

鉄電析被膜の結晶配向制御技術と 摺動特性向上に関する研究

Studies of Crystal Orientation Technologies and Improvement of Tribological Characteristics on
Iron Electrodeposit Films

郡 司 貴 浩* 鈴 木 達 也* 藤 田 信 芳*
Takahiro GUNJI Tatsuya SUZUKI Nobuyoshi FUJITA
堂 坂 健 児* 豊 田 裕 介*
Kenji DOSAKA Yusuke TOYODA

要 旨

Fe電析被膜は、析出条件により被膜の結晶配向性や表面形態が変化する。添加剤を含まない中性域の硫酸第一鉄の電解浴を用い、パルス電解方式を採用することにより、(222)面に強く配向し表面形態が六角錐状の柱状結晶性の被膜の析出挙動を制御することが可能となった。結晶配向電析被膜は、表面に均一かつ微細な凹凸が形成され、無配向のFe電析被膜と比べオイル濡れ性に優れることから、比較的厳しい摺動環境下においても油膜が確保され、動摩擦係数が30%低減することが確認された。本表面材料の部品応用例として、ピストンスカートへの適用を試み、摩擦損失低減に寄与することを確認した。

ABSTRACT

Crystal orientations and surface morphologies of iron electrodeposit films are changed by electrolysis conditions. Iron electrodeposit characters have been controlled by means of neutral electrolytic bath of ferrous sulfate without additives and pulse current. The obtained films were strongly orientated (222) plane and columnar crystalline structures, and surface morphology was consisted of hexagonal-like-pyramid crystal. As the result, the obtained films had uniform and fine roughness, and excellent oil wetness characteristic. And then we have confirmed that the obtained films made oil films under comparative hard tribological conditions and gave 30% decrease in coefficient of kinetic friction as compared with non-orientated iron electrodeposit films.

Application of this surface material to piston skirt surface was tried, and then we confirmed this surface material made friction loss reduce.

1. まえがき

現在のエネルギーおよび地球環境問題より、自動車を取りまく情勢は次世代に向かい、さらなる燃費向上が一つの課題になっている。この燃費向上技術に対するアプローチとしてさまざまな研究・開発が行われているが、エンジン、トランスミッション摺動部材の摩擦損失低減もその一つである。摺動部材の摩擦損失低減技術は、実際に摺動する部分の表面特性に起因するところが大きく、現在までに自己潤滑性のある材料の被覆または添加¹⁾、表面に潤滑剤を保持する溝の加工²⁾、仕上げ面粗度向上³⁾などが応用されてきた。

当社においてもエンジンの燃費向上と高出力化のバランスのとれた技術開発の一環として、コネクティングロッド用の軸受けメタルに、従来の無配向性Pb合金オーバーレイに代わり、被膜の表面形態が四角錐状を呈する結晶配向性Pb合金オーバーレイ被膜を開発し適用している^{4) 5)}。被膜表面は隣り合う角錐結晶の頂点と溝部による凹凸をもち、摺動初期には角錐頭部が優先摩耗し相手摺動面になじんだ理想的な摺動面が形成され、さらに溝部に潤滑剤が保持されるため、摩擦と耐焼付き性に優れた摺動特性を実現している。

しかしPb合金の被膜材料は材料強度が低いため、軸受

*和光研究所

けメタルのような強制給油され流体潤滑領域で摺動する部材には適しているものの、より潤滑条件が厳しく部分的に金属接触のある混合潤滑領域で摺動する部材には適用できず、新たな摺動用表面材料が求められてきた。

本研究では、摺動環境の比較的厳しい摺動部材への適用拡大を図るべく、摺動材として強度が高く安価なFeに着目し、その電析被膜の結晶配向の制御から表面形態との関係および表面形態が摺動特性に及ぼす影響について検討した。その結果、電析時のエネルギー制御により表面が六角錐状を呈する結晶配向電析被膜が得られた。

本論文では、結晶配向Fe電析被膜の配向制御技術と被膜特性、およびピストンスカートに適用したときの摩擦損失低減効果を現行量産ピストンと比較した結果について報告する。

2. 結晶配向制御電析技術

2. 1. Fe 電析被膜の結晶配向制御因子

Fe 電析被膜の結晶配向を制御する因子は、Fig. 1 で示すように通常電気めっきの制御因子として取り扱われる電解浴組成、pH、温度、 Fe^{2+} 濃度および電気エネルギーである。従来Feめっきは、浴の安定性（pH緩衝）、導電性、析出被膜の平滑化や硬度向上の観点から多くの添加剤を溶解した酸性域（pH2～3）の硫酸浴もしくは塩化浴を用い、連続的に電流を流す直流電流で行われるのが一般的である^{6) 7)}。

また、電流形態と析出被膜形態には密接な関係があり、特に直流電流とパルス電流とはその電流形態の違いから、電極近傍に形成される拡散層が異なり、析出被膜形態に影響を及ぼすとの報告がある⁸⁾。

Fig. 2 にパルス電流の概要を示す。ここで示すパルス電流とは、電流のオン／オフを一定時間ごとに繰り返す矩形波の電流であり、その一サイクル中の電流オンの時間 T_{on} を一サイクルの時間 T で割ったものをデューティサイクル θ で示すと、平均電流密度は次式で表される。

$$J_{av} = J_p \times \theta \quad [\text{A}/\text{dm}^2] \quad (1)$$

ここで、 J_p はピーク電流密度である。

一般に直流電流の場合、バルクのイオン濃度 C_o から電極表面のイオン濃度 C_e まで濃度勾配を持つ拡散層が存在する (Fig. 3-a)。一方、Fig. 3-bに示すようにパルス電流の場合、電流のオフ時間に電極表面のイオン濃度は

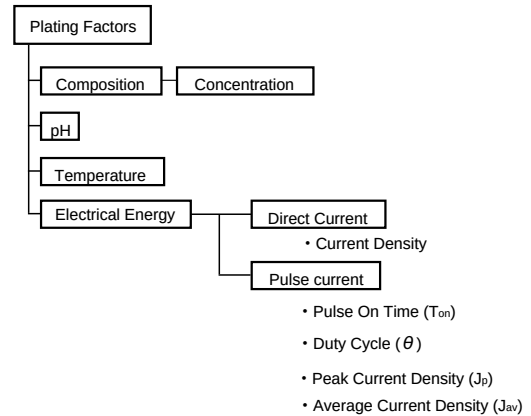


Fig. 1 Plating Factors

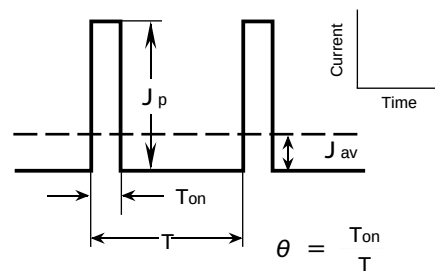
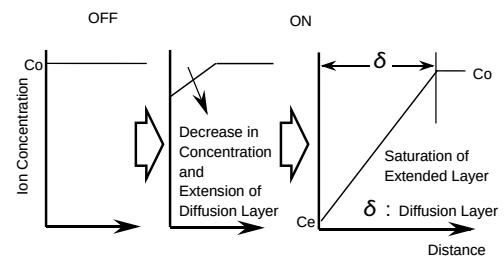
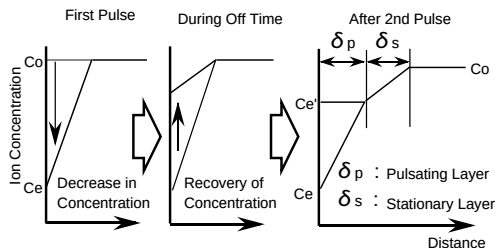


Fig. 2 Illustration of Pulse Current



a) Direct Current



b) Pulse Current (Double Diffusion Layer)

Fig. 3 Process and Mechanism of Diffusion Layer Formation, a)Direct Current and b)Pulse Current⁸⁾

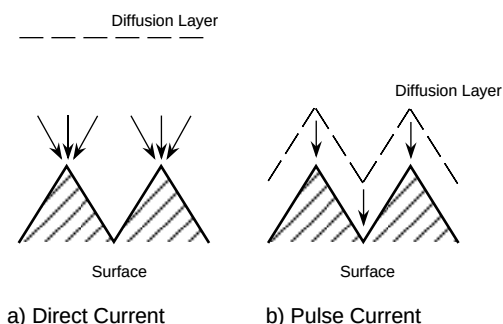


Fig. 4 Difference of Diffusion Layer Formation,
a) Direct Current and b) Pulse Current⁸⁾

Ce から Ce' まで回復する。したがって、拡散層はイオン濃度が増加する振動層 δ_p と、濃度勾配が変化しない定常層 δ_s の二つに分かれる（拡散二重層⁸⁾）。この場合、実質の拡散層は振動層になるため、直流電流の拡散層に比べ非常に薄いものとなる。つまり、直流電流においては拡散層が大きいため、析出被膜表面に形成される凹凸の凸部に析出原子が集中しやすく、表面形態の均一性を損ないやすいが（Fig. 4-a）、パルス電流の場合は（Fig. 4-b）、析出被膜表面の凹凸に依って薄い拡散層が形成されるため、析出結晶が均一に成長しやすいと考えられる。

したがって、表面に均一かつ微細な凹凸をもつ電析被膜を形成させる場合には、電極表面により多くのイオンを供給し、かつ拡散層を薄くすることができるパルス電流が有効であると判断される。

2. 2. テスト方法と配向性解析手法

各制御因子と Fe 電析被膜の結晶配向性の関係を明確にするため、電解浴組成、pH、温度、Fe²⁺ 濃度およびパルス電流の平均電流密度を標準電析条件に対し変化させ、それぞれの電析被膜について結晶配向性を調べた。

試薬は硫酸第一鉄七水和物（FeSO₄・7H₂O：純度 99% 以上）を用い、不純物による影響を防ぐため溶媒にはイオン交換水を用いた。また、添加剤についても同様に、高純度のものを使用した。なお、pH は 3vol.% のアンモニア水を加えることにより調整した。

テストは L 70 × W 58 × H 85mm³（内容積）のアクリル製電解セル中で、58 × 43mm²、厚さ 0.3mm の SPCC 板を電極として、電極間距離 20mm で行った。電極の SPCC 板は表面酸化防止のための Zn 被膜がめっきされており、

Table 1 Conditions of X-ray Diffraction

X-ray Power	18kW
Wave Length	1.5405 Å (CuKα)
Sampling Width	0.01deg
Scanning Speed	4.00deg/min

Table 2 X-ray Peak Intensity Ratio of Iron*

(hkl)	(110)	(200)	(211)	(310)	(222)
Shkl	100	20	30	12	6

*JCPDS No.6-696

Table 3 Standard Plating Conditions

FeSO ₄ ・7H ₂ O ([Fe ²⁺])	400g/L (1.44mol/dm ³)
pH	6.0
Temperature	50°C
Current Density	4A/dm ²
θ	0.2

電析前にこの極板を 6mol/dm³ の塩酸に 5 秒から 10 秒浸漬し、Zn 被膜を取り除き Fe 表面を活性化させてからテストに使用した。

電析後、形成した Fe 被膜の結晶配向性評価は、陰極の中央部を 10 × 10mm² に切り出し、X 線回折（XRD）により Fe 電析被膜の結晶面の回折強度を測定し行った。XRD の測定条件を Table 1 に示す。

XRD の回折ピークから以下の式より Fe 電析被膜の結晶配向性を評価した⁹⁾。なお、基材表面と平行に存在している結晶面が評価対象となる。

Willson の配向指数：W_{hkl}

$$W_{hkl} = (I_{hkl} / \sum I_{hkl}) / (S_{hkl} / \sum S_{hkl}) \quad (2)$$

配向率：OR_{hkl}

$$OR_{hkl} = (W_{hkl} / \sum W_{hkl}) \times 100 \quad [\%] \quad (3)$$

ここで I_{hkl} は測定された各結晶面の XRD ピーク強度、 S_{hkl} は ASTM に記載された各結晶面の XRD ピーク強度比である。Table 2 に S_{hkl} の値を示す。

2. 3. 各制御因子と被膜結晶配向の関係

2. 3. 1. 電流形態および添加剤の影響

本研究の狙いは、配向させた結晶を均一に成長させることにあり、それにはパルス電流が適していると考えられる。そこで Table 3 に示す電析条件を標準として、直流電流とパルス電流の違いおよび添加剤の有無が電析被膜の結晶配向性に与える影響について調べた。電析テストは、標準電析条件下で添加剤として硫酸アンモニウムを

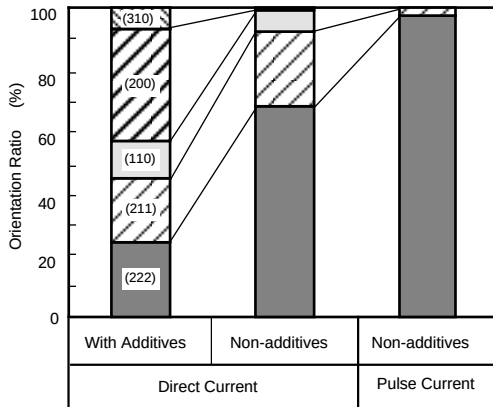


Fig. 5 Influence of Current Form and Additives on Crystal Orientation

100g/L、ほう酸を30g/L、尿素を100g/Lおよびサッカリンを1g/L加えた電解浴について直流電流 ($4A/dm^2$) で、また添加剤を加えない電解浴について直流電流とパルス電流でテストを行った。

Fig. 5 に示すように、添加剤のない電解浴でパルス電流を用いたときが、最も強く (222) 面に配向する。電流形態について比較すると、パルス電流の方が直流電流よりも (222) 面に配向しやすく、添加剤の存在下では結晶配向性は低下することが分かる。

以上の結果から、Fe 電析被膜の結晶配向性を向上させるためには、硫酸第一鉄を電解浴組成とした場合、パルス電流で添加剤のない電解浴が良いと言える。

2. 3. 2. 電解浴 pH の影響

前項の結果より、強く結晶配向した Fe 電析被膜は pH6 の電解浴で形成されることを確認した。これは、通常の Fe めっきに用いられる電解浴の pH に比べ高い領域であるため、電解浴 pH と電析被膜の結晶配向との相関について明確にする必要がある。そこで標準電析条件に対し、pH を酸性域から中性域の間で電析テストを行い、電析被膜の結晶配向性を評価した (Fig. 6)。

pH5.75 以上で強く (222) 面に配向し、pH の低い領域では無配向状態となることがわかった。このことは、電析時に Fe の析出に対し H_2 生成が優先するような酸性域では、(222) 面への配向が難しくなることを示している。

したがってパルス電流を用いた硫酸浴において、強く結晶配向した被膜を析出させるには、pH6 近傍の電解浴が適している。また、その配向面は (222) 面である。

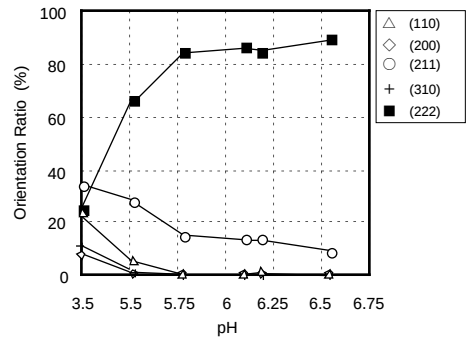


Fig. 6 Relationship between pH and Crystal Orientation

2. 3. 3. その他の制御因子の影響

次に標準電析条件で電解浴 pH を 6 とし、温度、 Fe^{2+} 濃度および平均電流密度と被膜結晶配向率の関係について電析テストを行った。

Fig. 7、8、9 にそれぞれ温度、 Fe^{2+} 濃度および平均電流密度に対する被膜結晶配向率の関係を示す。どの因子についても配向する結晶面は (222) 面であり、条件に

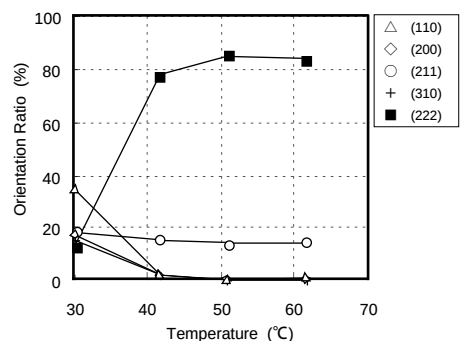


Fig. 7 Relationship between Temperature and Crystal Orientation

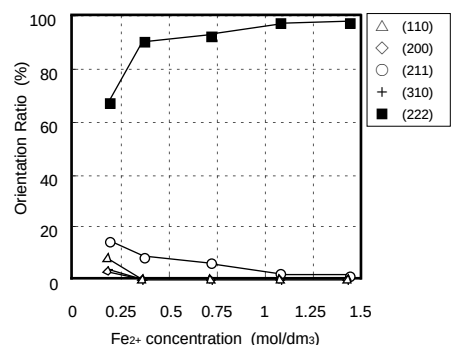


Fig. 8 Relationship between Fe^{2+} Concentration and Crystal Orientation

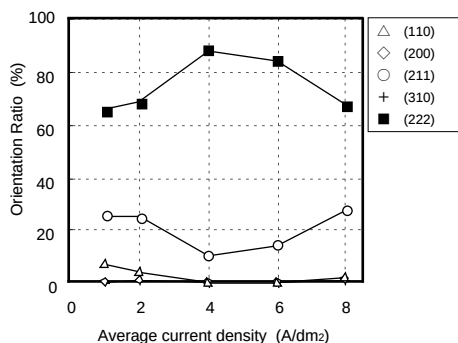
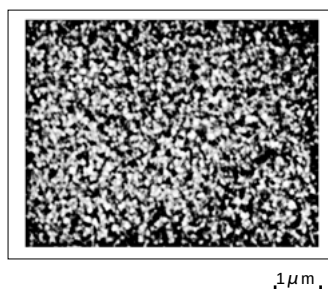


Fig. 9 Relationship between Average Current Density and Crystal Orientation

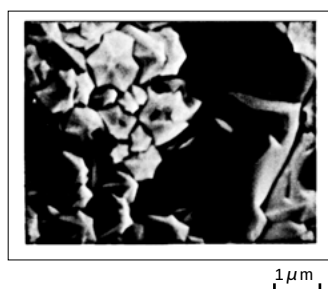
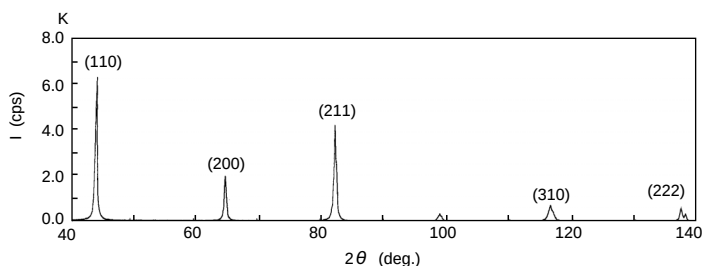
よっては 80 ~ 90 % 以上の高い配向率を示している。
(222) 面配向に特に影響しているのは温度であり、温度

40℃以上で (222) 面に強く配向する。Fe²⁺ 濃度および平均電流密度は温度ほど (222) 面への配向性には影響しないものの、高濃度、高平均電流密度側ほど (222) 面の配向率が高くなる傾向を示した。

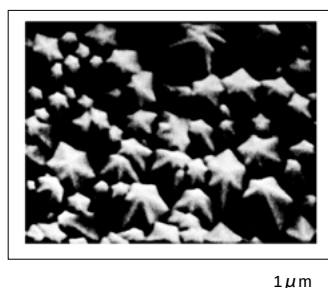
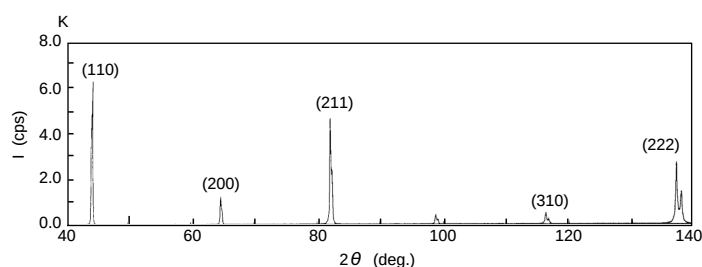
以上の結果を整理すると、Fe 電析被膜が (222) 面に配向しやすい条件は、添加剤を含まない電解浴でパルス電流を用い、pH6 近傍、温度 50℃ 前後、平均電流密度 4A/dm²、Fe²⁺ 濃度 0.36mol/dm³ (FeSO₄・7H₂O で 100g/L) 以上となる。電析結晶の配向に関する理論は諸説^{10) 11)} あるが、Fe のような bcc 結晶において (222) 面は比較的表面エネルギーの高い面であり、このような面を優先的に析出させるためには、電析時のエネルギーが高いこと、高エネルギー面の成長を阻害する吸着因子がないことが重要であると考えられ、上記の結果はこれらと一致する。



a) Fe (222) Orientation Ratio 20% Layer.



b) Fe (222) Orientation Ratio 60% Layer.



c) Fe (222) Orientation Ratio 90% Layer.

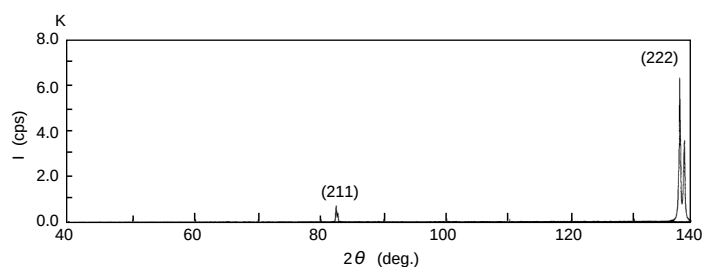


Fig. 10 SEM Images of Surface Morphologies and XRD Profiles of Iron Films for each Crystal Orientation

3. 結晶配向 Fe 電析被膜の特徴

3. 1. 被膜の結晶形態

次に (222) 面に配向した Fe 電析被膜について、その配向率別に被膜の表面形態を観察した。表面形態の観察は、走査型電子顕微鏡 (SEM) によって XRD に用いた試験片で行った。Fig. 10 に被膜表面の SEM 写真と XRD パターンを示す。

Fig. 10-a は、電解浴に添加剤を加えたときの電析被膜であり、(222) 面の配向率は約 20% と低く、その表面形態は粒状で比較的平滑なものである。一方、電解浴に添加剤を加えていない pH5.5 の電析被膜は、(222) 面の配向率が約 60% と上昇し、全体の表面組織はブロック状の結晶状態を呈することがわかる (Fig. 10-b)。また、そのブロック状結晶のところどころに六角錐状の結晶が析出している。さらに、pH6 の時の電析被膜は、(222) 面の配向率が約 90% に上昇し、全体の表面形態は六角錐状結晶が均一に析出したものとなる (Fig. 10-c)。

Fig. 11 に (222) 面の配向率と表面六角錐状結晶の面積率の関係を示す。表面六角錐状結晶の面積率は、(222) 面の配向率が上昇するにつれて増大し、配向率が 90% を超えるとその面積率は約 100% となる。

Fig. 12 は、表面六角錐状結晶の面積率がほぼ 100% 析出した電析被膜断面の SEM 写真である。試料は、表面を観察した試験片を液体窒素に浸漬し、被膜に低温脆性割れを起こさせた後、破断して作製した。観察結果より、表面六角錐状結晶の断面は柱状であり、角錐底面と側面の角度は約 70 度であることがわかる。

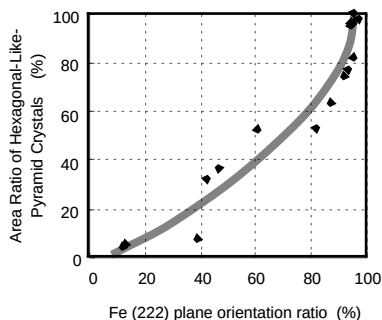


Fig. 11 Relationship between Orientation (222) Plane and Hexagonal-Like-Pyramid Crystals

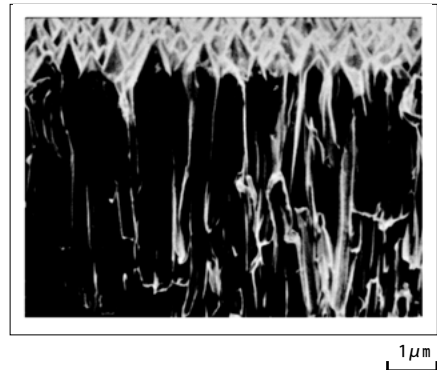


Fig. 12 SEM Photograph of Cross Section of Fe (222) High Orientation Layer

3. 2. 被膜のオイル濡れ性

摺動において、表面の潤滑剤 (オイル) に対する濡れ性は動摩擦特性や耐焼付き性に影響のある重要な因子である。そこで、高 (222) 面配向の表面六角錐状結晶被膜のオイル濡れ性を評価した。

オイル付着力 (オイル濡れ性) F_w は、Fig. 13 に示すように、両面に表面処理を行った板状試験片を 10W-30 エンジンオイルに浸漬し、一定加速度で引き上げたときの作用力を測定し、式 (4) により算出した (ウイルヘルミ法)¹²⁾。

$$F_w = \gamma L \cos \theta = (F + v \cdot \rho \cdot g) / L \quad [\text{N/m}] \quad (4)$$

γL : 表面張力 [N/m] θ : 接触角 [deg.]

F : 作用力 [N] v : 浸漬体積 [m³]

L : 固液接触周長 [m] ρ : 液体密度 [kg/m³]

g : 重力加速度 [9.8m/sec.²]

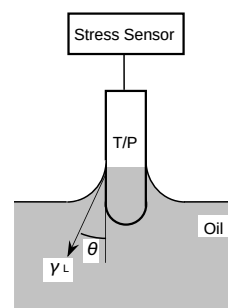


Fig. 13 Illustration of Wetness Characteristic Test by Wilhelmy Method

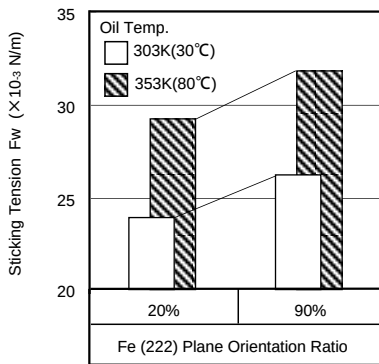


Fig. 14 Wetness Characteristic of Iron Electrodeposit Surface

Fig. 14に(222)面配向率約20%の表面粒状被膜および(222)面配向率約90%の表面六角錐状結晶被膜における油温30および80℃でのオイル付着張力を示す。(222)面配向率90%の被膜は(222)面配向率20%の被膜に対し、オイル付着張力は大きく、その差は油温の違いによってもほとんど変化しない。これは、(222)面配向率90%の被膜の表面積が表面六角錐状結晶の析出により(222)面配向率20%の表面粒状結晶被膜に対し微視的に増大したこと、また、隣り合う角錐結晶によって溝部が形成され、オイルがその溝部に保持されたことなどに起因すると考えられる。

3. 3. 被膜の基本摺動性能

3. 3. 1. 各種表面処理材料との比較

電析した高(222)面配向の表面六角錐状結晶被膜は、3. 2. よりオイル濡れ性に優れることから摺動特性の向上に期待のできる表面材料であることがわかった。そこで、本表面材料の動摩擦特性をチップオンディスク式摩擦摩耗試験機を用い、一般の表面材料と比較しその特性を評価した。

Fig. 15にチップオンディスク式摩擦摩耗試験機の概略を示す。本テストは、材質がSS400の外径φ139mm、内径φ105mm、厚さ5mmで表面粗度0.8sのディスクに各種表面処理を施したものをを用い、速度15m/sec.で回転させ、ディスク上に幅12mm、長さ16.65mm、厚さ5mmのFC250相当のチップを5MPaの垂直荷重Pで押しつけ、摩擦力Fを測定し、摩擦の基本式(5)に基づき動摩擦係数 μ を算出した。

$$F = \mu P \quad (5)$$

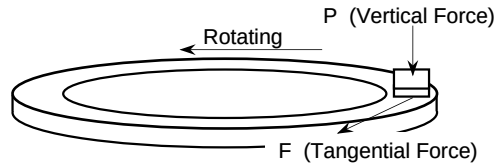


Fig. 15 Illustration of Chip-on-Disk Sliding Test Method

ディスクに行った表面処理は、Snめっき、MoS₂コート、窒化(LCN)処理、Crめっき、およびFe電析被膜として(222)面配向率約20%の表面粒状被膜、(222)面配向率約90%の表面六角錐状結晶被膜である。なお、潤滑油は10W-30エンジンオイルを用い、室温において流量40mL/min.で供給した。

Fig. 16にテスト結果を示す。(222)面配向率約90%の表面六角錐状結晶被膜は他の表面処理と比較しても動摩擦係数は小さく、特に(222)面配向率が約20%の表面粒状被膜に比べ動摩擦係数は約30%低減している。動摩擦係数が低くなったことの原因として、高(222)面配向被膜がオイル濡れ性に優れ、また表面が六角錐状形態による等方的形状であるためオイルの流動抵抗があり¹³⁾、さらに角錐頭部には弾性流体潤滑(EHL)による油膜が形成され¹⁴⁾、摺動時の固体接触確率が低減したと推測される。

3. 3. 2. 平均結晶粒径と摺動特性の関係

Fe電析被膜について平均結晶粒径と動摩擦係数の関係をTable 4に示す材料組合せで評価した。Fig. 17に示すように、平均結晶粒径が0.5~1.3 μ mの範囲に動摩擦係数の極小値を持つことがわかる。平均結晶粒径に対して動摩擦係数の極小値が存在するのは、平均結晶粒径が大きくなると結晶粒のバラツキが大きくなるため、角錐頂

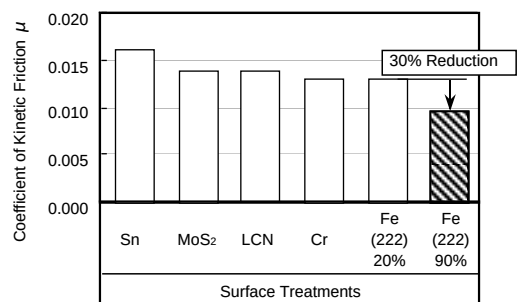


Fig. 16 Sliding Characteristic of Various Surface Treatments by Chip-on-Disk Test

Table 4 Test Materials

		1	2
Chip	Material	FC250	FC250
	Roughness	0.8 μm	0.8 μm
Disk	Surface Morphology	Hexagonal-Like-Pyramids	Fine Grains
	Mean Grain Size	0.6~3.6 μm	0.6~3.6 μm
	Base Material	Aluminium Alloy	Aluminium Alloy
	Base Material Roughness	1.6 μm	1.6 μm

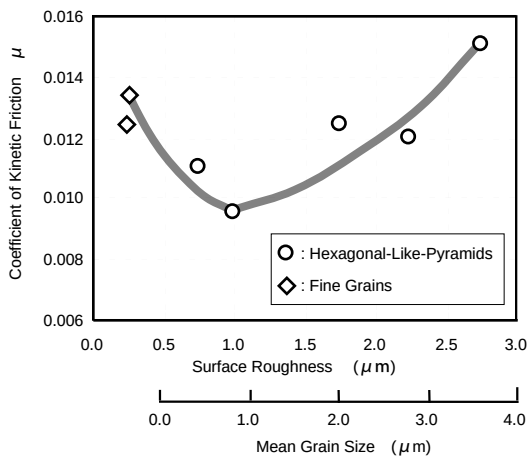


Fig. 17 Relationship between Mean Grain Size and Coefficient of Kinetic Friction

部で油膜が破断され固体接触率が増大し動摩擦係数は大きくなり、一方、平均結晶粒径が小さい被膜は(222)面配向率の低い表面粒状被膜であり、オイル濡れ性および油膜形成能力が低いため動摩擦係数は大きくなるためと推察される。

4. ピストンスカートへの応用

4. 1. ピストンスカート想定単体摺動試験

エンジンのピストンスカートは、側圧力と熱膨張による高い荷重を受け摺動する過酷な運転条件下にある。したがって、ピストン部の摩擦損失は大きく¹⁵⁾、エンジンの摩擦損失低減における最も重要な部品の一つとして挙げられる。そこで高(222)面配向六角錐状結晶被膜の摺動特性に着目し、ピストンスカートを想定してチップオンディスク式摩擦摩耗試験機による単体摺動試験を行い適用効果を検討した。

摺動特性は表面性状に大きく左右されることから、単

Table 5 Test Materials

		1	2
Chip	Surface Material	Orientated Iron Films	AC8C equiv.
	Base Material	AC8C equiv.	AC8C equiv.
	Surface Roughness	10 μm (Tool-marked)	
Disk	Material	FC250	FC250
	Surface Roughness	1.6 μm	

体テスト実施に当たっては実際のピストンスカート表面に合わせて評価することが重要である。本テストでは、チップをピストン相当、ディスクをシリンダライナ相当とし、チップにはピストンスカートと同様の条痕加工を行い、その表面に本表面材料を被覆した(Table 5)。

Fig. 18 に横軸を V/P にて整理した摩擦係数測定試験結果を示す。図中に単体テストの有効性を検証するため、2.2L 四気筒 SOHC - VTEC (可変バルブタイミング・リフト機構) のエンジン回転数 1000~3000rpm に相当する V/P 値を併記した。V/P 値の算出に当たっては、TDC のクランク角を 0deg. として 0~180deg. までの平均速度をスラスト側平均側圧で割った値を採用している。

テスト結果より、V/P ≈ 4 (エンジン回転数 1500rpm 相当) で約 20% の動摩擦係数の低減効果があることが分かる。したがって、本表面材料はピストンスカートへ応用することにより、摺動摩擦損失の低減が実現可能と考えられる。

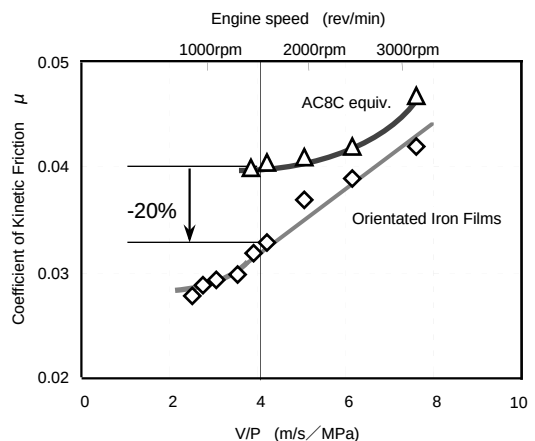


Fig. 18 Coefficients of Kinetic Friction versus V/P

4. 2. ピストンスカート適用実機試験

前項の結果を受けて、量産同様のピストンスカートに高（222）面配向六角錐状結晶被膜を施し、実機における摩擦損失低減効果をモータリングテストで評価した。テストは、2.2L 四気筒 SOHC－VTEC エンジンを用い、油温 80℃（10W－30 エンジンオイル）一定で、量産ピストンに対する本表面処理ピストンの摩擦損失低減を評価した。

Fig. 19 にエンジンの実用回転域の代表として、1500 rpm での往復運動部（ピストン、ピストンピン、ピストンリング、コネクティングロッド）の摩擦損失測定結果を示す。本表面処理ピストン適用により量産ピストンと比較し、約 7% の摩擦損失低減が図られた。しかし、2000rpm 以上の回転域では、ほとんどその効果は見られなかった。

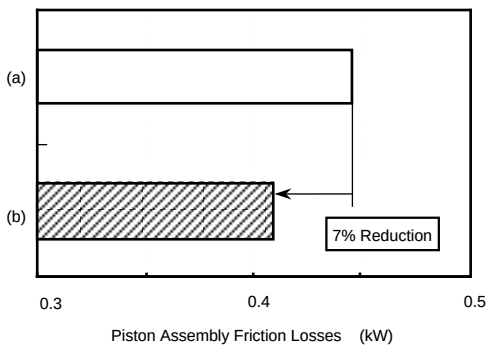


Fig. 19 Comparison of Piston Assembly Friction Losses; (a) without Iron Films and (b) with Orientated Iron Films on Piston Skirt Surface

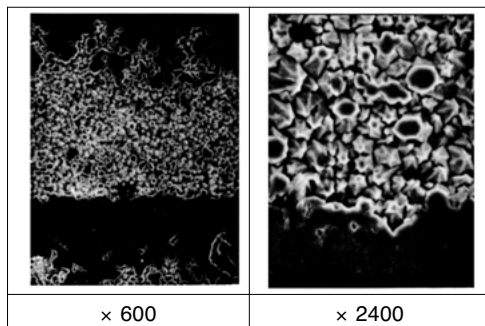


Fig. 20 SEM Photographs of Films on Piston Skirt after Motoring Test

テスト終了後のピストン表面状態 (Fig. 20) を見ると、ピストンスカート部の条痕頂部と谷部間における六角錐状結晶被膜の角錐頂部のみが摩耗してプラトー形状を形成していることから、本表面材料はシリンダライナへのなじみ効果とオイル保持による潤滑油膜形成効果により摩擦損失低減を実現していると推察される。

以上の結果から、高（222）面配向六角錐状結晶被膜はピストンスカートへ応用することで実用回転域での摩擦損失低減を実現し、燃費向上が期待できることが確認された。このことは、本表面材料が部分混合潤滑域で用いられる摺動部材への適用拡大の可能性を示唆しているものと思われる。

5. まとめ

- (1) パルス電流を用いることにより、従来の直流電流では得られなかった高（222）面配向電析 Fe 被膜の形成が可能となった。これはパルス電流により、電極表面のイオン濃度が高濃度に保持されること、形成する拡散層が薄いことに起因すると考えられる。
- (2) 上記被膜は、添加剤を含まない硫酸第一鉄の中性域（pH6 近傍）の電解浴で析出しやすい。
- (3) 上記被膜の結晶は、表面形態が六角錐状を呈しており、その面積率は（222）面の配向率が増加するほど増大する。また、その断面形態は柱状であり、角錐側面の傾斜角度は底面に対し約 70 度と鋭角である。
- (4) 高（222）面配向の表面六角錐状結晶被膜は、低（222）面配向の表面粒状被膜と比べオイル濡れ性に優れ、動摩擦係数が約 30% 低い。
- (5) ピストンスカートへの本表面材料の適用により、エンジン実用回転域での摩擦損失低減が確認された。

以上より、本研究により開発された高（222）面配向六角錐状結晶 Fe 被膜は、ピストンスカート部に限らず摺動摩擦損失低減を目的とした他の部材への適用に期待できる。

参考文献

- 1) 村上, 許斐ら: “エンジン実働時のピストン摩擦力解析” 自動車技術会学術講演会前刷集, 902214.
- 2) 赤松, 日比ら: “表面粗さの改質による軸受の長寿命化”, NTN TECHNICAL REVIEW, 59, (1991), p.3 - 7.
- 3) 有田: “最近のエンジン部品の表面仕上げ”, トライボロジスト, 36, (7), (1991), p.515 - 518.
- 4) 辻, 成重ら: “結晶配向電析鉛合金材料の軸受への応用と軸受メタルの高性能化研究”, HONDA R&D Technical Review, 4, (1992), p.86 - 97.
- 5) Y.Fujisawa, M.Tsuji, et.al., “Application of Crystal-Orientated Lead Alloy Electrodeposits to the Overlay of Bearings, and Studies on Increasing Plane Bearing Performance”, SAE Paper, 932902.
- 6) 川崎, 水本: “硫酸塩浴からの鉄メッキ”, 金属表面技術, 13, (11), (1962), p.6 - 9.
- 7) “めっき技術便覧”, 日刊工業社, 4版, (1979), p.270 - 273.
- 8) N.Ibl, “Some Theoretical Aspects of Pulse Electrolysis”, Surface Technology, 10, (1980), p.81 - 104.
- 9) K.S.Willson and J.A.Rogers, “Orientation, Crystal Structure and Appearance of Nickel Deposits from a Watts Bath Containing Coumarin”, Tech.Proc.Amer. Electroplaters’ Soc., 51, (1964), p.92 - 95.
- 10) N.A.Pangarov, “Preferred Orientations in Electro-Deposited Metals”, J.Electroanal.Chem., 9, (1965), p.70 - 80.
- 11) 王, 沖: “PVD法による金属薄膜の結晶配向性とモルフォロジー” 表面技術, 41, (8), (1990), p.29 - 34.
- 12) 佐々木: “表面のぬれ性を測る”, サーフェスコントロール&洗浄設計, 31, (秋), (1986), p.60 - 66.
- 13) N.Patir and H.S.Cheng, “An Average Flow Model for Determining Effects of Three-Dimensional Roughness on Partial Hydrodynamic Lubrication”, J.Lubrication Tech., 100, (1), (1978), p.12 - 17.
- 14) 兼田: “EHLと表面あらさ”, 潤滑, 27, (2), (1982), p.80 - 85.
- 15) J.T.Kovach, E.A.Tsakiris, “Engine Friction Reduction for Improved Fuel Economy”, SAE Paper, 820085.

■著者■



郡 司 貴 浩



鈴 木 達 也



藤 田 信 芳



堂 坂 健 児



豊 田 裕 介