

潤滑性能評価試験法における工具-材料間の 摩擦係数推定に関する研究

豊田工業高等専門学校 機械工学科
准教授 浅井 一仁

(2019年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2019039-C2)

キーワード：鍛造，トライボ特性，摩擦係数

1. 研究の目的と背景

塑性加工におけるトライボ評価試験法では、摩擦係数や焼付き量、摩耗量が測定され、高性能な潤滑剤や硬質皮膜の開発、型材の選定に利用されている。特に、鍛造や押し出し加工では、面圧が高く、型-材料間の摩擦が成形荷重や製品の精度に強く影響する。そのため、工程設計のシミュレーション解析では、適切な摩擦係数の入力が必要とされる。そこで、トライボ評価試験法と FEM 解析を用いて、型と材料間の摩擦係数が推定されている。摩擦係数を一定とした FEM 解析より、摩擦係数ごとの成形荷重や素材の形状変化から較正線図を作成する。その線図と実験の結果を比較して、工具と試験片間の摩擦係数が推定される。FEM 解析とトライボ評価試験法を用いて、工具と試験片間の摩擦係数を推定することに関して、Male¹⁾のリング圧縮試験、それに関連して、久能木²⁾は、軸方向の中空圧縮の詳細な変形をスラブ法で解析を行った。工藤³⁾は、上界法で内径変化に対する摩擦の影響を解析した。長いすべり距離の試験には、王らの据込み-押し出し式の試験⁴⁾、Dubarらの据込み-滑り試験⁵⁾、Groche らの据込みスライド試験⁶⁾がある。さらに大きな表面積拡大を伴う試験として、Zhang らの T 形圧縮試験⁷⁾、五十川らのスパイクテスト⁸⁾、鷺坂らの前後方押し出し試験⁹⁾が挙げられる。

本報告書では、鍛造用トライボ評価試験法である外周を拘束しないテーパプラグ通し試験法¹⁰⁾でのテーパプラグと試験片間の摩擦係数を推定した。

2. 実験方法

図 1 に外周を拘束しないテーパプラグ通し試験法の模式図を示す。試験片にテーパプラグを押し込み、内径を押し広げる。テーパ半角を大きくすると試験片への変形量が増加し、厳しい加工条件になる。この試験法では、試験片外周をコンテナで拘束しない。そのため、テーパプラグと試験片間だけに摩擦が発生する。表 1 に実験条件を示す。テーパプラグの材質は SKD11、最大直径 16.67 mm、半角 5°である。試験片の材質は A1070-T1、外径×内径×高さ=φ50×φ15×50 である。潤滑剤は、牛脂+黒鉛を用いて、テーパプラグと試験片内面に十分に塗布する。テーパプラグの押し込み速度は 0.1 mm/s である。表 2 に解析条件を示す。解析ソフトは simufact.formin 2021 を用いる。テーパプラグと下型は剛体、試験片は剛塑性体である。

テーパプラグと試験片間の摩擦係数には、クーロン摩擦係数 μ を用いる。

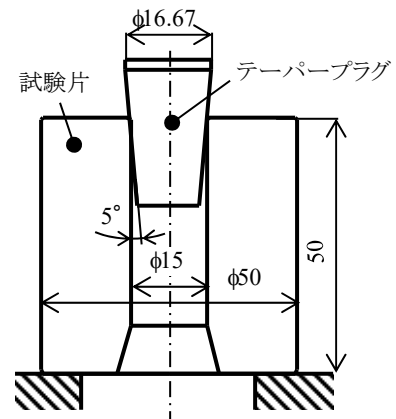


図 1. 外周を拘束しないテーパプラグ通し試験の模式図

表 1 実験条件

テーパプラグ	SKD11, 最大直径 16.67 mm, 半角 5°, 室温
試験片	A1070-T1, 外径×内径×高さ=φ50×φ15×50 室温
潤滑剤	牛脂+黒鉛
押し込み速度	0.1 mm/s

表 2 FEM 解析条件

テーパプラグ	剛体, 最大直径 16.67 mm, 半角 5°, 20°
試験片	剛塑性体, A1070 外径×内径×高さ=φ50×φ15×50, 20°C
摩擦係数	クーロン摩擦係数 μ
押し込み速度	0.1 mm/s

3. 研究成果

3・1 FEM 解析での荷重ストローク線図

図 2 に FEM 解析でのテーパ半角 5°の押し込み荷重線図を示す。テーパプラグと試験片間の摩擦の増加に伴い押し込み荷重は増加する。ストローク 10 mm 程度で、幾何学上、テーパプラグと試験片の接触面積が定常になる。テーパプラグと試験片間の摩擦が低い時、荷重はストローク 10 mm 以降からほぼ定常となる。摩擦が高くなると非定常になる。大きな摩擦は、前方にせん断変形を起こし、その局所的なバルジングが穴径を小さくする。それにより摩擦

係数の増加に伴い、バルジ変形が増加する。それは断面積減少率の増加に相当するので荷重が増加する。

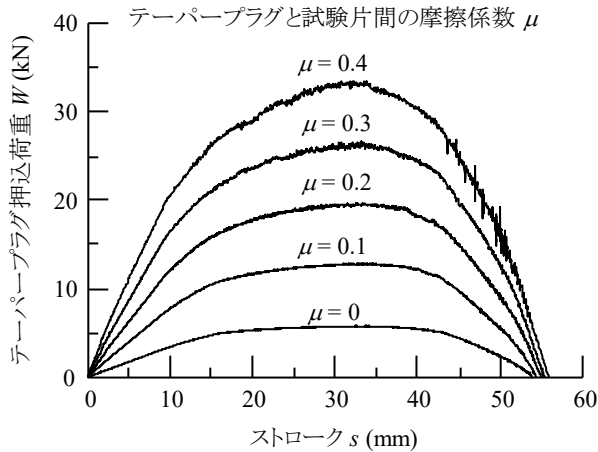
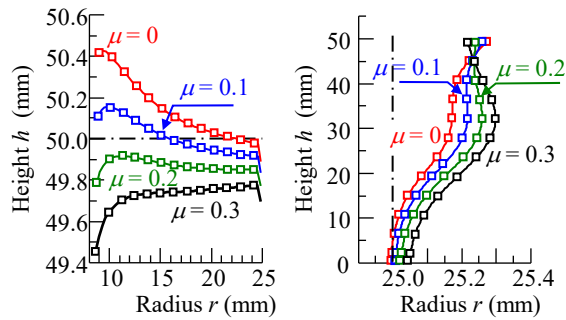


図 2. テーパープラグと試験片間の摩擦係数を変えた時の押込荷重線図

3・2 FEM 解析での試験片形状

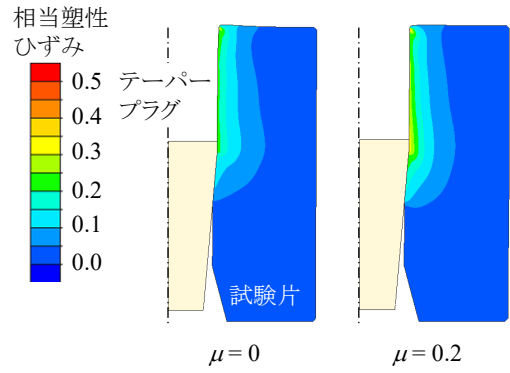
図 3 にストローク 30 mm での試験片形状を示す。図 3(a) は、上端面での高さ変化を示す。テーパープラグと試験片間の摩擦係数の減少に伴い内径付近の高さが高くなる。これは、押込方向と逆向きに材料が流動したためである。一方で、摩擦係数が増加すると材料が穴に引き込まれる。図 3(b) は試験片の外周形状を示す。摩擦係数が増加するほど外径は大きくなる。これは体積一定則より高さ減少分の体積が外径の増加に使われたためである。



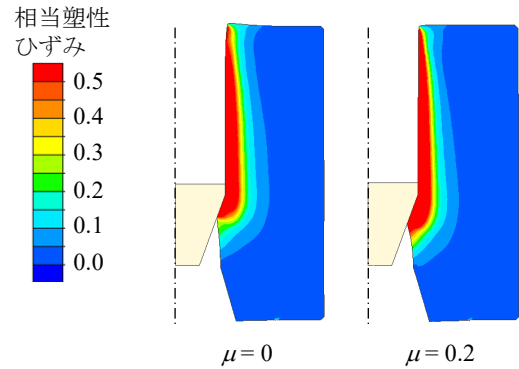
(a) 上端面での高さ変化 (b) 験片の外周形状

図 3. テーパープラグと試験片間の摩擦係数による試験片形状の変化

図 4 にストローク 30 mm での試験片の相当塑性ひずみ分布を示す。図 4 (a) はテーパー半角 5° での相当塑性ひずみ分布を示す。摩擦係数の増加に伴い表面近傍での相当塑性ひずみの値は大きくなる。これは、摩擦係数の増加に伴うせん断力の増加による。図 4 (b) はテーパー半角 20° の相当塑性ひずみ分布を示す。半角が大きくなると相当塑性ひずみは大きくなる。加えて、摩擦係数が 0 の時でも、未試験の部分がテーパープラグによって据え込まれ圧縮されている。テーパー半角 20° の時、テーパープラグ付近の材料にせん断変形と圧縮変形が生じる。



(a) テーパー半角 5° での相当塑性ひずみ分布



(b) テーパー半角 20° での相当塑性ひずみ分布

図 4. ストローク 30 mm での試験片の相当塑性ひずみ分布

3・3 荷重ストローク線図

図 5 に各潤滑条件でのテーパープラグ押込み荷重線図を示す。参考のため、FEM 解析でのテーパープラグ押込荷重線図を示す。ストローク 10 mm まで荷重は急激に増加する。その後、荷重は緩やかに増加または減少する。試験片内面とテーパープラグに潤滑した時、荷重はストローク 25~30 mm でほぼ定常となる。また、この荷重は摩擦係数 0.1 の荷重線図と一致する。これまで、この潤滑条件の見かけの摩擦係数として $\mu = 0.1$ と推定されてきた。

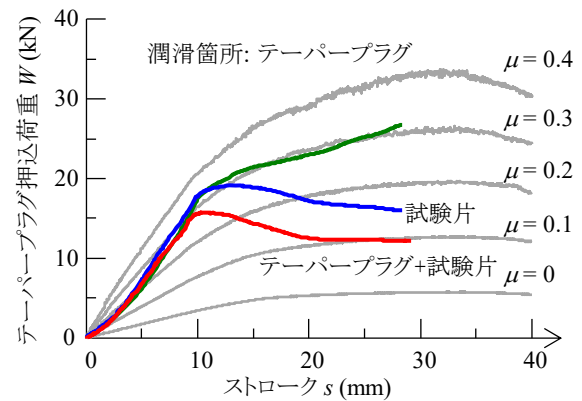


図 5. 各潤滑条件でのテーパープラグ押込荷重線図

3・4 試験後の試験片内面とテーパプラグの観察

図6に試験後の試験片内面とテーパプラグの観察結果を示す。各潤滑条件において、ストローク 20 mm 以降から深い傷が試験片内面に発生している。テーパプラグ上の凝着が 20 mm 以降から発生したと考える。テーパプラグ上に凝着が発生すると材料間でのせん断を生じるためテーパプラグと試験片間の摩擦係数の正確な推定は困難である。

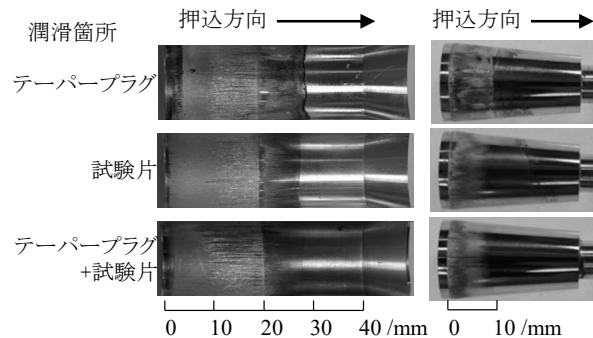


図6. 試験後の試験片内面とテーパプラグの観察結果

4. テーパープラグと試験片間の摩擦係数の推定法

図7にストローク 5mm までの実験と FEM 解析の押込荷重線図を示す。ストローク 1.3 mm までは、 $\mu=0.1$ の線図と実験の線図はほぼ重なる。ストロークが 1.3 mm 以上になると実験時の荷重は $\mu=0.1$ の線図よりも大きくなる。この時点で実際の変形は $\mu=0.1$ が一定の変形と異なる。これまで摩擦係数を推定するためにノモグラフを作成し摩擦係数を推定してきた。しかし、実験中の摩擦係数の変化を考慮した解析が必要であると考えられる。齋木ら¹¹⁾¹²⁾はリング試験中の工具と試験片間の摩擦係数の変化を推定するために摂動逆解法を提案し、リングの変形データと数値解析を用いてステップごとの摩擦係数の探索と推定を行った。

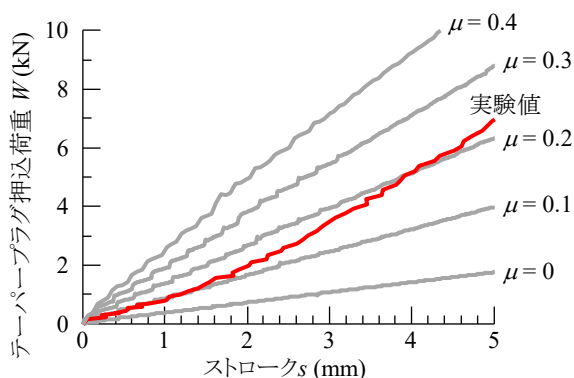


図7. ストローク 5 mm までの実験と FEM 解析での押込荷重線図

図8にテーパプラグと試験片間の摩擦係数を推定するための解析方法を示す。まず、ストローク s_1 までの摩

擦係数を μ_1 と決める。この工程が Step1 とする。 μ_1 の押込荷重線図が実験の押込荷重線図と重なったら、Step1 の解析結果を次の工程に引き継がせる。そうでなければ、摩擦係数を変えて Step1 を解析させる。次に、Step2 では、ストローク s_1 から s_2 までのテーパプラグと試験片間の摩擦係数を μ_2 とする。その後、同様の手法をとる。これら繰り返し計算を用いて、外周を拘束しないテーパプラグ通し試験でのテーパプラグと試験片間の摩擦係数を推定する。

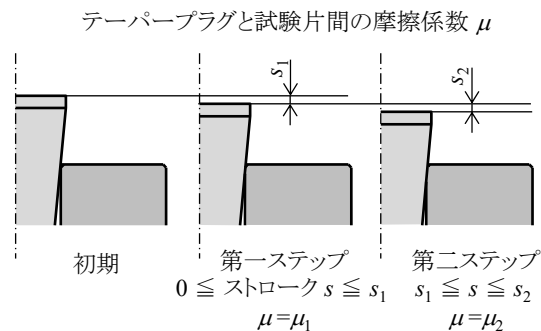


図8. 摩擦係数推定のための解析方法

図9に各 Step の押込荷重線図を示す。Step2 での立ち上がり時の押込荷重は、 $\mu_2 > \mu_1$ の時、Step1 の最大荷重より大きい。そこで、各 Step での押込荷重線図は差分法を用いて書き直す。

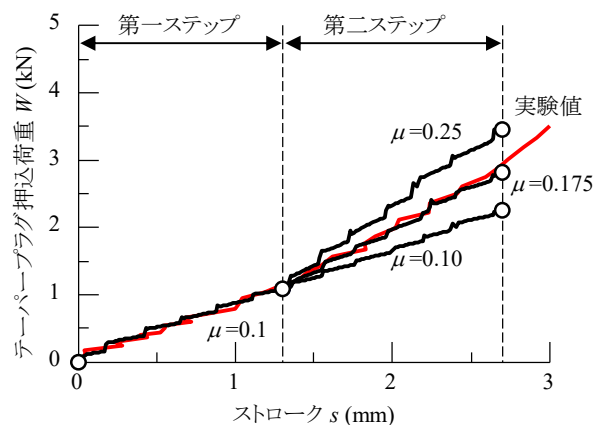


図9. 各 Step の押込荷重線図

図10に、Step2での FEM と実験の押込荷重線図を示す。Step1 では、実験の荷重線図が $\mu=0.1$ の押込荷重線図と一致する。Step2 では、 μ の値が 0.175 の時、解析の押込荷重線図は実験の押込荷重線図と重なる。一方で、 μ の値を 0.1 または 0.25 の時、解析の押込荷重線図は実験の押込荷重線図と重ならない。そのため、Step2 での実際の応力やひずみの分布は、 $\mu=0.175$ の解析結果と類似すると考える。

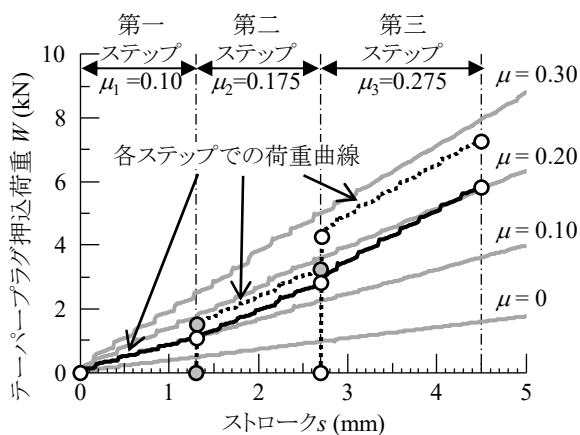
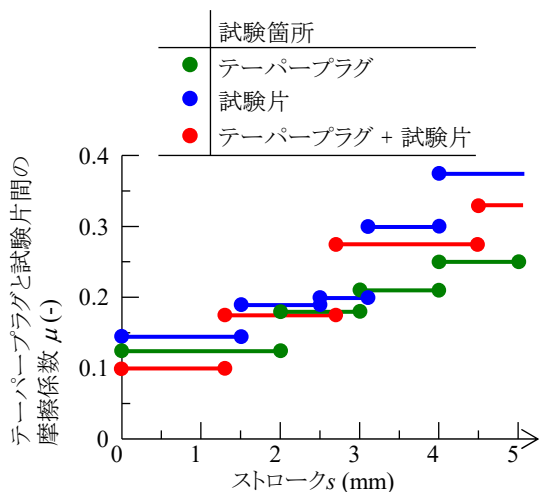
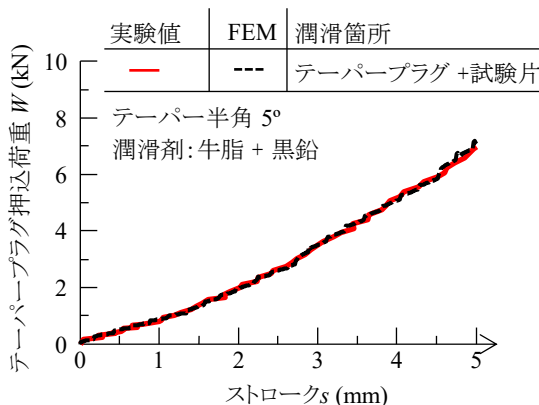


図 10. Step2 での FEM と実験の押込荷重線図

図 11 に逆解析による摩擦係数の推定結果を示す。図 11 (a)に逆解析より選定された摩擦係数を示す。図 11 (b)は、テーパプラグと試験片に潤滑剤を塗布した条件で、その摩擦係数を用いたテーパプラグ押込荷重線図を示す。ストロークの増加に伴い摩擦係数は増加する。図 6 より試験片内面に大きな傷が見られないことから潤滑膜が薄くなり摩擦係数が増加した。



(a) ストローク 5 mm までの摩擦係数



(b) テーパープラグと試験片に潤滑剤を塗布した時の実験と FEM 解析での押込荷重線図

図 11. 逆解析による摩擦係数の推定

5. 緒言

鍛造用トライボ評価試験法である外周を拘束しないテーパプラグ通し試験でのテーパプラグと試験片間の摩擦係数を推定した。以下に結果を示す。

- 1) テーパープラグと試験片間の摩擦は、試験中の押込荷重線図や試験片形状に影響した。
- 2) テーパープラグと試験片間の摩擦係数は、実験と FEM 解析を用いて推定可能であった。
- 3) FEM 解析と実験を併用した逆解析は微妙な摩擦係数の変化を決めるのに役立つ。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団 2019 年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2019039-C2 の支援を受けて行われ、本研究での結果は、The 19th International Conference on Metal Forming 2022 にて発表しました。同財団に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) Male. A. T and Cockcroft. M. G: Journal of the Institute of Metals vol 93, (1964), pp 38-46.
- 2) M. Kunogi: Report of Science Research Institute (Tokyo) 30-2, (1954), pp 63- 92.
- 3) Kudo: Proceedings of the 5th Japan national congress for application mechanics, (1955), pp 75-78.
- 4) Z. G. Wang, S. Komiyama, Y. Yoshikawa, T. Suzuki, and K. Osakada: CIRP Annals (Manufacturing Technology 64),(2015), pp 285-288.
- 5) Dubois. A, Lazzarotto. L, Dubar. L and Oudin. J: Wear vol 249, (2002), pp 951-961.
- 6) Groche. P, Stahlmann. J and Müller. C: Tribology International vol 66, (2018), pp 345-351.
- 7) Zhang. Q, Felder. E and Bruschi. S: Journal of Materials Processing Technology vol 209, (2009), pp 5720-5729.
- 8) Isogawa. S, Kimura. A and Tozawa. Y: CIRP Annals vol 41, (1992), pp 263-266.
- 9) Y. Sagisaka, I. Ishibashi, T. Nakamura, M. Sekizawa, Y. Sumioka and M. Kawano: Journal of Materials Processing Technology 212, (2012), pp 1869-1874.
- 10) K. Asai and K. Kitamura: Key Engineering Materials vol.716, (2016), pp 147-156.
- 11) H. SAIKI, Y. G. MENG, and H. SAKAMOTO: Advanced Technology of Plasticity Vol.1, (1990), pp 77-82.
- 12) H. Saiki and Y. G. Meng: Advanced Technology of Plasticity, (1989), pp 73-76.