

2024.02.13(火)

修論発表

摩擦攪拌接合時のツールの形状が 接合性とツール損傷に及ぼす 影響に関する数値解析的検討

大阪公立大学大学院

生島研究室

M2 九鬼 正治

研究背景

摩擦攪拌接合 (FSW)

- ・従来アルミニウム等の接合に利用
- ・低入熱量
- （溶接変形小
残留応力小
- ・鉄鋼材の接合にも応用

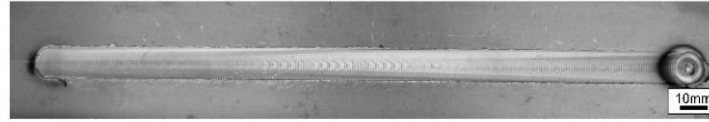


図4 実験で得られた代表的な継手の外観
(HT780, 条件 200rpm-200mm/min)

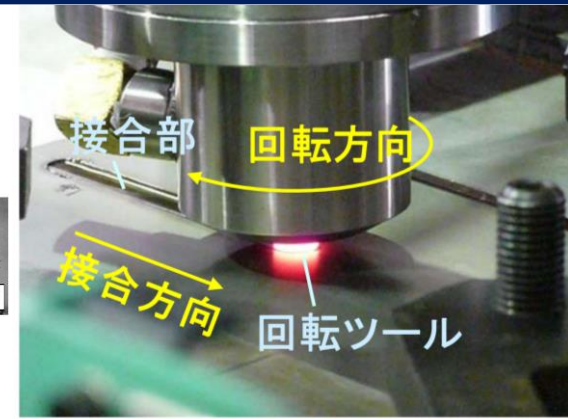


図3 高強度鋼板のFSWの外観

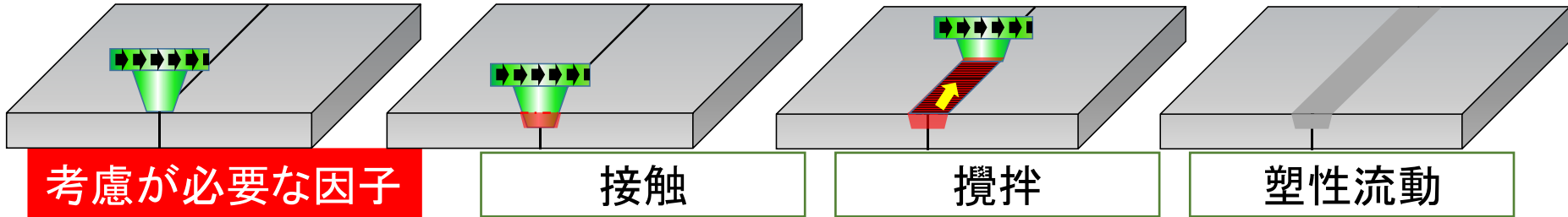
(引用: 松下 宗生: 高強度鉄鋼材料の摩擦攪拌接合 (FSW), 日本溶接協会, WE-COMマガジン, Vol.36, (2020))

次世代の接合法として期待大

回転・挿入

回転・移動

引き抜き



FSW解析ではひずみが大きくメッシュが崩壊し解析困難

粒子法 (宮坂ら)

○ 接触 ○ 攪拌・塑性流動、温度場 ○ 摩耗の検討可能

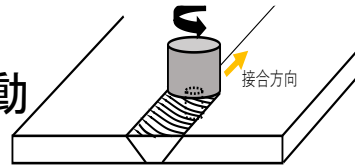
本研究
の目標

粒子法に基づいた力学シミュレーションによりFSW時の力学挙動について検討を行う

現状の鉄鋼材のFSWの課題

接合時の課題

実験での接合中の材料の挙動の可視化が困難
⇒接合性の高いツールの開発が困難



ツール強度

- ・挿入、回転時に鉄鋼材では特にツールに対して大きな荷重が作用、損傷、摩耗が発生
⇒発生メカニズムの可視化が困難
- ・ツールの開発に高コスト

力学的シミュレーション検討が必要

ツール形状

球状ツール

被接合材

温度 : 低入熱だと接合欠陥
攪拌度 : 攪拌不足による接合欠陥

接合性

- ・従来のツール形状(円柱状ツール)より長寿命なツールとして期待
- ・荷重の大きい鉄鋼材のFSWで期待

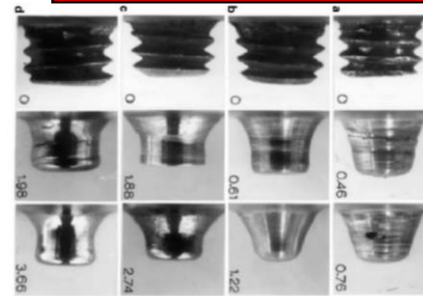
ツール

摩耗量: 大きいとツール寿命が短

ツール損傷

新たな形状の球状ツールに注目

接合性、ツール損傷の検討は重要



引用

Zhang, Y. N., Cao, X., Larose, S., & Wanjara, P. (n.d.). Review of tools for friction stir welding and processing.

粒子法に基づき、鉄鋼材のFSW時の接合性(温度、攪拌)、ツール損傷(摩耗)を検討し球状ツールの有用性を確かめる

支配方程式

材料の流動現象をN-S方程式により表現、
金属を高粘性流体として解析

N-S方程式:
$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nabla(\nu \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{g}$$

連続の式:
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

支配方程式

熱伝導方程式:

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{k}{\rho C_p} \nabla^2 T + \frac{Q}{\rho C_p}$$

粒子法(MPS法)

連続体の挙動を粒子の
運動により計算する方法

重み関数 $\omega = \begin{cases} \frac{r_e - r}{r} & (0 \leq r \leq r_e) \\ 0 & (r_e \leq r) \end{cases}$

粒子数密度
$$n_i = \sum_{j \neq i} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad i, j: \text{粒子番号}$$

勾配モデル

$$\nabla P_i = \frac{d}{n_i} \sum_{j \neq i} \left[\frac{(P_j - P_i)(\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \right]$$

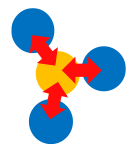
発散モデル

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_i = \frac{d}{n_i} \sum_{j \neq i} \frac{(\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i)(\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)$$

ラプラシアンモデル

$$\nabla^2 \mathbf{u}_i = \frac{2d}{\lambda n_i} \sum_{j \neq i} [(\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i) w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)] \quad \lambda = \frac{\sum_{j \neq i} |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2 w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)}{\sum_{j \neq i} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)}$$

塑性発熱量の算出



①速度場よりひずみ速度場を算出

$$\mathbf{u} \Rightarrow \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \Rightarrow \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$$

②ひずみ速度場と温度場より流動応力場を算出

流動応力は材料により異なるため、次式にて算出⁽¹⁾
 $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}, T \Rightarrow \sigma$

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \left(\frac{2}{3} \boldsymbol{\varepsilon}_{ij} \boldsymbol{\varepsilon}_{ij} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A} \right)^{\frac{1}{n}} + \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{\frac{2}{n}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}, \quad Z = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \exp \left(\frac{Q}{RT} \right)$$

③発熱量計算

発熱量は相当流動応力による仕事の90%と摩擦発熱

$$Q = \sigma \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \times 0.9 + kpv$$

参考文献

(1) T. Sheppard and A. Jackson, "Constitutive equations for use in prediction of flow stress during extrusion of aluminium alloys", *Materials Science and Technology* Vol. 13 March 1997.

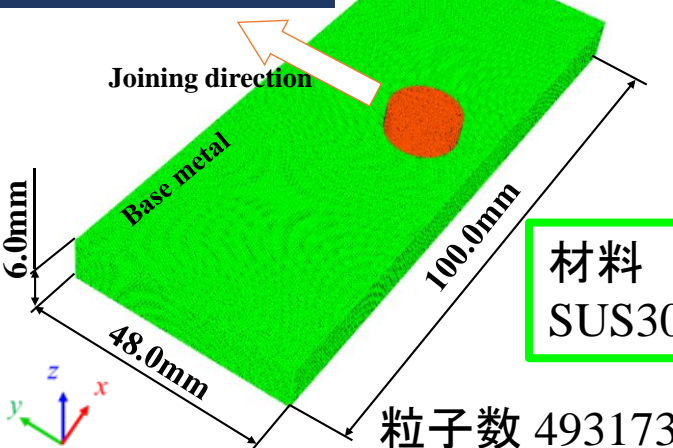
ツールの接触および回転に起因する
塑性流動現象を再現

攪拌に起因する熱伝導現象を再現

接合性（温度、攪拌度）の検討

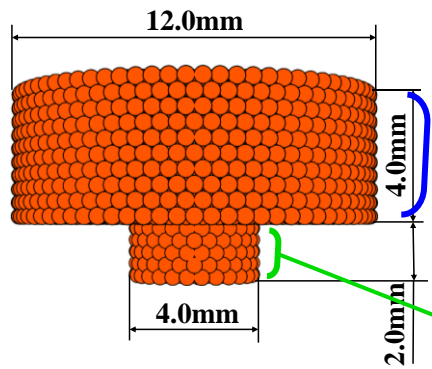
解析モデル及び解析条件

粒子配置図



材料
SUS304

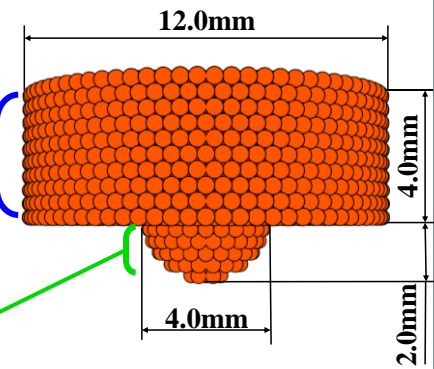
粒子数 493173



円柱状ツール

ショルダー

プローブ



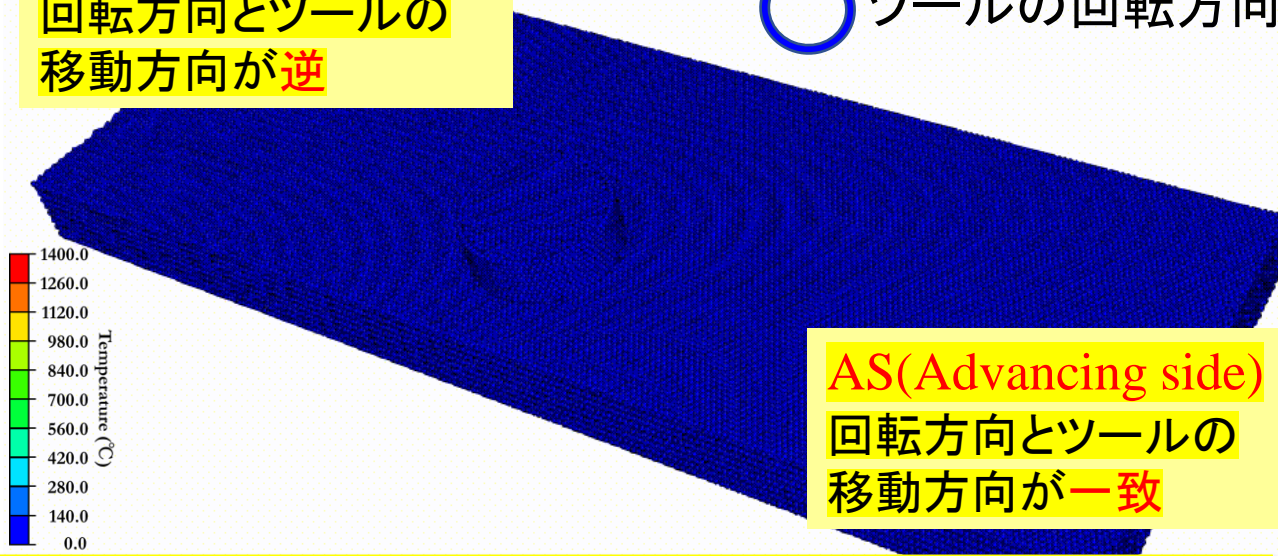
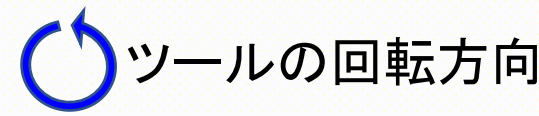
球状ツール

解析条件

材料定数 材料:SUS304

Density[kg/mm ³]	7.8×10^{-6}
Thermal conductivity[W/mm · K]	1.67×10^4
Specific heat[J(kg*K)]	590
Melting point[K]	1750
Q[kJ/mol]	401000
n	4.32
$\alpha[Pa^{-1}]$	1.2×10^{-8}
A	Exp(33.9)

RS(Retreating side)
回転方向とツールの
移動方向が逆



AS(Advancing side)
回転方向とツールの
移動方向が一致

回転速度、移動速度が変化した際のツール形状の影響を検討

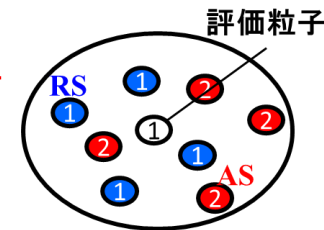
攪拌の評価

FSWにおいて攪拌量は
は接合欠陥などに影響

ツール形状による攪拌量を定量的に評価するために

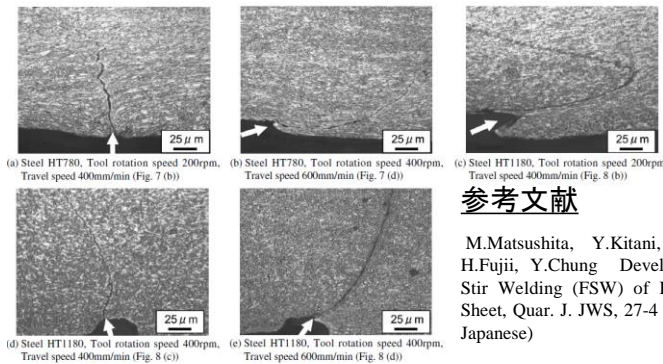
分散を用いて攪拌を評価

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$



(s^2 :分散、 n :評価粒子に対する周辺粒子数、
 x_i : 周辺粒子の分類番号、 \bar{x} :周辺粒子の分類番号の平均)

初期状態の母材をRS(=1),AS(=2)に分割
周辺粒子の分類番号で分散を算出



参考文献

M.Matsushita, Y.Kitani, R.Ikeda, M.Ono, H.Fujii, Y.Chung Development of Friction Stir Welding (FSW) of High Strength Steel Sheet, Quar. J. JWS, 27-4 (2009), 360-370. (in Japanese)

Fig. 9 Incomplete consolidation observed in macrostructure of weld

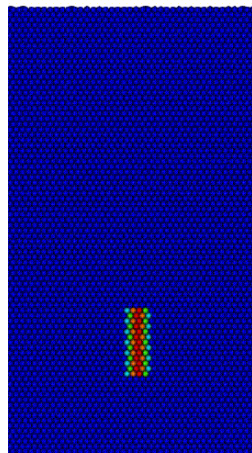
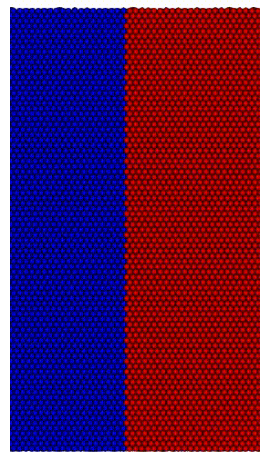
攪拌量の定量的な評価は少ない

0: 全て同じ粒子

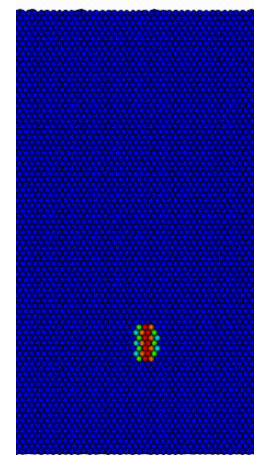
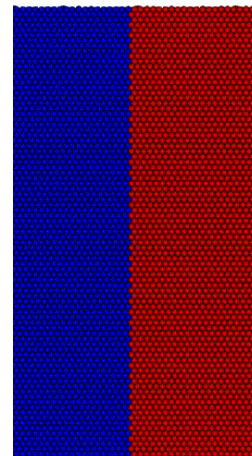


高: 粒子が混在

円柱状ツール



球状ツール



左右粒子の混ざり具合

攪拌(分散)

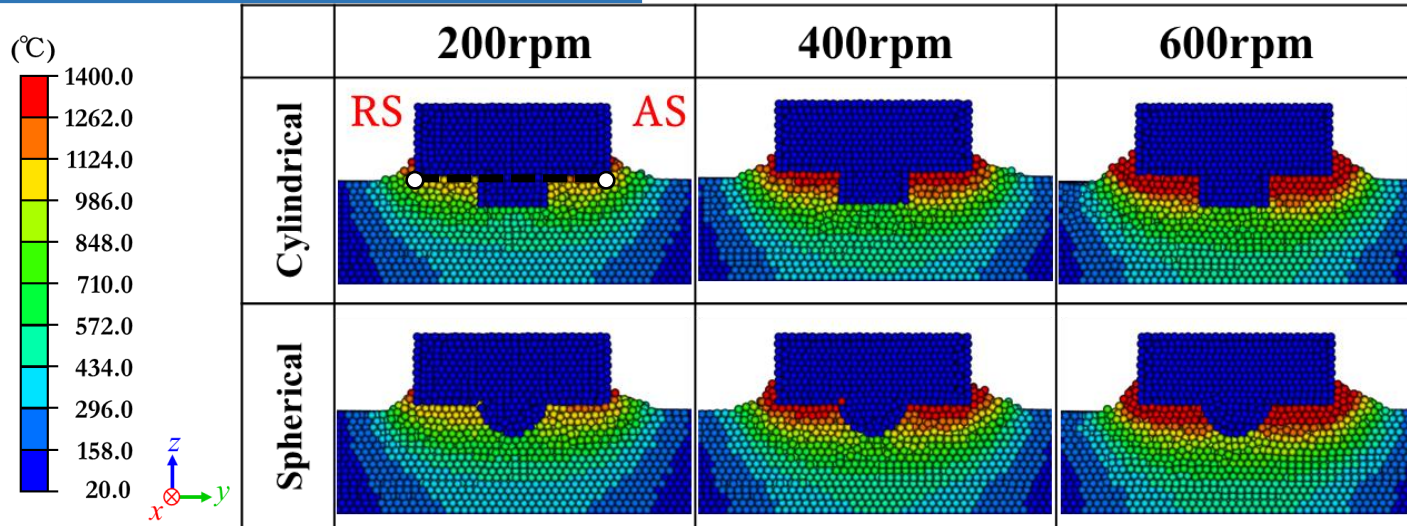
左右粒子の混ざり具合

攪拌(分散)

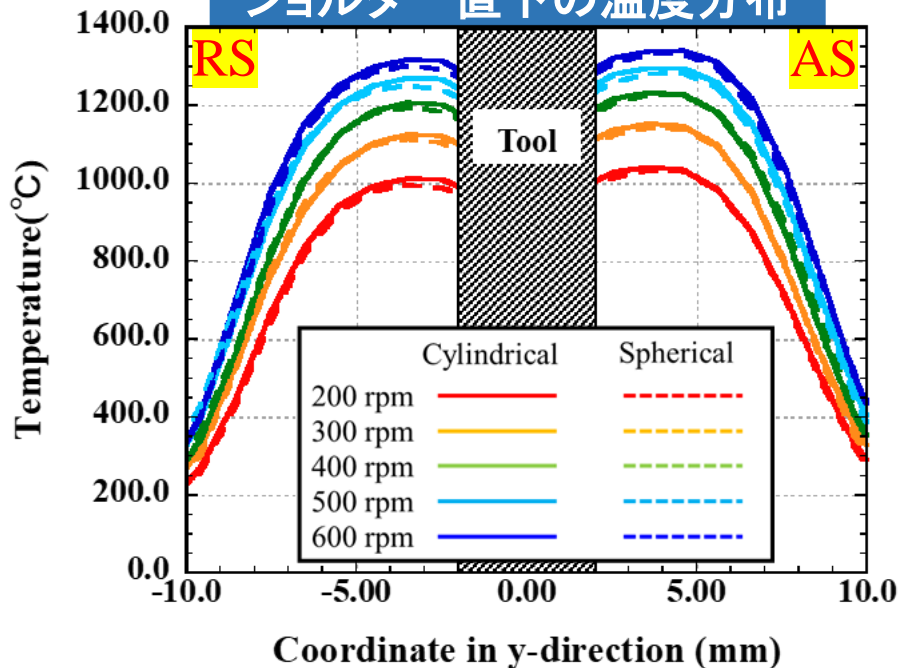
粒子が左右の攪拌されていて、攪拌の様子が確認できる

ツール形状による温度分布への影響—回転速度— 6

回転速度の影響(100mm/min)



ショルダー直下の温度分布



- ・回転数が**大**の時**温度高**
⇒塑性流動が大きくなる
- ・温度分布**AS>RS**
⇒左右非対称性を確認
- ・温度分布**円柱状>球状**
⇒円柱状ツール先端の攪拌速度が大きい**ため塑性流動大**

回転速度の影響

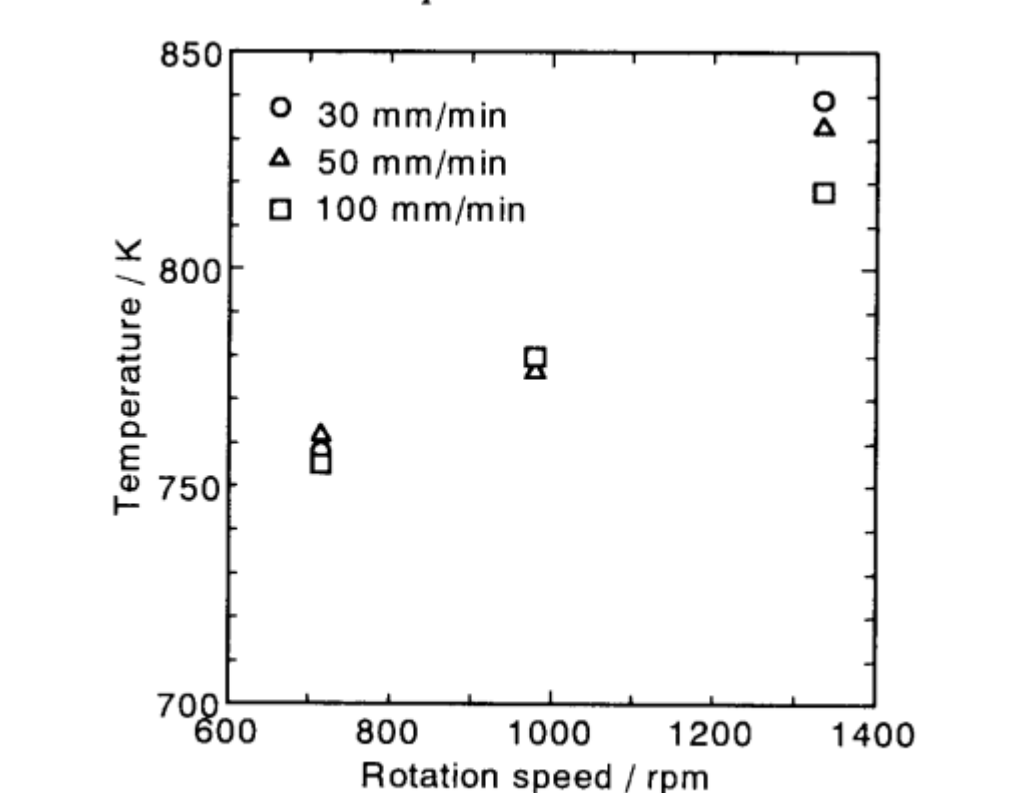
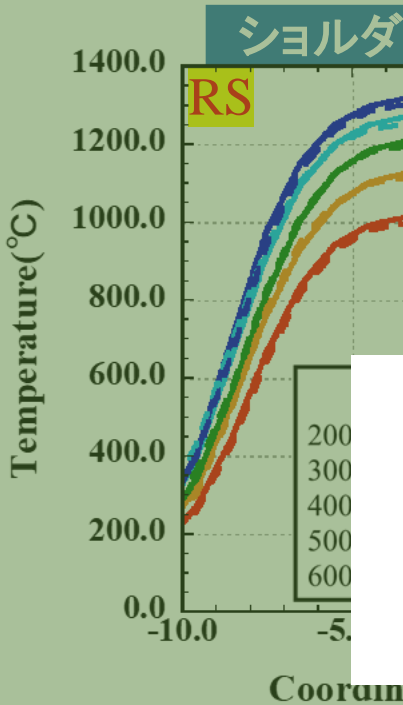
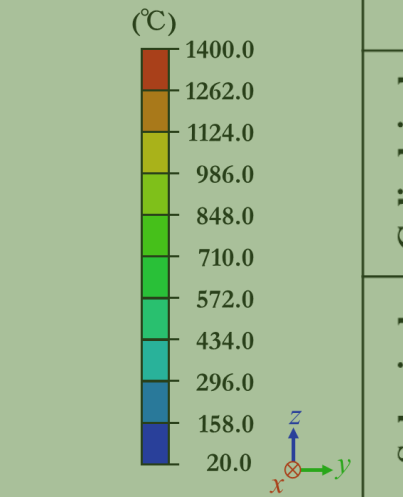


Fig. 6 Effect of rotation speed on the surface temperature

(参考: 長坂 勇太, 西原 公: FSW時のツール温度測定, 溶接学会全国大会講演概要集, Vol. 71 (2002))

⇒左右非対称性を確認

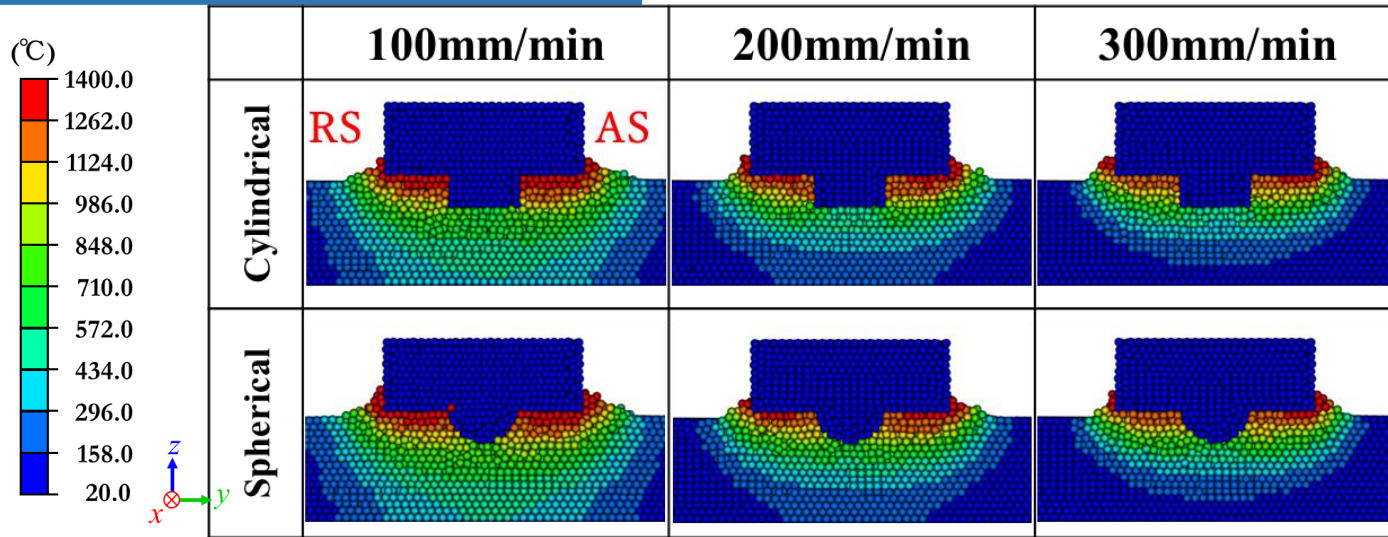
文献の傾向と
おおむね一致

温度高
なる

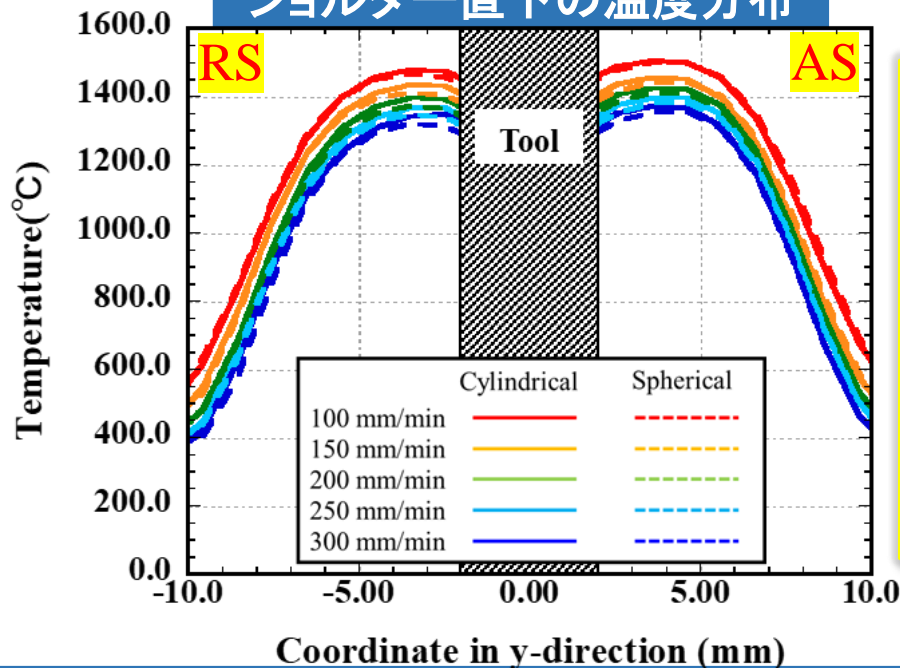
攪拌速度が

ツール形状による温度分布への影響 — 接合速度 — 7

接合速度の影響(400rpm)



ショルダー直下の温度分布



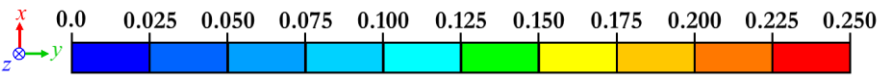
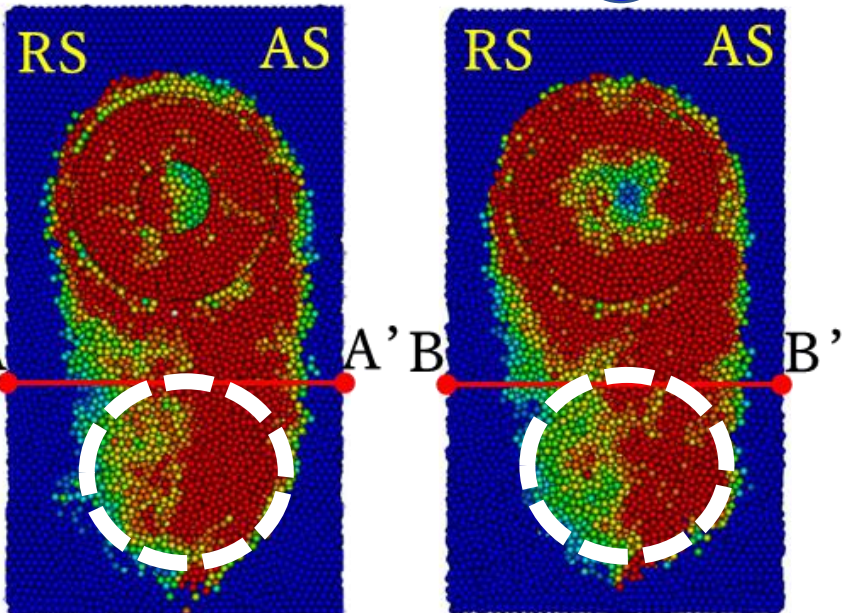
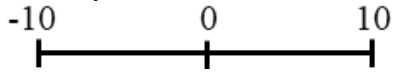
- ・移動速度が**大**の時**温度低**
⇒ 単位長さ当たりの塑性流動が小
- ・温度分布**AS>RS**
⇒ 左右非対称性を確認
- ・温度分布**円柱状>球状**
⇒ 円柱状ツール先端の攪拌速度が大きい**ため塑性流動大**

ツール形状による母材の攪拌の影響（断面分布） 8

母材表面の攪拌度（分散）の分布

250mm/minで5.0秒後の結果

y-coordinate (mm)



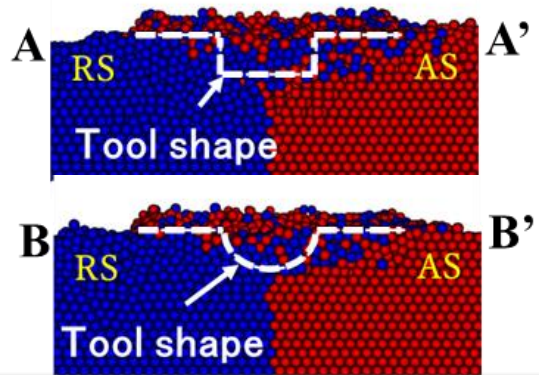
Variance

円柱状ツール 球状ツール

攪拌量はAS側で大
円柱状ツール > 球状ツール

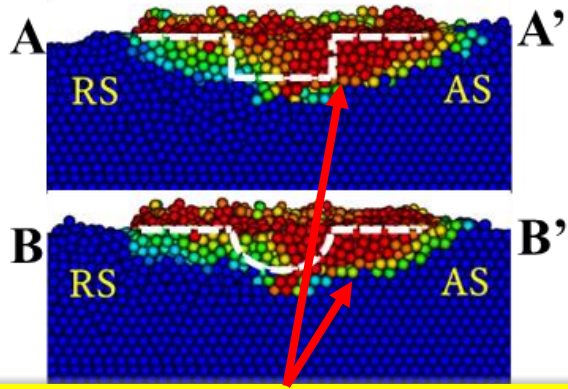
A-A', B-B'断面の分布

A-A', B-B'の分類番号分布



左右の粒子が攪拌され、
混ざり合っていることを確認

A-A', B-B'の攪拌度の分布



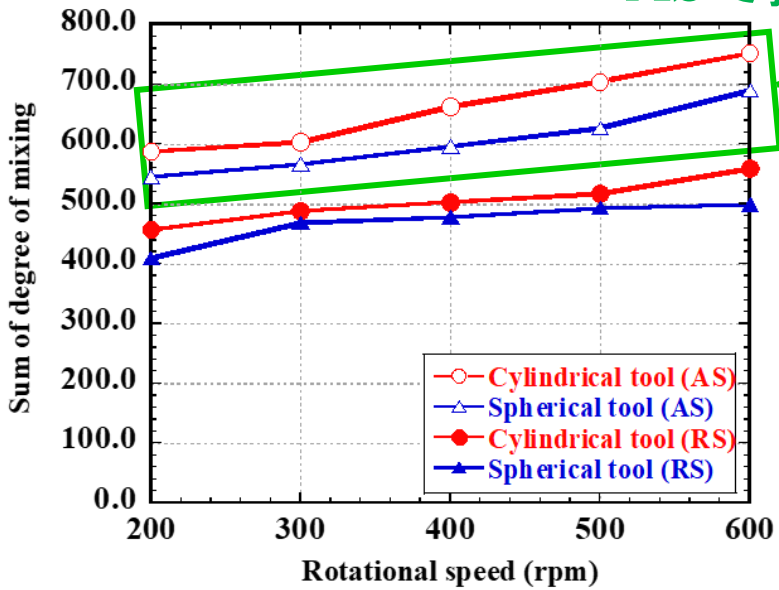
ASで攪拌度が
円柱状エッジで攪拌度大

ツール形状と接合条件が攪拌に与える影響

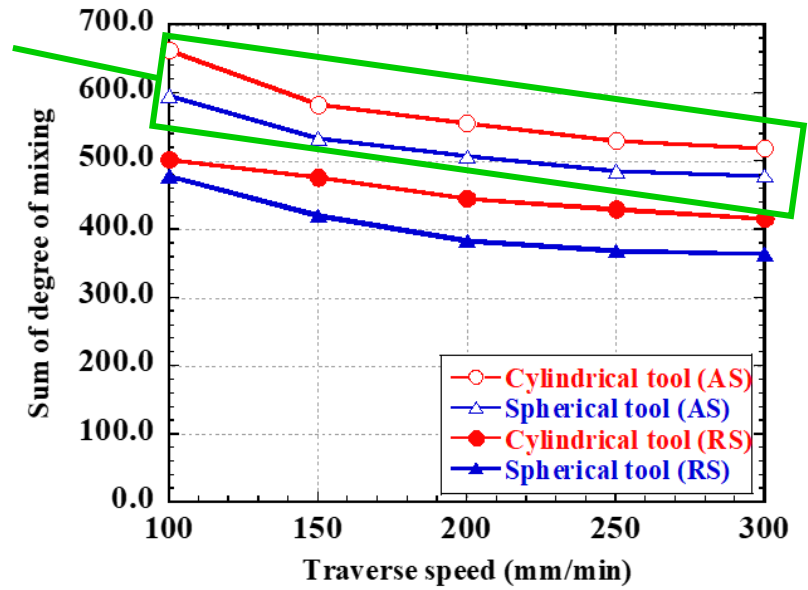
回転速度、移動速度が攪拌に与える影響

粒子の分散の総和を全体の攪拌量として仮定

ASで攪拌度が大きい



回転数と攪拌度の関係 (100mm/min, 2°)



移動速度と攪拌度の関係 (400rpm, 2°)

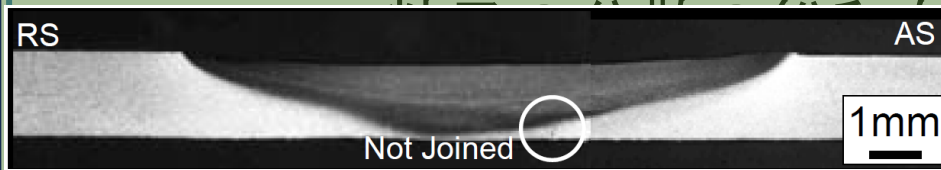
回転数が増加すると攪拌量大

移動速度が増加すると攪拌量小

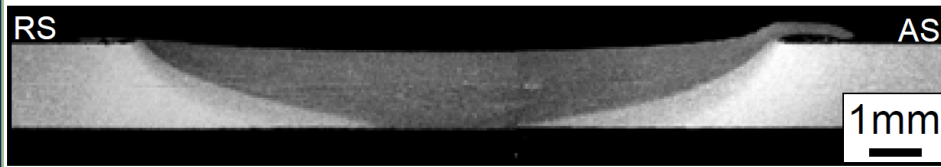
攪拌量: 円柱状ツール > 球状ツール
ツールのエッジ部の差が攪拌量の差になったと考察

ツール形状と接合条件が攪拌に与える影響

回転速度、移動速度が攪拌に与える影響



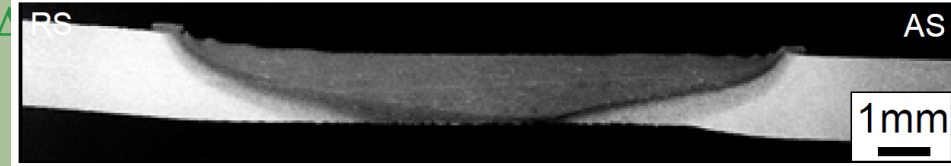
(c) 200rpm-400mm/min



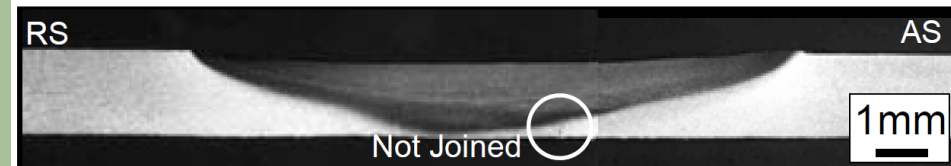
(d) 400rpm-400mm/min



(a) 200rpm-100mm/min



(b) 200rpm-200mm/min



(c) 200rpm-400mm/min

(参考: 松下宗生, 木谷靖, 池田倫正, 小野守章, 高張力薄鋼板の摩擦攪拌接合(FSW)技術の開発(第1報) - 適正接合条件の検討 -, 溶接学会全国大会講演概要集, No. 19 (2008))

Rotational speed (rpm)

Traverse speed (mm/min)

回転数と攪拌度

回転数が増加

実験の攪拌領域の傾向とおおむね一致

400rpm, 2°)

攪拌量小

攪拌重: 円柱状ツール > 球状ツール

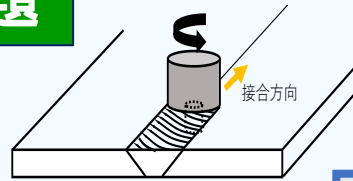
ツールのエッジ部の差が攪拌量の差になったと考察

接合時のツール損傷（摩耗） に関する検討

FSWにおける摩耗の課題

鉄鋼材の接合性

施工の品質を維持しながらの接合が困難



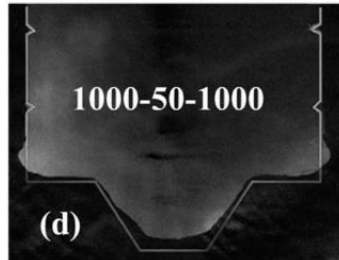
ツール寿命

摩耗量が大きくなるとツール寿命が短くなる

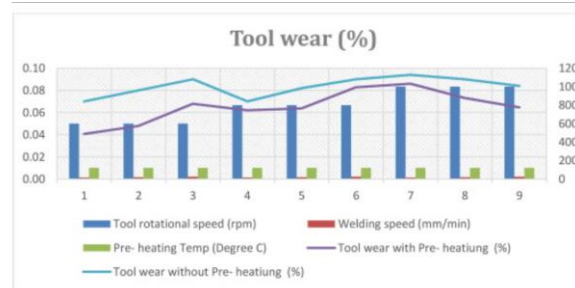
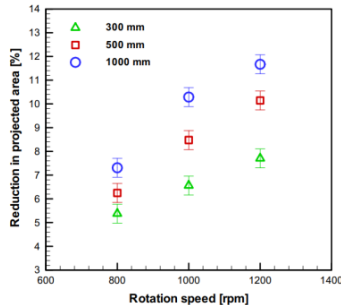
ツール形状の変化による
摩耗量の傾向を予測できると
ツールの効率的な開発が可能

先行研究

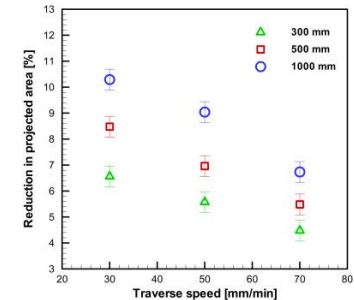
・ 摩耗の傾向



・ 回転数と摩耗量の関係



・ 移動速度と摩耗量の関係



摩耗の傾向

- ・ 回転速度が増加するにつれ摩耗量は**増加**
- ・ 移動速度が増加するにつれ摩耗量は**減少**

参考文献

Pankaj Sahlot, Kaushal Jha, G.K. Dey and Amit Arora, "Quantitative wear analysis of H13 steel tool during friction stir welding of Cu-0.8%Cr-0.1%Zr alloy", *Wear* Vol. 378-379 May 2017, pp.82-89.
Dilip K.Singh, Kaushik Sengupta, Arpan K. Mondal, Ivy das Choudhry, D. Bose, P. Singh, "Characterization of tool wear in i-FSW of AISI 316L material joining", *materialstoday:PROCEEDINGS*, Vol. 46, Part 20, 2021, pp.10628-10633.

MPS法によりツールに生じる摩耗を検討

摩耗現象のモデル化

Holmの凝着摩耗モデル

$$\Delta V = Kpv\Delta t$$

単位面積・時間
当たりの値に変換

$$\Delta W = \frac{\Delta V}{A} = K \frac{p}{A} v \Delta t$$

摩耗のモデル $W = \int KPvdt$

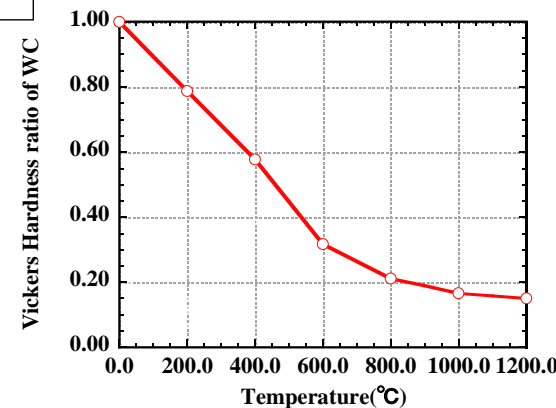
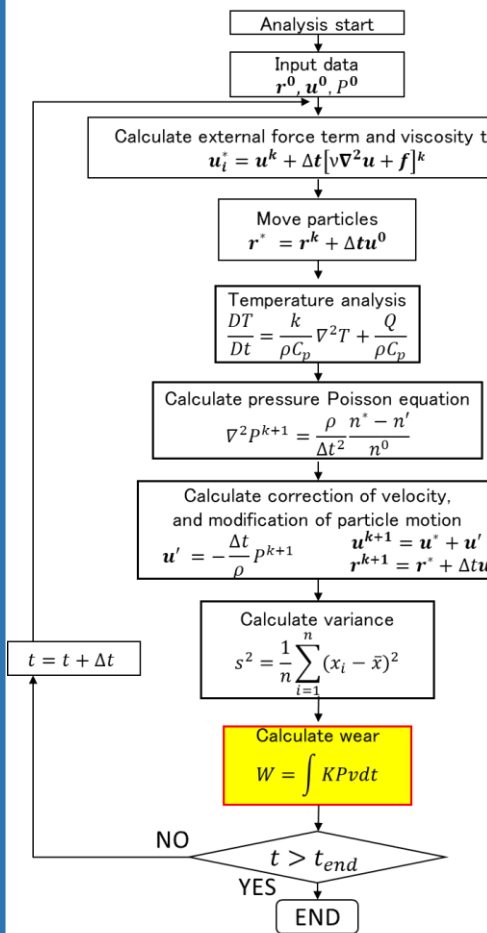
W: 摩耗量 K: 摩耗係数 p: 荷重
P: 負荷面圧 v: 速度 Δt: 時間増分

接触量を代表する量として
温度依存性を考慮した
流動応力で摩耗を評価

参考文献

佐藤 健児: 金属の摩耗とその対策, 養賢堂(1975), pp9-12.

解析フロー、ツールの温度依存性

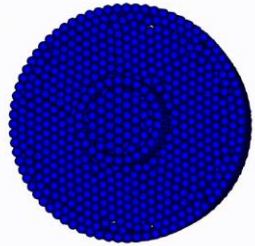


ツールを炭化タング
ステンと仮定
ビッカース硬さの
温度依存性の逆数を
摩耗係数Kに適用

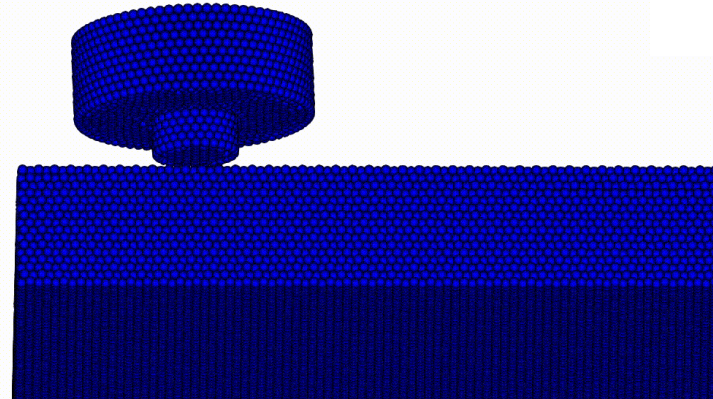
(参考) Akiyoshi Miyoshi, Akio Hara : High Temperature Hardness of WC, TiC, TaC, NbC, and Their Mixed Carbides, 粉体及び粉末冶金, 第12巻第2号(1965), pp.78-84

摩耗の様子

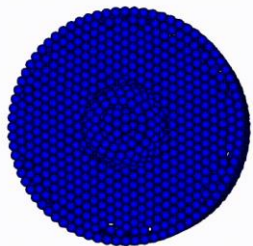
円柱状ツール



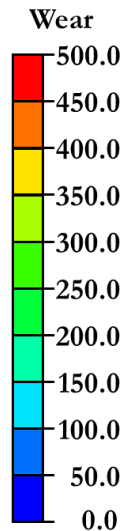
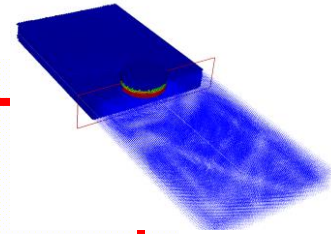
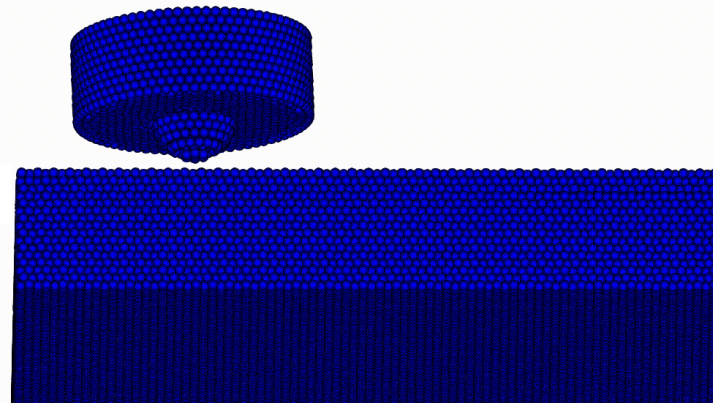
母材底面から見たツール



球状ツール



母材底面から見たツール



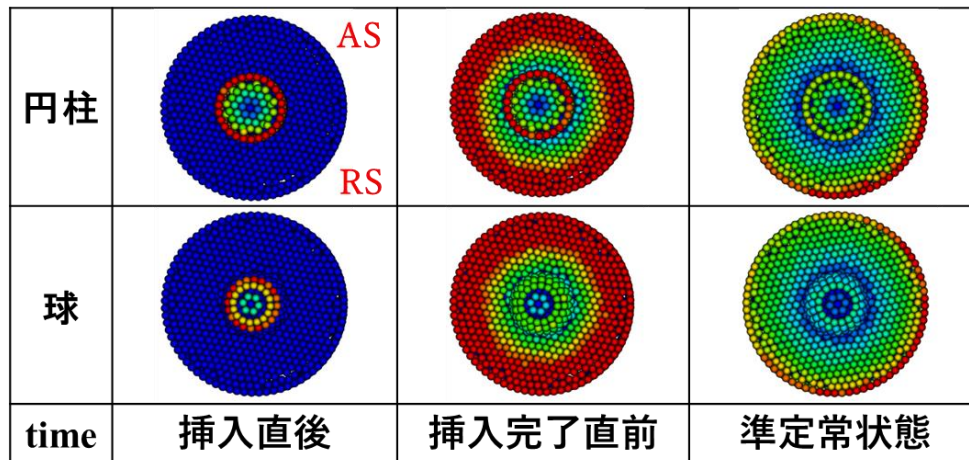
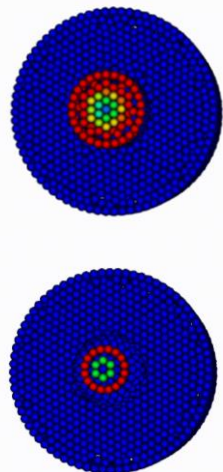
円柱状ツールではピン先端の**エッジ部分**で摩耗大
球状ツールではプローブに**エッジがない**ことから**摩耗小さい**

接合中の瞬間摩耗量の変化

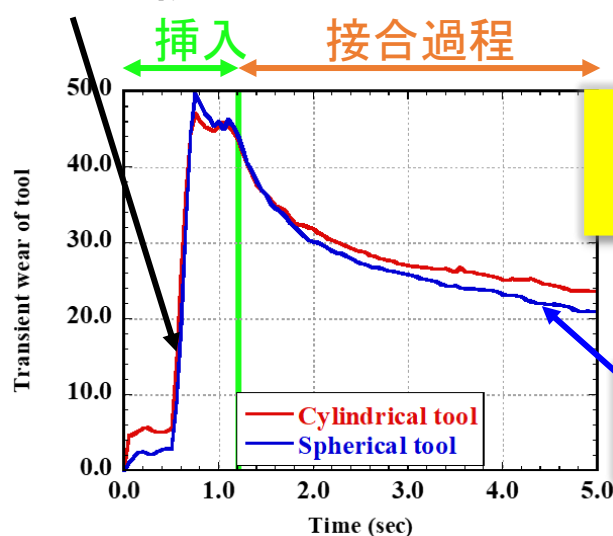
400rpm, 100mm/min, 2°

瞬間摩耗量: 各時刻の単位時間当たりの摩耗量

各時刻における瞬間摩耗量分布 ΔW

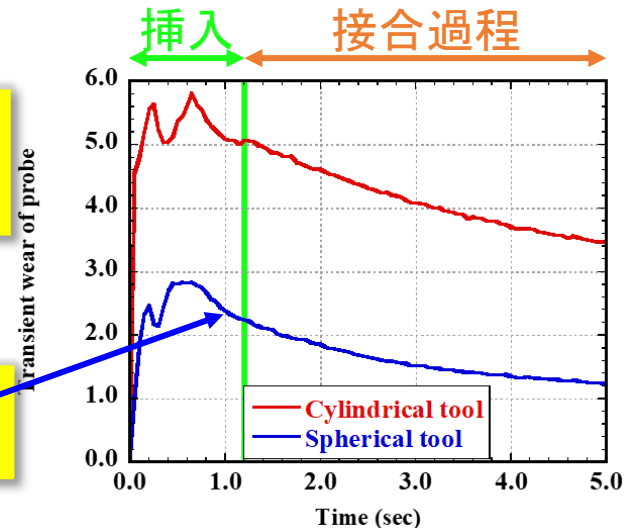


ショルダー接触



・挿入時の摩耗大
・準定常状態摩耗小

球状 < 円柱状



ツール全体の瞬間摩耗量の変化

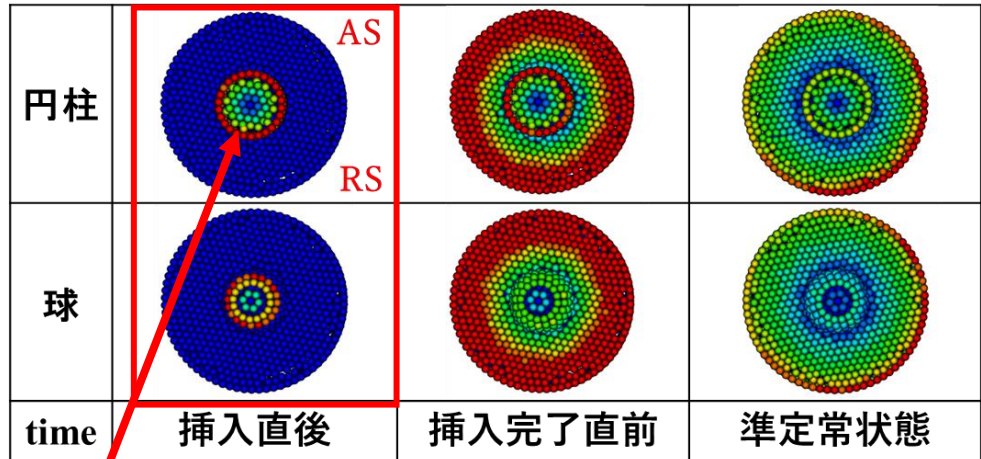
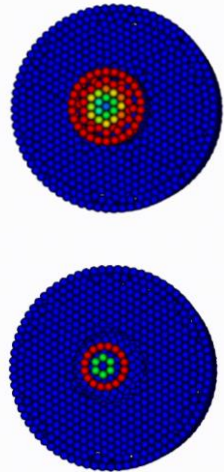
プローブの瞬間摩耗量の変化

挿入直後の瞬間摩耗量

400rpm, 100mm/min, 2°

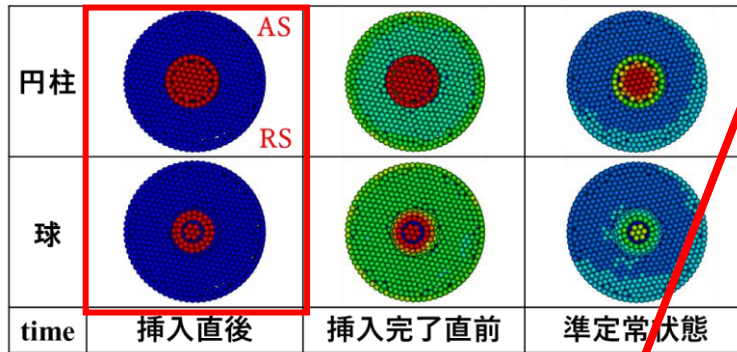
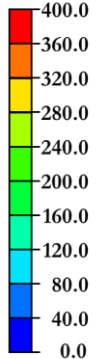
瞬間摩耗量: 各時刻の単位時間当たりの摩耗量

各時刻における瞬間摩耗量分布 ΔW

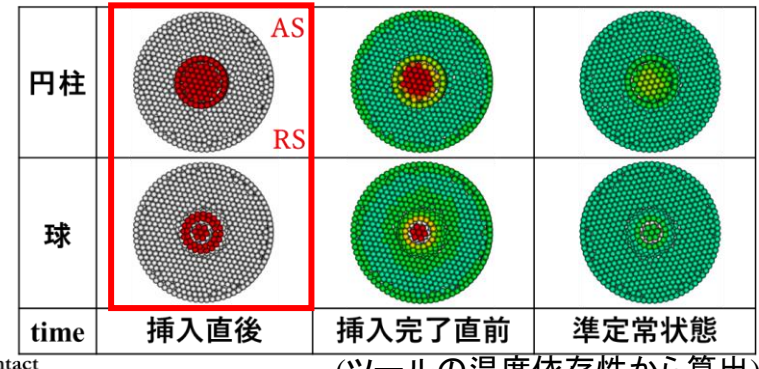
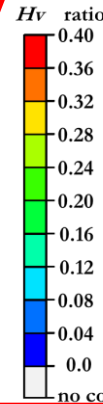


Flow stress (MPa)

流動応力分布 P



ツール表面ビッカース硬さ比分布 / K



(ツールの温度依存性から算出)

$$\Delta W = KPvdt$$

プローブ先端のみ接触

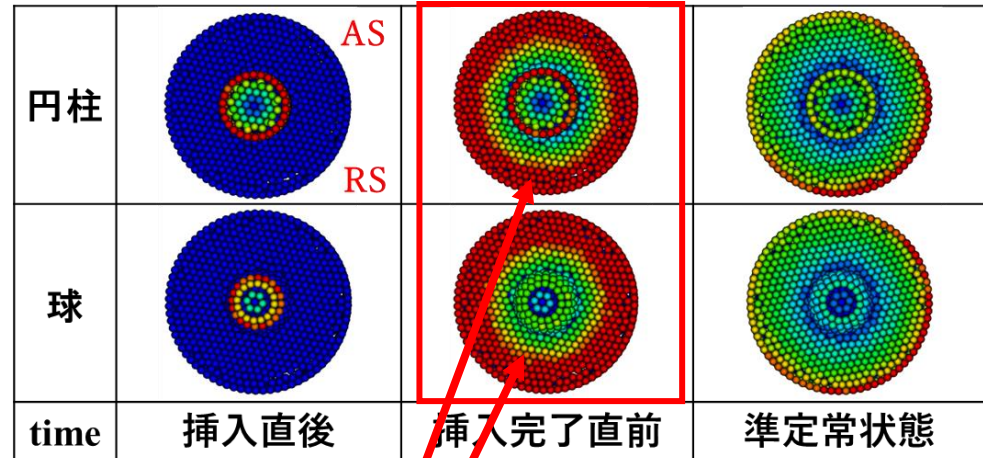
- ・ツールに作用する流動応力は同等
- ・ツールのビッカース硬さも同等
- ・周速度が大きい
- プローブエッジ部分で摩耗大

挿入完了直前の瞬間摩耗量

400rpm, 100mm/min, 2°

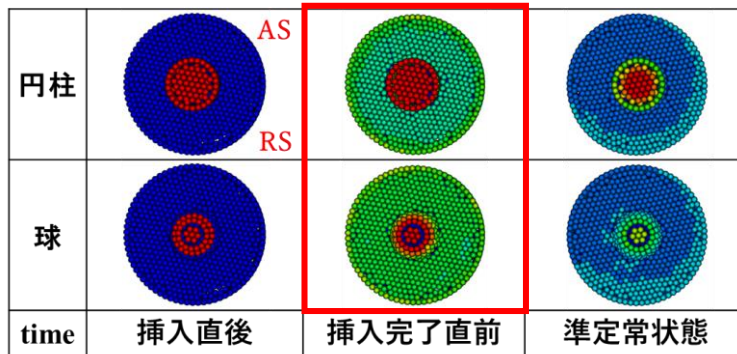
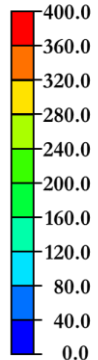
瞬間摩耗量: 各時刻の単位時間当たりの摩耗量

各時刻における瞬間摩耗量分布 ΔW



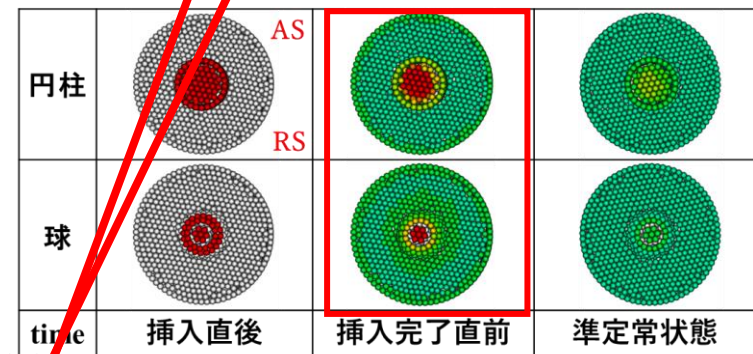
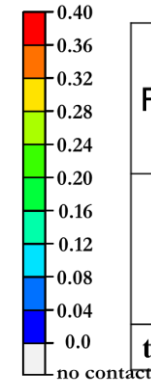
Flow stress (MPa)

流動応力分布 P



Hv ratio

ツール表面ビッカース硬さ比分布 / K



$$\Delta W = K P v dt$$

挿入完了は温度が低温で
流動応力大きい

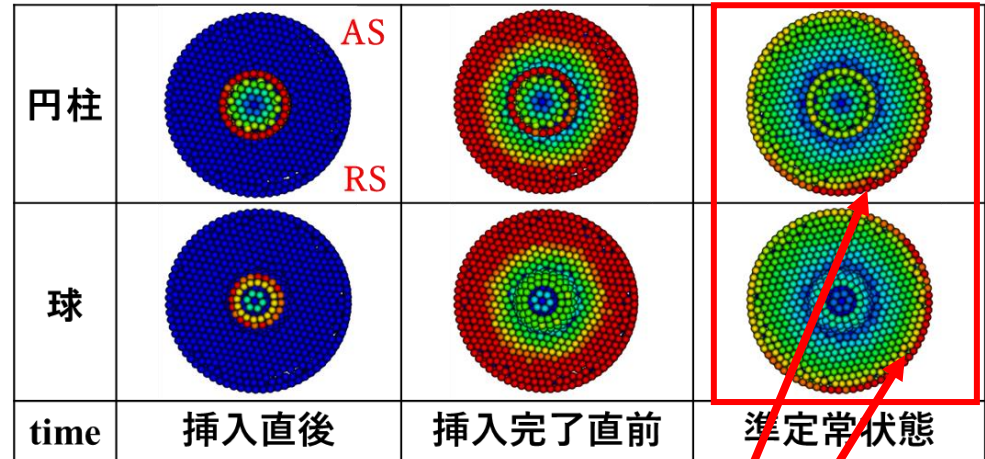
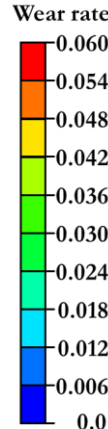
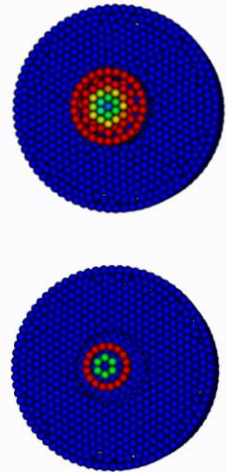
- ・ ツールに作用する流動応力は大きい (温度低)
 - ・ ツールのビッカース硬さは大きい (温度低)
 - ・ 周速度が大きい
- ショルダーエッジ部分で摩耗大

準定常状態の瞬間摩耗量

400rpm, 100mm/min, 2°

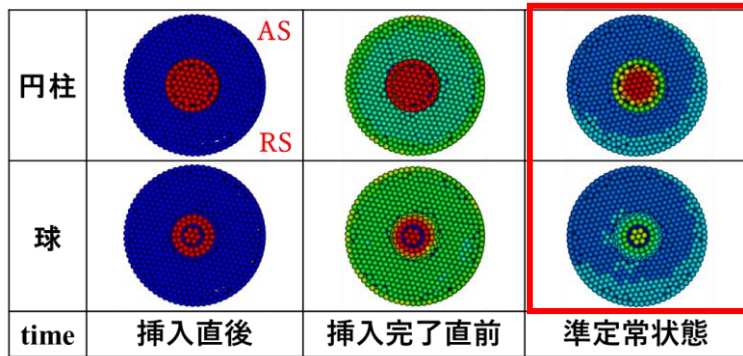
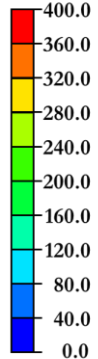
瞬間摩耗量: 各時刻の単位時間当たりの摩耗量

各時刻における瞬間摩耗量分布 ΔW



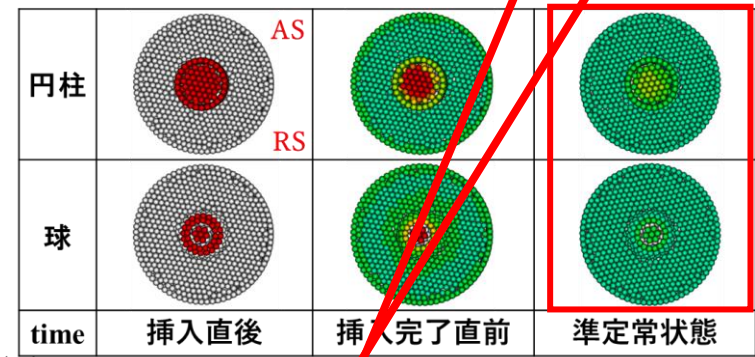
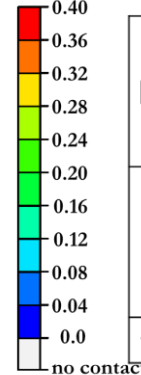
Flow stress (MPa)

流動応力分布 P



Hv ratio

ツール表面ビッカース硬さ比分布 / K



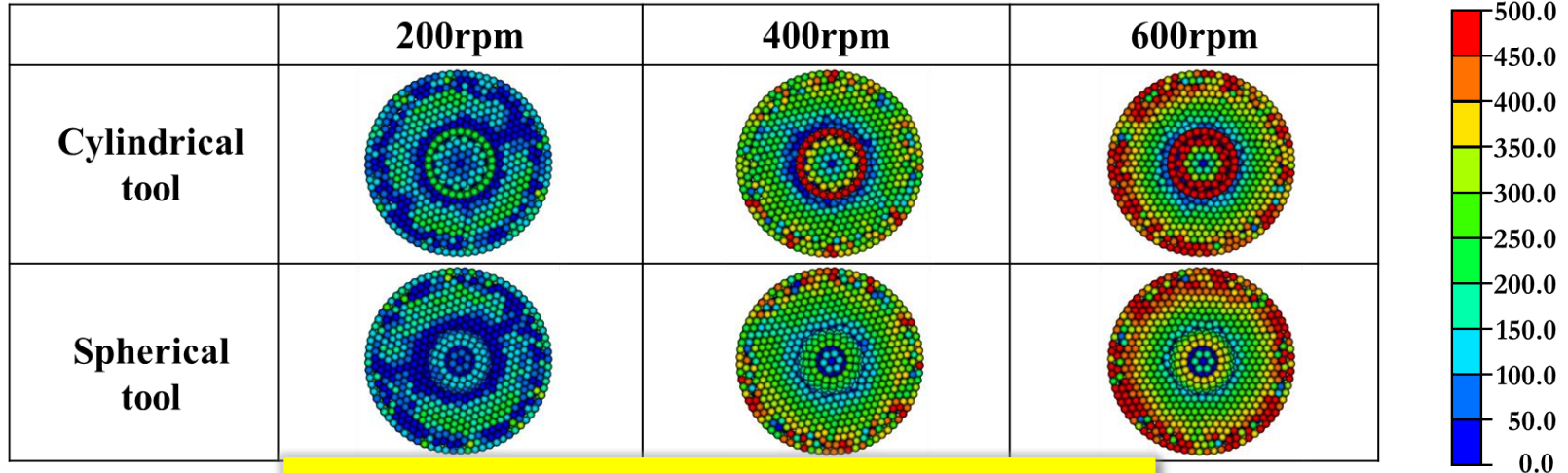
$$\Delta W = K P v dt$$

- ・温度が高く、流動応力が小さくなり挿入時よりも摩耗量が小さい

- ・ツール前方、RSは温度低→流動応力大
- ・ツールのビッカース硬さは同等
- ・周速度大
- ショルダーエッジ前方、RSで摩耗大

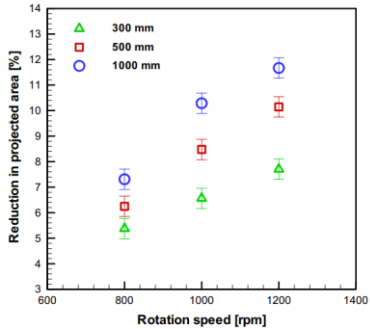
摩耗に及ぼす回転数、ツール形状の影響

100mm/min, 2°



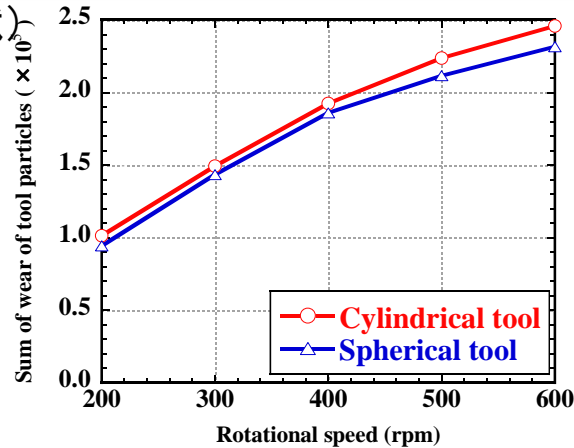
回転数が増加すると摩耗量が増加

回転数と摩耗量の関係(文献)

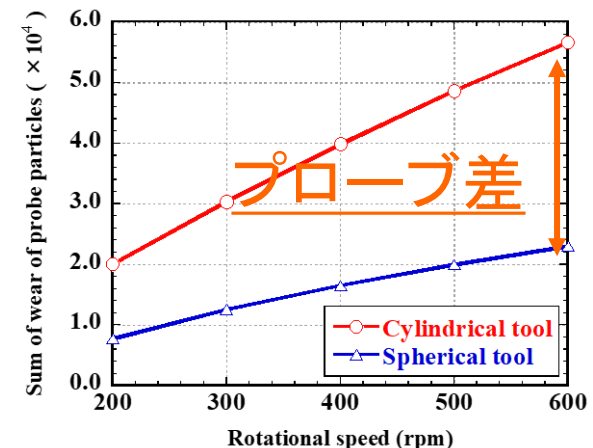


参考文献

Pankaj Sahlot, Kaushal Jha, G.K. Dey and Amit Arora, "Quantitative wear analysis of H13 steel tool during friction stir welding of Cu-0.8%Cr-0.1%Zr alloy", *Wear* Vol. 378-379 May 2017



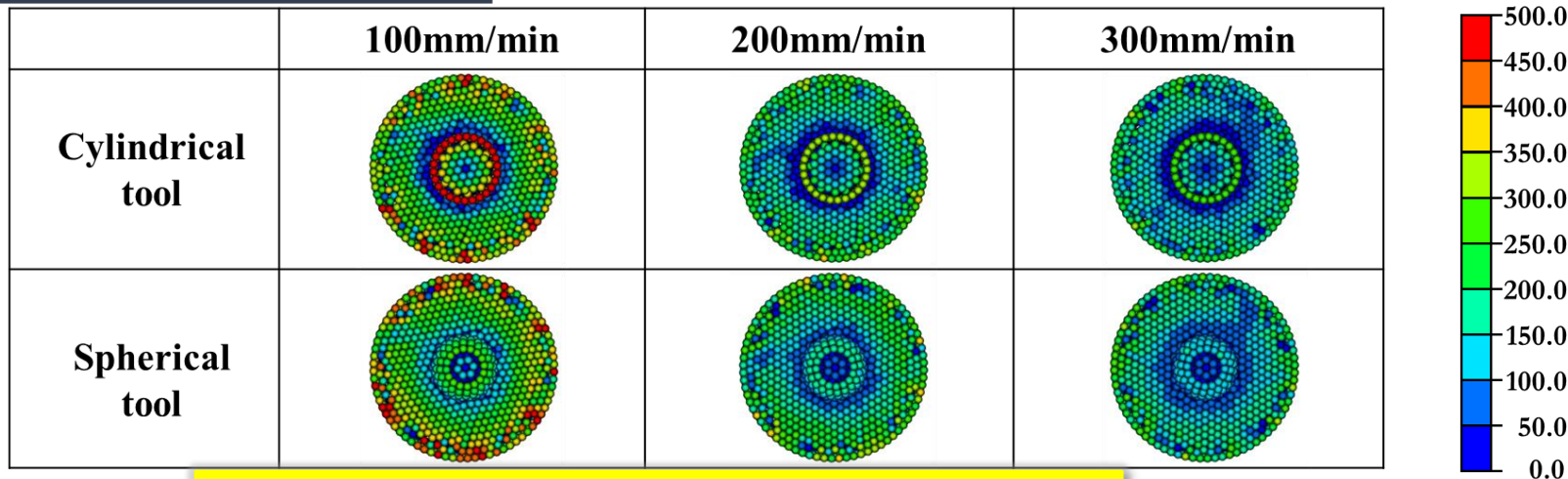
ツール全体の摩耗と回転数の関係



プローブの摩耗と回転数の関係

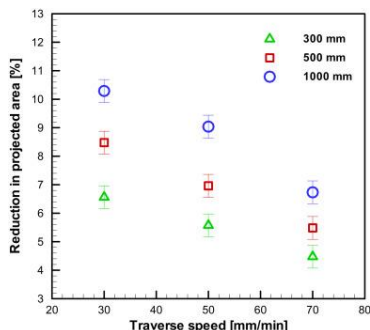
摩耗量: 球状ツール < 円柱状ツール

400rpm, 2°



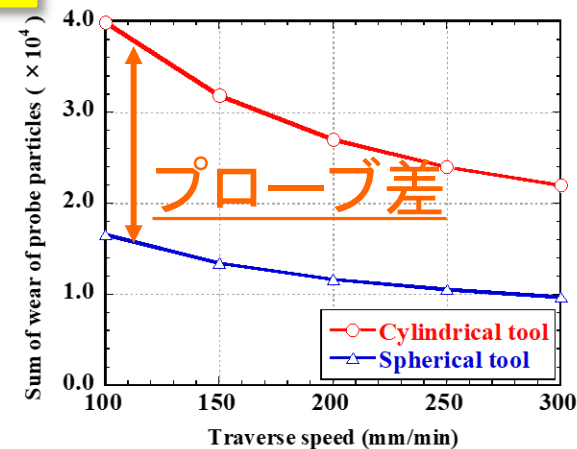
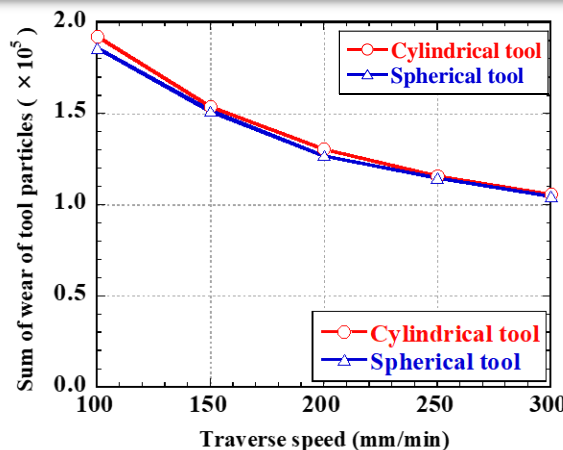
移動速度が増加すると摩耗量が減少

移動速度と摩耗量の関係(文献)



参考文献

Pankaj Sahlot, Kaushal Jha, G.K. Dey and Amit Arora, "Quantitative wear analysis of H13 steel tool during friction stir welding of Cu-0.8%Cr-0.1%Zr alloy", *Wear* Vol. 378-379 May 2017



ツール全体の摩耗と移動速度の関係

プローブの摩耗と回転速度の関係

摩耗量: 球状ツール < 円柱状ツール
文献と同様の傾向を確認

本研究では、粒子法に基づくFSW力学シミュレーション手法を用いて、ツールに注目し、ツールの攪拌性能とツールに生じる摩耗について検討した。得られた知見を以下に示す。

- ・接合中の温度分布の検討を行った結果、円柱状ツール、球状ツールにおいて共通してツールの回転数を増加させると接合中の温度が上昇、移動速度を増加させると接合中の温度が低下することが確認できた。
- ・被接合材の攪拌度の検討の結果、両ツール形状で攪拌度はRS側よりAS側の方が大きくなるという結果が得られた。これは、先行研究の実験結果の傾向と一致している。また、プローブ先端形状により攪拌度が変化することを確認し、回転数が大きくなると攪拌度が増加し、接合速度が大きくなると攪拌度が減少することを確認した。
- ・接合中にツールに生じる摩耗量は、ツール挿入時に大きくなることを確認された。また、球状ツールは円柱状ツールよりも接合中の摩耗量が小さいことが分かった。
- ・接合条件がツールの摩耗に与える影響に関して、回転数が大きくなると摩耗量が増加し、接合速度が大きくなると摩耗量が減少するという結果が得られ、文献の傾向と良好に一致していることを確認した。また、いずれの条件においても球状ツールの方が円柱状ツールより摩耗量が小さいことが確認でき、特にプローブの摩耗量ではその傾向が顕著であることが示された。このことから、球状ツールは長寿命なツールであると示唆された。