

# Euler法を用いたFSWのプロセス・力学解析に関する研究

大阪公立大学大学院工学研究科航空宇宙海洋系専攻

○油井 達哉、前田 新太郎、生島 一樹、柴原 正和

## 研究背景

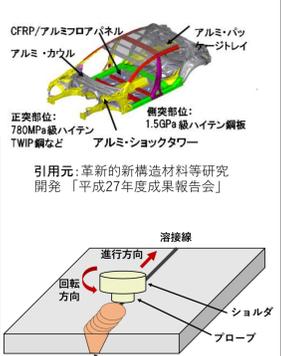
### 摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding:FSW)

- 地球温暖化ガス排出抑制のために自動車産業などでマルチマテリアル化が推進
- 従来溶接では不可な異材接合の手法が非常に重要

### FSWの特徴

- 高速回転するツールを挿入・移動させ、摩擦熱と塑性発熱により塑性流動により接合する非熔融接合
- 発生機構や残留応力は未解明な部分が多い
- 強度面から接合継手に関する残留応力の評価は重要
- 過渡の応力やツールの影響の総合的評価は重要

FSWの数値計算に対する期待は大きい



## 研究目的

### FSWの数値計算上の課題

- FSW解析は塑性変形による大変形ひずみを伴う
- Lagrange型のFEMでは計算メッシュが破綻
- プロセスの応力や残留応力を算出することは重要
- 主に使用されている粒子法では応力算出が不可

安定的なシミュレーションが実現できれば、残留応力を考慮した最適な施工条件(ツールの回転速度、移動速度)の検討が可能

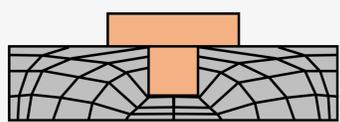
本研究の目的: オイラー型有限要素法を用いて摩擦攪拌接合時の継手における残留応力の可視化及び評価を行う

## 解析手法

### オイラー型有限要素法

#### ラグランジュ型

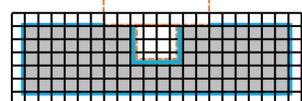
- メッシュが物体に追従
- 物体形状を容易に追跡可能
- メッシュが歪み、計算が破綻



ツールの解析に適用

#### オイラー型

- メッシュを空間に固定
- 空間メッシュを超えて物体が変形
- 安定的なシミュレーション
- 計算コストが高い



母材の解析に適用

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \nabla \cdot \sigma + \rho b$$

有限要素法による離散化

$$\bar{M} \dot{u}^n + F_{int}^n = F_{ext}^n$$

Euler型表示

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = \nabla \cdot \sigma + \rho b$$

大変形問題に対しても安定的な計算を実現



### Operator split法

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v = 0 \quad \text{移流計算}$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla \cdot \sigma = \rho b \quad \text{非移流計算}$$

### 接触モデル

$$f_c = \alpha(T) \Phi' \psi$$

$$\alpha(T) = \alpha_0(T) \frac{E(T)}{E(R,T)}$$

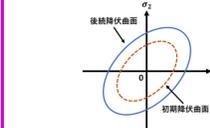
$$F_{ci} = \int_{\Omega_e} f_c' n_i d\Omega$$



めり込み量に応じて反力を設定

### 等方硬化モデル

$$F = \frac{1}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} - \frac{1}{3} \bar{\sigma}^2$$



### VOF法

固体界面識別子  $\phi = 0 \sim 1$  をとり、 $\phi$  を移流計算し、界面を捕捉  
 $\phi = 0$ : ボイド  
 $\phi = 0.5$ : 界面  
 $\phi = 1$ : 固体

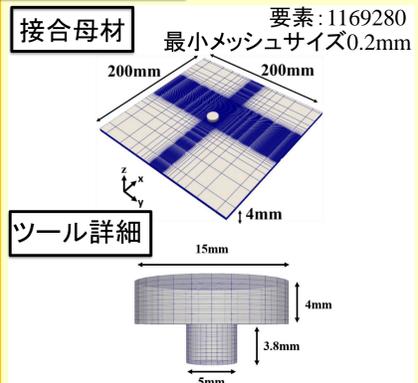
### SUPG法

- 重み関数に関して安定化パラメータを設定
- 複雑形状に対して移流計算の高精度な離散化が実現

## 解析モデルおよび解析条件

- 解析目的: 本解析手法の妥当性の確認, 残留応力の可視化・評価

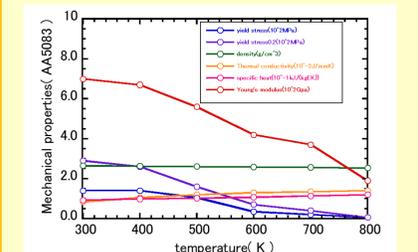
### 解析モデル



### 接合条件

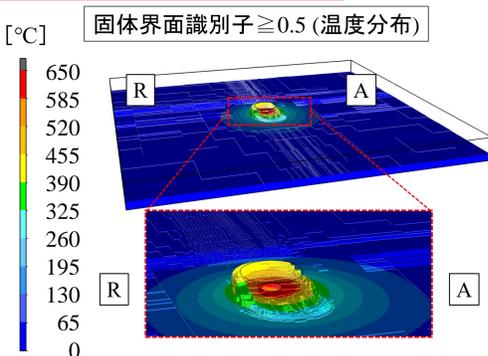
前進角[°]	3
前進速度[mm/min]	250, 500, 750, 1000
回転速度[rpm]	750, 1000, 1250, 1500

### 材料定数(Al合金A5083)



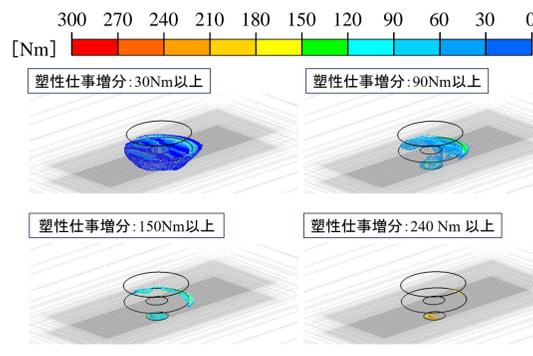
## 解析結果

### 過渡状態における解析結果



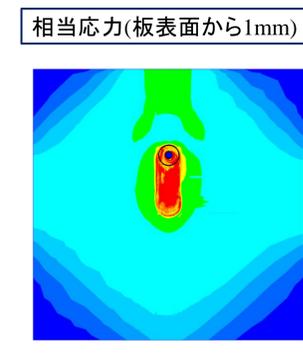
物質の攪拌/バリの発生を解析可能

ASで温度が高くなる傾向を再現

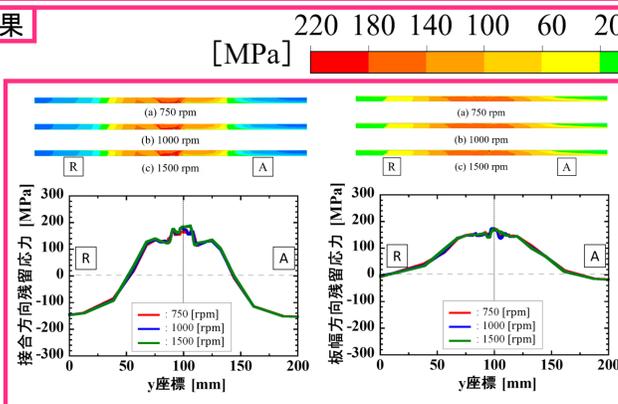


塑性流動による発熱はプローブ下部およびショルダー端部で大きい

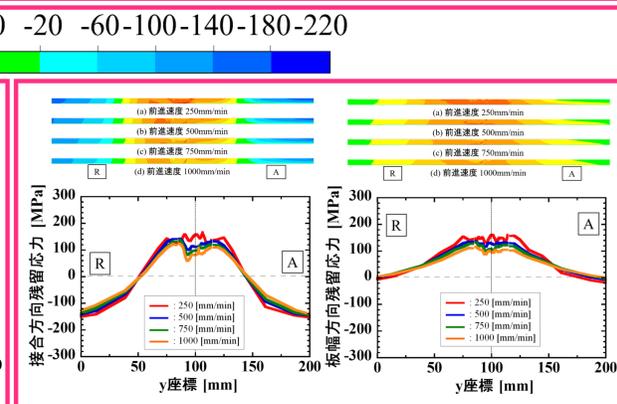
### 完全冷却後における解析結果



回転数が高いほど引張り残留応力が大きい傾向



前進速度が大きいほど引張り残留応力が小さい傾向



前進速度が大きいほど引張り残留応力が小さい傾向

## 結論

本研究では、FSWに関する力学シミュレーション手法の確立へ向けて、オイラー型有限要素法による検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- オイラー型FEMを用いることで実現象に即したシミュレーションが実現でき、摩擦攪拌接合における工具挿入→移動→引き抜きの一連の解析を実行できた
- 接合過渡状態において塑性流動による発熱はプローブ下部およびショルダー端部で大きいことを確認した
- 残留応力の可視化・評価を行い、①回転数が高いほど引張り残留応力が大きい傾向 ②前進速度が大きいほど引張り残留応力が小さい傾向を確認