

ピストンスカートに使用される固体潤滑剤

株式会社本田技術研究所 荻原 秀実*

はじめに

内燃機関用ピストンには、しゅう動部であるスカートになじみ性向上などのために固体潤滑剤である二硫化モリブデンなどをコーティング処理したものがある。これに対し、筆者らはコーティング処理などとは根本的に異なり、有意な寸法、形状、面粗度変化などを伴わずに、バインダ（接着剤）レスで二硫化モリブデンを定着させる『二硫化モリブデンショット処理』技術を開発した。ここでは固体潤滑剤の最近の動向として、MD（Micro Dimple）処理ピストン¹⁾を参考に、本技術をピストンに適用した『二硫化モリブデンショット処理ピストン』について概説する。

本処理により付与される二硫化モリブデンは、バインダレスであることとともに、すべてが結晶配向することで十分なフリクション低減を実現した。なお本処理は満足すべき効果持続性を有し、リサイクル性にも考慮し、廃棄物が出ない処理システムも実現した。

1. 今までの表面改質法

現在、ピストンではなじみ性向上を主目的とし、固体潤滑剤をコーティングする方法がある。しかしコーティング剤のほかにバインダを要し、その含有量は4割から6割に及ぶ。よって、例えばコーティング剤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べき劈開などによるフリクション低減効果や移着を抑制する。また膜厚分、ピストン径が拡大する。しかし慣らし運転終了時点において真実しゅう動部におけるコーティング膜はほとんど残存していない。よって少なくとも膜の減失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。反対に膜の耐久性（密着性）を考慮しバインダ含有量を増すと、フリクション特性は低下する。そしてコーティング処理時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。

2. 二硫化モリブデン微粉のサイズ測定法

二硫化モリブデン微粉は不定形、鱗片状であり、単に“粒子径”という表し方では不十

* 四輪開発センター（栃木）
〒321-3300 栃木県芳賀郡芳賀町大字下高根沢4630
TEL 028-677-3311(代)

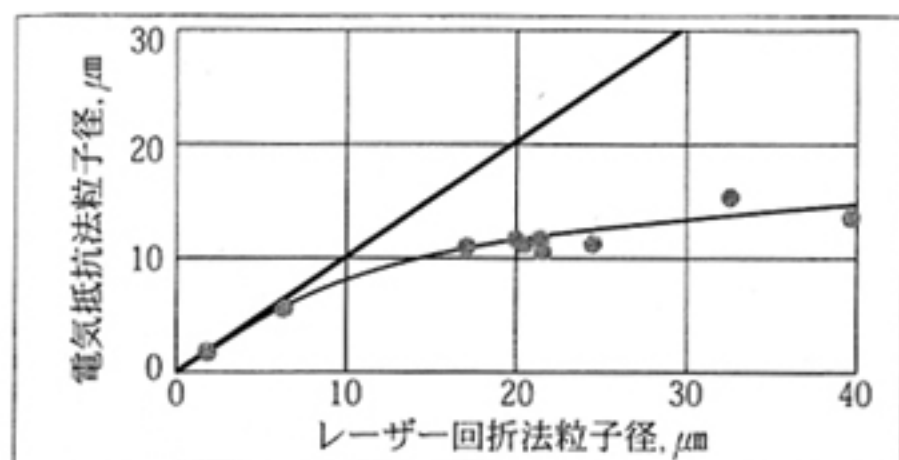


図1 測定法の違いによる粒径特性

分と考える。そこで筆者らはこの微粉サイズの測定に細孔電気抵抗法 (Electrical Sensing Zone Method) を用いた。

細孔電気抵抗法は、粒子が細孔を通過する際に、粒子の体積に応じた電気抵抗値の変化を球相当粒子径に換算するため、投影法を用いるレーザー回折散乱法や沈降法に比較し、その原理からして鱗片状、不定形のものを計測する場合、最も真値に近い値が得られる。

レーザー回折法の場合、球形のものを計測する場合はよいが、鱗片状物質の場合は長辺と短辺のアスペクト比が大きいので、長辺を比較的多く計測し、細孔電気抵抗法に比較し粒子径は大きくなり、またサンプル粒子のサイズが変化した場合でも差が出にくい。なお細孔電気抵抗法はISOの粒度分布計測に認められている方法である。よって二硫化モリブデン微粉のサイズを明確にするために、この測定法による体積分布の中位径を採用した (以下、二硫化モリブデンのサイズはこの中位径で記す)。図1にレーザー回折法と電気抵抗法の比較を示す。粒子径が10 μm 付近から測定結果に大きな差が現われてくる。

3. WPC 処理概略

筆者らは固体潤滑剤の新たな定着方法による低フリクションピストン (鋳造アルミニウム合金製) の開発にあたり、WPC処理という技術を用いた。WPC処理とはWonder Process Craft処理の略であり、ショットピーニング技術を応用し、目的に応じ材質を選定した粒径

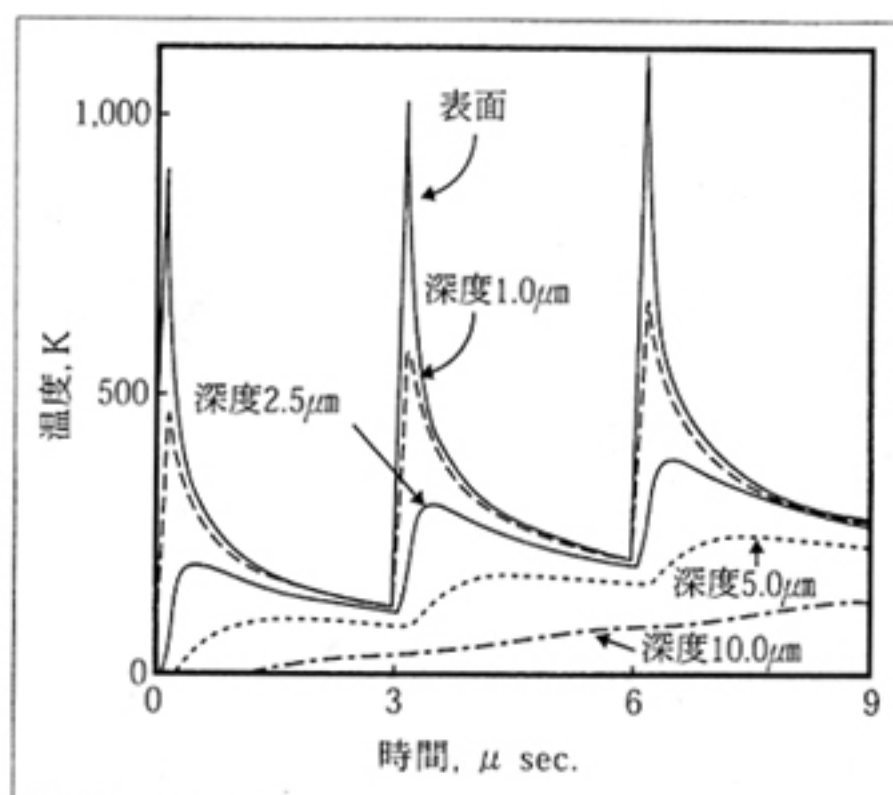


図2 各深度における上昇温度と時間特性

200 μm 以下の微粒子を100m/sec. 以上の高速度で圧縮空気流とともに処理対象物表面に投射する処理である。

本処理は鉄系金属ではA3変態点以上、非鉄系金属においては再結晶温度以上に瞬間的に昇温し、処理対象物表面を熔融、再結晶化し、表面性状改質を行い、フリクション特性、機械的諸特性などの向上を図る表面改質熱処理技術であるとされている。

なお、この温度上昇/下降は江上らの研究²⁾によると1,000K以上、 μ 秒オーダーで繰り返される (図2) ため材料の熱変形などはない。そこで筆者らはこのWPC処理法を用い熱拡散反応によりバインダレスで二硫化モリブデンを定着できるのではないかと考えた。

4. 最適処理条件の選定

圧縮空気流を用いるWPC処理条件パラメータは多義に渡る。ここでは紙面の都合、投射材として用いた二硫化モリブデンの粒径、投射時間についてのみ記す。

実験の結果、二硫化モリブデンは小粒径では十分な深度まで打ち込めず、大粒径では、繰り返し使用で破碎が進行し打ち込み深度は経時とともに不十分となる。結果的に繰り返し使用に耐え得る11 μm という最適粒径が存在

した。投射時間に関しては投射時間が同一でも、連続投射か、断続投射かによって打ち込み深度が変化する。断続投射の場合、投射により上昇した母材温度が、次の過程で投射が止まると低下し、温度上昇、温度低下の繰り返しになり、連続投射に比較し温度上昇が抑えられるためか、打ち込み深度は浅くなる。この結果を踏まえ、連続投射で最適投射時間を決定した。

5. エンジン単体フリクション測定結果

各種表面処理を施したピストンと二硫化モリブデンショット処理ピストンのフリクション比較を行った。排気量1L直列3気筒4弁式のエンジンに組み込み、テストベンチでエンジン単体のモータリングフリクションを測定した。結果は図3に示すとおり二硫化モリブデンショット処理が最も効果が大きく5%のフリクション低減効果であった。

二硫化モリブデンショット処理が同じ物質を用いるコーティング処理より効果が大きかった要因は、バインダレスで純度98.5%以上の二硫化モリブデンを付与できたこと、および後述する二硫化モリブデンのC軸配向性が顕著であり、二硫化モリブデンが有する低フリクション効果をいかんなく発揮できたためと推察する。

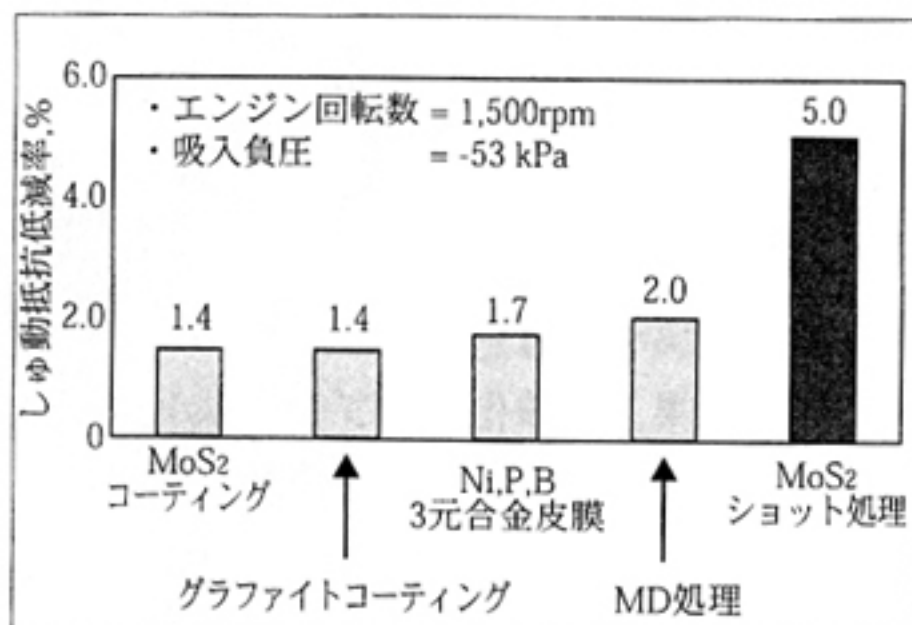


図3 ピストンスカート部表面改質法

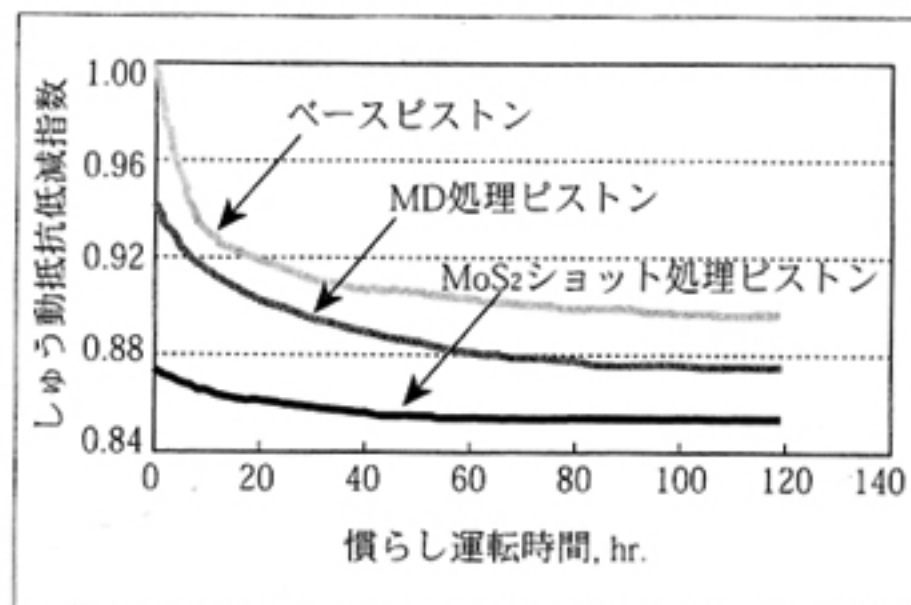


図4 表面処理別機関慣らし運転効果特性

6. 効果持続性と二硫化モリブデンの結晶配向

図4に示すとおり、3種類の表面処理ピストンの慣らし運転時間に対するフリクションを測定した。その結果、二硫化モリブデンショット処理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4割ほど短い運転時間でそのフリクションは安定する。これはやはり固体潤滑剤である高純度二硫化モリブデンの低フリクション効果であると、次の点から推察する。

二硫化モリブデンは4分子層3nm厚さの粒子で存在すると自己劈開性を発現し低フリクションを呈するが³⁾、摩擦部分でより低フリクションを発現するためには滑り方向に平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。この結晶配向は粒子にたった1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⁴⁾。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、より低フリクションを発現すると推察される⁵⁾。

最近の研究成果として、平山ら⁶⁾によると、二硫化モリブデンショット処理面のX線回折結果から、二硫化モリブデン(004), (006), (008)面の回折線強度が投射圧力に応じて高くなっていることが分かった。よってショット処理

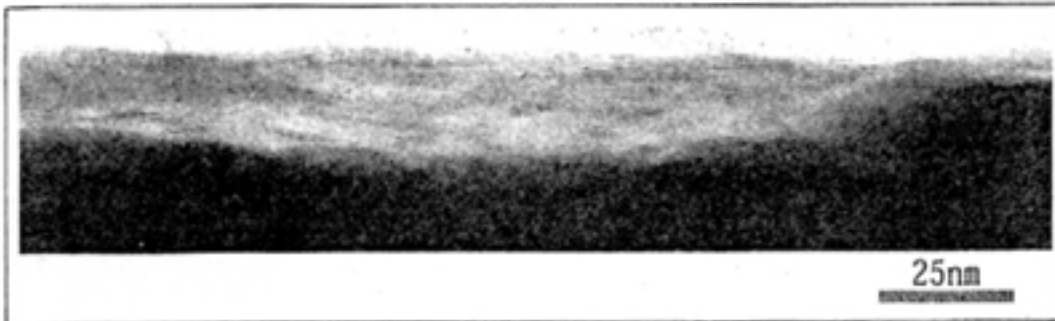


図5 MoS₂ショット直後断面TEM明視野像 ×600,000

面は処理直後、しゅう動前から二硫化モリブデンのC軸配向性が顕著になっていると言える。これは二硫化モリブデン層がしゅう動表面に対して平行に配向していることを意味し、二硫化モリブデンが持つ固体潤滑剤としての性能を発揮しやすい状態となっていることを示唆している。これを受け、筆者らは二硫化モリブデンショット処理面の処理直後、しゅう動前のTEM(Transmission Electron Microscope: 透過電子顕微鏡)観察を行い、観察範囲内におけるすべての二硫化モリブデン結晶配向を確認した(図5)。

この二つの結果から、二硫化モリブデンはしゅう動前から結晶配向しており、しゅう動初期から十分な低フリクションを発現するのはこの結晶配向によるものと考えられる。このように、処理直後、しゅう動前からすべて結晶配向するような二硫化モリブデンの付与方法は現在なく、バインダレスでの二硫化モリブデンの新たな定着法を開発できたものと考えられる。

7. 打ち込み深度とフリクション低減効果

打ち込み深度を1, 2, 3, 4, 12 μ mと変化させたピストンを製作し、テストベンチでモータリング法によりフリクションの測定を行った。供試エンジンは排気量1.3リットルSOHC 2プラグ直列4気筒2弁式である。測定結果、打ち込み深度1 μ mを除き、表面から2 μ mより深層に二硫化モリブデンが存在すれば、低フリクション効果はほぼ一定となり、次章で述べるように、その効果持続性も満足するものとなることが分かった。

二硫化モリブデンの打ち込み深度定量化方法については紙面の都合、割愛する。

8. しゅう動後の二硫化モリブデンの残存と効果持続性

打ち込み深度2 μ mで製作したピストンを組み込んだ排気量1.3リットルSOHC 2プラグ直列4気筒2弁式のエンジンを、テストベンチにてエンジン単体で高負荷、長時間運転を実施した。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部の実しゅう動部分における二硫化モリブデンの残存を電界放射型走査電子顕微鏡(FE-SEM/EDX: Field Emission-Scanning Electron Microscope/Energy Dispersive X-Ray Micro Analyzer)にて観察したところ残存を認めた。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 μ mであることを確認しているため、初期打ち込み深度より深層から残存を認めたことは、バインダレス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。

このことから二硫化モリブデンは深く打ち込めば打ち込むほど、また大量に付与すればするほど、より低フリクションを発現するというものではなく、ある一定の打ち込み深度、量があれば最大限の低フリクションを発現することが判明し、これは7章で述べた打ち込み深度を変化させても一定の低フリクション効果であった結果を裏付けるものと推察する。

9. 二硫化モリブデン打ち込み状態

母材であるアルミニウム合金への二硫化モリブデン打ち込み状態を透過型電子顕微鏡で観察した結果を図6に示す。そしてX線回折を行い元素の同定を行った結果、WPC処理が

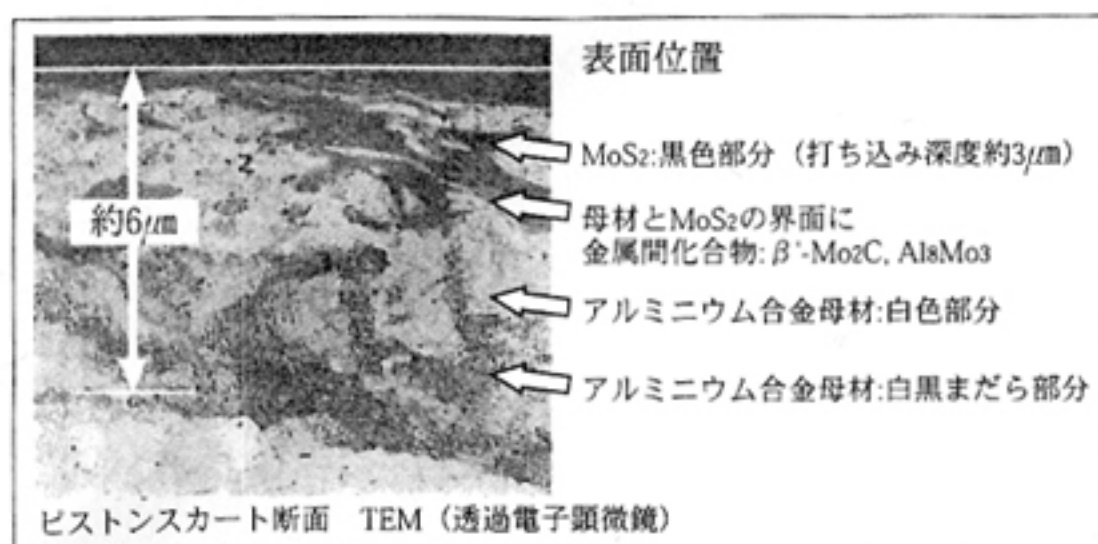


図6 MoS₂打ち込み状態

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く、ピストンが果たすべき機能について考えた場合に障害を生じるものではない。

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ということになるため、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と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はAl₂₂Mo₅, MoSi₂といった金属間化合物が検出されたことを参考に記す。

10. 加工後の表面性状

スカート部の表面粗さ測定結果からは、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なかった。

11. リサイクル性

本処理の際には有害な廃棄物は排出されず、

排出物は、空気と破碎した二硫化モリブデンのみであり、この二硫化モリブデンはリサイクルが可能であり、現在、すべて他用途に利用している。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。

おわりに

バインドレスで高純度二硫化モリブデンを定着させる手法を開発できた。現在二硫化モリブデンショット処理ピストンは、四輪車、二輪車に適用され、また家電製品にも採用されている。今後は鉄系金属に対して、環境負荷が小さく、取り扱いが簡便でありながら低しゅう動効果の大きいバインドレス固体潤滑剤定着法の研究開発を行いたい。また、多くの固体潤滑剤がある中で、最も効果の大きなものをWPC処理により活用したい。そうすることでCO₂削減、省資源の一助となれば幸いである。

—謝辞—

本稿を寄稿するにあたり、執筆推薦して頂いた、法政大学 西村允教授に深く感謝致します。また、共同研究者である(株)不二製作所 石渡正人氏に御礼申し上げます。

〈参考文献〉

- 1) 荻原秀実, 他4名: 表面改質によるエンジンのしゅう動抵抗低減技術, HONDA R&D Technical Review, Vol.12 No.2 (2000) pp. 93-98
- 2) 江上 登: 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) pp. 18-24
- 3) 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) pp. 97-100
- 4) 柏谷 智: 二硫化モリブデンの役割と最近の動向, 潤滑経済 No. 385 (1998) pp. 5-9
- 5) N. Takahashi, S. Kashiwaya: High resolution... Transmission, Wear 206 (1997) pp. 8-14
- 6) 平山朋子・石田尚・菱田典明: MoS₂ショット..., トライボロジ会議春季予稿集 (2003) pp. 331-332