

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：13701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820023

研究課題名(和文)側方応力状態を考慮した高面圧下の摩擦実験による新しい摩擦現象の解明

研究課題名(英文) Investigation of new friction behaviour by high pressure friction test in lateral stress state

研究代表者

吉川 泰晴 (Yoshikawa, Yasuharu)

岐阜大学・工学部・助教

研究者番号：20550544

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：新しい摩擦試験機によりドライ塑性加工における摩擦挙動を明らかにした。試験片がバルク変形を始めると平坦化率は急増するが、平均摩擦応力は急増することなく平均面圧の増加に伴い一定に増加した。平坦部の表面を電子線三次元粗さ解析装置により詳細に解析すると、バルク変形を始める前では表面は平滑であるが、バルク変形することにより平坦部は粗くなった。これらの実験結果より、限界面圧よりも小さな面圧ではクーロン則、限界面圧よりも大きな面圧では摩擦せん断応力一定則が成立するという新しい摩擦法則を提案し、検証した。

研究成果の概要(英文)：The friction behavior in dry metal forming is studied with a new tribometer. From the microscopic observation, it is found that the ratio of the flattened area starts to increase sharply when plastic deformation extends in the whole bulk. But, the nominal frictional stress increases linearly with the nominal contact pressure irrespective of the ratio of the flattened area. The surface texture of the flattened area is measured by using electron probe surface roughness analyzer. Before the start of bulk plastic deformation, the flattened area is smooth and almost the whole area seems to be real area of contact. After plastic deformation in the bulk material, the flattened area is roughened. A new friction law for dry metal forming, Coulomb's friction with constant friction coefficient holds up to the critical pressure and the law of constant frictional stress holds for the higher pressures, is proposed based on the experimental results.

研究分野：塑性加工

キーワード：摩擦法則 ドライ加工

### 1. 研究開始当初の背景

Bowden と Tabor の凝着理論が示され、数多くの真実接触に関する研究がなされてきた。図1は深絞り加工の途中で停止し、被加工材のフランジ部表面を金属顕微鏡で撮影したものである。白い部分は平坦なしわ押えによって押しつぶされて平坦化された突起である。塑性加工の分野では、この平坦面が真実接触面と考えられている。N. Bay らはこの平坦面でのせん断強さが一定であり、バルクの塑性変形もないと仮定して解析した。その結果は板成形のような低面圧下での加工の場合はクーロン則が適用でき、鍛造のような高面圧下での加工の場合は摩擦せん断応力一定則が適用できる、という現在の摩擦法則の適用判断の根拠となっている。一方、池らのバルクの塑性変形を考慮した表面突起の変形解析では、バルクが塑性変形すると接触率は急増することが示されている。これらから、接触部のせん断強さが一定であるならば、見かけの摩擦応力が急増する現象が示唆される。

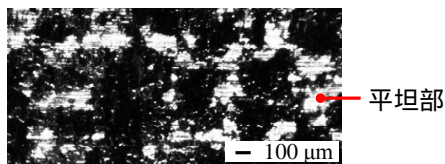


図1 深絞り加工のフランジ部表面の様子

### 2. 研究の目的

本研究では、独自の摩擦試験機により、試験片が弾性変形から塑性変形に移り変わる過程における摩擦挙動を計測し、新しい摩擦法則を提案・検証する。

### 3. 研究の方法

図2に試験機の原理を示す。本試験機は、微小突起を有する板状試験片を一定荷重で引張りながら、下側工具を上昇させ、試験片の突起部を圧縮する。それと同時に、摺動工具をスライドさせる。このとき、各荷重はロードセルにより計測される。摺動工具にはDLCコーティングを施し、その表面粗さは $0.14 \mu\text{mRz}$ である。

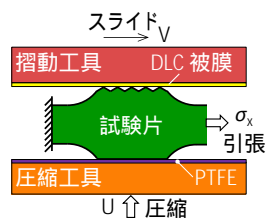


図2 摩擦試験原理図

試験片には工業用純アルミニウム板 A1050-H24 を使用した。その変形抵抗  $\gamma$  は 153 MPa 一定と近似できることを確認している。長さ 250 mm × 幅 30 mm の試験片の中央部表

面に、切削により 0.2 mm ピッチで先端角  $120^\circ$  の平行微小突起を 5 個作製した。また、突起部のみが摺動工具と摩擦する形状となっている。試験片はアセトン中での超音波洗浄後に摩擦実験に使用した。

試験片の摺動部に耐力の 40% にあたる引張応力  $\sigma_x$  が作用するように、引張荷重を加え、 $0.1 \text{ mm/s}$  の速度で潤滑油を使用せずドライで摩擦させた。また、高面圧下での摩擦試験は同様の摩擦工具と試験片材料を用いて実施した。

### 4. 研究成果

図3に、実験後の試験片および摺動工具の表面の金属顕微鏡観察の写真を示す。試験片の摺動面にわずかな擦り傷がみられるが、試験片、摺動工具のどちらの表面にも焼付きや凝着物は観察されなかった。

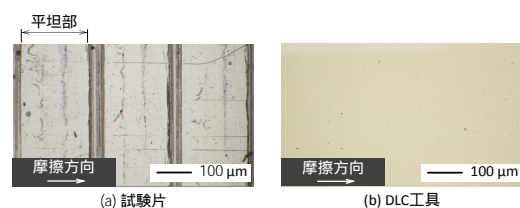


図3 摩擦試験後の試験片および DLC 工具の表面の様子

実験後の試験片摺動面の光学顕微鏡写真の画像解析により平坦化率  $\beta_f$  を求めた結果を図4に示す。平坦化率は試験片全体が塑性変形する  $p_a = 90 \text{ MPa}$  程度までは直線的に増加しているが、試験片全体が塑性変形を開始する 90 MPa あたりで急増に転じる。

図5に平均摩擦応力と平均面圧の関係を示す。平均摩擦応力は平均面圧に比例して増加しており、クーロン摩擦が成り立っていることがわかる。また、9 回の実験結果は同一線上にあり、実験の再現性の高いことがわかる。

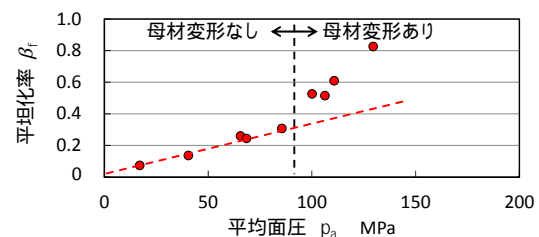


図4 平均面圧と平坦化率の関係

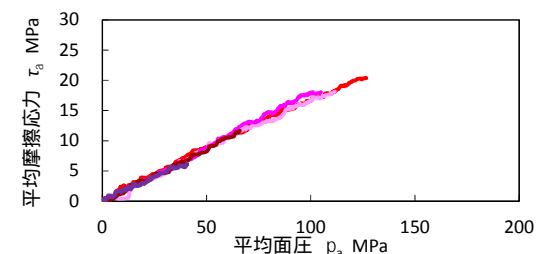


図5 平均面圧と平均摩擦応力の関係

平均摩擦応力と平均接触圧力を平坦化率  $\beta_f$  で割った平坦部の摩擦応力  $\tau_f$  と面圧  $p_f$  の関係を図 6 に示す。試験片の塑性変形の進行に伴い面圧が減少すると、摩擦応力も減少していくことがわかる。この結果から、平坦部についてもクーロン則が成立していることがわかる。

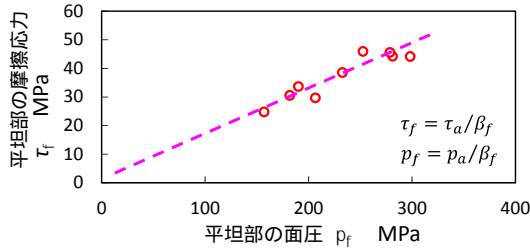


図 6 平坦部における面圧と摩擦応力の関係

平坦部の圧力が下がると摩擦応力も下がる原因を調べるために平坦部の電子線三次元粗さ解析(ERA)を行い、その様子を図 7 に示す。試験片全体が塑性変形する前は図(a)のように平滑であるが、母材が塑性変形すると平坦化された部分にも図(b)のように凹凸が観察された。

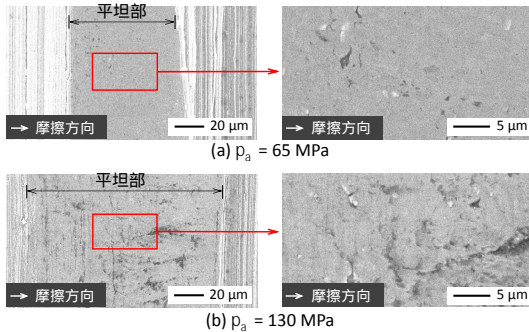


図 7 平坦部の電子線三次元粗さ解析(ERA)

以上から、試験片全体が塑性変形した後の真実接触率は、金属顕微鏡で観察された平坦化率  $\beta_f$  よりも小さくなることがわかる。

摩擦試験の結果より、平坦部の摩擦係数は  $\mu_f = \tau_f / p_f$  と表される。平均摩擦応力と平均面圧は  $\tau_a = \beta_f \tau_f$  と  $p_a = \beta_f p_f$  であるから、次式が得られる。

$$\tau_a = \mu_f p_a \quad (1)$$

図示すると図 8 のようになる。全体が塑性変形をしないと平均摩擦係数(OB)と平坦部の摩擦係数(A)は等しい。塑性変形後には平均的にはBB'を移動しクーロン則が成立する。

非常に高い面圧下では、摺動面の全体が真実接触状態になると考えられる。

$$p_{cr} = C = \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{1 + \sin 2\phi}{2} + \frac{\pi}{4} + \phi - \theta \right) \quad (2)$$

$$\phi = \frac{1}{2} \cos^{-1} m \quad (3)$$

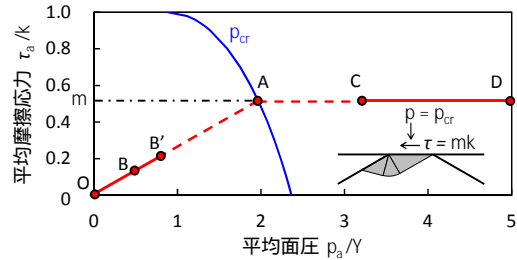


図 8 提案する新しい摩擦法則

全体の塑性変形が生じない段階では、接触率が増加するが、平坦部の面圧は一定である。平均面圧が高くなり塑性変形域が拡大し、母材全体が塑性変形すると、図 6 のように平坦部の面圧が減少する。平坦部は図 7 (b) のような微小凹凸を有する接触面となる。試験片が拘束されて塑性変形できない場合においては、平均面圧の高まりとともにやがて平坦部の微小凹凸がつぶされ、全面が工具と接触するようになると思われる。

以上より、図 8 の A 点まで  $\mu$  一定のクーロン則が成立し、A 点以上の高面圧下では摩擦応力  $\tau = mk$  となる摩擦法則を提案する。m と  $\mu$  との関係は次式の通りである。

$$m = \frac{\tau}{k} = \frac{\sqrt{3} \mu p_{cr}}{Y} = \sqrt{3} \mu (a \mu + b) \quad (4)$$

$$a = -0.48\theta + 2.48\theta - 3.82$$

$$b = -1.19\theta + 3.0$$

上記の提案した摩擦法則を検証するために、高面圧領域の摩擦試験を図 9 に示す試験機を用いて行った。試料はダイにより四方が拘束されているため、塑性変形せず、高い面圧を負荷することができる。アンピルの摩擦面には同じ DLC コーティングが施してある。摩擦面の表面粗さは  $0.28 \mu m R_z$  であった。

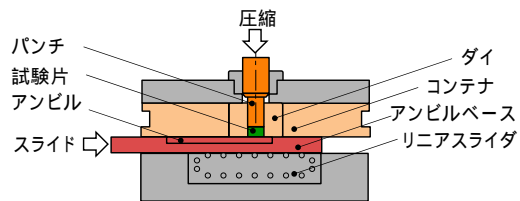


図 9 高面圧摩擦試験機の概略図

図 10 に低面圧および高面圧摩擦試験の結果を示す。面圧  $p_a / Y$  が 2.4 程度よりも大きくなると、面圧によらず摩擦応力はほぼ一定の値であることがわかる。

リング圧縮試験および新しい摩擦法則を適用した有限要素解析を行った。実験にはコマツ産機製 1100 kN サーボプレスを使用し、試験時の荷重は金型に取り付けたロードセルにより測定した。摩擦法則提案時と同じ DLC コーティングを施した摩擦金型と試験片 (A1050-H24) を使用した。コーティング後の金型の表面粗さは  $0.056 \mu m R_z$  である。試料の板厚は 0.6 mm、内径は 14 mm、外径は 18

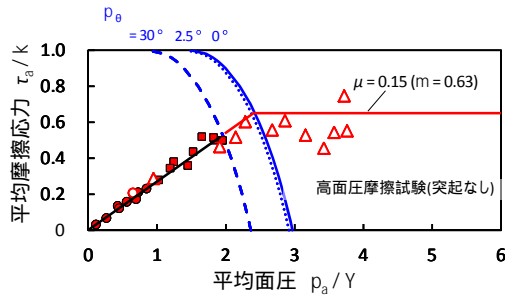


図 10 高面圧摩擦試験による平均面圧と平均摩擦応力の関係

mm とした．また，実験前に試料をアセトン中で超音波洗浄を行い脱脂した．

有限要素解析には DEFORM-2D を使用し，軸対称問題として解析を行った．試料の解析モデルは剛塑性体とし，材質，寸法は実験と同じとした．また，平滑圧縮工具は上下ともに剛体とし，上側の工具が  $z$  方向下向きに速度 5 mm/s で降下して試料を圧縮率  $r = 0.60$  まで圧縮した．試料 - 工具間の摩擦係数  $\mu = 0.15$  とし，面圧が臨界面圧を超えた地点から摩擦せん断係数  $m = 0.63$  に切り替えることで，摩擦法則を解析に適用した．

圧縮率が 0.25 で分流点の面圧が臨界面圧に達し，圧縮率 0.39 では臨界面圧 360 MPa を超えている領域が半分以上になり，圧縮率 0.60 となると，ほぼ全面の面圧が臨界面圧を超えた．実験と FEM 解析における荷重と圧縮率の比較を図 11 に示す．提案した摩擦法則を適用した場合の方がクーロン則のままの場合に比べて実験結果とよく一致していることがわかる．

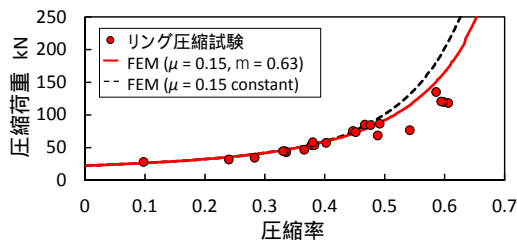


図 11 リング圧縮試験による圧縮率と圧縮荷重の関係

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 6 件)

- (1) 吉川泰晴, 王志剛, 鈴木達博, 塑性加工用摩擦法則の検証, 型技術ワークショップ 2014 in 愛知, 2014 年 11 月, ウィンクあいち (愛知県名古屋市).
- (2) Tatsuhiko Suzuki, Zhigang Wang, Yasuharu Yoshikawa, Effect of plastic deformation of

bulk material on frictional behavior in dry metal forming, 11th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP 2014), Nagoya Congress Center (Nagoya, Aichi).

- (3) 鈴木達博, 吉川泰晴, 王志剛, 小坂田宏造, ドライ加工における摩擦法則の実証, 平成 26 年度塑性加工春季講演会, 2014 年 6 月, つくば国際会議場 (茨城県つくば市).
- (4) 吉川泰晴, 鈴木達博, 王志剛, 小坂田宏造, ドライ加工における摩擦法則の提案, 平成 26 年度塑性加工春季講演会, 2014 年 6 月, つくば国際会議場 (茨城県つくば市).
- (5) 吉川泰晴, 王志剛, 鈴木達博, パルクの塑性変形を考慮した摩擦法則の定式化, 第 64 回塑性加工連合講演会, 2013 年 11 月, 大阪大学 (大阪府大阪市).
- (6) 鈴木達博, 王志剛, 吉川泰晴, パルクの塑性変形を考慮した摩擦法則の定式化, 第 64 回塑性加工連合講演会, 2013 年 11 月, 大阪大学 (大阪府大阪市).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉川 泰晴 (YOSHIKAWA, Yasuharu)

岐阜大学・工学部・助教

研究者番号: 2 0 5 5 0 5 4 4