

理想化陽解法FEMによる溶接移動熱源問題の熱伝導解析手法の開発

大阪府立大学大学院 工学研究科 航空宇宙海洋系専攻 深沢・柴原研究室 M1 壺井 翔太

研究背景

溶接変形シミュレーションの重要性

船体構造に**必要不可欠な溶接**を行うと必ず**溶接変形**が発生する

溶接変形は**強度低下**や**品質低下**などの問題に繋がる

FEMを用いた溶接変形シミュレーションの実施が重要

FEMを用いた変形予測
FEM熱伝導解析 + FEM熱弾塑性解析

溶接変形の予測においてFEM熱伝導解析の性能の向上は重要な課題

陰解法FEM手法に基づく熱伝導解析の問題点

FEM熱伝導解析の問題

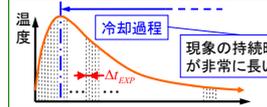
メモリや計算時間の制約から実用レベルでは**継手程度の規模のシミュレーションに限定**

陽解法FEMに注目

研究目的

陽解法FEMの問題点

時間増分の制約により溶接問題の冷却過程のような現象時間の長い問題に適用すると**計算時間が多大**



溶接問題の熱伝導解析に陽解法FEMを適用するのは**困難**

陽解法FEMを適用可能にした溶接問題の熱伝導解析手法の開発

解析理論

陰解法FEMに基づく熱伝導解析理論

FEM熱伝導解析の基礎方程式

$$[C] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} + [K] \{T\} = \{P\}$$

[C]: 熱容量マトリックス
[K]: 熱伝導マトリックス
{T}: 温度ベクトル
{P}: 熱流束ベクトル

離散化

$$[C] \left\{ \frac{T_{n+1} - T_n}{\Delta t_{IMP}} \right\} + [K] \{T\}_{n+1} = \{P\}$$

$$[K_{IMP}] = \frac{1}{\Delta t} [C] + [K]$$

$$\{F_{IMP}\} = \{P\} + \frac{1}{\Delta t} [C] \{T\}_n$$

$$[K_{IMP}] \{T\}_{n+1} = \{F_{IMP}\}$$

連立方程式

使用メモリ量大
計算時間大

本手法(理想化陽解法FEMに基づく熱伝導解析理論)

$$[C_{EXP}] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} + [K_{IMP}] \{T\} = \{F_{IMP}\}$$

付加項 陰解法FEM

前進差分を用いて離散化

$$\frac{[C_{EXP}] (\{T\}_{m+1} - \{T\}_m)}{\Delta t_{EXP}} = \{F_{IMP}\} - [K_{IMP}] \{T\}_m$$

m: 計算ステップ

収束計算

$$\{F_{IMP}\} - [K_{IMP}] \{T\}_m \text{ が } 0 \text{ に近づくまで反復計算}$$

付加項 $[C_{EXP}] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\}$ の影響がなくなる

陰解法FEMと同等の精度で解析

[C_{EXP}]の作成方法

[C_{EXP}]の役割

理想化陽解法の時間増分の制約の緩和

[C_{EXP}]の作成方法

クーラン条件 $\Delta t_{EXP} < \frac{c\rho(\Delta x)^2}{2\lambda}$ $\Rightarrow a \times \Delta t_{EXP} = \frac{c\rho(\Delta x)^2}{2\lambda}$

a: 陽解法の時間増分、ρ: 密度、c: 比熱、λ: 熱伝導率、Δx: 要素の最小サイズ、Δt: 陽解法の時間増分

クーラン条件を基に**限界時間増分**を大きくとる事ができる**理想的なρ**を決定

理想化した[C_{EXP}]

$$[C_{EXP}] = \int_{V_e} c\rho_{EXP} [N]^T [N] dV$$

理想化されたマトリックスを用いた解析

大きい時間増分で解析が可能

少ない計算ステップで解析が可能

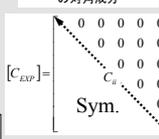
計算時間の短縮に期待

付加項の $\{ \partial T / \partial t \}$ は前進差分で離散化

[C_{EXP}]が**対角成分のみ非零**

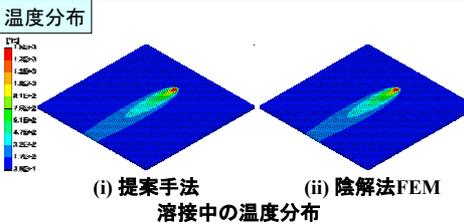
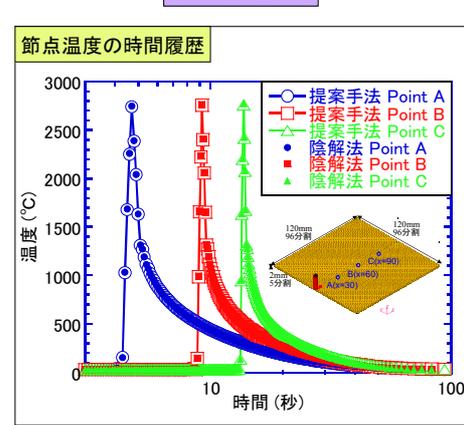
連立方程式を解く必要がない

省メモリ化を実現



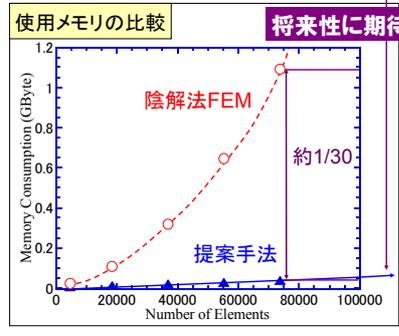
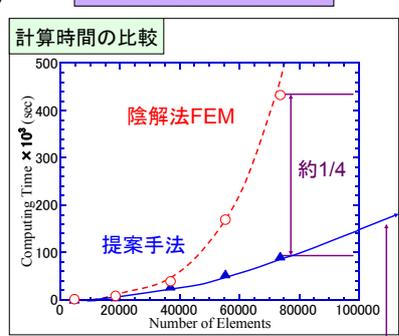
提案手法の性能評価

解析精度の評価



溶接線上の温度の時間履歴、分布が陰解法FEMと良好に一致

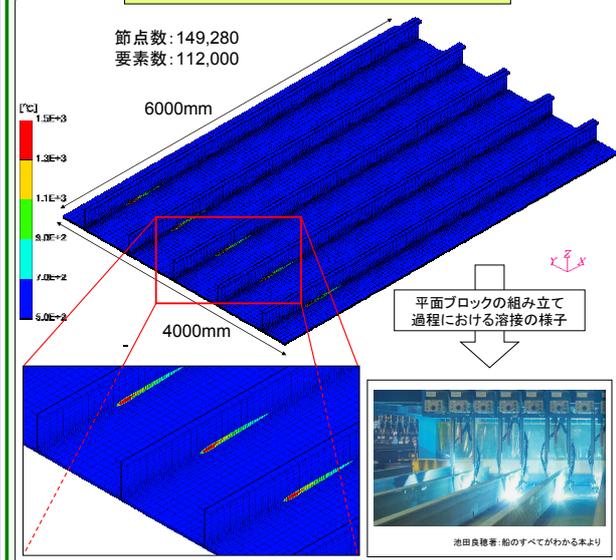
計算時間と使用メモリの比較



大規模な計算で**計算時間とメモリ使用量の点において有効**

大規模三次元モデルへの適用

ロンジ材の自動溶接時における熱伝導解析



計算時間
• 提案手法: 34h
• 従来手法: 120h以上 \rightarrow 約1/4

メモリ使用量
• 提案手法: 0.07GB
• 従来手法: 4.40GB \rightarrow 約1/60

従来手法では解析困難な**十萬要素超の大規模解析が可能**

従来手法では困難な大規模問題の熱伝導解析において陰解法FEMと同等の精度で可能

まとめ

- 本研究では、**理想化陽解法FEM**を適用した熱伝導解析手法を開発した。その手法を基礎的な溶接問題に応用した結果、以下の知見を得た。
- 提案手法を用いてビードオンプレート問題における節点温度の時間履歴及び温度分布に関する解析を行った結果、**陰解法FEMと同等の精度**で解析が可能であることを確認した。
 - 要素数が数万を超えるような大規模な熱伝導解析において、**理想化陽解法FEMは計算時間とメモリ使用量において有効**であることが分かった。
 - 提案手法を用いてロンジ材の自動溶接を対象とした熱伝導解析を実施した結果**本手法が大規模解析において有効**であることが分かった。