

摩擦攪拌接合時の欠陥形成機構 に関する数値解析的検討

2025/2/12

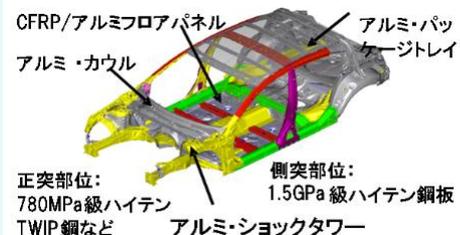
大阪公立大学大学院 工学研究科 航空宇宙海洋系専攻
海洋システム工学分野 生島研究室 M2 油井達哉

研究背景

背景

マルチマテリアル化の推進

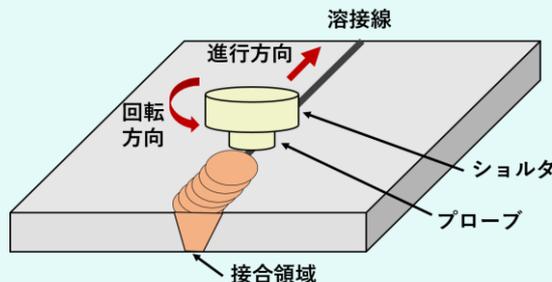
FSWは異種金属接合が可能



引用元: 革新的新構造材料等研究開発「平成27年度成果報告会」

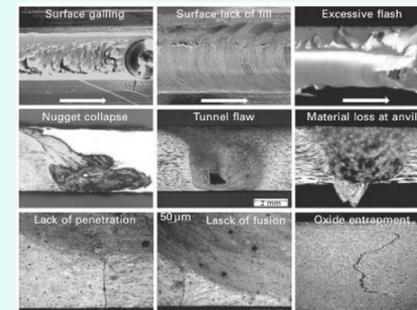
FSWとは

ツールを挿入・移動させて、**摩擦熱**と**塑性発熱**により接合する**非溶融接合**



課題点

様々な欠陥が確認
→トンネル状欠陥や
キッキングボンドなど



Lohwasser D, Chen Z, editors. Friction stir welding : From basics to application . Woodhead Publishing Ltd. And CRC Press LLC; 2009

既往の研究

Williamら: A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding **欠陥の分類**

森貞ら: 高輝度X線透過システムを用いた摩擦攪拌接合における欠陥形成機構の解明 **材料流動の可視化**

Dasら: Investigating surface defect by tool-material interaction in friction stir welding using coupled Eulerian-Lagrangian approach **解析**

- ・ 詳細な材料流動
 - ・ ツールとの影響
 - ・ 計算手法の確立
- FSWの数値計算の重要性が高まっている**

研究 目標

FSW時の数値解析的検討を行い、欠陥生成メカニズムの解明及び、良好なFSW継手が得られる接合条件の導出

研究
目的

摩擦攪拌接合時の欠陥形成機構
に関する数値解析的検討を行う

発表内容

01

本数値解析手法の理論

02

本数値解析手法の妥当性評価

- ・ 実験データとの比較
 - 温度分布の傾向比較
 - 特定の点での温度データの比較

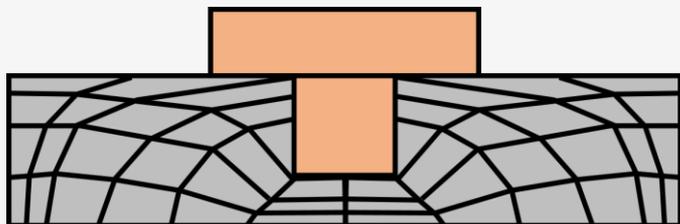
03

諸変数の欠陥形成への影響

- ・ 前進速度変化による欠陥形成の検討
- ・ 前進角度変化による欠陥形成の検討
- ・ 回転数変化による欠陥形成の検討

ラグランジュ型

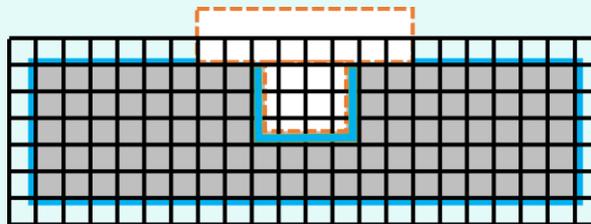
- 計算メッシュが物体に追従
- 物体形状を容易に追跡可能
- メッシュが歪み計算が破綻



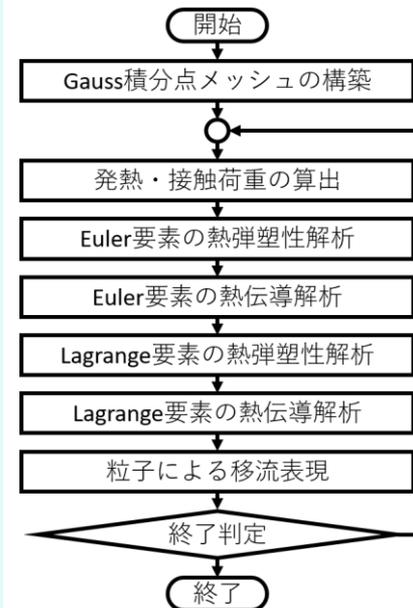
ツールの解析に適用

オイラー型

- 計算メッシュを空間に固定
- メッシュを超えて物体が変形
- 計算コストが高い



母材の解析に適用



固体の支配方程式 $\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b}$

接触モデル
発熱モデル

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

有限要素法による離散化

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \phi$$

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

Euler型表示

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \rho \mathbf{b}$$

非移流計算

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = 0$$

移流計算

接触モデル

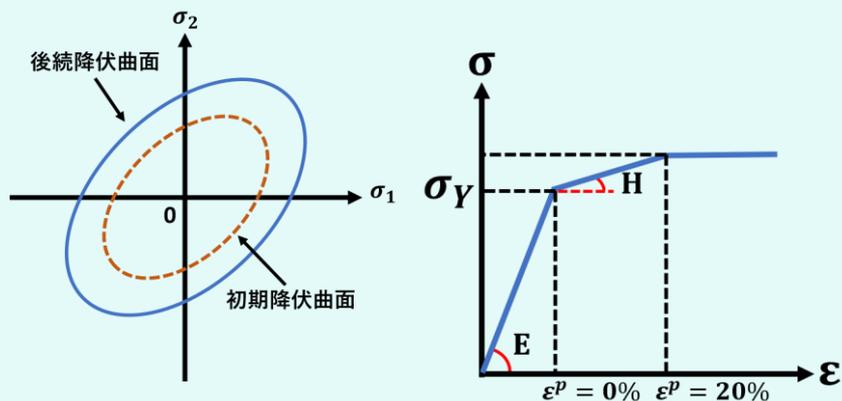
体積接触力 $f_c = \alpha(T)\Phi'\psi$

ペナルティ
係数 $\alpha(T) = \alpha_0(T) \frac{E(T)}{E(R.T)}$

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

ペナルティ法に基づいた接触力
→貫通量に応じて反力を設定

等方硬化モデル



元の20%まで塑性変形し硬化すると仮定

発熱モデル

1要素当たりの塑性発熱量 q_p は

$$q_p = \int \eta \bar{\sigma} \Delta \bar{\epsilon}_p dV$$

η : 熱効率, $\bar{\sigma}$: 相当応力, V : 単位体積
 $\Delta \bar{\epsilon}_p$: 相当塑性仕事増分

接触部分の摩擦発熱量 q_f は

$$q_f = \int_S \eta * F_f \cdot v_r dS$$

η : 熱効率, F_f : 摩擦力,
 v_r : 相対速度, S : 接触面積

ただし

$$F_f = \mu * N * \frac{-v_r}{|v_r|}$$

μ : 比例定数, N : 接触反力

塑性仕事増分による発熱量と
摩擦熱により熱伝導解析を実行

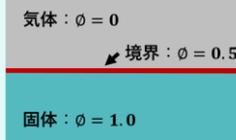
VOF法

固体界面識別子 $\phi = 0 \sim 1$ をとり、
 ϕ 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



発表内容

01 | 本数値解析手法の理論

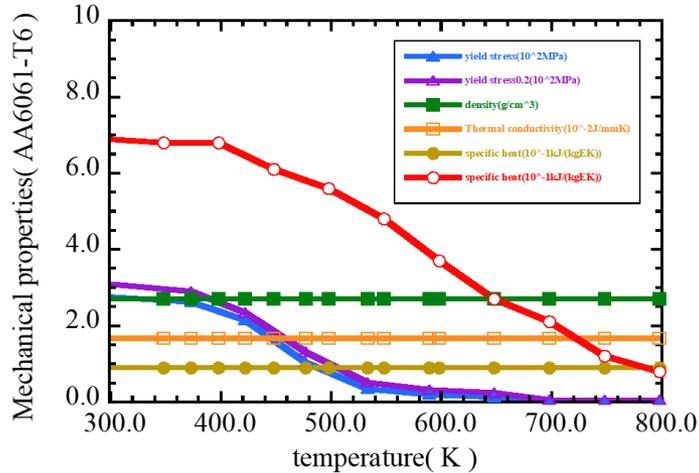
02 | 本数値解析手法の妥当性評価

- ・ 実験データとの比較
 - 温度分布の傾向比較
 - 特定の点での温度データの比較

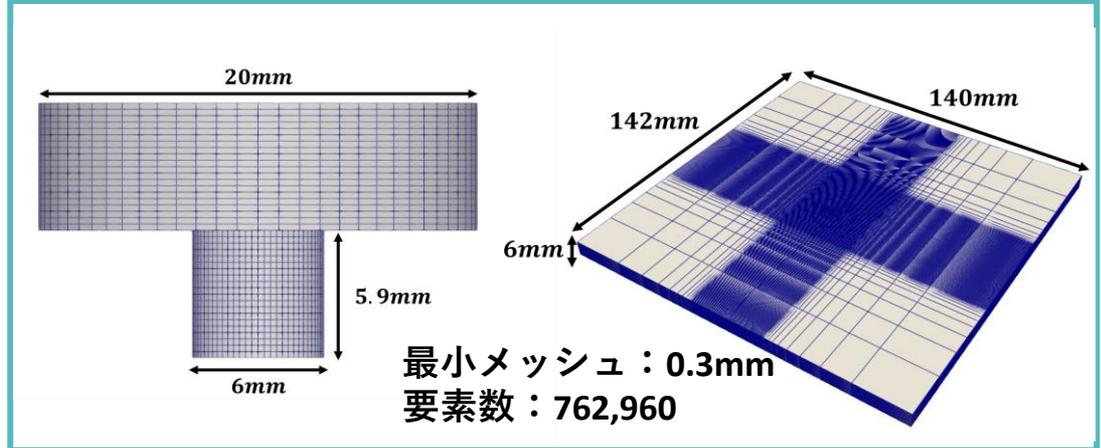
03 | 諸変数の欠陥形成への影響

- ・ 前進速度変化による欠陥形成の検討
- ・ 前進角度変化による欠陥形成の検討
- ・ 回転数変化による欠陥形成の検討

AS材料定数(AA6061-T6)

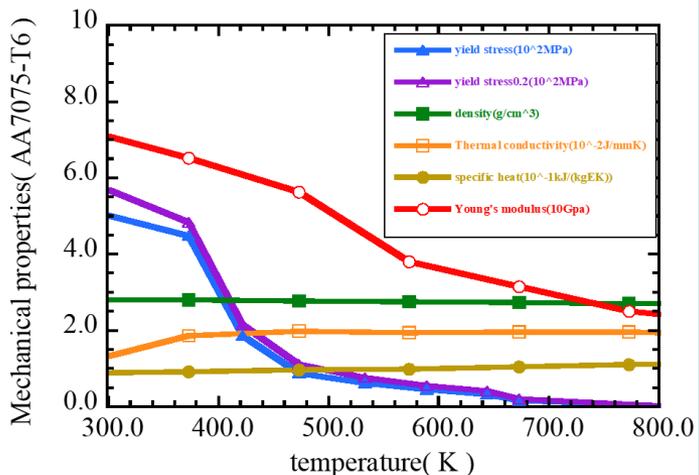


解析モデル

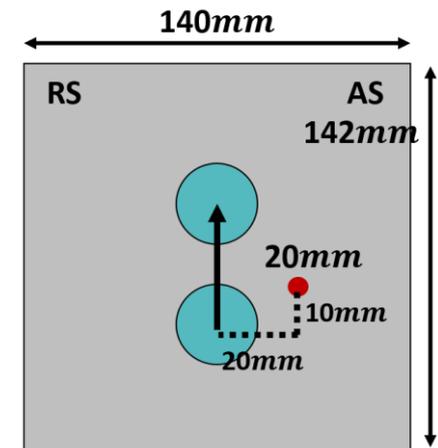


接合条件

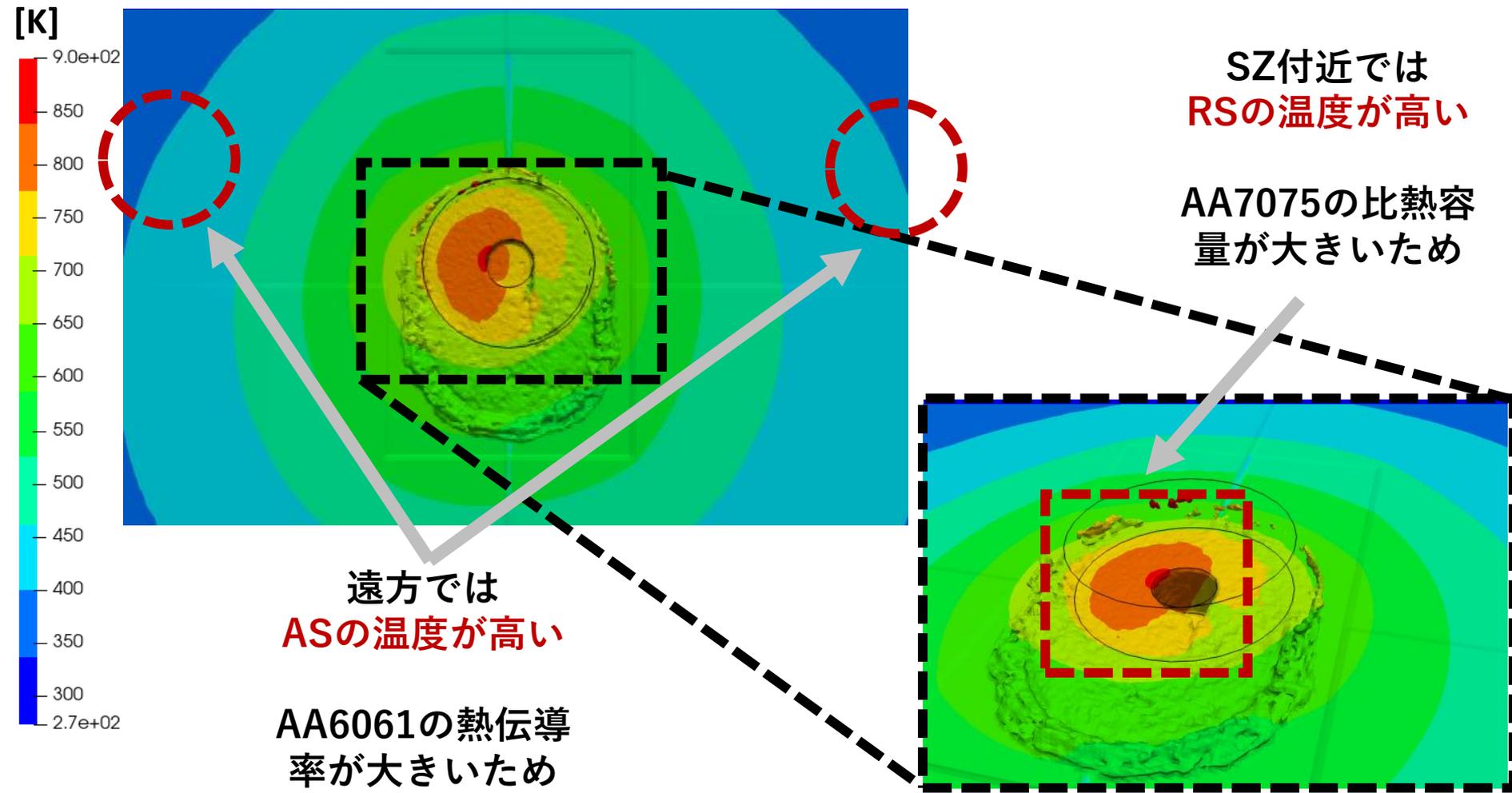
RS材料定数(AA7075-T6)



前進速度：98mm/min
 回転数：1250rpm
 前進角：0度
 前進距離：20mm

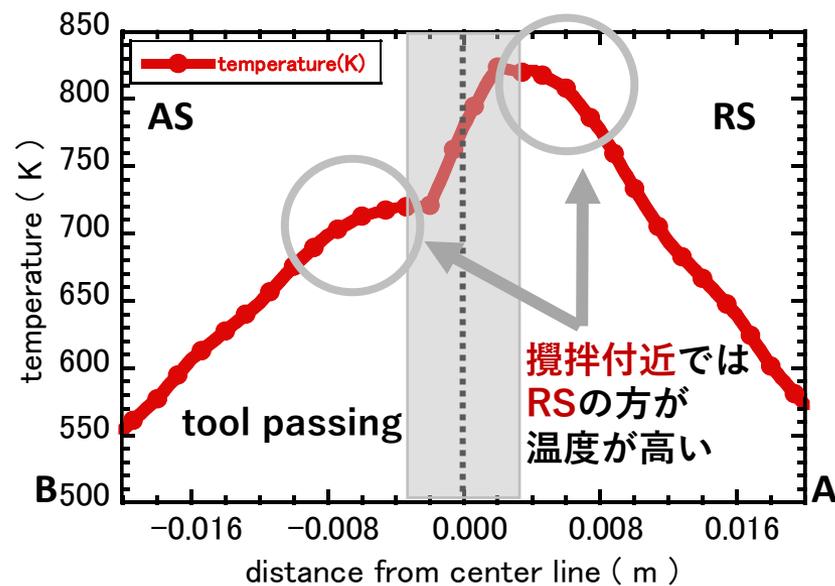
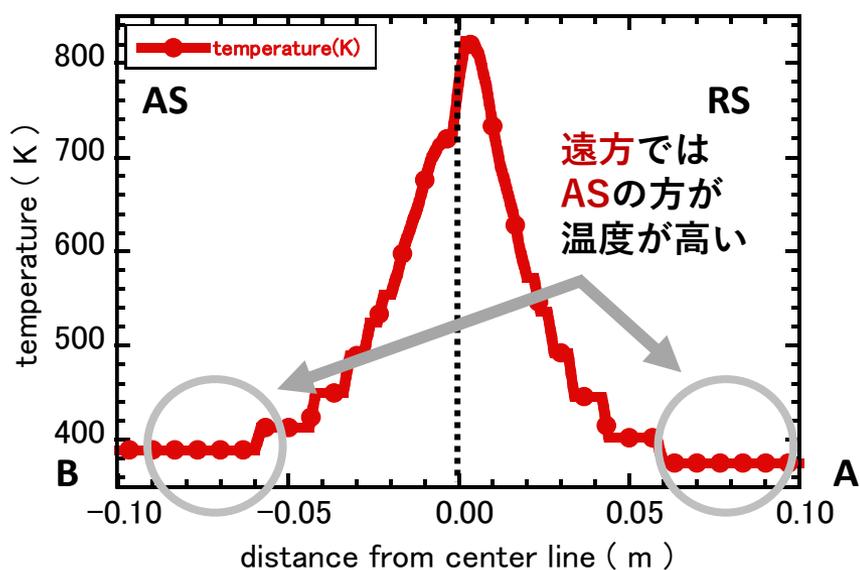
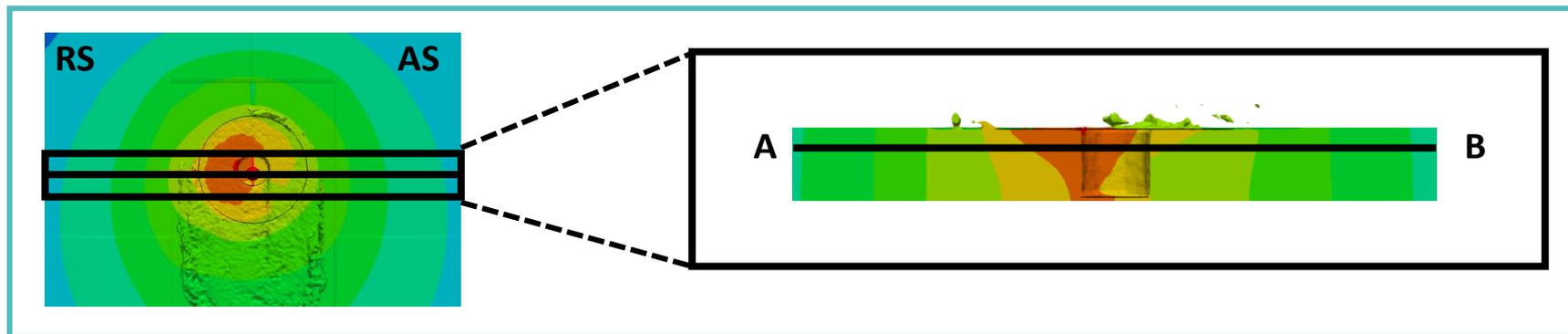


x-y平面（板表面から0.5mm）における温度分布結果



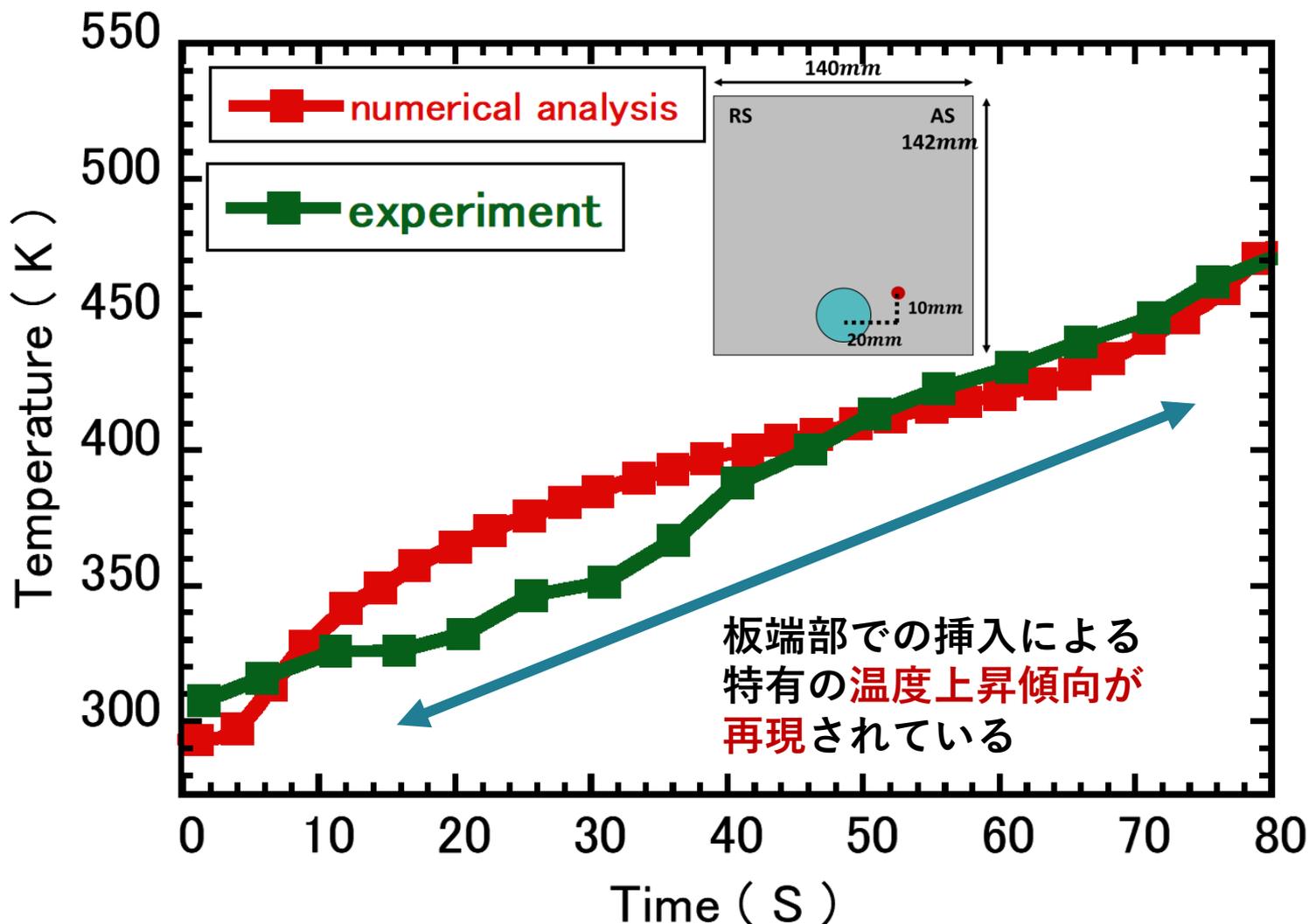
実験の温度分布傾向と良好に一致していることを確認

横断面（板表面から0.5mm）における温度分布結果



実験の温度分布傾向と良好に一致していることを確認

検出点における実験と解析の時系列温度データの比較



本解析手法による数値解析結果の温度データと実験値が良好に一致

発表内容

01 | 本数値解析手法の理論

02 | 本数値解析手法の妥当性評価

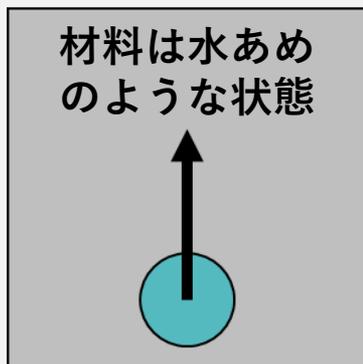
- ・ 実験データとの比較
 - 温度分布の傾向比較
 - 特定の点での温度データの比較

03 | 諸変数の欠陥形成への影響

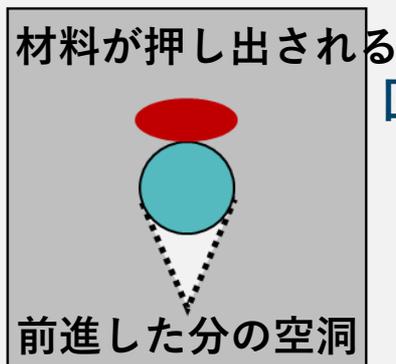
- ・ 前進速度変化による欠陥形成の検討
- ・ 前進角度変化による欠陥形成の検討
- ・ 回転数変化による欠陥形成の検討

接合イメージ

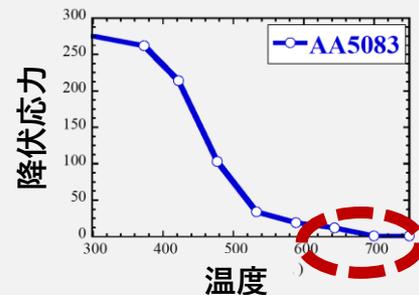
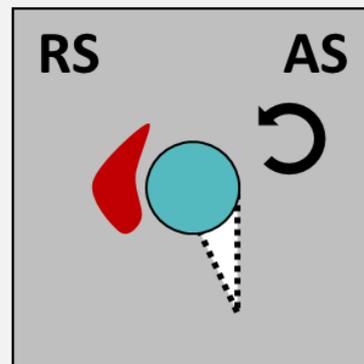
バリを抑制し、材料をツール後方に受け流し
空洞を埋められるかが良質な継手への鍵



前進



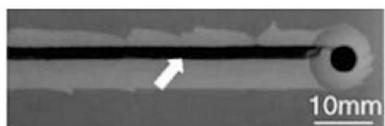
回転



十分な入熱を加え、**力学的溶融**を実現することが重要

入熱量を制御する**前進速度**・**回転数**及び材料流動に影響を与える**前進角**は最重要

欠陥の実例



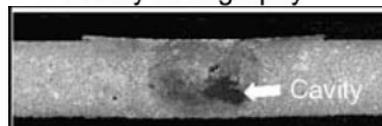
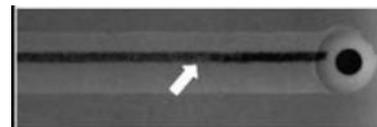
X-Ray radiography



Cross-section

溝状欠陥

- ・ 入熱不足に起因
- ・ 進展すると
ツール破損へ



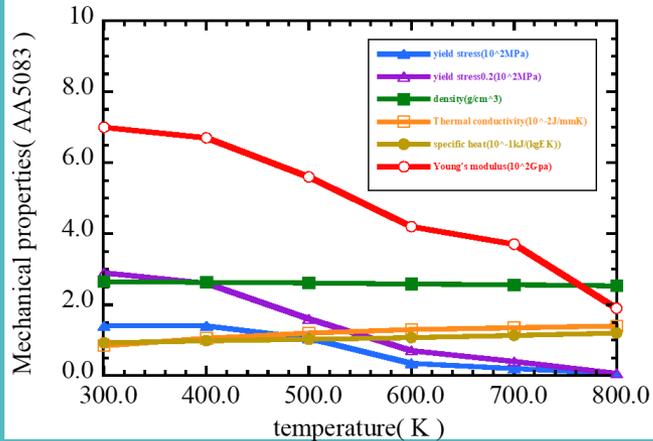
Cross-section

トンネル状欠陥

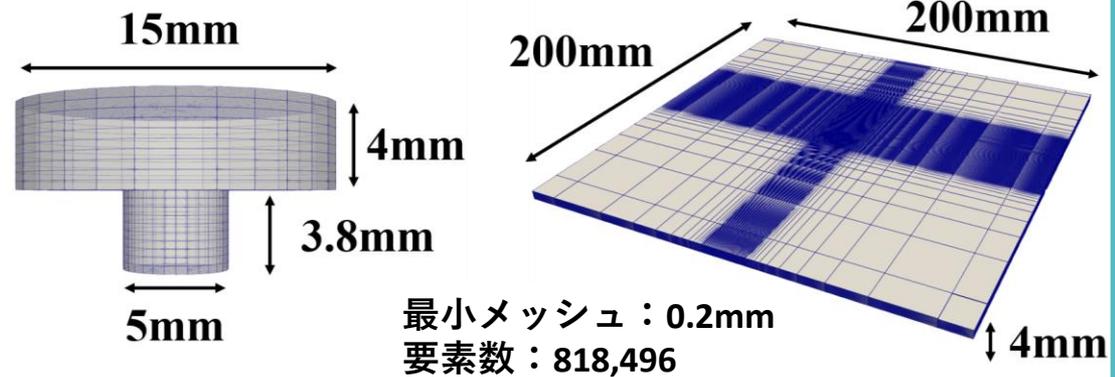
- ・ 入熱過剰に起因
- ・ 回転数を増加
させても埋まらない

前進速度・**回転数**・**前進角度**の最重要接合パラメータに関して検討を行う

材料定数(AA5083)

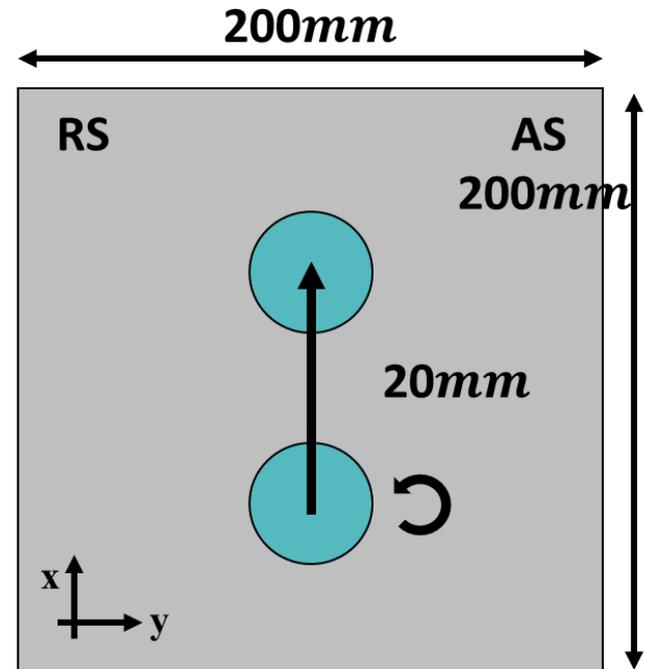


解析モデル



接合条件

- $v=100,250,500,750,1000$ [mm/min]
- $\alpha=100,250,500,1000,1500$ [rpm]
- 前進角-3~6度
- dwelling : 3s
- 接合距離 : 20mm



発表内容

01 | 本数値解析手法の理論

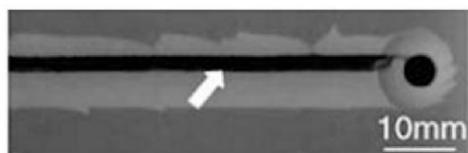
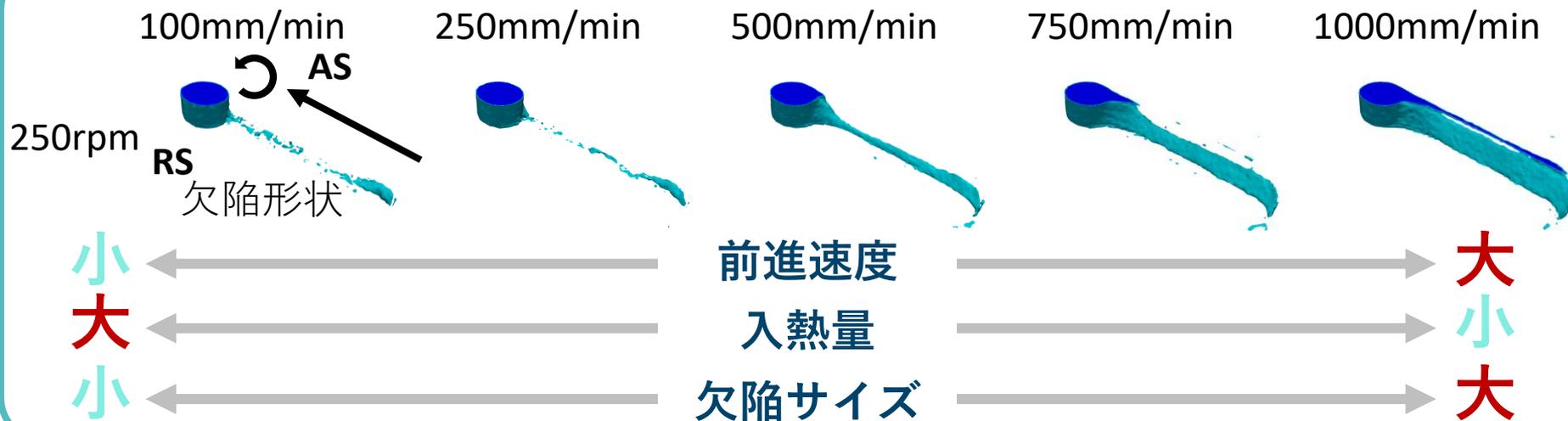
02 | 本数値解析手法の妥当性評価

- ・ 実験データとの比較
 - 温度分布の傾向比較
 - 特定の点での温度データの比較

03 | 諸変数の欠陥形成への影響

- ・ **前進速度変化による欠陥形成の検討**
- ・ 前進角度変化による欠陥形成の検討
- ・ 回転数変化による欠陥形成の検討

欠陥の可視化（固体界面識別子： $0 \leq \phi \leq 0.5$ ）



X-Ray radiography



Cross-section
実例

溝状欠陥の確認



実現象と同様の
傾向

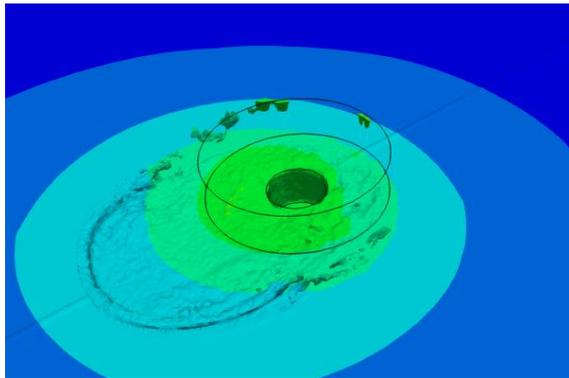
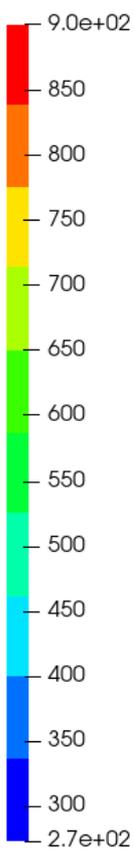


1000mm/minでの解析結果

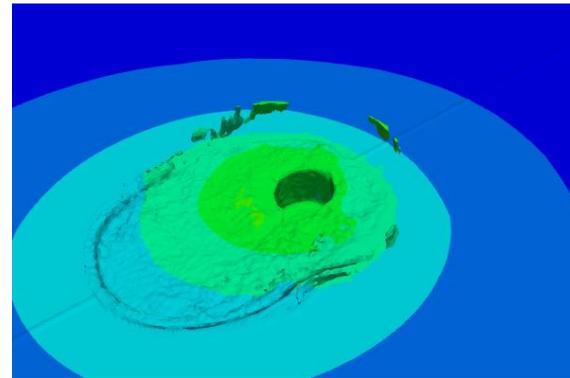
前進速度が増加し入熱量が不足すると溝状欠陥が表れることを確認

温度分布結果

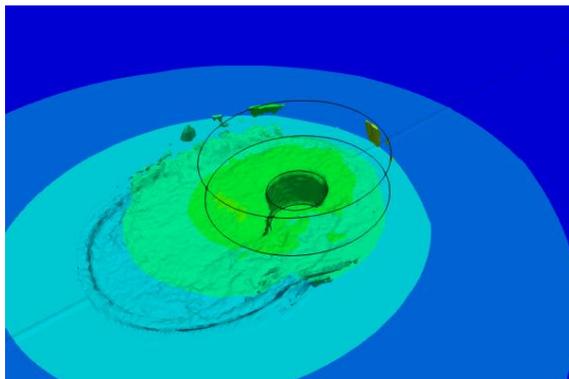
250mm/min 500mm/min 750mm/min 1000mm/min



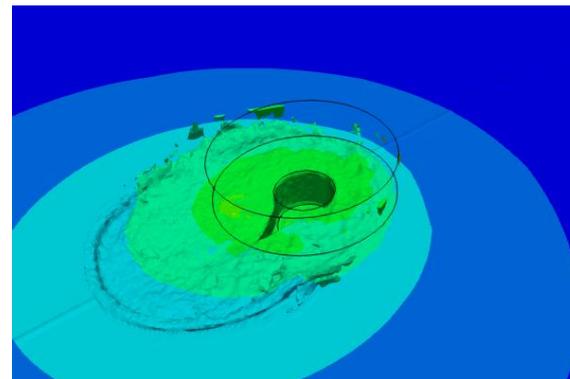
250mm/min



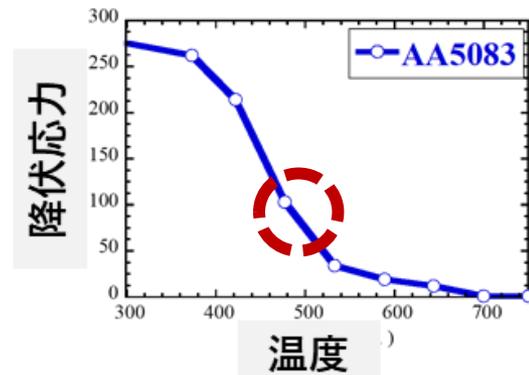
500mm/min



750mm/min



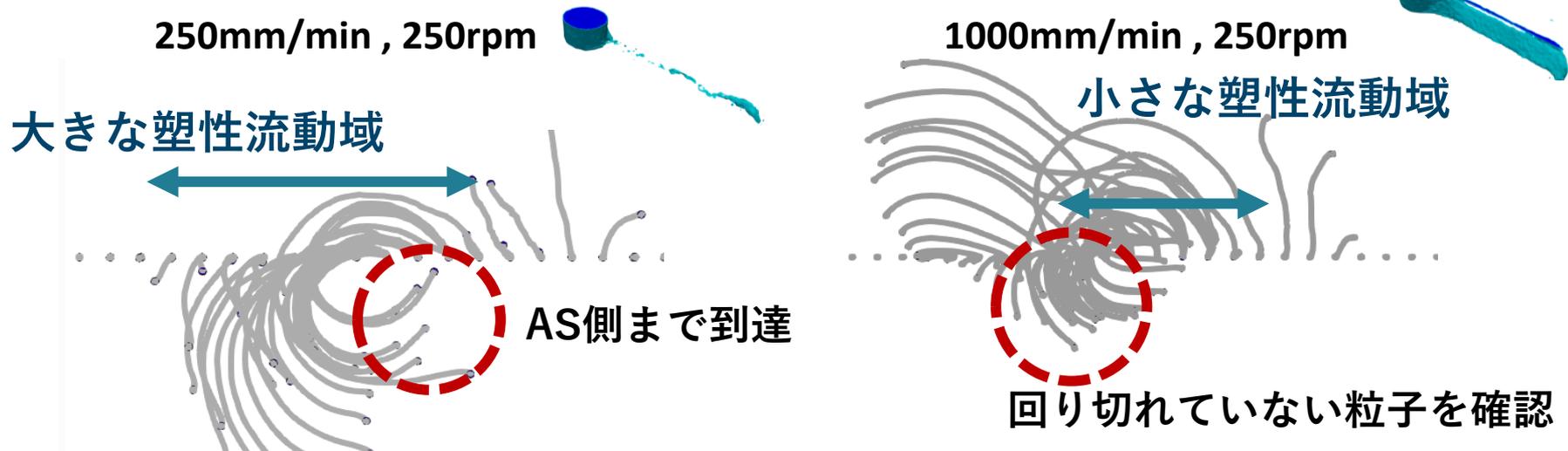
1000mm/min



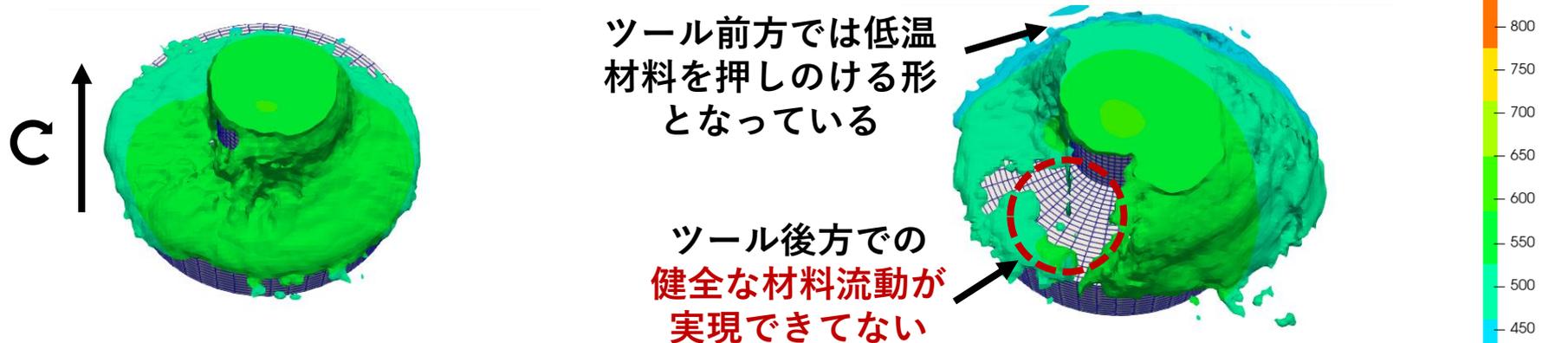
前進速度が大きく入熱が小さいため、降伏応力が高い状態

前進速度が大きくなるほど温度分布が低い傾向を確認し、降伏応力が高く材料流動を生じさせるのが難しい

材料流動現象の可視化



塑性仕事増分60000[N · m]以上の材料の温度分布結果



- ・ 溝状欠陥は入熱が小さく材料が回りきらないことで生じる可能性
- ・ ツール前方の負荷が大きくツール破損へとつながる可能性

発表内容

01 | 本数値解析手法の理論

02 | 本数値解析手法の妥当性評価

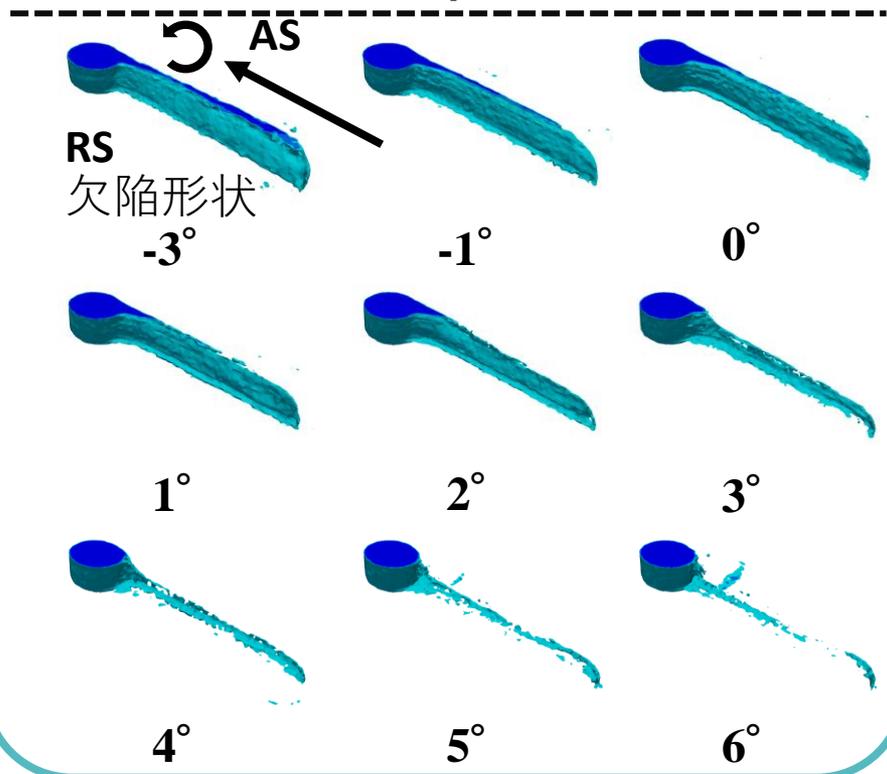
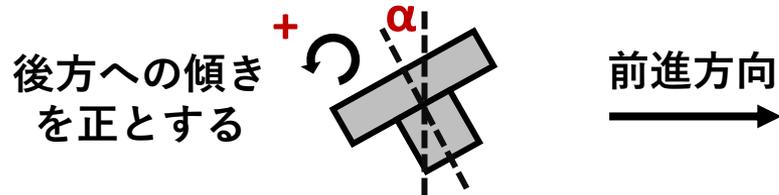
- ・ 実験データとの比較
 - 温度分布の傾向比較
 - 特定の点での温度データの比較

03 | 諸変数の欠陥形成への影響

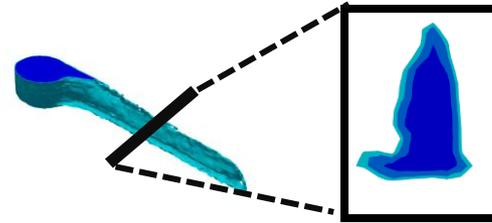
- ・ 前進速度変化による欠陥形成の検討
- ・ **前進角度変化による欠陥形成の検討**
- ・ 回転数変化による欠陥形成の検討

欠陥の可視化

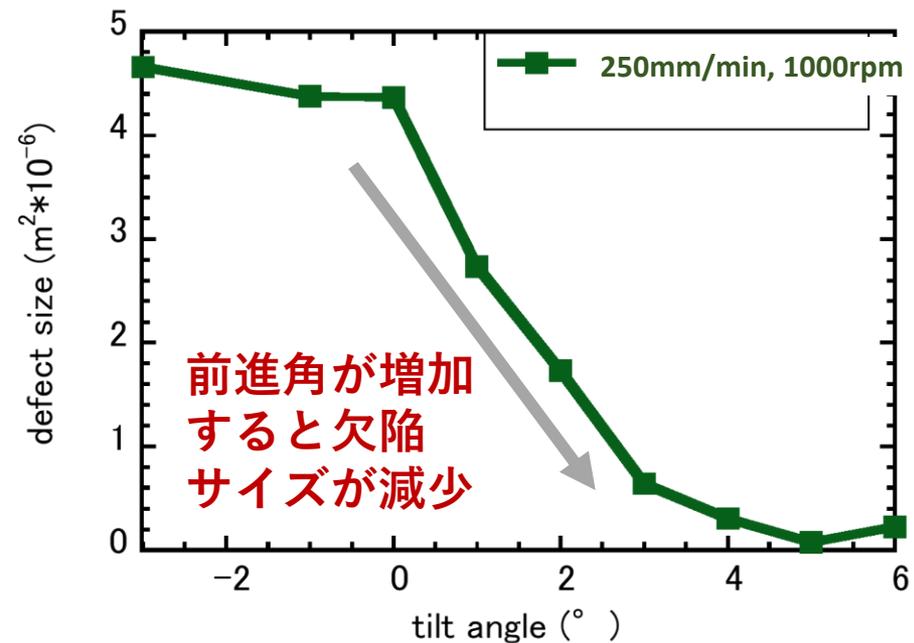
(固体界面識別子: $0 \leq \phi \leq 0.5$)



欠陥のサイズの算出法



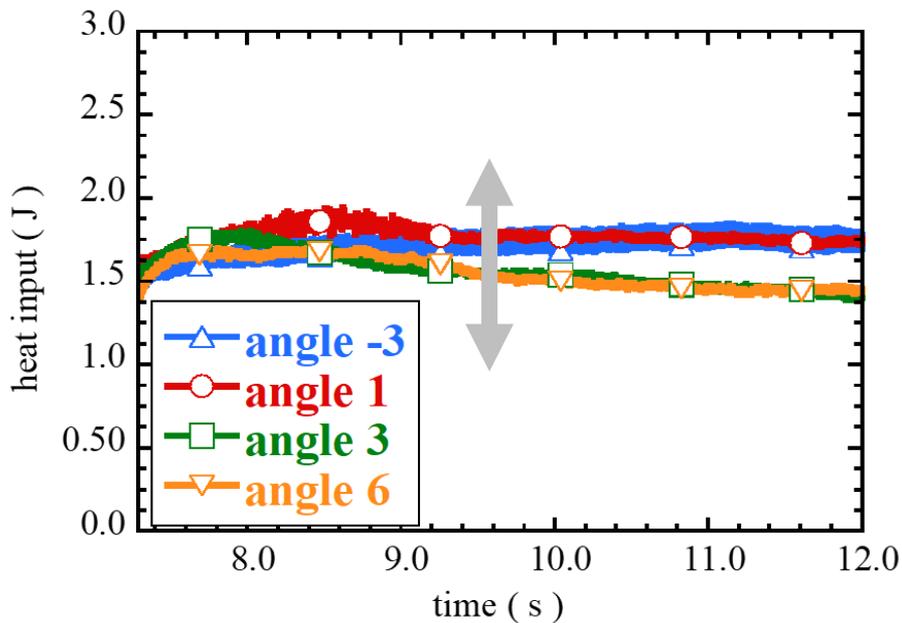
欠陥サイズ
→X=0での
断面積で検討



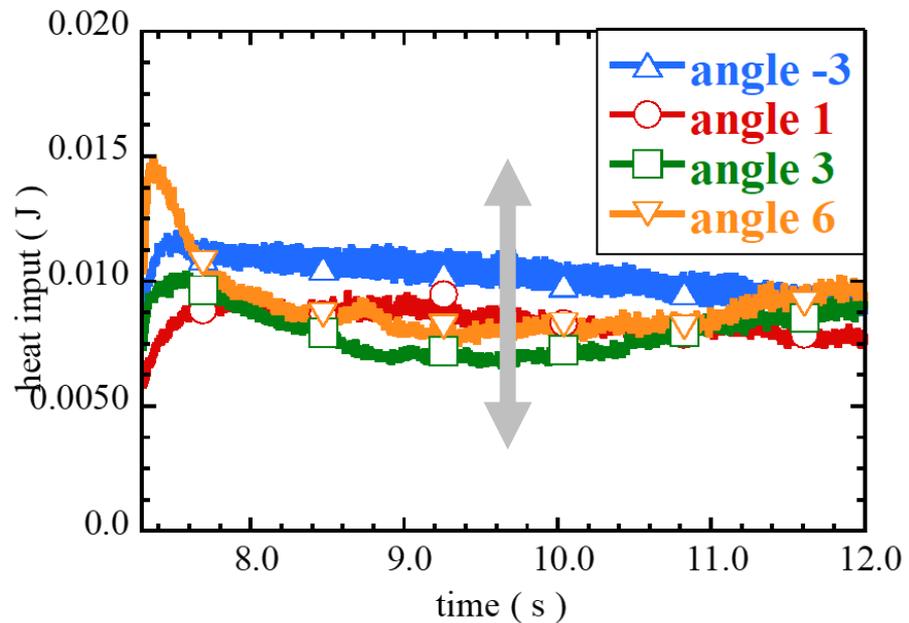
前進角度が増加するほど欠陥サイズが減少する傾向を確認
→前進角度が欠陥形成に大きな関連があることが示唆される

前進角変化による摩擦発熱量と塑性発熱量

摩擦発熱量と塑性発熱量ともに優位な差は確認されなかった
 →前進角度が変化しても入熱量はあまり変化しない



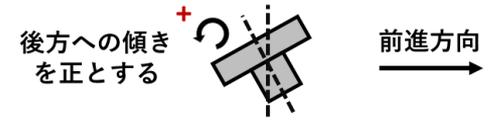
前進時の摩擦発熱量



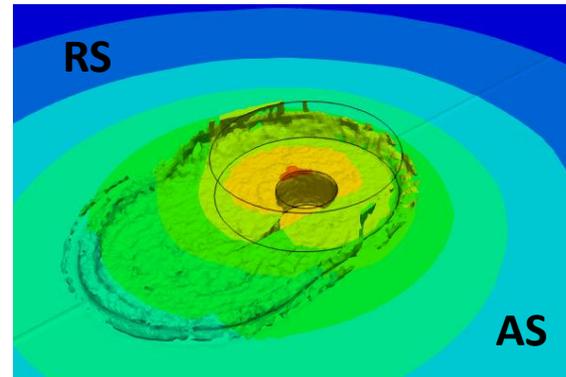
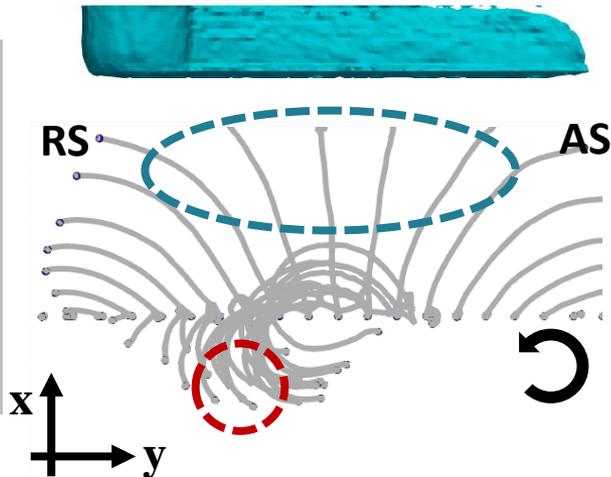
前進時の塑性発熱量

摩擦発熱量及び塑性発熱量のいずれも優位な差はなかった
 →ツールとの相互作用が欠陥形成に大きく関連

x-y平面におけるトレーサー粒子の可視化

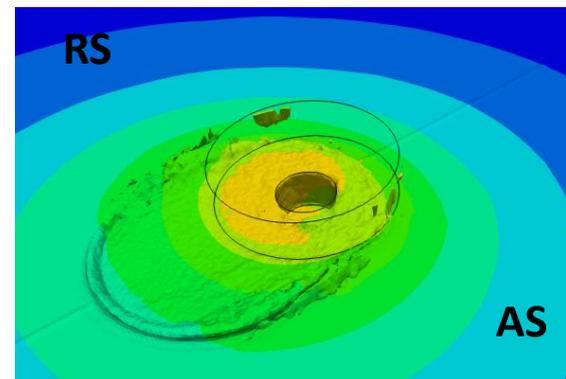
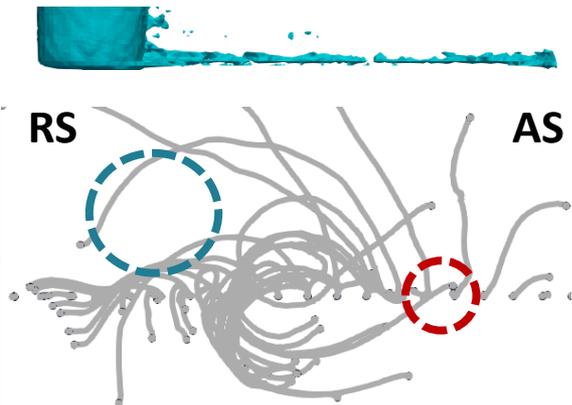


0°
欠陥…大



- ・ 前面に押し出され、バリとして放出
- ・ 回り切れていない材料を多数確認

5°
欠陥…小



- ・ RS側へと回り込むように材料が流動
- ・ 材料がRS側からAS側へと回りこんでいる

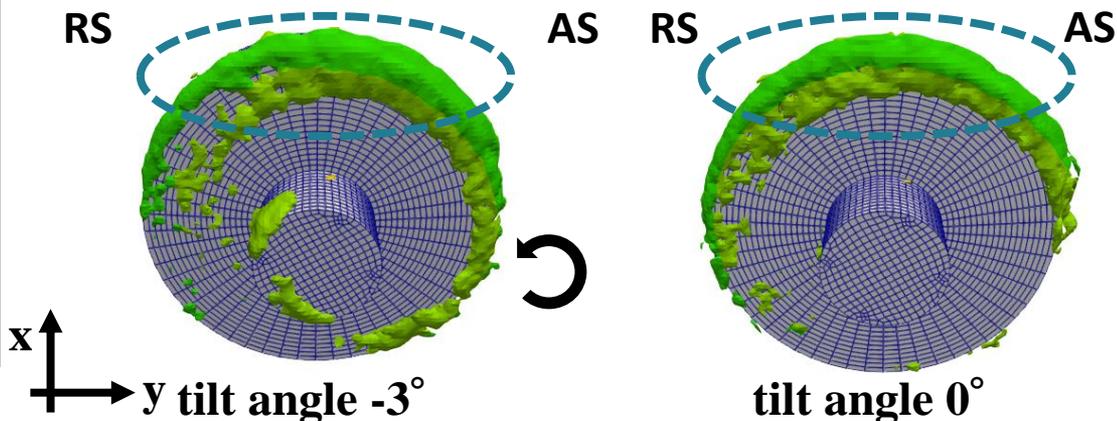
ツールはバリを抑制し、かつRS→ASへの材料流動を促進する役割

塑性仕事増分100000[N*m]以上の材料の温度分布結果

→バリ発生や塑性流動に大きく寄与している範囲を可視化

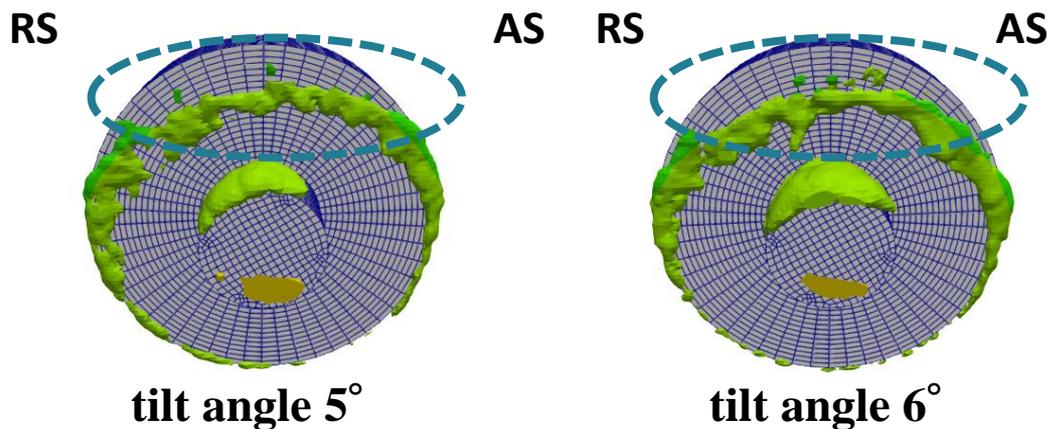


欠陥…大



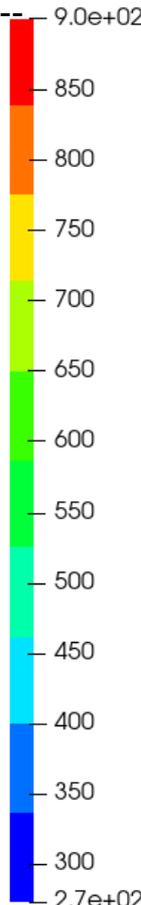
・ショルダ前方の端部及び側面で塑性仕事増分が大きい

欠陥…小

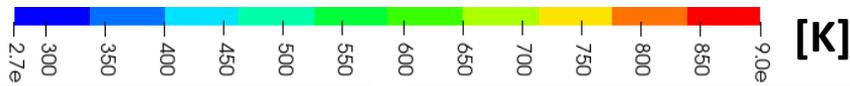
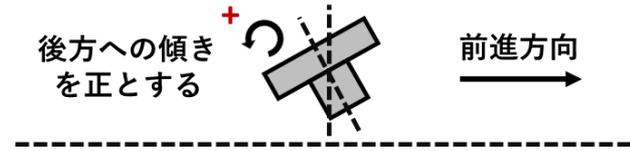


・ショルダ前方の端部より内側で塑性仕事増分が大きい
→リザーバーとしての役割

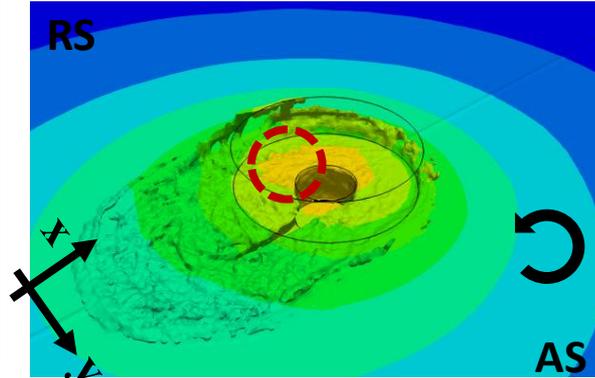
前進角が大きい条件ではショルダの内側で塑性仕事増分が大きい
→ツールは前進時に押し出された材料を受け流す役割を果たしている



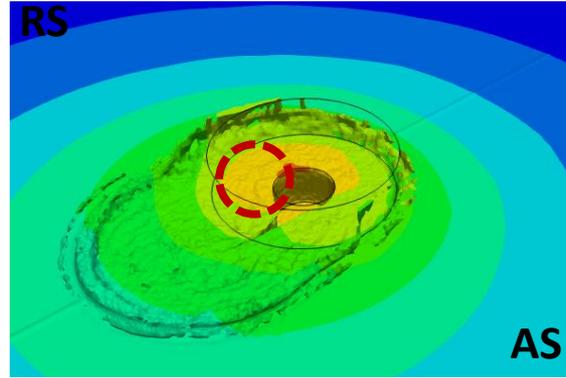
前進角度を変化させた際の温度分布結果



欠陥…大



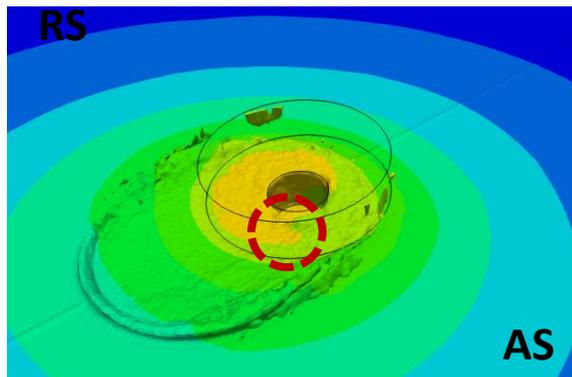
tilt angle -3°



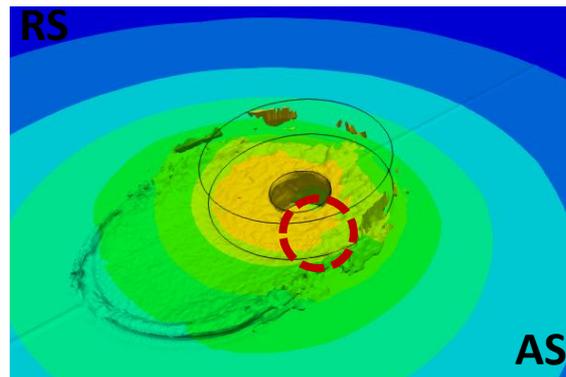
tilt angle 0°

- 700[K]の温度域帯がツール前方で発生

欠陥…小



tilt angle 5°

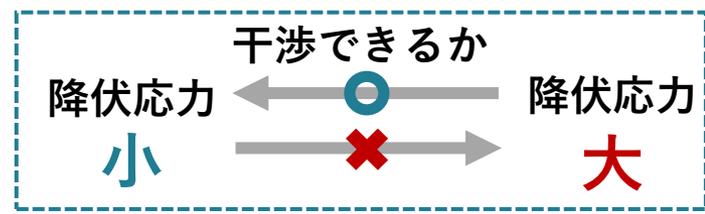
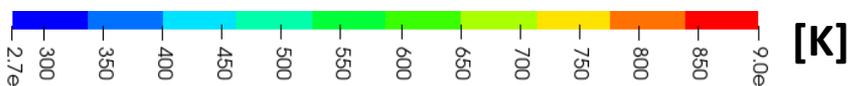


tilt angle 6°

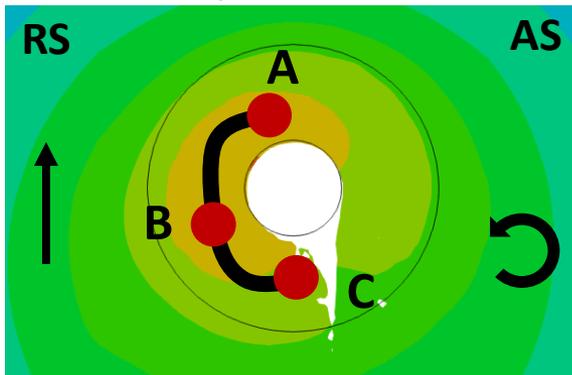
- 700[K]の温度域帯がツール後方のRS→ASにかけて広がっている

前進角が大きい条件ではツール後方部に高温部が均一に広がっている
→ツールは温度分布を調整し、後方部の材料流動を促進する役割

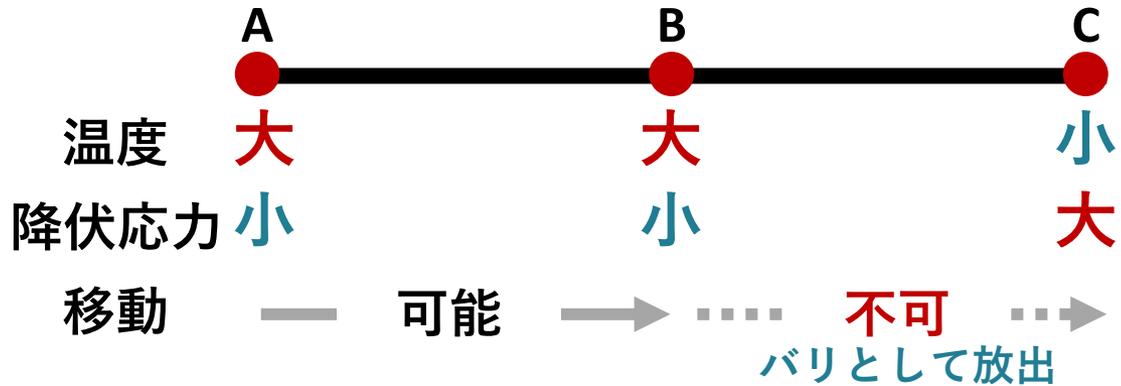
温度分布によって欠陥が異なる理由



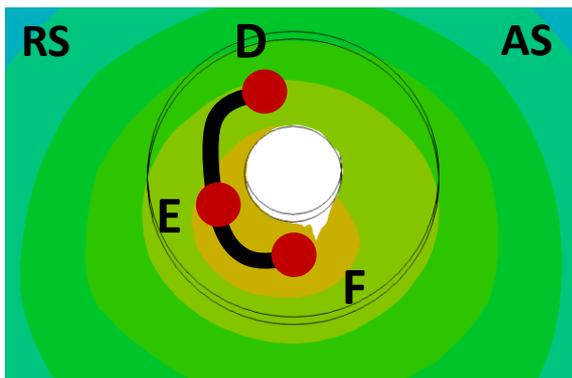
欠陥…大



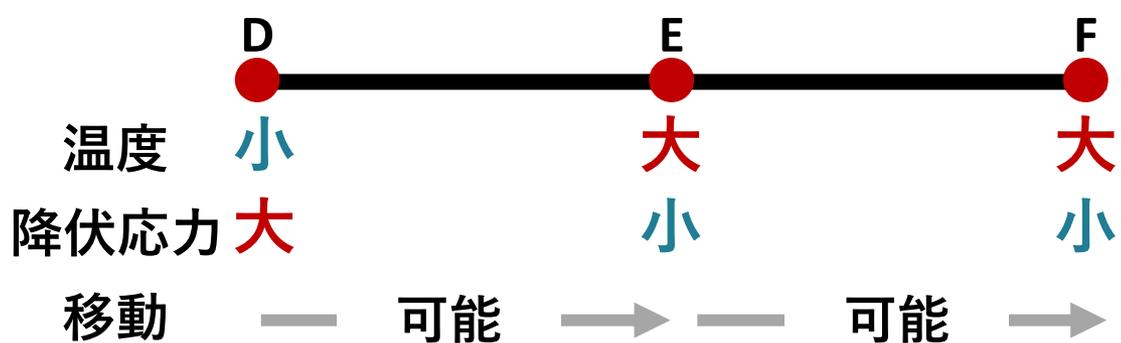
tilt angle 0°



欠陥…小



tilt angle 6°



前進角が大きい条件ではツール後方部に高温部が均一に広がっている
 → ツールは温度分布を調整し、後方部の材料流動を促進する役割

発表内容

01 | 本数値解析手法の理論

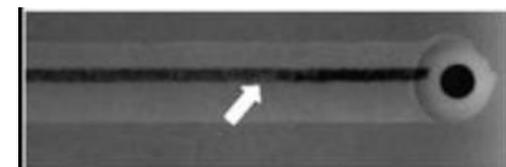
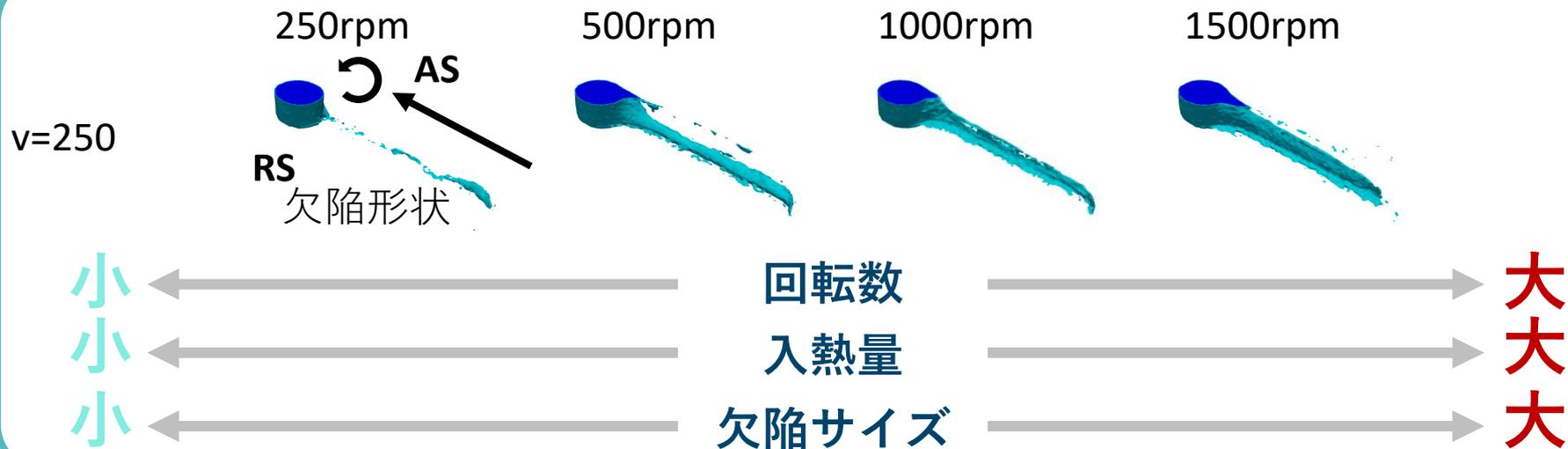
02 | 本数値解析手法の妥当性評価

- ・ 実験データとの比較
 - 温度分布の傾向比較
 - 特定の点での温度データの比較

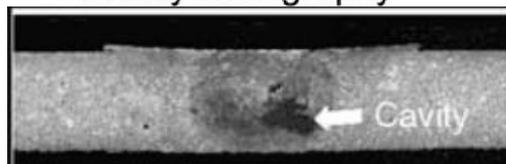
03 | 諸変数の欠陥形成への影響

- ・ 前進速度変化による欠陥形成の検討
- ・ 前進角度変化による欠陥形成の検討
- ・ **回転数変化による欠陥形成の検討**

欠陥の可視化（固体界面識別子： $0 \leq \phi \leq 0.5$ ）



X-Ray radiography



Cross-section
实例

トンネル状欠陥
の確認



実現象と同様の
傾向

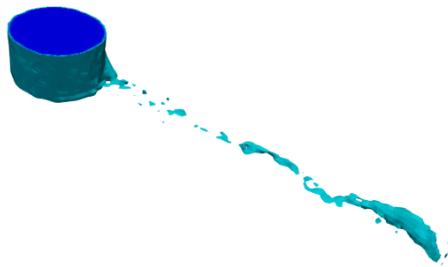
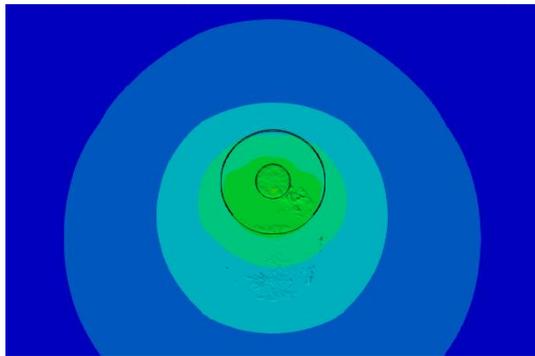


1000mm/minでの解析結果

回転数が増加し入熱量が過剰になるとトンネル状欠陥が表れることを確認

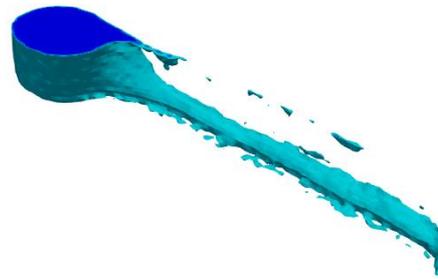
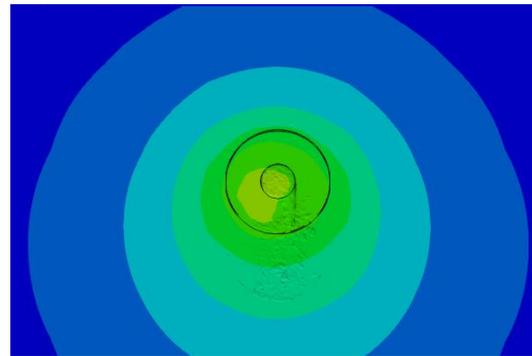
回転数を変化させた際の温度分布結果

250rpm



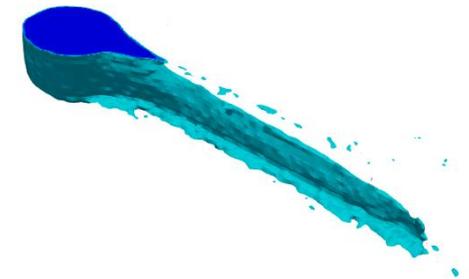
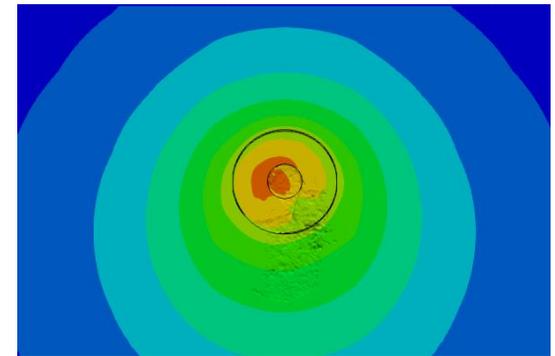
ツール直下の**温度分布**
が**均一**で、欠陥が小さい

500rpm



ツール**後方**の**温度分布**に
差があり、欠陥が大きい
(前進角検討と同様)

1500rpm

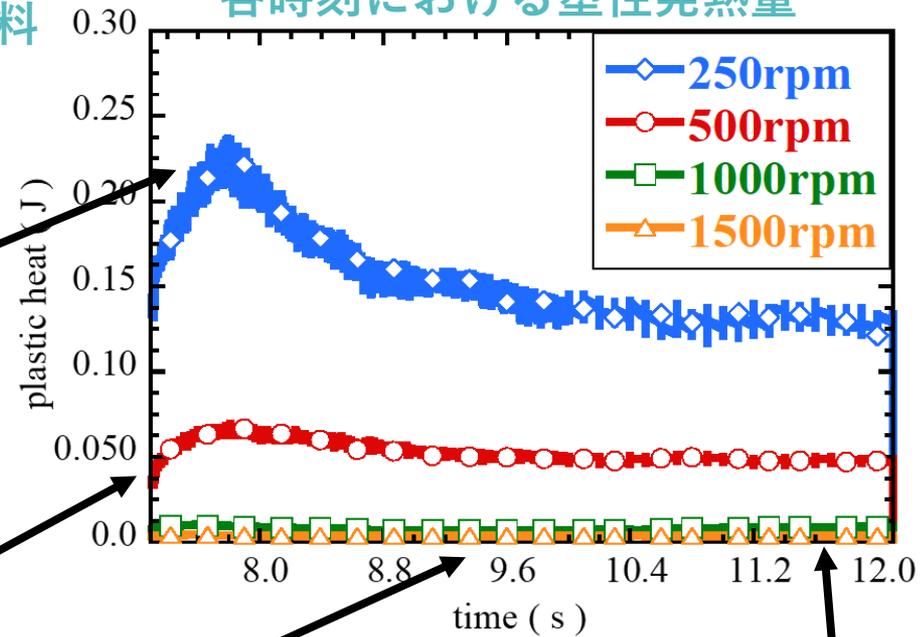
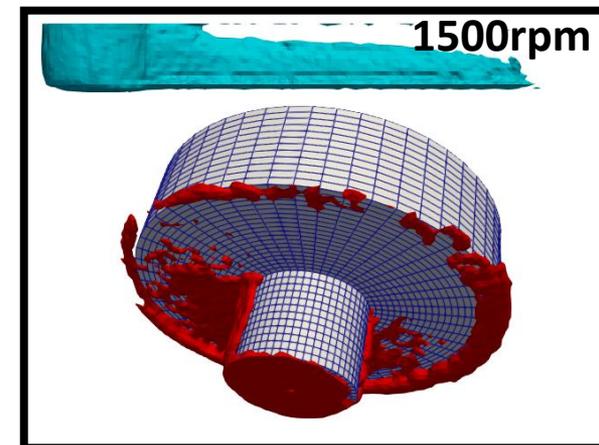
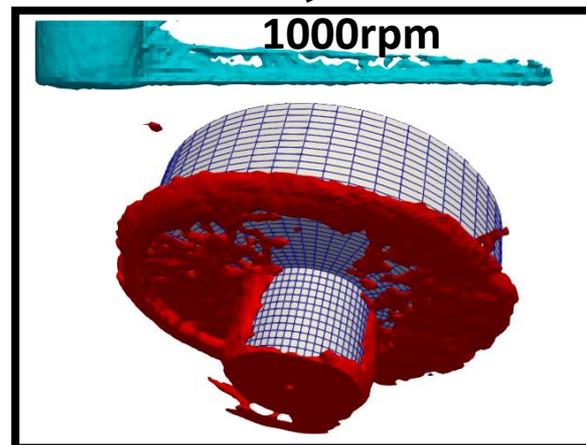
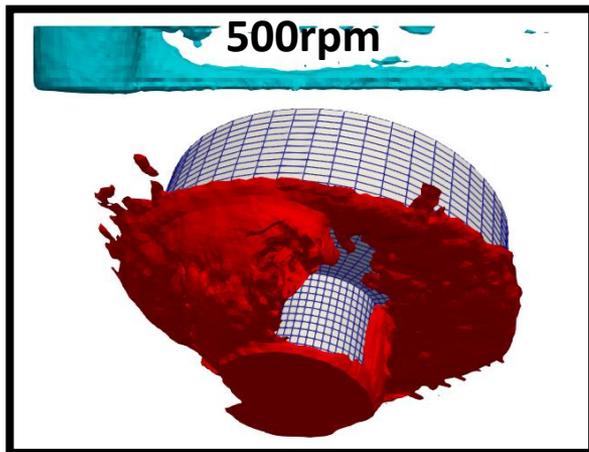
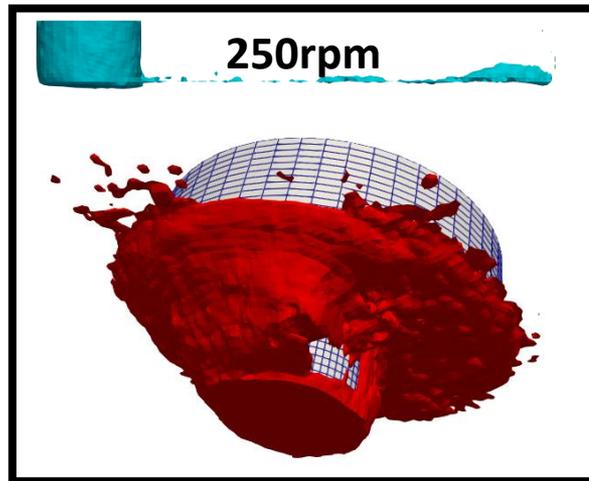


ツール直下で**力学的溶**
融温度を**実現**している
が、欠陥は大きい

1000rpmと1500rpmでは欠陥形成機構が異なる可能性

塑性仕事増分100000[N*m]以上の材料

各時刻における塑性発熱量



回転数が増加すると表面しか追従せず健全な塑性流動が形成できない

□実験結果と比較し、妥当性評価を実施

→巨視的な温度分布傾向の比較と検出点での時系列温度データの比較を行い実験値と良好に一致していることを確認

□前進速度と回転数、前進角を変化させ、欠陥サイズへの影響を検討し、以下のことを明らかにした

- ・速度増加による入熱不足の欠陥ではツール負荷が大きい接合環境で材料が回りきらないことで生じる

- ・前進角変化ではツールがリザーバーと温度分布を調整し、後方部の材料流動を促進する役割を果たしている

- ・回転数変化における入熱過剰欠陥においては、力学的溶融に達しているものの、空滑りが生じトンネル欠陥が生じる