



肉燃機関用ピストンに関わる トライボロジー技術の最近の話題

荻原 秀実

(株)本田技術研究所 栃木研究所 APRブロック・研究員

1. はじめに

従来の手法とは異なる新しい表面改質熱処理技術(WPC処理)を応用したMD(Micro Dimple)処理技術¹⁾と、二硫化モリブデンショット処理(MoS₂ショット処理)技術²⁾を開発した。当該技術はピストンスカート部の表面形状改良、性状改質を行い、フリクション(しゅう動抵抗)を大幅に低減するものである。併せてその効果持続性、生産性、コスト、処理時排出物のリサイクル性も考慮している。これらを達成した両技術について紹介する。

2. 効果的なフリクションの低減

図1に示すように、市街地を走行するときの部分負荷運転時には、全機関損失の半分以上を機械損失が占め、機械損失の約4割はピストンのフリクション(駆動損失)である。このためピストンフリクションを低減することが機関損失低減に効果的である。

3. 新しい表面改質手法

ピストンスカート部の表面改質を行うためにWPC処理を応用した。WPC処理とはWonder Process Craft処理の略であり、目的に応じ材質を選定した粒径200 μ m以下の微粒子を100m/sec以上の高速度で圧縮空気とともに処理対象物に投射し、その最表面を鉄系金属ではA3変態点以上に、非鉄系金属においては再結晶温度以上に昇温し、瞬間的に熔融、再結晶化するもので、しゅう動特性、機械的諸特性などの向上を図る、新しい表面改質熱処理特許技術である³⁾。MD処理、MoS₂ショット処理は、このWPC処理を応用した技術である。

4. 今までの表面処理法

現在、ピストンのフリクション低減や、なじみ性向上、耐焼付き性の向上に対して、しゅう動表面処理法としては、コーティング法が主流であり、顕著な効果が得られる。しかし、コーティング法はコーティング材のほかに樹脂系のバインダ(接着剤)を要し、その含有量は4割以上になる。よって、たとえばコーティング材に二硫化モリブデンを用いた場合、二硫化モリブデンが本来発揮する、低しゅう動性や、移着を抑制する。また、コーティング膜厚分、ピストン径が変化することをピストン設計時点で考慮しなければならない。さらには機関の慣らし運転

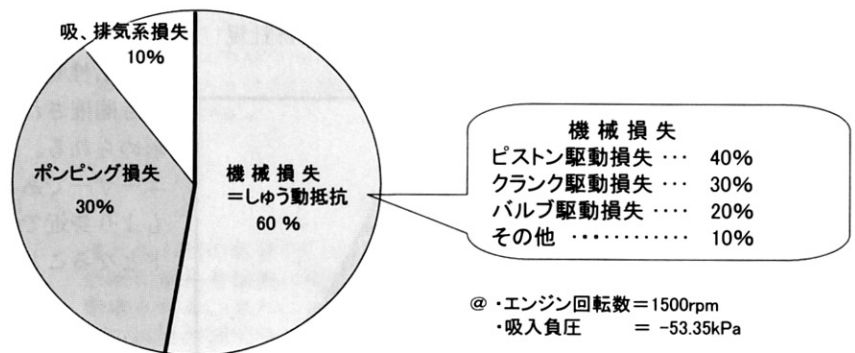


図1 エンジンの損失割合

【著者問合せ】

〒321-3393 栃木県芳賀郡芳賀町下高根沢4630
Tel.028-677-3377(内39181) Fax.028-677-6760
E-mail Hidemi_Ogihara@n.t.rd.honda.co.jp

終了時点ではスカート部の真実しゅう動部分で、コーティング膜はほとんど残存していない。つまり、膜厚分ピストンとシリンダスリーブ間のクリアランスが拡大し、場合によってはピストンスラップ音などの異音の増大を引き起こし、商品性の低下につながる。また、膜の耐久性(密着性)を考慮し、バインダ含有量を増せば、低しゅう動性はさらに低下してしまう。

そして、コーティング処理の際は、有機溶剤などを用いるため、排気、廃液処理が必要となる。

5. 技術開発目標

WPC処理を応用した表面改質ピストンの技術開発にあたり、以下のことを目標とし、開発に取り組んだ。

- ・十分なフリクションの低減と、効果持続性
- ・形状、寸法変化の抑制
- ・排出物のリサイクル性
- ・簡易な生産性
- ・低コスト
- ・バインダフリー(MoS₂ショット)

6. フリクション測定法

今回の実験では、機関単体で、テストベンチでモータリング法によるフリクション測定を実施した。モータリング法によるフリクションの測定は、ファイアリング法に対し混合気の燃焼によるピストンやスリーブに負荷される荷重がない。また、各 부품の熱膨張も少ない。たとえば低しゅう動材に二硫化モリブデンを用いた場合、二硫化モリブデンはある一定以上の荷重の負荷により結晶配向を発現し、より低しゅう動を示す⁴⁾。よってモータリング法で効果が確認された場合、ファイアリング法ではより低しゅう動を発現することも考えられる。しかし一般的に考え、モータリング法で効果がなかったものが、ファイアリング法では効果が得られるといったケースは考えにくい。このため、フリクションの測定にはシンプルなモータリング法を用いた。

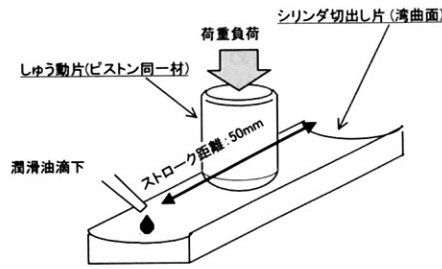


図2 往復動試験装置(概略)

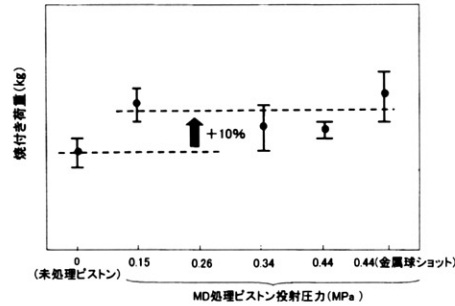


図4 往復動試験結果-2

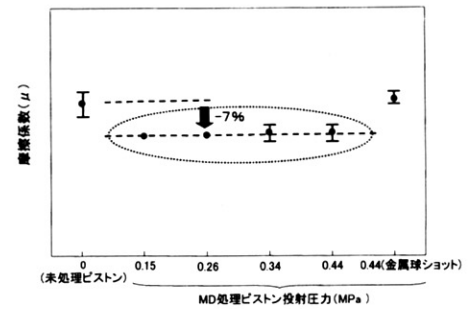


図3 往復動試験結果-1

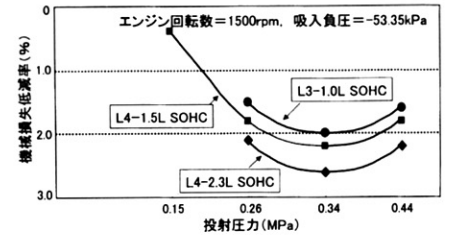


図5 投射圧力に対するフリクション低減率特性

7. 表面改質手法とその効果

7-1 MD処理ピストン

7-1-1 特徴の概略

MD処理はWPC処理をピストンに応用したものであり、中心粒径約50 μ mの略球形セラミックビーズを、圧縮空気流とともにピストンスカート部へ投射し、オイルピットとなるミクロンオーダーサイズのディンプルを無数に付与する表面形状改良技術である。処理の際、問題となるような寸法、形状変化は生じないため、通常のピストン製作工程の後に処理が可能である。

7-1-2 往復動試験

MD処理によるフリクション低減効果を明かにするため、テストピース(TP)を用いた往復動試験による摩擦係数、および焼付き荷重の測定を行った。当該往復動試験の概略を図2に示す。シリンダスリーブを切り出した板状TPしゅう動面に潤滑油を滴下しながら、ピストンスカート面を模した先端球面状のピンTPを50mmのストロークで板状TP表面上にて往復動させる。その際に押付け荷重を段階的に増加させ摩擦係数をリアルタイムに測定し、摩擦係数を時間で積分することにより、単位時間当たりの平均摩擦抵抗を算出した。その結果を図3に示す。

MD処理を施すことで、投射圧力0.15~0.44MPa(ゲージ圧力、以下圧力値はすべてゲージ圧力)の範囲で、ベースピストンに対し、約7%摩擦係数が低下している。図4に示すように、焼付き荷重もMD処理により向上することが判明した。この結果から摩擦係数と焼付き荷重を併せて向上できる手法として、MD処理が有効であることを確認した。

なお、当該往復動試験は、実機フリクション測定結果と相関が取れるように開発したしゅう動試験装置、試験法である。

7-1-3 実機でのフリクション低減効果

投射圧力0.15~0.44MPaでMD処理を施したピストンを製作し供試機関に組み込み、フリクションを測定した。投射圧力に対するフリクション低減率特性を図5に示す。この結果から、投射圧力はフリクション低減率が最大となる0.34MPaに決定し、この条件下で排気量により2.0~2.6%のフリクション低減を達成した。

7-1-4 処理後の表面硬度

投射圧力0.15~0.44MPaでMD処理を施したピストンの表面硬度を、マイクロビッカース、圧子25gで測定した結果、HV硬度で約30ポイントの表面硬度上昇を確認している。しゅう動抵抗低減、焼付き荷重向上が得られる投射圧力でMD

処理することで、併せて最表面硬度も上昇するため、耐摩耗性の向上も期待できる。

実機における、この耐摩耗性向上効果として、マイクロディンプルの油膜保持性向上による効果分も含まれていると考えられるが、ピストンスカート部分に付与されている条痕形状の摩耗量が、未処理の50%以下となっていることを確認している。

7-1-5 リサイクル性

MD処理は圧縮空気とセラミックビーズしか用いないため、処理後排出される物は、空気と破砕したビーズのみであり、十分なりサイクル性を有する。

7-2 二硫化モリブデンショットピストン

7-2-1 特徴の概略

MoS₂ショット処理もWPC処理を応用した技術である。当該処理は、純度98.5%以上、粒径約11 μ m(細孔電気抵抗式による体積分布の中位径、以下二硫化モリブデンのサイズはこの中位径で記す)の鱗片状かつ不定形の二硫化モリブデン微細粉を用いる。この固体潤滑剤である二硫化モリブデン微細粉を、圧縮空気流とともにスカート部へ投射し、スカート部表面、および表面から最大で約20 μ m深度までの表層に純粋な二硫化モリブデン層を付与するものである。

当該処理もMD処理同様、問題となる寸法、形状変化を伴わないので、通常のピストン製作後にショット処理を行う。

7-2-2 最適投射条件

モース硬度1~1.5、比重4.8~5.0、粒径11 μ mの鱗片状かつ不定形の二硫化モリブデン微細粉を圧縮空気を用いた投射加工でアルミニウム合金製のピストンに

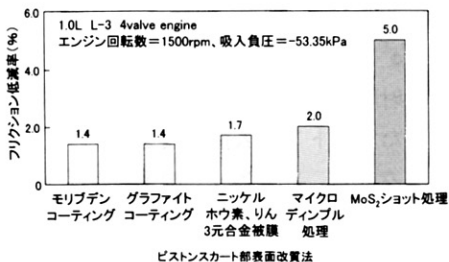


図6 表面処理手法別フリクション低減率特性

打ち込むためには高压を必要とするが、むやみに圧力を高めても投射材の破砕が多くなり投射材消費量が増すだけで打込み深度はさほど変化しない。このため単位時間あたりのピストン生産個数、投射材の破砕なども考慮した上で、投射圧力は0.90MPaに設定し、同様に最適投射時間も設定した。

7-2-3 各種表面処理手法とフリクション低減効果

実験から決定した最適投射圧力0.90MPaで製作したピストンを、試験的に各種しゅう動抵抗低減処理を施したピストンとともに、各々供試エンジンに組み込み、モータリングフリクションを測定した。測定の結果は図6に示すとおりであり、MoS₂ショット処理ピストンが最も効果が大きく5.0%のフリクション低減効果であった。モリブデンコーティング処理より効果が大きかった要因は、コーティングの際に必要なバインダを一切含有してない高純度二硫化モリブデンを用いることで、二硫化モリブデンが本来有する低しゅう動効果を十分発揮できるためと推察する。

7-2-4 フリクション低減効果の経時特性

図7に示すとおり、ベースピストン、MD処理ピストン、MoS₂ショットピストンの慣らし運転時間に対するフリクション低減指数特性を測定した。ここでフリクション低減指数とは、ベースピストンの運転開始時フリクションを1とし、この値を基準として各々の表面処理を施したピストンのフリクション低減率を指数化したものを指す。その結果、MoS₂ショットピストンは運転開始時点から大幅な低フリクションを発現し、ベースピストンに対し約4割ほど短い運転時間で

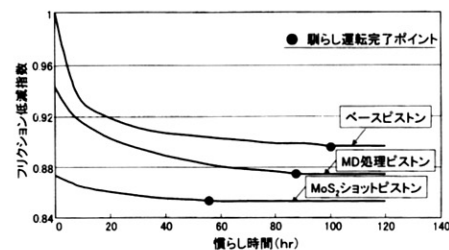


図7 表面処理別機関慣らし効果特性

そのフリクション値は安定する。これもバインダを用いてない高純度二硫化モリブデンによる低しゅう動効果であると、次の点から推察する。

二硫化モリブデンは4分子層3nmの粒子で存在すると自己劈開性を発現し低摩擦を呈する⁵⁾が、摩擦部分でより低摩擦を発現するためには滑り方向に並行かつ荷重方向に垂直に層を配向させるオリエンテーション(結晶配向)が不可欠である⁴⁾。この結晶配向は粒子にたった一回の滑りを与えることで発現することが直接観察で確認されている⁶⁾。この際、結晶の破壊や回転を伴い、劈開した粒子の別部分への移着も促進され、より低しゅう動を発現すると推察される⁴⁾。内燃機関のピストンのしゅう動は爆発荷重を受けシリンダに押し付けられながらのしゅう動であり、オリエンテーションをするにたる面圧を受けていることは明白であり、機関運転初期から大幅なフリクション低減効果を発現するのはこのためであると考えられる。

さらに120時間運転後においてもフリクション値は安定していることから、機関の終身にわたり十分な効果持続性を有すると推測される。

またここで、MD処理ピストンも未処理ピストンに対し、初期からしゅう動抵抗が低く、かつ90時間経過後にはほぼ平衡状態となり、やはり120時間運転後においてもベースピストンに対し、2%以上のフリクション低減効果を保っていることから、MD処理ピストンも十分な効果持続性を有すると推測されることを付記する。

7-2-5 二硫化モリブデン打込み深度測定法

二硫化モリブデン打込み深度を確認するために、まずスカート部を1 μ m刻みに掘り下げ測定した。掘り下げ加工にはイオンミリング法を用い、加工の熱的影響、汚損、損傷を回避しながら掘り下げた。次に掘り下げ加工面は、同じく1 μ mごとに、図8に示すようにFE-SEM/EDX(電界放射走査型電子顕微鏡)でカラーマッピングを行い、モリブデン元素だけを表示

表 二硫化モリブデン打込み深度によるフリクション低減率特性

二硫化モリブデン打込み深度	フリクション低減率
1 μm	2.1%(ただし持続性なし)
2 μm	4.3%
3 μm	3.9%
4 μm	4.1%
12 μm	4.3%

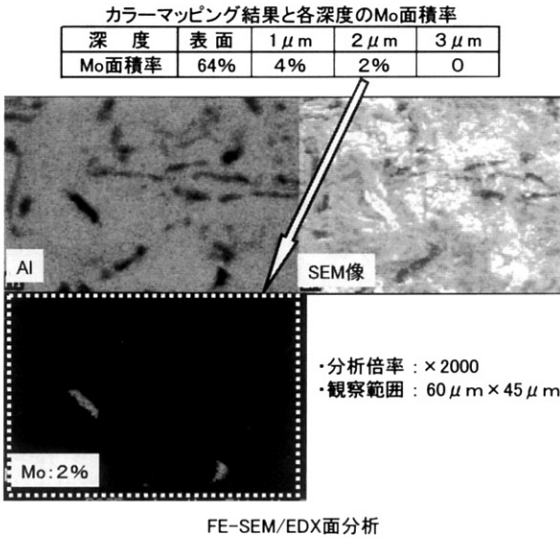


図8 画像処理によるモリブデン面積率の数値化

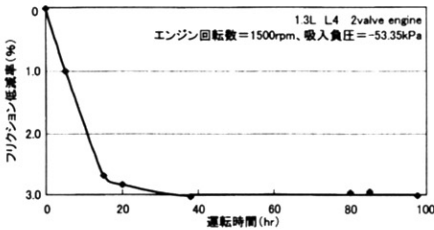


図9 機関慣らし時間によるフリクション低減率特性

し、そのマッピング面を二値化画像処理し、観察範囲内におけるモリブデン元素の存在を面積率で求めた。

7-2-6 二硫化モリブデン打込み深度の定量化

打込み深度を1、2、3、4、12 μmと変化させたピストンを製作し、モータリングフリクションを測定した。その結果を表に示す。打込み深度1 μmのものを除き、表面から2 μmより深層に2%以上の面積率で二硫化モリブデンが存在すれば、低しゅう動効果はほぼ一定となり、その効果持続性も満足するものとなることが分かった。このためモリブデン面積率が2%となる最深深度を「打込み深度」と定義し、「打込み深度基準」を2 μm以上とし

た。

7-2-7 しゅう動面摩減後の二硫化モリブデンの残存状態

打込み深度2 μmで製作したピストンを供試エンジンに組み込み、テストベンチでエンジン単体にて高負荷、長時間運転を実施した。図9に示すように約40時間運転後にフリクションはほぼ平衡状態となり安定し、100時間経過後もその値を維持している。100時間経過後のスカート部の実しゅう動部分における二硫化モリブデンの残存の有無をFE-SEM/EDXカラーマッピング、二値化処理で観察したところ6%面積率で残存を認めた(図10)。

続いてしゅう動面を掘り下げたところ、深層からも残存を認めた。100時間運転後の実しゅう動面の摩耗量は2~4.9 μmであり、初期打込み深度より深層から残存を認めたことは、高純度二硫化モリブデンを用いたことによる二硫化モリブデンの移着と推察する。よって二硫化モリブデンは深く打ち込めば打ち込むほど、

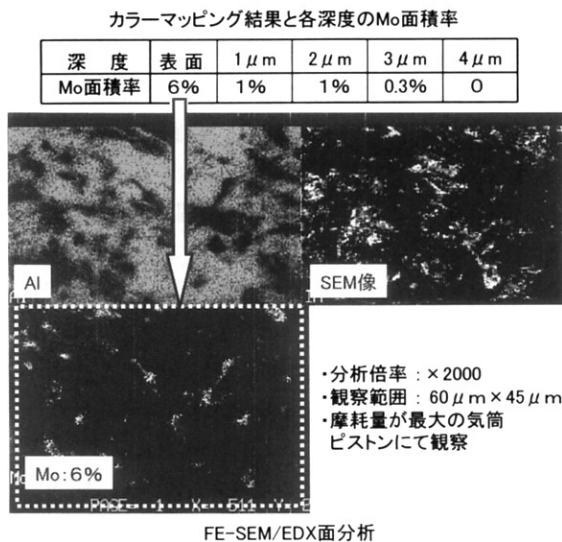
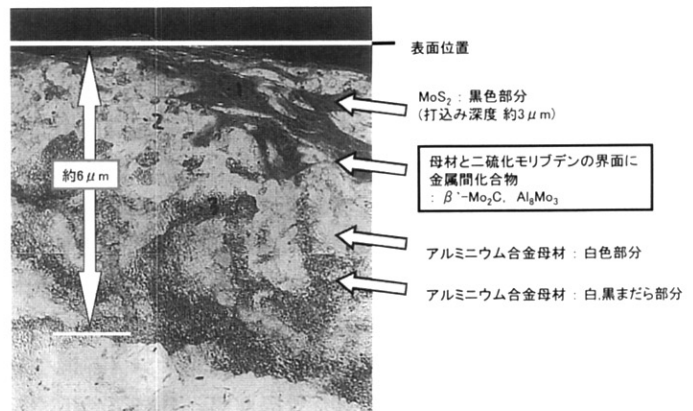


図10 長時間運転後のピストンスカート部のモリブデン残存状況



ピストンスカート断面 TEM(透過電子顕微鏡)像

図11 二硫化モリブデン打込み状態

MoS₂ショット処理の際に排出されるものは、空気と破碎二硫化モリブデンのみであり、この破碎二硫化モリブデンはリサイクルが可能であり現在他用途に利用中である。よって廃棄物処理設備が不要であり設備コスト低減の面からも有効である。

8. おわりに

MD処理によるピストンを、ホンダ初のハイブリッドカー「インサイト」より、またMoS₂ショット処理のピストンを「フィット」、「シビックハイブリッド」よ

参考文献

- 1) 荻原秀実 他4名：HONDA R&D Technical Review, Vol.12, No.2 (2000) p93-98
- 2) 荻原秀実：HONDA R&D Technical Review, Vol.14, No.1 (2002) p85-92
- 3) <http://www.fujimfg.co.jp/p0401.htm>
- 4) 柏谷 智：潤滑経済, No.385(1998)p5-9
- 5) N.Takahashi, S.Kashiwaya：High resolution Transmission... Wear206 (1997)p8-14
- 6) 柏谷 智・石橋 格：塑性加工分野での固体潤滑剤、固体潤滑シンポジウム予稿集 (2001)p97-100
- 7) 江上 登 他5名：微粒子ピーニングにおける粒子速度および材料表面温度分布の解析、微粒子衝突表面改質研究会第4回技術講演会前刷り集(2001)p18-24

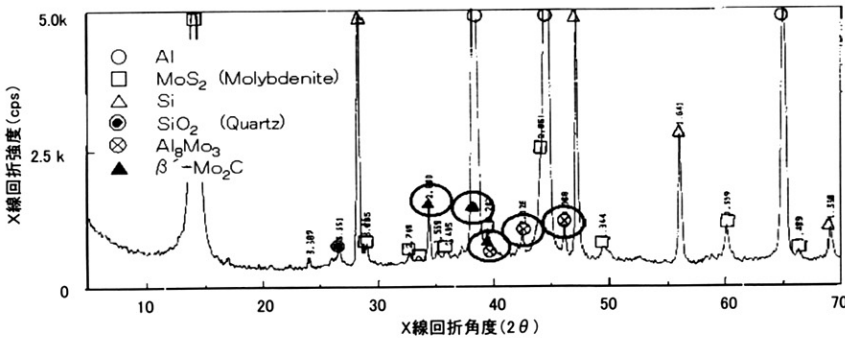


図12 X線回折結果

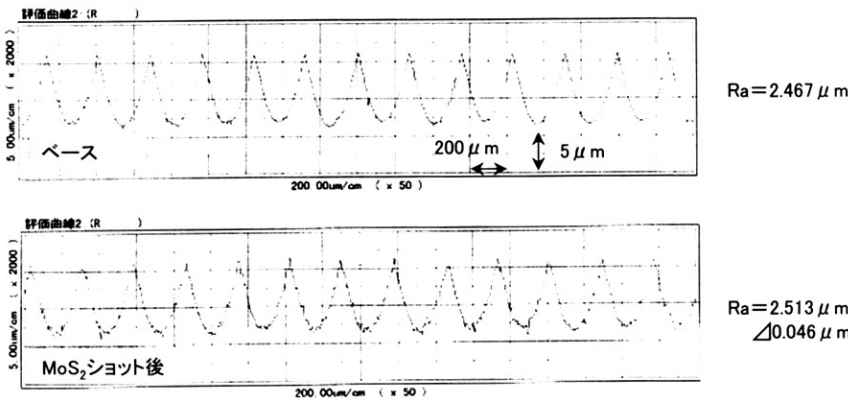


図13 ピストンスカート断面二次元粗さ曲線

より低しゅう動を発現するというものではなく、ある一定以上の打込み深度、量があれば、最大限の低しゅう動を発現することが判明し、7-2-6項で述べた打込み深度を変化させても一定の低しゅう動効果であった試験結果を裏付けるものと推察する。

7-2-8 二硫化モリブデンの打込み状態

母材であるアルミニウム合金への二硫化モリブデン打込み状態をTEM(透過電子顕微鏡)で観察した結果を図11に、その元素の同定をX線回折により行った結果を図12に示す。この結果からWPC処理が表面改質熱処理であることを示すように、少なくとも数百度以上の温度上昇がなければ創製されないβ'-Mo₂C、Al₈Mo₃の2種類の金属間化合物を母材と打ち込まれた二硫化モリブデンの界面から検出した。この熱拡散反応で創製された金属間化合物は、腐蝕原因となるような塩化物や弗化物、硫化物といった化合物ではないので、ピストンが果たすべき機能について考えた場合、障害を生ずるものではない。また、金属間化合物の存在

はピストン母材であるアルミニウム合金と二硫化モリブデンが単に接触しているのではなく、接着剤と考えられる金属間化合物によって密着していることになり、金属間化合物が存在しない場合と比較し、二硫化モリブデンのいわゆるはがれに対しては、より強度があるということの一助になっていると推察される。

ここで、二硫化モリブデンの代わりに、モリブデンを投射した場合にも同様にAl₂₂Mo₅、MoSi₂といった金属間化合物が検出されたことを参考まで付記する。

本処理による極小範囲の極度の温度上昇は、江上らによりμ secオーダーという極短時間内に1,500k以上の温度上昇、下降を繰り返すということが報告されている⁷⁾。

7-2-9 加工後の表面性状

図13に示すスカート断面二次元粗さ曲線からはベースピストンと処理したピストンに有意な差は認められず、ピストン外径、形状にも変化は認められず、ピストン製作は容易である。