

塑性加工における摩擦法則の確立

岐阜大学 工学部機械工学科
教授 王 志剛

(平成 26 年度重点研究開発助成 AF-2014001)

キーワード：塑性加工，トライボロジー，摩擦法則

1. 研究の背景と目的

塑性加工の数値シミュレーション技術は、実用レベルに達してから 20 年近く経過し、いまでは新しい加工法の開発、生産現場の技術改善等あらゆる場面において不可欠な道具となっている。

この数値シミュレーションの解析精度を上げるために、解析に必要な被加工材の構成式に関しては、精力的な研究が積み重ね、精緻な域に達しつつある。一方、解析に必要なもう一つの関係式である、被加工材と金型間の摩擦法則に関しては、面圧の低い領域ではクーロンの法則($\tau = \mu p$)、面圧の高い領域では摩擦せん断応力一定則($\tau = mk$)が一般的に使われている¹⁾。しかし、それぞれの法則の適用可能な面圧範囲は不明確であり、 μ と m の関係も判然としない。このことは、圧延、鍛造加工のような接触界面の面圧が大きく変動し得る加工法の数値解析にとって大きな障害となっている。加えて、近年、塑性加工の守備範囲を拡大させるために、板鍛造に代表されるように各種複合加工法が使われるようになってきている。複合加工においては、面圧は加工の部位によって大きく異なり、分流点も存在するため、摩擦法則は数値解析の精度を左右する重大な課題となっている²⁾。

このように、塑性加工における摩擦現象の解明は、各種塑性加工法の高度化にとって不可欠であり、その根幹となる摩擦法則の確立は学術的な意義に留まらず、塑性加工業界全体に大きな影響をもたらすと考えられている。

本研究は、トライボロジーの原理・原則に基づいて、板成形、圧延、鍛造など全ての塑性加工法の数値シミュレーションに簡便に使える摩擦法則を提案する。

2. 摩擦試験法

広範囲の面圧条件下での摩擦現象を調べるために、本研究では側方引張を加えた摩擦試験法と高面圧摩擦試験法を併用した。

図 1 に側方張力付加摩擦試験機の原理図³⁾を示す。表面突起を有する試験片は、両サイドで引張られながら、圧縮ツールにより下方から圧縮され、摩擦ツールにより摺動摩擦を受ける。側方の引張荷重は摩擦試験中計測・制御され、摩擦係数は計測した圧縮荷重と摩擦力で算出される。試験片と摩擦ツール間の焼付きの発生を無潤滑油状態で抑制するため、摩擦ツールの表面に DLC 膜を製膜した。この試験機の最大の特徴は以下の 2 点である。

- (1) 試験片のバルクが弾性状態から塑性状態に移るプロセスにおける摩擦挙動を捉えることができる。
- (2) 試験片のバルクの応力状態が摩擦挙動に及ぼす影響を検討できる。

図 2 に高面圧摩擦試験機の原理図⁴⁾を示す。試験片を密閉型内で圧縮し、高い面圧を付加した後すべりを与える。摩擦係数は計測した圧縮荷重と摩擦力で算出される。試験片とアンビル間の焼付きの発生を抑制するため、アンビル表面に DLC 膜を製膜した。

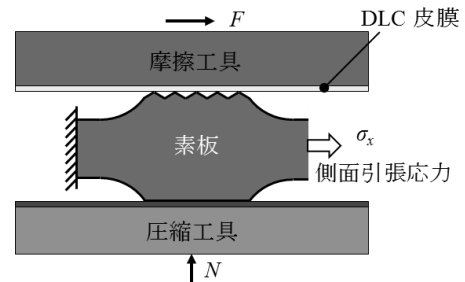


図 1 側方張力付加摩擦試験の原理³⁾

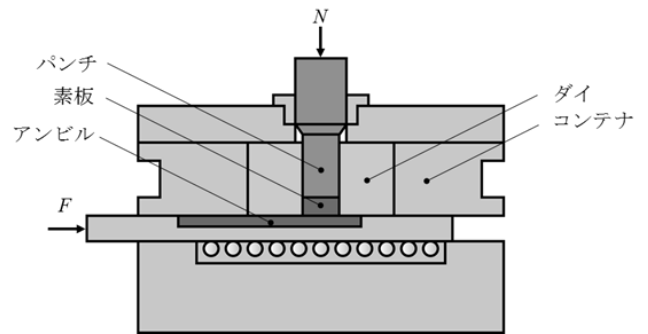


図 2 高面圧摩擦試験法の原理⁴⁾

3. 摩擦法則

3. 1 ドライ状態における摩擦法則

バルク材の塑性変形が表面層の変形に少なからずの影響を与えることは古くから知られており⁵⁾⁶⁾、摩擦挙動にも何らかの影響を及ぼし、塑性加工における摩擦現象の特異性を引き起こすと考えられている。図 3 のようにバルク材が弾性状態であれば、平坦部の割合は平均面圧に比例するが、バルク全体が塑性状態になると平坦部の割合は急増している。

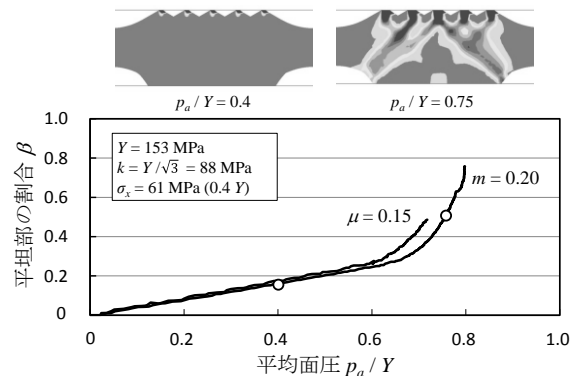


図 3 FEM 解析による平坦部の割合と平均面圧との関係

仮に平坦部の摩擦せん断応力がバルク材の塑性変形の有無に関わらず一定とすれば、バルク材の塑性変形によって平均摩擦応力の急増が容易に想像され、塑性加工における摩擦法則はバルク材の変形状態の影響を受けると想定されるが、実際の実験結果は図4の通りである。

摩擦試験後の表面を光学顕微鏡で観察すると試料表面の突起がきれいに平坦化されている。この平坦部の割合は有限要素法の解析結果と同じく、バルク材の塑性変形に伴い、急増している。しかし、平均摩擦応力はバルク材の塑性変形の有無によらず平均面圧に比例する。すなわち、クーロンの法則は成立する。

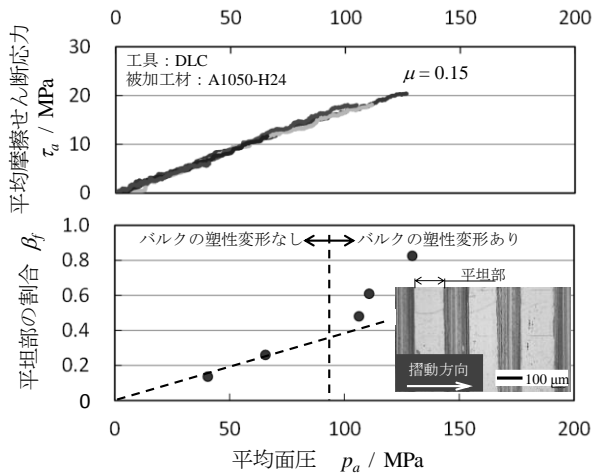


図4 摩擦試験における平均摩擦せん断応力および平坦部の割合と平均面圧との関係

それでは、平坦部の摩擦せん断応力は接触圧力に対してどのような変化を示すのか。その様子を図5に示す。バルク材の塑性変形の進行に伴い、平坦部において接触圧力と摩擦せん断応力の両方が低下するものの、クーロンの法則が成立する。

電子線表面粗さ計で平坦部を観察してみると、図6に示すように、バルク材が弾性状態にある場合、平坦部全体がほぼ完全に平滑化されているが、バルク材が塑性変形していると、平坦部には深さ0.1-0.2μmの谷部が存在し、いわゆる真実接触面積は平坦部の面積よりかなり小さいようである。この平坦部のしゅん動は、結晶粒の沈降によって引き起こされるものであろう。この現象は接触界面のダイナミックの一面を示唆するもので、均質材を前提とする一般的な有限要素解析では捉えることはできない。

この平坦部の観察結果に基づいて、著者は図7に示す摩擦法則を提案している³⁾。この摩擦法則において、クーロン則が成立する臨界面圧はバルク材の変形がない場合の突起の押しつぶし圧に等しいと仮定している。すべり線場法により臨界面圧 p_{cr} を以下のように算出した。

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

$$\varphi = \frac{1}{2} \cos^{-1} m$$

ここで θ (rad) は表面突起の傾斜角である。また、摩擦係数 μ から摩擦せん断係数 m および臨界面圧 p_{cr} は次のように計算できる。

$$m = \sqrt{3}C\mu$$

$$p_{cr} = (A\mu + B)Y$$

$$A = -0.48\theta^2 + 2.48\theta - 3.82$$

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

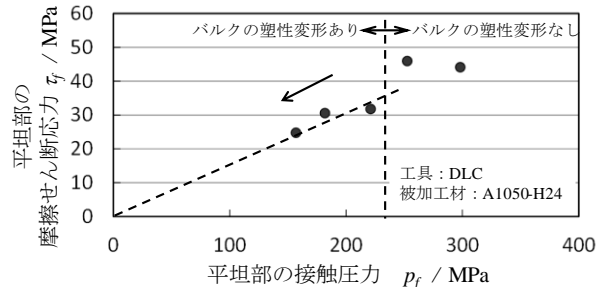


図5 平坦部の摩擦せん断応力と接触圧力の関係

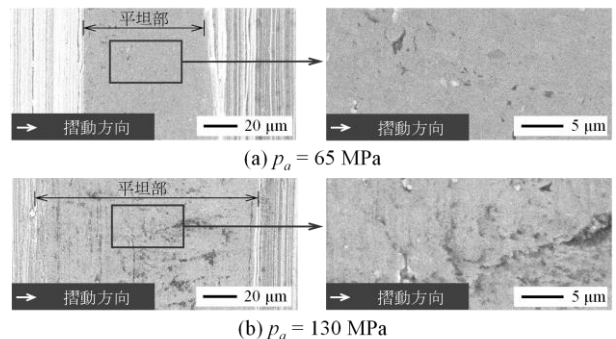


図6 電子線表面粗さ計によって観察した平坦部の様子

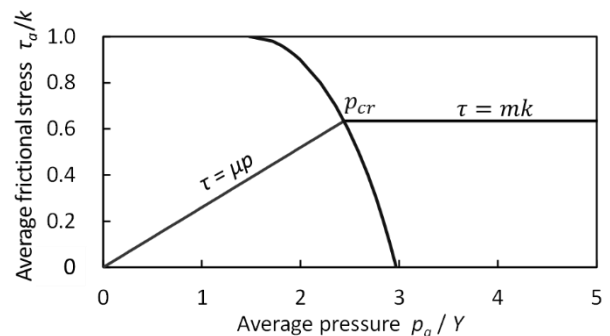


図7 新摩擦法則の提案³⁾

この新摩擦法則によれば、平均面圧がバルク材の降伏応力の約3倍まで、すなわち、閉塞鍛造のような一部の加工を除けば塑性加工のほぼ全域でクーロン則が成立する。この新摩擦法則の特徴は、高面圧側の摩擦せん断係数は低面圧側の摩擦係数から算出でき、摩擦係数を与えるだけで、全ての面圧域でのCAE解析が可能となる。

これまでの導出過程において、被加工材として加工硬化性を有しない純アルミニウム A1050-H24 を用いた。加工硬化性を有する被加工材として、冷延鋼板 SPCC を用いた実験の結果を図8に示す⁷⁾。図中、無次元化に用いた降伏応力 Y およびせん断降伏応力 k は相当塑性ひずみ 0.08 に対応する値を使用した。相当塑性ひずみ 0.08 を用いたのは、臨界面圧は突起の初期押しつぶし圧力に等しく、突起の押しつぶし変形はビッカース硬さ試験のような圧子の

押し込み変形とみなして、その変形量は相当塑性ひずみ 0.08 程度と見積られるためである。

これらの結果より、加工硬化性を有する被加工材においても、構築した摩擦法則が適用可能であることが明らかになった。さらに、詳細を省くが、予ひずみを付加した被加工材の場合は、予ひずみに 0.08 を加えた値に対応する変形抵抗値を無次元化の降伏応力 Y に用いれば、摩擦法則は適用可能であることが確認されている。

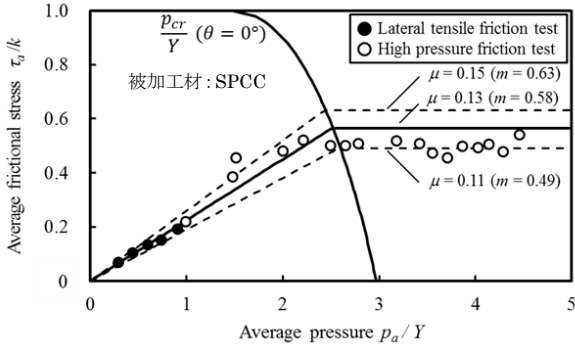


図 8 加工硬化性を有する被加工材の摩擦法則

3. 2 固体潤滑皮膜の摩擦法則

冷間鍛造のような高面圧、表面積拡大の大きい加工において、焼付きを抑制するために被加工材表面に予め固体潤滑皮膜を塗付しておくのが一般的である。ボンデ皮膜、一液潤滑皮膜の摩擦挙動を図 9 に示す⁷⁾。実験した全ての条件において、実験後の被加工材表面に完全な潤滑皮膜が残存していたことが確認された。潤滑皮膜を用いた場合、摩擦せん断応力は臨界面圧を超えても一定値を示さず、線形関係を保ったままである。即ち、全ての面圧域においてクーロン則が適用される。

なお、潤滑皮膜の摩擦係数は温度と金型の表面粗さの関数のようである⁸⁾。

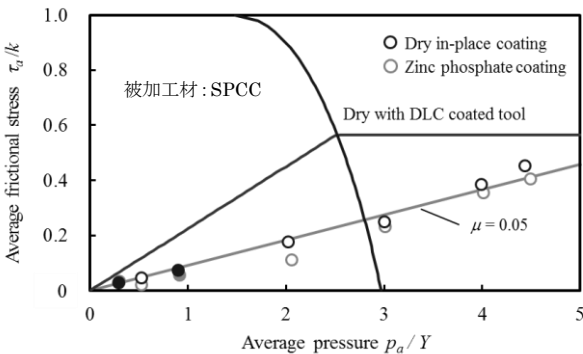


図 9 固体潤滑皮膜の摩擦挙動

3. 3 潤滑油を用いた場合の摩擦法則

現状の塑性加工現場では、液体潤滑油を用いるのが普通である。本実験では鉱油 P100 を使用し、摩擦熱の影響を小さくするために、すべり速度は 0.1 mm/s とした。

試験片にはダル仕上げの冷間圧延鋼板 SPCC を用いた。無次元化に用いる変形抵抗 Y はひずみ 0.08 に対応する値 $Y_{\epsilon=0.08} = 326\text{MPa}$ を使用した。図 10 に試験片表面のベアリング曲線を示す。突出山部の割合は 3% 程度、深い谷部の割合は 15% 程度である。

試料はアセトン中で超音波洗浄を行い脱脂した後、潤滑

油のエタノール希釈液に漬け、取り出し後空气中で乾燥させて実験に供した。油膜厚さは試験片表面粗さ基準にそれよりかなり小さい $0.5\mu\text{m}$ とそれと同レベルの $7.0\mu\text{m}$ の 2 種類とした。なお、油膜厚さは塗布前後の重量変化より算出した。

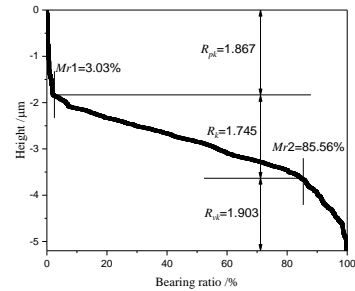


図 10 被加工材表面の負荷曲線

図 11 に側方応力が $0.4Y$ の場合の実験結果をドライ状態下の摩擦法則の図中にプロットしたものを示す⁹⁾。面圧 $1.0Y$ 以下は側方引張形摩擦試験による結果で、面圧 $1.0Y$ 以上は高面圧摩擦試験による結果である。摩擦応力は初期の油膜厚さの影響を受けず、以下の変化を辿っている。面圧が $0.5Y$ 以下と低い場合、潤滑油 P100 による潤滑効果が現れず摩擦挙動はドライ状態のそれとほぼ同一である。面圧 $0.5Y$ - $1.0Y$ において面圧の増加に伴い、摩擦応力が減少している。面圧 $1.0Y$ - $3.5Y$ においては、摩擦応力は面圧の増加に伴い線形に増加している。面圧が $3.5Y$ 以上と高い場合は摩擦応力がクーロン則の線よりも高い値をとり、ドライ状態の限界せん断応力に近づく。

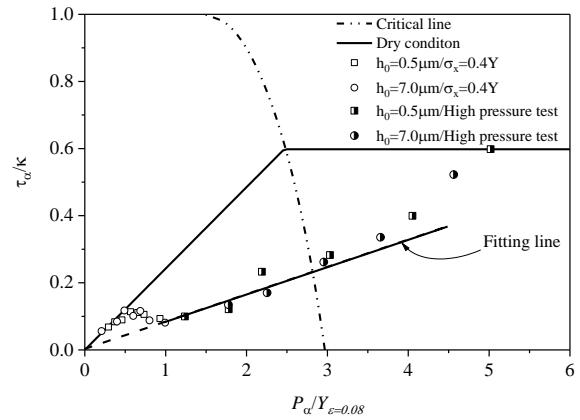


図 11 種々の塗付油膜厚さにおける摩擦挙動 ($\sigma_x=0.4Y$)

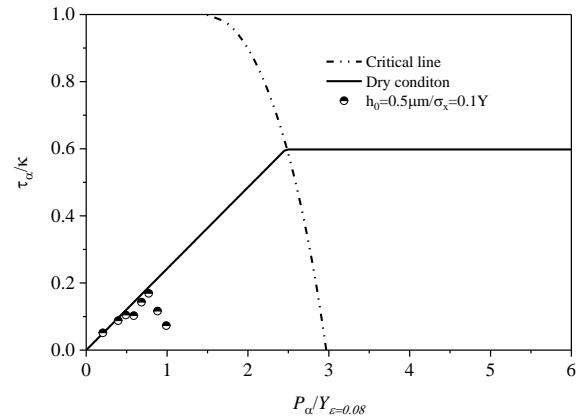


図 12 $\sigma_x=0.1Y$ における摩擦挙動

側方応力 $\sigma_x = 0.4Y$ において、面圧が $0.5Y$ あたりから試験片のバルクが塑性変形状態に入ると、側方応力 σ_x の値を $0.1Y$ に変更した実験を行った。その結果を図 12 に示す。摩擦応力は $\sigma_x = 0.4Y$ の場合とほぼ同様な挙動を示していることから、面圧 $0.5Y$ あたりの摩擦挙動は試験片バルクの弾塑性状態の変化によるものではないと考えられる。

摩擦挙動に及ぼす摩擦履歴の影響をみるため、面圧 $1.0Y$ での摩擦すべりを負荷した試験片に対して、面圧を $0.4Y$ に降下して摩擦試験を継続し、得られた結果を図 13 に示す。実験データは図 11 のマスターカーブにほぼのることから、摩擦履歴の影響はなさそうである。

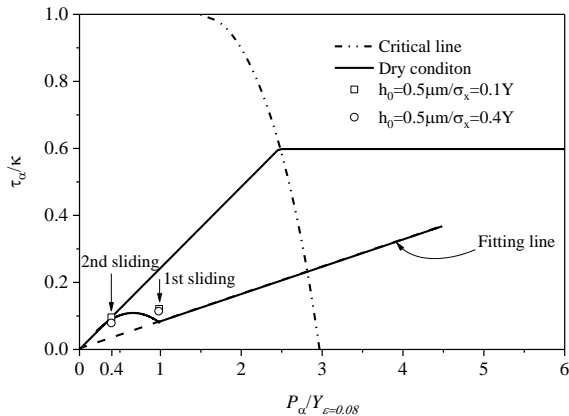
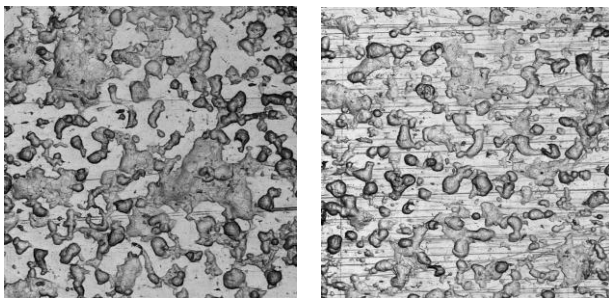


図 13 摩擦履歴の影響

摩擦試験後の試験片表面の性状を図 14 に示す。いずれの面圧においても平坦部と谷部で構成されており、平坦部の擦り傷は高面圧のほうが目立っている。これらの結果から本実験の摩擦挙動は以下のような機構によるものと考えられる。



(a) Average pressure $p/Y = 0.4$ (b) Average pressure $p/Y = 0.8$

図 14 摩擦試験後の試験片表面写真

平坦部の面積割合を R 、その部分に作用する平均摩擦せん断応力を τ_r 、オイルピット部の摩擦せん断応力を τ_l とすれば、摩擦面の平均摩擦せん断応力 τ_m は、次式のように表される。

$$\tau_m = R\tau_r + (1 - R)\tau_l$$

また、平坦部の平均面圧を p_r 、オイルピット部の潤滑剤の圧力を p_l とすれば、平均面圧 p_m は、次式のように表される。

$$p_m = Rp_r + (1 - R)p_l$$

平均摩擦係数 μ_m は、次式のように表される。

$$\mu_m = \frac{\tau_m}{p_m} = \frac{R\tau_r + (1 - R)\tau_l}{Rp_r + (1 - R)p_l}$$

オイルピット部が圧力を受け持たず、 $p_l = 0$ が成立するとき、 $\mu_m = \mu_r$ となる。オイルピット部の圧力が平坦部の平均面圧にほぼ等しいレベルに高まり、オイルピット部の摩擦せん断応力が無視できるとすれば、 $\mu_m = R_i\mu_r$ となる。 R_i はこのときの平坦部の面積割合である。

この基本的な考え方で考えると、面圧が $0.5Y$ 以下と低い場合、オイルピット内の圧力は高まらず、摩擦係数は一定値をとる。臨界面圧の値を用いて平坦部の面積割合を見積れば、面圧 $0.5Y$ でおおよそ 20% となる。注目すべきことは低面圧での接触では、鉱油 P100 の潤滑効果がなく、塗付油膜厚さの影響もない点である。その後面圧の増加に伴い、オイルピット内に油圧が発生し、摩擦係数は低下する。面圧が $1.0Y$ 以上で再び摩擦係数が一定となることから、面圧 $1.0Y$ あたりでオイルピット内の圧力は平坦部の圧力に近いと思われる。低面圧域の摩擦係数 $\mu = 0.13$ と高面圧域の摩擦係数 $\mu = 0.05$ から逆算すると、このときの平坦部の面積割合は 38% 程度と推測される。面圧 $3.5Y$ 以上では、潤滑剤の固化等でオイルピット部の摩擦せん断応力が無視できなくなり、摩擦応力はクーロン則よりも高い値をとるようになる。

このように、潤滑剤を用いた場合の摩擦法則はやや複雑な形をとるが、ドライ状態の摩擦係数と 2 つの面圧値で定式化できると思われる。

4. 結言

側方引張り摩擦試験と高面圧摩擦試験を併用し、ドライ状態、固体潤滑皮膜および潤滑剤を用いた潤滑状態下の摩擦挙動を調べた。その結果、塑性加工における摩擦法則を確立することができた。

謝辞

本研究の遂行にあたり、公益財団法人天田財団の平成 26 年度重点研究開発助成をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表します。また、実験の遂行に岐阜大学助教吉川泰晴氏、岐阜大学大学院博士課程生鈴木達博氏、日本学術振興会外国人特別研究員の董文正氏の協力をいただいた。さらに実験結果の討議を通して、大阪大学の小坂田宏造名誉教授、静岡大学の中村保名誉教授に数多くの助言をいただいた。

参考文献

- 1) N. Bay, et. al.: Wear, **38**(1976), 201.
- 2) Z.G. Wang, et. al.: Annals of the CIRP, **62** (2013), 291.
- 3) Z.G. Wang, et. al.: Annals of the CIRP, **63** (2014), 277.
- 4) T. Nakamura: Journal of Tribology, **122-4**(2000), 803.
- 5) B. Fogg: Sheet Metal Industries, **44-2**(1967), 95.
- 6) H. Ike, et. al.: Wear, **140**(1990), 17.
- 7) Z.G. Wang, et. al.: Annals of the CIRP, **64** (2015), 285.
- 8) 加田修ほか：平成 29 年度塑加春論文集 (2017), 289.
- 9) 張野他：平成 29 年度塑加春論文集 (2017), 305.