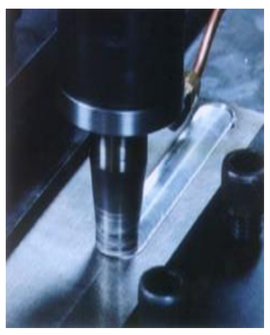
摩擦攪拌接合(FSW)に関する力学シミュレーション手法の確立

大阪府立大学　家下 輝也、生島 一樹、柴原 正和
大阪大学　松澤 周平、光藤 健太、三宅 由莉佳、宮坂 史和

研究背景

摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding:FSW)

・1991年にイギリスのTWIにより開発された接合法
・接合面にツールを押入れ、摩擦熱が発生維持され、材料が軟化すると同時に接合面に沿って移動させる



引用
http://www.khi.co.jp/rd/news/detail/c3020828-1.html

FSWの特徴

・ツールの回転による融点以下での材料の攪拌により母材性能が保たれる
・非溶融接合のため、溶接継手と比べ高強度であり、溶接時の割れ発生の危険が少ない
・入熱量が抑えられるため、変形量が小さい

FSWに対する期待は大きい

研究目的

FSWの課題

・ツール寿命が短い
・鉄鋼材の接合は研究段階
・厚板の鉄鋼材の場合は接合が非常に困難
・施工条件は経験と試行錯誤によるものが多い

シミュレーションができればツール寿命の改善および最適な施工条件(ツールの回転速度、移動速度、硬さ等)の検討が可能

本研究の目的　**摩擦攪拌接合の力学シミュレーション手法の確立を目指す**

接合後の硬さ分布を求めるために塑性ひずみ分布を算出

解析手法

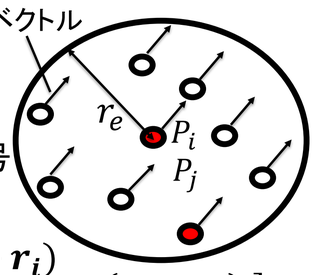
粒子法(MPS法)

支配方程式

N-S方程式: $\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2\boldsymbol{u}+\mathbf{g}$　温度場: $\frac{Dh}{Dt} = k\nabla^2 T + Q$

重み関数 $\omega = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & (0 \le r \le r_e) \\ 0 & (r_e \le r) \end{cases}$

粒子数密度 $n_i = \sum_{j\neq i} w(\boldsymbol{r_j} - \boldsymbol{r_i})$　i,j: 粒子番号



勾配モデル　$\nabla\varphi_i = \frac{d}{n_i}\sum_{j\neq i}\left[\frac{(\varphi_j - \varphi_i)(\boldsymbol{r_j} - \boldsymbol{r_i})}{|\boldsymbol{r_j} - \boldsymbol{r_i}|^2} w(\boldsymbol{r_j} - \boldsymbol{r_i})\right]$

発散モデル　$\nabla\boldsymbol{u_i} = \frac{d}{n_i}\sum_{j\neq i}\frac{(\boldsymbol{u_j} - \boldsymbol{u_i})(\boldsymbol{r_j} - \boldsymbol{r_i})}{|\boldsymbol{r_j} - \boldsymbol{r_i}|^2} w(\boldsymbol{r_j} - \boldsymbol{r_i})$

ラプラシアンモデル　$\nabla^2\varphi_i = \frac{2d}{\lambda n_i}\sum_{j\neq i}[(\varphi_j - \varphi_i) w(\boldsymbol{r_j} - \boldsymbol{r_i})]$

$\lambda = \sum_{j\neq i}\frac{|\boldsymbol{r_j} - \boldsymbol{r_i}|^2 w(\boldsymbol{r_j} - \boldsymbol{r_i})}{\sum_{j\neq i} w(\boldsymbol{r_j} - \boldsymbol{r_i})}$

粒子の離散化により大変形問題も安定的に解くことが可能

相当塑性ひずみ算出

・粒子の速度場を仮定し、移動最小二乗法(MLS)により粒子のひずみを算出

速度場: $u^i(x,y,z) = U_x^i x + U_y^i y + U_z^i z + U_0^i \quad (i = 1,2,3)$

誤差関数: $E^i = \sum_{j=1}^{N_j}\left(u^i - u_j^i\right)^2$

最小二乗法の適用(誤差関数の微分)

$\frac{\partial E_u}{\partial U_x^i} = 0 \quad \frac{\partial E_u}{\partial U_y^i} = 0 \quad \frac{\partial E_u}{\partial U_z^i} = 0 \quad \frac{\partial E_u}{\partial U_0^i} = 0$

$[A]\{U^i\} = \{b\}$

ひずみは

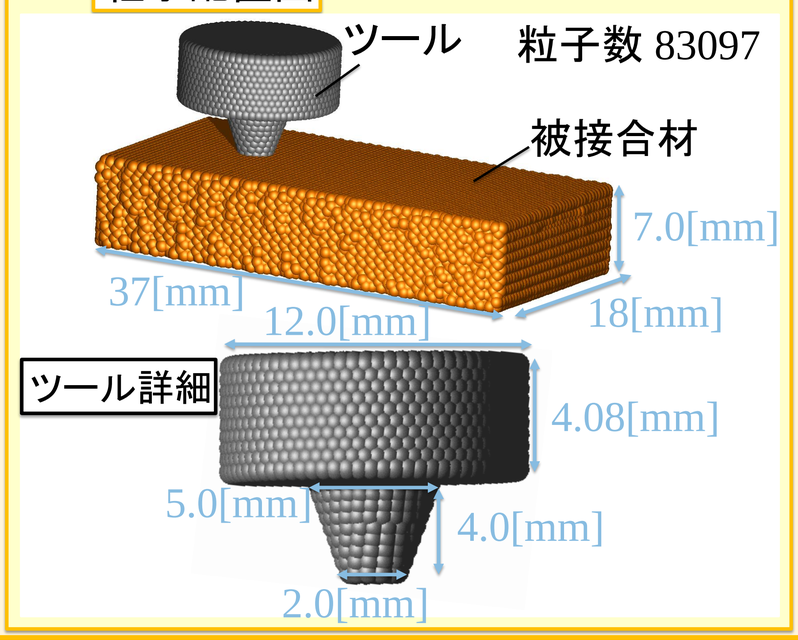
$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u^1}{\partial x} \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u^2}{\partial y} \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u^3}{\partial z}$

$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u^1}{\partial y} + \frac{\partial u^2}{\partial x}\right) \quad \varepsilon_{yz} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u^2}{\partial z} + \frac{\partial u^3}{\partial y}\right) \quad \varepsilon_{zx} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u^3}{\partial x} + \frac{\partial u^1}{\partial z}\right)$

後退オイラー法により擬似的な相当塑性ひずみを算出

解析モデルおよび解析条件

粒子配置図



接合条件

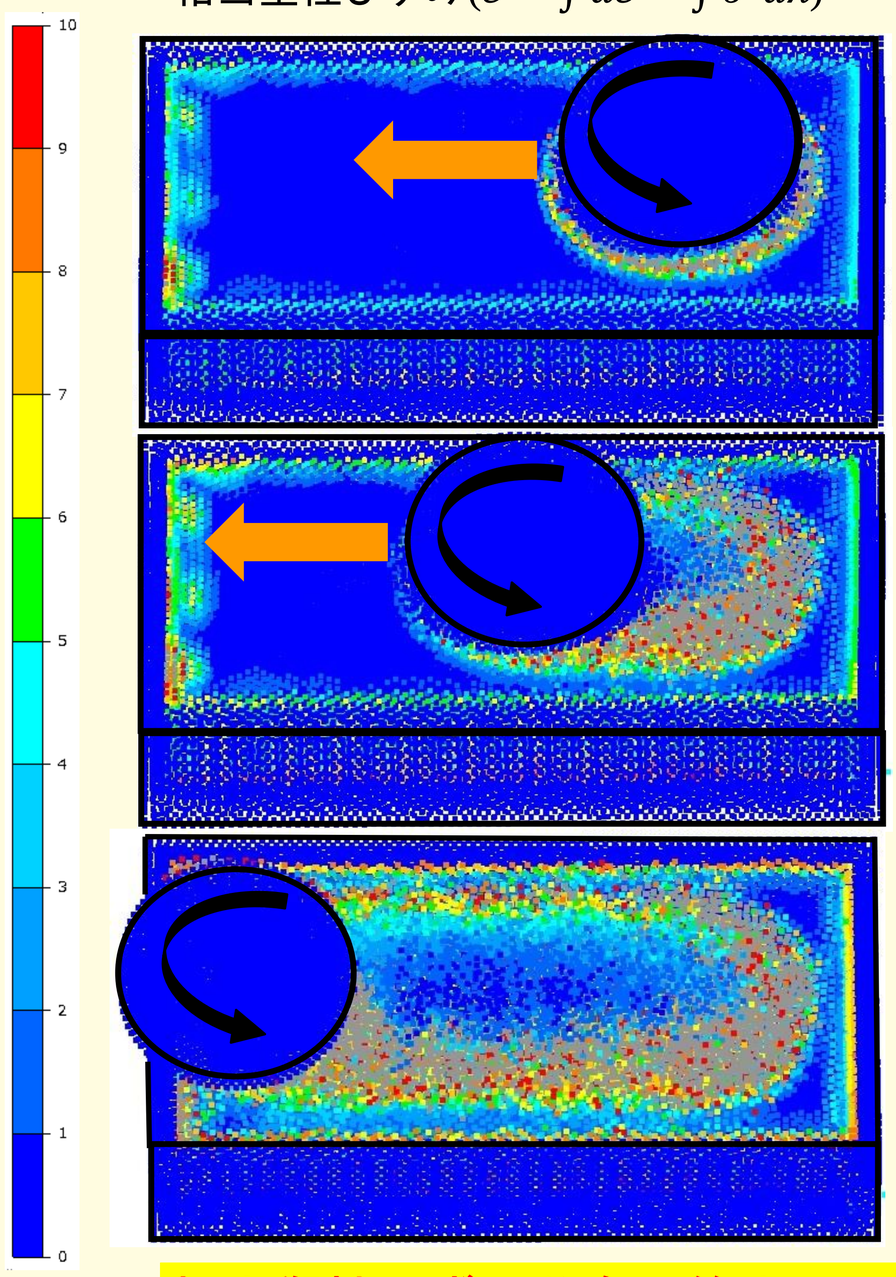
ツール移動速度	60[mm/min]
ツール回転速度	2.5×10^2[rpm]

材料定数(アルミニウムA1100)

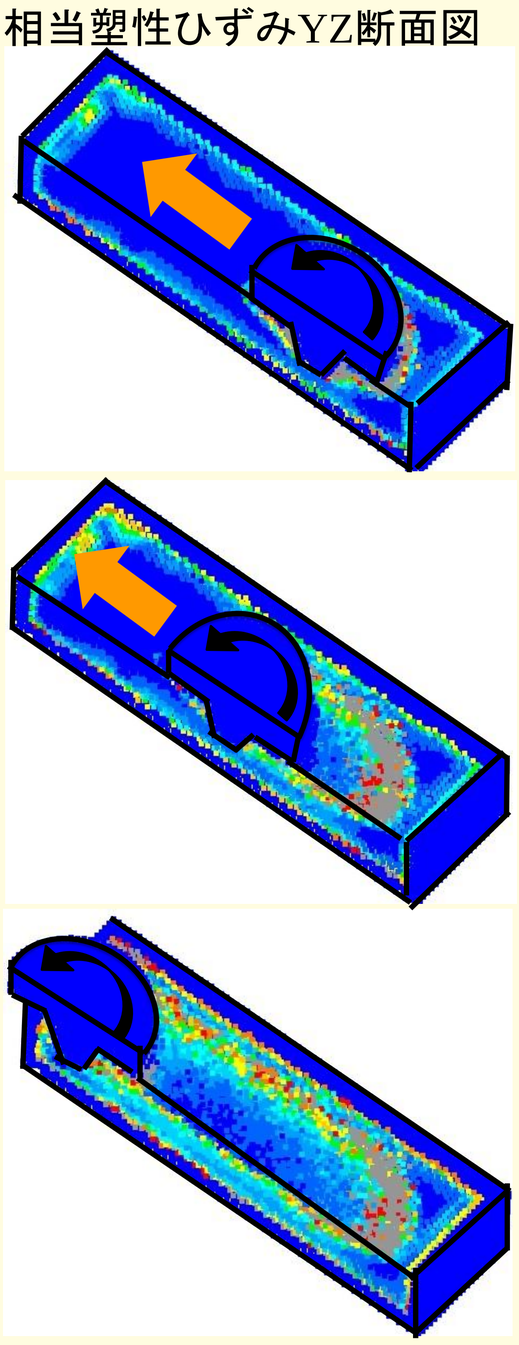
密度	2.7×10^{-6}[kg/mm^3]
粘性係数	1.0×10^5[Pa・s]
定圧比熱	9.0×10^2[kj/(kg・K)]
熱伝導率	2.34×10^2[W/(m・K)]
潜熱	396567.45[J/kg]
融点	933[K]
熱膨張係数	2.1×10^{-4}[$1/K$]

解析結果

相当塑性ひずみ($\bar{\varepsilon} = \int d\varepsilon = \int \sigma' d\lambda$)



相当塑性ひずみYZ断面図



相当塑性ひずみ分布の算出→硬さ分布の予測

結論

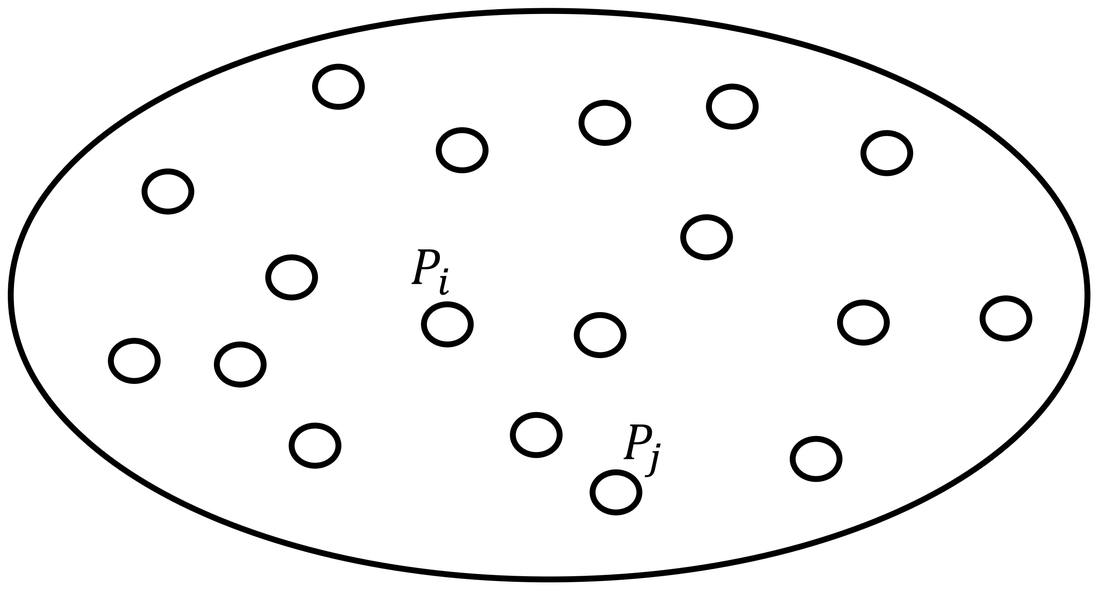
本研究では、FSWに関する力学シミュレーション手法の確立へ向けて、粒子法による検討を行った。得られた知見を以下に示す。

・移動最小二乗法により粒子のひずみ速度を算出し、後退オイラー法によって相当塑性ひずみを算出することで、相当塑性ひずみ分布が得られ、可視化することが可能になった。

本研究は経済産業省 革新的新構造材料等技術開発・ISMA(委託事業)「テーマ46 中高炭素鋼の摩擦接合共通基盤研究」の一環として実施されたものである。

今後の展望

・ツールに対する曲げ応力およびせん断力を算出できるようにすることで、**ツール寿命の推定・長寿命化**
・理想化陽解法FEMに適用させ、解析精度および計算速度の向上
また、理想化陽解法FEMにより重ね継手接合などへの適応
・解析によって組織分布および組織形成過程の把握
→ 最適な施工条件の選定が可能



$$\frac{\partial E_u}{\partial u_x} = \sum_{j=1}^{N_j} \frac{\partial \Delta u_j^2}{\partial \Delta u_j} \frac{\partial \Delta u_j}{\partial u_x} = \sum_{j=1}^{N_j} 2\Delta u_j x$$
$$= \sum_{j=1}^{N_j} 2x(u_x x + u_y y + u_z z + u_0 - u_j)$$

$$E_u = \sum_{j=1}^{N_j} (u - u_j)^2 = \sum_{j=1}^{N_j} \Delta u_j^2 (u, u_j)$$

$$u(x,y,z) = u_x x + u_y y + u_z z + u_0$$
$$v(x,y,z) = v_x x + v_y y + v_z z + v_0$$
$$w(x,y,z) = w_x x + w_y y + w_z z + w_0$$

$$u(x,y,z) = u_x x + u_y y + u_z z + u_0$$
$$v(x,y,z) = v_x x + v_y y + v_z z + v_0$$
$$w(x,y,z) = w_x x + w_y y + w_z z + w_0$$

$$\frac{\partial E_u}{\partial u_y} = \sum_{j=1}^{N_j} 2y(u_x x + u_y y + u_z z + u_0 - u_j)$$

$$b[i][j] = \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$\frac{\partial E_u}{\partial u_z} = \sum_{j=1}^{N_j} 2z(u_x x + u_y y + u_z z + u_0 - u_j)$$

$$deps[i] = \frac{1}{2}\{2b[i][i], 2b[i][i], 2b[i][i], b[i][j] + b[j][i], b[i][j] + b[j][i], b[i][j] + b[j][i]\}dt$$

$$peps[i] =$$

$$u^i(x,y,z) = U_x x + U_y y + U_z z + U_0 \qquad (i = x,y,z)$$

$$E^i = \sum_{j=1}^{N_j} (u^i - u_j^i)^2 \qquad \frac{\partial E_u}{\partial U_x^i} = 0 \qquad \frac{\partial E_u}{\partial U_y^i} = 0 \qquad \frac{\partial E_u}{\partial U_z^i} = 0 \qquad \frac{\partial E_u}{\partial U_0^i} = 0$$

$$\frac{\partial E_u}{\partial u_x} = \sum_{j=1}^{N_j} 2x(U_x^i x + U_y^i y + U_z^i z + U_0^i - U_j^i)$$

$$\frac{\partial E_u}{\partial u_y} = \sum_{j=1}^{N_j} 2y(U_x^i x + U_y^i y + U_z^i z + U_0^i - U_j^i)$$

$$\frac{\partial E_u}{\partial u_z} = \sum_{j=1}^{N_j} 2z(U_x^i x + U_y^i y + U_z^i z + U_0^i - U_j^i)$$