

熱間加工を模擬したトライボ性能評価の研究

—熱間鍛造の摩擦係数に及ぼす潤滑因子の影響—

名古屋工業大学大学院 つくり領域

教授 北村 憲彦

(平成27年度 一般研究開発助成 AF-2015017)

キーワード：熱間加工，鍛造，炭素鋼，潤滑，摩擦，材料流動制御，摩擦係数，CAE，型寿命，

1. 研究の目的と背景

国内の鋼における鍛工品の年間生産重量では，熱間鍛造品が90%以上を占め，型鍛造品における自動車用部品は約60-70%を占める．自動車や航空機などの大型複雑形状部品にチタンや鋼，高強度アルミニウム合金の熱間鍛造が必要不可欠な技術である．自動車や航空機などの部品の熱間加工やホットプレスでは低コスト，環境負荷低減，省資源・省エネルギー，廃棄物低減が要求されている．

耐熱鋼や高強度の鋼などの難加工材の熱間鍛造，あるいは高張力鋼板のホットプレスでは，800℃～1200℃に材料を加熱して加工する．このような高温の材料と型が接触するため，型割れやヒートチェック，塑性変形，摩耗などの型の表面の損傷が激しく，型寿命を低下させている．そのため，工程設計の見直しや最適な型材，型表面処理，高性能な潤滑剤の開発が進められている．

そこで高性能な型材，表面処理や潤滑剤を開発するためには，潤滑メカニズムの解明，評価試験法の開発が必要となる．しかし熱間鍛造のトライボロジー（摩擦と潤滑の科学技術）現象は複雑で，体系的な研究が他の塑性加工のトライボロジーの分野でも特に遅れている．現場のニーズは強い割には，世界的にもこの分野の研究者は意外にも少ない．

以上のことから，当初の研究目的を次の3項目とした：

- 1) 高張力鋼板のホットプレスと鋼の熱間鍛造のための工具や潤滑剤のトライボロジー性能を実用的に評価する試験方法を構築し，熱間鍛造やホットプレスの型寿命向上を支援する．
- 2) 熱間鍛造やホットプレスにおける過酷なトライボロジー条件を幅広く変更し，できれば繰り返し試験が可能な方法を開発する．このような現実的な試験条件を再現し，現場で未整理な技術情報を整理し，有効な対策を現場に提供する．
- 3) 実用的な条件を実験室レベルで自由に変更できる試験方法を提供することにより，実作業に迷惑をかけることなく，熱間成形の潤滑メカニズムの解明を目指す．

繰り返し試験を想定して，2016年度に豊田中央研究所から山田ドビーの20トン小型プレスを寄贈いただき，予備試験の準備中に，ロッドとクラッチ部品が根元から破損し，古い機種のため修理が難しく，あらためて現在の安全基準に照らすと使用は控えるべきであると修理業者からの連絡もあり，学内の安全管理室からこのプレスを廃棄するように指示され，これを廃棄することにした．繰り返し試験に必要な機材が揃わないことになった．

この間に，現実の熱間鍛造の型と材料との接触条件を調査し，摩擦条件の範囲を絞り込んだ．また，繰り返し

試験をする前に，1回の熱間成形での摩擦係数の測定（推定）されることも当然のごとく重要で，今後繰り返しが可能な試験方式を前提に1回の熱間加工での摩擦計測も必要と考え直した．

そこで，現実の熱間鍛造における摩擦接触条件をカバーする範囲を調査し，その条件が再現できる試験法を使って，摩擦係数に及ぼすトライボロジー因子の影響を整理することを目標とする．

2. 研究の計画

<2015年度> 自動車部品の熱間鍛造を例に，型と材料との滑り距離，接触圧力，温度などの解析結果などを調査

<2016年度> 熱間テーパプラグ通し試験を改良および低すべり速度域用に熱間回転摩擦試験に改造

<2017年度> 熱間テーパプラグ通し試験で摩擦係数を推定できるようにFEM解析と実験の併用．それらの摩擦係数に対するトライボロジー因子の影響程度調査

3. 熱間鍛造の摩擦条件の調査結果（代表例）

図1に自動車用大型ギアブランクの熱間鍛造品について面圧と接触部の温度を調べた結果を示す．これらの解

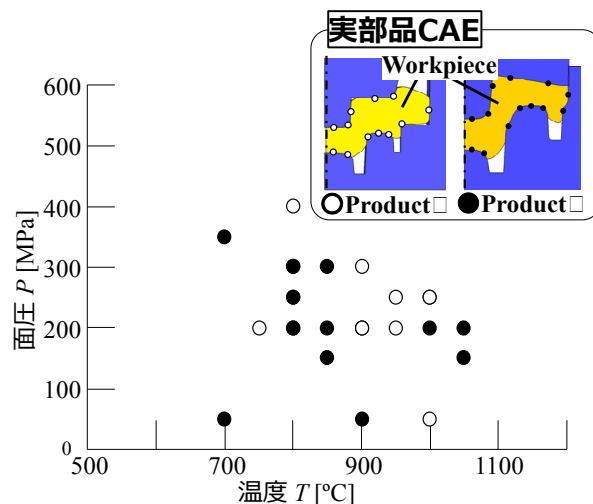


図1 熱間鍛造の面圧と接触温度の推定（FEM結果）
析結果を参考に以下のように摩擦条件の範囲を設定した．

ピレットの加熱温度は1200℃を越えないように設定する．滑り摩擦，型との接触時間，材料内部から表面への伝熱，潤滑による熱伝達や断熱などの影響を考慮したFEM解析を利用して，界面のトライボロジー因子を定量的に推定したところ，接触界面温度は，700℃～1150℃，面圧は50～400 MPa，滑り距離はほぼ0～20 mm，滑り速

度は0~400 mm/s, 表面積拡大比は1~4倍程度であることを把握した。

これらの条件を満足する試験法として, テーパープラグ通し試験¹⁾と回転摩擦試験²⁾をベースにして改良することにした。その結果, 図2に示すように, それらの試験が相互に試験範囲を補って, 実機の熱間鍛造の摩擦界面での条件をカバーできるようにした。

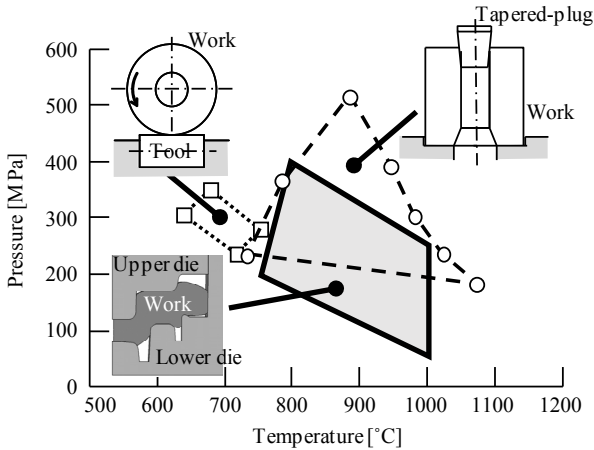


図2 改良したテーパープラグ通し試験と回転摩擦試験機の試験範囲

4. テーパープラグ通し試験

従来から潤滑試験に活用しているテーパープラグ通し試験¹⁾では, 外周を拘束して圧力を高めるようにしていた。しかし熱間では高温の試験片がコンテナによって冷やされるため試験片の温度が保持されない。また摩擦力をテーパープラグ通し荷重から算定しようとすると, 試験片とコンテナとの間に生じる摩擦力のために未知数が増えて摩擦係数の推定ができなかった。

そこで, テーパープラグと試験片との間の摩擦だけが荷重に反映されるように外周を自由にした。図3に示すような, 同じ内径で異なる厚み (あるいは異なる外径) の試験片を用いて予備試験した。

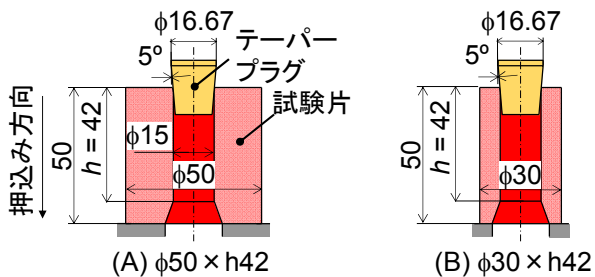


図3 テーパープラグ通しにおける二種類の試験片

壁の薄い試験片ではテーパープラグと材料との間の圧力増加が少なく, 壁が厚い場合には圧力も高く, 潤滑膜もダメージを受け, ストロークが進むにつれて荷重が急増している。

この結果から実際の熱間鍛造の圧力の調査結果なども考慮して, 図3(A)のような厚い試験片を用いることにした。この試験後にテーパープラグを観察すると, 図5

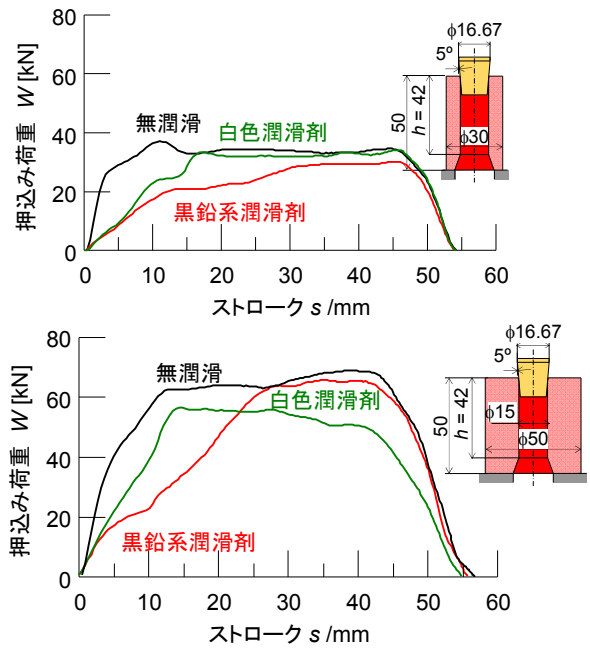


図4 厚みの異なる試験片を用いた場合の荷重変化

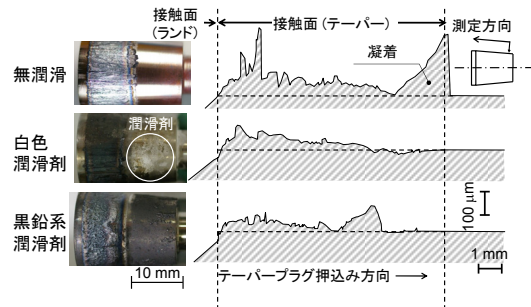
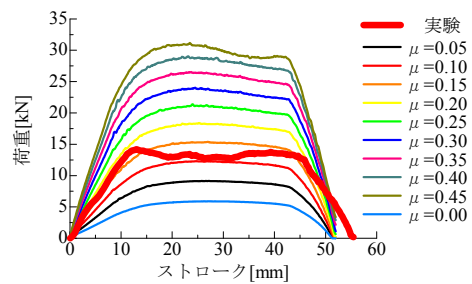


図5 厚肉試験片で試験した後のテーパープラグ表面



検定曲線を線形補間し, μ を算出

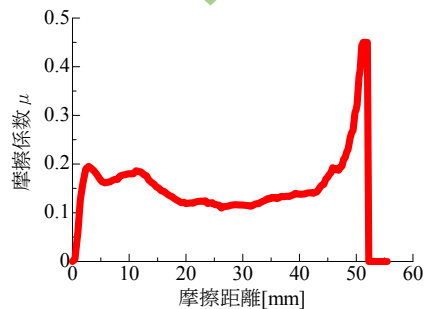


図6 熱間テーパープラグ通し試験での摩擦係数の算定

に示すように潤滑剤の効果も分かりやすいだけでなく、無潤滑では厳しい凝着も生じることから、この試験条件は熱間の潤滑にとって十分に厳しいと推察される。

次にこのテーパプラグ通し試験におけるFEM解析の結果、荷重と摩擦係数との関係を図6上で用いて求める。このノモグラフは一例である。外周が自由であるがゆえにテーパプラグと材料との間の摩擦係数が荷重に強く反映されている。この図の例では、太い線が実験値で、0.10~0.15の間にある。この間を線形で補完して図7のようにストロークに対する摩擦係数の変化を捉えた。この試験法も使って、潤滑膜の厚みなどを変更して摩擦に影響するトライボロジー因子を探した。

5. 熱間回転摩擦試験

図7に熱間回転摩擦試験²⁾を示す。この図では高周波誘導加熱で厚肉円板試験片が830℃になっている。回転する円板の側面を固定した円筒工具に擦りながら押し付ける。工具の下に六分力計を配置し、接触荷重 F_z と摩擦による接線力 F_x を測定し、摩擦係数 $\mu = F_x/F_z$ を算出した。

工具の材質はSKH51と窒化処理した工具(SKH51+Nitriding)、回転する厚肉円板はS45C, SCr20, SCM420である。高周波加熱装置を用いて約830℃に加熱する。潤滑剤は、水溶性の非黒鉛系潤滑剤を用いて、試験前に予め工具を200℃に加熱し塗布する。

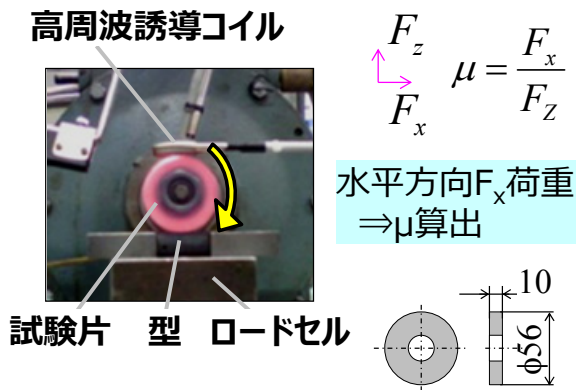


図7 熱間回転摩擦試験と摩擦係数の算出

変速機によって低速から高速の滑りを再現する。特にテーパプラグ通し試験より遅い速度領域をこの試験で補うため回転速度は、10 mm/s, 100 mm/s, 200 mm/sとした。

6. 摩擦係数に及ぼすトライボ因子の影響

試験機をそれぞれ熱間に対応できるように改良し、また摩擦係数が推定できるようにシミュレーションも併用した。表1に示すような範囲で、試験条件を変更してデータを収集した。

対象としたトライボロジー因子は、素材の材料、型表面処理、型の表面粗さ、潤滑膜厚、摩擦速度、試験温度、面圧で、現場の鍛造を想定した範囲で変更している。これらのうち、影響が明確に表れたのは、試験温度、摩擦速度、および潤滑膜厚であった。これらの3項目について代表的なデータを以下に示す。

(a) 摩擦面温度の影響

摩擦面温度については、接触面の温度を決めるのは難しい。そこで数値解析の結果を参考に、試験片側の最表面の要素の温度を、接触面に沿って平均した温度とした。

表1 テーパープラグ通し試験と回転摩擦試験の条件

Rotational frictional test	
Work	: S45C, SCr20, SCM420 (φ56×10)
Tool	: SKH51, SKH51+Nitriding
Temperature	: 830°C (Radiation thermometer)
Lubricant condition	: Non-graphite lubricant
Rotational velocity	: 10 mm/s, 100 mm/s, 200 mm/s
Tapered-plug penetration test	
Work	: S45C
	(50×φ15×φ50, 50×φ15×φ30, 50×φ15×φ25)
Tool	: SKH51, SKH51+Nitriding
Temperature	: 750°C, 1100°C (電気炉の設定温度)
Lubricant condition	: Non-graphite lubricant
Rotational velocity	: 400 mm/s

結果的にはほぼ試験直前の試験片の温度と同じとなった。白色潤滑では試験片温度900℃までは摩擦係数は0.12~0.17である。無潤滑では摩擦面温度によらず0.3近い摩擦係数を示すので、白色潤滑は無潤滑よりは明らかに摩擦低減効果があると言える。900℃以降は温度上昇とともに摩擦係数が高くなっている。これは、試験片の最表面温度がこのくらい以上の場合には、潤滑剤のダメージが進むことを意味している。

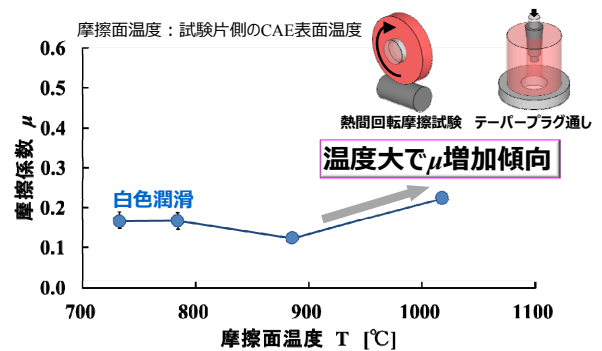


図8 摩擦面温度と摩擦係数 μ との関係

(b) 摩擦速度の影響

それぞれの試験での摩擦速度ごとの摩擦係数を図9に載せる。無潤滑の場合も白色潤滑剤を塗布した場合も摩擦速度が高いほど摩擦係数が低くなっている。高温の試験片は低温の型との接触によって、最表面の温度は低下し、変形抵抗も大きくなる。

今回の試験は錘による垂直応力や試験片の形状で決まる内圧のため、垂直圧力は速度によってあまり変形していない。一方で摩擦せん断応力が、凝着や焼付きを伴う無潤滑では、試験片のせん断変形抵抗が低いほど、摩擦係数が低くなることになる。これをベースにすると、潤滑剤を塗布した場合には、無潤滑より試験片は断熱され材料温度は低下しにくいと考えられる。

また、摩擦速度が速いほど接触時間は短い。このことが無潤滑での凝着を減らし、潤滑剤のダメージも減らしたことも推察される。これは、実鍛造でも熱間加工には、下死点近傍で速度の遅いクランクプレスより、接触時間を短縮できるスクリュウプレスが好まれることとも対応している。

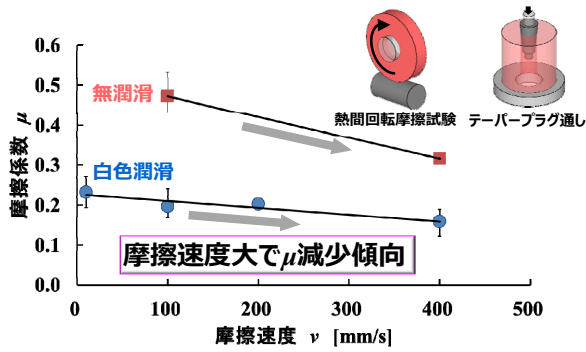


図9 摩擦速度と摩擦係数の関係

(c) 潤滑膜厚さの影響

予備的に行ったテーパプラグ通し試験における荷重ストローク線図を図10に載せる. 潤滑膜の厚みは $t = 5, 16, 67 \mu\text{m}$ であり, 無潤滑 ($t = 0$) は参考値である.

ストロークが 10 mm くらいまでの押込み始めでは, 無潤滑より薄い潤滑膜の摩擦低減効果がある. このストロークでは潤滑膜厚に関わらず, 安定した荷重を示す. それらの荷重は $16 \mu\text{m}$ で最も低い. 潤滑膜への伝熱とそれに伴う潤滑剤の質の変化が生じていると思われる.

ストロークが 20 mm まで進むと, 潤滑膜厚さ $t = 16 \mu\text{m}$ では $\mu = 0.1$ と低くなる. これは一般的に熱間鍛造で高性能な黒鉛系潤滑剤と同等の高い摩擦低減性能といえる.

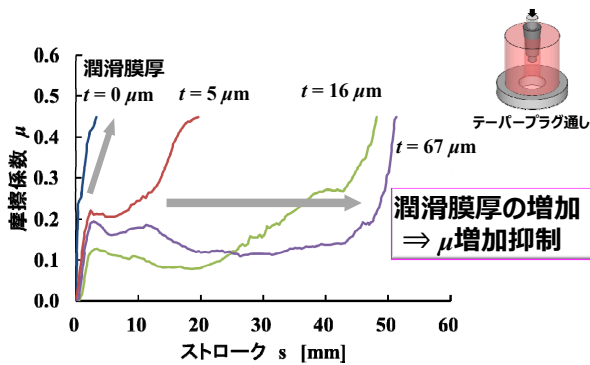


図10 テーパプラグ通し荷重-ストローク線図例

さらにストロークが 30 mm 以降では, $t = 16 \mu\text{m}$ の摩擦は増加し, 安定している $t = 67 \mu\text{m}$ の摩擦係数より高くなる. 潤滑膜が薄いほど, 短い摩擦距離で摩擦係数が増加し始める. 潤滑膜の短い段階で潤滑膜の破断が起りやすいと推定される.

そこで, ストローク 3~10 mm における摩擦係数の違いが顕著で, 安定しているので, この間の平均摩擦係数

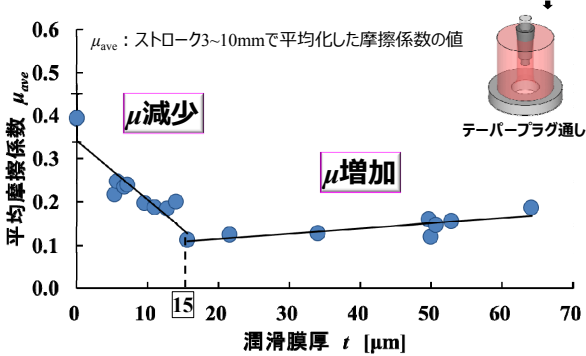


図11 潤滑膜厚さと摩擦係数

そこで, ストローク 3~10 mm における摩擦係数の違いが顕著で, 比較的安定しているので, この間の平均摩擦係数を, 潤滑膜厚さごとに図11に示す. 白色潤滑剤で今回の摩擦条件では潤滑膜厚さが約 $20 \mu\text{m}$ 付近において摩擦係数が最小になっている. これ以下では激しい焼付きも生じており, 摩擦低減には不十分な量である. これ以上の潤滑膜厚さでは, 少し摩擦が増加する傾向にある.

以上のことから, 摩擦条件と潤滑剤の特性によって, それらに応じた摩擦係数を最小にするような最適な潤滑膜厚みが求められることを示唆している.

(d) 重回帰分析

代表的な摩擦因子の摩擦係数に対する影響を(a)~(c)に示した. これら以外の影響因子なども調べ, それらを重回帰分析した. ここでは, 因子としては素材材料, 型表面処理, 型表面粗さ, 工具ツールマーク方向, 潤滑膜厚さ, 摩擦速度, 温度, 面圧の影響を試験した. その結果, 摩擦係数に影響する因子を図12に示す. さらに標準偏回帰係数絶対値 0.5 以上となり影響が強いのは, 潤滑膜厚さ, 摩擦速度, 摩擦面付近の温度となった.

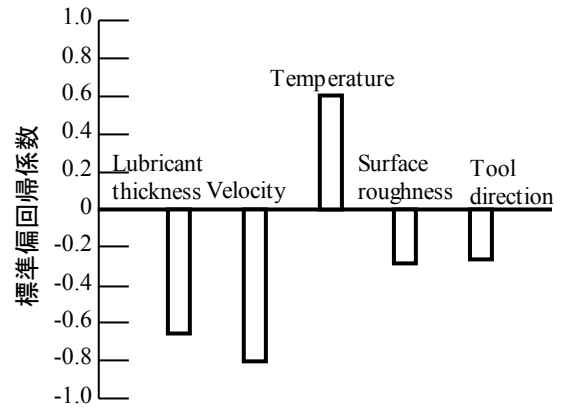


図12 摩擦係数に影響するトライボロジー因子

まとめ

外周自由のテーパプラグ通し試験については摩擦係数が測れるように改良した. また冷間回転摩擦試験機に加熱装置を付け加えて, 熱間回転摩擦試験ができるように準備した. それらの試験においては, 素材材料, 型表面処理, 型表面粗さ, 工具ツールマーク方向, 潤滑膜厚さ, 摩擦速度, 温度, 面圧のトライボロジー因子を変更しながら, それらの摩擦係数への影響を重回帰分析にて整理した. 以下に主な結果をまとめる.

- 1) 熱間鍛造の工具と材料との間の摩擦係数には, 潤滑膜厚, 摩擦速度, 温度が最も影響が強い.
- 2) 潤滑膜厚については, 潤滑剤の特性や摩擦条件に応じて摩擦係数が最小となる最適な摩擦係数があることを例示した.

本試験の主な結果は, 平成30年度塑性加工春季講演会 No. 612, pp. 255- 256にて発表した. また, 次回の第69回連合講演会でも関連内容を発表する予定である. 以上の一連の研究においては, 天田財団の研究助成が大きく貢献していることを記して, 謝意を表す.

参考文献

- 1) Kazuhito Asai et al., Key Engineering Material, 716 (2016), 147-156.
- 2) 浅井ら, 平成24年春塑講論(2012), 331-332.