増分を決定する必要があるため、時間ステップ数が増大し、計算時間が増加する。そのため動的陽解法 FEM は溶接問題における冷却過程のような時間スケールの大きな問題には不向きであると考えられている⁵⁾。そこで本研究では、この点を克服することで、この動的陽解法 FEM を基に、大規模溶接構造問題を高速かつメモリ使用量を大幅に減少させた、新しい解析手法の開発を行った。通常、溶接問題によく用いられる静的陰解法 FEM では、動的効果を表す慣性力および減衰力の影響がきわめて小さいと仮定し、解析対象となる現象を静的なものとして解析を行っている。開発手法においては、通常行われている静的解析に対して、慣性項、減衰項を付加し、これらの影響が十分に小さくなり、静的平

*受付日 平成22年3月26日 受理日 平成22年10月26日 平成21年度春季全国大会で発表、溶接構造シンポジウム2009で発表

**正員 大阪府立大学大学院 Member, Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

***学生員 大阪府立大学大学院 Student Member, Graduate School of Engineering, Osaka University

****正員 大阪大学大学院 Member, Graduate school of Engineering, Osaka Prefecture University

***** 正岡技術開発 Masaoka Technical Development

衡状態を満たすまで、動的陽解法に基づき解析を行い、荷重ステップ毎に静的解への収束計算を行う方法を考えた。こうすることにより、メモリ消費量の少ない動的陽解法 FEM を用いながら、静的平衡状態を保持する解析が可能となった。

本研究では、以上の手法を基礎溶接問題の解析に適用することにより、本手法の妥当性および有用性について検討を行った。その結果、開発した手法は、従来手法である静的陰解法 FEM と比べて、解析精度の点でほとんど差はなく、計算時間およびメモリ消費量の面において非常に有利であるという結論が得られた。

2. 大規模構造のための解析手法の開発

溶接残留変形・応力、また、それらに至る過渡現象を解析する際には、一般に、溶接現象を慣性力が無視できる程度に小さい準静的な現象と捉え、静的陰解法 FEM を用いて熱弾塑性解析を行うことが多い⁶⁾。しかし、静的陰解法 FEM は要素数の 2~3 乗に比例して計算時間やメモリ消費量が増加するため、解析規模において制約を受ける⁷⁾。そこで本研究では、静的陰解法 FEM における溶接現象の温度変化に伴う各荷重ステップを動的な問題と捉え、計算時間およびメモリ消費量を大幅に低減できる解析手法を提案する。まず、Fig. 1 に示すように、静的陰解法 FEM における荷重ステップを動的陽解法 FEM における時間ステップに分割し、各時間ステップにおいて、動的陽解法 FEM に基づき変位を計算する。そして、各荷重ステップにおいて、系全体の静的釣り合い状態が得られたときに次の荷重ステップに進むといった手法を採用する。

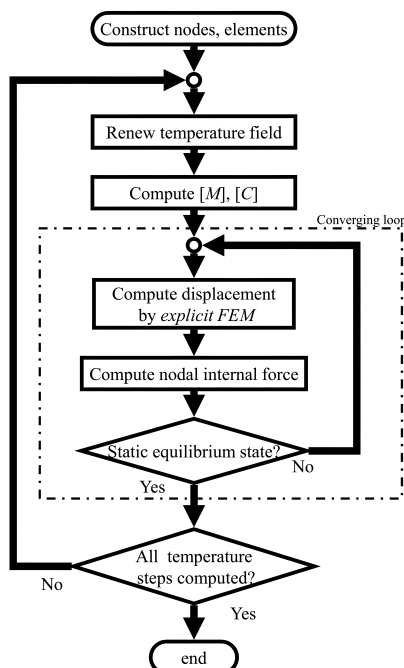


Fig. 1 Computing flow of developed method.

本章では、提案手法で用いた動的陽解法 FEM の基礎理論を示すとともに、手法の詳細について示す。

2.1 動的陽解法 FEM

FEM による動的解析手法には大きく分けて、陰解法と陽解法の 2 つがある。これらの違いは時間微分項の離散化の方法によって解くべき平衡方程式の解法が異なる点である。陰解法では一般的に、Newmark の β 法や Wilson の θ 法を用いて基礎方程式を離散化することにより、最終的に導かれる節点変数と同程度の規模の多元連立一次方程式を解く必要がある。一方、陽解法 FEM では連立方程式を解く必要は無く、その基本原理は次の通りである⁸⁾。

まず、節点変位ベクトル $\{u\}$ を用いて、中心差分により節点速度ベクトル $\{\dot{u}\}$ および節点加速度ベクトル $\{\ddot{u}\}$ を離散化する。

$$\{\ddot{u}\}_t = (\{u\}_{t+\Delta t} - 2\{u\}_t + \{u\}_{t-\Delta t})/\Delta t^2 \quad (1)$$

$$\{\dot{u}\}_t = (\{u\}_{t+\Delta t} - \{u\}_{t-\Delta t})/(2\Delta t) \quad (2)$$

ここで、 t は時刻、 Δt は時間増分を示し、 $\{u\}_{t-\Delta t}$ 、 $\{u\}_t$ 、 $\{u\}_{t+\Delta t}$ はそれぞれ時刻 $t + \Delta t$ 、 t 、 $t - \Delta t$ における変位を示す。式 (1)、式 (2) を次式 (3) に示す平衡方程式に代入し、式 (4) を得る。

$$[M]\{\ddot{u}\}_t + [C]\{\dot{u}\}_t + [K]\{u\}_t = \{F\}_t \quad (3)$$

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2}[M] + \frac{1}{2\Delta t}[C]\right)\{u\}_{t+\Delta t} = \{F\}_t - \left([K] - \frac{2}{\Delta t^2}[M]\right)\{u\}_t - \left(\frac{1}{\Delta t^2}[M] - \frac{1}{2\Delta t}[C]\right)\{u\}_{t-\Delta t} \quad (4)$$

ここで、質量マトリックス $[M]$ と減衰マトリックス $[C]$ が節点集中型、すなわち、対角成分のみ非零であると仮定すると、式 (4) のマトリックス演算は、もはや連立方程式ではなく、過去の時間ステップにおける変位量 $\{u\}_t$ および $\{u\}_{t-\Delta t}$ を代入することで、変位ベクトル $\{u\}_{t+\Delta t}$ を求めることができる。このことにより、計算規模が大きくなればなるほど陰解法と比べて計算時間が小さくなり、また、全体剛性マトリックス $[K]$ を記憶する必要もなくなるので、使用メモリも大幅に小さくなるといえる。

2.2 動的陽解法 FEM を基にした大規模構造のための溶接過渡変形・応力解析手法の提案

前節における説明の通り、動的陽解法 FEM では節点変数毎に定められる式 (4) を計算することで時間ステップを進める。しかし、溶接変形問題のように、現象の持続時間が長い問題に対し、動的陽解法 FEM を適用する場合には、クーラン条件と呼ばれる解析における時間増分値の制限により、計算時間が非常に長くなるという問題が生じる⁹⁾。これは、1 ステップの解析において、(応力波の伝播速度) × (解

析における時間増分) が最小有限要素サイズを超えないように時間増分を決定する必要があるためであり、本研究では、この点を克服することで、動的陽解法 FEM を現実的な計算時間で溶接問題に適用する方法を考えた。

既往の溶接力学解析¹⁰⁻¹²⁾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、式 (3) 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。

本研究で提案する手法においても、通常の静的解析と同様に、熱伝導解析により得られた温度増分により発生する荷重を外力として用いる。そして、Fig. 2 に示すように、この温度増分による荷重を式 (4) に与え、次節で示す収束性を高めるために調整を行っ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各時間ステップにおける変位を求め、各荷重ステップにおいて変位が収束するまで式 (4) の計算を繰り返す。このとき、各時間ステップにおいては、静的陰解法 FEM における反復計算と同様に、応力、塑性ひずみなどの物理量の更新は行わず、慣性項と減衰項の影響が無視できる程度に小さくなり、かつ、解析対象が静的平衡状態を満たす場合にのみ解が収束したものとみなし、物理量の更新を行う。このような手法をとることで、慣性項と減衰項を付加したことによる動的効果を抑えることができ、静的陰解法 FEM と同等の解を得ることが可能になると考えられる。本研究においては、この収束条件に関して、慣性力ベクトル、減衰力ベクトルのノルムと拘束節点反力ベクトルのノルムの比により動的効果の評価を行い、残差力ベクトルのノルムと拘束節点反力のノルムの比により静的平衡状態の評価を行うものとした。

また、動的陽解法 FEM を用いて、加熱開始時から完全冷却時までを解く場合、後述するクーラン条件によって時間増分は小さい値に制限されるため、溶接線近傍のもっとも小さい要素の寸法が 1 mm であると仮定すると、一般的な軟鋼材の場合で、ヤング率が $E=210(\text{GPa})$ 程度であるから、臨界時間増分が $\Delta t_{dynamic} = 1.9 \times 10^{-7}(\text{s})$ 程度となり、一般的に

溶接現象における加熱開始時から完全冷却時までの経過時間を 1 時間程度であると仮定すると、質量スケーリングなどの解析上の技法を用いない限り、約 1.9×10^{10} の膨大な時間ステップが必要となる。また、一般的な動的陽解法 FEM では、収束計算を行わないので、精度面での問題もある。一方、提案手法では、静的陰解法 FEM と同様に、熱伝導解析により得られた温度増分 ΔT_{static} を用いて解析を行い、1 荷重ステップにおいて、およそ数百程度の時間ステップで静的平衡状態へと収束する。一般に、静的陰解法 FEM における溶接 1 パスあたりの解析に必要な荷重ステップ数は、現状では数千程度であると考えられるので、解析全体に要する時間ステップ数はこれらの積より、多く見積もった場合でも数十万回程度であることがわかり、動的陽解法 FEM と比較して、十分に高速であるといえる。なお、提案手法においては、熱伝導解析により得られた温度増分ベクトルの絶対値の最大値が ΔT_{static} を超える場合には、その最大値が ΔT_{static} 以下となるよう節点の温度増分ベクトルの再分割を行い、冷却過程においては、最大温度増分の絶対値がほぼ一定となるよう時間増分を制御しており、本研究においては、 ΔT_{static} を一般的によく用いられる $20(\text{C})$ とした。この方法により、荷重負荷速度を小さく抑えることができる。一方、提案手法は大規模な連立方程式を構築・求解する必

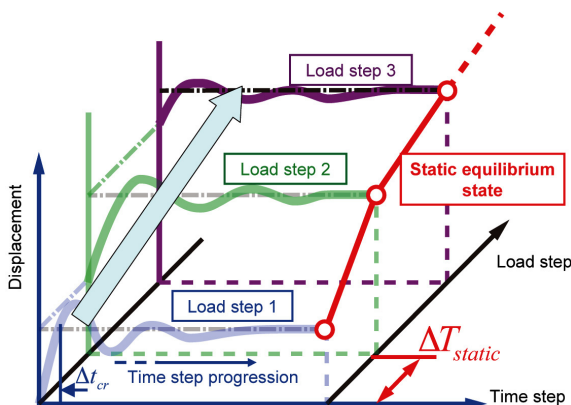
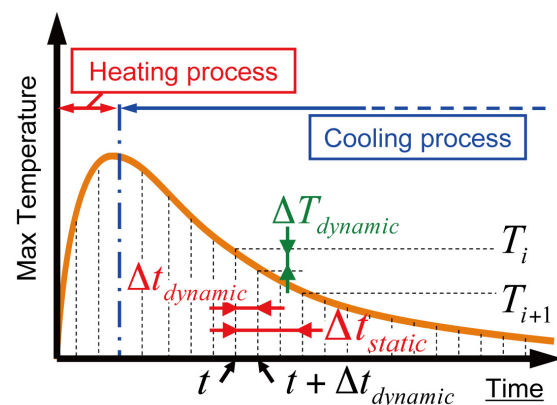
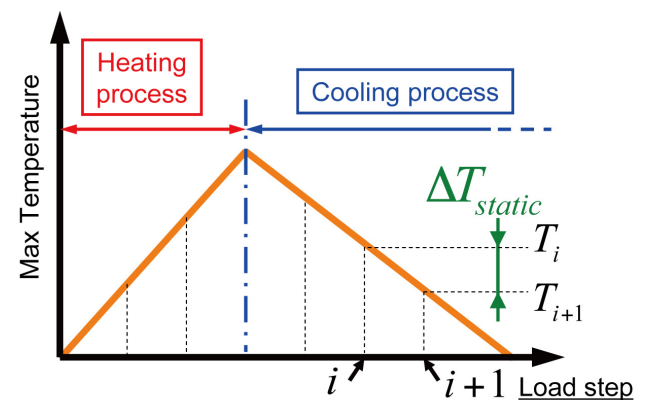


Fig. 2 Concept of Proposed method.



(a) Dynamic explicit FEM



(b) Proposed method

Fig. 3 Schematic illustration of time increment $\Delta t_{dynamic}$ in dynamic explicit FEM and Δt_{static} in proposed method.

要がないため、提案手法と静的陰解法 FEM を比較すると、自由度数が数万を超えるような大規模な解析になるほど、計算時間、メモリ消費量に対する提案手法の効果が大きくなると考えられる。なお、詳細については第 3 章に示す。

以上のような手法をとることで、溶接問題、特に数万以上の自由度を有する大規模溶接構造物の過渡変形・応力問題に対して、従来の静的陰解法 FEM と同等の解析精度を実現し、計算時間の短縮、並びに省メモリ化を実現できるものと考えられる。

2.3 質量マトリックス・減衰マトリックスの決定

提案手法では、各温度増分において静的平衡状態に達するまで繰返し計算を行う。その際に必要な計算ステップ数をできるだけ少なくするために質量マトリックス $[M]$ および減衰マトリックス $[C]$ の調整を行う。本節では、その導出について説明する。

まず、通常の動的陽解法における質量マトリックスについて考える。通常の動的陽解法 FEM では、次式に示すクーラン条件により、1 ステップ当りの限界時間増分 Δt_{cr} が制約を受ける。

$$v = \sqrt{E/\rho}, \quad \Delta l_{\min}/v > \Delta t_{cr} \quad (5)$$

ただし、 v は応力波の伝播速度、 ρ は密度、 Δl_{\min} は要素における一辺の最小サイズである。式(5)では限界時間増分 Δt_{cr} が要素の応力波伝播速度 v と要素における一辺の最小サイズ Δl_{\min} の関係により制限されるため、通常、限界時間増分 Δt_{cr} は要素サイズに依存する。特に、溶接力学解析においては溶接線近傍の非線形現象を詳細に解析する必要があることから、溶接線近傍を非常に密な要素分割とするのが一般的である。そのため、溶接線近傍の要素サイズが小さくなるため、限界時間増分 Δt_{cr} が小さくなり、計算ステップ数が膨大となる。そこで、本節では、この問題に対処するため、比較的少ない計算ステップ数で変位を収束させることを可能とする質量マトリックスおよび減衰マトリックスの決定方法を提案する。

上述の通り、クーラン条件より、1 ステップの限界時間増分 Δt_{cr} は要素における一辺の最小サイズ Δl_{\min} および、ヤング率 E 、密度 ρ より式 (5) の制限を受ける。ここで、式 (5) は時間増分の制限値が $\Delta l_{\min}/v$ より大きくなければならぬことを意味しているので、次式により時間増分 Δt_{cr} と要素における一辺の最小サイズ Δl_{\min} および応力波伝播速度 v の関係を与える。

$$\Delta l_{\min}/v = a \Delta t_{cr} \quad (6)$$

ただし、 a は応力波が要素を通過する間に必要な計算回数を意味し、本研究では $a=10$ として要素内の応力の伝播を十分に評価できるようにしている。ここで、式 (5) を用いて、式 (6) を次式のように整理する。

$$a^2 \Delta t_{cr}^2 = \rho \Delta l_{\min}^2 / E \quad (7)$$

ここで、

$$\rho \Delta l_{\min}^2 / E = b \quad (8)$$

と定義すると、式 (6), (7), (8) より次の関係が導かれる。

$$\Delta t_{cr} = \sqrt{b/a} \quad (9)$$

$$\rho = b E / \Delta l_{\min}^2 \quad (10)$$

よって、 Δt_{cr} 、 ρ はヤング率と要素における一辺の最小サイズを用いて表すことができる。ここで、式 (7) を 3 次元方向に拡張し、要素における自由度毎の仮想的な密度を $\rho_i (i: x, y, z)$ と定義することで、3 次元空間の各方向に伝播する応力波成分に対応する要素の各自由度方向毎の最適な密度成分を次式のように求めることができる。

$$\rho_i = a^2 \Delta t_{cr}^2 E / \Delta l_{\min_i}^2 \quad (11)$$

ここで、 $\Delta l_{\min_i} (i: x, y, z)$ は要素の各自由度方向の最小サイズである。続いて式 (11) により求めた要素の各自由度毎に定められた仮想的な密度を用い、次式 (12) に示す積分を実行することにより質量マトリックスを求める。

$$[M] = \int_{V^e} \{\rho_i\} dV \quad (12)$$

ただし、式 (12) の積分は、行成分を対角項に集中させ、節点集中型のマトリックスとする。

以上のように、クーラン条件を基に、質量マトリックスを導出するが、この手法は、要素ごとの質量に対して、ある種のスケールを施しているのと同様であると考えられる。したがって、 a の値によっては、静的平衡状態へ収束するまでの間の慣性項の影響が大きくなり、一時的に大きく塑性が進展する場合があると考えられる。特に、 ΔT_{static} が大きい場合には、荷重の負荷速度が大きくなるため慣性項による影響が無視できないと考えられる。そのため、提案手法では、全ての荷重ステップにおいて、荷重の負荷速度の最大値を一定値以下にすることで、時間ステップ内で生じる慣性力が小さくなるよう工夫した。この方法により、慣性力の影響に伴う新たな塑性の発生を小さく抑えることができると考えられる。

減衰マトリックス $[C]$ は、静的解への収束の速さを重視し、1 次元振動理論を基に決定する。すなわち、1 次元振動理論において、質量を m 、減衰係数を c 、バネ定数を k とするとき、 $c > 2\sqrt{mk}$ で過減衰、 $c = 2\sqrt{mk}$ で臨界減衰、 $c < 2\sqrt{mk}$ で減衰振動であり、臨界減衰において最も速く安定的に変位が静的解に収束することから、これを基に、減衰マトリックスの対角成分を次式のように決定する。

$$c_{ii} = 2\sqrt{m_{ii}k_{ii}} \quad (13)$$

ここで、 c_{ii} 、 m_{ii} 、 k_{ii} はそれぞれ減衰マトリックス、質量マトリックス、要素剛性マトリックスの対角成分であり、減衰マトリックス $[C]$ も、質量マトリックス $[M]$ と同様に対

角マトリックスであると仮定する．要素剛性マトリックスは静的陰解法 FEM と同様，熱弾塑性解析理論¹³⁾に基づき式 (14) より計算される．

$$[K] = \int [B]^T [D] [B] dV \quad (14)$$

ここで， $[B]$ は変位-ひずみ関係， $[D]$ は応力-ひずみ関係を規定するマトリックスであり， $[K]$ マトリックスは，ステップ毎に，ヤング率，降伏応力の温度による変化を考慮した形で表されるため，それを基に作成される $[M]$ マトリックス， $[C]$ マトリックスに関しても，温度により変化するものとして定義される．

以上の方法により，クーラン条件を基に，要素サイズや材料定数の温度依存性をも考慮に入れた質量マトリックス，減衰マトリックスを導出することで，収束に要する時間ステップを削減することが可能になると考えられる．

3. 溶接基礎試験への適用による提案手法の性能評価

本章では，前章で提案された手法の解析精度およびその他の特性について検討するために，多層溶接の最終層を模擬した厚板ビードオンプレート溶接モデルへの適用を行った．

3.1 解析モデル

解析に使用した基本モデルの要素分割図を Fig. 4 に示す．

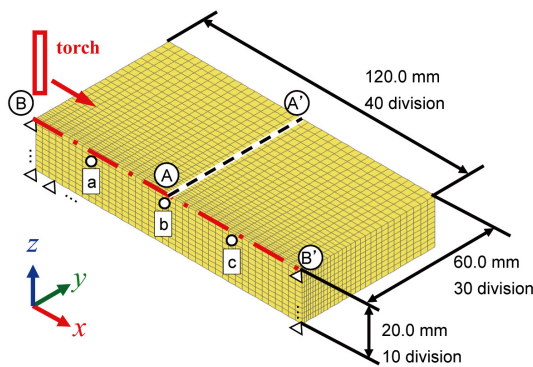


Fig. 4 Analysis conditions and FE mesh division.

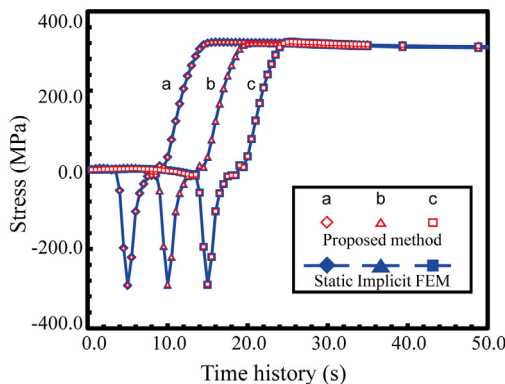


Fig. 6 Time history of stress σ_x .

問題の対称性を利用し，板幅方向に対して半分のみを解析対象とした．要素分割は，溶接線方向 (x 方向) に40分割，板幅方向 (y 方向) に30分割，板厚方向 (z 方向) に10分割であり，板幅方向にのみ溶接線近傍部を細かくした不等分割を採用した．要素数は12000，節点数は13981である．解析に用いた入熱量は， $Q = 180 \text{ J/mm}$ とし，溶接速度を 6.0 mm/s とした．解析対象材料は軟鋼材であり，材料定数の温度依存性は Fig. 5 に示す通りとした．

3.2 過渡応力の精度検証

Fig. 4 中 a, b, c における応力成分 σ_x の時間履歴を Fig. 6 に示す．図中 \diamond , \triangle , \square はそれぞれ Fig. 4 中 a, b, c 点における提案手法を用いた解析結果を示し，図中 \blacklozenge , \blacktriangle , \blacksquare は静的陰解法 FEM における解析結果を示す．同図より a, b, c 各点ともに，溶接トーチ通過直前に圧縮応力が発生し，その後，溶融に伴い応力がほぼゼロとなり，最終的には引張りの残留応力が発生していることがわかる．また，提案手法による解析解と静的陰解法 FEM による解が良好に一致していることも確認できる．

次に，Fig. 6 と同様にして，応力成分 σ_y について比較した図が Fig. 7 である．同図からも，提案手法と静的陰解法 FEM による解析結果が良好に一致していることが確認できる．

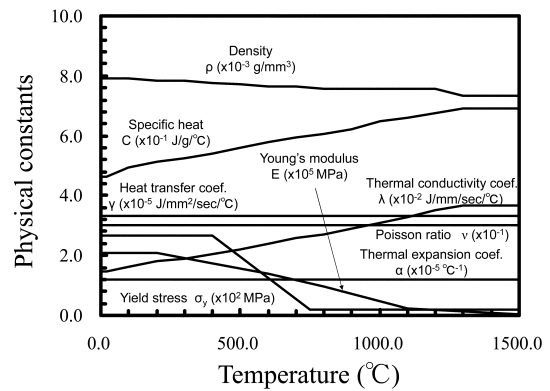


Fig. 5 Temperature dependent physical constants.

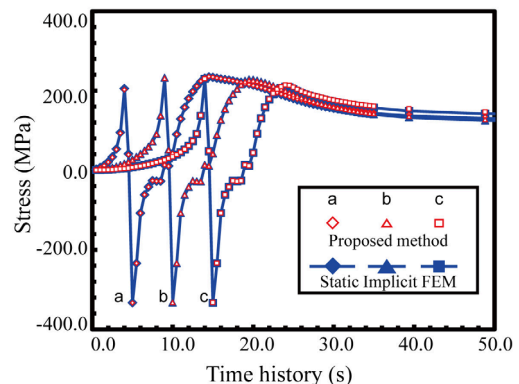


Fig. 7 Time history of stress σ_y .

3.3 残留応力・残留変形の精度検証

Fig. 8 (a), (b) はそれぞれ残留応力の x 方向成分 σ_x および y 方向成分 σ_y の分布を示しており、上図は提案手法による解析結果を示し、下図は静的陰解法 FEM による解析結果を示す。同図(a)より、 σ_x は溶接線上で大きな引張りの残留応力が発生していることが確認できる。また、 σ_y に関しては、溶接線上表面部付近に注目すると、始末端部付近で大きな圧縮応力が発生しており、中央部で引張り応力が発生するという、ビードオンプレート溶接特有の応力分布が得られ

ている。また、提案手法による解析結果と静的陰解法 FEM による解析結果を比較すると、両者はほとんど一致していることが確認できる。

さらに Fig. 9 に、Fig. 4 中の A-A' 部における残留応力の x 方向成分 σ_x および y 方向成分 σ_y の分布を示す。また、同様にして、Fig. 10 には B-B' における残留応力分布 σ_x , σ_y を示す。これらの図より、 σ_x , σ_y 共に、また、A-A' 部、B-B' 部共に、提案手法による解析結果と静的陰解法 FEM の解析結果が定量的に良好に一致しており、本手法の応力解析に

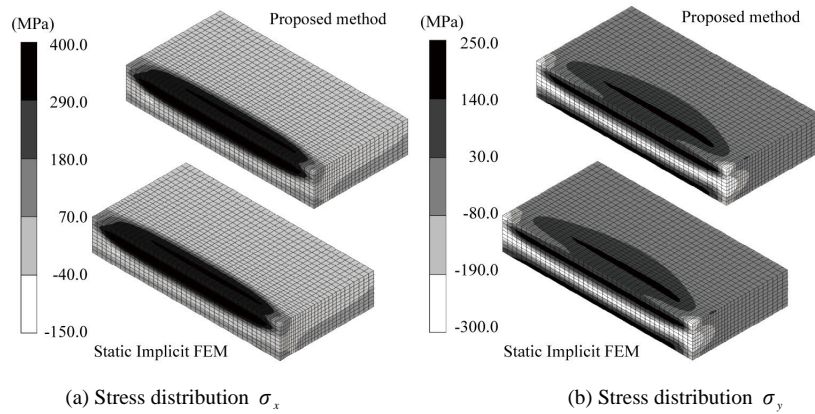


Fig. 8 Comparison between proposed method and existing static implicit FEM on residual stress distribution.

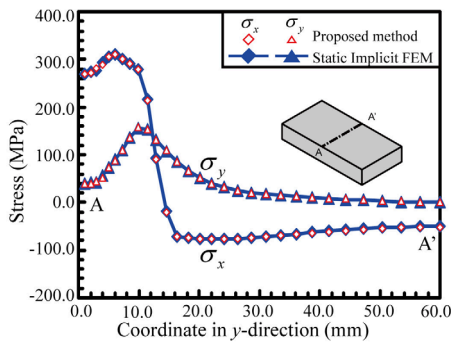


Fig. 9 Comparison of residual stress between proposed method and existing static implicit FEM on the top of transverse cross section.

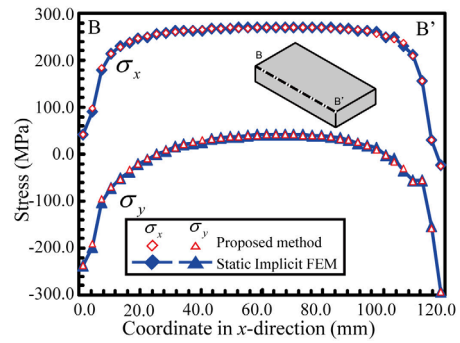


Fig. 10 Comparison of residual stress between proposed method and existing static implicit FEM on the top of welding line.

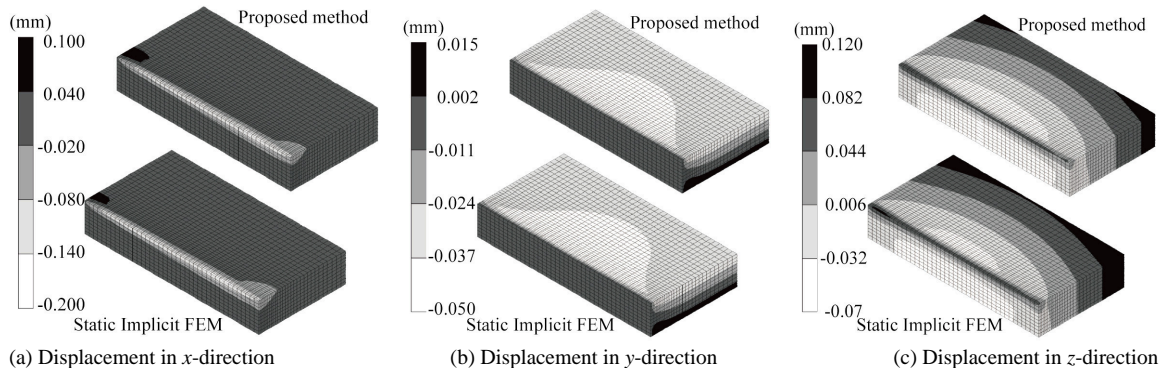


Fig. 11 Comparison between proposed method and existing static implicit FEM on residual deformation distribution.

対する妥当性を示すことができた。

Fig. 11は、残留変位分布の解析結果を静的陰解法FEMと提案手法で比較したものであり、(a), (b), (c)はそれぞれx方向, y方向, z方向変位の分布を示している。Fig. 8と同様に、上図は提案手法による解析結果を示し、下図は静的陰解法FEMによる解析結果を示す。同図(a), (b), (c)より、両解析手法による結果は、残留変形においても、ほぼ一致することが確認できる。

次にFig. 12, Fig. 13, Fig. 14は、それぞれ縦収縮, 横収縮および角変形についての解析結果を提案手法と静的陰解法FEMで比較した結果である。同図より、いずれの変形に関しても、提案手法による解析結果と静的陰解法FEMによ

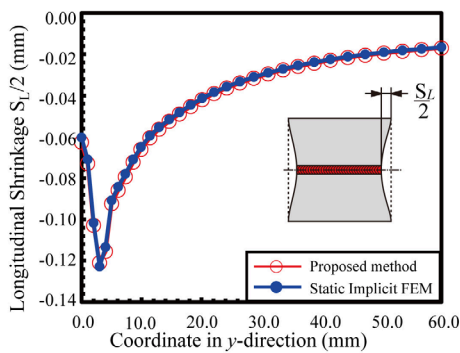


Fig. 12 Comparison of longitudinal shrinkage between proposed method and static implicit FEM.

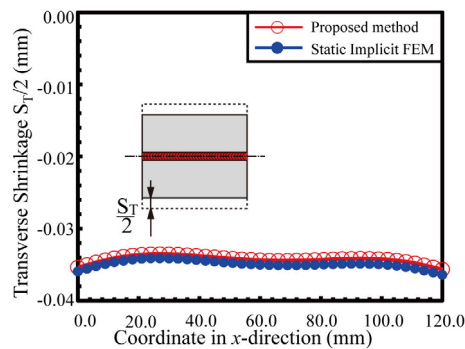


Fig. 13 Comparison of transverse shrinkage between proposed method and static implicit FEM.

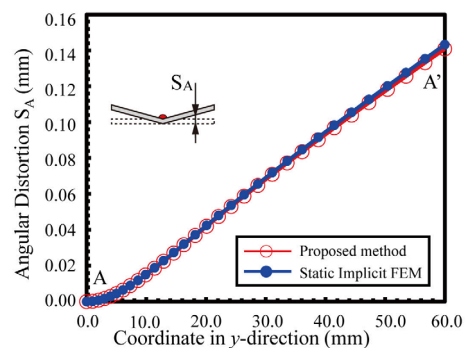


Fig. 14 Comparison of angular distortion between proposed method and static implicit FEM.

る解析結果が良好に一致していることが分かる。

以上の結果より、提案手法による解析結果は、応力, 変形のいずれにおいても陰解法FEMによる解析結果とほぼ一致しており、提案手法は非常に良い精度で解析可能であることを示すことができた。

3.4 計算時間とメモリ消費量

本節では、提案手法と静的陰解法FEMの計算時間およびメモリ消費量に関する比較を行うため、前節と同じ解析モデルを用いて解析を実施する。しかし、計算時間の比較に関して、静的陰解法FEMを用いて完全冷却時まで解析を行う場合、モデルの自由度が数万を超えるような大規模な解析では、全体剛性方程式の求解に要する時間が膨大となり、現実的な計算時間で解析を終えることができない。そこで、本節では、溶融および局部塑性という溶接特有の現象が十分に出現する加熱開始後0.5秒までの解析時間について比較した。解析に用いたモデルの節点数は13981, 27511, 41041, 54351, および84081の5通りとした。解析に用いた要素分割の一例をFig. 15に示す。溶接条件および境界条件は前節の解析モデルと同様である。なお、計算に使用した計算機は、CPUがXeon 2.53GHz, メモリ容量が32GB, OSがWindows XP Professional x64 Editionのものを用いた。また、比較対象とした陰解法FEMプログラムのソルバーにはスカイライン法を適用している。

Fig. 16に、メモリ消費量と節点数の関係を示す。同図より、静的陰解法FEMでは節点数の2~3乗程度に比例してメモリ消費量が増加しているが、提案手法では節点数にほぼ線形にメモリ消費量が増加していることが分かる。特に、節点数が81081のモデルでは、提案手法のメモリ消費量が0.3[GB]となっているのに対して、静的陰解法FEMではおよそ40倍の12[GB]となっていることが分かる。この理由としては、静的陰解法FEMは全体剛性マトリックスを構築する必要がある一方で、提案手法では全体剛性マトリックスを構築する必要がない点が挙げられる。

Fig. 17に、計算時間と節点数の関係を示す。同図より、静的陰解法FEMが節点数の2~3乗程度に比例して計算時

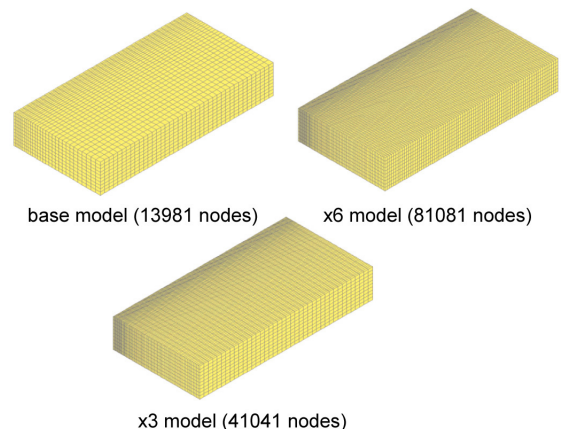


Fig. 15 FE mesh division used in section 3.4.

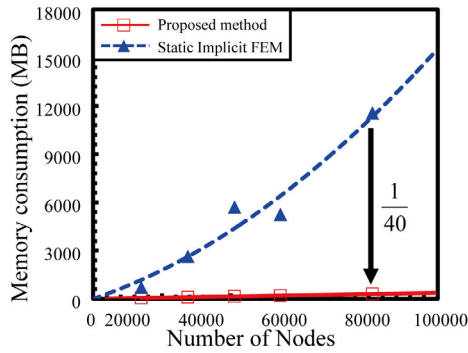


Fig. 16 Comparison of memory utilization between proposed method and static implicit FEM.

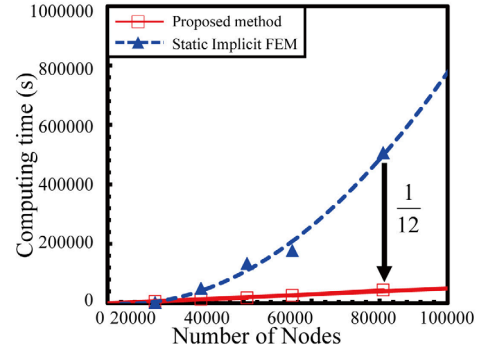


Fig. 17 Comparison of computing time between proposed method and static implicit FEM.

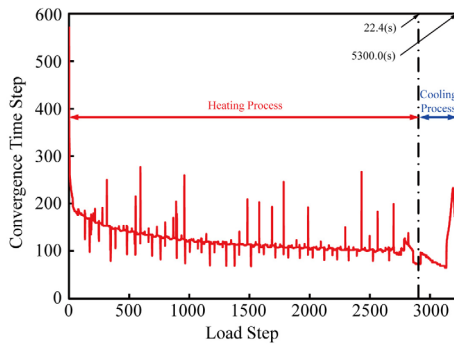


Fig. 18 History of time steps for convergence.

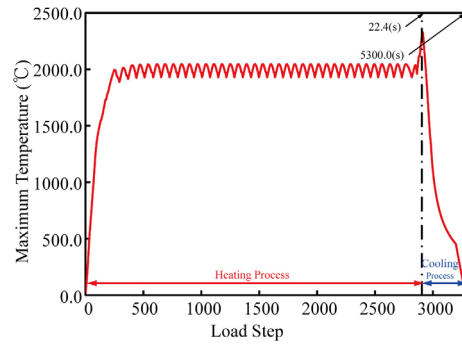


Fig. 19 Maximum temperature history.

間が増加しているのに対して、提案手法ではほぼ線形となっていることが分かる。特に、81081 節点のモデルにおいては、提案手法は静的陰解法 FEM のほぼ12分の1の計算時間となっていることが分かる。

Fig. 18 に節点数 13981 の解析モデルにおける 1 荷重ステップあたりの収束までに要した時間ステップ数と荷重ステップの関係を示す。また、Fig. 19 に荷重ステップに対する最高到達温度履歴を示す。Fig. 18 より、提案手法の収束までに要した時間ステップ数は、塑性計算等の影響により多少のばらつきはあるものの、概ね 200 ステップ未満に抑えられており、解析が進むにつれてその数が少なくなっていることがわかる。これは収束条件として、慣性力ベクトル、減衰力ベクトルおよび残差力ベクトルのノルムの、拘束節点反力ベクトルのノルムに対する比を基に評価したため、解析が進むにつれて、評価基準となる拘束節点反力ベクトルが大きくなるからであると考えられる。また、Fig. 19 より、2900 ステップ以降は冷却過程となっており、これ以降の荷重ステップにおいては、通常の動的陽解法 FEM による解析が事実上困難である、時間スケールが非常に長い現象となる。同図から、提案手法を用いることで、冷却過程においても 1 荷重ステップあたりの収束までに要した時間ステップ数は、200 ステップ程度に抑えられていることが確認できる。これは、提案手法が時間進展に伴う現象の変化を、温度変化による荷重増分の形で与えているためであり、このことから提案手法は、動的陽解法 FEM を基にしている

にもかかわらず、時間スケールの長い現象を短時間で解析することを可能にしていることが分かる。

本節で示すように、従来手法である静的陰解法 FEM は計算時間およびメモリ使用量が節点数の 2~3 乗程度に比例して増加するため、節点数が数十万を越えるような大規模構造の溶接問題を解くことは、たとえ弾性解析においても非常に困難であると言えるが、提案手法では全体剛性方程式を構築・求解する必要がないため、計算時間およびメモリ消費量は、節点数にほぼ比例する程度に十分小さく抑えることができる。このことより、提案手法は、計算規模が大きくなればなるほど、計算時間、メモリ消費量の面から非常に有効であると考えることができ、その将来性に期待が持てる手法である。

4. 結 言

本研究では、溶接構造問題の大規模解析を目的とした手法を開発した。本手法を厚板ビードオンプレート問題に対して適用し、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) 提案手法は、動的陽解法 FEM において解析困難と考えられる、溶接問題の冷却過程のような、現象の持続時間の長い問題に対して、溶接中のみならず、完全冷却に至るまで解析可能であることを示した。
- 2) 厚板ビードオンプレート溶接問題に関して、提案手法を

適用した結果, 過渡応力・変形分布および残留応力・変形分布において, 静的陰解法 FEM と同等の精度で解析可能であることを示した。

- 3) 提案手法および静的陰解法 FEM における計算時間に関して比較を行った結果, 節点数が数万を超えるような大規模な溶接過渡応力・変形解析において, 提案手法は非常に有効であることを示した。
- 4) 提案手法は静的陰解法 FEM と比べて非常に少ないメモリ消費量で解析できることを示した。

参 考 文 献

- 1) Y. Ueda, S. M. H. Rashed: An Ultimate Transverse Strength Analysis of Ship Structures, Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Japan, No. 190, 309-324, (1974).
- 2) Y. Toi, K. Yuge, T. Kawai: Basic Studies on the Crashworthiness of structural Elements Part 1. Crush analysis by the finite element method, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, No. 155, 248-257, (1986).
- 3) S. Kubo, T. Iwamoto, T. Tshuta: Computational Simulation of Impact Deformation Behavior of TRIP Steel by Dynamic-Explicit Elasto-Viscoplastic FEM, SME annual meeting I (01-1), 67-68, (2001). [in Japanese]
- 4) J. Okita, K. Manabe, K. Ueda: 3-Dimensional Simulation of Cutting Process by Dynamic-Explicit Elastic-Plastic FEM : Development of Simulation Method and Application to Turning Process, Journal of the Japan Society of Precision Engineering, 66 (3), 429-433, (2000). [in Japanese]
- 5) M. Tuda, I. Hagiwara: Dynamic-Explicit Finite Element Analysis Methods for Large-deformation Quasi-Static Problems (1st Report, Presentation of Research Theme), Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, 54 (622), 114-121, (1998).
- 6) M.G. Yuan, J. Wang, H. Murakawa, Y. Ueda: Development of Finite Element Program of Three Dimensional Thermal-Elastic-Plastic Analysis and Its Application to Assembly of a Compressor by Welding, Journal of the Japan Welding Society, 13 (4), 628-634, (1995). [in Japanese]
- 7) H. Nishikawa, I. Oda, M. Shibahara, H. Serizawa, H. Murakawa: Three-dimensional Thermal-elastic-plastic FEM Analysis for Predicting Residual Stress and Deformation Under Multi-pass Welding, Proceedings of ISOPE '04, Toulon, France (2004), CD-ROM.
- 8) 矢川 元基: 構造工学ハンドブック, 丸善 (2004), 302.
- 9) S. Sugimoto, Y. Yasuzawa, K. Kagawa: Elasto-Plastic Collapse Behavior of Plate and Shell Structure Components by Dynamic Explicit FEA, The Computational Mechanics Conference, The Japan Society of Mechanical Engineers, 2001 (11), 183-184, (2001). [in Japanese]
- 10) Y. Tajima, S. Itoh, S. Rashed, H. Serizawa, H. Murakawa, Y. Okumoto: Prediction of Panel Buckling Produced in Deck of Car Carrier during Assembly by Welding, Pre-Prints of the National Meeting of JWS, (81), 130-131, (2007). [in Japanese]
- 11) R. Wang, H. Serizawa, H. Murakawa: Thermal Elastic-Plastic FEM Analysis of Typical Welded Joints and Estimation of Inherent Deformations through Inverse Analysis, Pre-Prints of the National Meeting of JWS, (83), 268-269, (2008). [in Japanese]
- 12) M. Mochizuki, A. Tataru, Y. Mikami, M. Toyoda, Y. Izawa: Study on the Calculation Method based on Inherent Strain for the Prediction of Weld Distortion of Car Components, Pre-Prints of the National Meeting of JWS, (83), 272-273, (2008). [in Japanese]
- 13) Y. Ueda, T. Yamakawa: Analysis of Thermal Elastic-Plastic Behavior of Metals during Welding by Finite Element Method, Journal of Japan Welding Society, 42 (6), 567-577, (1973). [in Japanese]