MLPG法による熱弾塑性解析手法の開発と溶接問題への応用

大阪府立大学大学院　工学研究科　航空宇宙海洋系専攻　構造系研究室　M１　堀　友則

研究背景

MLPG法は，1998年にメッシュを必要としない完全なメッシュレス解析手法としてAtluriら[1)]により開発され，現在も開発段階にある解析手法である

解析対象物の形状・節点座標のみで解析可能

特徴

CADデータからの接続が容易
節点の再配置・追加が容易
→ プリプロセッシング時間の短縮
アダプティブな解析が可能

節点のみで内挿関数を作成
解析領域全体でひずみが連続
→ 大変形・ゆがみの影響を受けない き裂・自由表面などの問題を扱うことが容易

参考文献：1) S. N. Atluri , T. Zhu (1998)：A new Meshless Local Petrov-Galerkin (MLPG) approach in computational mechanics , Computational Mechanics , 22 , pp117-127

MLPG法開発の現状

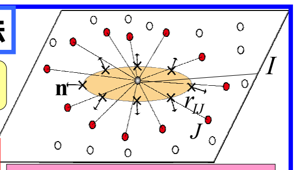
- 弾性解析(Atluri,2000)
- 破壊問題解(Ching,2001)
- 熱伝導解析(Sladeck,2004)
- 大変形解析(Han,2005)
- シェル構造解析(Sladeck,2006)
- 熱弾性解析(Ching,2006)
- 弾塑性解析(Xiong,2007)
- 熱弾塑性解析(本研究,2009)

本研究の内容

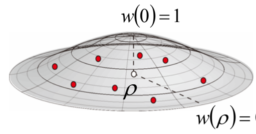
アダプティブに解析することが可能な新しい溶接構造物解析手法の開発
↓
溶接構造解析で必要な熱弾塑性解析のために本手法の定式化
↓
板継ぎ溶接問題において開発手法とFEMによる解析結果の比較を行うことにより，開発手法の妥当性を示す
↓
通常のFEMでは解析困難であるような，アダプティブ解析を行い，開発手法の有用性を示す

MLPG法の特徴的手法

周辺節点を用いて剛性マトリックスを作成



×：積分点　r_{IJ}：節点間距離
n：法線ベクトル　w：重み関数



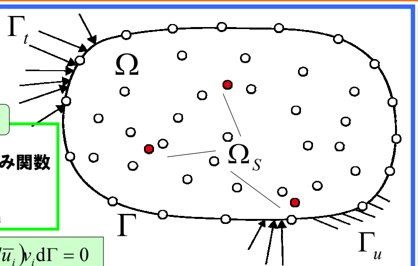
周辺節点の検索
- 節点 I 近傍の局所領域を設定
- 局所領域に積分点を配置
- 積分点を補間する周辺節点 J を検索

↓
注目節点と関係する節点が決まる
↓
局所領域内で最小二乗法と節点間距離に応じた重み関数を用いて内挿関数を求める[移動最小二乗法(MLS)][2)]
↓
内挿関数の微係数から注目する局所領域内でのひずみの適合条件式が求まる → 注目節点に関する剛性マトリックスが求まる

$$\mathbf{K}_{IJ}=\int_{L_s}\mathbf{nDB}^J d\Gamma$$

2) T.Belytchko (1994)：Element-Free Galerkin Methods , International Journal for Numerical Methods in Engineering , vol, 37 , pp229-256

MLPG法の熱弾塑性解析定式化



応力の平衡方程式 ＋ 境界条件

弱形式化および基本境界条件の付与

重み付き残差法　$v(x)=\begin{cases}1 & at\ \ x\in\Omega_S\\ 0 & at\ \ x\notin\Omega_S\end{cases}$　：重み関数

ペナルティー法　$\mathbf{u}+d\mathbf{u}=\bar{\mathbf{u}}+d\bar{\mathbf{u}}\quad \text{on}\ \Gamma_u$

$$\int_{\Omega_s}\left(\sigma_{ij,j}+d\sigma_{ij,j}+b_j+db_j\right)v_i d\Omega+\alpha_p\int_{\Gamma_{su}}\left(u_i+du_i-\bar{u}_i-d\bar{u}_i\right)v_i d\Gamma=0$$

Ω：全体領域　Γ_u：基本境界　Ω_S：局所領域
Γ：全体境界　Γ_t：自然境界　L_s：局所境界

構成式 ← 温度依存性 / 材料非線形 / J2流れ理論
ひずみの適合条件式

$$\mathbf{K}^{(n)}d\hat{\mathbf{u}}^{(n)}=d\mathbf{f}_0^{(n)}+d\mathbf{f}_1^{(n)}+d\mathbf{f}_2^{(n)}$$

全体剛性マトリックス

$$\mathbf{K}^{(n)}=\int_{L_S}\mathbf{NDB}^{(n)}d\Gamma+\alpha_p\int_{\Gamma_{su}}\mathbf{S\Phi}d\Gamma$$

境界条件による外力項

$$d\mathbf{f}_0^{(n)}=-\int_{\Gamma_{st}}\bar{\mathbf{t}}d\Gamma-\int_{\Omega_s}\mathbf{b}d\Omega+\alpha_p\int_{\Gamma_{su}}\left(\bar{\mathbf{u}}-\mathbf{u}^{(n)}\right)d\Gamma$$

温度依存・材料非線形による外力項

$$d\mathbf{f}_1^{(n)}=\int_{L_s}\mathbf{Ng}^{(n)}dTd\Gamma$$

節点内力

$$d\mathbf{f}_2^{(n)}=-\int_{L_s}\mathbf{N\sigma}^{(n)}d\Gamma$$

$d\hat{\mathbf{u}}$：周辺節点変位　$d\mathbf{u}=\mathbf{\Phi}d\hat{\mathbf{u}}$
α_p：ペナルティー係数　$\mathbf{\Phi}$：内挿関数
$\mathbf{B}$：変位－ひずみ関係式
$\mathbf{N}$：法線マトリックス　$\mathbf{S}=\begin{cases}1 & on\ \ \Gamma_u\\ 0 & other\end{cases}$

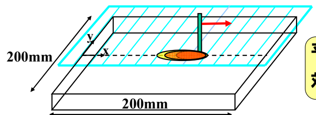
開発手法の計算流れ

1. 境界形状・節点分布の入力
2. 各時間ステップの温度入力
3. 全体剛性マトリックスの構築
4. 変位増分を計算
5. 節点内力の計算
6. 収束判定
7. 全温度ステップ
8. 計算終了

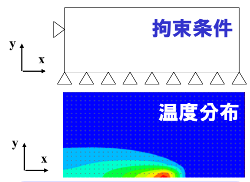
本定式化を基に熱弾塑性解析プログラムを独自に開発

精度検証－熱弾塑性解析－

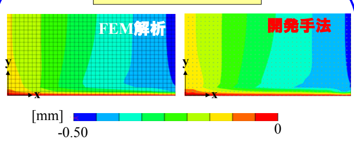
解析モデル：板継ぎ溶接



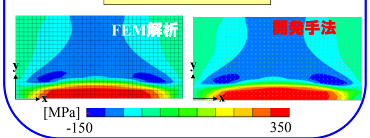
平面応力
対称条件



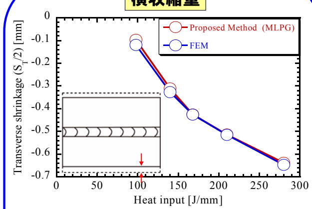
X方向溶接変形分布



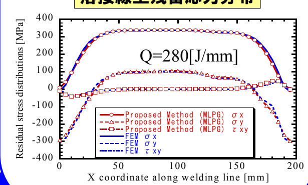
X方向残留応力分布



横収縮量

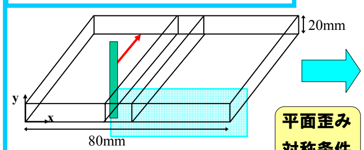


溶接線上残留応力分布

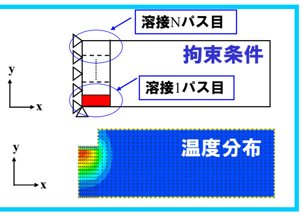


本開発手法により得られた溶接変形・残留応力は，FEM解析結果と良好に一致する

解析モデル：狭開先多層溶接



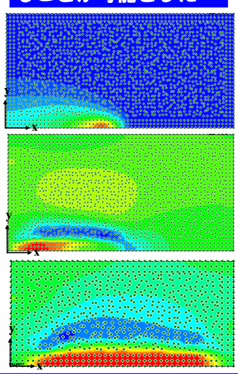
平面歪み
対称条件



アダプティブ解析例

不均一節点分布

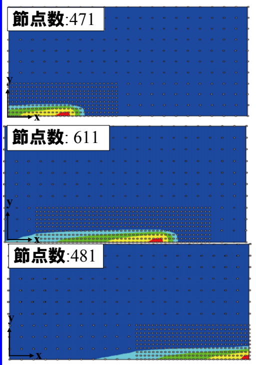
FEMでは困難なランダム節点分布でも解析することが可能とした



均一節点分布と同等の解析精度を得た

移動重合節点

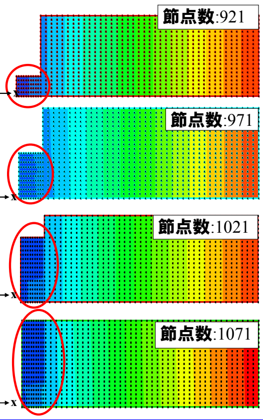
解析中において，自由自在に節点の増減を行うことを可能にし，解析精度を向上させた



追加節点により,節点分布が粗な領域も解析できた

境界節点追加

解析中に境界形状を再生成することが可能となった



境界形状が変化する問題を解析することができた

適用例

不均一節点分布	熱弾塑性解析（板継ぎ溶接）残留応力
移動重合節点	熱伝導解析（板継ぎ溶接）温度分布
境界節点追加	熱弾塑性解析（狭開先多層溶接）角変形

FEM解析と比べて良好な精度かつ柔軟に節点分布を変化させることができるようになった

結論・今後の展望

本研究では，MLPG法による熱弾塑性解析定式化を行い，独自にプログラム開発を行った．また，基本的な溶接問題に適用した結果，以下の知見を得た．

- 本開発手法により得られた溶接変形・残留応力結果は，FEM解析結果と良好に一致することを確認した．
- FEMでは困難なランダム節点分布で解析した結果，均一な節点分布と同等の精度を得た．
- 解析中において，自由自在に節点の増減を行うことを可能にし，解析前に解析領域が粗な節点分布においても十分な精度で解析することが可能となった．
- 複雑形状を有するモデルや大規模問題といった実用的な問題に適用するために，ロバストな節点検索法および領域分割法を導入し，解析手法の汎用化，並列化を行う．