



K. Kitamura

厳しい条件の塑性加工における潤滑技術開発

北村 憲彦*

1. まえがき

塑性加工は、信頼性の高い素形材や強度部品を経済的に量産できる加工方法である。製品の寸法精度も、冷間成形では後工程の切削仕上げが不要な公差範囲に収まり、ネットシェイ化が進んでいる。熱間成形では材料歩留まり向上だけでなく、後工程の切削代削減も追求され、こちらではニアネットシェイ化が目標とされている。

ところが自動車の軽量化が必要な時代になり、従来よりも高強度な材料の使用、さらに小型で角丸味半径の小さな形状の成形品が採用されるようになってきた。これらの製品についても、従来品と同じような高い精度と型寿命を保証し、コスト増も抑制することは難しい課題である。

さらに最近では、生産工程における環境負荷低減に向けた動きも活発である。その一環として、省エネルギー、省資源、廃棄物削減に関連する技術の開発と普及が急速に進んでいる。この傾向に潤滑技術も無縁ではなく、高性能化と環境負荷低減の両立に向けた開発がグローバルに求められる時代になってきた。

その上軽量化のためには、変形しにくい強い材料が採用されるので、まず熱間鍛造で荒加工した後、冷間鍛造やしごき加工で仕上げることも増えている。そのせいか、熱間鍛造加工や冷間しごき加工の潤滑は、企業の規模にかかわらず、多くの加工技術者にとって関心のある課題である。これらの加工では、圧延や引抜きに比べて、安定な潤滑状態を作りにくい。しかも現象は複雑であり、局所的なこともあり、現象の理解も他の塑性加工に比べても不明なことが多い。これらを天田財団の助成テーマ2006年度¹⁾（冷間しごき潤滑に関連）および2015年度²⁾（熱間鍛造潤滑に関連）としても取り組んだ。本稿では、それらの内容に沿って、それぞれの取組を紹介する。

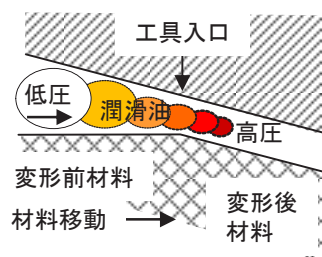
2. 冷間しごき加工用の潤滑油開発^{1), 8)~11)}

2.1 冷間成形の潤滑基礎

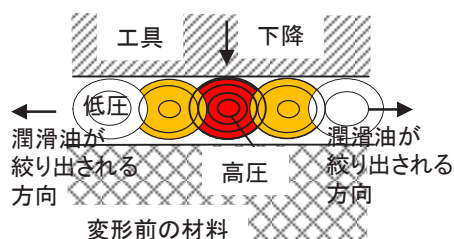
材料の降伏応力 Y に対して、しごき加工の型面圧は $3Y$ 、鍛造加工では $5Y$ に達することは特別なことではない。このような高い面圧に対しても、その負荷を潤滑膜が支えるおかげで工具と材料は直接接触することなく、滑ることができる。もし圧力が局部的に上がり、あるいは潤滑剤の量が不足すれば、潤滑膜は破断し、型と材料は直接接触する。

型コーティングがなければ、少量生産数でも材料が型に移着し（焼付き）、材料や型に深い擦過傷（かじり）が生じやすい。

良好な潤滑の際には型と材料との間に油膜が形成される。そのメカニズムは図1(a) くさび効果、図1(b) スクイーズ効果と呼ばれている。流体力学と塑性力学との連立した理論によって、これらの原理³⁾が説明されている。



(a) くさび効果：材料や型に付着した油が狭い隙間にくさびを打ち込むように押し込まれ、油の圧力は材料の降伏応力並みに上昇し、潤滑膜が形成される。



(b) スクイーズ効果：工具が材料に接近してくる時、その隙間に残っている油が圧縮され、その内圧は材料の降伏応力並みに増加し、潤滑膜が形成される。

図1 流体潤滑機構の模式図

実生産の塑性加工では、面圧も高く、滑り距離も長いいため、摩擦発熱も大きい。変形の大きな鍛造では、成形中の塑性変形発熱も潤滑面を経て型へ伝わっていく。潤滑膜の温度が上がれば、潤滑油粘度は下がり、油膜は薄くなり、破断しやすくなる。

これらの温度上昇は潤滑に不利な条件とも単純には言えない。たとえば、潤滑油に含まれる極圧添加剤（圧力が高くて反応するというより、温度が上がって化学反応す

*名古屋工業大学 つくり領域 教授

る)は活性になって、材料の表面との間で反応生成物を形成する。その反応生成物やその表面への吸着物は、耐圧性・耐焼付き性に優れ、低摩擦を実現することも知られている。

また、300℃までならセッケンは溶融して、低粘度油なみの低摩擦が得られる。冷間鍛造では材料表面の化成被膜、たとえばリン酸塩の上層に反応セッケンと未反応セッケンが付着し、高い潤滑性能を発揮している。最近では環境問題から、これに代わる非化成処理型潤滑被膜^{4)~6)}も次々に開発され、それらの普及が進んでいる。これらを含めた最近の冷間鍛造用潤滑剤の技術動向⁷⁾について分かりやすく解説されている。

二次成形では、切削仕上げを省略して、成形後そのまま製品になることも増えている。そのため製品の精度と表面性状の向上を狙って、冷間しごき加工で仕上げることも多い。仕上げの段階であるゆえに深い擦過傷を防ぐために潤滑油も使われる。この場合にも、同じように高性能で環境に配慮した潤滑剤が求められている。

2.2 ステンレス鋼の実機冷間しごき加工での潤滑性能

しごき加工では、くさび効果(図1)が潤滑原理である。しかし最終段階であるから、できるだけ潤滑油は少なくして、成形品の表面を滑らかに仕上げたい。それまでの塑性変形が加わって、加工硬化が進んでおり、材料は硬くなっている。変形発熱と摩擦発熱で材料の温度も上がっている。

もし材料がステンレス鋼であれば、著しい加工硬化によって材料の降伏応力が高くなるので、工具面圧も相当に高くなる。ステンレス鋼の熱伝導度はアルミニウム合金や鉄鋼材よりも低いため、材料の温度も高いままである。

さらにステンレス鋼は、表面に生成しているクロムの酸化膜によって錆びにくい特性を持つ。そのため、油の添加剤はステンレス鋼と化学反応しにくいので、十分な反応被膜をステンレス鋼の表面に形成することは容易ではないとされている。従来はステンレス鋼の成形には塩素系添加剤が用いられてきた。しかし塩素系添加剤は環境負荷が高いため、代替の高性能添加剤が必要とされている。

図2は2005年頃に市販あるいは試作されていた潤滑各社の実機しごき加工によるベンチマーク結果⁸⁾である。

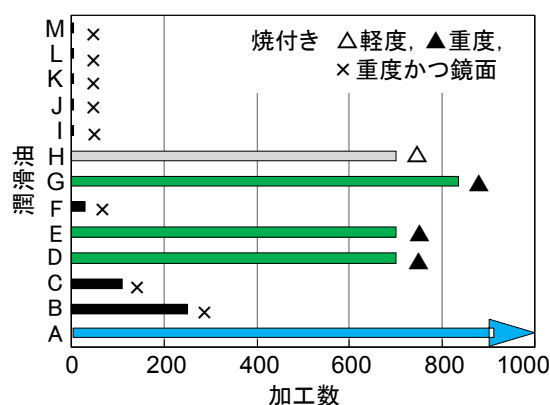


図2 ステンレス鋼深絞り・しごき加工の実機試験

表1に供試油の粘度と主な含有元素を示す。この時の成形は複数段の深絞り・しごき加工で、材料は加工硬化し、475 HVとなっている。材料の表面の粗さも1 $\mu\text{m Rz}$ 以下に低下し、平滑で、潤滑の助けが期待される油溜りの細かい凹部も減っていた。

塩素系潤滑油Aを使うと、1000個連続試験後も製品表面には深い擦過傷は観察されない。潤滑油B~Mは非塩素系の潤滑油で、このうちG, D, E, Hは他より高い性能を示している。しかしこれらも潤滑油Aの性能には及ばない。塩素系潤滑油に代わる高性能な潤滑油が必要とされる当時の実態を示している。その後、硫黄系の添加剤が配合された高性能潤滑油S1が開発されたと聞いて、同様の実機試験を追加したところ1000個焼付きなく成形できた。

そこで、これらの潤滑油を使った実機試験後の材料についてEPMAで表面分析を行った。この時は硫黄Sの反応量に注目した。SのX線強度比と焼付き限界個数の関係を図3に示す。このX線強度比はSの材料への反応量に相当する。焼付きが発生して現場の担当者が許容できない傷が製品

表1 実機試験に供した潤滑油の粘度や成分系など

潤滑油	動粘度(40℃) /mm ² ・s ⁻¹	主な成分系や含有元素
A	186	従来の塩素系油剤(SUS加工用)
B	91	硫黄系油剤+P+Ca+Zn
C	112	硫黄系油剤+P+Ca+Zn
D	130	硫黄系油剤
E	190	活性硫黄系油剤(SUS加工用)
F	194	油性剤+Ca+界面活性剤
G	195	活性硫黄系油剤+有機物
H	198	活性硫黄系油剤+固体潤滑剤
I	198	鉱油+油性剤+有機物
J	200	油脂硫黄系油剤
K	205	硫黄系油剤+Ca
L	207	不活性硫黄極圧剤
M	215	エステル系油性剤

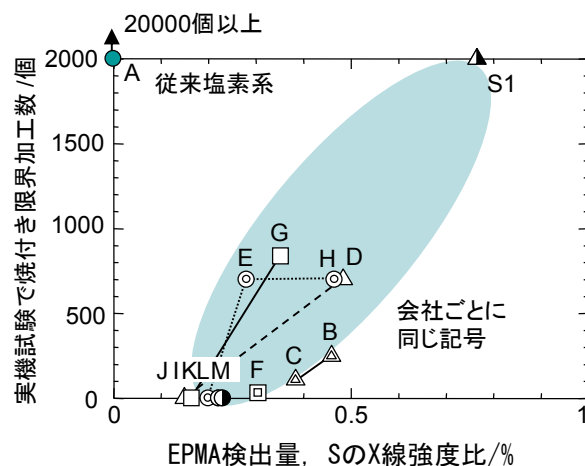


図3 EPMAによる硫黄S分の分析と焼限界個数の関係

表面に出始めた個数を、焼付き限界個数としている。

硫黄SのX線強度比が高いものほど、焼付き限界個数が多い傾向がある。加工中の反応だけでなく、加工後にも反応が進んだ結果も含まれているが、ステンレス鋼に対する、ある加工条件での化学的な反応活性と対応していると考えられる。今回の供試油には多くのSが含まれているため、ここでは優先的にSのX強度比を分析したが、他の添加剤のX強度比については後で示す。

2.3 ステンレス鋼しごき加工を模したラボ試験⁹⁾

実機評価は確実であるが、これを潤滑油の開発初期段階から利用することは、時間と経済の両面から無駄が多すぎる。しかも潤滑油の性能評価の指標も取りにくい。そこでラボ試験できる評価装置を製作した。

図4に製作した内面しごき試験機の概観を示す。油圧とアキュムレータと組合せ、パンチ押込み速度は 30 , 230 mm/s, 荷重容量は約200 kNで、単発試験である。

図5に本試験の原理を示す。ホルダーに入れた試験片内面を鋼球でしごき板厚を減少させる。ホルダー内径は 11.67, 11.81, 11.90 mmとし、直径9.998と10.317 mmの鋼球

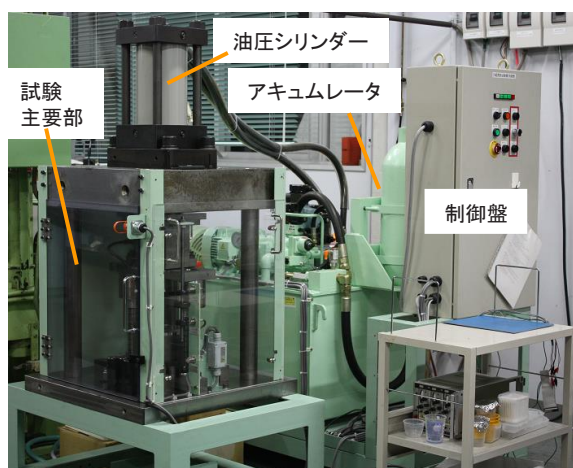


図4 ステンレス管内面しごき試験機

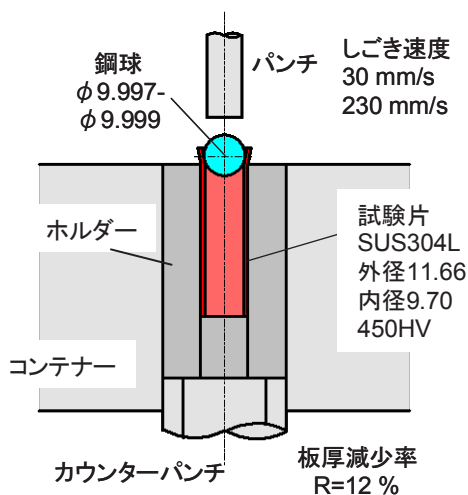


図5 内面しごき試験の原理

と組合せ、しごき率を 12, 16, 21 %とした。鋼球はSUJ2 (焼入れ・焼戻し) で、軸受け用の鋼球である。

試験片は多段深絞り・しごき成形品を利用した。その内面粗さは約3 μm Rz, 外径11.66 mm, 内径9.70 mm, 肉厚差2 μm 以内の精度である。また硬さは約450HVで、軸方向に一様である。

試験片の内面に供試潤滑油を塗付し、外面には牛脂を塗付した。供試潤滑油に粘度の異なるパラフィン系鉱油 VG100, VG200, VG460, 実機試験でも供試したA, G, H, I, K, S1を用いた。ボール押込みストロークに対する荷重を荷重計で測定した。

2.4 内面しごき試験の結果

図6 (a)は、しごき荷重-ストローク線図は30 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ の低速試験の一例である。塩素系Aはストローク初期に荷重が最大で、その後少し減ってから一定か緩やかに減少する。硫黄系KはAより低い荷重を示し、変化の様子はAと同じように緩やかに減少する。無添加の鉱油VG200では、ストローク初期はKと同じくらいの荷重で、ストローク $s > 10$ mmで荷重が25%ほど増加している。いずれの試験片も軽い擦り傷が見られた。

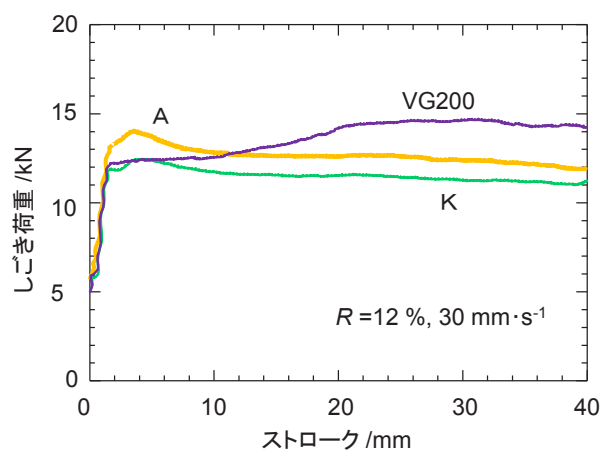


図6 (a) しごき荷重-ストローク 30 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 低速試験

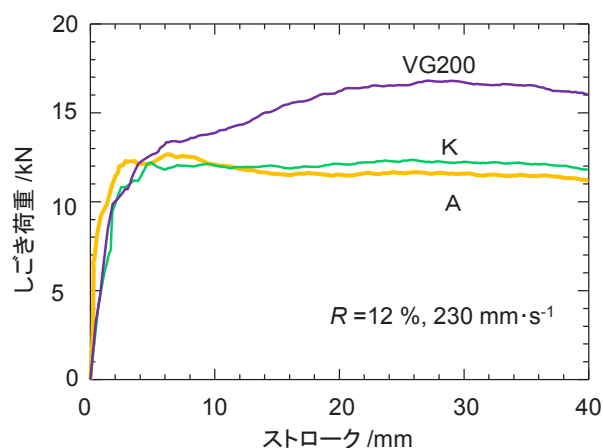


図6 (b) しごき荷重-ストローク 230 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 高速試験

同じ潤滑油について高速 ($230 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) の試験結果を図6 (b) に示す。しごき開始直後約1 mmまでの荷重は、いずれも、低速試験の時より低い。しごき速度の増加に伴い、潤滑油が引き込まれやすくなった (くさび効果) ためと考えられる。

Aの荷重は低速試験の荷重より低く、定常値を示し、試験片には軽く傷が付く程度で、潤滑良好であった。Kでは低速よりも荷重は高く、試験片表面にも深い傷が数本生じた。VG200では、ストロークが増加すると、荷重は増加し、 $s > 15 \text{ mm}$ で重かじりも発生していた。

他の潤滑油における荷重や試験片内面傷の程度を図7に示す。ここでは低速 $v=30$ から高速 $v=230 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ への変化に対する $s=20 \text{ mm}$ での荷重の増減を比較し、併せて試験片内面の傷の程度も分類した。

パラフィン系鉱油で、低速試験では高粘度油ほど荷重は高く、流体の抵抗が荷重に反映したと考えられる。しかし高速試験では、低粘度油の荷重が高く、試験片の表面には重かじりも観察された。重かじりの発生は、低粘度の鉱油ほどストローク初期から始まっている。高速では低粘度ほど油膜が破断しやすいと言える。無添加鉱油以外の潤滑油の荷重は、無添加鉱油より低く、高速でも重かじりは発生していない。

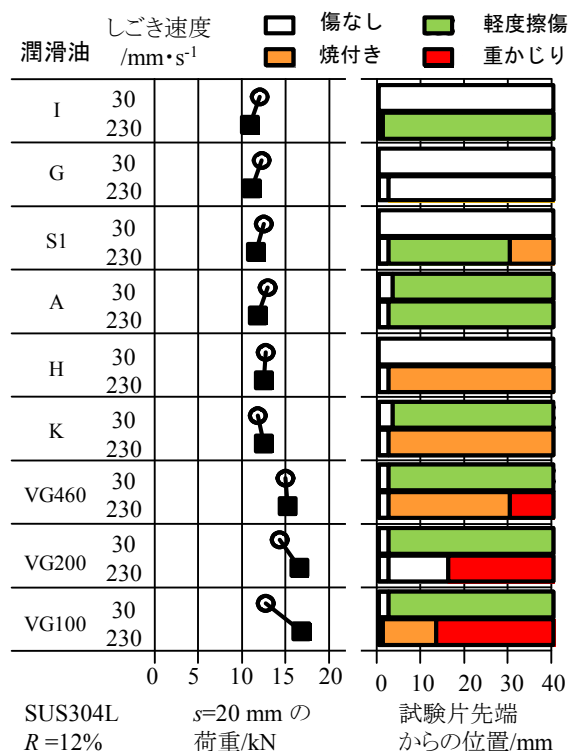


図7 内面しごき試験における荷重と表面損傷程度

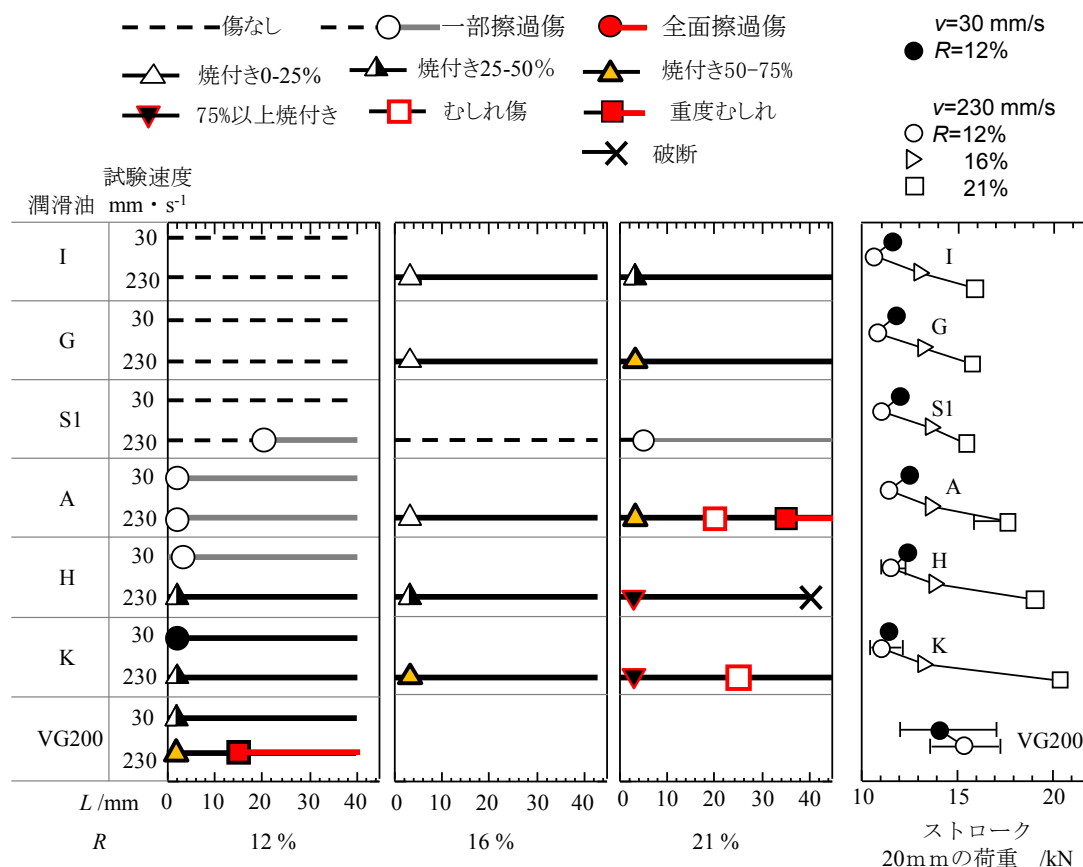


図8 内面しごき試験後の試験片内面の傷の発生位置および周方向に焼付き傷の占める割合

同粘度のVG200の荷重や傷の発生程度と比較しても焼付き防止に対して添加剤の効果が認められる。添加剤を含む潤滑油の間では荷重の差は小さく、いずれも傷の程度は軽い。次にしごき率 R を上げて試験した。

図8に試験片内面の傷の発生位置、および周方向に焼付き傷の占める割合を示す。併せて、ストローク20 mmの荷重も示す。しごき率 $R = 16\%$, 21% では、厳しい高速試験だけ実施した。

$R = 16\%$ の時には、潤滑油H, Kで重度の焼付きが発生し、その面積割合も多い。これらに比べて、 $R = 16\%$ の時にはA, G, Iの焼付き程度は軽い。以上 $R = 16\%$ については、いずれの油の荷重の差は小さい。

さらに $R = 21\%$ に上げると、それぞれの潤滑油で重度の焼付き傷となり、焼付きの占める面積割合も高く、荷重差も大きくなる。焼付きの程度が低く、荷重も低かったのは、S1であり、実機の結果とも対応していた。（ただし、塩素系Aについては、実機ベンチマーク当時は、短鎖の塩素系油を使用。内面しごき試験を考案後には、環境規制から製造中止で入手できず、中鎖の塩素系油を使った。）

2.5 実機試験とラボ試験での添加剤の応性の比較

図9に実機試験と内面しごき試験のEPMA分析結果を示す。今回は酸素、塩素、硫黄、カルシウム、ナトリウムについて分析した。X線強度比はこれらの反応活性を反映している。また酸素は、反応生成物が酸化したことによる。どの元素ごとに比較しても、成形管内面しごき試験での反応量は実機に比べて少なく、検出量の序列は両試験で対応している。

これらのEPMA分析によるX線強度比を単純に合計した値を、実機試験と内面しごき試験後で図10に比べた。実機試験の値が成形管内面しごき試験での値の2倍くらい高いが、両者のX線強度比の相関は強い。これは添加剤の反応の観点からも、両試験の相関関係が良好であることを意味している。（Hでの検出量が多いのは、擦過傷が多く、反応が進んだためと推定している。）

内面しごきは実機の性能とも対応良好であり、第一性能を経済的に判定できると考えられる。今後はこの試験機を潤滑剤の開発に活用したい。

2.6 ステンレス鋼の冷間しごき加工用潤滑油の開発例

内面しごき試験で代表的な硫黄系添加剤の潤滑性能を評価した結果¹⁰⁾を図11に示す。ここで試験後の試験片内面粗さは試験片口元から周方向に測定した。内面粗さは焼付き傷の程度に対応している。しごき率 $R = 16\%$ では、A以外ではあまり深い傷もない。 $R = 21\%$ では、焼付きも発生し、長く擦った位置では傷が深くなっている。これらのうち、D（硫化油脂）では焼付きも軽かった。ステンレス鋼用の非塩素系油の開発にとって、これは有用な結果である。

そこで、硫黄系添加剤の効果を安定して出すために、他の添加剤と複合して、潤滑性能を調べることにした。ここでは三元系添加油の内面しごき試験の結果¹⁰⁾を一例として図12に示す。しごき率 $R = 16\%$, 21% で試験した。図中

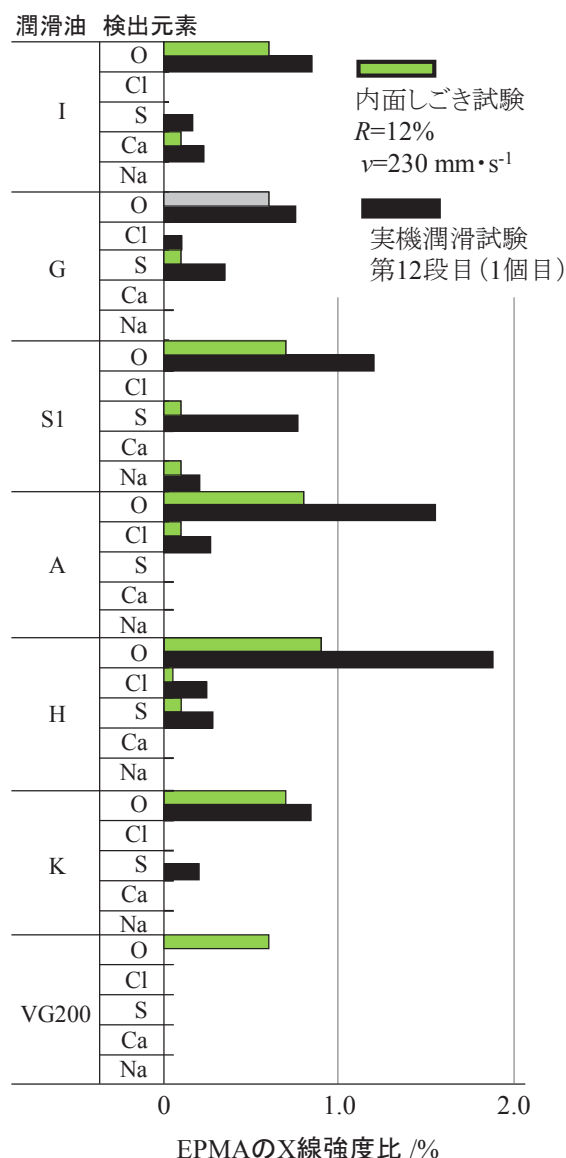


図9 内面しごき後の試験片表面のEPMA分析

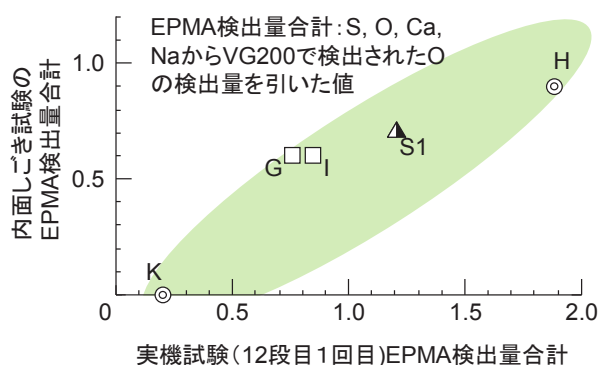


図10 実機試験と内面しごき試験後のEPMA検出量

の数字はストローク20 mmのしごき荷重で、これが低くければ、型と材料間の摩擦抵抗が小さいと言える。また焼付きの程度は3ランクに分けて、○と△は軽度な傷であった。

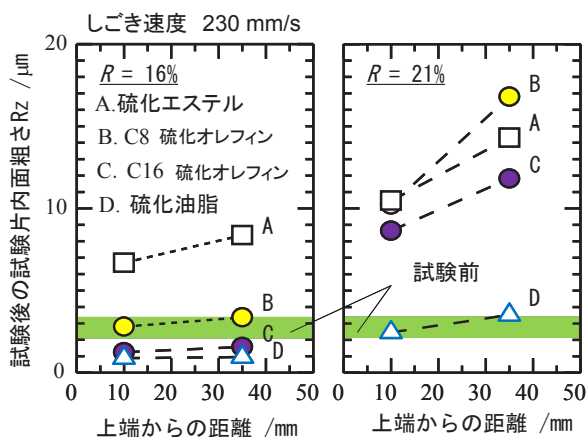


図11 代表的な硫黄系添加剤の内面しごき試験結果¹⁰⁾

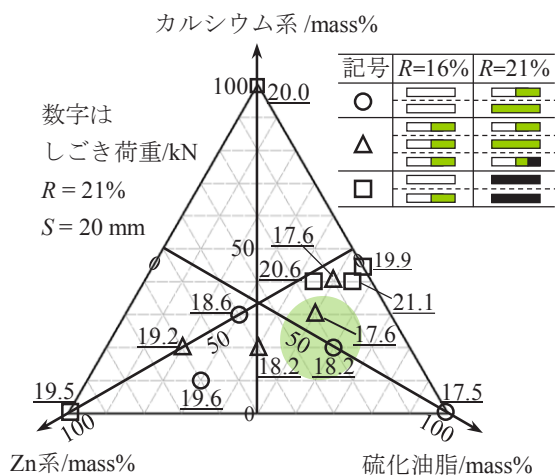


図12 三元系添加剤の内面しごき試験¹⁰⁾

以上の結果から適切な複合系添加剤と配合比を検討し、内面しごき試験を重ね、いくつかの試作油を調合した。図13に市販の塩素系油と非塩素系試作油を実機試験した結果を載せる。非塩素系試作油T1は、現用の塩素系油C1と同様に1万個試験後も傷もなく、良好に加工可能であった。

試験直後のワーク表面温度は40℃～60℃の範囲で安定していた。これは潤滑状態の安定を示唆する。図14に1個目の加工品と1万個目の加工品の表面を示す。非塩素系油によってステンレス鋼が良好にしごき加工できていることが確認された。

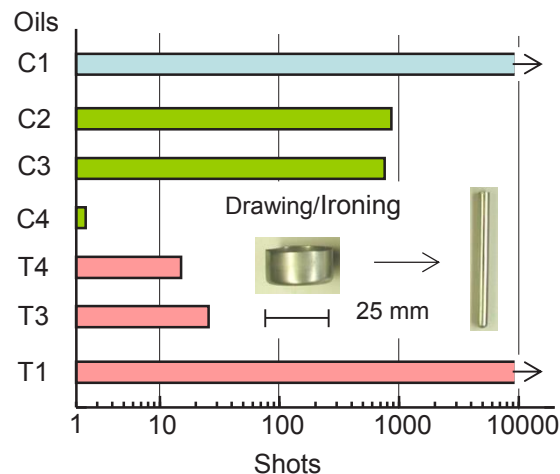


図13 実機試験で傷なしで良好に生産できた個数¹¹⁾

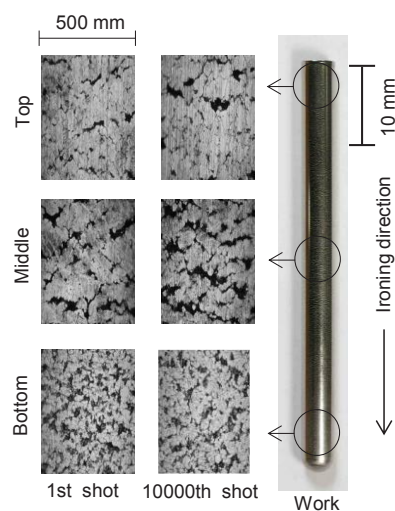


図14 実機しごき加工の1個目と1万個めの製品表面¹¹⁾

2.7 冷間しごき加工用潤滑開発 まとめ

実生産の課題をベンチマークし、非塩素系潤滑油の開発に必要なラボ試験を考案した。これを活用して潤滑油の開発を進めた。その結果、実用的なレベルで良好な潤滑性能を発揮する非塩素系潤滑油が開発できた。

3. 熱間鍛造の潤滑^{2), 18)}

3.1 熱間鍛造における潤滑の課題

日本国内で鍛工品の年間生産重量における鋼の熱間鍛造品は90%以上を占める。これらの部品の大半が複雑形状、高強度材、あるいは大型部品である。熱間鍛造では、材料を加熱して材料の変形抵抗を下げ、延性も上げ効率良く大量生産できるからである。

しかし材料の加熱には大量の熱エネルギーが必要となる。材料の使用効率も低い。酸化スケールも多い。材料歩留りも低い。製品にならない余肉も加熱され、エネルギーを消費

する。省資源だけでなく、省エネルギーの点でも課題が多い。高温の材料に接触する型も、その熱で軟化や割れが生じやすいため、型寿命も冷間鍛造に比べると桁違いに短い。このように熱間鍛造では、材料歩留まりと型寿命が大きな課題である。

日本塑性加工学会でも熱間鍛造の型寿命向上は、幾度も取り上げられてきたテーマである。例えば、第209回塑性加工シンポジウム（2002年）での議論では、型材だけでなく型形状によって異なる熱負荷と応力負荷を適切に評価すること¹²⁾も議論されている。

その後、型応力低減のための方案の創成に注目して、鍛造型寿命向上にCAEを駆使した最適化¹³⁾が解説され、実用的な成果も上げ、注目を集めた。熱間の潤滑剤そのものの吹き付けや摩擦界面での直接その場観察や潤滑剤の熱分析を総合した取り組み¹⁴⁾も精力的に行われている。また、最近の熱間鍛造の潤滑剤と酸化スケール抑制剤¹⁵⁾についても分かりやすく解説されている。

以上のように熱間鍛造では、型に塗布された潤滑剤が熱負荷と応力負荷を緩和する。材料・潤滑剤・型が接触するイメージを図15に示す。潤滑剤が被覆された型表面に高温の材料が降伏応力を越える圧力で接触しながら擦ることになる。潤滑剤にとっては急な温度上昇による熔融、分解、燃焼を伴い、一種の摩耗のように消耗すると推測される。

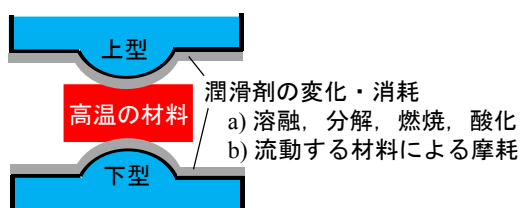


図15 熱間鍛造中の型と潤滑剤と材料のイメージ

この複雑な状態を便宜的に摩擦係数で代表させれば、CAEや潤滑剤開発、塗布条件の最適化などに役立つであろう。

ここでは、実際の熱間鍛造における摩擦接触条件を包含する範囲を調査し、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した。

3.2 熱間鍛造の摩擦条件の調査結果（代表例）

図16は、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数値解析した結果である。これらの解析結果を参考に、摩擦条件の範囲を設定した。すなわち、ビレットの加熱温度は1200℃以下を前提とし、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の影響を考慮したFEM解析により界面のトライボロジー因子を定量的に推定した。その結果、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、面積拡大比は1～4倍程度の範囲であることが分かった。

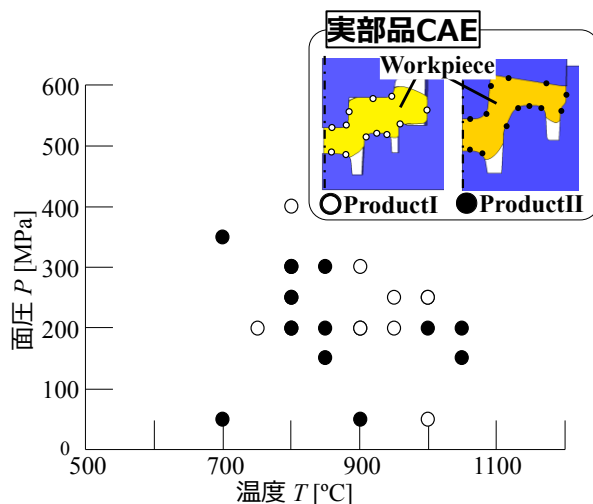


図16 熱間鍛造の面圧と接触温度の推定（FEM結果）

これらの条件を具現できる試験法として、テーパプラグ通し試験¹⁾と回転摩擦試験²⁾を用いた。その結果、図17の両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補完できるようにした。

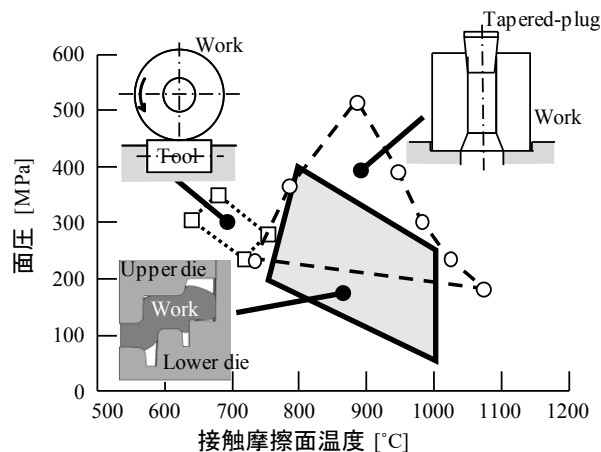


図17 テーパープラグ通し試験と回転摩擦試験機の試験範囲

3.3 テーパープラグ通し試験

テーパプラグと試験片との間の摩擦だけが荷重に反映されやすいように外周の拘束をなくした。図18のような、同じ内径で異なる厚みの試験片を用いた。

図19に荷重-ストローク線図を示す。薄い試験片ではテーパプラグでの面圧増加が少なく、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18 (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プラグを観察すると、図20に示すように潤滑剤の効果も分かりやすく、無潤滑では激しく凝着している。

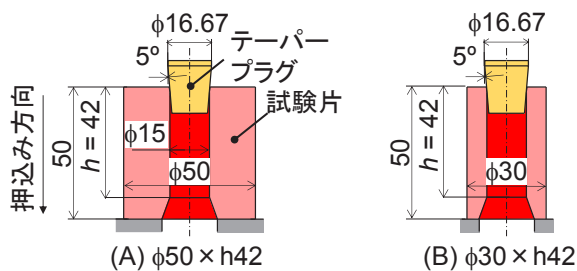


図18 テーパープラグ通しにおける二種類の試験片

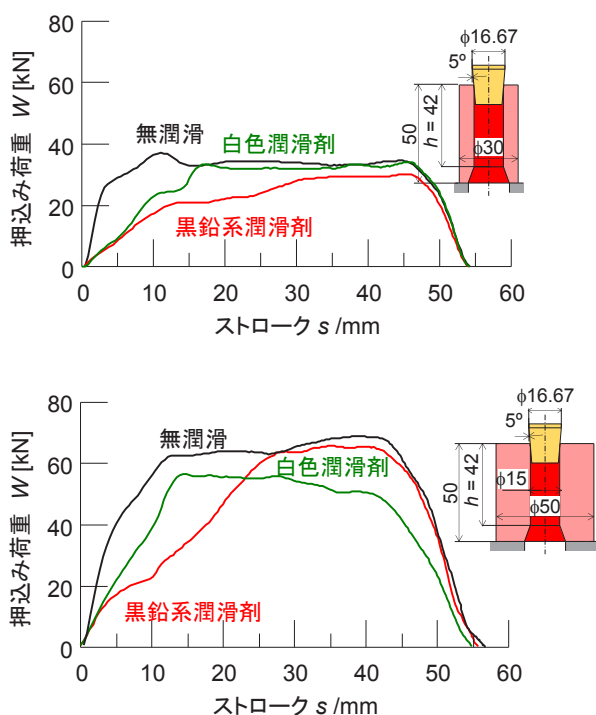


図19 厚みの異なる試験片を用いた場合の荷重変化

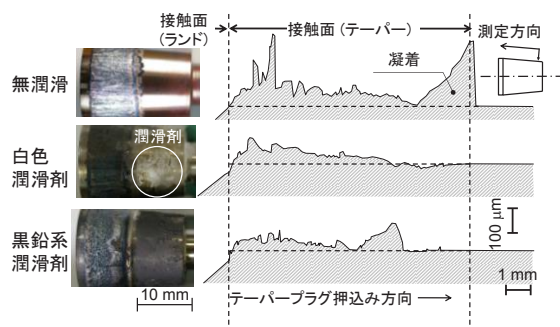
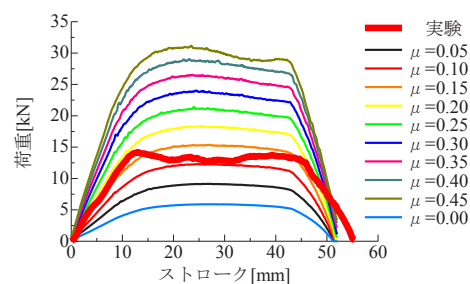


図20 厚肉試験片で試験した後のテーパープラグ表面



検定曲線を線形補間し、 μ を算出

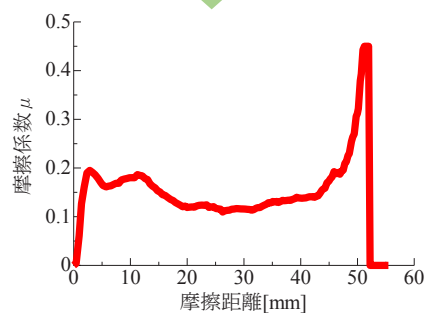


図21 熱間テーパープラグ通し試験での摩擦係数の算定

この条件は熱間潤滑にとって十分に厳しいと推察された。

次にこのテーパー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21のように求める。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ー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。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22のようにストロークに対する摩擦係数の変化とした。

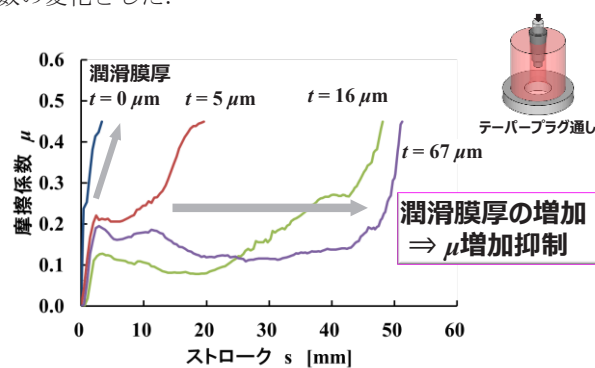


図22 テーパープラグ通し試験におけるストロークー摩擦係数線図例

3.4 熱間回転摩擦試験

図23に熱間回転摩擦試験¹⁷⁾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で、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試験前に200℃の工具に塗布する。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, 100, 200 mm/sとした。

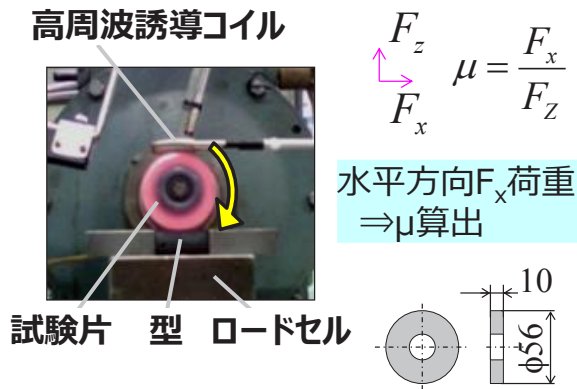


図23 熱間回転摩擦試験と摩擦係数の算出

3.5 摩擦係数に及ぼすトライボロジー因子の影響

摩擦係数が推定できるように実験とシミュレーションも併用した。表2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、重回帰分析した。

表2 テーパープラグ通し試験と回転摩擦試験の条件

回転摩擦試験

試験片：S45C, SCr20, SCM420 (φ56×10)
工具：SKH51(Q. T.), SKH51(Q. T.)+窒化
試験温度：830℃
潤滑剤：無潤滑, 非黒鉛系潤滑剤
回転速度：10, 100, 200 mm/s

テーパプラグ通し試験

試験片：S45C
(高さ50・内径φ15)・外径3種φ25, φ30, φ50
工具：SKH51(Q. T.), SKH51(Q. T.)+窒化
試験温度：750, 1100℃
潤滑剤：無潤滑, 非黒鉛系潤滑剤
押し込み速度：400 mm/s

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ている。これらのうち、影響が強かったのは、試験温度、摩擦速度、潤滑膜厚の3項目について重回帰した代表データを以下に示す。

(a) 摩擦面温度の影響

摩擦面温度は数値解析の結果を参考に、試験片最表面の要素の温度を、接触面に沿って平均した。図24に摩擦面温度の摩擦係数への影響を示す。白色潤滑では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近い摩擦係数を示し、白色潤滑より無潤滑のμは高い。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。

(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25に速度が高いほど摩擦係数が低くなっている。今回の試験は錘によるので圧力は一定である。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化していない。一方で、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。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り、せん断抵抗が増える。

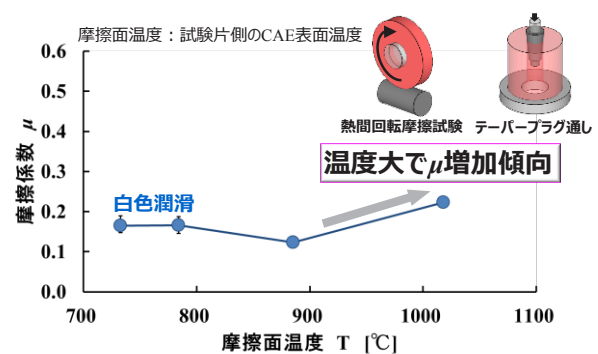


図24 摩擦面温度と摩擦係数μとの関係

一方、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く、せん断抵抗は上がり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

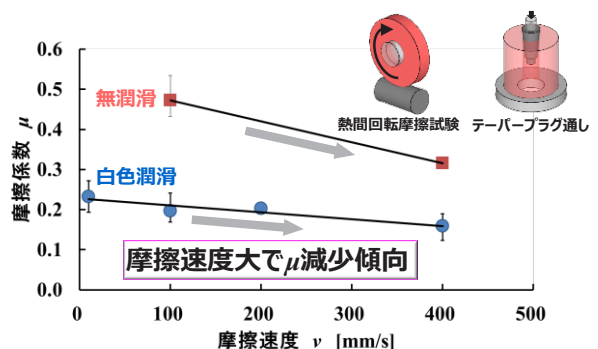


図25 摩擦速度と摩擦係数の関係

点近傍で低速のクランクプレスより、短縮接触のハンマーやスクリーブプレスが好まれることとも対応している。

(c) 潤滑膜厚さの影響

前述の図22テーパプラグ通し試験におけるストロー

クー摩擦係数線図では、潤滑膜の厚みを $t = 5, 16, 67 \mu\text{m}$, 無潤滑 ($t = 0$) であった。

ストロークが10 mmくらいまでの押込み始めでは薄い潤滑膜でも摩擦低減効果が認められる。このストロークまでは潤滑膜厚に関わらず、安定した摩擦係数 μ を示す。それらの μ は16 μm 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 $t = 16 \mu\text{m}$ 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。

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こりやすいと推定される。

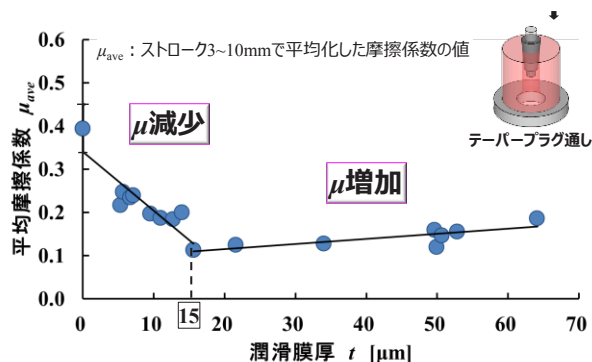


図26 潤滑膜厚さと摩擦係数

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26に示す。今回の摩擦条件では潤滑膜厚さが約20 μm 付近において摩擦係数が最小になっている。これ以下潤滑膜厚さでは激しい焼付きも生じており、摩擦低減には不十分である。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) 重回帰分析の標準偏回帰係数

上記(a)～(c)以外の影響因子なども調べ、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、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27に示す。ここで標準偏回帰係数の絶対値0.5 以上となり影響が強いのは、潤滑膜厚さ、摩擦速度、摩擦面付近の温度である。

3.6 熱間鍛造における潤滑因子のまとめ

熱間鍛造では、摩擦による潤滑膜の消耗を仮定し、実機で摩擦条件を包含するようにテーパープラグ通し試験と回転摩擦試験を行った。その結果、熱間鍛造の工具と材料

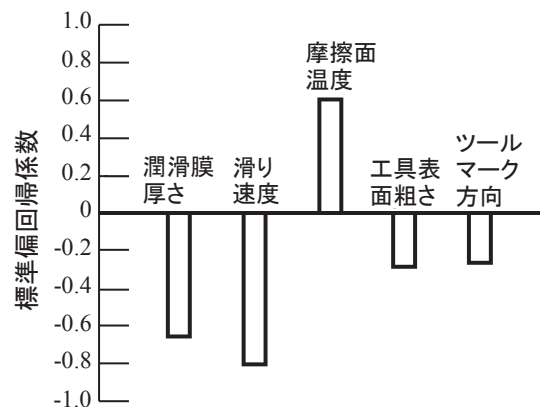


図27 熱間鍛造の摩擦係数に影響するトライボロジー因子

との間の摩擦係数に対して、潤滑膜厚、摩擦速度、温度が強く影響し、摩擦係数を最少とする潤滑膜厚があることを例示できた。

4. まとめ

高い精度と材料ロスの少ない強度部品を経済的に成形することを目指して、ここでは冷間しごき加工と熱間鍛造加工の潤滑を取り上げた。それぞれが、より高性能化と環境負荷低減にも取り組まねばならない。そのためには加工法、条件ごとのメカニズム解明も必要である。また、型、鍛圧機械、工程などの技術とも連携した潤滑システムも創出されるであろう。今後のブレークスルーが楽しみである。

謝 辞

以上の一連の研究においては、天田財団の研究助成により実施したことを記して、謝意を表します。また、冷間しごき加工については実機試験では(株)野口製作所に多大なご協力を頂きました。また、潤滑油は出光興産(株)、新日本石油(株)、大同化学工業(株)、中京化成工業(株)、日本工作油(株)、ユシロ化学工業(株)から快くご提供いただき、深く感謝申し上げます。名古屋工業大学の学生各位には、多くの実験・測定・観察に膨大な時間と大変な努力を頂きましたこと、深く感謝します。熱間鍛造の潤滑では、トヨタ自動車(株)、豊田高等専門学校の浅井一仁博士にも多くの協力を得たこと深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 北村憲彦, 天田金属加工機械技術振興財団 研究概要報告書, 22 (2010), 6-11.
- 2) 北村憲彦, 天田財団助成研究成果報告書, 31 (2018), 146-149.
- 3) 日本塑性加工学会編: 塑性加工におけるトライボロジー (1988), 67-75, コロナ社
- 4) 樫村徳俊ら, 塑性と加工, 41-469 (2000), 100-114.
- 5) 石橋 格ら, 塑性と加工, 52-611 (2011), 1263-1267.

- 6) 吉田昌之ら, 塑性と加工, 55-647 (2014), 1058-1062.
- 7) 岡野知晃, ふらすとす, 2-14 (2019), 106-110.
- 8) 牧 正幸ら, 第57回塑加連演, (2006), 97-98.
- 9) Kazuhiko Kitamura et al., Proc. 4th ICTMP, 1 (2010), 71-79.
- 10) 鈴木一孝ら, 平23年度塑加春講 (2011), 209-210.
- 11) 大野公博ら, 平25年度塑加春講 (2013), 41-42.
- 12) 濟木弘行, 第209回塑性加工シンポジウム (2002), 1-10.
- 13) 藤川真一郎, 塑性と加工, 56-650 (2015), 225-229.
- 14) 土屋能成, 天田財団助成研究成果報告書, 28 (2015), 7-12.
- 15) 池田修啓, ふらすとす, 2-14 (2019), 101-105.
- 16) Kazuhito Asai et al. Steel Research International 2011, Special Edition 1 (2011), 235 - 239.
- 17) Kazuhito Asai et al. Proc. the 6th International Seminar on Precision Forging, (2013), 11-14.
- 18) 武井健太ら, 平30年度塑加春講 (2018), 255-256.