

# アルミニウム合金の耐摩耗性改善を目的とした表面改質処理

及川 渉，竹内榮一，宅見 章，善林智範，石川祥久  
小室文稔，椛沢 均

## 受賞記念講演会シリーズ

## アルミニウム合金の耐摩耗性改善を目的とした表面改質処理

及川 渉\*, 竹内榮一\*, 宅見 章\*, 善林智範\*, 石川祥久\*  
小室文穂\*\*, 椋沢 均\*\*\*

\*日本プレーテック(株)(〒329-2756 栃木県那須塩原市西三島 7-334)

\*\*(株)ムロ・コーポレーション鳥山工場(〒321-0627 栃木県那須烏山市南 1-12-25)

\*\*\*(株)日本テクノ(〒349-0133 埼玉県蓮田市閩戸 3986)

## On the Surface Modification for Wear Resistance of Aluminium Alloys

Wataru OIKAWA\*, Eiichi TAKEUCHI\*, Akira TAKUMI\*, Tomonori ZEMBAYASHI\*  
Yoshihisa ISHIKAWA\*, Fumitoshi KOMURO\*\*, Hitoshi KABASAWA\*\*\*

\*Nippon Platec Co., Ltd.(7-334, Nishimishima, Nasushiobara-shi, Tochigi 329-2756)

\*\*Muro Corporation(1-12-25, Minami, Nasukarasuyama-shi, Tochigi 321-0627)

\*\*\*Nihon Techno Co., Ltd.(3986, Uruido, Hasuda-shi, Saitama 349-0133)

**Keywords** : Iron Alloy Plating, Diffusion Treatment, Sulphonitriding, Crack on Plating  
Face, Friction, Wear Resistance, Aluminium Alloys

## 1. はじめに

自動車をはじめとする輸送機類は省資源、省エネルギー、あるいは地球温暖化抑制などの観点から、重要な一つの手法として軽量化が進められ、この目的に沿い、かつ、リサイクルの面をも含めて Al 合金の活用が効果的と考えられている。しかしこの場合、機能部品の材料として利用するときは、機械的な強さの上から検討の余地が十分残されている。例えば、摺動部材として用いるに当たっては耐摩耗性改善のための表面改質処理が必要となる。

Al 合金の耐摩耗性を目的とした表面改質処理には古くから行われてきた陽極酸化処理をはじめ、プラズマ窒化、イオンビームミキシングなど多くの方法が挙げられる<sup>1)</sup>。

さて、ここで述べる開発技術は汎用技術として一般に普及されている電気めっきによる鉄系合金めっき、ならびにこれに熱拡散処理、あるいは窒化系の表面熱処理に属するガス浸硫酸窒化処理を複合させることにより、めっき皮膜の密着性の強化および耐摩耗性に優れた表面層を得ることを目的として開発を試みたものである。

以下、その結果について述べる。

## 2. Al 合金への Fe および Fe-Cr 合金めっき

## 2.1 めっき条件の決定

めっき条件の設定は、まず、ハルセル試験法にしたがってめっき液の組成、液温、電流密度などを検討し、表 1 に示す

ような Fe および Fe-8%Cr 合金めっき条件を決定した。以下、これらの条件に従ってめっき処理を行った。なお、Fe めっきの場合、液の主要成分である硫酸第一鉄の代わりに塩化第一鉄を主要成分とするときは 300 HV 程度の軟質な Fe めっき層を得ることが可能となる。

## 2.2 めっき下地の検討

Al 合金に Fe もしくは Fe-Cr 合金めっきを施す際、めっき層の密着性を向上させる観点から下地めっきの影響を検討した。試験片は幅 30×長さ 120×厚さ 1mm の Al1100P 材を用い、下地めっきに Ni(厚さ 7~8 $\mu$ m)または無電解 Ni-P めっき(厚さ、約 2 $\mu$ m)を施した上に Fe めっきしたもの、および、直接 Al 上に Fe めっきを行ったものを作製した。このときの Fe めっき層の厚さは 3 者とも約 10 $\mu$ m である。

密着性の評価は加熱-冷却方式によって行った。すなわち、N<sub>2</sub> 雰囲気中、560°C で 5h 加熱後、20°C の水中に急冷し、めっき層のはく離状態を観察した。その結果によると、下地

表 1 Fe および Fe-8% Cr 合金めっきのめっき条件

試験, 測定項目	Fe めっき	Fe-8% Cr 合金めっき
めっき液組成	硫酸第一鉄	250 g/dm <sup>3</sup>
	塩化第一鉄	40 g/dm <sup>3</sup>
	塩化アンモニウム	20 g/dm <sup>3</sup>
	L-アルコピン酸	3 g/dm <sup>3</sup>
	クエン酸	1 g/dm <sup>3</sup>
めっき液組成		塩基性硫酸クロム(III) 200 g/dm <sup>3</sup> 硫酸第一鉄 40 g/dm <sup>3</sup>
電流密度 (A/dm <sup>2</sup> )	2	5
液温 (°C)	40~50	40~50
めっき時間 (min)	60	35
めっき厚さ ( $\mu$ m)	約 20	約 20
めっき硬さ (HV)	500~700	750~800

† 第 113 回講演大会(会期:平成 18 年 3 月 15 日~17 日, 会場:東洋大学川越キャンパス)における「平成 18 年度技術賞受賞記念講演会」での講演内容をまとめたものである。

にNiめっきを施したものはNiめっき層から完全にはく離を起こしている。また、これほどではないが、Ni-Pめっき下地のものは素地のAlと下地めっき層の界面からはく離寸前の状態にあるものが多く認められた。

これに対して、Al素地に直接Feめっきを施したものはAlとFeの熱膨張率の違いからFeめっき面に50~100 $\mu$ mの大きさをもった亀甲模様の亀裂が観察されるが、剝離現象は全く検出されなかった。

これらの結果から、以下の実験はすべてAl合金素地に直接FeまたはFe-Cr合金めっきを施すこととした。

2.3 めっき-拡散複合処理

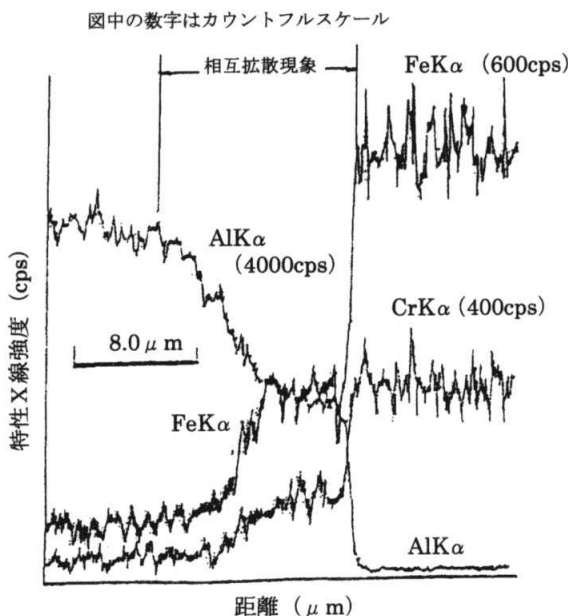
めっき界面における素地金属とめっき金属との相互拡散はめっき皮膜の密着性を強化するうえから極めて有効な手法といえる。図1は一例としてA5052PにFe-8%Cr合金めっきを施したのち、N<sub>2</sub>雰囲気中500°Cで3h拡散処理したもので、めっき界面をEPMAにより線分析を行った結果、約10 $\mu$ mの相互拡散層が認められる。この状態からみて、めっき皮膜の密着強さは極めて高いものと判断された。

これに加えて、先にも述べたごとく素地のAl合金とめっき層を構成するFe合金との熱膨張率の相違から、加熱の過程でめっき面に図2に示すような大きさ50~80 $\mu$ m、亀裂幅3 $\mu$ m前後の亀甲模様を呈する亀裂が発生するが、潤滑下の摩擦過程において亀裂が油道としての役割を果し、低摩擦、耐摩耗性の改善に優れた状態が維持されるものと推察される。なお、この現象は次項で述べるガス浸硫窒化処理したものにも認められる。

2.4 めっき-浸硫窒化複合処理

窒化系の表面熱処理のうちから、凝着抑制作用に優れた特性を有するガス浸硫窒化処理を選び、採用した<sup>2)~4)</sup>。

厚さ15~20 $\mu$ mのFeあるいはFe-8%Cr合金めっきを施



Fe-8%Cr合金めっき(約20 $\mu$ m)  
拡散条件; 500°C-3h 窒素雰囲気中で処理

図1 500°C-3h, N<sub>2</sub>雰囲気中で拡散処理を施したFe-8%Cr合金めっき層とAl合金素地との界面に現れた相互拡散現象

したものについて、450および500°Cで3~5hガス浸硫窒化処理を行った。使用した雰囲気はNH<sub>3</sub>, 15L/minと浸硫性ガス(N<sub>2</sub>で希釈されたH<sub>2</sub>S; 667ppm)0.33L/minの混合雰囲気である。また、処理終了後は酸化を防ぐため常温までN<sub>2</sub>の流気中で冷却した。

図3は一例として500°Cで3h処理したFe-8%Cr合金

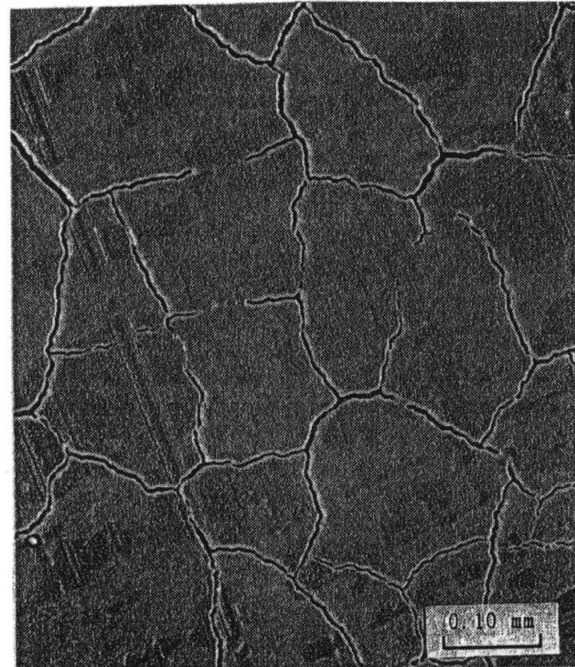


図2 400°C-1h真空中で加熱した際、Fe-8%Cr合金めっき面に現れた亀甲模様の亀裂

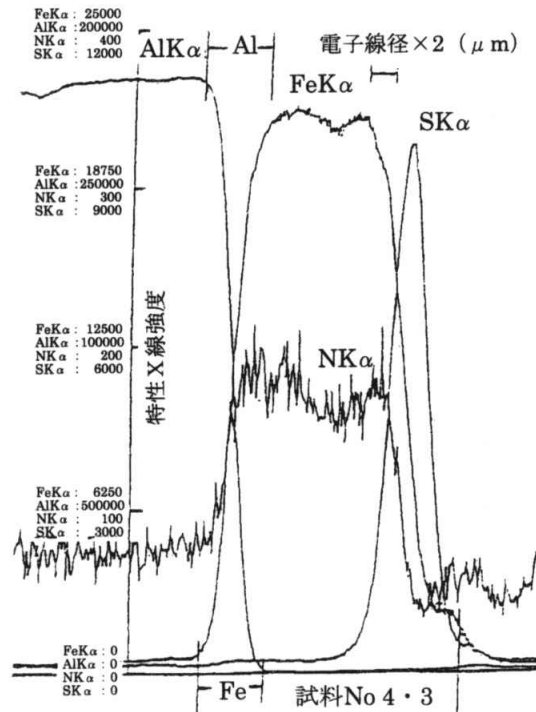


図3 500°C-5hガス浸硫窒化処理したFe-8%Cr合金めっき層内のNおよびSの浸入状態とめっき界面における相互拡散現象

めっき層の窒素ならびに硫黄の侵入、拡散状態をEPMAにより線分析を行った結果である。これによると、表面より数 $\mu\text{m}$ の厚さをもったS K $\alpha$ 線強度の高い層が存在し、X線回折により同定された反応生成物は $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ 、 $\text{FeS}$ から成り、その下層のN K $\alpha$ 線の高い領域からは $\epsilon\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ 、 $\gamma'\text{Fe}_4\text{N}$ の存在が認められた。また、めっき界面における相互拡散層の厚みは約 $2\mu\text{m}$ で、前掲図1の $\text{N}_2$ 雰囲気中での拡散層の厚みに比較して1/5程度となる。これは窒化物から成る層の生成によりFe中におけるAlの拡散が抑えられたためと考えられる。なお、これと同様な現象はFeめっき皮膜からも観察される。

また、これらの処理によって得られた化合物層の厚みを光学顕微鏡により計測するとFeめっきの場合は $20\mu\text{m}$ 弱、Fe-8%Cr合金めっきのものは $15\sim 18\mu\text{m}$ となり、処理温度の高いものほど厚くなる傾向がみられる。

化合物層の硬さについては、 $500^\circ\text{C}$ で処理したFe-8%Cr合金めっき層が $1100\sim 1150\text{HV}$ で最も硬く、Feめっき層は $770\sim 840\text{HV}$ であった。

### 3. Fe合金めっき層の摩擦・摩耗特性

#### 3.1 摩擦・摩耗試験の方法<sup>5)</sup>

摩擦・摩耗試験は図4に示す試験片を用い、鈴木式摩耗試験機に類似した摩擦方式、機能をもつ試験機により潤滑すべり摩擦・摩耗試験を行った。

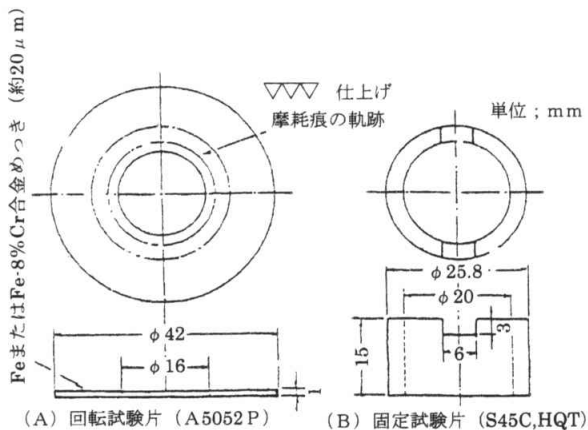


図4 試験で使用した摩擦・摩耗試験片

試験条件は接触圧力を $0.196\text{MPa}$ に一定とし、高負荷条件の試験に限り $0.49\text{MPa}$ とした。また、摩擦速度は $0.50\sim 4.00\text{m/s}$ の範囲で変化させ、摩擦距離 $50000\text{m}$ を限度として、試験の過程で摩擦係数が $0.20$ 以下の値を維持している状態までの連続摩擦距離、ならびにその時点での比摩耗量と摩耗痕の深さを計測した。したがって、試験の途中で瞬間的にでも摩擦係数が $0.20$ を超える値が計測されたときはその時点で試験を中止し、比摩耗量などを測定した。

試験では、まず実験を始める直前に約 $20^\circ\text{C}$ に保たれた潤滑油(7.5W30SE)の中へ回転試験片(表面処理を施したA5052P)を15s浸漬し、次にこれを取り出して10s垂直に保持(以後、これを1回塗布と記す)することにより余分な油を除去したのちに試験機に取り付け、所定の負荷を掛けて摩擦・摩耗試験を行った。なお、この試験方式の欠点は摩擦速度、すなわち、回転試験片の回転数が高くなるにともなって遠心力により油が飛散することであり、これが摩擦、摩耗に影響を齎すことが予測されるが、今回の試験では特にこのための補正は行っていない。

回転試験片の比摩耗量ならびに摩耗痕の深さは触針式仕上げ面粗さ試験機を活用して、直径方向に沿って8箇所摩耗痕の形態(摩耗痕の幅と深さ)を測定し、その値から平均値を算出した。なお、これと組合せる固定試験片は焼入焼戻処理により、組織を微細パーライトとしたS45Cで、均質材であると仮定して化学天秤により摩耗減量を秤量し、その結果から比摩耗量を計算により求めた。なお、このときの比重を $7.8\text{g/cm}^3$ とした。また、焼入焼戻により微細パーライトとしたことは摩擦面温度が焼戻温度(この実験では $600^\circ\text{C}$ )に達するまでは組織変化が起こらず、これによって試験結果に及ぼす不安定要素を軽減させたものである。

#### 3.2 めっき皮膜の摩擦・摩耗特性

まず、FeめっきおよびFe-8%Cr合金めっきを施したままのものについて摩耗試験を行った。

この場合、Feめっきの表面には亀甲模様の亀裂は認められないが、Fe-8%Cr合金めっき面には前掲図2と類似の形状をもった大きさ $100\sim 150\mu\text{m}$ 、亀裂幅 $1\mu\text{m}$ 程度の亀甲模様をもった亀裂が観察される。

図5は一例としてFe-8%Cr合金めっきを施したままの試験片について摩擦特性を検討した結果を示したものである。

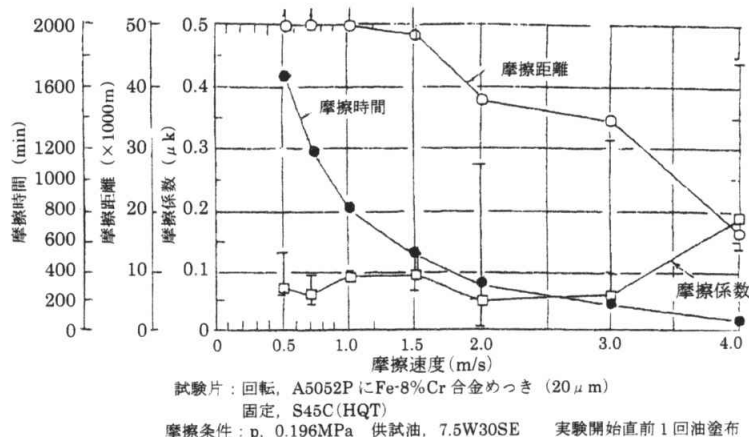


図5 Fe-8%Cr合金めっきを施したA5052Pの潤滑・すべり摩擦特性

これによると、摩擦速度0.50~1.00m/sでは摩擦係数が0.06~0.10の範囲に安定した状態が摩擦距離50000mまで維持される。しかし、これよりも高速の1.50m/sになると距離49000m付近で瞬間的ではあるが摩擦係数が0.20を越える現象がみられるようになり、この時点で試験を中止した。なお、この現象は摩擦速度が高くなるほど短距離側で発生するようになる。たとえば、速度4.00m/sでは距離14500m付近で0.20を超す摩擦係数が認められた。

これに対して、めっき時に亀裂が存在しないFeめっき試験片では摩耗の進行が著しく、速度0.50m/sにおいて摩擦係数が0.20を超える状態が観察された。

以上の結果から、めっきしたままのものでも、めっき面に亀甲模様の亀裂が存在するものは、それが大きく、かつ、亀裂幅が細いものであっても油道としての役割を果し、低摩擦でしかも耐摩耗性に優れた状態の得られることが確認された。

### 3.3 熱拡散処理を施しためっき皮膜の摩擦・摩耗特性

2.2項で述べたようにめっきと熱拡散処理を複合させたものは、まず、めっき界面において素地金属とめっき金属との間に相互拡散が起こり、このためにめっき皮膜の密着強さが著しく改善されることおよび、素地のAl合金とめっき皮膜のFe合金とは熱膨張率が異なるため、めっき面には前掲図2にみられるような亀甲模様を呈する亀裂が発生し、潤滑

下においてこれが油道となるなど、潤滑・すべり摩擦の観点から何れの現象も有効といえる。

図6はFeめっき後、N<sub>2</sub>雰囲気中、500°Cで3h熱拡散処理を施した回転試験片を用いて摩擦・摩耗試験を行ったときに得られた摩擦特性を示したものである。これによると、めっき面に現れた亀甲模様の亀裂は先にも述べたごとく一辺が50~80μmに細分化され、かつ、亀裂幅が約3μmに拡張されていることから、油道としての効果はさらに大きくなり、速度0.50~2.00m/sでは距離50000mまで摩擦係数が0.20を超すことはなく、概ね0.05~0.10の範囲に安定した値を採ることが認められた。しかし、これよりも高速域では0.20以上の摩擦係数の現れる距離が急激に減少し、速度400m/sでは5000m付近で摩擦係数の0.20以上に達する現象が観察された。

これに対して、Fe-8%Cr合金めっきを施したのち500°Cで3h拡散処理を行ったものは図7に示すように速度2.50m/s以下の領域で距離50000mまで摩擦係数が0.20を超すことはなく、0.04~0.07の範囲に安定していることが認められた。しかしながら、これよりも高速域では摩擦係数の平均値が約0.05を維持しているにも拘らず、瞬間的には0.20を超えることがあり、その距離は47000~43000mで、前掲図6のFeめっきと比べて明らかに摩擦挙動に相違がみられ

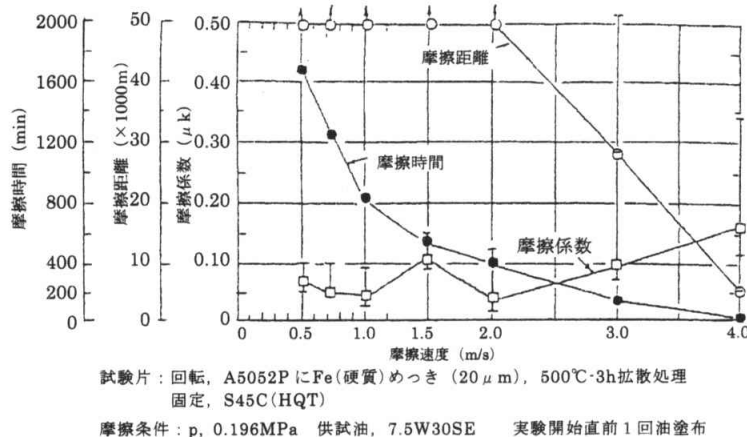


図6 500°C-3h熱拡散処理を施したFeめっき皮膜の潤滑・すべり摩擦特性

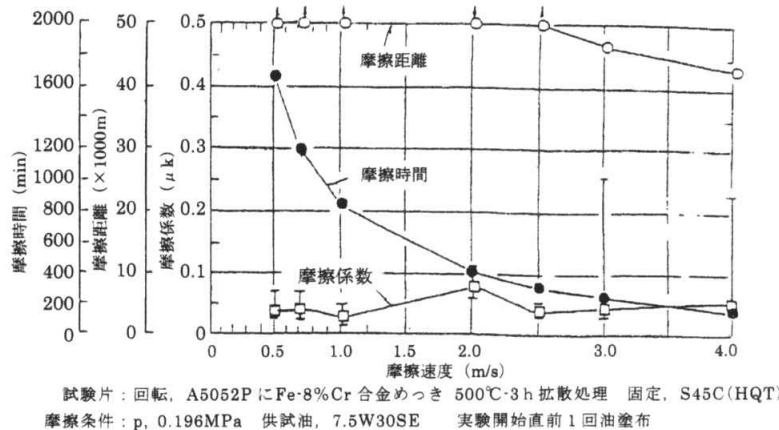


図7 500°C-3h熱拡散処理を施したFe-8%Cr合金めっき皮膜の潤滑・すべり摩擦特性



た。

図8はこのときの摩耗特性を現わしたものである。この結果によると、回転試験片の比摩耗量は速度0.50~2.00 m/sの範囲においておおよそ $5 \times 10^{-11}$  mm<sup>3</sup>/N.mmで、これを摩耗痕の深さで現わすと約0.50 μmとなり、明らかにめっき層内での摩耗ということになる。また、これよりも高速側では速度が高くなるにともなって摩耗損失には増加の傾向がみられるようになる。しかしこの場合、摩耗が最も激しく起こる速度4.00 m/sでも摩耗痕深さは3.0 μm程度で、前述と同様、めっき層内の摩耗を現わしている。

これに対して、相手側の固定試験片の摩耗は極めて微量で、おおよそ $6 \times 10^{-15}$ ~ $2 \times 10^{-13}$  mm<sup>3</sup>/N.mmの範囲にある。

### 3.4 めっき-ガス浸硫窒化複合処理皮膜の摩擦-摩耗特性

めっき層の表面改質とめっき界面の相互拡散による密着強さの改善を兼てFeおよびFe-8%Cr合金めっきを施した回転試験片を500°Cで3hガス浸硫窒化処理し、これらについてすべり摩擦・摩耗試験を行った。なお、表面層の状態は概ね前掲図2および3と同じである。

図9はFe-8%Cr合金めっきの回転試験片について摩擦特性を求めたもので、速度2.50 m/s以下の速度界域では摩擦

係数の平均値が0.02~0.03で、連続摩擦距離50000 mまで瞬間的といえども0.20を越すことはない。しかし、3.00 m/sより高速側では50000 mに達する以前に0.20を越す摩擦係数が現れるようになる。しかしこの場合でも、摩擦係数の平均値は0.04~0.05の低い値を示す。これを前掲図7の熱拡散処理したものと比較すると約1/2の低い値となっている。この現象は浸硫窒化処理によってめっき層の表面付近に生成されたFeS, Fe<sub>1-x</sub>Sなどの硫化物の影響で、これら反応性生物の存在により摩擦面間で生ずる凝着現象が抑制されたことに起因している。

また、このときの摩耗特性を図10に示す。これによると摩擦速度2.50 m/s以下の領域における比摩耗量は $4 \sim 7 \times 10^{-11}$  mm<sup>3</sup>/N.mmの範囲にある。この値を摩耗痕の深さをもって表すと0.40~0.70 μmで、摩耗は浸硫窒化層内で起きていることを現わしている。しかし、これよりも高速側では激しい摩耗が現れ、比摩耗量は3.00 m/sのとき $3.5 \times 10^{-9}$  mm<sup>3</sup>/N.mm、また4.00 m/sでは $10^{-8}$  mm<sup>3</sup>/N.mmとなり、いずれも摩耗痕深さは図中に記載してあるようにめっき層の厚さよりも大きく、めっき皮膜は完全に摩耗損失していることを現わしている。この主な原因として挙げられるものに摩耗粉末として脱落した硬質の窒化物が摩擦面間に介在し

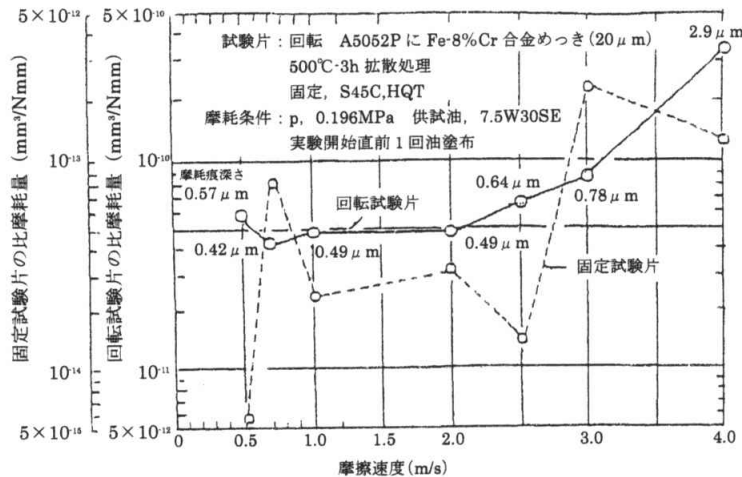


図8 500°C-3h熱拡散処理を施したFe-8%Cr合金めっき皮膜の潤滑・すべり摩耗特性

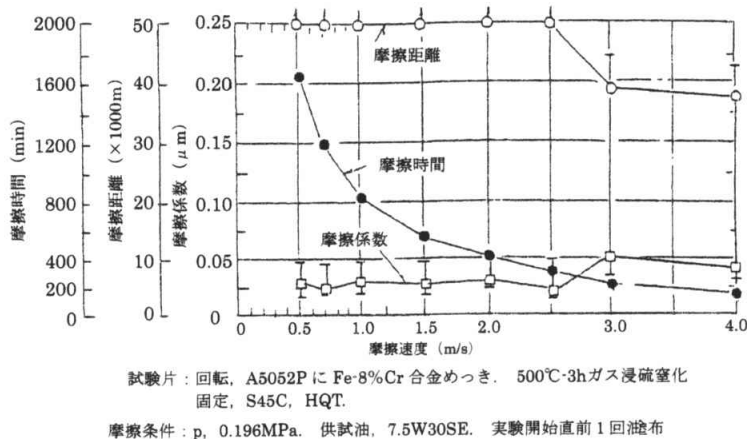


図9 500°C-3hガス浸硫窒化処理を施したFe-8%Cr合金めっき皮膜の潤滑・すべり摩擦特性

てアプレシブ摩耗を生じたためと判断される。

他方、固定試験片の損耗は傾向的には回転試験片のそれと類似しているが、前述と同様極めて少ないことが認められた。

### 3. 5 高負荷条件下の摩擦・摩耗特性に及ぼす複合処理の影響

高負荷条件といえども素地がAl合金である関係から鉄鋼材料を対象とするような負荷は難しいと判断し、この試験では接触圧力を0.49MPaとしたときのFe系合金めっきの潤滑・すべり摩耗試験を行った。

試験では上述の結果から最も優れた摩擦・摩耗特性を有する500°Cで3hガス浸硫窒化処理を施したFe-8%Cr合金めっき処理のA5052P回転試験片について検討を加えた。このときの試験条件は接触圧力を除き、他は前述までのものと同じである。

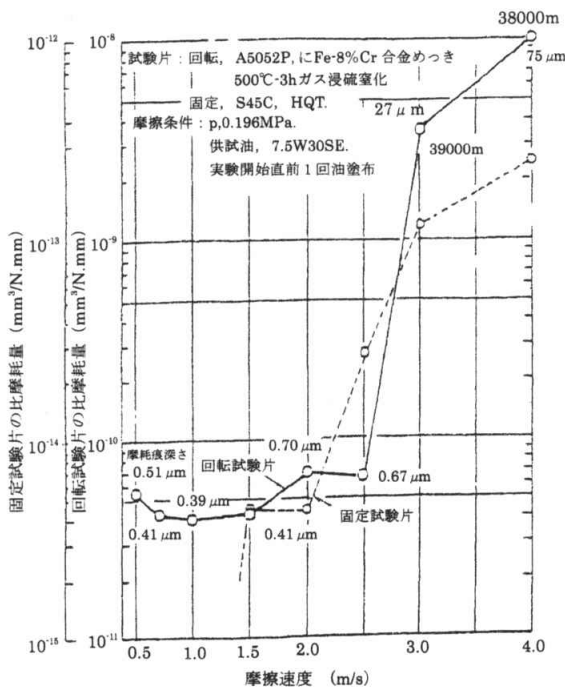


図10 500°C-3hガス浸硫窒化処理を施したFe-8%Cr合金めっき皮膜の潤滑・すべり摩耗特性

図11に摩擦特性を検討した結果を示す。これによると、速度0.30~1.50 m/sの低速域では距離50000mまでの連続運転で摩擦係数は約0.025にほぼ一定した状態が保たれ、0.20を超すことはない。しかしこれよりも高速側では摩擦係数の平均値が0.03~0.06の範囲にあるにも拘らず、瞬間的であっても0.20を超す現象がみられるようになる。たとえば、摩擦係数の平均値が0.03の速度2.00 m/sでは距離38000m付近で、また速度3.00または4.00 m/sでは何れも距離12000m前後において0.20を超す状態が観察されるようになる。殊に4.00 m/sではその値が約0.38にまで達する。

この結果から、広範囲に亘る摩擦条件の下において摩擦係数の平均が低い値を保ち得ることは、前述と同様、浸硫窒化処理によって摩擦面に生成された硫化物による凝着抑制効果、ならびにその下層に存在する硬質な窒化物の強化作用によるものと考えられる。

次に上述の試験で得た摩耗特性を図12に示す。これによると、摩擦係数が0.025に安定している速度1.50 m/s以下における比摩耗量はおよそ2~4×10<sup>-11</sup> mm³/N·mmで、このときの摩耗痕深さは0.54~0.78 μmの範囲にあり、何れも浸硫窒化層内の摩耗である。

しかし、摩擦係数が0.20を超えるような現象が現れるようになると摩耗損失も激しくなり、速度の増すにともなって比摩耗量は急激に増加する。すなわち、速度2.00 m/sでは1.5×10<sup>-9</sup> mm³/N·mm、また、4.00 m/sでは1.5×10<sup>-8</sup> mm³/N·mmとなる。これを摩耗痕の深さをもって現わすと、図中に記載したように25~85 μmとなり、何れもめっき層が完全に損耗し、Al合金素地の摩耗となる。

## 4. Al合金への表面改質技術の応用例

### 4. 1 ピストンへの応用

自動車や自動2輪車の軽量化を目的としてAl合金をはじめとする軽合金や合成樹脂類が構造材あるいは機能材料として広く利用される傾向にある。

本技術応用の対象として先ずピストンが挙げられる。すなわち、最近、シリンダーライナーレスのエンジンが検討され、このためAl合金同士の組合せを避けることからシリンダー

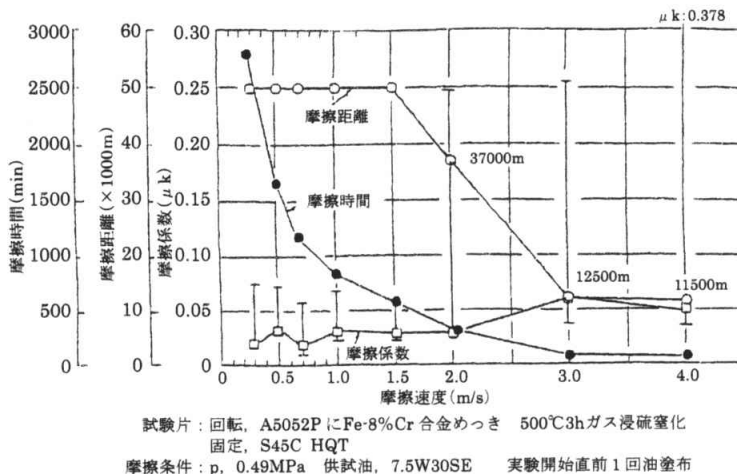


図11 500°C-3hガス浸硫窒化処理を施したFe-8%Cr合金めっき皮膜の高負荷条件下における潤滑・すべり摩擦特性

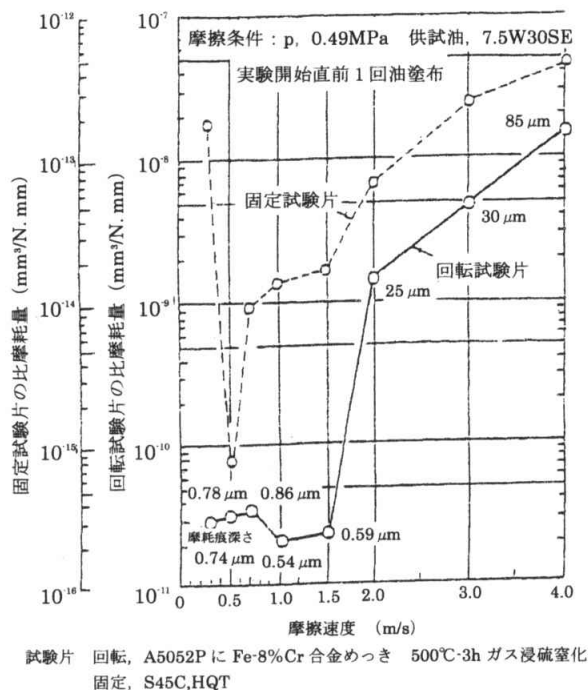


図12 500°C-3h ガス浸硫窒化処理を施したFe-8%Cr合金めっき皮膜の高負荷条件下における潤滑・すべり摩耗特性

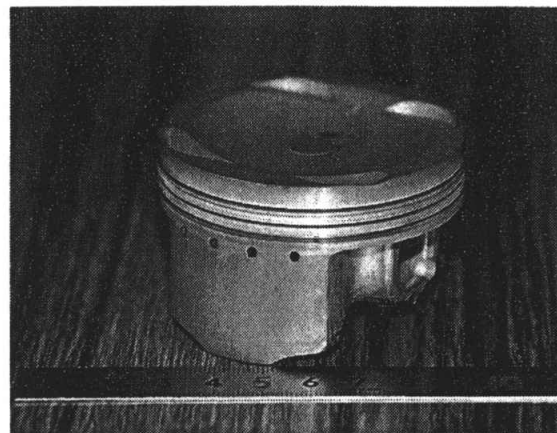


図13 スカートの部分にFeめっきを施したピストン(次工程でSnめっきを施し, 完成)

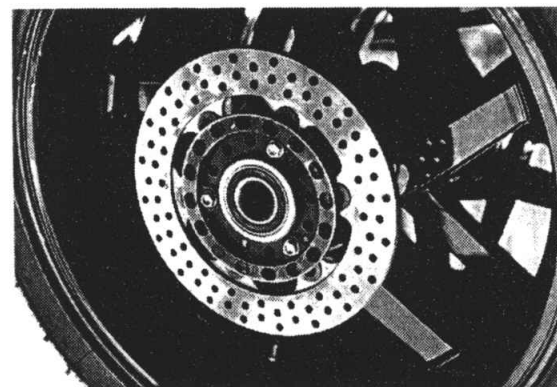


図14 Fe-8%Cr合金めっき後, ガス浸硫窒化処理を施したブレーキディスク(レース終了後のディスクには摩耗痕はほとんど検出されない)

もしくはピストンの何れか一方の摺動面に耐摩耗性のための表面改質処理が必要となる。この開発研究ではこの目的に沿ってピストンのスカートの部分に厚さ約15 $\mu\text{m}$ のFeめっきを施し, 一部の自動2輪車に適応し, 国内は勿論, 海外でも生産, 販売している。図13にFeめっきしたピストンを示す。通常はこれに初期なじみをよくするため厚さ2~3 $\mu\text{m}$ のSnめっきを施したものが実用に供されている。

#### 4. 2 レース用自動2輪車のブレーキディスクへの応用

従来, レース用自動2輪車のブレーキディスクには鉄鋼材料が汎用されてきた。そのためコーナリングにはディスクの遠心力が大きく作用し, ドライバーにとっては大きな負担となる。これを軽減させる目的から特殊な組成, 方法をもってAl合金から成るディスクを製造し, これに優れた耐摩耗性と適正な制動性を持たせるためにFe-8%Cr合金めっき, ガス浸硫窒化の複合処理を施した。図14は2000年, 鈴鹿サーキットで行われたレース終了後のブレーキディスクを示したもので, 摩耗の形跡はほとんど認められなかった。

#### 5. あとがき

機能材料として用いるAl合金の低摩擦, 耐摩耗性を改善するための手法として, 汎用技術に属するFeまたはFe-Cr

合金の電気めっきと熱拡散あるいはガス浸硫窒化を複合させた処理を行うことにより, 潤滑すべり摩擦・摩耗の下で優れた特性を得ることを可能にした。この技術はピストンやブレーキディスクに応用し, 効果を挙げる事ができた。

(2006-6-2 受理)

#### 文 献

- 1) 恒川好樹; あたりあ, 36, 730 (1995).
- 2) 片桐敏夫, 藤井京子, 石渡伸一, 大関泰之, 竹内榮一; 日本金属学会誌, 51, 930 (1987).
- 3) 梶沢 均; 熱処理, 36, 383 (1996).
- 4) 野口奉夫; 熱処理, 38, 198 (1998).
- 5) 竹内榮一, 及川 渉, 小室文稔, 梶沢 均; 熱処理, 44, 239 (2004).