

技術解説


 Technical Review

水溶性の非黒鉛系熱間鍛造用潤滑剤

池田修啓*

Water-Soluble Graphite-Free Type Hot Forging Lubricants

Nobuhiro Ikeda

Synopsis

Graphite type hot forging lubricants have been commonly used in actual job sites even now. Because graphite type hot forging lubricants provide good anti-seizure performance thanks to the excellent heat-resistance performance. However, in recent years, it is required to be aware of the advantages of graphite-free type lubricants due to the environmental issues which contain an improvement of work environment and reduction of quantities of waste liquid, in addition to reduction of used amount of products.

The main components of water-soluble graphite-free type hot forging lubricants are water-soluble polymer and carboxylate, likely to have a great effect on reduction of waste liquid amount owing to the superior performance of oil water separation. But when an application is altered from graphite type lubricants to graphite-free type lubricants, the caution is needed if there is an occurrence of troubles such as shortening die life and forming defects. The countermeasure for aforementioned problems is to understand well the characteristics of graphite-free type lubricants.

This study highlights the features of graphite-free hot forging lubricants and appropriate usage of them.

1. はじめに

熱間鍛造の現場においては現在でも黒鉛系潤滑剤が使用されている場合が多く見られる。黒鉛系潤滑剤は耐熱性に優れるため耐焼き付き性が良好で、潤滑被膜が薄い場合でもある程度の性能を発揮することができることから、生産性のみ追求した場合はたいへん有効な潤滑剤である。

しかし近年では作業環境の改善、また廃液量の低減やそれに伴う使用量の低減といった環境問題への取り組みから非黒鉛系の潤滑剤が求められている。特に少品種の大量生産を行う比較的規模の大きな熱間鍛造ラインでは、潤滑剤を循環使用して使用量を低減し生産コストの削減を目指すことが求められる。しかし黒鉛系潤滑剤を

循環使用した場合、混入した異種油の除去が困難であるため大量の廃液が発生し、それに伴う使用量も増大してしまう。このような場合、油水分離性に優れる非黒鉛系潤滑剤を適用すれば廃液量やそれに伴う使用量を大幅に低減することができる。

また黒鉛系潤滑剤を使用する際に起こりやすい設備トラブルの低減や、操業時における潤滑液管理の簡便化のような操業面での効率化をねらい、非黒鉛系潤滑剤の需要はますます高まっているといえる。

本報では非黒鉛系の熱間鍛造用潤滑剤について、その概要と適切な使用方法について解説する。また非黒鉛系の熱間鍛造用潤滑剤は一般的に白色系潤滑剤と呼ばれることが多いため、以後は白色系潤滑剤という呼称で述べることにさせていただく。

2014年4月22日受付

*大同化学工業(株)技術研究所 (Research Laboratory, Daido Chemical Industry Co., Ltd.)

2. 熱間鍛造用潤滑剤の進歩¹⁾

熱間鍛造の始まりは鉄という材料が発見され、鉄の道具が造られ始めた頃に遡ると考えられる。そして産業の発展に伴って熱間鍛造技術も日ごとに進歩し、現在では熱間鍛造は自動車産業をはじめ、鉄道、建築、家電製品、生活日用品に至るまで鉄を使用するあらゆるところに必要な技術といえる。

熱間鍛造の進歩とともに熱間鍛造用の潤滑剤も進化を遂げている。熱間鍛造における潤滑剤の始まりは“すす”や“おがくず”を金床に撒き、その上で熱した鉄を叩くことによって、貼り付かず伸びやすい加工を実現させたことである。その後金型による加工が行われるようになる。重油や釜残（原油からナフサやガソリンなどを蒸留分取した後のタール状になった物質）を金型表面に塗り、その上で熱した鉄を加工することによって、金型に貼り付かず必要な形状に成型することができるようになった。

しかしながらこのような“すす”や“おがくず”、重油、釜残と言った潤滑剤は、我々が潤滑とイメージするような直接的な「滑り」をもたらすものではない。これらの働きは、熱された鉄に接触し圧力を加えられたときに生じるガス爆発で、金型と被加工材を引き剥がし、貼り付きを防止することである。

だが熱間鍛造技術がさらに進歩するにつれて、ただ離型するだけではなく、そこに「滑り」の要素が求められるようになる。より複雑な形状を成型するために、そしてより金型寿命を延ばすために「滑り」は重要度を増してくる。この課題に対して適用されるようになったのが黒鉛である。黒鉛は鉄表面に付着しやすく、また黒鉛が付着した鉄表面は滑りやすいといわれている。よってまず重油などに黒鉛を混ぜ込んで金型に塗布し熱間鍛造に供することがなされた。黒鉛の潤滑性によって熱間鍛造は飛躍的に進化したと考えられる。現在でもこのような油性の黒鉛が使用されている現場は多くある。

その後、火災の危険性低減などから水に黒鉛を分散させた水溶性黒鉛が使用されるようになる。水溶性黒鉛は非危険物であり扱いやすく、また黒鉛自体にもさまざまな改良がなされ、熱間鍛造にはなくてはならない潤滑剤となった。しかし黒鉛には作業環境の悪化、設備トラブルの多発という大きな欠点がある。これらを改善するために考え出されたのがいわゆる白色系潤滑剤である。初期の白色系潤滑剤は無機塩やカルボン酸塩を水に溶解させ、金型に塗布することで金型表面に皮膜を形成し熱間

鍛造に供するものであった。その後離型性を向上させるため水ガラスなどの適用が検討され、また高温付着性や潤滑性を向上させるために水溶性高分子が適用されるようになる。現在では作業環境の改善、廃棄物の低減などを目的に白色系潤滑剤への期待が大変大きなものとなっている。

3. 水溶性熱間鍛造用潤滑剤の働き²⁾

熱間鍛造加工では高温に加熱した被加工材を金型で成形するため、金型表面は非常に高温にさらされ、それに伴って金型の硬度低下や摩耗を招く。また金型と被加工材の直接接触があると、焼付きや成形不良を引き起こす。

したがって熱間鍛造用潤滑剤には、金型に塗布することで金型を冷却し、同時に金型表面を保護する皮膜を形成して潤滑・離型を促すことが必要になる。

水溶性熱間鍛造用潤滑剤はほとんどの場合金型表面にスプレー塗布される。スプレーされた潤滑剤は金型表面に付着し、同時に金型表面を冷却する。付着した潤滑剤は水が蒸発して乾燥し、金型表面に潤滑皮膜を形成する。形成した潤滑皮膜は鍛造に供され、潤滑・離型の働きをする。鍛造に供された後の残渣や余分な皮膜は、次の塗布によって再溶解し、新たな潤滑皮膜に置き換えられる。

そして Fig. 1 に示すように、塗布工程では付着性・冷却性が、皮膜乾燥工程では皮膜乾燥性・皮膜均一性・皮膜密着性が、鍛造工程では皮膜耐熱性・高温潤滑性・再溶解性がそれぞれ必要性能として要求される。

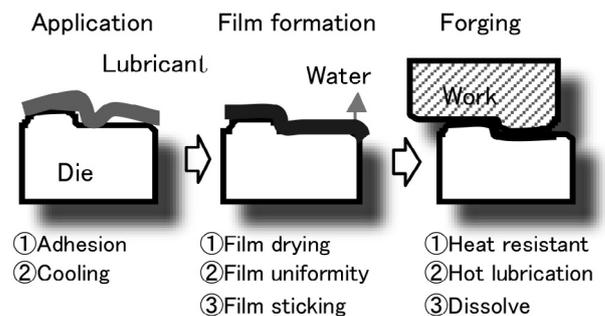


Fig. 1. Film formation cycle and required properties of water-based lubricants.

4. 水溶性の黒鉛系潤滑剤について

(1) 黒鉛の特徴

黒鉛は身近なところでは鉛筆の芯の原料として、また

電子機器の導電性フィルムの原料として、さらには新幹線のパンタグラフ、自動車のブレーキ、電気モーターのブラシなどのほか、さまざまな用途で使用されている³⁾。

熱間鍛造用潤滑剤としての黒鉛は Fig. 2 に示すように層状の結晶構造を有するため、層間すべりによる優れた潤滑性を示し、また耐熱性にも優れるため実際の熱間鍛造においては薄い潤滑皮膜でも潤滑・離型効果を発揮することができる。よって使用にあたってはラフな液管理でも操業することができ、熱間鍛造の現場では広く使用されている。

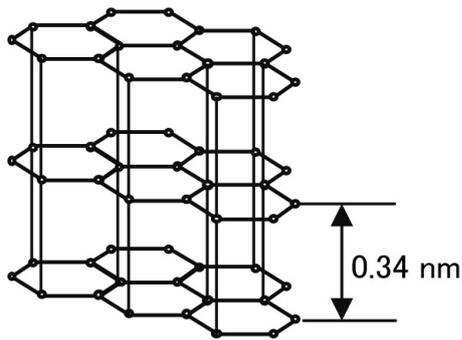


Fig. 2. Crystal structure of graphite.

(2) 熱間鍛造用としての水溶性黒鉛系潤滑剤の欠点

水溶性黒鉛系潤滑剤の欠点として、以下のような点が挙げられる。

- ①作業環境の悪化
作業現場が黒くなり付着すると取れない。
- ②通電性による設備トラブルの多発
設備の腐食や電気配線などのトラブルが発生する。
- ③循環使用した場合、廃棄物が大量に発生
油水分離性が悪く、油分、スラッジ、その他異物を巻き込んだ廃棄物が大量に発生し、それに伴い新液使用量も増大する。

Fig. 3 は油水分離性試験の結果を示す。潤滑剤希釈液に作動油を投入し、激しく振とうした後静置して油分の分離を時間とともに観察する。白色系では 90 sec 後には油分の分離が確認できるが、黒鉛系では 120 sec 後でも油分の分離は見られない。

この結果からもわかるように循環使用した場合、白色系では浮上した油分などを除去すれば下層の潤滑液は問

題なく再使用できるのに対し、黒鉛系では油分の分離がはっきりできないため、油分などを除去しようとする多くの潤滑液とともに廃棄しなければならない。そのため黒鉛系では大量の廃棄物が発生し、それに伴い新液使用量も増大することになる⁴⁾。

	Before	0 s	30 s	60 s	90 s	120 s
Non-graphite						
Graphite						

Fig. 3. Result of separate oil from lubricant solution.

5. 水溶性の白色系潤滑剤について

(1) 水溶性白色系潤滑剤の特徴

水溶性白色系潤滑剤はカルボン酸塩をベースに水溶性高分子 (Table 1)、無機塩などを配合し、必要によっては固体潤滑剤を添加して作られる。黒鉛系潤滑剤に比べ白色系潤滑剤は作業環境を良好に保つことができ、また前述のとおり油水分離性に優れるため、循環使用した場合は黒鉛系に比べ廃棄物が少なく、それに伴って新液使用量が黒鉛系の 1/4 に減少した実績もある。

(2) 水溶性高分子の役割

①粘度上昇効果

Fig. 4 に示すように水溶性高分子は濃度の上昇とともに急激な粘度上昇を起こす。水溶性高分子を配合した潤滑剤が金型に塗布された際、水分蒸発に伴い粘度上昇することで成分の付着と皮膜形成をもたらす。更に金型表面への皮膜の密着性を向上させる効果がある。

Table 1. Example of water-based polymer.

Products	Structure
Poly alkylene glycol (PAG)	$\text{H} \left[\begin{array}{c} \text{CH} \\ \\ \text{OH} \end{array} \text{CH}_2\text{-O-CH}_2\text{CH}_2\text{-O} \right]_n \text{H}$
Poly vinyl alcohol (PVA)	$\text{H} \left[\begin{array}{c} \text{CH} \\ \\ \text{OH} \end{array} \text{CH}_2\text{-CH} \begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{C} \\ \\ \text{O-CH}_3 \end{array} \text{CH}_2 \right]_n \text{H}$
Carboxy methyl cellulose Na-salt (CMC-Na)	$\text{H}_3\text{C} \left[\begin{array}{c} \text{H}_2\text{C-O-C(=O)-O-Na} \\ \\ \text{H} \\ \\ \text{H} \\ \\ \text{H} \end{array} \text{C} \begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{O} \end{array} \right]_n \text{CH}_3$
Poly acrylic acid Na-salt (PA-Na)	$\text{H} \left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 \\ \\ \text{O=C-O-Na} \end{array} \text{CH} \right]_n \text{H}$
Alkyl-Maleic anhydride copolymer Na-salt (PAM-Na)	$\text{H} \left[\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{C} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} \text{-CH}_2\text{-CH} \begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{C} \\ \\ \text{O} \end{array} \text{-CH} \begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{C} \\ \\ \text{O} \end{array} \right]_n \text{H}$
Poly styrene sulfonic acid Na-salt (PSS-Na)	$\text{H} \left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 \\ \\ \text{C}_6\text{H}_4 \\ \\ \text{SO}_3\text{-Na} \end{array} \text{CH} \right]_n \text{H}$
Poly alkylene imine (PAI)	$\text{H}_2\text{N} \left[\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{CH}_2\text{N} \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{H}_2\text{C-NH}_2 \end{array} \right]_n \left[\text{CH}_2\text{CH}_2\text{-NH} \right]_m \text{H}$

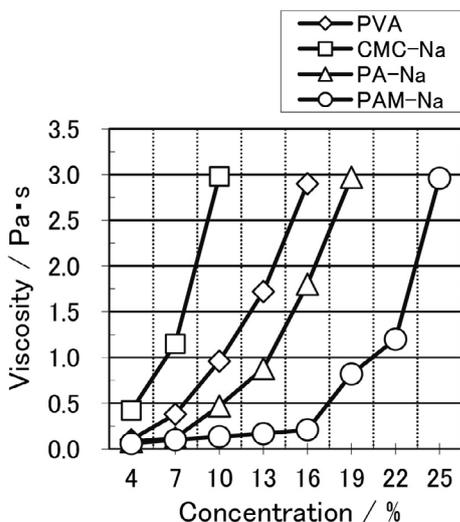


Fig. 4. Increase-viscosity of water-based polymer.

②残渣生成効果

生成した潤滑剤皮膜は高温の被加工材と接触することによって燃焼しながら潤滑の働きをされると考えられる。そして最終的に残渣を生成し、その残渣が加工界面に存在することで被加工材の金型からの離型を行う。Fig. 5 に示すように水溶性高分子はアルカリ塩にすることにより燃焼後に残渣を生成することができ、被加工材の金型からの離型を促す効果がある。

Fig. 5 中の PAG, PVA, PAM はアルカリ塩にならず 500 °C 程度で残渣がほとんどなくなってしまい、加工時の離型効果はあまり期待できないと考えられる。一方、CMC-Na, PA-Na および上記 PAM をアルカリ塩 (Na 塩) にした PAM-Na は、700 °C でも 35% から 45% の残渣を生成することができるため加工時の離型効果を期待できると考えられる。

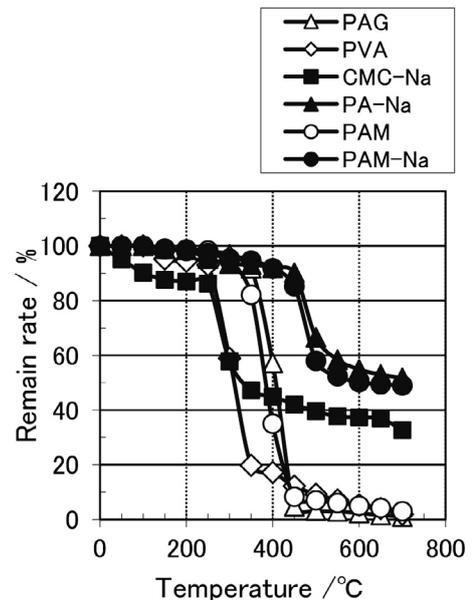


Fig. 5. Heat-resistance of water-based polymer.

(3) 水溶性高分子の選択

水溶性高分子にはそれぞれ異なった特性があり、対象となる鍛造条件に最適なものを選択して適用することが重要となる。また同じ種類の水溶性高分子でも分子量の違いにより、粘度、付着性、冷却性、耐熱性などが大きく異なるため、どの性能を最も重視するのかによって選択することが必要である。

6. 水溶性黒鉛系と水溶性白色系の比較

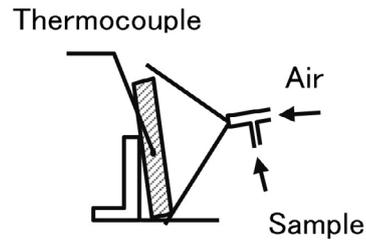
(1) 付着性と付着した皮膜の耐熱性⁵⁾

Fig. 6 に示すように潤滑剤希釈液をエアミックスプレーで加熱した試験片に塗布し、塗布前後の試験片の重量差から付着量を測定する。一般に市販され、汎用性がある水溶性白色系と、同じく汎用性がある水溶性黒鉛系とを比較した結果、Fig. 7 に示すように白色系は高温付着性に優れており、特に試験片温度 300℃ 以上では黒鉛系に比べ優れた付着性を示した。

また付着した皮膜の耐熱性を調べるため、潤滑剤乾燥成分の分解温度を熱天秤により測定した (Fig. 8)。その結果白色系は 450℃ 付近から分解蒸散が始まり、700℃ で約 40% 程度の残渣成分が残存した。対して黒鉛系は 300℃ 付近で約 80% 程度に減量するが、その後温度が上昇してもほとんど減量しない。これは白色系の主成分である有機物が 450℃ 付近で分解し始めるのに対し、黒鉛系は最初に分散剤やバインダー成分が蒸散した後、黒鉛自体は高温でも分解せず残存することによると考えられる。この結果から黒鉛系の最終的な残渣量は白色系の約 2 倍となり、このことが黒鉛系の優れた潤滑・離型性を実現する一因と考えられる。

(2) 付着量(皮膜厚さ)と潤滑性

白色系は付着性で黒鉛系に勝る性能を示すが、実際には潤滑・離型や金型寿命で黒鉛系に劣ることが多い。その一因を Fig. 9 に示すリング圧縮試験の結果から考察する。Fig. 9(a) のグラフは潤滑皮膜の厚さを約 3 μm に設定し、圧縮率を変化させたときの摩擦係数を測定した結果である。白色系は黒鉛系に比べ高い摩擦係数を示した。Fig. 9(b) のグラフは圧縮率を 75% に設定し、潤滑皮膜の厚さを変化させたときの摩擦係数を測定したものである。白色系は黒鉛系に比べ約 2 倍の皮膜厚さを確保すれば、黒鉛系と同等の摩擦係数を得ることができた。このことは Fig. 7 で示したように、潤滑剤乾燥成分中の残渣分量が白色系は黒鉛系の約 1/2 であることと関連していると考えられる。



Spray time: 0.5 sec
 Spray volume: 200 ml/min
 Spray pressure: 0.5 MPa
 Concentration: 20 %

Fig. 6. Spray system for adhesion test.

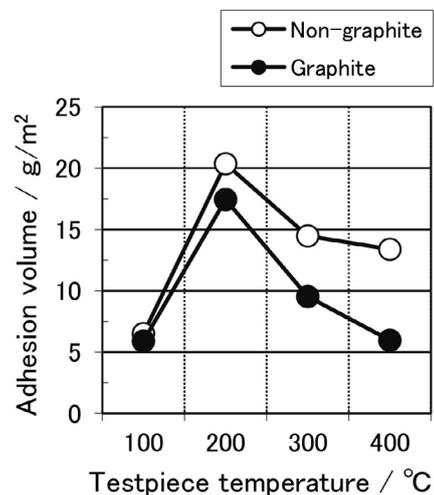


Fig. 7. Result of adhesion test.

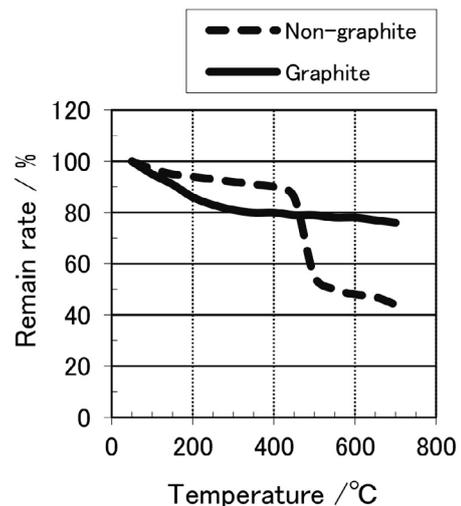


Fig. 8. Heat-resistance of graphite and non-graphite lubricants.

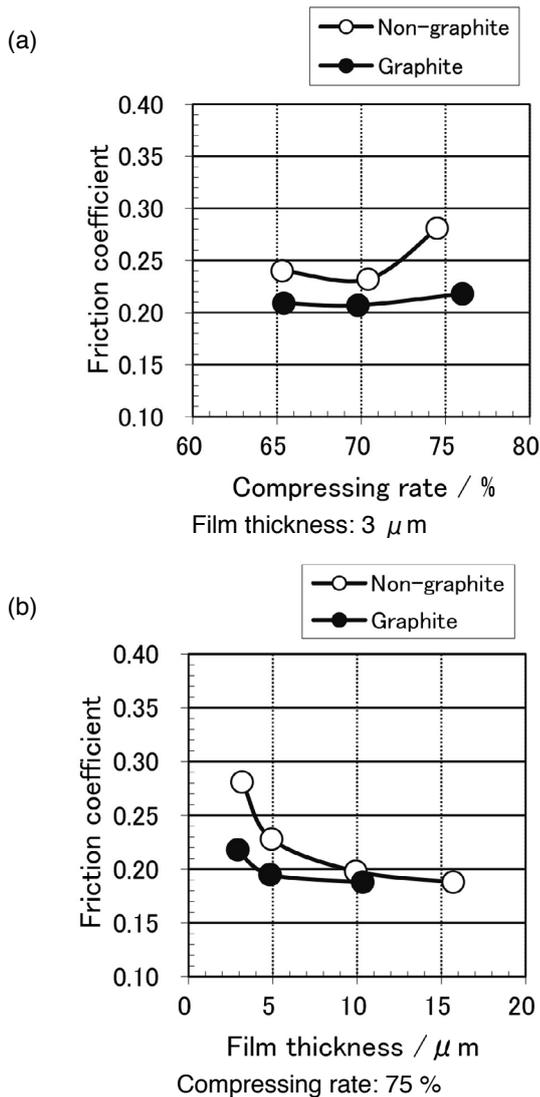


Fig. 9. Friction coefficient in definite film thickness(a), in definite compressing rate (b).

7. 塗布条件と付着

(1) 塗布条件と付着の関係

熱間鍛造用潤滑剤は塗布条件によって付着量だけでなく付着の状態が大きく変わってくる。鍛造工程や鍛造条件によって潤滑剤の塗布条件は制限を受けるため、対象となる塗布条件に適した潤滑剤を選定して使用することが効率よい操業につながる。これまでも金型温度と付着量の関係⁶⁾、潤滑剤の均一成膜条件の検討⁷⁾、スプレー条件と付着性・金型冷却性の関係⁸⁾などさまざまな研究がなされているが、付着状態に影響を与える因子として大きいものは金型温度、塗布時間、塗布の距離が

挙げられる。以下にこれら条件と付着状態の関係について実験結果を基に考察する。

塗布試験には扶桑精機製 ST-5R スプレーガンを使用し、試験片：SS-41 (60 × 60 × 10 mm)、塗布量：200 ml/min、塗布圧：0.5 MPa、潤滑剤濃度：7 倍希釈、で行った。潤滑剤は一般に市販されており汎用性がある水溶性白色系を使用した。

(2) 金型温度と付着状態

金型を想定した試験片を 100, 150, 200, 300, 400 °C に加熱し、潤滑剤を塗布したときの付着量と付着状態を Fig. 10 に示す。試験片温度 200 °C で最も付着量が多くなっている。100 °C で付着量が少ないのは、塗布された潤滑剤が乾燥し付着する前に流れ落ちてしまうためであり、300 °C 以上で付着量が低下するのは、水の蒸気圧によって潤滑剤がはじき飛ばされる確率が高くなるためと考えられる。付着状態も 100 °C では潤滑剤が流れた状態が見られ、150 ~ 200 °C では良好、300 °C 以上ではスプレーが直接当たる部分にしか付着していないことがわかる。

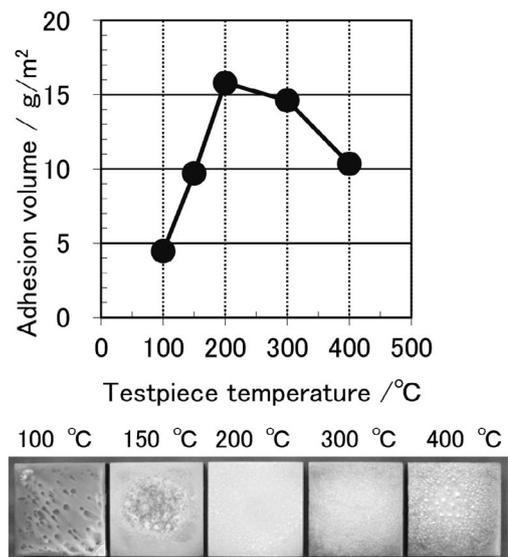


Fig. 10. Adhesion volume and state on each temperature.

(3) 塗布時間と付着状態

200 °C の試験片に 0.2, 0.5, 1.0, 1.5 sec で潤滑剤を塗布したときの付着量と付着状態を Fig. 11 に示す。塗布時間が長いほど付着量が多くなり付着効率が良いように見えるが、塗布時間が長いほど付着状態は悪くなり、ス

プレーが直接当たる部分は表面温度が下がり、潤滑皮膜が薄くなっていることがわかる。

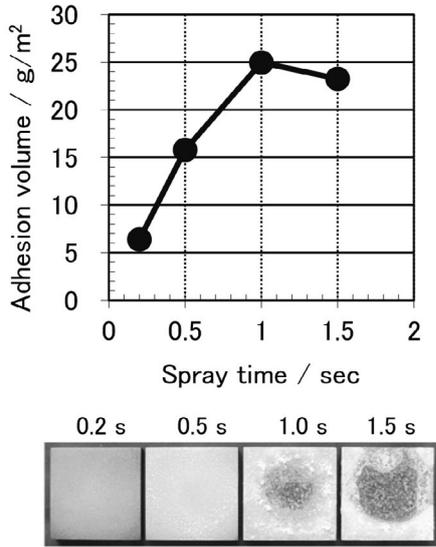


Fig. 11. Adhesion volume and state on each spray time.

(4) 塗布の距離と付着状態

200℃の試験片に150, 300, 450 mmの距離で潤滑剤を塗布したときの付着量と付着状態を Fig. 12 に示す。塗布の距離が短いほど付着量が多くなり付着効率が良いように見えるが、塗布の距離が短いほど付着状態は悪くなり、スプレーが直接当たる部分は表面温度が下がり、潤滑皮膜が薄くなっていることがわかる。

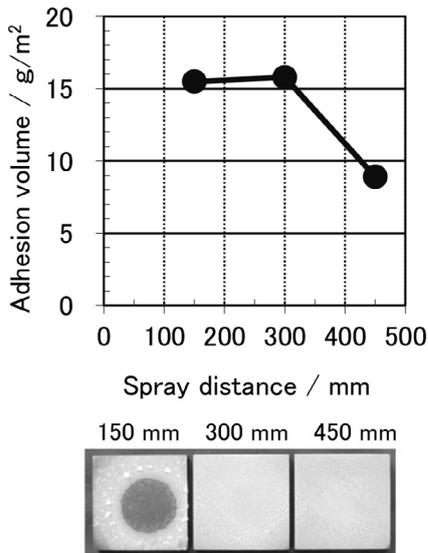


Fig. 12. Adhesion volume and state on each spray distance.

8. 潤滑剤の循環使用における使用液管理

(1) 使用液の管理項目

使用液の管理としては以下の項目を測定し液状態を把握する。

- ① pH: 異種油の混入, 腐敗の進行などを把握するため。
- ② 濃度: 付着性, 潤滑性, 冷却性などを調整するため。
- ③ 混入油分: 冷却性の低下, 均一皮膜性の低下, 潤滑性の低下などが懸念される。
- ④ 狭雑物: 均一皮膜性の低下, 潤滑性の低下, ノズルの詰まりなどが懸念される。
- ⑤ スケール(鉄分): 均一皮膜性の低下, 潤滑性の低下, ノズルの詰まりなどが懸念される。

(2) 使用液の性能劣化

使用液の性能劣化を把握するため動粘度, 付着性, 潤滑性を測定し液状態を把握する。

Fig. 13, 14, 15 に新液と使用液の試験結果を示す。新液に比べ使用液の動粘度, 付着性, 潤滑性はすべて低下している。これらの調査は定期的に行い, 実機操作の状況と照らし合わせてデータ蓄積することによって, 新液補給のタイミングや潤滑液の入れ替え時期を判断する。

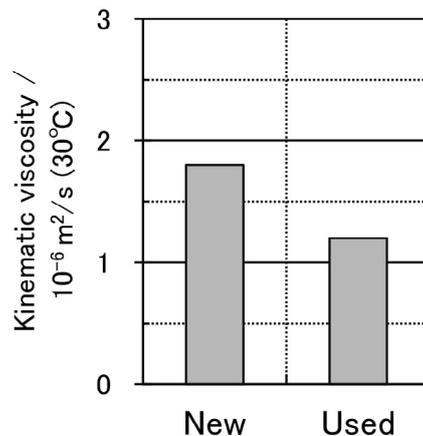


Fig. 13. Kinematic viscosity of lubricant solution on new and used.

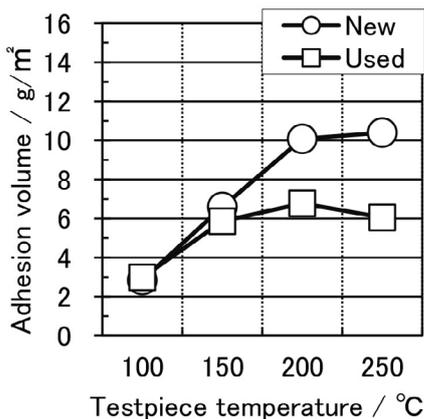


Fig. 14. Adhesion volume of lubricant solution on new and used.

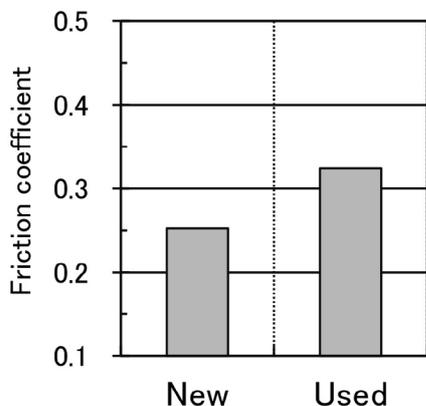
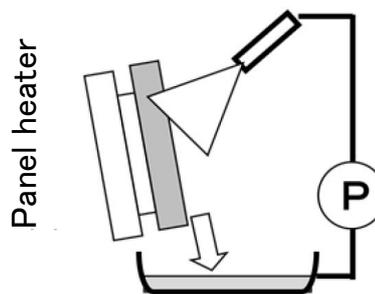


Fig. 15. Friction coefficient of lubricant solution on new and used.

(3) 潤滑液劣化のラボ実験による再現

潤滑剤の循環使用における性能劣化をラボ実験で再現するため、Fig. 16のような実験を行い粘度の変化を測定することによって調査した。その結果 Fig. 17に示すようにパネルヒーター温度 200℃では液の動粘度に変化は見られなかったが、400℃では試験時間に伴って液の動粘度が低下した。熱間鍛造の実機における鍛造直後の金型表面温度が 400℃以上になることは十分考えられ、液劣化が進行する条件であることが確認できた。



Nozzle: Full cone
 Spray distance : 100 mm
 Spray volume: 900 ml/min
 Sample volume: 3.0 L
 Spray interval: spray 1 min → stop 2 min
 spray 1 min → stop 2 min
 repeat
 Panel heater temp.: 100, 200, 300, 400 °C

Fig. 16. System of reappearance on used lubricant solution.

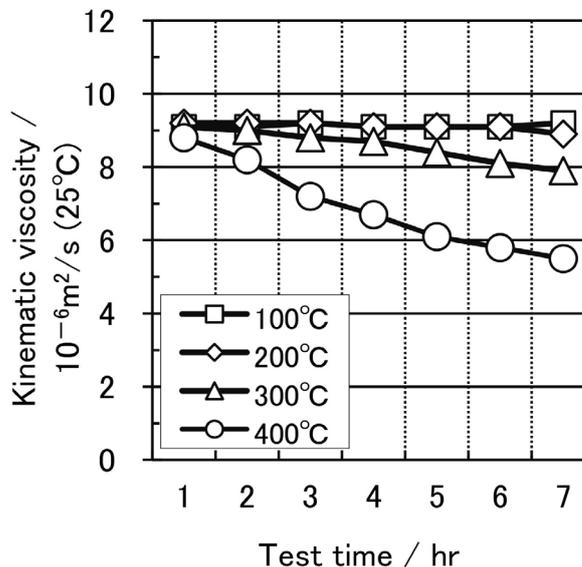


Fig. 17. Result of reappearance on used lubricant solution.

9. おわりに

熱間鍛造用の潤滑剤には加工する部品、加工する工程、塗布の条件などによって要求される性能が大きく異なる。黒鉛系潤滑剤は汎用性に優れ、ラフな管理で使用してある程度の効果が得られるが、環境問題を考慮するならば白色系潤滑剤への転換は避けられない課題である。白色系潤滑剤を適用するにあたり、加工に際して要求される性能を的確に把握し、要求事項に対して潤滑剤の性能を最大に発揮することができれば、黒鉛系潤滑剤から白色系潤滑剤への転換は十分に可能であると考えられる。

(文 献)

- 1) 日本塑性加工学会 鍛造分科会編：わかりやすい鍛造加工，(2005)，1.
- 2) 池田修啓：平成22年度 素形材技術セミナーテキスト，(2011)，17.
- 3) 日本トライボロジー学会 固体潤滑研究会編：新版 固体潤滑ハンドブック，養賢堂，(2010)，17.
- 4) 宇田紘助，辰巳和夫，黒田将文，池田修啓：トライボロジー会議予稿集，2009-5(2009)，325.
- 5) 宇田賢一郎：日本塑性加工学会 塑性加工学講座テキスト，98(2007)，73.
- 6) 安藤光浩，八木勝春，石原裕文，池末富三夫，原康介，久保田智，田村庸：平成 11年度塑性加工春季講演会講演論文集，(1999)，259.
- 7) 土屋能成，堤亮介，王志剛：塑性加工連合講演会講演論文集，63(2012)，27.
- 8) 澤村政敏，与語康宏，田中利秋，中西広吉，鈴木寿之，渡邊敦夫，宮嶋伸晃：平成 16年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2004)，367.