

内燃機関用ピストンスカート部への 固体潤滑剤付与技術とその効果

Technology for Applying Solid Lubricant to the Piston Skirt of
Internal Combustion Engine and Its Effects

荻原 秀実*
Hidemi OGIHARA

要 旨

内燃機関用ピストンしゅう動面に WPC(Wonder Process Craft)処理技術を応用し、高純度二硫化モリブデンを付与する二硫化モリブデンショットピストン製作技術を開発した。世界初となる本技術により製作されたピストンは、十分な効果持続性を有しつつ、コーティングなどの際に必要となるバインダが不要なため、大幅なしゅう動抵抗低減を低コストで実現した。また本処理では留意すべき母材の寸法、形状、面粗度変化などは発生せず製作が容易である。更に本ピストン製法においては圧縮空気と二硫化モリブデン微粉しか用いないため、排出される二硫化モリブデンはリサイクル可能であり、廃棄物ゼロを達成し環境にも優しい時代の要求に応える技術であると考えられる。

ABSTRACT

A molybdenum disulfide piston manufacturing technique was developed that uses the Wonder Process Craft (WPC) processing method to apply high-purity molybdenum disulfide onto the sliding surface of the piston skirt for an internal combustion engine. This technique is a first in the world, and the pistons manufactured using it gained the full effect of durability while also achieving significant reduction in sliding resistance at a low cost because the coating process does not require use of a binder. The technique is also noteworthy for making manufacturing easier because it does not alter the dimensions, shape, surface roughness, and so on of the base material. In addition, this piston manufacturing process uses only compressed air and molybdenum disulfide powder, so that the molybdenum disulfide that is discharged from the process can be recycled. Thus the process realizes zero waste and addresses the current need for environmentally-friendly technology.

1. まえがき

エネルギー資源の有効利用、環境保護、排出ガスのクリーン化などの観点から自動車の燃費向上は有効手段の一つである。このような中、内燃機関のしゅう動抵抗の低減による燃費改善効果は大きく、潤滑油の改良や、しゅう動面への固体潤滑剤のコーティング、メッキなどにより改善が積み重ねられてきている。その一方で、コーティングによる固体潤滑剤被膜の付与は、被膜厚さによる処理対象物の寸法変化や、接着剤であるバインダを介して固体潤滑剤を付与するため固体潤滑剤が本来持つ潤滑機能の一部抑制などの課題を抱えている。

*栃木研究所

2. WPC 処理

本報告技術の表面改質手法にはWPC処理を用いた。WPC処理とは、Wonder Process Craft処理の略称であり、ショットピーニング技術を応用し、目的に応じて材質を選定した粒径 200 μm 以下の微粒子を 100m/sec. 以上の高速度で圧縮空気と共に処理対象物表面に投射し、その最表面温度を鉄系金属では 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上昇させ、処理対象物最表面を瞬間的に溶融、再結晶化させることで表面性状改質を行い、しゅう動特性をはじめ、機械的諸特性向上を図る表面改質熱処理技術である。

3. 二硫化モリブデンによるしゅう動抵抗の低減

Fig. 1 に示すように、試験的にピストンスカート部に各種表面処理を施し、エンジン単体台上でモータリングフリクションを比較した。しゅう動特性向上のための表面性状改質という観点からは、しゅう動表面およびその最表層に固体潤滑剤である二硫化モリブデン層を付与する処理が最も有効であることがわかる。よってこの技術開発に取り組んだ。

この新しい処理技術を開発するにあたり、

- ① バインダレス化(最大限のしゅう動抵抗低減)
- ② 処理対象物の形状、寸法変化の抑制
- ③ 処理後排出物の完全リサイクル
- ④ 十分な効果持続性
- ⑤ 簡易な量産性
- ⑥ 低コスト

を主眼においた。またこの技術を用いて製作したピストンを二硫化モリブデンショットピストンと名付けた。

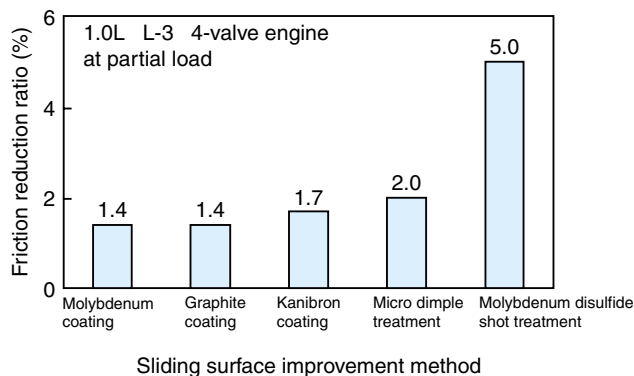


Fig. 1 Characteristics of surface treatment method and friction reduction ratio

4. 二硫化モリブデンショット処理技術の特徴

本技術はバインダを一切必要とせずに処理対象物の表面を含む最表層に高純度の固体潤滑剤層を形成することができるため、しゅう動抵抗低減効果が大きいことを特徴としている。また処理対象物に対し WPC 処理技術を用いて固体潤滑剤を一部熱拡散させながら打込んでおり、形状、寸法変化を伴わないため製作が容易であり、はがれや摩滅に対して非常に強固なゆえ、長期間に渡りしゅう動抵抗低減効果が持続する。一方で本処理は圧縮空気と二硫化モリブデンしか用いないため、排出される物質は使用後の二硫化モリブデン破砕材と空気のみである。この二硫化モリブデンの破砕材はサイズが小さくただけであり、専用に設計、製作した特殊風力分級機を用い高精度の分級を行っていることから、均一な粒度に揃っており異物の混入などもないため他用途に再利用している。よって廃棄物が一切なく環境保護の観点から、また廃棄物処理設備が不要であり設備コスト低減からも価値のある技術と考える。

5. 二硫化モリブデンのサイズ計測

鱗片状かつ不定形である二硫化モリブデンのサイズの測定には細孔電気抵抗式粒度分布計(コールタカウンタ)を用いた。この粒度分布計の測定原理の概略は、細孔を粒子が通過する際、その体積に応じた電気抵抗値の変化を球としての粒子径に換算するもので、レーザドップラ式などの二次元計測法と比較し、三次元計測法であり最も真値に近い値が得られると考える。この方法により測定される体積分布の中位径を用い二硫化モリブデンの粒度とした(以下、二硫化モリブデンのサイズはこの体積分布の中位径で記す)。

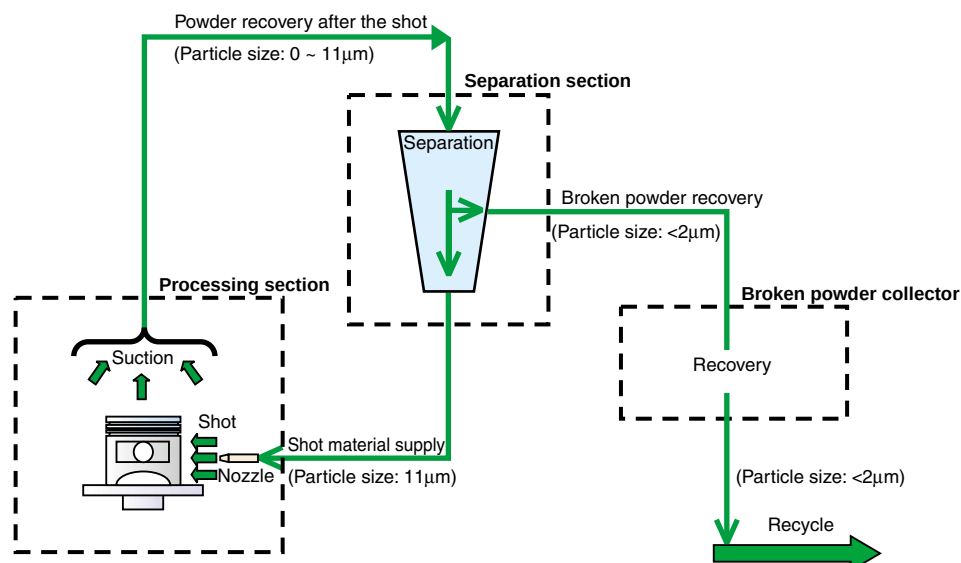


Fig. 2 Shot material supply process

6. 加工装置概略

加工装置はFig. 2に示すように、大きく分け分級セクション、加工セクション、破碎材捕集機から構成される。投射材は一度でも投射されると破碎したもの、破碎しなかったものが混在した状態になるため、投射後は専用に設計、製作した特殊な風力分級機を通し、サイズが約 $2\mu\text{m}$ より小さくなった破碎二硫化モリブデンは破碎材捕集機に回収するようにした。一方、破碎しなかった、または破碎してもまだ適度なサイズのものは分級機を通過後、再び加工ノズルに供給され、破碎し分級され破碎材捕集機に回収されるまで繰返し投射使用されるような投射材経路とした。

次に加工セクションの詳細を Fig. 3 に示す。加工に用いる二硫化モリブデンは圧縮空気を利用しピストンスカート部に投射する。ターンテーブルにセットされたピストンは回転し、それに伴い二硫化モリブデン投射ノズルは揺動し、ピストンスカート部にまんべんなく二硫化モリブデンを打込む機構とした。

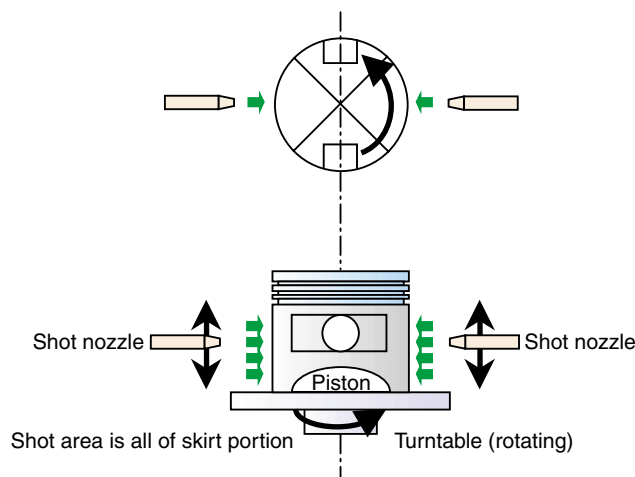


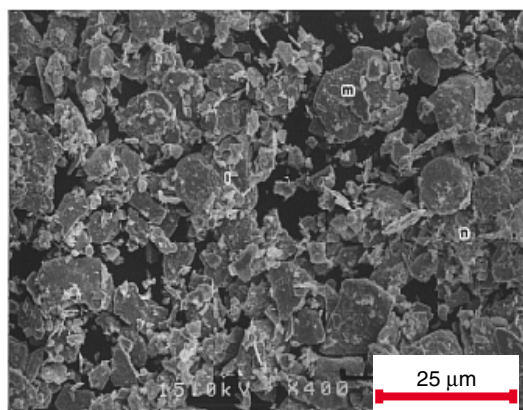
Fig. 3 Processing section outline

7. 最適投射条件の設定

投射加工をする際の加工条件のパラメータは、投射圧力、投射時間、投射材の材質、物性、粒度、投射材と圧縮空気の混ざり度合い、投射距離など多岐に渡る。これらはどれか一つのパラメータを変化させただけでも、投射結果として表面性状が変化する場合もあれば、複数のパラメータを変化させても結果が変わらないケースもある。またこの逆に複数のパラメータを変化させることでようやく表面性状の変化に結びつく場合もあり、最適投射条件を導き出す難易度は高い。今回の WPC 処理を用いて二硫化モリブデンを母材に打込む技術は前例がなく初の試みであり、難易度は更に高かった。このような状況の中から導き出した最適投射条件のなかで、二硫化モリブデンの打込みに対し特に効果的に作用したパラメータについて記す。

7.1. 最適投射材諸元

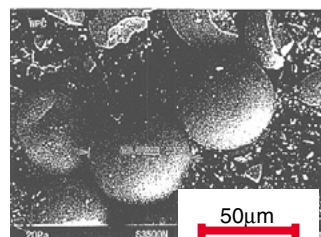
Fig. 4に投射材に用いる二硫化モリブデン微粉を示す。投射材として用いる二硫化モリブデン微粉は固体潤滑剤として本来有する機能を十分活用するため、バインダを一切含有しない 98.5%以上の高純度で、かつ入手できる一番大きなサイズの $11\mu\text{m}$ のものを用了。これは投射エネルギーを極力高め処理対象物に二硫化モリブデンを打込むためである。実験の結果、小さなサイズのものでは十分な深度まで打込めなかった。逆に特別に製作した市販にはない大きなサイズのものは、サイズが大き過ぎるためか、繰返し使用で急激に破碎が進行し、それに伴い打込み深度は不十分となり不適当であった。結果的に、二硫化モリブデン打込み深度、破碎による投射材の消耗、その他を考慮すると、投射材として使用できる二硫化モリブデンには最適サイズが存在し、量産品の加工にはこの最適サイズの $11\mu\text{m}$ のものを用了。



Molybdenum disulfide powder SEM image

Purity	98.5% over
Particle size	$11\mu\text{m}$
Moisture	0.01%
Oil	0.03%

※ Particle size is mean of sensing zone method volume distribution



※ Reference: Ceramic beads for MD treatment

Fig. 4 Molybdenum disulfide powder for shot material

7.2. 最適投射圧力

HV 硬度 500 ～ 600(モース硬度 6 ～ 7)、比重 2.3 ～ 2.5、平均粒径 $\phi 50 \mu\text{m}$ の略球形セラミックビーズを 0.34MPa $\{3.5\text{kg}/\text{cm}^2\}$ の圧力で投射加工を行う MD 処理⁽¹⁾を参考に、モース硬度 1、比重 4.8、鱗片状の二硫化モリブデンを投射加工で処理対象物に打込むために、単位時間あたりのピストン生産個数、投射材の破碎による消耗なども考慮した上で、投射圧力を 0.902MPa $\{9.2\text{kg}/\text{cm}^2\}$ に設定した。この高圧は専用コンプレッサで作出される。この投射圧力は投射時間と密接に関係し、二硫化モリブデン打込み深度を決定する大きな要因の一つである。

7.3. 最適投射時間

最適投射圧力の実験結果から単位面積あたりの投射時間が二硫化モリブデンの打込み深度に密接に関わることが分かり、量産性、コストなども考慮した上で投射時間を設定した。投射圧力を適度に設定し、その後さらに、母材単位面積あたりへの連続投射時間を長く設定することで打込み深度を深くすることができた。Fig. 5 に示すように、投射時間が同じでも断続的に投射すると打込み深度は浅くなる。これは断続投射の場合、いったん上昇した母材温度が次の過程で投射が一時停止すると低下し、温度上昇、温度低下の繰返しになり連続投射に比較し温度上昇が低いためと推察される。連続投射の場合は母材の温度上昇が断続投射に比較し高く、結果的に打込み深度も増すものと考えられる。

この温度上昇については、モデル計算結果から最高で 1500K 以上の温度上昇が報告されている⁽²⁾。

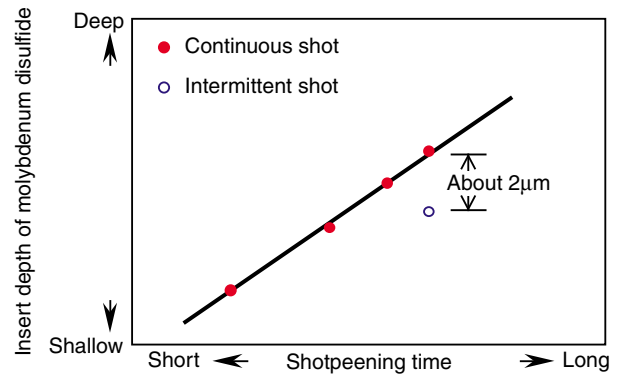


Fig. 5 Characteristics of insert depth of molybdenum disulfide and shotpeening time

7.4. 投射材の分級

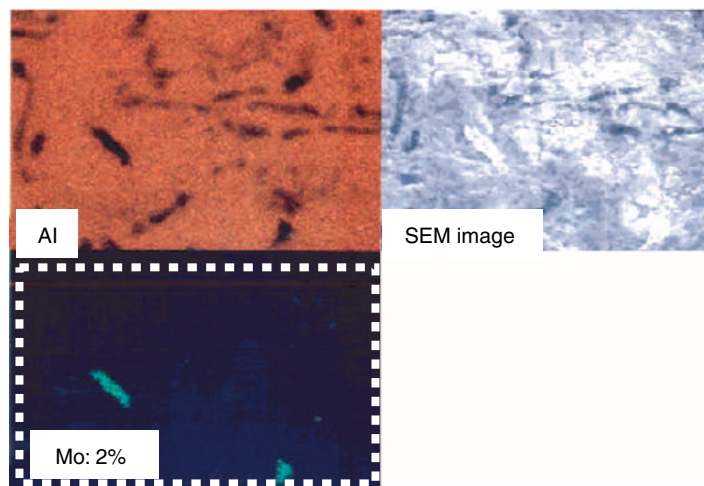
前述の加工条件は投射材の破碎も考慮し設定したが、投射材の破碎は避けられない。そこで専用開発した特殊風力分級機を用い分級し、加工に使用する投射材は常に $11 \mu\text{m}$ 程度を維持するようにした。これにより一定の打込み深度を常に維持できるようになり品質の安定化につながると同時に、投射材の消耗量を大幅に削減でき製品コスト低減にも寄与している。

8. 二硫化モリブデン打込み深度の定量化

二硫化モリブデンの母材への打込み状態はコーティングやメッキのように深さ方向に均一の膜厚となるようなもの

Depth	Surface	$1\mu\text{m}$	$2\mu\text{m}$	$3\mu\text{m}$
Molybdenum area ratio (%)	64	4	2	0

Color mapping results and molybdenum area ratio of each depth



FE-SEM/EDX surface analysis (Magnification: $\times 2000$ observation area: $60\mu\text{m} \times 45\mu\text{m}$)

Fig. 6 Measurement of molybdenum disulfide area ratio by image processing

ではなく複雑な形態を取るため、母材に打込まれた二硫化モリブデンの打込み深度を測定するにあたり、打込み深度を定義した。まず二硫化モリブデンショット処理を施した未使用のピストンのしゅう動表面を、加工の熱的影響、汚損、損傷を回避するためにイオンミリング法を用い1 μm 刻みに掘下げる。各掘下げ加工面は Fig. 6 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し、次にその表示面を二値化画像処理しモリブデン面積率を算出する。

以上の方法を用いた解析の結果とモータリングフリクション測定結果から、初期摺動表面から深さ2 μm 以上に2%以上のモリブデン面積率面が存在すれば、しゅう動抵抗低減効果とその効果持続性は十分なものとなることが明らかとなったので、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、また二硫化モリブデン打込み深度基準を2 μm 以上と設定した。

9. しゅう動面摩滅後の二硫化モリブデンの残存と効果持続性

Fig. 7 に示すように二硫化モリブデン打込み深度2 μm のピストンをエンジン単体台上で約100時間慣らし運転を実施した。40時間運転後に部分負荷モータリングフリクションは安定し、100時間経過後もそのレベルを維持し、運転開始時に対し4%のフリクション低減となっている。また100時間経過後に、実しゅう動部であるピストンスカート部の摩滅し略平坦化した条痕先端部における二硫化モリ

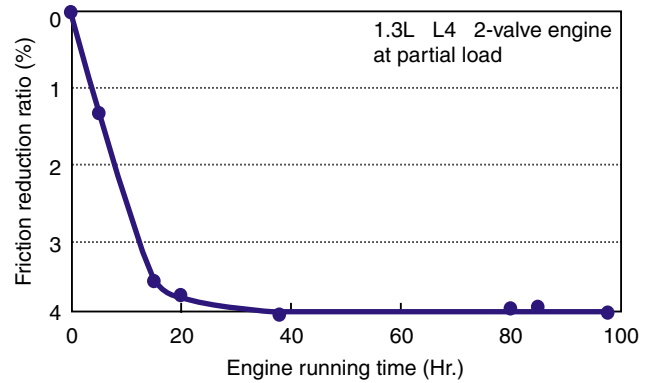


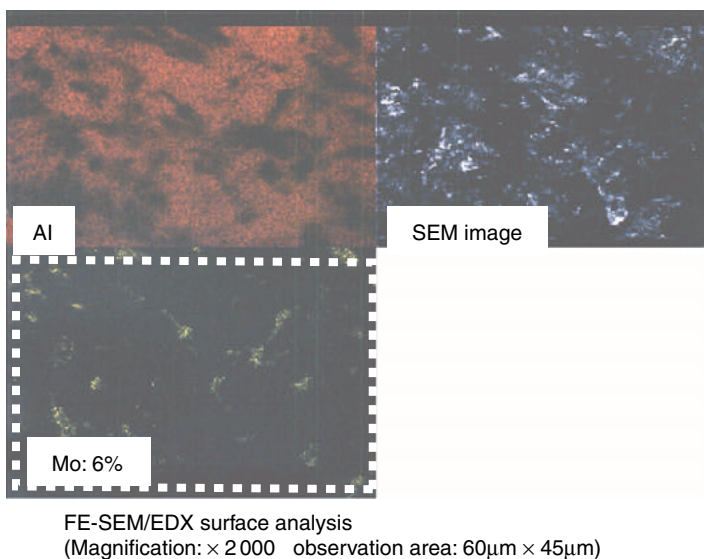
Fig. 7 Engine break-in time and friction reduction ratio

ブデンの残存の有無を、Fig. 8 に示すようにFE-SEM/EDX面分析によるカラーマッピングで観察したところ残存を認め、その面積率は6%であった。続いてその面を掘下げたところ、表面から4 μm の深さまで0.3~1%の面積率で二硫化モリブデンの存在を確認した。100時間運転後の条痕先端摩耗量は、摩滅の多い箇所では2~4.9 μm であることが確認されている。このため長時間運転後に初期打込み深度より深部から二硫化モリブデンの残存が確認されたことは、バインダを一切含有しない高純度の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によるものと考えられる。

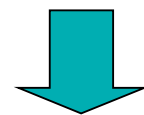
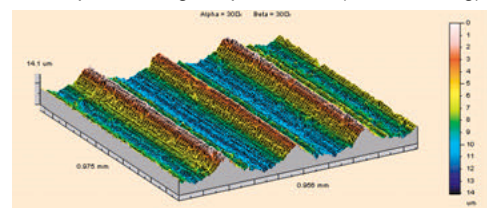
これは二硫化モリブデンの結晶構造を考えると十分推察できる。二硫化モリブデンは、一つのモリブデン原子と、二つの硫黄原子からなる化合物で、モリブデン原子が硫黄原

Depth	Surface	1 μm	2 μm	3 μm	4 μm
Molybdenum area ratio(%)	6	1	1	1	0.3

Color mapping results and molybdenum area ratio of each depth



Development image of piston skirt (Before sliding)



Development image of piston skirt (After sliding)

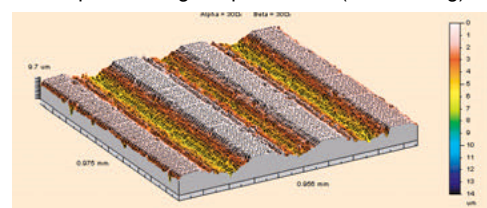


Fig. 8 Molybdenum disulfide residual on piston skirt surface after long period of running engine

子の斜め下に位置するトリゴナルプリズムの $2H_p$ 型(六方晶の層状物質)である。層内のMo-S間は共有結合であり、結合エネルギーも極めて強く原子間距離も約 $1.5 \text{ \AA}$ 程度である。一方、層と層の間は約 $3 \text{ \AA}$ のS-S間に働くVan der Waals力のみである。Van der Waals力は距離の7乗に反比例するため、層間の結合エネルギーは、層内の結合エネルギーよりはるかに小さい。そのため二硫化モリブデンは、層内の共有結合により垂直方向の力に対しては十分な強度を持つが、水平方向の力に対しては層間に働いているVan der Waals力が弱いため、層間で滑りを生じる。ただし、層間で滑るには層間が存在しなければならないため、滑りを生じるためには最小層単位が存在する。高分解能電子顕微鏡による二硫化モリブデンの摩擦部分の断面観察によれば、一回の滑り部分から4層の二硫化モリブデンが観察されている⁽³⁾。すなわち二硫化モリブデンは4分子層 3 nm の粒子で存在すると自己劈開性を発現し潤滑機能を有すると推測される。またさらに、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)が不可欠であるが、この結晶配向は粒子に荷重と滑りを加えることで行われるため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ることが考えられる⁽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足る面圧を受けていることは明白である。慣らし運転終了後は安定した低摩擦を発現していることから、慣らし運転の初期に二硫化モリブデンは摩擦部分で結晶の破壊と転移を繰り返しながらオリエンテーションを終了し、安定した摩擦係数を発現する一因となっていることが推察される。以上のことから、二硫化モリブデンによるしゅう動抵抗低減効果は、その結晶構造に依存するところが大きいと考えられる。そのため、二硫化

Insert depth of MoS ₂	Friction reduction
1 μm	2.1% (Results may be vary)
2 μm	4.3%
3 μm	3.9%
4 μm	4.1%
12 μm	4.3%

Fig. 9 Characteristics of insert depth of molybdenum disulfide and friction reduction ratio

モリブデンは深く打込めば打込むほど高いしゅう動抵抗低減効果が得られるというのではなく、打込み深度がある一定以上であれば高いしゅう動抵抗低減効果が得られると推測される。実際、打込み深度を1, 2, 3, 4, 12 μm と変化させて製作したピストンでモータリングフリクションを測定したが、Fig. 9に示すように、ほぼ一様なしゅう動抵抗低減効果であった。

10. 二硫化モリブデン打込み状態の観察

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Fig. 10に示す。次にX線回折によりその元素の同定を行った結果をFig. 11に示す。以上の結果からWPC処理が表面改質熱処理技術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生されないアルミニウム合金とモリブデンからなる β' -Mo₂C, Al₈Mo₃の2種類の金属間化合物を、母材と、母材の内部に打込まれた二硫化モリブデンとの界面から検出した。本処理による極小範囲の極度の温度上昇は、前述のモデル計算結果から μsec . オーダという極短時間内の現象であることも報告⁽²⁾されている。また、

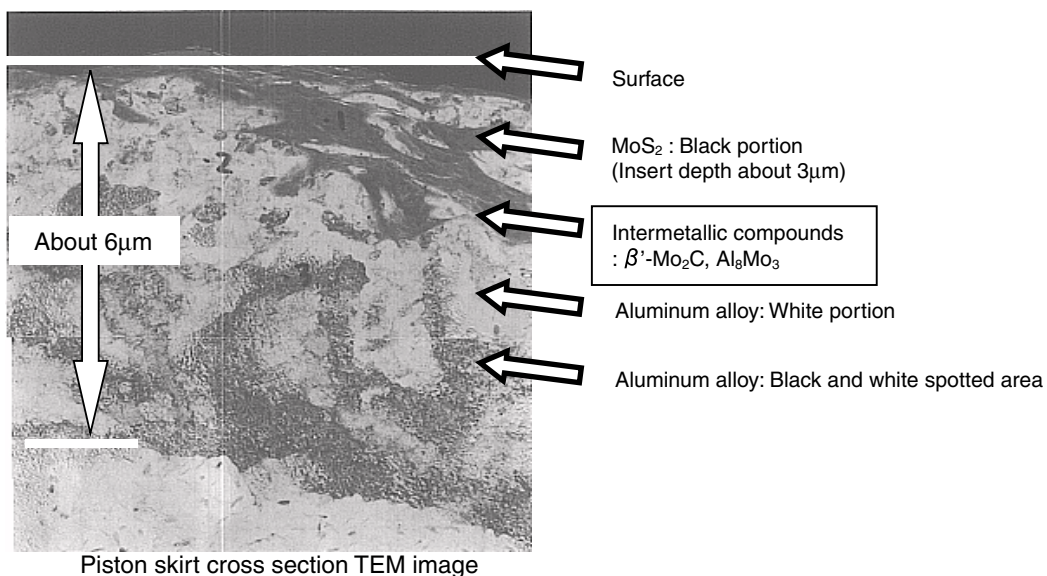
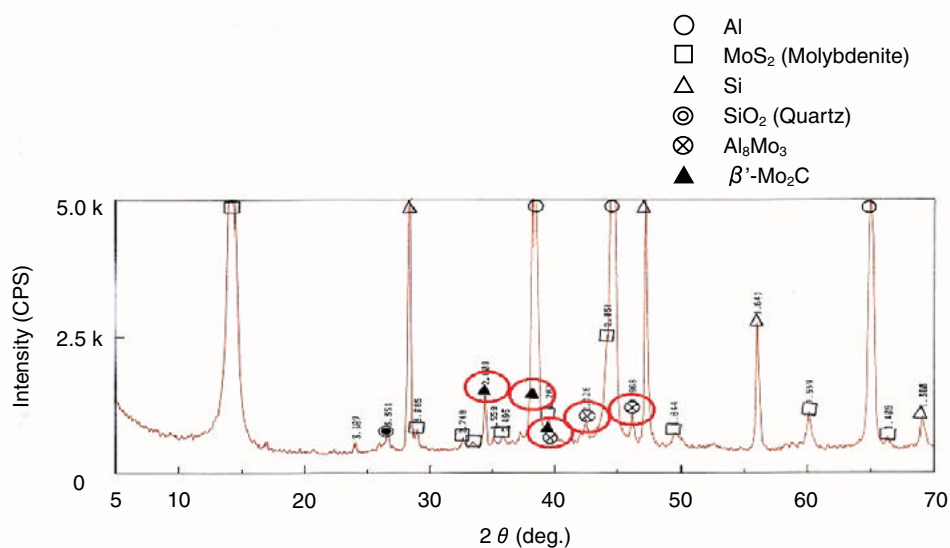


Fig. 10 Molybdenum disulfide insert condition



13. まとめ

- ・ バインダを含有しない 98.5%純度以上の二硫化モリブデン微粉を WPC 処理手法を用い、圧縮空気とともに高速度で内燃機関用ピストンスカート部に投射加工で付与し、エンジンのフリクションを4%以上低減した。
- ・ 本処理によるピストンは、しゅう動抵抗低減効果が瞬時に発現し長期間に渡りその効果を維持できる。
- ・ 本処理によるピストンの寸法変化、形状変化は発生しない。
- ・ 短時間での加工が可能で大量生産に適している。
- ・ ショット処理に伴い、唯一排出される破砕二硫化モリブデンは、完全にリサイクルできる。

14. あとがき

本研究により、固体潤滑剤の新たな使用法を開拓したものと考える。今後アルミニウム合金以外の材料にも応用できるよう研究を進め、しゅう動各部への適用を早期に実現し、省資源、環境保護の一助となるよう努力したい。

この処理によるピストンを、2001年6月より発売を開始した「ホンダフィット」用新型 1.3 リットル直列4気筒2プラグエンジン、また 2001 年 12 月より発売を開始した「ホンダシビックハイブリッド」用 1.3 リットル直列4気筒2プラグエンジンより採用している。

15. 謝辞

最後に本研究にあたり、当初より研究支援を快諾下さり、技術指導、ご助言を頂いた(株)不二製作所 間瀬氏、菅沢氏、熊谷氏、石渡氏、(株)不二機販 宮坂氏の各氏に厚く御礼申し上げます。

川鉄テクノリサーチ(株)島内氏、木下氏には、迅速かつ詳細な金属組織分析の他、ご助言、ご指導も頂き、厚く御礼申し上げます。

住鋳潤滑剤(株)柏谷氏には二硫化モリブデンに関するさまざまなご教授を頂き、厚く御礼申し上げます。

16. 文献

- (1) 荻原 秀実: 表面改質によるエンジンの摺動抵抗低減技術、微粒子衝突表面改質研究会主催「最新の表面改質技術—微粒子衝突表面改質技術の応用—」第2回技術講演会前刷り集 p.15-25(1999 年8月)
- (2) 江上 登, 加賀谷 忠治, 他4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主催「最新の表面改質技術—微粒子

衝突表面改質技術の応用—」第4回技術講演会前刷り集 p.18-24(2001 年 10 月)

(3) N.Takahashi, S.Kashiwaya: High resolution transmission Wear 206 (1997) 8-14

(4) 柏谷 智: 潤滑経済 No.385 (1988) 5-9

■ 著 者 ■



荻原 秀実