研究報告

# 鋼用冷間鍛造油の開発

大森俊英，北村憲彦，団野　敦，川村益彦

# Development of High Performance Cold Forging Oil for Steel

Toshihide Ohmori, Kazuhiko Kitamura, Atsushi Danno, Masuhiko Kawamura


## 要　旨

従来，技術的に困難とされていた優れた焼付き防止性能と低腐食性との両立を実現した高性能な冷間鍛造油を開発した。本文は，その開発過程ならびに開発油の特徴をまとめたものである。

冷間鍛造油の焼付き防止性能の評価に適したボール通し試験法を考案し，焼付き防止に優れた試料油の組成について検討した。それによって，長鎖酸性りん酸エステルであるオレイルアシッドホスフェート（OLAP）とりん酸とを配合し加熱処理を施した試料油が，既存の冷間鍛造油を大きくしのぎ，金属石ケン／りん酸塩被膜処理に迫る優れた性能を示すことを見出した。この試料油にさらにりん酸亜鉛等の金属りん酸塩を配合することによって，焼付き防止性能を低下させることなく，鉄系材料に対する腐食性を抑制できることを明らかにした。

この，OLAP，りん酸および金属りん酸塩を配合した新規な冷間鍛造油は，実機試験においても，優れた焼付き防止性能を示す一方，腐食による問題を生じることはなかった。金属石ケン／りん酸塩被膜処理から本開発油への置換を実施した生産ラインでは，コストならびに生産工程面に関して多大なメリットを生じている。

## Abstract

High performance cold forging oil has been developed to realize excellent galling prevention property equivalent to the soap/phosphate coating and low corrosiveness against ferrous materials. The effect of extreme pressure additives on galling prevention was investigated by the ball penetration method.  Sample oils containing oleyl acid phosphate (OLAP) and phosphoric acid are found to exhibit excellent galling prevention corresponding to the soap/phosphate coating. It is discovered that adding zinc phosphate to the oil suppresses the corrosiveness of the oil without reducing the galling prevention ability. The target of the development has been satisfactorily accomplished with the composition including OLAP, phosphoric acid and zinc phosphate. The developed oil showed superior performance in practical cold forging test. Replacing the soap/phosphate lubricant with the newly developed oil has brought enormous benefits on cost and productivity on production lines.


キーワード　冷間鍛造，潤滑油，焼付き，腐食，りん化合物，吸着，反応

## １．はじめに

冷間鍛造には，高速，高歩留まりで，材料強度に優れた機械部品を生産できるという特徴がある。このような特徴から，冷間鍛造は自動車を初めとする機械産業にはなくてはならない加工法として発展を遂げた[1)]。

鋼の冷間鍛造用潤滑剤としては，金属石ケンとりん酸塩とを組合せた複合被膜（以後，金属石ケン／りん酸塩被膜）が広く用いられている[2)]。それは，この潤滑剤が，冷間鍛造特有の高面圧，高温，著しい表面積拡大といった厳しい摩擦条件下においても，優れた焼付き防止性能を示すことによる。しかし，金属石ケン／りん酸塩被膜の形成には煩雑な処理工程が必要である[3)]。また，バッチ処理であるため，生産工程の連続性が途切れてしまうという欠点もある。

潤滑油を用いた場合には，潤滑法が簡便であり，コストおよび生産工程上大きなメリットがある。しかし，焼付き防止性能に関しては，金属石ケン／りん酸塩被膜に比べて劣るため，その使用は軽度の加工に限られている[4)]。したがって，近年，焼付き防止性能に優れた冷間鍛造用潤滑油が強く求められるようになってきている。

このような背景のもと，当所において，金属石ケン／りん酸塩被膜処理からの置換を目指した高性能な鋼用冷間鍛造油の開発を行った。開発過程で得られた知見ならびに開発油の特徴を以下にまとめる。

## ２．鍛造性能の実験室的評価

冷間鍛造の実験室的な評価試験法としては後方せん孔試験[5)]，前方押出し試験[6)]などが知られている。しかし，加工条件が厳しすぎる，試験が繁雑であるなどの理由から，これらの試験法は冷間鍛造油開発のための評価試験に適しているとはいいがたい。それゆえ，冷間鍛造油の焼付き防止性能を適切かつ簡便に評価できる試験法としてボール通し試験法[7)]を考案した。

### ２．１　ボール通し試験法

ボール通し試験の型構成を**Fig. 1**に示す。被加工材としてS10C製円筒形試片を，工具に相当するものとして玉軸受用のSUJ2製ボールをそれぞれ用いた。ボールは使い捨てである。そのため，後方せん孔試験および前方押出し試験と異なり，工具の交換および修復にかかる手間は不要である。試片の硬さおよび表面粗さは，それぞれHV119およびRmax1～5$\mu$mである。また，ボールの硬さおよび表面粗さは，$H_R$C58およびRa＜0.05$\mu$mである。

試料油を塗布した後コンテナ内にセットした試片に，その内径よりも大きな直径のボールを押し込み貫通させる。それにより，試片は内径が拡大し，軸方向に伸びる変形を受ける。**Table 1**に示すように，ボール

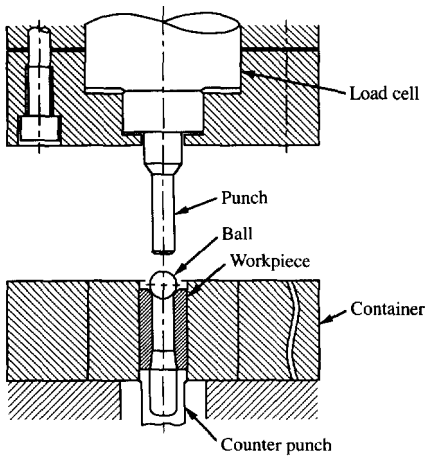



**Fig. 1**　Ball penetration test.

**Table 1**　Reduction in cross-sectional area of workpiece (R) in ball penetration test.

$$R = \frac{Db^2 - Di^2}{30^2 - Di^2} \times 100$$

*Db* : Ball diameter
*Di* : Inside diameter of workpiece

| R, % | *Db*, mm | *Di*, mm |
|---|---|---|
| 2.5 | 15.08 | 14.5 |
| 4 | 15.88 | 15.0 |
| 6 | 15.88 | 14.5 |
| 8 | 16.67 | 15.0 |
| 10 | 16.67 | 14.5 |
| 12 | 17.46 | 15.0 |
| 14 | 17.46 | 14.5 |

直径*Db*と試片内径*Di*との組合せを変えることによって，加工に伴い試片の断面積が減少する割合（減面率R）を2.5～14%の間で変化させた。試験後の試片内面を観察することによって，焼付きを生じることなく加工できた最大の減面率maxRを判定し，その値によって試料油の焼付き防止性能を評価した。試験には，250tonfナックルジョイントプレスを用いた。平均加工速度は370mm/sである。

ボール通し試験後の試片内側の表面状態の例を**Fig. 2**に示す。(a)は焼付きを生じなかった場合である。(b)は焼付きを生じた場合である。焼付きはこのようにボール通しの途中から生じる。

### 2．2　市販油の焼付き防止性能

ボール通し試験によって評価した市販冷間鍛造油，無添加鉱油および金属石ケン／りん酸塩被膜の焼付き防止性能を**Fig. 3**に示す。市販冷間鍛造油には，S系(2種類)，S-Cl系(3種類)およびP系(1種類)を用いた。市販冷間鍛造油および無添加鉱油の性能が4水準に分離されている。後方せん孔試験では，これらの試料油の焼付き防止性能は2水準にしか分離されなかった[7]。したがって，後方せん孔試験に比べてボール通し試験の方が，オイルタイプの潤滑剤の性能評価に適しているといえる。

極圧添加剤の配合された市販冷間鍛造油は，無添加鉱油に比べて全般的に優れた焼付き防止性能を示している。しかし，最高性能のものでもmaxRの値は8%であり，金属石ケン／りん酸塩被膜処理の12%に比較すると大きく劣っている。これは，一般的知見と一致するものである。

## 3．焼付き防止に優れた添加剤の選択と組合せ

冷間鍛造油の焼付き防止性能は，主に配合された極圧添加剤に依存する。それゆえ，焼付き防止性能に優れた冷間鍛造油の開発に当たっては，極圧添加剤の選択が最も重要なポイントである。各種極圧添加剤の中から，S系ならびにCl系極圧添加剤に比べて極性が高く，材料表面に対してより高い吸着・反応活性が期待されるP系極圧添加剤[8]に焦点を絞って検討を行った[9~12]。

### 3．1　単一添加系の性能

添加剤には，**Table 2**に示すエステル化度とアルキル基の異なる市販の各種りん酸エステルおよび亜りん酸エステルを用いた。これらの添加剤をパラフィン系鉱油（96mm$^2$/s at 40℃）にりん濃度で1wt%配合した試料油を試験に供した。

ボール通し試験の結果を**Fig. 4**に示す。無添加鉱油のmaxR 2.5%に対して，添加剤配合油ではすべての試料油において4%以上であり，りん系極圧添加剤の配合による焼付き防止性能の向上が認められる。その中でも，ADPおよびALP配合油は市販油最高性能品と同等のmaxR 8%の優れた性能を示している。ADPおよびALPを他の添加剤と比較した場合の大きな相違点は，12ないし15wt%の無機りん酸を含んでいることである。すなわち，焼付きの防止に対して少量の無機りん酸が重要な役割を担っていると推察される。

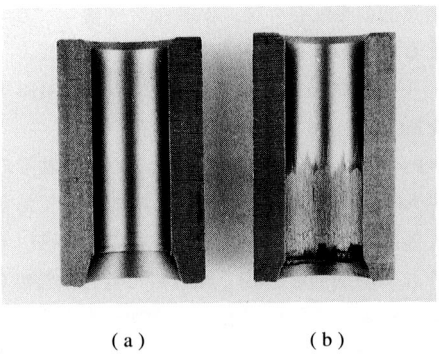



**Fig. 2**　Inside surfaces of workpieces after ball penetration test.

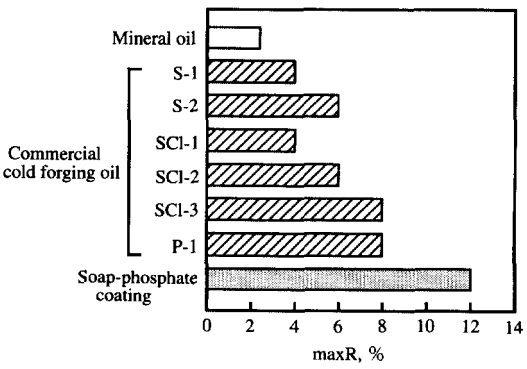



**Fig. 3**　Galling prevention properties of commercial lubricants evaluated by ball penetration test.

直径*Db*と試片内径*Di*との組合せを変えることによって，加工に伴い試片の断面積が減少する割合（減面率R）を2.5～14%の間で変化させた。試験後の試片内面を観察することによって，焼付きを生じることなく加工できた最大の減面率maxRを判定し，その値によって試料油の焼付き防止性能を評価した。試験には，250tonfナックルジョイントプレスを用いた。平均加工速度は370mm/sである。

ボール通し試験後の試片内側の表面状態の例を**Fig. 2**に示す。(a)は焼付きを生じなかった場合である。(b)は焼付きを生じた場合である。焼付きはこのようにボール通しの途中から生じる。

### 2．2　市販油の焼付き防止性能

ボール通し試験によって評価した市販冷間鍛造油，無添加鉱油および金属石ケン／りん酸塩被膜の焼付き防止性能を**Fig. 3**に示す。市販冷間鍛造油には，S系(2種類)，S-Cl系(3種類)およびP系(1種類)を用いた。市販冷間鍛造油および無添加鉱油の性能が4水準に分離されている。後方せん孔試験では，これらの試料油の焼付き防止性能は2水準にしか分離されなかった[7]。したがって，後方せん孔試験に比べてボール通し試験の方が，オイルタイプの潤滑剤の性能評価に適しているといえる。

極圧添加剤の配合された市販冷間鍛造油は，無添加鉱油に比べて全般的に優れた焼付き防止性能を示している。しかし，最高性能のものでもmaxRの値は8%であり，金属石ケン／りん酸塩被膜処理の12%に比較すると大きく劣っている。これは，一般的知見と一致するものである。

## 3．焼付き防止に優れた添加剤の選択と組合せ

冷間鍛造油の焼付き防止性能は，主に配合された極圧添加剤に依存する。それゆえ，焼付き防止性能に優れた冷間鍛造油の開発に当たっては，極圧添加剤の選択が最も重要なポイントである。各種極圧添加剤の中から，S系ならびにCl系極圧添加剤に比べて極性が高く，材料表面に対してより高い吸着・反応活性が期待されるP系極圧添加剤[8]に焦点を絞って検討を行った[9~12]。

### 3．1　単一添加系の性能

添加剤には，**Table 2**に示すエステル化度とアルキル基の異なる市販の各種りん酸エステルおよび亜りん酸エステルを用いた。これらの添加剤をパラフィン系鉱油（96mm$^2$/s at 40℃）にりん濃度で1wt%配合した試料油を試験に供した。

ボール通し試験の結果を**Fig. 4**に示す。無添加鉱油のmaxR 2.5%に対して，添加剤配合油ではすべての試料油において4%以上であり，りん系極圧添加剤の配合による焼付き防止性能の向上が認められる。その中でも，ADPおよびALP配合油は市販油最高性能品と同等のmaxR 8%の優れた性能を示している。ADPおよびALPを他の添加剤と比較した場合の大きな相違点は，12ないし15wt%の無機りん酸を含んでいることである。すなわち，焼付きの防止に対して少量の無機りん酸が重要な役割を担っていると推察される。

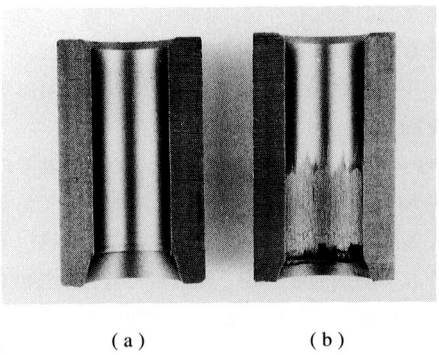



**Fig. 2**　Inside surfaces of workpieces after ball penetration test.

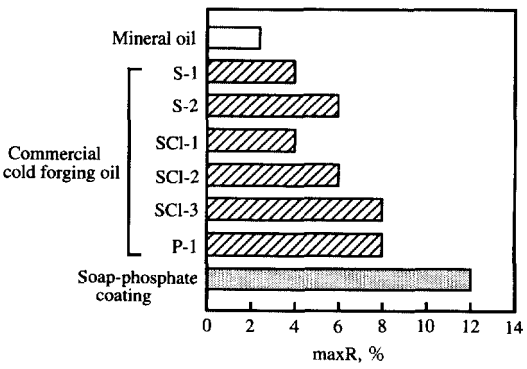



**Fig. 3**　Galling prevention properties of commercial lubricants evaluated by ball penetration test.

**Table 2** Composition of additives used.

| | Name | Alkyl group | Composition (mol%) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Triester | Diester | Monoester | Inorganic acid |
| Phosphate ester | TBP | $-C_4H_9$ | >99 | — | — | — |
| | TOP | $-C_8H_{17}$ | >99 | — | — | — |
| | TOLP | $-C_{18}H_{35}$ | >99 | — | — | — |
| | DOP | $-C_8H_{17}$ | — | >99 | — | — |
| | BAP | $-C_4H_9$ | — | 46 | 54 | — |
| | OAP | $-C_8H_{17}$ | — | 49 | 51 | — |
| | DAP | $-C_{10}H_{21}$ | — | 56 | 44 | — |
| | TAP | $-C_{13}H_{27}$ | — | 40 | 60 | — |
| | OLAP | $-C_{18}H_{35}$ | — | 45 | 55 | — |
| | MLP | $-C_{12}H_{25}$ | — | — | >99 | — |
| | ADP | $-C_{10}H_{21}$ | — | 27 | 58 | 15 |
| | ALP | $-C_{12}H_{25}$ | — | 4 | 84 | 12 |
| Phosphite ester | TBPi | $-C_4H_9$ | 87 | 13 | — | — |
| | TLPi | $-C_{12}H_{25}$ | 87 | 13 | — | — |
| | TOLPi | $-C_{18}H_{35}$ | 85 | 15 | — | — |
| | TBPi | $-C_4H_9$ | — | >99 | — | — |
| | DLPi | $-C_{12}H_{25}$ | — | >99 | — | — |
| | DOLPi | $-C_{18}H_{35}$ | — | >99 | — | — |

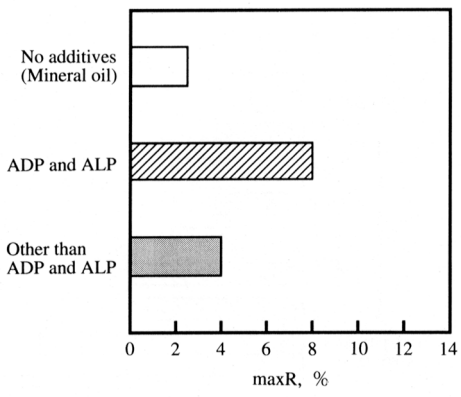



**Fig. 4** Galling prevention properties of sample oils containing single additives.

### 3．2　複合添加系の性能

前節で得られた知見を基に，りん酸エステルと試薬のりん酸とを配合した試料油の焼付き防止性能について検討した。りん酸エステルには，長鎖の酸性りん酸エステルであるオレイルアシッドホスフェート（OLAP）を用いた。試薬りん酸には約15%の水が含まれるため，両添加剤を配合の後，試料油を加熱し，水分を減少させる処理も行った。

ボール通し試験によって得られた各試料油のmaxRの値を**Fig. 5**に示す。

OLAPもしくはりん酸だけを配合した試料油でのmaxRは4%である。配合量をそれ以上増加させても焼付き防止性能の向上は認められなかったことから，これがそれぞれの添加剤を単独で配合した場合の性能の上限と考えられる。それに対して，添加剤を両方とも配合した場合には，maxRは8%に増大している。これは，両添加剤の配合によって焼付き防止性能に相乗効果を

生じていることを示すものである。

OLAPとりん酸とを配合した試料油に加熱処理を施すことによって，さらに焼付き防止性能が向上している。OLAPもしくは りん酸だけを配合した試料油に加熱処理を加えても焼付き防止性能の向上はみられなかったことから，これは複合添加系固有の現象と考えられる。この複合系に120℃の加熱処理を加えた場合には，maxRは12%にまで達している。このように，OLAPとりん酸とを配合し加熱処理を施した試料油において，当初の目標通り，既存の冷間鍛造油（maxR =4〜8%）を大きくしのぎ，金属石ケン／りん酸塩被膜処理に匹敵する優れた焼付き防止性能を得ることができた。

### ３．３　複合添加系における作用機構

ボール通し試験後の試片内側表面をXPS（X-ray photoelectron spetroscopy）で分析することによって，ボール通し試験に伴う，りん酸鉄系の反応被膜[13]の生成が認められた。試片表面のEPMA（Electron probe microanalysis）分析によって得られたりんの定量値を**Fig. 6**に示す。複合添加系となり，さらに加熱処理温度が上昇するのに伴い，より多量のりんが検出されている。すなわち，両添加剤の配合および加熱処理温度の上昇に伴い，より厚いりん酸鉄被膜が生成している。

このりん酸鉄の生成量の序列は，Fig. 5における焼付き防止性能の序列と一致するものである。したがって，OLAPとりん酸との相乗効果および加熱処理の効果は，試料油の鉄に対する反応性（りん酸鉄生成能）の向上に起因するものと考えられる。

試料油の $^{1}$H-NMR（Nuclear magnetic resonance spectrometry）および $^{31}$P-NMR分析によって推察された試料油中における添加剤の状態変化を**Fig. 7**に示す。OLAPとりん酸の両者の配合により，りん酸および水ともにOLAP と水素結合による会合体を形成し油中に可溶化する。しかし，OLAPと会合しきれない過剰なりん酸と水は分散相として残る。この系に熱を加えると，OLAPとの会合にとってりん酸の競争種である水が蒸発により減少し，それによってOLAPと会合し可溶化するりん酸が増加すると考えられる。

試料油の反応性および焼付き防止性能は，試料油中のりん酸濃度の増大に伴い向上する一方，OLAP濃度の増大により阻害されることが認められた[10]。したがって，試片表面におけるりん酸鉄の生成は，主にりん酸側に起因するものと考えられる。会合体の形成による反応性ならびに焼付き防止性能の向上は，ひとつには，りん酸鉄生成反応の主体であるりん酸の鉄表面にぬれやすく反応の機会の多い油相への可溶化に起因するものと推察される。

りん酸エステル側の焼付き防止に対する効果について検討するために，あらかじめりん酸鉄被膜を生成させた試片を用いたボール通し試験を行った。被膜の生成処理は，OLAPを0.75wt%Pおよびりん酸を0.54wt%P配合して加熱処理を施した後，さらに100℃に保持した試料油中に試片を5分間浸漬することによって行っ

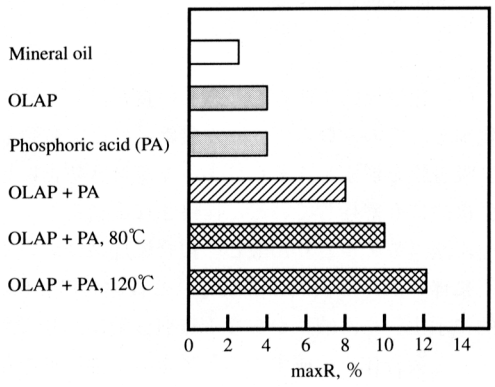



**Fig. 5**　Galling prevention properties of sample oils containing OLAP and phosphoric acid.

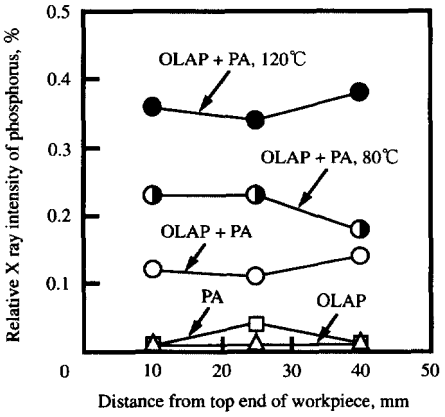



**Fig. 6**　Amount of phosphorus detected by EPMA (Electron probe microanalysis) on workpiece surfaces.

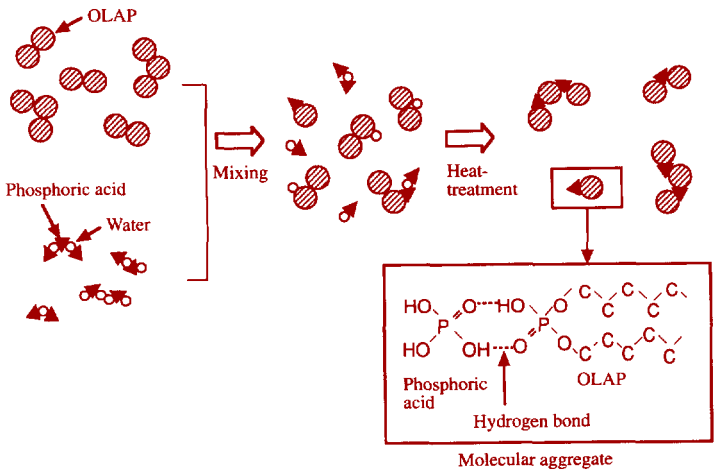



**Fig. 7** Schematic illustration of molecular association between OLAP and phosphoric acid.

た。浸漬処理後の試片は，*n*－ヘキサン中で超音波洗浄した。りん酸鉄の生成はXPS分析によって確認した。また，EPMA分析によって得られた生成量は，りんのX線強度比で0.4%である。

このような試片にりん酸エステルだけを1wt%配合した試料油もしくは無添加鉱油を塗布してボール通し試験を行った。その結果を，被膜処理を施さない試片を用いた場合の結果と比較して**Fig. 8**に示す。すべての試料油の場合において，あらかじめ生成させたりん酸鉄被膜の共存によって焼付き防止性能が向上している。しかし，その度合いは試料油によって異なる。無添加鉱油ではmaxRは4%であるのに対して，りん酸エステル配合油においては8%以上に向上している。りん酸エステル配合油の中では，OLAP配合油が最も優れた性能を示しており，maxRの値は12%となっている。

脂肪酸，アミン等の極性化合物の吸着においては，極性が高く，また，アルキル基の鎖長の長いものほどより強度の大きな吸着膜を形成するといわれている[14]。ここで用いているりん酸エステルもアルキル基の末端に官能基を有しており，基本的には脂肪酸等と同様の分子構造を有している。したがって，りん酸エステルの吸着にも他の極性化合物の吸着と同様のことが成り立ち，極性が高くアルキル基の鎖長の長い長鎖酸性りん酸エステルであるOLAPが最も優れた焼付き防止性能を示したものと考えられる。すなわち，りん酸エステルは，化学反応を伴うことのない良好なりん酸の可溶化剤としてのみならず，りん酸鉄系の反応被膜最表面に吸着膜を形成し，それによって焼付き防止に対して直接的にも寄与していると推察される。

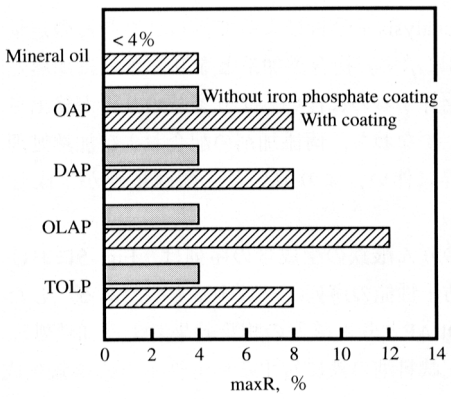



**Fig. 8** Synergistic effect between phosphate ester and iron phosphate coating.

りん酸エステルとりん酸との複合添加系において，加工に伴い試片の表面に形成される被膜を**Fig. 9**に模式的に示す。りん酸鉄からなる無機被膜は，りん酸エステルと会合体を形成することによって油に可溶化したりん酸と鉄表面との反応に主に起因するものである。また，有機吸着膜は，りん酸エステルによるものであ

る。りん酸エステルだけでも，また，りん酸鉄被膜があってもりん酸エステルが共存しないと性能が低い（Fig. 8）ことから，りん酸エステルとりん酸とを配合した系における優れた焼付き防止性能は，このような複合被膜の形成に基づく相乗効果に起因するものと考えられる。その際，りん酸鉄被膜は焼付き防止に直接的に作用し，また，りん酸エステルの吸着膜は摩擦の低下を通して焼付き防止に寄与していると推察される。

## 4．鉄系材料に対する腐食の抑制

冷間鍛造油に要求される優れた焼付き防止性能を得るには，試料油の反応性を上げることが有効である。しかし，これは金属材料に対する腐食性の増大につながる。鉄系材料に対して腐食性の高い潤滑油は，金型，油槽，配管系等を浸食し，加工機に致命的な損傷を与えてしまう。したがって，いかに焼付き防止性能に優れていようとも，腐食性の高い潤滑油は実用上用いることはできない。高性能な冷間鍛造油の開発において，従来，相反する特性である優れた焼付き防止性能と低腐食性との両立が技術上の壁となっていた。

優れた焼付き防止性能を示す新規な組成である長鎖酸性りん酸エステル（OLAP）とりん酸とを配合した試料油の鉄系材料に対する腐食性，および焼付き防止性能を低下させることのない腐食抑制法について検討を行った[15～17]。

### 4．1　金属りん酸塩配合の効果

室温の試料油（35g）中に鉄試片（SPCC；10×40×0.8mm）を浸漬することによって，試料油の鉄系材料に対する腐食性について検討した。

腐食試験に伴う試片の重量変化を**Fig. 10**に示す。OLAPを1.34wt%Pおよびりん酸を0.54wt%P配合した後120℃で1時間加熱処理した基本組成油（Base composition oil）では，試片の溶け出しによる著しい重量減少を生じており，明らかな腐食の発生が認められる。すなわち，OLAPとりん酸とを配合し加熱処理を施した試料油は，焼付き防止性能には優れているが腐食性が高くそのままでは実用に供することはできない。

一方，基本組成油にりん酸亜鉛（$Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$）を配合した試料油の場合には，試片の重量は減少することなくかえって若干増加している。

腐食試験後の試片の表面状態を**Fig. 11**に示す。基本組成油の場合には，試片表面に激しい荒れを生じているのに対して，りん酸亜鉛配合油の場合には，穏やかな表面状態を呈している。また，XPSおよびEPMA分析により，基本組成油ではりん酸鉄被膜が，りん酸亜鉛配合油ではりん酸鉄とりん酸亜鉛の混合物からなる被膜がそれぞれ試片表面に生じていることが明らかになった。

腐食試片の断面のSEM観察によって得られた腐食深さと反応被膜の厚さとを**Fig. 12**に示す。りん酸亜鉛の配合によって腐食深さは小さくなっており，りん酸亜鉛を0.33wt%Zn以上配合した場合には，測定限界である1$\mu$m以下となっている。

以上のように，基本組成油にりん酸亜鉛を配合することにより，鉄試片の重量は減少することなくかえってりん酸鉄およびりん酸亜鉛からなる被膜の生成によ

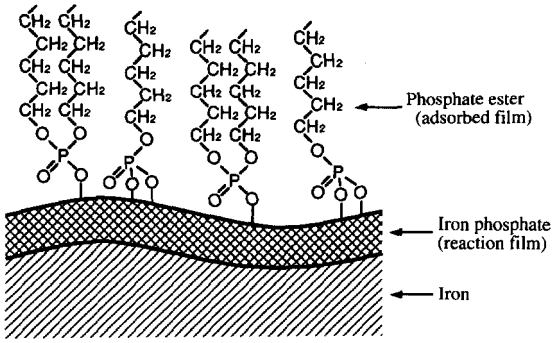



**Fig. 9**　Schematic illustration of surface film formed during cold forging.

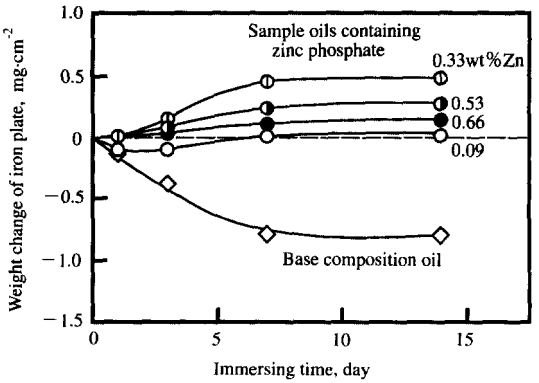



**Fig. 10**　Weight change of iron plate during corrosion test.

って増加し，その際の下地鉄の腐食深さは極めてわずかとなり，また，表面状態も穏やかとなっている。これらのことから，りん酸亜鉛の配合によって，基本組成油の鉄に対する腐食性が抑制されているといえる。

また，ボール通し試験によって，りん酸亜鉛の配合量が0.53wt%Zn以下の試料油においては，maxRに関して12%の優れた焼付き防止性能が維持されていることが明らかになった。すなわち，適切な量(0.33〜0.53wt%Zn)のりん酸亜鉛の配合により，優れた焼付き防止性能と低腐食性との両立を達成することができた。また，良好な腐食抑制剤としての効果は，りん酸亜鉛のみならずりん酸鉄等の他の金属りん酸塩においても認められた[15]。

### 4．2　腐食抑制機構

腐食試片表面のEPMA分析によって得られた腐食試験に伴うりんおよび亜鉛の定量値の変化を**Fig. 13**に示す。りん酸亜鉛配合油においては，相当量のりん酸亜鉛に起因する亜鉛が検出されている。鉄試片表面に析出によるりん酸亜鉛が存在した場合，りん酸と鉄表面との接触は必然的に妨げられる。したがって，りん酸亜鉛配合油においては，りん酸亜鉛の析出による，りん酸鉄生成反応の阻害を生じていると推察される。

また，既に生成したりん酸鉄上にりん酸亜鉛が析出した場合には，りん酸亜鉛による被覆のため，りん酸鉄の油中への溶出も抑制されると考えられる。

これらのことから，りん酸亜鉛等の金属りん酸塩の配合による腐食の抑制の原因として，ひとつには，金属りん酸塩の析出による，鉄試片にとって腐食反応を意味するりん酸鉄生成反応の直接的な阻害および生成りん酸鉄の油中への溶出防止を挙げることができる。

りん酸亜鉛が共存する試料油へのりん酸鉄の溶解性について検討した結果を**Fig. 14**に示す。③の条件での結果から，りん酸鉄とりん酸亜鉛の共存下では，りん酸亜鉛の方が溶解しやすいことがわかる。また，④の条件での結果から，試料油中に既に存在するりん酸亜鉛によってりん酸鉄の溶解が妨げられていることが認められる。

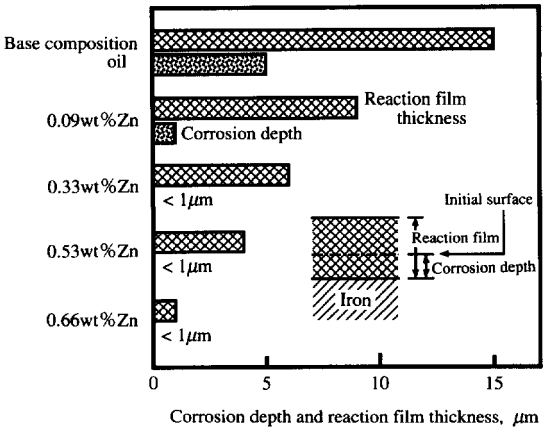



**Fig. 12**　Corrosion depth and reaction film thickness after corrosion test.

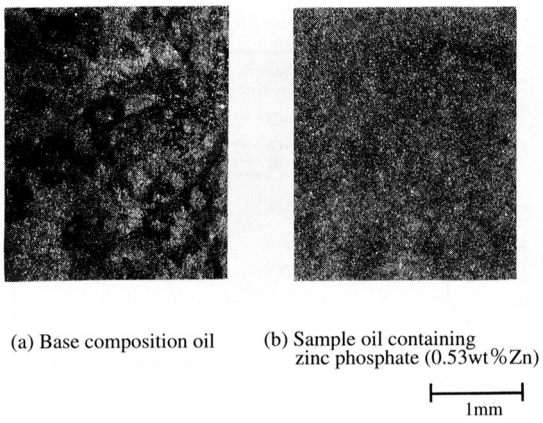



**Fig. 11**　Iron plate surfaces after corrosion test.

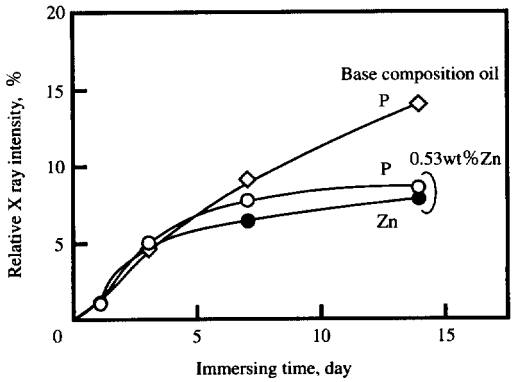



**Fig. 13**　Amount of phosphorus and zinc detected by EPMA on iron plate corroded.

このような結果から，金属りん酸塩の配合による腐食の抑制は，前もって金属りん酸塩を多量に含んだ試料油においては，りん酸鉄の溶解平衡が容易に達成されるため，試料油と試片との反応によって生成したりん酸鉄被膜の油中への溶出が防止されることにも起因すると推察される。その際，試片表面に析出した金属りん酸塩も同様に試料油中に再溶解しにくいと考えられる。それによって，りん酸鉄および金属りん酸塩の混合物からなる被膜は，安定して鉄試片表面を被覆するものと考えられる。

基本組成油における腐食機構および金属りん塩配合油における腐食抑制機構を模式的に**Fig. 15**に示す。基本組成油による鉄試片の腐食は，試片表面におけるりん酸鉄生成反応および生成りん酸鉄の油中への溶解の連続的な発生に起因するものである。金属りん酸塩配合油における腐食の抑制は，金属りん酸塩の析出による腐食反応の阻害および腐食生成物の溶出防止，ならびに溶解平衡を迅速に達成することによる生成被膜の溶出の防止に起因すると要約される。このような機構は，従来の塩基性物質を用いた酸性物質の中和による，試料油の反応性を犠牲にした腐食抑制法[18)]とは異質のものである。

## 5．実用特性

実験室的な評価において，OLAP，りん酸および金属りん酸塩を配合し加熱処理を施した試料油は，当初の目標を満足する，金属石ケン／りん酸塩被膜処理に迫る優れた焼付き防止能と鉄系材料に対する低腐食性とを示した。そこで，試作油を**Table 3**および**Fig. 16**に示す実部品の冷間加工に供することによって，その実用特性について検討した。試作油の組成について

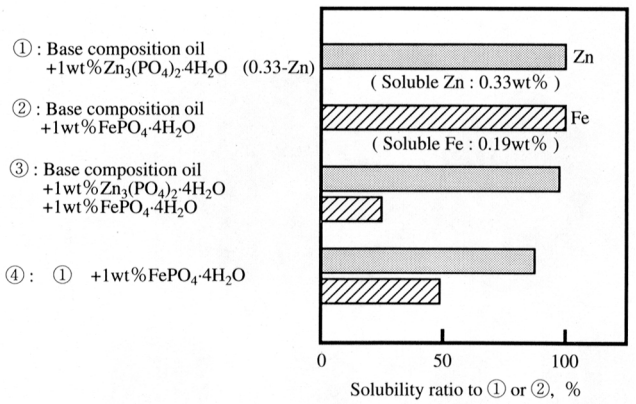



**Fig. 14** Solubility of iron phosphate into oil containing zinc phosphate ( 80℃×1h ) .

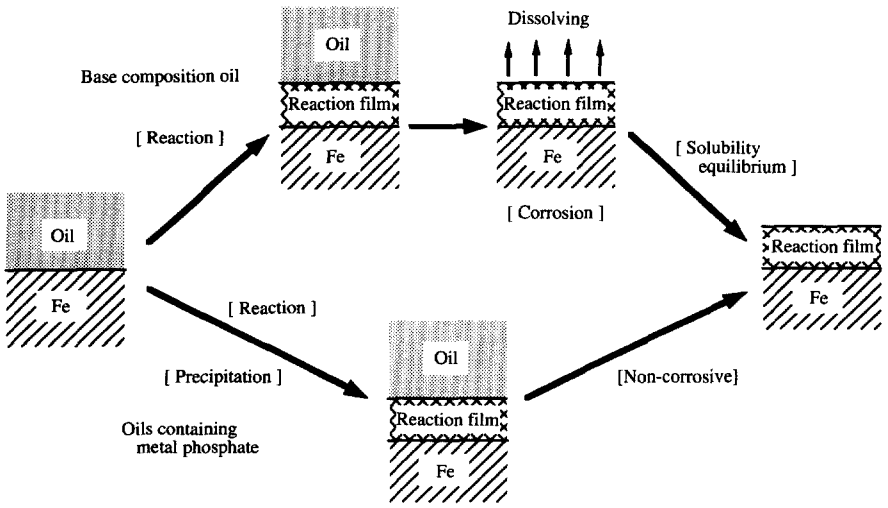



**Fig. 15** Corrosion and corrosion control mechanism.

**Table 3** List of application examples.

| No. | Forming types | Workpiece material |
|---|---|---|
| (1) | Backward extrusion | S10C |
| (2) | Deep drawing and ironing | S10C |
| (3) | Ironing and sizing | S35C |
| (4) | Deep drawing and ironing | Hot rolled mild steel |
| (5) | Ironing and sizing | Hot rolled mild steel |
| (6) | Upsetting and piercing | S15C |

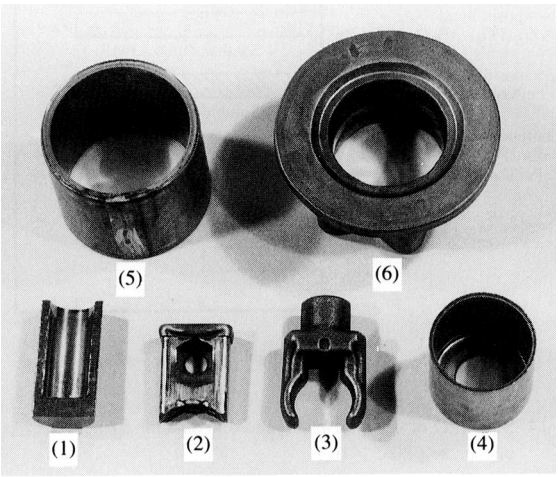



**Fig. 16** Application examples.

は，加工条件の厳しさに応じて，各々適正な添加剤の配合量とした。

これらの部品は，いずれも従来の冷間鍛造油では加工が困難だったものである。しかし，試作油を用いた場合には，焼付きを生じることなく適正な加工を行うことができた。また，加工機およびその周辺に腐食による問題を生じることはなかった。これによって，この試作油が既存の冷間鍛造油をしのぐ優れた焼付き防止性能と低腐食性とを兼ね備えていることが，実験室的評価のみならず実機試験においても確認された。

また，金属石ケン／りん酸塩被膜処理をとりやめ，この試作冷間鍛造油を採用した生産ラインにおいて，コストの低減，潤滑処理のインライン化，潤滑処理スペースの削減等，多大なメリットを生じている。

## 6．おわりに

既存の冷間鍛造油をしのぎ，金属石ケン／りん酸塩被膜処理に迫る焼付き防止性能と鉄系材料に対する低腐食性とを兼ね備えた，初期の目標を満足する潤滑油を開発することができた。実用化も進み，金属石ケン／りん酸塩被膜処理からこの潤滑油への置換により，様々な効果を生み出しつつある。

しかし，現在の冷間鍛造の工程の多くは金属石ケン／りん酸塩被膜処理向きに設計されており，潤滑油には不向きな場合が少なくない。そのため，単に潤滑剤を金属石ケン／りん酸塩被膜から開発油に変更しただけでは，焼付き，寸法精度等の不具合を生じる場合も散見される。金属石ケン／りん酸塩被膜処理を潤滑油に置き換えることによって生じる工業上のメリットは極めて大きい。したがって，今後，開発油の適用範囲を拡大するべく，型設計，表面処理等を含めた総合技術としての最適化の確立が必要になると考えられる。

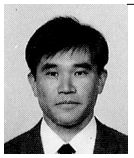
## 参 考 文 献

1) 冷間鍛造ハンドブック, 工藤英明, 大和久重雄監修, (1973), 7, アグネ
2) Phillips, R. W. : AES Annu. Tech. Conf. Proc., **72** (1985), M 2. 1
3) 水谷巖 : 熱処理, **21**-5(1987), 296
4) 園田栄, 土屋豊 : 潤滑, **33**-7(1988), 514
5) Kaiser, H. : Proc. 13th Int. MTDR Conf., (1972), 555
6) Komatsuzaki, S., Nakano, F., Uematsu, T. and Nakahara, T. : Lubr. Eng., **41**(1985), 98
7) Ohmori, T., Kitamura, K., Danno, A. and Kawamura, M. : Wear, **155**(1992), 183
8) Mori , S. and Imaizumi, Y. : Tribol. Trans., **31**(1988), 449
9) 大森俊英, 北村憲彦, 団野敦, 川村益彦 : トライボロジ

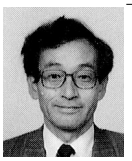
スト, **36**-6(1991), 452
10) 大森俊英, 北村憲彦, 団野敦, 川村益彦 : トライボロジスト, **36**-10(1991), 792
11) 大森俊英, 北村憲彦, 団野敦, 川村益彦 : トライボロジスト, **36**-10(1991), 799
12) Ohmori, T., Kitamura, K., Danno, A. and Kawamura, M. : Tribol. Trans., **34**-3(1991), 458
13) 例えば, Barcroft, F. T. and Daniel, S. G. : Trans. ASME Ser. D, **87**(1965), 761
14) Jahanmir, S. : Wear, **102**(1985), 331
15) 大森俊英, 北村憲彦, 団野敦, 川村益彦 : トライボロジスト, **37**-3(1992), 230
16) 大森俊英, 北村憲彦, 団野敦, 川村益彦 : トライボロジスト, **37**-3(1992), 237
17) Ohmori, T., Kitamura, K., Danno, A. and Kawamura, M. : Proc. Jpn. Int. Tribology Conf., Jpn. Soc. of Tribologists, Nagoya, (1990), 1767
18) 石油製品添加剤, 桜井俊男編, (1973), 201, 幸書房

## 著 者 紹 介

**大森俊英　　Toshihide Ohmori**
生年：1959年。
所属：トライボロジ研究室。
分野：潤滑油の研究・開発。
学会等：日本トライボロジー学会，日本塑性加工学会会員。
1991年日本潤滑学会 ( 現日本トライボロジー学会 ) 論文賞受賞。
1991年R&D100 受賞。



**北村憲彦　　Kazuhiko Kitamura**
生年：1958年。
所属：材料1部 加工プロセスグループ。
分野：塑性加工の潤滑に関する研究開発。
学会等：日本機械学会，日本塑性加工学会，日本トライボロジー学会会員。
1991年R&D100 受賞。



**団野敦　　Atsushi Danno**
生年：1941年。
所属：材料1部。
分野：塑性加工プロセスに関する研究・開発。
学会等：日本塑性加工学会，日本機械学会会員。
1969, 1988年日本塑性加工学会論文賞受賞。
1991年R&D100 受賞。
工学博士。

**川村益彦　　Masuhiko Kawamura**
生年：1939年。
所属：情報特許部。
分野：資料，調査，特許関連業務。
学会等：日本トライボロジー学会，日本化学会，自動車技術会，Am. Chem. Soc. 会員。
1991年日本潤滑学会 ( 現日本トライボロジー学会 ) 論文賞受賞。
1991年R&D100 ( 2件 ) 受賞。
工学博士。