GPUを用いた理想化陽解法FEMによる
大規模溶接過渡応力・変形解析

大阪府立大学　工学部　海洋システム工学科　深沢・柴原研究室　岡田　崇志　生島　一樹

研究背景

船体の大型化が進む

例えばコンテナ船

- 開口部に縦曲げを受ける
- 鋼板の厚手化
- 厚肉鋼材の多層溶接

１枚の鋼材に大きな荷重がかかるため応力状態を知る必要がある

しかし…

現在、多層溶接の三次元移動熱源解析はメモリ・計算時間等の制約により解析不可能な場合が多い

多層溶接シミュレーションを実施するには省メモリ化･高速化が必要[1)]

溶接問題を解析するために…

理想化陽解法FEM

- 静的陰解法FEMに比べて、省メモリかつ高速（計算時間やメモリが要素数に比例）
- 溶接問題の時間スケールの大きな現象でも解析可能

GPUを用いた並列解析

- GPU…グラフィックス用の数値計算用チップ
- リアルタイム画像生成に用いられる
- 数値演算能力が高い

本研究の目的　GPUを用いた理想化陽解法FEMによる大規模溶接過渡応力・変形解析手法を開発

1)　西川弘泰、芹沢久、村川英一　：大規模溶接シミュレーション手法による溶接変形予測　日本応用数理学会　応用数理　18(1) 15-22, (2008)
2)　津田政明,萩原一郎，　：準静的大変形問題の動的陽解法有害法に関する基礎的検討　，日本機械学会論文集(A編)　64巻662号 1548-1555, (1998).

解析手法

一般的な陽解法の基礎理論

平衡方程式

$$[M]\{\ddot{U}\}_t + [C]\{\dot{U}\}_t + \int [B]^T\{\sigma\}dV = \{F\}_t$$

$[M]$：質量マトリックス
$[C]$：減衰マトリックス

速度･加速度を中心差分で離散化

離散化された陽解法の平衡方程式

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

時間$t+\Delta t$での変位　時間tでの変位　時間$t-\Delta t$での変位

$[M]$と$[C]$が対角成分のみ非零ならば連立方程式を構築・求解する必要がない

計算時間の短縮・省メモリ化が可能

理想化陽解法の理論

一般的な陽解法
要素サイズより時間増分が決まり、時間ステップ増加

理想化陽解法
理想化密度を用いて、質量マトリクスを作成し、要素サイズによらない解析が可能

Courant条件による考察

Courant条件　：$\Delta t < l_{min}/v$（Δt：時間増分，l_{min}：要素の最小寸法）

$l_{min_i}/v = a\Delta t$ とするような応力伝播速度vを仮定

$v = \sqrt{E/\rho_i}$ より要素の仮想的な密度を算出　(E:ヤング率)
ρ_i：理想化密度と定義

陽解法FEMの基礎方程式に適用

[M]の決定法

質量マトリクス

$$[M] = \int_{V^e}\{\rho_i\}dV \quad \text{(対角行列, Sym.)}$$

[C]の決定法

m_{ii}, k_{ii}：質量，剛性行列の対角項

減衰マトリクス

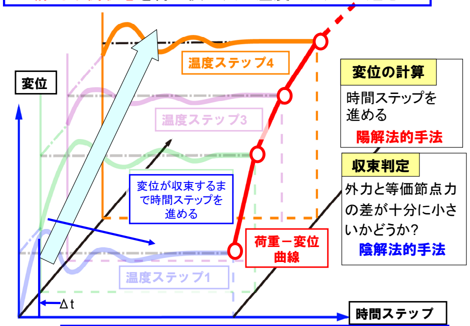
臨海減衰より $c_{ii} = 2\sqrt{m_{ii}k_{ii}}$

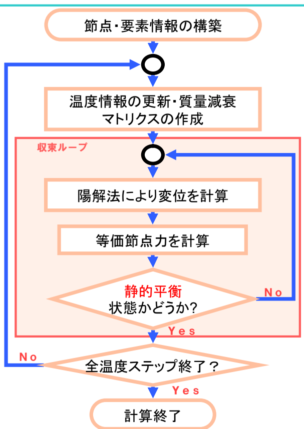
$$[C] = 2\sqrt{m_{ii}k_{ii}} \quad \text{(対角行列, Sym.)}$$

高速に変位を収束させることが可能

理想化陽解法の流れ

各荷重ステップにおいて、動的計算を行い静的平衡状態を得た後に次の温度ステップに進む





静的陰解法FEMと比べて理想化陽解法FEMは…

節点数が数万を越える大規模な計算に対して有利であり、計算時間やメモリに対する効果が大きい

GPUを用いた理想化陽解法FEMの並列化

自由度ごとの計算（陽解法の変位の計算）

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

要素ごとの計算（等価節点力）

$$\{F_{int}\} = \sum_i \int_{V^e}[B]^T\{\sigma\}dV$$

[B]　変位ひずみマトリックス
{σ}　応力ベクトル

要素毎,自由度毎に独立した処理を行う → 並列化に適する

並列化の方法

要素単位の並列化

１要素の積分計算

GPU上の１プロセッサで計算を行う

GPU計算部分

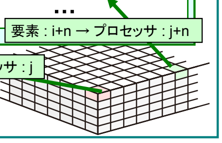
プロセッサ：j　(GPU)
要素等価節点力ベクトル　$\{f\}_i = \int_{V_i^e}[B]^T\{\sigma\}dV$

…

プロセッサ：j+n　(GPU)
…

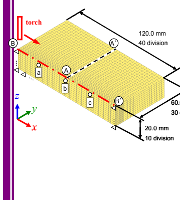
CPU計算部分

要素等価節点力ベクトル$\{f\}_i$を足し合わせ　$\{f\} = \sum_i \{f\}_i$



解析精度

解析モデル



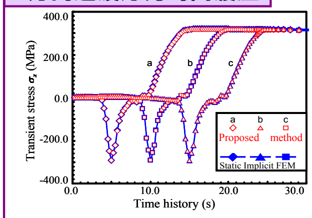
並列計算用計算機

- CPU:Core2 Quad 2.4GHz
- RAM:2GB
- GPU:GeForce GTX 285 (240 processor)

静的陰解法FEM，理想化陽解法FEM用計算機

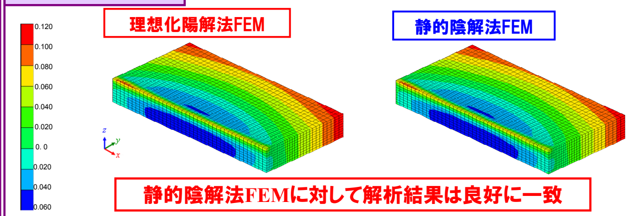
- CPU：Xeon 2.53GHz
- RAM：32GB

x方向過渡応力時間履歴



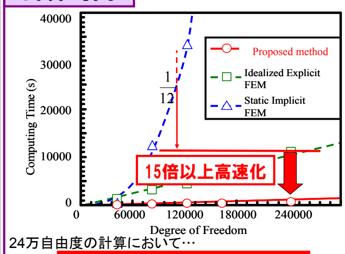
静的陰解法FEMに対して応力履歴は良好に一致

z方向変位分布



静的陰解法FEMに対して解析結果は良好に一致

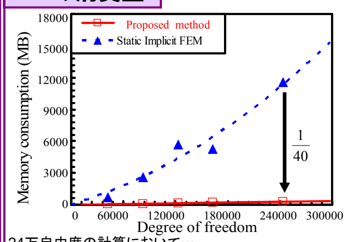
計算時間



24万自由度の計算において…

静的陰解法FEMに対して180倍以上高速化

メモリ消費量



24万自由度の計算において…

静的陰解法FEMに対して1/40に省メモリ化

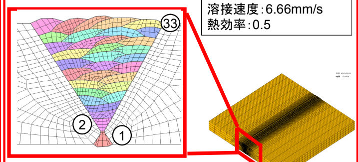
多層溶接移動熱源問題解析事例

解析モデル

多層溶接問題（33パス）

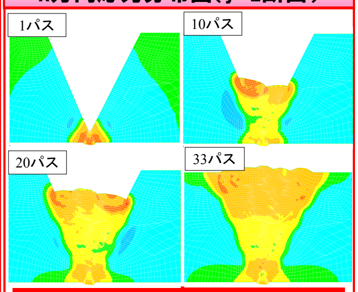
入熱条件

電圧：120V
電流：17A
溶接速度：6.66mm/s
熱効率：0.5



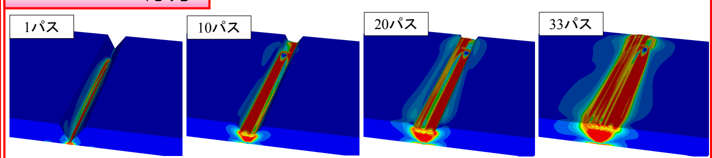
要素数	412,400要素
節点数	427,735節点
荷重ステップ数	56,320ステップ
パス数	33パス
自由度	1,283,205
計算時間	108h(4.5日)

中央横断面におけるx方向応力分布図(y-z断面)



各パス最終溶接部に高い応力が発生

Von Mieses 応力



- 多層溶接時における過渡応力分布が解析可能
- 詳細に肉盛りを再現

まとめ

本研究では理想化陽解法FEMによる熱弾塑性解析法に対し、GPUによる並列計算を適用した新しい解析手法を用いて多層溶接時における溶接過渡応力・変形問題に適用した結果、以下の知見を得た。

- ビードオンプレート問題に関して、静的陰解法FEM、理想化陽解法FEMと本手法の計算時間を比較した結果、24万自由度のモデルにおいて、静的陰解法FEMに対して解析速度は180倍程度で、メモリ消費量は1/40程度であることを確認した。
- 市販の陰解法FEM解析コードでは解析困難な総自由度数1,283,205、33パス多層溶接移動熱源問題に対して本手法を適用した結果、本手法が100万自由度以上の問題に対して、現実的な計算時間で解析可能であることを示した。