

技術論文

モーターサイクルにおける表面改質

Surface Quality Improvement for Motorcycle Components

山田 徹
Toru Yamada

要 旨

モーターサイクルにおける材料構成比を概観すると、鉄鋼材料が約49%あるもののアルミ材料が約33%以上と軽金属が多いのが特徴である。加えて搭載するエンジン出力は、約150~200Ph/lと極めて高いため、要求される表面改質も面圧、速度、耐熱、潤滑などの点で他と異なる厳しいものがある。

まずフレーム系をみると、主にアルミ材料となる為陽極酸化を用いるが、外観商品性から色調が明るく均一であることが望まれる。が、加工によって起きる母材欠陥への対応が必要である。又クッションの一部にはMMCも用いているので紹介する。エンジン系では、モーターサイクル特有の高性能用表面改質、例えばピストン用潤滑アルマイト、シリンダー用特殊磷酸Mn処理やNi-P-Sic分散めっき、又リングやTiコンロッドへのPVD(TiN)、ギヤへの電解浸硫等が用いられている。

最後に材料の動向を予測しつつ今後必要となる表面改質について言及したい。

1. は じ め に

モーターサイクルの生産台数は、1981年の741

Abstract

Apart from steel which accounts for about 49% of the material of motorcycles, material component ratio of motorcycle is featured by light metals which account for a considerable part, particularly aluminum (about 33% or more). Besides, since the output of an engine to be mounted is extremely high (about 150 to 200ph/l), stricter surface reforming is required in terms of pressure, speed, heat resistance, lubrication, and so on.

Since a frame system is mainly composed of aluminum materials, anodic oxidation is employed for the system.

However, the color tone is required to be light and homogeneous for good visual merchantability. Countermeasures should be taken against defects which may be caused to base metals during processing. MMC, which is used for a part of cushion, is introduced for reference. Surface reforming for high performance which is particular to motorcycles is applied to an engine system: lubrication Alumite for piston, special phosphate Mn treatment and Ni-P-SIC dispersion plating for cylinders, PVD (TiN) for rings and Ti connection rods, and electro sulfurizing for gears.

Finally, taking into account the future trend of materials, the author would like to refer to the surface reforming which will be required in the future.

万台をピークとして、以後国内需要の低迷および海外現地生産の拡大、さらに先進国における安全問題、環境問題などが発生したことにより減少し続けてきた。が、1999年には前年比やや戻して約281万台の生産量であった。この中味を排気量別

* 技術本部要素研究部

にみると50cc以下が約50%, 50~250cc級が約35%, 251cc以上が約16%となっている⁽¹⁾。モーターサイクルにおける材料、表面改質の典型的な特徴は、この中で250cc以上のスポーツ車と呼ばれるカテゴリーの車種に端的に垣間見れるので、本論文ではこの車種を中心として論を進めていきたい。

さてモーターサイクルの表面改質を論ずる上で、前提条件として3つの観点を考慮にいれておきたい。すなわち、その材料構成比、使用条件、外観商品性の3点である。第一に材料構成比であるが、図1に代表的な輸送機器の材料構成比を示す⁽²⁾。自動車は約80%が鉄鋼材料、約4.5%がアルミで構成されているが、航空機は自動車の鉄鋼材料分の約80%がアルミ材料に置換されているのに対し、モーターサイクルではその中間の約33%がアルミ材料である。これはある意味で、軽量化に対する要求度のパロメーターとも言え、同時にモーターサイクルにおいては、表面改質を考える上で、後の外観商品性の観点も加えると、容積比で最大となるアルミ材料の重要性が極めて高いことをも示している。第二に考えなければならないことは、使用環境条件である。とりわけ構造体として考えた場合、振動発生源としてのエンジンの性能が大きな影響を与える。つまり、モーターサイクルのエンジン性能は、平均すると約150~200馬力/ ℓ と自動車の約2倍以上あるため振動応力、熱負荷、面圧、速度、潤滑などすべての面で負荷が増

大している。したがって、従来の材料、表面改質だけでは不十分な場合があり、新材料、新表面改質を使用または開発を行ってエンジン性能向上に対応している。第三者は、ユーザーの約80%が30才以下と若いこともあってデザイン、色彩、ファッション性なども含めた外観商品性に対して厳しい要求があり、材料、表面改質は、構造用として機能を満足した上でこの外観商品性も満足しなければならない。特に既述したアルミ材料は外観に出ているため、その色彩、色調について材料成分、加工特性まで制御して対処しなければならない場合がある。以上表面改質を考える前提条件として3つの観点を述べたが、これらが部品にどのように具現化しているかをフレーム系とエンジン系にわけて示し、最後に表面改質に対する課題と要望を材料動向を踏まえながら論じてみたい。

2. フレーム系の表面改質

2.1 フレーム

図2にフレームの表面処理を示すが、素材から鋼管またはアルミフレームに分類され、スポーツモデルでは、後者のほうが主流である。前者では、一般的に塗装が用いられるが、一部の機種にスズコバルト合金めっき (Tin-Co, TCめっき[®]) が採用されているのが特徴的である。カバーリングが良いため複雑なフレームに適し、皮膜特性と

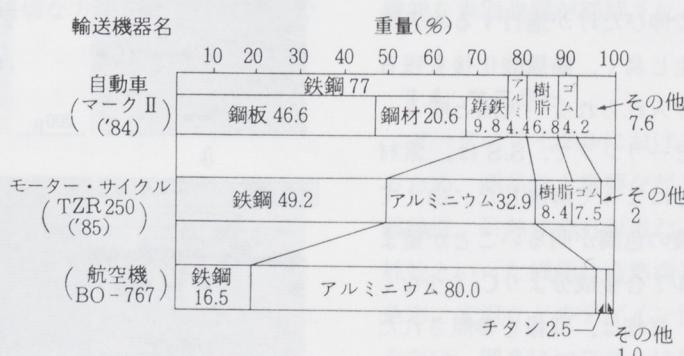


図1 各種輸送機器の材料構成比

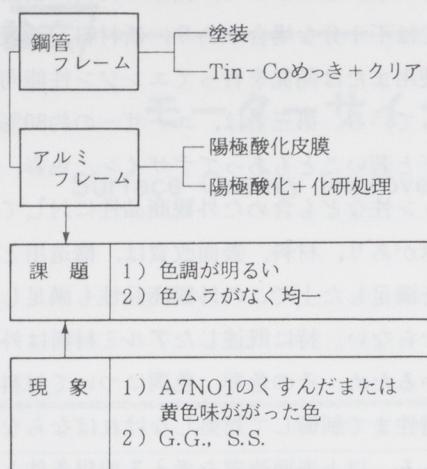


図2 フレームの表面処理と課題

して装飾性、耐蝕性に優れている。一方アルミフレームは1983年に一般車に展開されて以来⁽³⁾ 軽いアルミのイメージを保つため陽極酸化皮膜を採用している。このとき、素材の加工特性により陽極酸化皮膜の色彩、色調の均一性に問題が生じている。すなわち、溶接構造用三元アルミ合金A7N01FDT6からなる部品を熱間鍛造にて製造する際、加工歪と加熱により表層部にグレイン・グロース(Grain Growth, G.G. 結晶粒径が異常に粗大化する現象)を生じ、陽極酸化を施すと結晶粒界がさらに浮かび上がって蛇皮のような模様を呈し、外観商品性を著しく損ねた例がある。またアルミ板材A5083P-0材をプレス成形するとストレッチャーストレイン(Stretcher Strain, S.S. 塑性領域の直後に一定応力で伸びだけが進行する為表面に皺となる現象)が生じ易く、陽極酸化後も残るため、ユーザには受け入れられない欠陥と映る。G.G.は、素材丸棒のピーリングで、S.S.は、素材板に予歪を加えることによって解決した。加えてA7N01の陽極酸化皮膜の色調が明るいことが望まれたため、従来のアルミ合金成分よりCrを少なくすることで達成した。詳細は、別報を参照されたい⁽²⁾⁽³⁾ このように、通常は、外観商品性と表面改質は、同義語の場合が多いが、アルミ材料の場合、

材料の成分や加工特性が陽極酸化皮膜を介して顕著に外観商品性を支配する例である。

2.2 リアクション

同部品は、メカニカルなスプリングに加えて油圧と加圧ガスを利用して後輪が受ける荷重を吸収している⁽⁴⁾ 後輪に荷重が加わる度にオイル室を形成するシリンダーチューブ(アルミ材料A7N01、硬質アルマイド10μ)の内面をピストン(鉄系焼結品)がしゃう動するのだが、厳しい使い方をすると、硬質アルマイドが摩耗しクッション性能を低下させる場合があった。シリンダーチューブ材には上記耐摩耗性の他に、耐圧性、低熱膨張係数、しゃう動特性、熱放散性、軽量、加工性などの要求機能があり、これらを出来る限り満足させるためにSiC粒子分散型複合材料(Metal Matrix Composite, MMC)を採用した⁽⁵⁾ その組織写真を図3

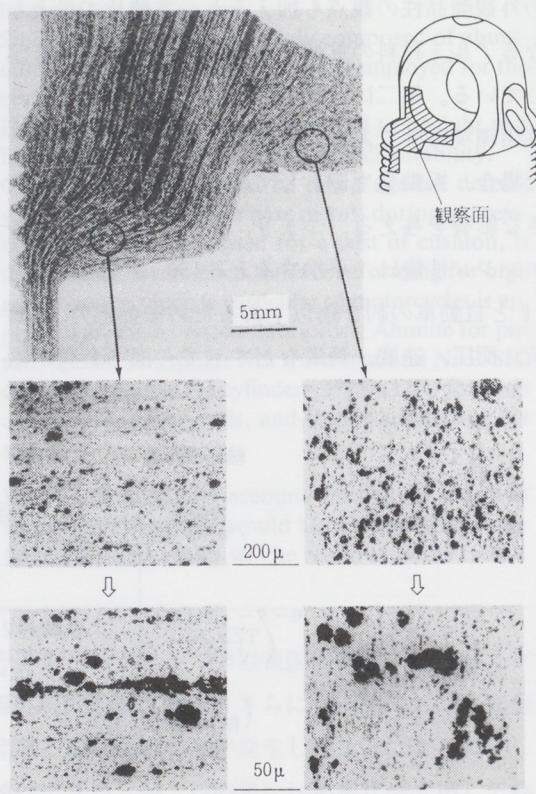


図3 SiC粒子分散型MMCの金属組織

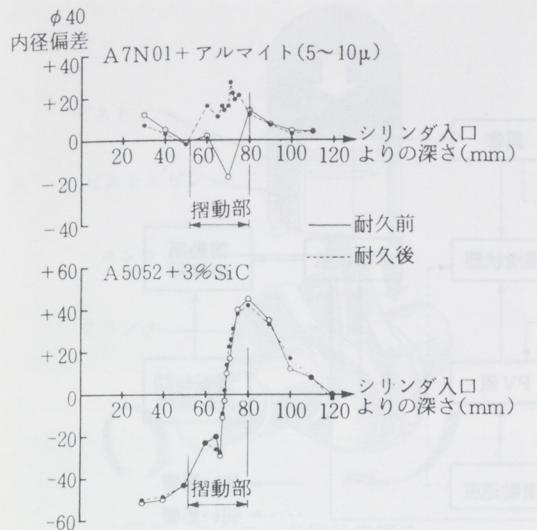


図4 従来材とMMCの摩耗量比較

に示すが、アルミ母材A5052に約20~30 μ のSiC粒子をVf(体積%)で3%添加したものである。要求機能からすると、SiCのVfは、多いほうが良いが、後方押し出しによる冷間鍛造を用いるため加工性を考慮してVfを決定した。従来材とMMCのシミュレーション耐久試験での摩耗量の比較結果を図4に示す。摩耗に関しては従来材が約40 μ 摩耗したのに対しMMCは全く摩耗が生じなかった。したがって、最終的には、摩擦熱の発生やオイル粘性の低下などが防がれクッション性能が向上した。このように、クッションに関する材料または表面改質には、高機能が要求されることが多い。本来、このケースは、アルミ材料の表面改質で行うべきところであったが、適切な方法がなく材料置換を行った例である。

白クロム (4層)	0.15 μ	Cr
	10 μ	光沢Ni
	1 μ	ストライクNi
	10 μ	半光沢Ni
黒クロム (5層)	白クロム+黒クロム (最外層1 μ)	
	0.15 μ	Cr
サチライト ニッケル (3層)	5 μ	サチライトNi
	10 μ	半光沢Ni

評価

	耐熱性	耐摩耗	耐蝕	カバーリング
白 ク ロ ム	○	○	○	△
黒 ク ロ ム	○	○	△	×
サチライトNi	◎	○	◎	△

図6 マフラーの表面処理と評価

2.3 フロントサスペンション

望遠鏡の鏡胴のようにインナーチューブとアウターチューブが嵌め合わされてしゅう動し、その内部にはスプリングとオイルが組み込まれて、前輪が受けた荷重を両者で吸収する。インナーチューブ(炭素鋼管)の表面はしゅう動するため硬質Crめっき(下地Niめっき)を施し耐蝕性と外観商品を同時に満足し、一方アウターチューブ(アルミ合金鋳物AC2BまたはAC4D-T6)内面は、バニッシュ加工を行ってしゅう動性の向上を計っている。加えてインナーチューブの先端とアウターチューブの入口にDUメタル®(裏金に青銅粉末を多孔質に焼結しPTFEとPbの混合物を含浸させた軸受材料)を埋め込んでいる。組織写真を図5に示す。2.2と同様に極めてしゅう動特性の良い高機能な表面改質が期待される。

2.4 マフラー

モーターサイクルにおけるマフラーは外観に出るため、商品性上重要な部品である。したがって耐蝕性、耐熱性や石が当たったりしたときの耐摩耗性といった機能は当然満足したうえで、形状、色彩、光沢などのデザイン性を考慮しなければならない。図6にマフラーに用いる表面処理とその定性的比較を示す。いずれも耐熱性の要求からト



図5 DU® メタルの断面組織

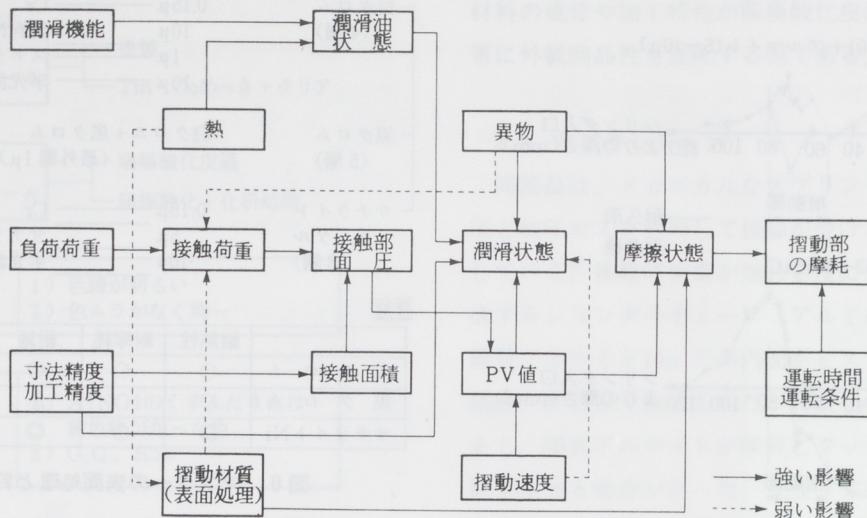


図7 内燃機関の摺動メカニズム

ップコートはCrめっきで、また耐蝕性をより高めるため白クロム、黒クロム共下地は三層Ni（トリニッケル）を用いている。これは、ニッケル中のS量を母材に近い層ほど多くすることによって鋼板より電気化学的に卑にもっていき、耐蝕性を向上させている。またニッケル浴中に微粒子を添加懸濁させてめっきすることによりサテン（梨地）仕上げができるサチライトニッケルめっきも用いている。このトリニッケルCrめっきやサチライトNiめっきを用いているのがモーターサイクルの特徴であるが、課題としては高温に晒されても変色しないCrめっきの開発であろう。

3. エンジン系の表面改質

2サイクルエンジンと4サイクルエンジンがあり、前者は、クランクが1回転（ピストン1往復、2ストローク）する間に1サイクル完了し、後者は、2回転（ピストン2往復、4ストローク）で1サイクル完了するので、それぞれ正式には、「2ストローク1サイクル」「4ストローク1サイクル」エンジンという。2サイクルエンジンは、構造簡便、小型軽量、安価、高出力、燃料消費大、熱負

荷大という特徴を持ち、比較的小さい(500cc以下)機種に用いられ、一方4サイクルエンジンは、構造複雑、高コスト、重量大、燃料消費小、熱負荷小であり、あらゆる機種(50～1300cc)に使用される。

一般に、エンジン特に内燃機関の内部部品のしゅう動メカニズムを図7に簡略に示す。基本的には、約1073～1273Kという燃焼ガスによる熱源があり、そのエネルギーにより0～約20m/secの可変速度で常に変動荷重を受けている。それにしゅう動材質（表面改質）と潤滑が付加され、これらのすべての要因が複雑に絡み合ってしゅう動しているのが、エンジン内部の部品であり、なかなか解析が困難なのが現状である。

これらの要因からすると、熱的負荷が大きく、潤滑が不十分な2サイクルは、より厳しいしゅう動状態となるため、逆に材質、表面改質が進歩発達した。これらを順次部品で見ていきたい。

3.1 ギヤ

通常、SCM415(オフロード)、SCM420(オンロード)の浸炭焼入れ焼戻し材を用いるが、年々の性能向上に伴いギヤに対する負荷荷重、衝撃荷重

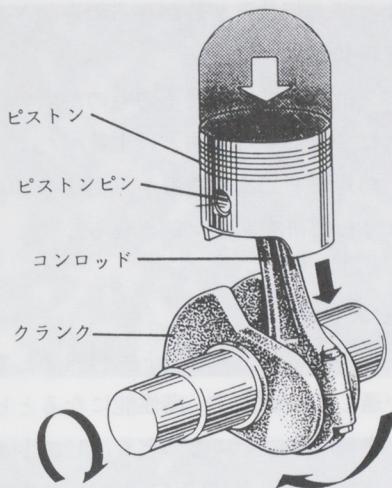


図8 コンロッド回りの構造

が増大し、特殊なギヤ用鋼も一部使用され始めた。しかしピッキングに対してはなかなか有効な方法がなかったが、電解浸硫法（コーベット法^⑧）の効果が認められ、ピニオン、減大ギヤなどに採用されている。同法は、塩浴中でワークを陽極、塩浴を陰極にし通電するとイオン反応によって鉄鋼の表面に硫化鉄が生成しこれが耐摩耗性、耐ピッキング性、油膜の耐圧性向上などの効果を付与している^⑦。今後耐ピッキング性向上の表面改質の開発が望まれる。

3.2 スラストワッシャー

エンジンのピストンからクラランクまでは、爆発圧力を受けたピストンの往復運動を回転運動に変換する最も重要な部分である。この概略を図8に示すが、この部分で数多くの表面改質が極めて多彩かつ重要な役割を果たしている。まず往復運動をするコンロッドと回転運動をするクラランクが焼付かずにはスムースなしう動をさせるため、2サイクルでは、両部品の間にバックメタルに銀めっきを施したスラストワッシャーを挿入している。潤滑が切れてメタルコンタクトになった場合、銀のもつ展延性からくる固体潤滑性がきいていると考えられている。

3.3 チタンコンロッド

近年、一部の4サイクルモーターサイクルにおいて、往復慣性質量の軽減を目的とし、コンロッドにTi-6Al-4V合金が採用された^⑨。4サイクルのため、通常潤滑が良く鉄鋼材料のコンロッド（S55C、またはSCM435調質）であれば無処理で良いが、チタン合金の場合は焼付き易くクラランクとの間でかじりや焼付きが生じ易い。したがって何等かの表面改質を必要とし、酸化皮膜を用いたりTiNのPVDコーティングで対策している。いずれも切削加工後に処理を行うため、処理温度に起因した歪を防ぐ事が重要である。PVDは、膜厚が約1～2μと薄く、高い面圧には耐えられないので、小端のブッシュを廃止することが出来ないという欠点を有する一方、酸化皮膜法は、疲労強度が大幅に低下する欠点がある。低成本で部分的に且つ厚膜ができるPVDやCVDなどが期待される所以である。

3.4 ピストン

既述したように、モーターサイクルのエンジン性能は約150～200馬力/ℓと非常に高いため、ピストンに対する熱負荷が年々厳しくなり、様々な表面改質で何とか対応している段階である。図9にピストンに用いている表面改質（ほとんどが2サイクルエンジン）をまとめて示す。まずピストンヘッドがデトネーション（異常爆発）によって溶損するのを防ぐため、Niめっきを施すと効果がある。デトネーションは、約2273K近い高熱と衝撃

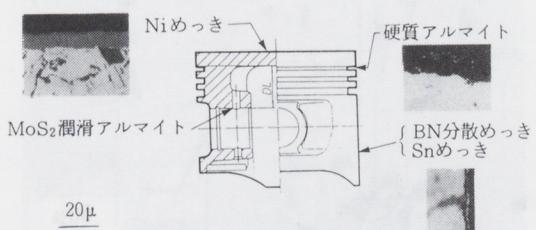


図9 ピストンに用いる表面処理

波を発すると言われており、ヘッド外周部のAlを一瞬に溶け落してしまう。Niめっきはこの衝撃波を反射していると考えられている。次にトップランドとファーストリング溝の部分に硬質アルマイトを施している。これは、主にピストンリングにピストン材料(2サイクルはAl合金鑄物AC9B-T7)のAlが凝着しリングスティック(膠着)が生じるのを防ぐために行う。つまり、この部分は、約523K以上となり⁽²⁾ Alが軟化するためリングと当たるうちにリングにAlが移着しピストンのAlと凝着をおこしついにはリングの自由な動きを妨げ往復運動の抵抗となってしまう。アルマイトの硬質層はAlを被覆してしまうので凝着防止に有効である。さらにピストンスカート(側面)のある部分は、構造的、熱的に張り出し、シリンダー側としゅう動するときスカッフ(軽い焼き付き)を起こすときがあるので、初期なじみやしゅう動特性を改良するため、SnめっきやNi-P-BN分散めっきを加えることがある。

また最近エンジン性能の高い機種では、ピンボス、ピストンピンが大きく撓むため、ピストンピンがピンボス内面へ高い局部面圧を与え、ピストン材のAC9Bの初晶Siを碎き、碎かれたSiがピンボスもピストンピンも摩耗させてしまう現象が起きている。碎かれた初晶Siが再びピンボス内面に埋め込まれている様子を図10に示す。この対応として、ピンボス内面にMoS₂潤滑アルマイトを施す



図10 ピンボス摩耗面の断面組織

ことによって、初晶Siが碎かれるのを防ぎかつ局部面圧を緩和している。

ピストンに関しては材料そのものが限界にきており新素材で対応する方法と以上述べたように表面改質での対応と二通りあるが、構造も絡んで複雑であり今後の研究開発が望まれる。

3.5 ピストンピン

4サイクルエンジンのピストン材料としては、AC8Aが適している⁽²⁾が、高性能になるとピンボス内面が摩耗するので、このときはピストンピン(肌焼き鋼SCM420浸炭)表面に磷酸Mn処理後デフラックコート[®](MoS₂)⁽⁹⁾を行っている。

3.6 シリンダー

モーターサイクルにおけるシリンダーのピストンとのしゅう動表面を図11にまとめた。一般には、アルミ合金鑄物AC4BまたはアルミダイカストADC12にFC25相当の鉄スリーブを鋳ぐるむか圧入して用いている。この鉄スリーブのしゅう動特性では不十分なときピストンリングスカップやリング焼けを生じる場合がある。そこでしゅう動特性を改善するため磷酸Mn処理を鉄の表面の表面に施すのが有効であることが判明したが、従来の塗装下地に用いる磷酸Mn処理では機能上不十分であった。そこで、従来より結晶粒径が小さく柔らかい特殊な磷酸Mnを開発し(図12参照)、図13に示すようなファビリー式摩耗試験機で実験を

ボディシリンダー母材；AC4BまたはADC12

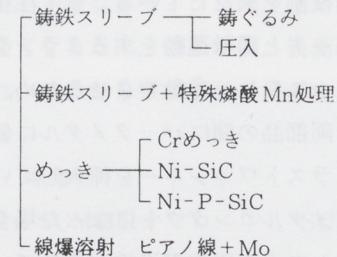
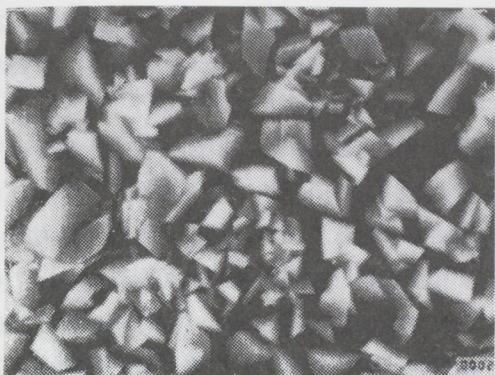


図11 シリンダーしゅう動表面の改質



従来の磷酸Mn



改良された磷酸Mn

10 μ

図12 磷酸Mn処理のSEM写真

行った結果、図14に示すような摩耗が少なくスカッフの無い磷酸Mn皮膜を得ることができた。すなわちブロック材にピストンリング材料を、ピンにスリーブ材料をもってきて、3000Nという高荷重で摩耗試験を行った結果、FC25はスカッフを、従来の磷酸Mnは摩耗が生じ改良した磷酸Mn処理は、

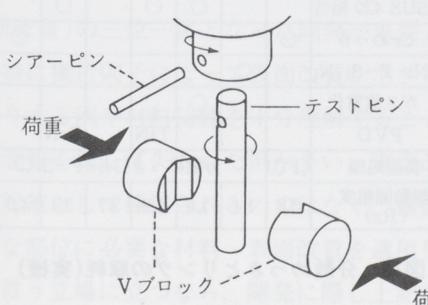
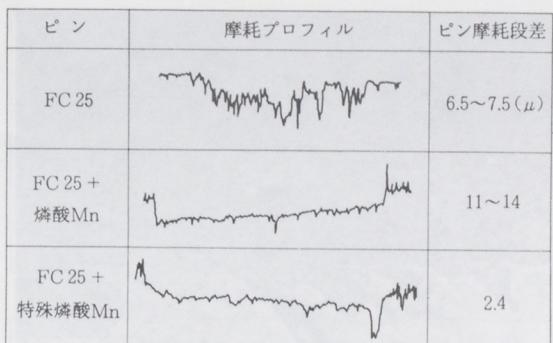


図13 ファビリー式摩耗試験の原理



摩耗条件 ブロック材; S45C+Crめっき
回転数; 300rpm 時間; 1min
荷重; 3000N 潤滑; オイル浸漬

図14 磷酸Mn処理の摩耗試験結果

両者とも生じなかった。

しかしながらさらにエンジンを軽量高性能にもっていくには、鋳鉄スリーブそのものを無くしてアルミシリンダーブロックに直接めっきをするいわゆる“めっきシリンダー”へと進む。めっきシリンダーにすると、スリーブシリンダーのようにAl凝固時の残留圧縮応力によるスリーブの変形は、最初から無いため、シリンダーのボアの変形が小さくなる。かつ熱伝導率の高いアルミ母材に近くなることによりシリンダー壁温が低下する。この一例を図15に示すが、従来のスリーブを鋳ぐるんだけシリンダーに比較し壁温が、20K以上低い。したがってオイル温度が低下し粘性が保持できるためオイル潤滑が良くなる。変形が小さく潤滑状態がよいなどの理由で、耐焼付性が向上する。同時

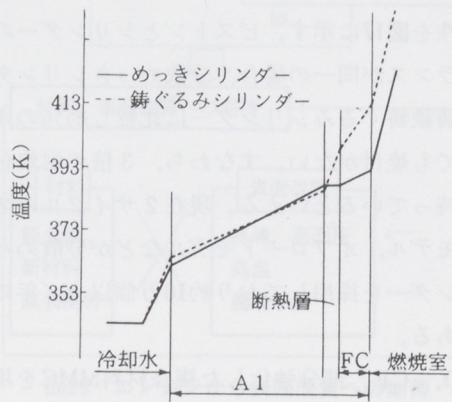


図15 シリンダー壁面温度分布

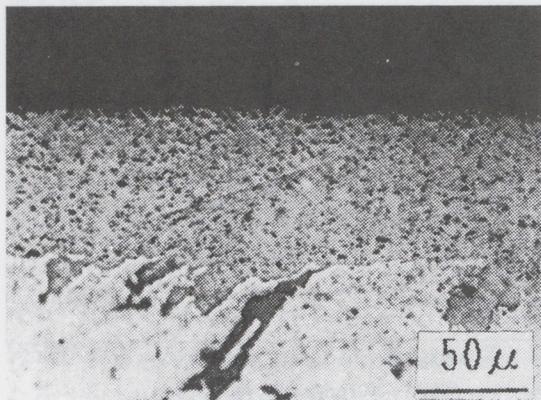


図16 分散めっきの断面組織写真

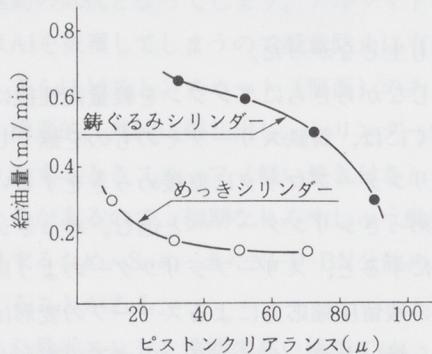


図17 限界油量の比較

に、軽量化にも貢献する。当初は、Crめっきより始まったが、Crめっきそのものの焼付きまたはスカッフ荷重が不安定かつ低いため、Ni-P-SiC分散めっきに移行していく。図16に組織写真を示すように、2～3 μのSiC粒子が体積%Vfで3～5%含まれている。分散めっきのエンジンにおける焼付特性を図17に示す。¹⁰⁾ ピストンとシリンダーのクリアランスが同一の場合、分散めっきシリンダーは、鉄鉄鉄ぐるみシリンダーに比較し約1/3のオイル量でも焼付かない。すなわち、3倍の耐焼付き性を持っているといえる。現在2サイクルのスポーツモデル、オフロードモデルなどが分散めっきシリンダーを採用しており約10万個以上／年の実績がある。

(Al₂O₃+CF)部分強化した複合材料MMCを用いるのが現れた。^{11)/12)} プリフォームにAlダイカストで

シリンダーブロックを製造するときに溶浸させるもので、一体である所がメリットである。今後の新しい動きの一つである。

3.7 ピストンリング

分散めっきシリンダーの出現により、従来のピストンリング材は摩耗が多く耐久寿命が短い。そこで種々の表面処理を施したリング材を実機試験した結果を、図18に示す。従来の鉄鉄スリーブとバネ鋼SUP3にCrめっきをしたリング材を標準仕様とすると、分散めっきシリンダーの場合、外周摩耗量、合い口隙增加量共に標準仕様と同等なのは、ステンレス鋼SUS420相当材にTiN PVDコーティングを行った組み合わせのみであった。PVDの母材との密着強度を上げるためにには、前処理として窒化が適当でその窒化性を高める元素Crをたくさん含有しているステンレス鋼が良い。TiN層の膜厚は、数μであるが、現時点ではコストが高い。

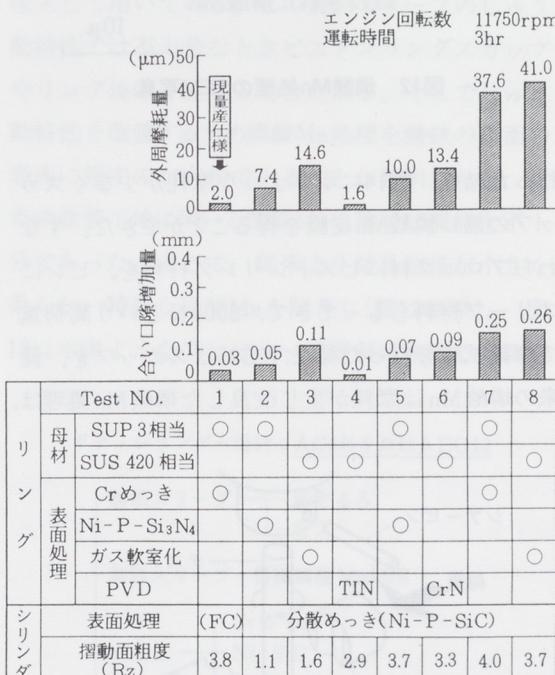


図18 分散めっきとリングの摩耗(実機)

4. 動向と表面改質技術への期待

モーターサイクルにおける材料の動向として、基本的な考え方を図19に示す。軽量化を目的とした材料代替（鉄鋼材料からアルミ材料）は特にフレーム系を中心に終了したと考えている。したがってフレーム系は、今後コストダウンを中心とした動きになっていくと思われる。一方エンジン材料は、通常のAI材料では、機能的に不十分なため新素材、表面改質それ自体と加工方法、構造的熟成も含めた総合的開発が必要である。中でもエンジンの燃費向上、排気ガスの清浄化、小型高性能化などに寄与する新材料（軽金属ベース）と表面改質をどう機能開発していくかに移行していくと思われる。部品の観点からは、ピストン、シリンダー、バルブ回りなどが重要であり、様々なトライが為されているが未だ研究開発段階であることは否めない。エンジンから表面改質への期待を定性的にまとめると図20になる。要は、新素材と表面改質の相乗作用によって上記エンジンの期待に応えていこうということであり、具体例としては、表1のような表面改質が考えられる。おしなべて表面硬化に関することが多い。

5. おわりに

モーターサイクルの使用条件を念頭に、他の輸送機器とは異なった特徴的な表面改質について述べてきた。表面改質を応用してきた立場からいえば、図21に単純に示したが、構造-材料-加工（表面改質）の三位一体となった開発が重要と考える。特に構造因子によって表面改質が活きたり死んだりする例や材料特性を十分理解すること無く表面改質を施して失敗した例が多い。表面改質が事後対策として採用されるのではなく、積極的に必要な部位に必要な材料・表面改質を適用していくと言う立場に立つなら、開発に際し上記のような考え方が必要と考えている。

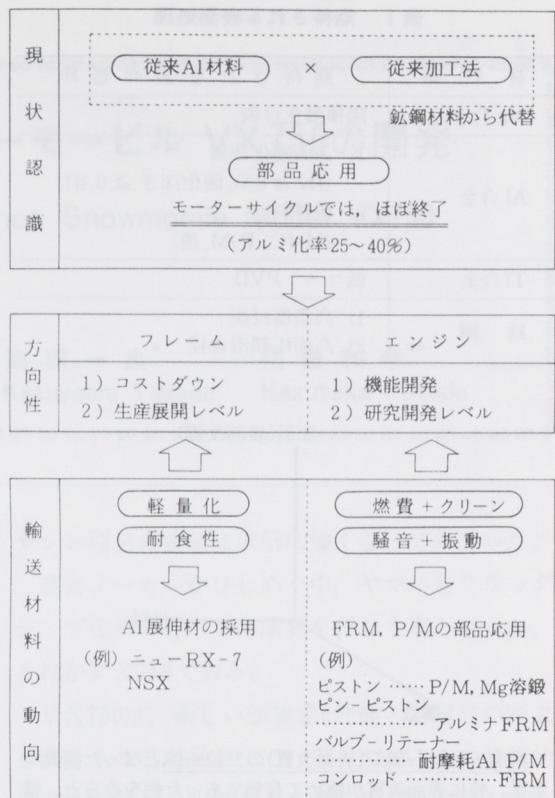


図19 アルミ化の現状と今後の動向

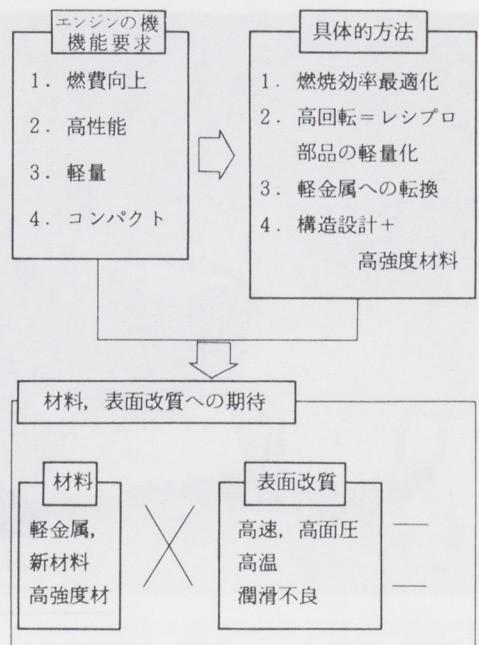


図20 エンジンから表面改質への期待

表1 期待される表面処理

材 料 系	期 待 さ れ る 表 面 処 理
Mg 合金	陽極酸化技術
Al 合金	1) 表面硬化技術 ($H_v \geq 800$, 硬化深さ ≥ 0.6) 2) 新材料 (MMC, P/M, 他)
Ti 合金	低コスト PVD
鉄 鋼	1) 高濃度浸炭 2) 高面圧潤滑皮膜

加工(表面改質)

材料

構造

構造-材料-加工(表面改質)の三位一体となった開発が重要。特に表面改質が極めて有効であった例をみると、構造が基本的に必要条件を満足している場合が多い。

図21 表面改質の技術的位置付け

〔参考文献〕

- 日本自動車工業会, 日本の自動車工業, 1990
- 山田徹, 軽金属, 39, 310(1989)
- 山田徹, Boundary, 2, 287(1988)
- 山田徹, 軽金属, 41, 67(1991)
- 日刊工業新聞, 1989, 11, 17
- 大同メタル工業, 技術資料
- 東京熱処理工業, 技術資料
- 萩原好敏他, 自動車技術, 42, 1216(1988)
- 川邑研究所, 技術資料
- 中村雍, 自動車技術会シンポジウム「自動車を支えるトライポロジー: 現状と将来」1988. 4.21
- 日経メカニカル, 6, 27, 56(1991)
- 林直義他, HONDA R&D Technical Review, 1, 55 (1991)

■著者■



山 田 徹