GPU を用いた並列化理想化陽解法 FEM の開発*

生島 一樹**, 伊藤 真介***, 柴原 正和***

Development of Parallelized Idealized Explicit FEM Using GPU*

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

Numerical simulations such as Finite Element Method (FEM) are widely used as tool of structural analyses in both design and production. However, in the application of FEM to welding problems, the simulation scale is usually limited to the welding joint level. Only a few largescale welding analyses are performed on existing research because welding is transient problem and show strong nonlinearity. In such cases, it is necessary to use static implicit FEM to achieve an accurate analysis, but the larger analysis scale requires larger memory consumption and computing time. Thus, we previously proposed Idealized Explicit FEM (IEFEM) to achieve shorter computing time and lower memory consumption.

Since IEFEM is based on dynamic explicit FEM, it is possible to perform the calculation for each degree of freedom (DOF) and element. Such characteristic indicates that IEFEM is suitable for parallelization. Then, in this study, we developed parallelized IEFEM using a graphics processing unit (GPU). The usefulness and validity of the developed method are considered by analyzing a 3-dimensional multi-pass moving heat source problem, which is very difficult to analyze with commercial FEM software because of its analytical scale. As a result, it is found that parallelized IEFEM accelerated by a GPU can analyze a large-scale problem having over 1,000,000 DOFs on a single PC.

Key Words: Multi-pass Welding, Residual Stress, Thermal-elastic-plastic analysis, Idealized Explicit FEM, Parallelization, GPU

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.溶 接問題においては、溶接の力学現象を有限要素法による熱弾 塑性計算で求める研究1,2により、様々な数値計算が行われ、 溶接残留応力や溶接変形の発生機構の解明に関して多くの 研究成果が得られている.しかし、有限要素法を用いた溶接 問題の熱弾塑性計算は、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、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 を用いる必要がある.静的 陰解法 FEM においては, 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.現 在,この問題を解決するために、3次元溶接シミュレーショ ンを高速化する研究が多数行われている3-6. しかしながら,

いずれの手法も静的陰解法 FEM を基にしており、実構造物 クラスの大規模解析においては全体剛性方程式の構築に要 するメモリ消費量が増大し、解析が困難になると考えられ る. そこで, 著者らは, これまでに動的陽解法 FEM (例えば") を基に,溶接の過渡応力,変形問題の解析に最適化した解析 手法の開発により,静的陰解法 FEM と同等の精度を有し,且 つ,高速,省メモリな解析を実現した⁸.本論文では,この手 法を理想化陽解法 FEM と定義する.理想化陽解法 FEM の基 となった動的陽解法 FEM は、その特徴として、系全体に亘る 大規模な連立方程式を解く必要がないという点が挙げられ る.これにより,動的陽解法 FEM は高速かつ省メモリな解析 手法となっており,理想化陽解法 FEM も同様の特徴を持つ. 理想化陽解法 FEM においては、動的陽解法 FEM と同様に、 連立方程式を解く必要がないことから, 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. そ のため、理想化陽解法 FEM は並列化に対して非常に適して おり, 並列化を導入することで一層の高速化が可能になると 考えられる.

一方,リアルタイムのコンピュータグラフィックスを生成 するために,GPU (Graphics Processing Unit) と呼ばれるプロ セッサが用いられている.これまで,GPU は座標変換等の計 算を高速かつ大量に処理するための比較的単純なハードウ ェアだったが,近年のコンピュータグラフィックス技術の進 歩を受け,ある程度の複雑な演算を行える高速な並列プロセ ッサとして進化してきた.加えて,GPU は汎用の部品として 量産されるため,GPU を利用することで,PC クラスタやス ーパーコンピュータなどと比較し,非常に安価に高速な計算

^{*}受付日 平成24年8月8日 受理日 平成25年1月25日 平成 22年4月春季全国大会で発表,平成23年11月溶接構造 シンポジウムで発表

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

^{***}正 員 大阪府立大学大学院 Member, Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

環境を整えることが可能である.そのため,その処理能力を 科学技術計算をはじめとする画像処理以外の計算に利用す る GPGPU (General Purpose computation on GPU) という技術 が発展してきている⁹⁻¹⁰.

そこで,本研究では,理想化陽解法 FEM に対して,GPU に よる並列化を導入することで,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 性およ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100万自由度を超え る大規模な解析を,市販のPC1台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

理想化陽解法 FEM とは、動的陽解法 FEM を基に構造解析 の高速・省メモリ化を実現する解析手法である. ここではま ず,理想化陽解法 FEM の基本原理について簡単に説明する. 動的陽解法 FEM においては、解析中の時間増分を制限す る Courant 条件により,時間増分をきわめて小さな値に設定 する必要がある.そのため、加熱開始から完全冷却するまで の時間スケールが非常に大きい溶接問題の応力・変形の解 析を行う際には、計算ステップが膨大となり、現実的な計算 時間で解析を行うことは困難であると考えられる.一方,溶 接力学解析において,一般的によく用いられる静的陰解法 FEM においては, 各計算ステップにおいて, 系全体の剛性方 程式, すなわち連立方程式を解く必要があり, 解析対象が大 規模または複雑構造物である場合は,計算時間,メモリ消費 量の点で問題となる.加えて、溶接問題を含む非線形解析に おいては、Newton-Raphson 法などに基づき反復計算を行う 必要があることから, さらに計算時間が増大し, 解析を困難 としている. そこで, 著者らは, 溶接変形・応力問題に対し て、動的陽解法 FEM を基に大幅な高速・省メモリ化を実現 した,理想化陽解法 FEM を開発[®]した.理想化陽解法 FEM に おいては,以下の①②③の手順に従い,Fig.1に示すように解 析を進める.

- ① 荷重増分を負荷し、その状態を保持する.
- ② 動的陽解法 FEM の基礎式 (1) に基づき静的平衡状態に 達するまで,変位を計算する.

$$\left[M\right]\left\{\ddot{U}\right\}_{t} + \left[C\right]\left\{\dot{U}\right\}_{t} + \int_{V^{\ell}} \left[B\right]^{T}\left\{\sigma\right\} dV = \left\{F\right\}_{t}$$
(1)

ただし, [*M*], [*C*], [*B*], { σ } はそれぞれ質量マトリックス, 減衰マトリックス,変位-ひずみ関係マトリックスおよび,応 カベクトルを示し, { \ddot{U} }, { \dot{U} }, {U}, {*F*},はそれぞれ,時 刻*t*における加速度ベクトル,速度ベクトル,変位ベクトルお よび,荷重ベクトルを示す.また, *V*^tは要素体積を示す.

③ 静的平衡状態が得られた場合には、次の荷重ステップの 計算に移るために、手順①に戻る. 動的陽解法 FEM における変位の計算は,式(1)に示す基礎式の速度および加速度の項を中央差分することにより得られる式(2)を用いて行う.

$$\left(\frac{1}{\Delta t^{2}}[M] + \frac{1}{2\Delta t}[C]\right)\left\{U\right\}_{t+\Delta t} = \left\{F\right\}_{t} - \int_{V^{e}}[B]^{T}\left\{\sigma\right\}dV$$
$$-\frac{2}{\Delta t^{2}}[M]\left\{U\right\}_{t} - \left(\frac{1}{\Delta t^{2}}[M] - \frac{1}{2\Delta t}[C]\right)\left\{U\right\}_{t-\Delta t}$$
(2)

ただし, Δt は時間増分を示す.

ここで,質量マトリックス [M] および,減衰マトリックス [C] を節点集中型の対角マトリックスと仮定すると,式(2) のマトリックス演算は,もはや連立方程式ではなくなり,省 メモリに解析を行うことが可能となる.しかし,②③におけ る動的陽解法 FEM を用いて静的平衡状態を得る過程におい ては,通常の物理現象に基づく質量マトリックスおよび,減 衰マトリックスを用いた場合,Courant 条件により,多大な時 間ステップ数が必要となる.そこで,理想化陽解法 FEM にお いては,式(3)を基に,質量マトリックス[M],減衰マトリッ クス [C] を調整することで,各荷重ステップにおける静的平 衡状態を得るまでに要する時間ステップ数を削減する.

$$\rho_i = a^2 \Delta t_{cr}^2 E / \Delta l_i^2 \tag{3}$$

ただし、Eはヤング率、 Δl_i は各自由度方向における要素長 さ、 Δt_{cr} は1ステップあたりの限界時間増分を示す.また、式 (3)のaは応力波が要素内を通過する間に必要な計算回数を 示し、解析を安定させるため1以上の値をとる必要がある. 本論文では3章以降の解析において、文献⁸⁰と同様にa=10と した.式(4)の積分により要素単位の質量マトリックス[M] を決定する.

$$[M] = \int_{V^e} \{\rho_i\} [N]^T [N] dV$$
⁽⁴⁾

ここで, [N] は要素の形状関数である.このように, 要素毎に スケーリングされた密度を質量マトリックスの算出に使用



Fig. 1 Concept of Idealized Explicit FEM.

することで, Courant 条件により制限される時間増分の最大 値を要素サイズや材料定数によらず均一にとることができ る.よって静的平衡状態への収束に要する時間ステップを削 減することが可能となる.一方,減衰マトリックス [C] に関 しては,要素剛性マトリックス [K] の対角項成分 k_{ii}および, 質量マトリックス [M] の対角項成分 m_{ii}を用いて,1次元振 動理論における臨界減衰を基に,次式 (5) および式 (6) を用 いて定義する.

$$c_{ii} = 2\sqrt{m_{ii}k_{ii}} \tag{5}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ & \ddots & \vdots & & \vdots \\ & & c_{ii} & \cdots & 0 \\ & & & \ddots & \vdots \\ Sym. & & & c_{nn} \end{bmatrix}$$
(6)

以上の様に,理想化陽解法 FEM では,静的平衡状態,すな わち,静的陰解法 FEM で得られる解と同等の状態に達する まで動的陽解法 FEM を用いて時間ステップを進めることで 解析を行う.従って,静的陰解法 FEM において,十分な解析 精度が得られる解析条件を用いることで,提案手法において も十分な解析精度が得られるものと考えられる.また,大幅 な計算時間の短縮および,メモリ消費量の削減を実現[®]して いる.また,理想化陽解法 FEM は,自由度毎,要素毎に独立 した計算のみで解析を進めることが可能であることから,並 列性に優れた手法である点も特筆すべきである.

3. GPUを用いた並列化理想化陽解法 FEM

前章に示す通り,理想化陽解法 FEM は非常に高い並列性

を有しているため,計算の並列化による計算時間短縮に対す る効果は非常に大きいと考えられる.そこで、本研究では、近 年,並列数値計算環境として注目されつつある GPU (Graphics Processing Unit)を用いた並列化手法を導入する. GPU は、その内部に数十から数百の数値演算用のプロセッ サを有し、一般的な CPU に対して非常に高い数値演算能力 を持つが、プログラミングの専門性が高いことから、これま では画像処理に対する適用がほとんどであった.しかしなが ら,近年においては,画像処理技術が高度化し,GPUに対し て複雑な処理を要求するようになってきた. そのため, ある 程度の汎用性を持たせた GPU が開発されるようになり、数 値解析に対して用いることが可能となった.また,サーバー やワークステーションなどの高価な計算機を導入するより も、非常に安価に高性能な計算環境を構築できることもあ り,科学技術用の数値演算プロセッサとして注目され始めて いる⁹. 特に, GPU がこれまで目的としてきた画像処理が, 画 素単位で独立した計算であり, 並列粒度が小さい計算である ことから、理想化陽解法 FEM の特徴である要素や自由度単 位の計算に対して,効果を発揮できると考えられる.

このような, GPU を用いた数値計算を行う環境としては, NVIDIA 社の GPU を用いた並列計算環境である CUDA (Compute Unified Device Architecture)¹²の他, Advanced Micro Devices 社の ATI Stream¹³, Brook GPU¹⁴などが提供されてい る.これらの中で,2011年現在においては,CUDA がもっと も普及していることから,本研究においても,CUDA を用い て GPU による理想化陽解法 FEM の並列化を実施した.

並列化の方法としては, Fig. 2 に示すように, まず, GPU上の1つの計算ユニットにおいて要素の応力を算出し, その応力を同計算ユニットで積分することにより, 等価節点力を算出する. 算出された要素ごとの等価節点力は, GPUから CPU へ転送され, CPU上においてすべての要素に関する等価節



Fig. 2 Schematic illustration of GPU parallelization.



Fig. 3 Computing flow of parallelized IEFEM using a GPU.

点力を足し合わせることで,解析領域全体の等価節点力ベク トルを作成する.また,変位の算出に関しても,GPUの1計 算ユニット上で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GPUを用いた解析手順を含む並列化 理想化陽解法 FEM 全体のフローを Fig.3に示す.同図から も分かるように,理想化陽解法 FEM において計算コストが 最も高い,要素毎の計算および,自由度毎の計算を並列化す ることにより,高速化が期待される.

次章においては,以上の並列化手法を基礎的な溶接問題に 対して適用することにより,本手法の持つ基礎的特性に関す る検討を行った.

4. T 継手溶接問題への適用による GPU を用いた 並列化理想化陽解法 FEM の性能評価

本章では,前章で提案された GPU を用いた並列化理想化 陽解法 FEM の解析精度およびその他の特性について検討す るため, T 継手溶接問題に対し本手法を適用した.

4.1 解析モデル

解析対象材料は軟鋼材と仮定し、材料定数の温度依存性は Fig.4に示す通りとした.溶接条件は溶接電圧を30V,溶接 電流を120A,溶接速度を6.0mm/s,熱効率を0.5とし、2電



Fig. 4 Temperature-dependent physical constants.



Fig. 5 FE mesh for T-joint welding model.

極を用いた両側同時溶接を模擬した.また,要素分割はFig.5 に示す約1万要素のモデルを標準モデルとし,解析時間およ びメモリ使用量に関する性能評価のため,要素数が約2万,4 万,6万,8万のモデルを作成した.なお,解析には,Intel社 製 Core i7 3.60 GHz の CPU および,24 GB のメモリを用いた 計算機を使用した.さらに,GPU として1プロセッサあたり 512計算コアを有する GeForce GTX 580 プロセッサ1 基を 用いた.

解析の比較対象として、スカイラインソルバーを採用した 静的陰解法 FEM を用いた.また,提案手法,静的陰解法 FEM ともに完全積分六面体要素を用いた.熱伝導解析は1ステッ プの時間増分を0.05秒とし,熱伝導解析により得られた1ス テップの温度増分ベクトルの最大値が20℃以下になるよう に温度増分ベクトルを再分割し,熱弾塑性解析における温度 増分ベクトルとして付与するものとした.以上の様に,提案 手法と静的陰解法 FEM を同等の条件下で解析を行い,提案 手法の解析精度,計算時間並びにメモリ消費量について検討 する.

4.2 解析精度の検証

Fig. 6 (a) に, GPU を用いた並列化理想化陽解法 FEM によ る溶接線方向応力 σ_x の分布を示す.また,同図 (b) には,市 販されている汎用 FEM コードでよく用いられている静的陰 解法 FEM を用いた溶接線方向応力 σ_x の分布を示す.同図よ り,両者は定性的にほぼ一致していることが確認できる.次 に, Fig. 5 に示す溶接中央断面上 A-A' における応力分布を Fig. 7 (a) に示し,また,溶接部裏面側 B-B' における応力分布 を Fig. 7 (b) に示す. 図中における色塗りの印は静的陰解法 FEM による解析結果を示し,色抜きの印は GPU を用いた並 列化理想化陽解法 FEM による解析結果を示す.また,図中の ●印および〇印は溶接線方向残留応力成分 (σ_x)を示し, 印および〇印は溶接線直角方向残留応力成分 (σ_y) を示す. 両図より,残留応力分布において提案手法による解析解と静 的陰解法 FEM による解析解は定量的によく一致しているこ とが確認できる. 次に, Fig. 5 に示す C-D 上における y 方向変位量と C'-D' 上における y 方向変位量との差, すなわち横収縮分布の比較 を Fig. 8 に示す.また, Fig. 9 には A-A' 上における z 方向変 位分布, すなわち角変形の分布を示す.色抜きの印は並列化 理想化陽解法 FEM による解析結果を示し,色塗りの印は静 的陰解法 FEM による解析結果を示す.両図より,残留変形に 関しても,提案手法による解析解と静的陰解法 FEM による 解が定量的によく一致していることが確認でき,提案手法 は,静的陰解法 FEM と同等の精度で解析可能であることが 分かる.

4.3 解析時間およびメモリ使用量についての検討

ここでは,提案手法の持つ性能について評価するため,T 継手溶接問題を対象に解析時間およびメモリ使用量につい て検討を行った.溶接条件等は,4.1節と同様とし,自由度数 が,39,975,70,602,141,588,218,538,289,680の5通りのモ デルを作成し,解析を実施した.しかし,解析時間の検討に 関して,静的陰解法 FEM を用いて完全冷却時まで解析を行



Fig. 6 Comparison between parallelized IEFEM accelerated by a GPU and static implicit FEM on residual stress in longitudinal direction σ_{i} .



Fig. 7 Comparison between parallelized IEFEM accelerated by a GPU and static implicit FEM on stress distribution.



Fig. 8 Comparison between parallelized IEFEM accelerated by a GPU and static implicit FEM on transverse shrinkage.



Fig. 10 Comparison among IEFEM, IEFEM accelerated by a GPU and static implicit FEM on computing time.

う場合,モデルの自由度数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完了することができない. そこ で,本節では,本解析条件において,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. Fig. 10 に解析時間におよぼす 自由度数の影響を示す. 図中の●印は, 提案手法である GPU を用いた並列化理想化陽解法 FEM による解析結果を示し, また, △印は理想化陽解法 FEM による解析結果, □印は静的 陰解法 FEM による解析結果を示す. 同図において, □印で示 す静的陰解法 FEM による解析結果は、自由度数の2 乗程度 に比例して解析時間が増大するのに対して,●印で示す理想 化陽解法 FEM に関しては,自由度数の増加に伴い,計算時間 が比例的に増加するに留まっていることが確認できる.この ことは、大規模問題ほど、理想化陽解法 FEM の方が有利であ ることを示唆するものである. さらに, 提案手法である GPU を用いた並列化理想化陽解法による解析結果に関しては、約 30万自由度(約10万節点)の解析においても解析時間が1万



Fig. 9 Comparison between parallelized IEFEM accelerated by a GPU and static implicit FEM on angular distortion.



Fig. 11 Ratio of computing time of IEFEM and IEFEM accelerated by a GPU to static implicit FEM.

秒以下であることが確認できる.この点について,詳細に調 べるため,静的陰解法 FEM による解析結果と理想化陽解法 FEM および GPU を用いた並列化理想化陽解法 FEM による 解析結果に関して,計算時間の比をとり比較した図が Fig. 11 である.同図より、約30万自由度の解析において、静的陰解 法 FEM の解析に比べて理想化陽解法 FEM による解析時間 は約 1/30, また, GPU を用いた並列化理想化陽解法 FEM に よる解析時間は約1/250であることが分かり、大規模解析に おける理想化陽解法 FEM および GPU を用いた並列化理想 化陽解法 FEM の有効性を示す事ができた. さらに, 同様にし てメモリ使用量について比較した図が Fig. 12 および Fig. 13 である.これらの図より,理想化陽解法 FEM および GPU を 用いた並列化理想化陽解法 FEM はメモリ使用量においても 静的陰解法 FEM に比べて非常に有利であることが分かり, 約30万自由度において, GPUを用いた並列化理想化陽解法 FEM の使用メモリは約 132 MB であり,静的陰解法 FEM と 比べて約1/130であることが確認できる.

以上より, GPU を用いた並列化理想化陽解法 FEM は, 汎



Fig. 12 Comparison between IEFEM accelerated by a GPU and static implicit FEM on memory consumption.

- --- Idealized explicit FEM using GPU

140

120

100

80

60

40

20

Ratio of memory consumption

to static implicit FEM

Fig. 13 Ratio of memory consumption of IEFEM accelerated by a GPU to static implicit FEM.

150

Degrees of Freedom (x10³)

200

250

300

100

50

用 FEM 解析コードでよく用いられている静的陰解法 FEM と比べて,特に大規模解析ほど圧倒的に有利であることが分かった.

5. 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, 大規模移動熱源多層溶接問題への適用可能性について検討 するために,約130万自由度,約43万節点,33パスという汎 用 FEM コードでは解析が非常に困難であると考えられる大 規模問題に対し本手法の適用を試みる.

5.1 解析モデル

解析に用いた要素分割は, Fig. 14 に示す通りである. 同図 (a) に解析領域全体を示し, (b) に溶接金属部の拡大図を示 す.また,本モデルにおける解析自由度数は1,283,205, 節点 数は427,735, 要素数は412,400 である. 溶接条件としては, 1 パスあたりの溶接電圧を17V, 溶接電流を120A, 溶接速度 を6.66 mm/s, 熱効率を0.5とし, パス間温度を250℃と仮定 した. 溶接パス数は33パスであり, 溶接の施工順序はFig. 15 に示す通りとした. また, 解析対象は軟鋼材料を仮定し, 解 析に用いた材料定数の温度依存性はFig. 4 に示す通りと仮 定した. なお, 解析に際して, CPU は Core i7 2.66 GHz, メモ リは12 GB とし, また, 1 プロセッサあたり 240 計算コアを 有する GeForce GTX 285 プロセッサを3 基用いた計算機を 使用した.

熱伝導解析の結果,全温度ステップ数は56,320となり, GPUを用いた並列化理想化陽解法 FEM により全温度ステ ップに対応する熱弾塑性解析を実施した.

5.2 大規模移動熱源多層溶接の解析結果

Fig. 16 に溶接中央断面(x = 500 mm)および中央断面から 終端側(x = 500~1000 mm)表面部における溶接線方向応力



Fig. 14 FE mesh of multi-pass welding model.



Fig. 15 Welding sequence of multi-pass welding.

 σ_x の分布を示す.同図 (a) は1パス溶接終了時 (250℃時) に おける応力 σ_x 分布を示し, (b) から (f) はそれぞれ同様に, 8 パス, 15パス, 22パス, 29パス, 33パス (全パス) 溶接終了 時における応力 σ_x 分布を示す.同図より,パスが進むに従 い,積層が行われ,詳細な応力分布が得られていることが確 認できる.その特徴としては,溶接直後のパスの積層部近傍 において,比較的高い応力の発生が確認できる.同様にして, Fig. 17 には溶接線直角方向応力 σ_y の分布を示す.同図より, 初パスを除いたいずれのパスを溶接した場合においても,板 厚方向内部に圧縮応力が発生し,表面部および裏面部におい ては引張り応力が発生していることが確認できる.

次に, Fig. 15 に示す溶接中央断面 (x = 500 mm) 裏面部 (z = 0 mm) の E 点および E' 点における各パス溶接終了時の σ_y の履歴を Fig. 18 に示す.同図より,裏面部の応力履歴は、いずれのパスを溶接した場合においてもほぼ左右対称に変化し、各層における積層方向に依らないことが確認された.また、約10パス終了時から最終パスまで応力値はほとんど変化



Fig. 16 Distribution of stress σ_x at interpass temperature in transverse cross section.



Fig. 17 Distribution of stress σ_{y} at interpass temperature in transverse cross section.



Fig. 18 Relationship between stress σ_v at E and E' and pass number.



Fig. 19 Relationship between stress σ_{y} at F and F' and pass number.

しないことが確認できる. さらに, Fig. 15 に示す溶接中央断面上 (x = 500 mm) 表面部 (z = 90 mm) のF点およびF点における各パス溶接終了時の σ_y の履歴をFig. 19 に示す. 同図から, F'点における応力は, 各層におけるF'点側のパス (13, 16, 18, 21, 25, 29パス目) 終了時ほど高くなることが確認でき, また, F点における応力は, 各層におけるF点側のパス (15, 17, 20, 24, 28, 33パス目) 終了時ほど高くなることが確認できる. さらに, 最終層最終パス溶接後の残留応力状態において, F点とF'点の応力差は 50 MPa 程度であることが確認できる.

次に、溶接中央断面 (x = 500 mm) 裏面部 (z = 0 mm) から 表面部、すなわち Fig. 15 の H-H'線上における σ_y の分布を 8 パス、22パス、33パス溶接終了時において比較し Fig. 20 に示 す.同図より、 σ_y の分布に関して、積層が進むに伴い、表裏 面に引張り、内部に圧縮という応力分布が発生していること が確認できる.表面部に大きな引張り応力が発生する理由と しては、開先幅が表面部ほど大きいため、表面部ほど大きな 収縮の塑性ひずみが発生しているためであると考えられる. また、この表裏面の塑性ひずみの差に起因して角変形が発生 し、その曲げにより裏面側において大きな引張り応力が発生



Fig. 20 Comparison of distribution of stress σ_y after 8th, 22nd and 33rd pass.

していると考えられる.なお,本章における,応力解析に要 した計算時間は約108時間であり,実用可能な時間内で計算 できたと言える.

厚板の多層溶接時における応力挙動を詳細に解析するこ とは各種構造物の応力腐食割れや疲労き裂の回避という観 点から非常に重要と考えられる.そのシミュレーションを初 めて実現する GPU を用いた理想化陽解法 FEM は,その汎用 性,高速性,省メモリ性という観点から,今後溶接力学分野 の発展に大いに貢献できると考えられる.

6. 結 言

本研究では、溶接力学問題の大規模・高速解析を目的とした GPU を用いた並列化理想化陽解法 FEM を開発した.本手法を T 継手溶接問題および多層溶接の 3 次元移動熱源問題に適用し、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.

- 提案手法は、通常の動的陽解法 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も、解析可能であることを示した。
- 2) T 継手溶接問題に対して提案手法を適用した結果,残留 応力・変位分布において,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 を用いた場合における 計算時間に関して比較を行った結果,節点数が96,560の 解析において,提案手法は約1/250にまで計算時間を低減 することができ,また,節点数が多いほど,高速化が可能 という結論が得られた.
- 4)提案手法および静的陰解法 FEM を用いた場合における メモリ消費量に関して比較を行った結果,節点数が 96,560の解析において,提案手法は約1/130にまでメモリ 消費量を低減できることができ,また,節点数が多いほど 省メモリ化が可能という結論が得られた.

5) 自由度数1,283,205,節点数427,735,要素数412,400の33 パス大規模移動熱源多層溶接問題に対し,提案手法を適 用した結果,約108時間で全パスの過渡応力・変形解析 が可能であることを示した.

参考文献

- Y. Ueda and T. Yamakawa: Analysis of Thermal Elastic-Plastic Stress and Strain during Welding by Finite Element Method, Transaction of The Japan Welding Society, vol. 2-2 (1971), 90-100.
- Y. Fujita and T. Nomoto: Studies on Thermal Elastic-Plastic Problems, Journal of The Society of Naval Architects of Japan, vol. 130 (1971), 183-191. (in Japanese)
- F. Boitout and J. Bergheau: The Numerical Simulation of Welding in Europe: Present Capabilities and Future Trends, Transactions of JWRI, vol.32-1 (2003), 197-204.
- J. Goldak, M. Mocanita, V. Aldea, J. Zhou, D. Downey and D. Dorling: Predicting Burn-through When Welding on Pressurized Natural Gas Pipelines, Proceedings of 2000 ASME Pressure Vessels and Piping Conference (2000), 23-27.
- S. B. Brown and H. Song: Rezoning and Dynamic Substructuring Techniques in FEM Simulations of Welding Processes, ASME Journal of Engineering for Industry, vol. 155 (1993), 415-423.
- H. Nishikawa, I. Oda, M. Shibahara, H. Serizawa and 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.

- Peter Wriggers: Nonlinear Finite Element Methods, Springer (2008), 209-212.
- M. Shibahara, K.Ikushima, S. Itoh and K. Masaoka: Computational Method for Transient Welding Deformation and Stress for Large Scale Structure Based on Dynamic Explicit FEM, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 29-1 (2011), 1-9. (in Japanese)
- T. Harada, S. Koshizuka and Y. Kawaguchi: Smoothed particle hydrodynamics on gpus, Proceedings of Computer Graphics International, Budmerice, Slovakia (2007), 63-70.
- A. Kolb, L. Latta and C. Rezk-Salama: Hardware based simulation and collision detection for large particle systems, Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Conference on Graphics Hardware, Grenoble, France (2004), 123-131.
- Y. Liu, X. Liu and E. Wu: Real-time 3d fluid simulation on gpu with complex obstacles, Proceedings of Computer Graphics and Applications, 12th Pacific Conference on (PG'04), Seoul, Korea (2004).
- 12) NVIDIA Compute Unified Device Architecture (CUDA), http://developer.nvidia.com/category/zone/cuda-zone
- ATI Stream, http://www.amd.com/jp/products/technologies/streamtechnology/Pages/stream-technology.aspx
- 14) Brook GPU, http://graphics.stanford.edu/projects/brookgpu/