

アルミニウム合金の塑性流動における粘度実測

日大生産工(院) ○成川 雅人 日大生産工 前田 将克

1. 緒言

摩擦攪拌接合 (FSW) は、ショルダーとプローブからなる回転ツールと被接合材料との摩擦熱により材料を軟化させ、ツールの回転により材料を塑性流動させて接合する技術であり、自動車や鉄道車両などをはじめとする様々な分野で実用化されている。しかし、接合欠陥となる塑性流動状態の解明は不十分なままであり、適切な接合条件の確立には様々な条件下で実験を行う必要がある。そのため、X線による塑性流動の可視化¹⁾や金属と類似した透明作動流体による塑性流動の可視化²⁾など様々な試みがなされてきた。しかし、これらは塑性流動の可視化は可能であるが、各接合条件での塑性流動、特に接合欠陥形成現象の予測は困難である。そこで、我々はこの問題の解決策として材料の塑性流動を流体の流動現象と同様にニュートンの粘性法則に従うと仮定し、流動現象で重要な指標である粘度を計測することで塑性流動の解明を進め、適切な接合条件の確立に要する時間を縮減することを目指している。

本報告では、材料の粘度計測用に自作した粘度計測装置の計測方法および粘度の確度評価をするにあたり使用する理論式について述べる。また、粘度計測の確度評価にはJS160000の粘度校正用標準液（以下、標準液）を使用し、標準液の各温度における粘度と実験により得られた粘度の比較を行った。

2. 計測方法

Fig. 1 に本研究のために製作した粘度計測装置の模式図を示す。上板に4つのボルトで固定された厚さ5mmの円板の中心に直径6.5 mm、深さ5 mmの穴あけ加工を施し、標準液を充填する。その後、直径6.2 mmの回転ツールを円板の深さ5 mmまで挿入する。ツールの回転により標準液が攪拌され上板が回転し、上板がロードセルにあたることで荷重を計測する。また、確度評価には標準液を購入した際に付属する温度・動粘度・粘度の値と理論式により得られた粘度の誤差を評価するため、円板の表面と裏面に円板の中心から8.5mmの位置にK型熱電対をカシメにより固定し、温度計測を行った。

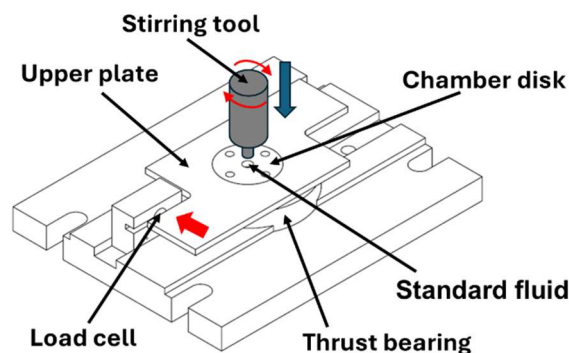


Fig. 1 Schematic diagram of the viscosity measuring device.

3. 基礎とする理論

実験で計測されるロードセルの信号から粘度を導出するには、モーメントのつり合い式とニュートンの粘性法則を用いた。まずはじめにモーメントのつり合い式を説明する。Fig. 2 に計測原理の模式図を示す。回転ツールの攪拌により円板の穴内面に生じるせん断力 F_θ [N]と穴半径 r_2 [mm]の積とロードセルが計測した荷重 F [N]と円板の中心からロードセルの計測点の距離 l [mm]の積のモーメントのつり合い式から式 (1) が求まる。

$$F_\theta r_2 = Fl \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad (1)$$

次にニュートンの粘性法則を用いて円板の穴内面に生じるせん断力 F_θ [N]を導出する。Fig. 3 に円板内に生じる流動現象の模式図を示す。円板内の流れは定常流、軸対称流れ、軸方向および半径方向の速度を持たない、圧力勾配や外力がないものと仮定した。これらの仮定と境界条件（円板と標準液の界面の速度を 0 [m/s]、回転ツールと標準液の界面の角速度を ω_1 [s^{-1}]）を円柱座標に拡張したナビエ・ストークス方程式にあてはめることで速度勾配を求め、ニュートンの粘性法則に代入することで式 (2) が求まる。

$$\tau_\theta = -2\mu \frac{\omega_1 r_1^2}{r_1^2 - r_2^2} \text{ [Pa]} \quad (2)$$

但し、 τ_θ は円板の穴内面に生じるせん断応力

[Pa], μ は粘度[Pa・s], ω_1 はツールの角速度[s⁻¹], r_1 はツールの外径[mm], r_2 は円板の内径[mm]である。

円板の穴内面に生じるせん断力 F_θ [N]は穴半径 r_2 [mm]と板厚 h [mm]を用いて式 (3) で表すことができる。

$$F_\theta = -4\pi\mu \frac{\omega_1 r_1^2 r_2 h}{r_1^2 - r_2^2} \text{ [N]} \quad (3)$$

式 (1) と式 (3) から粘度 μ [Pa・s]は、式 (4) のように求まる。

$$\mu = -\frac{Fl(r_1^2 - r_2^2)}{4\omega_1 r_1^2 r_2^2 \pi h} \text{ [Pa・s]} \quad (4)$$

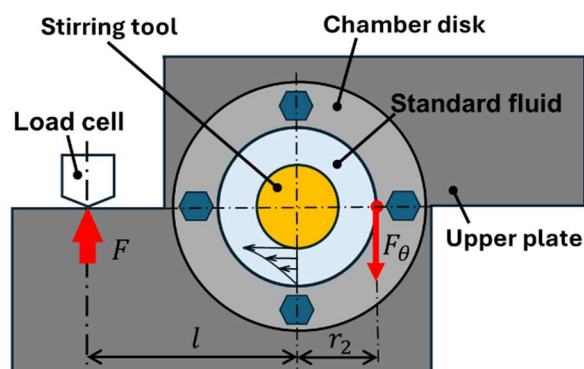


Fig.2 Schematic diagram of measurement principle.

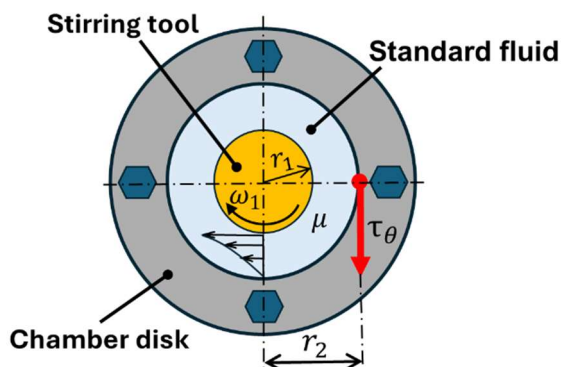


Fig. 3 Schematic diagram of the flow of the sample fluid generated by the tool rotation.

4. 実験結果および高察

実験はツール回転数 580 rpm (≈ 60.7 [s⁻¹]), 直径 6.2 mm, 円板の内径 6.5 mm, 厚さ 5 mm で行った. Fig. 4 に攪拌時間に伴う温度と粘度の変化を示す. 実験結果から円板の表面と裏面の温度差は約 0.1 °C であることがわかり, 円板の厚さ方向の温度差はほとんどないことが確認できた.

Fig.5 に標準液の各温度における粘度と理論式により得た粘度のグラフを示す. 標準液の粘度

は温度の上昇に伴って緩やかに低下しているが, 理論式から得た粘度は標準液と比較すると激しく低下していることがわかる. また, 温度の上昇とともに標準液と理論値の粘度の誤差が線形的に増えている傾向が確認できた. 温度が高くなるにつれて誤差が大きくなっていく要因を明らかにすることは今後の課題である. 今後は複数回実験を行い, 計測のばらつきとその要因を明確にし, 標準液の各温度における粘度の値に合うような補正関数の検討を行う.

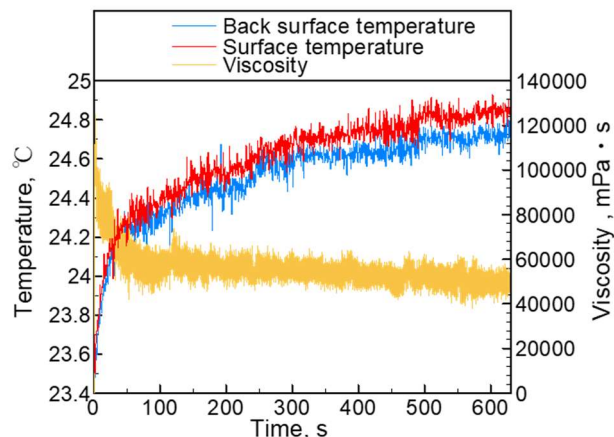


Fig. 4 Viscosity and temperature with stirring time.

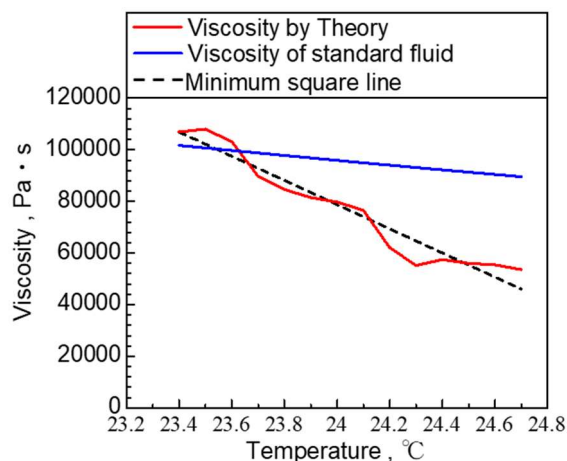


Fig. 5 Comparison of standard and theoretical viscosities at different temperatures

参考文献

- 1) 高井ら: 摩擦攪拌溶接の鉄道車両への適用, 軽金属溶接, 39(2001), pp. 29-31.
- 2) 川西ら: 溶接学会全国大会講演概要, (2017), 176-177.