

【中小企業庁長官賞】

鉄合金めっき被膜によるアルミニウム材の
表面改質技術の開発

日本プレーテック（株） 及 川 涉
善 林 智 範
竹 内 榮 一
宅 見 章

素
形
材

第
46
卷

第
12
号

別

刷

「素形材産業技術賞」審査委員会経過報告

素形材産業技術賞表彰選考委員会委員長 中川 威 雄

日本の自動車用素形材技術の底力

素形材技術賞審査委員会は8名の学識経験者で構成されており、4月に公募要領を決定し、6月末に公募を締め切った後、応募業績の書面による審査とヒヤリングによる審査、さらに現地調査による確認を行って、10月には3か月にわたる厳正な審査を終え、経済産業大臣賞1件、中小企業庁長官賞1件、製造産業局長賞1件、素形材センター会長賞3件の合計6件の候補業績を理事会に上申した。

大臣賞は自動車車体プレス金型用や工作機械ベッド用の精密な鋳造を、フルモールド法で効率よく生産するシステムを開発したもので、世界最大規模の生産を誇るにいたっている。また、中小企業庁長官賞は自動車エンジンのピストンのメッキ技術を開発したもので

今後の発展が期待される。また製造産業局長賞は、自動車の鋳物工場の粉塵対策を現場の人達で解決したもので、多くの工場に展開可能な技術である。素形材センター会長賞も高密度ダイカストと高強度鋳鉄と軸受け用樹脂複合材料に関するもので、いずれも日本ならではの高いレベルの開発技術である。

言うまでもなく日本の素形材産業は、自動車の占める割合が高く、そのためもあって最近の仕事量も多く景気は良好であるが、自動車に関連する素形材の技術開発も活発に行われ、今回の受賞対象の素形材技術は、結果として自動車関係が多くを占めた。受賞対象の業績を審査しながら、日本の自動車産業が、現在世界で一人勝ちをしているのも頷ける気がしたし、また日本の自動車産業の国際競争力は今後も当分安泰と思えた。

それにしても素形材製造に代表される“ものづくり”は、奥が深いというかどこまで行っても終わりが無いというのか、つくづく改良の余地が多く、そこがまた日本の素形材産業や自動車産業や機械産業の強さの源ではないかと審査を行いながら感じ入った次第である。

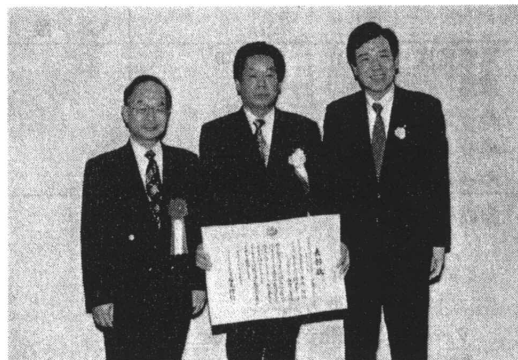
受賞者の皆様や所属する企業や関係者の皆様に、今回の受賞のお祝いを申し上げるとともに、ここまで素晴らしい技術を完成して下さったことに、敬意を表する次第である。是非、今後とも引き続き素形材の技術の更なる発展を目指して頑張ってください、さらに先輩として後進の指導をしていただくことをお願いしたい。



菅野氏 中川委員長 木村氏 金原氏
経済産業大臣賞（株式会社木村鋳造所）



工藤氏 中川委員長 及川氏 宅見氏 善林氏
中小企業庁長官賞（日本プレーテック株式会社）



中川委員長 木崎氏 村井氏（推薦者）
経済産業省製造産業局長賞（トヨタ自動車株式会社）

鉄合金めっき被膜によるアルミニウム材の表面改質技術の開発



日本プレーテック(株) 及川 渉 善林 智範 竹内 榮一 宅見 章

最近の技術動向として自動車等の軽量化が挙げられ、その目的に沿ってAl合金が多用されている。受賞技術はライナーレスのエンジンにおいて、シリンダーとピストンのAl合金同士の組合せを避けるためピストンにFeめっきを施し、耐摩耗性の改善を図ったものである。

本稿では、めっき面の亀裂の油道効果についても言及する。

1. 緒言

自動車を始めとする輸送機類は省資源、省エネルギー、地球温暖化抑制等の観点から軽量化が進められており、このためにはAl合金の活用がリサイクルの面からも効果的と考えられる。しかし、これをピストン等の機能部品の材料として利用する場合、機械的強さのうえから改良の余地が残されている。殊に摺動部に用いるときは、耐摩耗性の改善のための表面改質処理が必要となる。

Al合金の表面改質処理には多くの方法が挙げられるが¹⁾、ここで述べる技術は既に汎用技術として普及

し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を複合させることにより、密着強さ及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したものである。

2. アルミニウム合金の鉄合金めっき方法

2.1 めっき条件の決定

めっき条件は、まず、ハルセル試験法によりめっき条件、すなわち、めっき液組成、液温、電流密度等の検討を行い、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。

表1 FeおよびFe-8%Cr合金めっきのめっき条件と組成分析の結果

試験、測定項目	硬質Feめっき		Fe-8%Cr合金めっき			
	めっき液の組成	硫酸第一鉄 250g/l	塩化第一鉄 40g/l	トライクロムプラス 100%液	硫酸第一鉄 40 g/l	
電流密度 (A/dm ²)	2		5			
液温 (°C)	40 ~ 45		40 ~ 45			
めっき時間 (min)	60		35			
めっき層の厚さ (μm)	約 20		約 20			
めっき層の硬さ (HV)	600 ~ 700		750 ~ 800			
組成分析結果 (蛍光 X 線分析) エネルギー分散方式 ターゲット: Rh、時間: 60s 照射径: 3mm 電流: 50μA、電圧: 15kV			元素			
			回数		Fe (%)	Cr (%)
			1	93.03	6.55	
			2	93.00	6.54	
			3	91.45	8.45	
			4	92.83	6.74	
5	91.69	7.86				

特集

2.2 下地めっきの効果

AlまたはAl合金にFeもしくはFe-Cr合金めっきを施す際、めっき層の密着性改善の観点から下地めっきの影響を検討した。

試料には30×120×1mm厚さのAl100P材を用い、下地めっきの影響を求めするために、Niめっき（厚み：7~8μm）または無電解Ni-Pめっき（約2μm）の下地の上にFeめっきしたもの、および直接Feめっきしたものの3種類について比較検討した。この場合、Feめっき層の厚さは3者とも約10μmである。

次に、加熱、冷却方式によるめっき層の密着性を検討するために、N₂雰囲気中で560℃で5時間加熱後水冷し、めっき層の剥離状態を観察した。それによると、下地にNiめっきを施したものは、Niめっき層からFeめっきが完全に剥離を起こしている。また、これ程ではないが、Ni-Pめっき下地の場合には、素地のAlとNi-P下地めっき層との間が剥離寸前の状態にあることが数多く認められた。

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50~100μmの大きさをもった亀甲模様のき裂が発生するが、剥離現象は全く観察されなかった。

従って以下の実験はすべて直接FeまたはFe-Cr合金のめっきを施すこととした。

2.3 めっき拡散処理

素地金属とめっき金属との界面における相互拡散は、めっき被膜の密着性を強化する上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-

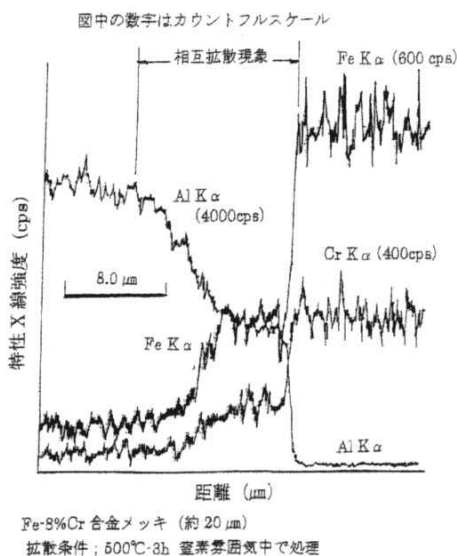


図1 500℃・3h窒素雰囲気中で拡散処理を施したFe-8%Cr合金めっき層とAl合金素地との界面に現れた相互拡散現象

8%Cr合金めっきを施したのちN₂雰囲気中で500℃・3時間の拡散処理を行ったもので、めっき界面をEPMAで線分析した結果、約10μmの相互拡散層が認められた。この状態からみて、めっき被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、素地のAl合金とFe合金めっき層の熱膨張率の相違から、加熱の過程でめっき面に図2に示すような亀甲模様のき裂が発生するが、潤滑下の摩擦において、き裂が油道としての役割をはたし、低摩擦、耐摩耗性に優れた状態が確保されるものと推察される。

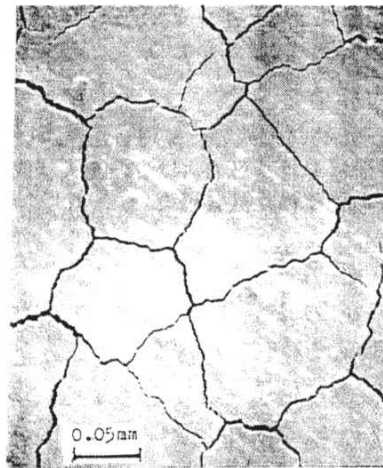


図2 400℃・1h真空中で加熱した際、Fe-8%Cr合金めっき面に現れた亀甲模様のき裂

2.4 めっき-窒化系複合処理

窒化系の表面熱処理には優れた凝着抑制効果を有するガス浸硫窒化処理を採用した^{2) 3)}。厚さ15~20μmのFeあるいはFe-8%Cr合金めっきを施したものについて、450℃または500℃で3~5時間ガス浸硫窒化処理を行った。使用した雰囲気はNH₃ 15 l/minと浸硫性ガス(N₂で希釈されたH₂S: 667 ppm) 20 l/h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N₂雰囲気中で冷却した。

図3は一例として500℃で5時間処理したFe-8%Cr合金めっき層のNならびにSの浸入、拡散状態をEPMAにより観察したものである。また、この試料についてX線回折により反応生成物の同定も併せて行った。これらの結果を総合して検討すると、最表面のS Kα線強度の高い領域はFe_{1-x}S、FeSによって構成され、その下層にあるNKα線強度が高く現れた層はε Fe₂₋₃N、γ Fe₄Nからなることが認められた。また、めっき界面における相互拡散層の厚みは約2μmである。なお、これと同様な現象はFeめっき被膜からも

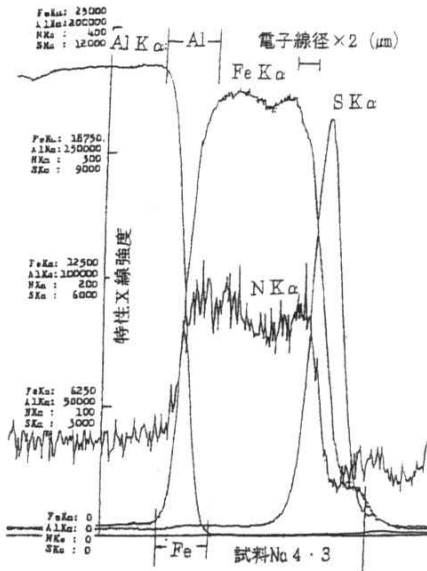


図3 500℃・5hガス浸硫窒化処理したFe-8%Cr合金めっき層におけるNおよびSの浸入状態とめっき界面における相互拡散現象

観察された。

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で計測した結果、Feめっきの場合は20 μm弱、Fe-8%Cr合金めっきでは15~18 μmとなり、処理温度の高いものほど厚くなる傾向があり、化合物層の硬さについては500℃で処理したFe-8%Cr合金めっき層が1,100~1,150HVで最も硬く、Feめっき層は770~840HVであった。

3. 鉄合金めっきの摩擦・摩耗特性

3.1 摩擦・摩耗試験の方法⁴⁾

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ならびに機能を持つ試験機によりすべり摩耗試験を行なった。試験条件は接触圧力を0.196MPa一定とし、高負荷条件のときに限

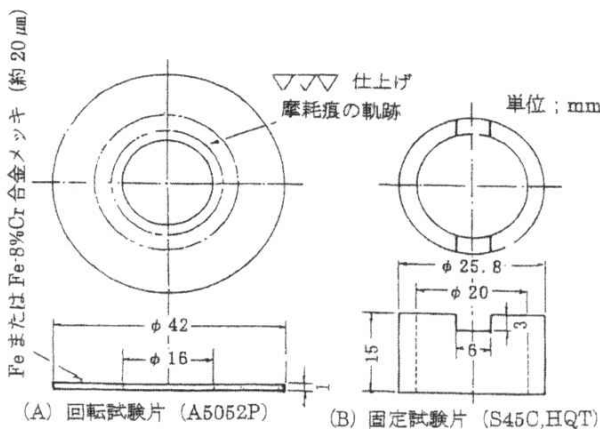


図4 実験に用いた摩擦・摩耗試験片

り0.49MPaとした。また、摩擦速度は0.50~4.00m/sの範囲で変化させ、摩擦距離50,000mを限度として摩擦係数が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。従って実験の過程で瞬間的といえども摩擦係数が0.20を超える値が現れたときは、その時点で実験を中止し、比摩耗量等を測定した。

実験では、まず試験を開始する直前に約20℃に保たれた潤滑油(7.5W30SE)中に回転試験片(表面処理したA5052P)を15秒間浸漬し、次にこれを取り上げて垂直に10秒間保持(以後、これを油1回塗布、と記す)することによって余分な油を除去したのち試験機に取り付け、所定の負荷をかけて摩擦・摩耗試験を行なった。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伴って遠心力により油が飛散することであり、これが摩擦・摩耗に影響を及ぼすことが推察される。

回転試験片の比摩耗量ならびに摩耗痕深さの測定は触針式仕上面粗さ試験機を用い、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、その平均値から算出した。なお、これと組合わせたS45C(HQT;微細パーライト組織)からなる固定試験片は均質体であると仮定して化学天秤により摩耗減量を秤量し、その結果から計算により比摩耗量を求めた。このときの比重は7.8g/cm³とした。

3.2 めっき被膜の摩擦・摩耗特性

予備実験の観点からめっき処理を施したままのものについてすべり摩耗試験を行なった。Feめっきを施した回転試験片のめっき面には亀甲模様のき裂は認められないが、Fe-8%Cr合金めっき面には大きさが100~150 μmの亀甲模様のき裂が検出され、き裂幅は1.0 μmもしくはそれ以下の極めて細いものであった。

図5にめっきしたままの試料の摩擦特性の一例としてFe-8%Cr合金めっき層について検討した結果を示す。これによると、摩擦速度1.00m/s以下の低速条件下では摩擦係数が0.06~0.10の範囲に安定した状態が距離50,000mまで継続される。しかし、これよりも速度の高い1.50m/sになると摩擦距離49,000m付近で瞬間的ではあるが摩擦係数が0.20を越す現象が現れるようになり、この時点で実験を中止した。なお、この現象は摩擦速度が高くなるに伴って短距離側に現れるようになる。例えば、速度4.00m/sでは距離14,500m付近で0.20をこす摩擦係数が認められた。

以上の結果から、めっきしたままのものでも亀甲

模様なき裂が存在するものは、それが大きく、且つ、き裂幅が狭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が得られる。しかしながら、Feめっきの場合はき裂が検出されず、本実験条件の範囲で摩擦係数を0.20以下に保つことは困難であった。

3.3 熱拡散処理を施しためっき被膜の摩擦・摩耗特性

2.3項で述べたようにめっき後、熱拡散処理を施したものはめっき界面に相互拡散現象を生じ、このためめっき被膜の密着強さは改善される。また、素地のAl合金とFe合金めっき被膜との熱膨張率の相違から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き裂が発生する。潤滑すべり摩耗の観点からこれらの現象は有効といえる。

図6はFeめっきをしたのち500℃で3時間窒素雰囲気中で熱拡散処理を施した回転試験片を用いたときの摩擦特性を表したものである。これによると、めっき面に現れた亀甲模様のき裂は一辺が50~80μmに細分化され、且つ、き裂幅も約3.0μmに拡張されるため、油道としての効果がさらに大きく、速度0.50~2.00m/sでは距離50,000mまで摩擦係数が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、これよりも高速側では0.20以上の摩擦係数の現れる距離が急激に減少し、速度4.00m/sでは約5,000m付近で摩擦係数0.20以上が観察された。

これに対して、Fe-8%Cr合金めっきを施したものは図7に示すように速度2.50m/s以下において距離50,000m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に維持されているにもかかわらず、瞬間的には0.20を超えることがあり、その距離は43,000~47,000mで、前掲図6のFeめっきと比較して摩擦挙動に顕著な相違がみられた。

図8はこのときの摩耗特性を示したものである。この結果から、回転試験片の比摩耗量は速度0.50~2.00m/sの範囲においておよそ $5 \times 10^{-11} \text{mm}^3/$

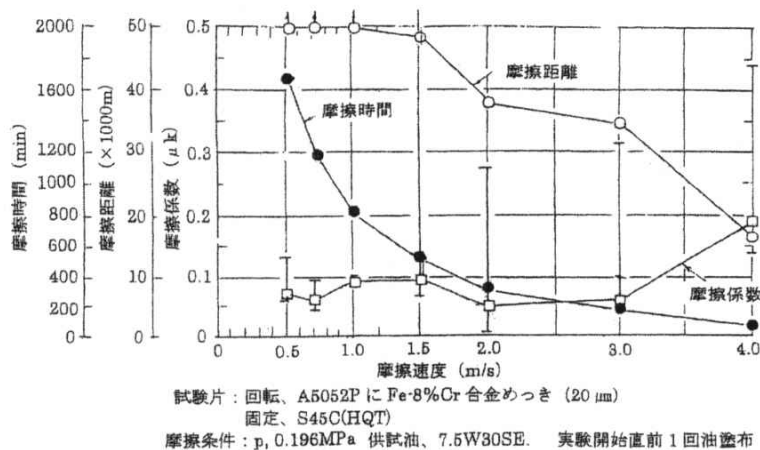


図5 Fe-8%Cr合金めっきを施したA5052Pの潤滑-すべり摩擦特性

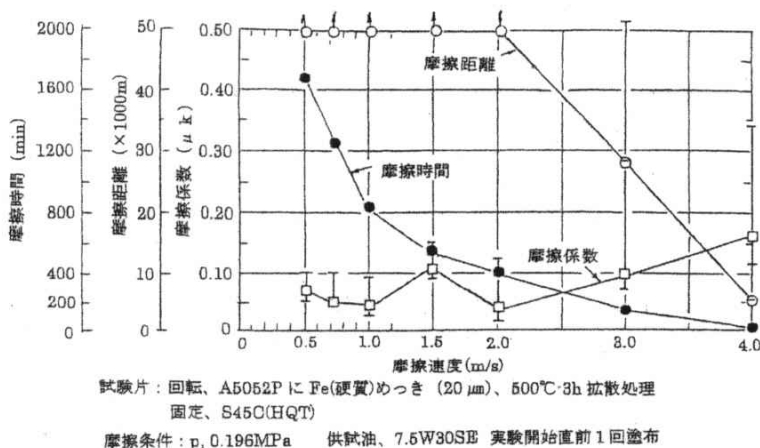


図6 500℃-3h熱拡散処理を施したFeめっき皮膜の潤滑-すべり摩擦特性

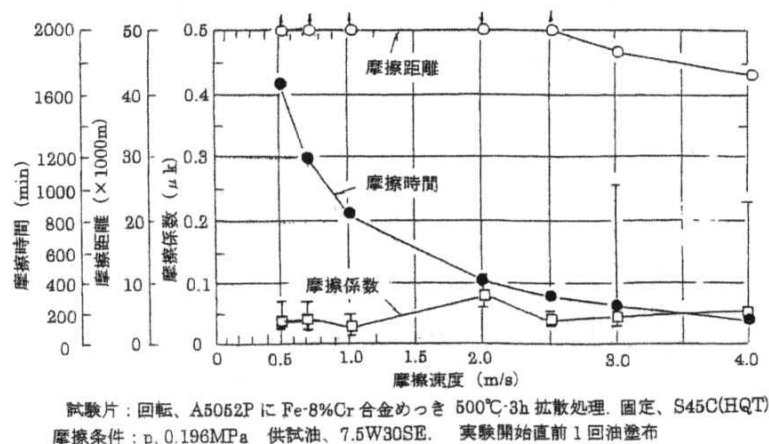


図7 500℃-3h熱拡散処理を施したFe-8%Cr合金めっき皮膜の潤滑-すべり摩擦特性

N.mmで、これを摩耗痕の深さで表すと0.50μm前後となり、明らかにめっき層内の摩耗ということにな

特集

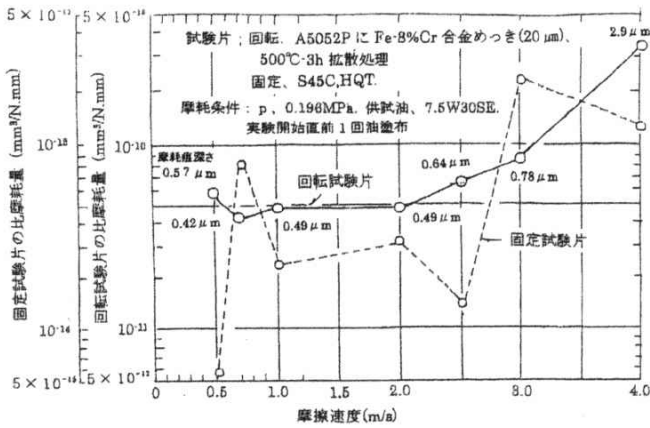


図8 500°C-3h熱拡散処理を施したFe-8%Cr合金めっき皮膜の潤滑-すべり摩擦特性

る。また、これよりも高速側では速度が高くなるに伴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、この場合でも、摩耗が最も激しく起こる速度4.00m/sの摩耗痕深さは3.0μm程度で、前述と同様、めっき層内の摩耗を表している。

これに対し、相手側の固定試験片の摩耗は極めて少なく、おおよそ $6 \times 10^{-15} \sim 2 \times 10^{-13} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$ の範囲にある。

3.4 めっき-ガス浸硫窒化複合被膜の摩擦・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向上を兼ねて、FeおよびFe-8%Cr合金めっきした回転試験片に500°Cで3時間ガス浸硫窒化処理したものについて、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3と同じである。図9は摩擦係数の挙動を表したもので、摩擦速度2.50m/s以下の低速側では摩擦係数の平均値が

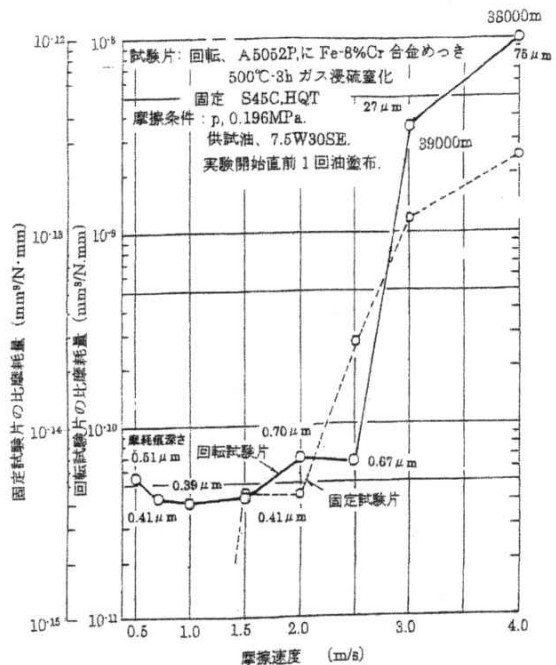


図10 500°C-3hガス浸硫窒化処理を施したFe-8%Cr合金めっき皮膜の潤滑-すべり摩擦特性

0.02~0.03で、連続摩擦距離50,000mまで瞬間的といえども0.20を越すことはなかった。しかし、3.00m/sより高速側では50,000m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が、この場合でも平均値は0.04~0.05の低い値を示す。これを前掲図7の熱拡散したものと比較すると、摩擦係数は約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生成されたFeS, Fe_{1-x}Sなどの硫化物の影響で、これら反応生成物の存在により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2.50m/s以下の領域における比摩耗量は $4 \sim 7 \times 10^{-11} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$ の範囲にある。これを摩耗痕の深さをもって表すと0.40~0.70μmで、摩耗は浸硫窒化層内で起きていることを表している。しかし、これよりも高速側では激しい摩耗が現れ、比摩耗量は速度3.00m/sのとき $3.5 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$ 、また4.00 m/sでは $10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$ となり、何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、めっき被膜は完全に摩耗損失していることを現わしている。この現象は遠心力により潤滑油が飛散したこと、ならび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てアプレシブ

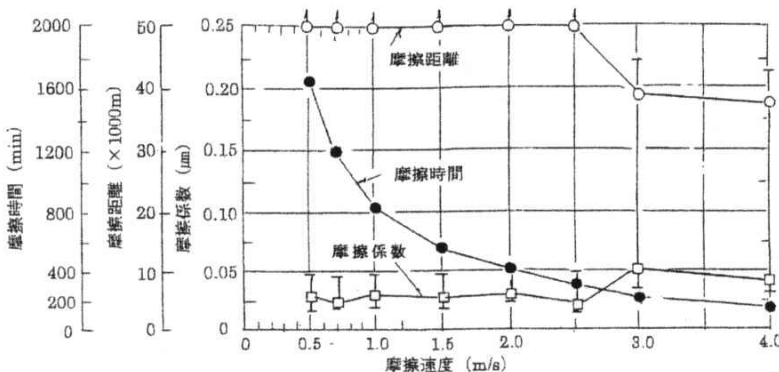


図9 500°C-3hガス浸硫窒化処理を施したFe-8%Cr合金めっき皮膜の潤滑-すべり摩擦特性

摩擦を発生していることに起因しているものと判断される。

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十分な負荷をかけることは難しいと判断し、本実験では接触圧力を0.49MPaとしたときのFe合金めっきの潤滑すべり摩擦・摩耗試験を行なった。

実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Fe-8%Cr合金めっきを施した後、500℃で3hガス浸硫窒化処理したA5052P回転試験片について検討した。なお、このときの実験条件は接触圧力を除き、前述までのものと同じである。

図11は摩擦特性を検討した結果である。これによると、速度1.50m/s以下の低速域では距離50,000mまでの連続運転で摩擦係数は約0.025にほぼ安定した状態が保たれ、0.20を越すことはない。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を越す現象がみられるようになる。例えば、摩擦係数の平均が0.03の速度2.00m/sでは距離38,000m付近で、また速度3.00および4.00m/sでは何れも距離12,000m前後において0.20を越す状態が観察されるようになる。殊に4.00m/sではその値が約0.38にまで達することが認められた。

この結果から、広範囲にわたる摩擦条件の下におい

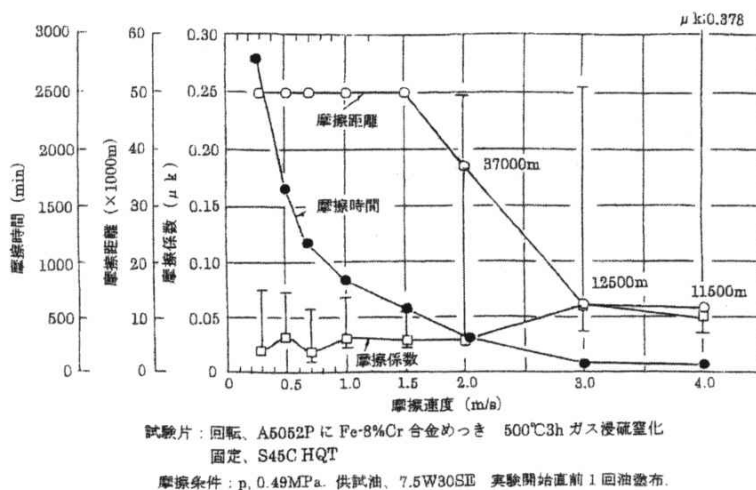


図11 500℃-3hガス浸硫窒化処理を施したFe-8%Cr合金めっき皮膜の高負荷条件下における潤滑-すべり摩擦特性

試験片：回転、A5052PにFe-8%Cr合金めっき 500℃-3hガス浸硫窒化
固定、S45C HQT

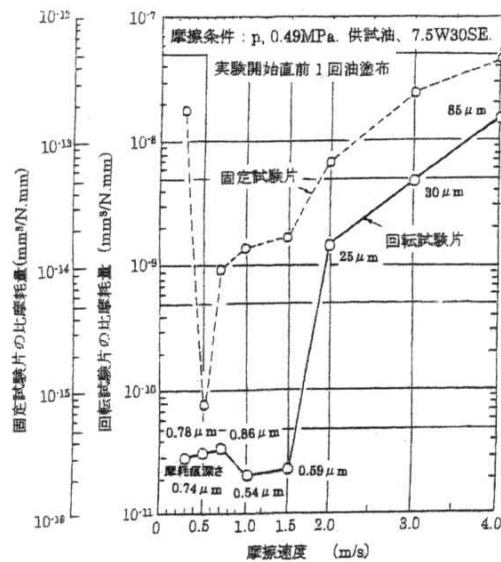


図12 500℃-3hガス浸硫窒化処理を施したFe-8%Cr合金めっき皮膜の高負荷条件下における潤滑-すべり摩耗特性

て摩擦係数の平均が低い値に安定した状態を保ち得ることは、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。

次に上述の実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付近に安定する速度1.50m/s以下における比摩耗量はおよそ $2\sim 4 \times 10^{-11} \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$ で、このときの摩耗痕深さは $0.54\sim 0.78 \mu\text{m}$ 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を越す状態が現れるようになると損耗も激しくなり、速度の増加に伴って比摩耗量もほぼ直線的に高い値を示すようになる。すなわち、速度2.00m/sでは $1.5 \times 10^{-9} \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$ 、また4.00m/sでは $1.5 \times 10^{-8} \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$ となる。これを摩耗痕深さをもって表すと、図中に示すように $25\sim 85 \mu\text{m}$ となり、何れもめっき層が完全に脱落し、素地であるAl合金の摩耗となっている。

4. Al合金の表面改質技術の応用例

4.1 ピストンへの応用

自動車あるいは自動二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

脂類が構造用材料あるいは機能材料として広く活用されるようになった。

今回の開発技術の応用例の一つとして、従来エンジンのシリンダーには鋳鉄製のライナーが用いられているが、軽量化の一つとしてライナーレスが普及する傾向にある。この場合、シリンダーとピストンはAl合金同士の組合せのため、摩擦・摩耗の観点から避けるべき組合せといえる。そこで結晶構造の異なるFeをピストンあるいはシリンダーの摺動面にめっきし、耐摩耗性の改善を図る必要がある。

本実験から得られた結果に基づき、ピストンのスカート部分に厚さ約15 μ mのFeめっきを施して一部の自動二輪車に適用し、国内は勿論、海外でも生産、販売している。図13はFeめっきしたピストンを示したもので、通常はこれに初期なじみをよくするため2~3 μ mのSnめっきを施したのち実用に供されている。

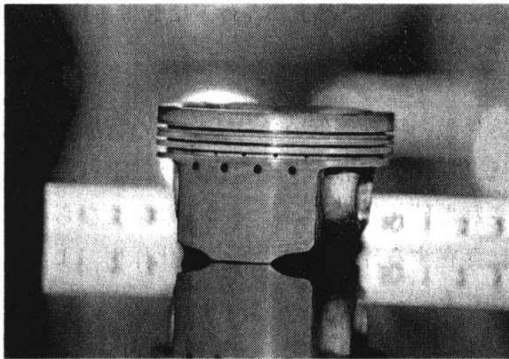


図13 スカートの部分にFeめっきを施したピストン
(次の段階でSnめっきを行い、完成)

4.2 レース用自動二輪車のブレーキディスクへの応用

従来、レース用自動二輪車のブレーキのディスクには鉄系材料が使用されてきた。そのためコーナリングにはディスクの遠心力が大きく働き、ドライバーにとってはかなりの労力を必要とした。これを軽減させる目的から特殊なAl合金をもってディスクを製造し、しかもこれに優れた耐摩耗性を持たせる目的からFe-8%Cr合金めっき、ガス浸硫窒化の複合処理を施した。

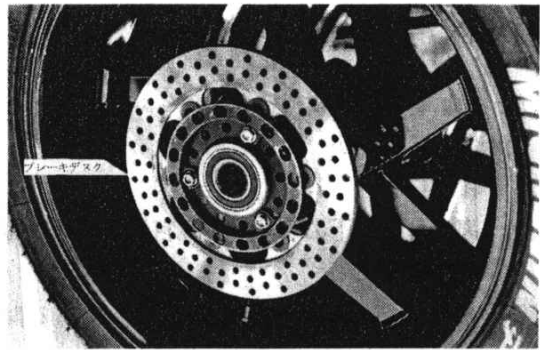


図14 Fe-8%Cr合金めっき後ガス浸硫窒化処理を施したブレーキディスク(レース終了後のディスクには摩耗痕が殆んど認められない)

図14は2000年、鈴鹿で行われたレースの終了後のブレーキディスクを示したもので、摩耗痕らしきものはほとんど認められなかった。

5. 結 言

Al合金の低摩擦、耐摩耗性を改善するための手法として、汎用技術である電気めっきと熱拡散あるいはガス浸硫窒化処理を複合させることにより、潤滑すべり摩耗の下で優れた特性を得ることを可能とした。この技術はピストンやブレーキディスクに応用し、効果をあげることができた。

参考文献

- 1) 恒川好樹：まてりあ, 36,6 (1995) 730
- 2) 梶沢 均：熱処理, 36,6 (1996) 383
- 3) 野口奉夫：熱処理, 38,4 (1998) 198
- 4) 竹内榮一, 及川 渉, 小室文俊, 梶沢 均：熱処理, 44,4 (2004) 239

日本プレーテック株式会社

http://www.nasuinfo.or.jp/FreeSpace/n-platec/
〒 329-2756 栃木県那須郡塩原市西三島7-334
TEL 0287-36-1050 FAX 0287-36-7167