

材料塑性変形挙動の可視化に基づく新たな凝着摩擦モデルの構築とその応用

Exploring the role of adhesive friction based on direct observation of plastic deformation field

大阪大・工（正）*杉原 達哉

Tatsuya Sugihara*

*The University of Osaka

1. はじめに

材料の塑性変形を利用した成型加工法である塑性加工において、近年では難加工材の加工や複雑な形状の加工が求められている。そういった加工において、材料-金型間は極めて過酷な摩擦環境に晒されることとなり、界面の摩擦状態に起因して様々な問題が発生することから^[1]、材料-金型間の摩擦特性の理解が極めて重要となっている。ここで、塑性加工における材料-金型間などの過酷な摺動環境下においては、Amontons-Coulombの法則が適用できないことが知られており、次式で示されるWanheim-Bayによる摩擦モデルが広く用いられている^[2]。

$$\tau = \begin{cases} \mu\sigma & (\sigma < \sigma_0) \\ mk & (\sigma \geq \sigma_0) \end{cases} \quad (1)$$

しかしながら、同モデルは摺動界面で生じる材料の塑性変形や、それにより生じる新生面の露出等の影響が考慮されておらず、実験や解析で得られた摩擦応力分布との乖離が度々指摘されている^[3]。そこで本研究で着目するのが、加工前後における材料の表面積の比、すなわち「表面積拡大率」である。表面積拡大率は、化学的に活性で、界面での著しい凝着生成に繋がる新生面の露出と密接な関係があることから、特に加工中の材料-金型間の凝着挙動を理解する上で極めて重要な指標となる。

そこで、本研究では“材料塑性変形挙動のその場観察技術”を援用することによって、摺動界面における材料の微視的な表面積拡大の分布を定量化する手法を提案し、さらにそれに基づく新たな凝着摩擦モデルの構築を試みた。

2. 表面積拡大率分布の定量化

本研究では、塑性加工における材料の著しい表面積の拡大を再現するため、くさび状圧子（インデンタ）によるアルミニウムへの圧入-引き抜き実験を行った。加工対象は、焼鈍し処理を施したアルミニウム合金 A1050 とした。Figure 1 に、実験装置の概要を示す。同図に示すように、インデンタ近傍における材料の塑性変形挙動について、ガラス面越しにハイスピードカメラで撮影を行った。そして、得られた連続画像に対してデジタル画像相関法（DIC）による解析を行い、下記の手順でインデンタ側面近傍における材料の微視的な表面積拡大率の分布を獲得した（Fig. 2）。

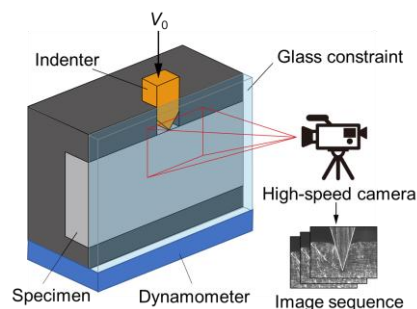


Fig. 1 Experimental setup

1. 材料表面に、等間隔 (l) で仮想的な追跡マーカをプロットする (Fig. 2 (a))
2. 追跡マーカ P_n のインデンタ先端からの距離 (x_n)、ならびに P_n , P_{n+1} 間の距離 ($l + \Delta l_{n,n+1}$) を算出する (Fig. 2 (b))
3. P_n , P_{n+1} 間の midpoint の座標 $x_{n,n+1}$ 、ならびに局所的な表面積拡大率 $\phi_{n,n+1}$ を、下記の式に基づいて算出する

$$x_{n,n+1} = \begin{cases} 0 & (n=0) \\ (x_n + x_{n+1})/2 & (n>0) \end{cases} \quad \phi_{n,n+1} = \frac{\Delta l_{n,n+1}}{l} \quad (2)$$

4. インデンタ側面に沿った表面積拡大率分布 $\phi(x)$ を算出する (Fig. 2 (c))

Figure 3 は、上記の方法で取得した表面積拡大率分布を示した結果である。同図に示すように、インデンタ側面において表面積拡大率は不均一に分布しており、表面積拡大はインデンタ先端部分に集中している。また、圧入距離 D の増加にともない、全体的に表面積拡大が増加していることがわかる。以上のように、本手法を用いることで、インデンタ近傍における材料の微視的な変形挙動を、可視化・定量化することが可能であることが示された。

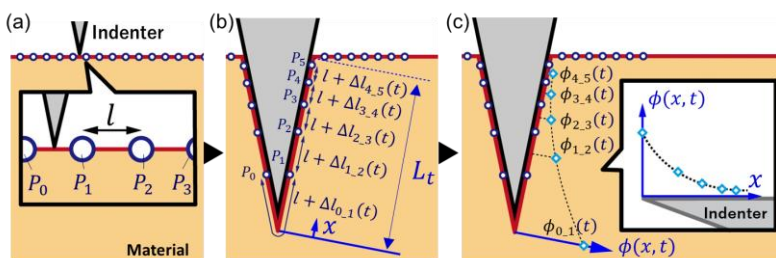


Fig. 2 Procedure for obtaining surface expansion distribution

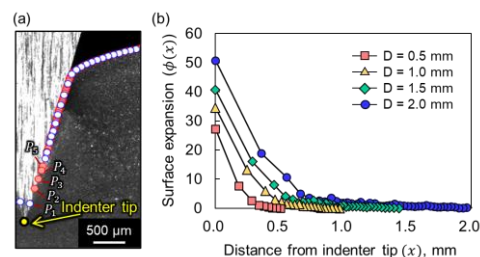


Fig. 3 Surface expansion distribution for 30 deg indenter

3. 表面積拡大率分布に基づく凝着摩擦力モデルの提案

塑性加工においては、摺動界面において材料の表面積が拡大することにより、材料表面の酸化被膜が破断し、活性な新生面が露出する。この新生面は、工具表面へ著しい凝着を生じることから、界面における凝着摩擦力は、その部位における表面積拡大の程度に依存すると考えられる。本研究では、この考え方に基づき、摺動界面における凝着摩擦力の分布 $\tau(x)$ は、表面積拡大率の分布 $\phi(x)$ に比例する、すなわち、

$$\tau(x) = \begin{cases} k\phi(x) & (\tau_s > k\phi(x)) \\ m\tau_s & (\tau_s \leq k\phi(x)) \end{cases} \quad (3)$$

と表すことができると考えた。ここで、 τ_s は材料のせん断降伏応力、であり、 k および m は定数である。すなわち、上記の式は、ある位置 x における凝着摩擦力 $\tau(x)$ は、その位置における表面積拡大率 $\phi(x)$ に比例して増加し、材料のせん断降伏応力によって規定される値に収束する、ということを示している。

本研究では、圧入時に材料-インデント界面で生じる凝着摩擦力は、インデントを材料から引き抜く際の抵抗値（離形抵抗）に対応すると考え、材料下部に設置した動力計を用いて離形抵抗の測定を行うことで、上記の式で示される凝着摩擦力モデルの妥当性の評価を行った。ここで、離形抵抗の評価については、通常のインデント、および Fig. 4 に示す側面に幅 200 μm の溝構造を有するインデントを用いて行った。溝付きインデントは、 $L_1 \leq x \leq L_2$ に溝構造を有するため、溝部においては材料-インデントが非接触となる。したがって、通常のインデントで生じる離形抵抗 F 、溝付きインデントを用いた場合の離形抵抗 F_{groove} の値から、 $L_1 \leq x \leq L_2$ 間で部分的に生じる凝着摩擦力 F_{12} を、次式に基づき推定することができる。

$$F_{12} = \frac{F - F_{\text{Groove}}}{2} \quad (4)$$

よって、様々な位置に溝部を有するインデントを用い、圧入距離 D を変えながら繰り返し実験することで、インデント側面上の様々な位置 x における凝着摩擦力 $\tau(x)$ を求めることが可能となる。

Figure 5 に、溝付きインデントを用いて算出した位置 x における凝着摩擦力 $\tau(x)$ 、および、Fig. 3 より求めた同じ位置における表面積拡大率 $\phi(x)$ の関係を示す。同図に示すように、局所的に発生する凝着摩擦力は、その位置における表面積拡大率分布に比例して増加し、本実験で使用した材料である A1050 合金のせん断降伏応力に収束していることが確認できる。さらに、インデント側面で生じる凝着力の総和と離形抵抗の関係、および凝着力分布の連続性を考慮し、Fig. 3 で示した表面積拡大率分布から、式(3)に基づき、各圧入距離においてインデント側面に生じる凝着力の分布を算出した結果を Fig. 6 に示す。なお、同図において、実線は式(3)に基づき算出した推定値、プロット点は溝付きインデントを用いて測定した実測値である。また、推定値の算出にあたり、 $m = 1$ としている。同図からわかるように、推定値と実測値の傾向はよく一致しており、式(3)のモデルによって、界面の凝着摩擦現象を表面積拡大率分布から推定することが可能であることが示された。

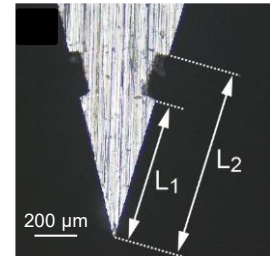


Fig. 4 Micro-grooved indenter

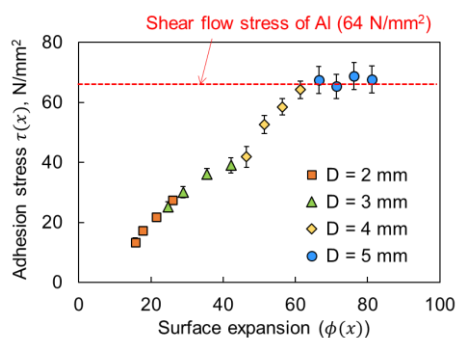


Fig. 5 Relationship between adhesion force distribution and surface expansion distribution

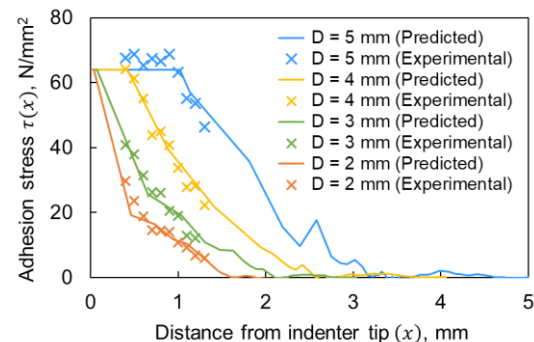


Fig. 6 Comparison of experimental and predicted values for adhesive friction force distribution

4. おわりに

本研究では、表面積拡大率分布に基づいた新たな凝着摩擦力分布モデルの構築を目的として、“材料塑性変形挙動のその場観察技術”を援用することによって、摺動界面における材料の表面積拡大分布の微視的な分布を定量化する手法を提案した。さらに、表面積拡大率分布と材料のせん断降伏応力に基づく新たな凝着摩擦力モデルを提案し、提案モデルが摺動界面における材料の凝着挙動を正確に記述可能であることを実験的に明らかにした。

文献

- 1) 日本塑性加工学会 塑性加工便覧 (2017)
- 2) T. Wanheim, N.Bay & A.S.Peterson: WEAR, 28 (1974) 251
- 3) K. Patel, G. Liu, S.R. Shah & T. Özel, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 142 (2020) 021007