

# 粉末法複合材によるアルミニウム製 シリンダライナの開発

Development of Aluminum Powder Metallurgy Composite for Cylinder Liners

|               |                     |                |              |
|---------------|---------------------|----------------|--------------|
| 小 屋 栄太郎*      | 萩 原 好 敏*            | 鈴 木 達 夫*       | 三 浦 静 止*     |
| Eitarou Koya  | Yoshitoshi Hagiwara | Tatsuo Suzuki  | Seishi Miura |
| 真 田 誠*        | 津 野 宏*              | 柳 田 国 男*       |              |
| Makoto Sanada | Hiroshi Tsuno       | Kunio Yanagida |              |

## 要 旨

二輪車の多気筒エンジンにおいて、シリンダブロックのオールアルミ化には、ダイキャスト鑄造による鑄込みアルミライナ方式が、軽量化・生産性の点で優れている。

このため新たに耐摩耗性と加工性を両立し鑄込みを可能とした、アルミナ 3~5%、黒鉛 0.5~3% を配合した粉末冶金ベースの複合材 (PMC) によるアルミライナを開発した。本複合材は耐摩耗性が鑄鉄、耐焼付性が鉄めっきと同等の特性を示す。また平均粒径  $3\mu\text{m}$  の微細な球状化アルミナを使用することにより加工性が改善されている。

本ライナを使用したオールアルミ製シリンダブロックは、1993 年 12 月量販二輪車 (RVF/RC45) のエンジンにはじめて採用された。

## ABSTRACT

The cylinder liner material widely used for all-aluminum cylinder block for motorcycle multicylinder engines is grey iron. New aluminum liner material has been developed which offers advantages of light weight and higher productivity. The liner is made from powder metallurgy composite (PMC) with 3 to 5% alumina and 0.5 to 3% graphite additives. The PMC, which has abrasion resistance and seizure resistance equal to grey iron and iron plating, respectively, offers the required abrasion resistance while improving machinability, with the adoption of fine spherical alumina particles,  $3\mu\text{m}$  in average diameter.

The all-aluminum cylinder block with the PMC liners was introduced in December 1993 in mass production of motorcycle engine, beginning with model RVF/RC45.

## 1. はじめに

多くの二輪車や小型四輪車のエンジンは、鑄鉄シリンダライナを鑄込んだアルミダイキャスト製シリンダブロックを採用している。シリンダライナには、耐摩耗性および耐焼付性が要求されることから鑄鉄が使用されてきたが、軽量化の点からアルミ化が望まれている。

現在までオールアルミ製シリンダブロックはいくつか見られるが、いずれも一体型でありライナ型は見られない。

一体型は、高 Si アルミ合金 (A390) をブロック全体に使用したものと、SiC を分散させた Ni 複合メッキまたは FRM によりシリンダボア内面のみを部分強化したものに分けられる。これらの特徴を整理すると以下のとお

りである。

- (1) A390 合金は、耐摩耗性を向上させるために、エッチングにより初晶 Si を浮きだし、オイル保持性を向上させる必要がある<sup>1)</sup>。
- (2) 複合メッキは、耐摩耗性および耐焼付性が鑄鉄よりも優れ、2 サイクルエンジンや 4 サイクル空冷エンジンに多く採用されている<sup>2)</sup>。多気筒のシリンダブロックでは、メッキ処理効率が悪いことから別体タイプのシリンダに多く使用されている。
- (3) FRM 製シリンダブロックは、クローズドデッキの多気筒エンジンに適しているが、繊維間にアルミを浸透させるために低速中圧鑄造法で製造する必要がある<sup>3) 4)</sup>。

\* 朝霞研究所

上記の方法は、いずれもシリンダボア内面の品質を確保するため低圧鑄造、低速中圧鑄造等で製造されるが<sup>5)~8)</sup>、高速高压で射出するダイキャスト法と比較して、平均肉厚が厚くなりシリンダブロック全体の軽量化を図ることが難しく、かつ鑄造サイクルが長くなる。そのため、1993年12月に市販された二輪車(RVF/RC45)のV型4気筒排気量750cm<sup>3</sup>エンジンのシリンダブロックのオールアルミ化に当たっては、ダイキャスト法による鑄込みライナ型のシリンダブロックを採用した(Fig. 1, 2)。しかしながら、シリンダライナとしての要求特性を満足するアルミ合金がなく、新たに粉末冶金による複合材(PMC: Powder Metallurgy Composite)の開発が必要となった。

本開発のオールアルミ製シリンダブロックは以下の特徴を有する。

- (1) 軽量化 従来の鑄鉄製ライナを用いたシリンダブロックに対して約20%の軽量化が達成された。
- (2) 性能 冷却性の向上により、ノック限界の拡大および熱だれ特性の向上が図られた。
- (3) 生産性 従来のシリンダブロック製造設備を用いることにより、高い生産性を維持できた。

本稿では、シリンダライナ用複合材料の諸特性、製造方法および本ライナを用いたエンジン特性について述べる。

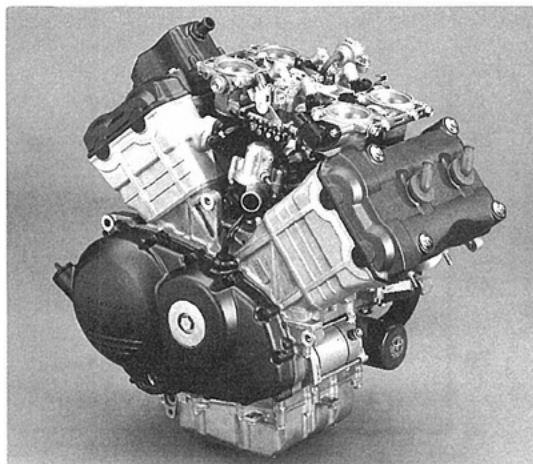


Fig. 1 Four-cylinder 750cm<sup>3</sup> Motorcycle Engine with All-aluminum Cylinder Block

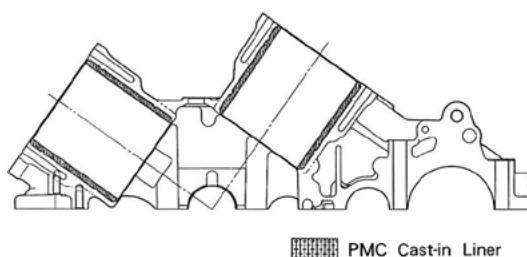


Fig. 2 Cross Section of PMC Cast-in Liner Cylinder Block

## 2. 材料設計

### 2.1 要求特性

アルミライナの要求特性を挙げると以下になる。

- (1) 耐摩耗性 エッチング等の処理を必要としないこと
- (2) 耐焼付性 無処理ピストンでも焼付かないこと
- (3) 加工性 鑄鉄と同じ方法で加工可能なこと
- (4) 耐熱性 鑄込み時にアルミ溶湯から受ける熱により母材硬度が低下しないこと
- (5) 強度・靱性 鑄造圧にたえる強度・靱性を有すること

### 2.2 材料設計の考え方

#### (1) 複合化手法

合金化による耐摩耗性および耐焼付性の改善には限界があることから複合材を採用することとした。

複合材の製造法としてはPM(Powder Metallurgy)法とIM(Ingot Metallurgy)法とがあり、IM法の実用化例として短繊維FRMシリンダブロックが挙げられる。アルミとの比重差が大きく濡れ性が悪い黒鉛等の潤滑材や微細硬質粒子の熔融金属中への均一分散は容易ではないことから、FRMではブリフォームへ溶湯を浸透させている。一方、PM法は機械的混合であり強化材の均一分散が容易であることからPM法を採用した。

強化材には短繊維と粒子があるが、大きさ・形状・種類の選択自由度が大きいことから粒子を選択した。短繊維は強度の向上には寄与するが、成形時の繊維の破損および加工時の繊維の欠落を起こさないように、成形加工条件に対して特別な配慮が必要である。またカーボン短繊維の潤滑効果は黒鉛と同等には期待できない。微細硬質

粒子は脱落や破損は起きにくいことから、耐摩耗性を維持しながら鋳鉄と同様の加工性を得ることができる。

## (2) 耐熱性の向上法

ダイキャスト製品では、熱処理により硬さを回復することはできない。このため、鋳込み時の熱により硬さが低下しないようにマトリックスに耐熱型急凝固粉末を使用した。

## (3) 粉末成形法

通常鉄系粉末の成型固化には焼結法が採られる。一方、アルミニウム粉末の表面には強固な酸化皮膜があり、十分な強度・靱性を得るためには、酸化皮膜を破り金属結合が行われる必要がある。このため粉末の成型固化には熱間押出法を採用した。

# 3. PMC マトリックスの特性

## 3.1 化学組成

Table 1 に PMC マトリックス合金の化学組成を示す。硬質粒子の添加量を減らすために 17% シリコン合金を採用した。また耐熱性を向上するために Fe を添加した。

## 3.2 ミクロ組織

Fig. 3 に PMC と 17% シリコンの鋳造合金 (A390) のミクロ組織と冷却速度を示す。PMC マトリックスの急凝固粉末はエアアトマイズ法によって製造される。急凝固粉末の冷却速度は  $10^2 \sim 10^3 \text{ K/s}$  と大きく、鋳造合金では得られない Si 晶や Fe、Al、Si の金属間化合物の微細組織を得ることができる。

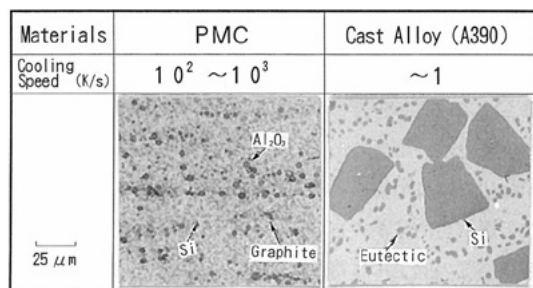


Fig. 3 Influence of Cooling Speed on Micro-structure of Al-17% Silicon Alloy

Table 1 Nominal Chemical Composition of PMC Matrix Alloy

| Element | Content (wt %) |
|---------|----------------|
| Si      | 17.0           |
| Cu      | 3.5            |
| Mg      | 1.0            |
| Fe      | 5.0            |
| Mn      | 0.5            |
| Al      | Bal            |

## 3.3 耐熱性

急冷による微細な金属間化合物により耐熱性が向上する。Fig. 4 に PMC マトリックスと A390 の 1 時間加熱後の硬度の軟化特性を示す。A390 は 500K 近傍から硬度の低下が起こるが、PMC マトリックスの硬度は 770K まではほぼ低下しない。ダイキャスト鋳造時のライナの温度上昇は 625~675K であり、PMC マトリックスの耐熱性は十分である。

# 4. PMC の耐摩耗性および耐焼付性

シリンダライナのアルミ化においては、低温始動時のような境界潤滑条件下での耐摩耗性と耐焼付性の評価が重要である。

低温始動の繰り返しにより、複合化を行わないアルジル合金では、異常摩耗およびピストンとの焼付が見られた。このため複合化による耐摩耗性および耐焼付性の改善が必要となった。

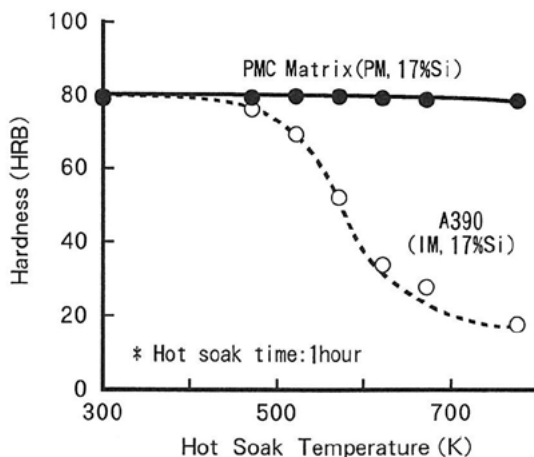


Fig. 4 Hardness Deterioration of PMC Matrix and A390 after 1 Hour Hot Soak

#### 4.1 耐摩耗性

耐摩耗性の改善を行うため2種類のテストを行った。

第1に、モータリングテストによりライナ材へ添加する硬質粒子と潤滑材のスクリーニングを行った。

第2に、単体摺動テストにより硬質粒子径と潤滑材のピストンリング材への攻撃性およびライナ材の耐摩耗性への影響を調査した。これは、ピストンリング材への攻撃性の低減および機械加工性の向上には硬質粒子の粒径は微細であることが望ましく、また耐焼付性の向上には潤滑材の添加が必要であることによる。

##### 4.1.1 モータリングテスト

低温始動時の異常摩耗を再現するためのテスト装置をFig. 5に示す。上死点では、モータリングによる往復動に加え、計算上の最大爆発荷重発生時の側面荷重 834N を与えている。テストは 2000rpm×10min を1サイクルとし6サイクルを行った。低温始動時の未燃焼ガソリンによるシリンダ壁面のオイルの洗い流しを想定して、1サイクルごとに洗浄液によるシリンダの洗浄を行った。

Fig. 6 にテスト結果を示す。耐摩耗性の向上には硬質粒子の添加が有効であり、3% アルミナの添加では鋳鉄と同様の摩耗量であった。一方、潤滑材である黒鉛のみの添加では摩耗量は大幅に増加した。

これらの結果から硬質粒子としてアルミナを選定した。添加量は3% で鋳鉄と同等の耐摩耗性を示す。

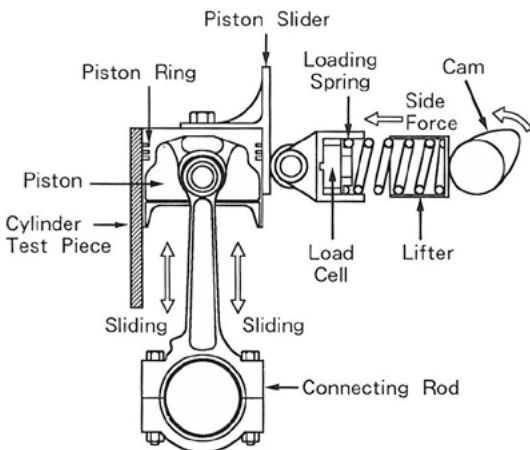


Fig. 5 Motoring Test Equipment

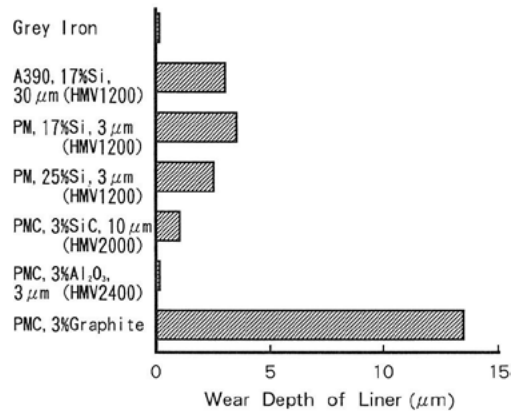


Fig. 6 Influence of Materials on Liner Wear at TDC in Motoring Test with Chrome Plating Piston Ring

##### 4.1.2 単体摺動テスト

Fig. 7 に示すチップオンディスク摺動試験機によりテストを行った。最大爆発荷重の発生点付近の摺動速度として、ディスクの周速は 2.5m/s、オイル供給量は 0.5cm<sup>3</sup>/min とした。面圧は金属接触を開始し、かつ凝着を起こさない条件として 15.7MPa とした。

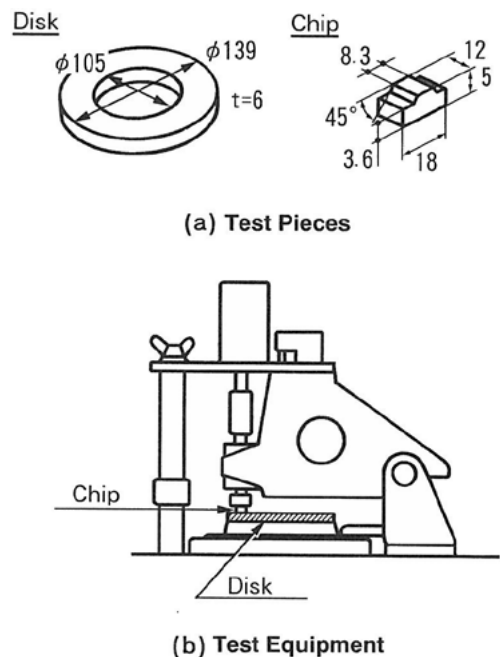


Fig. 7 Chip-on-disk Sliding Test Equipment and Test Pieces

## (1) ピストンリング材の摩耗

Fig. 8(a) に各種ピストンリング材の摩耗に及ぼすアルミナ粒子径の影響について示す。クロムメッキ材においてはアルミナの微細化により摩耗量は減少するが、その減少量は十分とはいえない。表面硬度をあげた SUS440 ガス窒化材においては、硬質粒子の微細化により摩耗はわずかになる。PMC と窒化の組み合わせが良い相性を示す。

## (2) ライナ材の摩耗

Fig. 8(b) に PMC ライナ材の摩耗に及ぼすアルミナの粒子径と潤滑材の影響について示す。アルミナの粒子径はライナ材の耐摩耗性に対して影響は少なく、 $3\mu\text{m}$  の微細粒子を採用しても耐摩耗性の低下は見られない。また黒鉛はアルミナと同時に添加することにより耐摩耗性の低下を防止することができた。

## 4.2 耐焼付性

通常、メッキ以外のアルミシリンダ (A390, FRM) ではピストンに鉄メッキを施し、アルミ同志の直接接触を避けている。単体摺動テストにより、複合化による耐焼付性の向上を調査した。

PMC の耐焼付性を定量化するため、Fig. 7 のチップオンディスク摺動試験機によりテストを行った。耐焼付性の評価は、チップに一定荷重を与えながらディスクを回転させ、焼付が起こるまでの時間で評価した。テスト条件は上死点付近の摺動速度  $2.5\text{m/s}$ 、オイル塗布量  $0.05\text{cm}^3$  とした。オイル塗布としたのは、オイル飛散による焼付挙動のばらつきを抑えるためである。

Fig. 9 にテスト結果を示す。焼付荷重は硬質粒子の添加、更に潤滑材の添加により向上する。潤滑材の効果は短時間側で顕著である。硬質粒子と黒鉛を加えた材料は、鉄メッキと A390 の組み合わせと同等の耐焼付性を有す。黒鉛は 0.5% で効果を現す。

## 4.3 エンジン単体低温始動テスト

複合化による耐摩耗性および耐焼付性の向上がテストピースによって確認されたため、エンジン単体での効果確認を行った。潤滑の最悪条件としてシリンダ内壁を洗浄し、オイル分のない状態での始動を数回行った。

Fig. 10 にシリンダ材料ごとのライナの摩耗状況とピストンの状態を示す。アルミナと黒鉛を配合した PMC は鋳鉄と同様に異常摩耗および焼付は見られない。

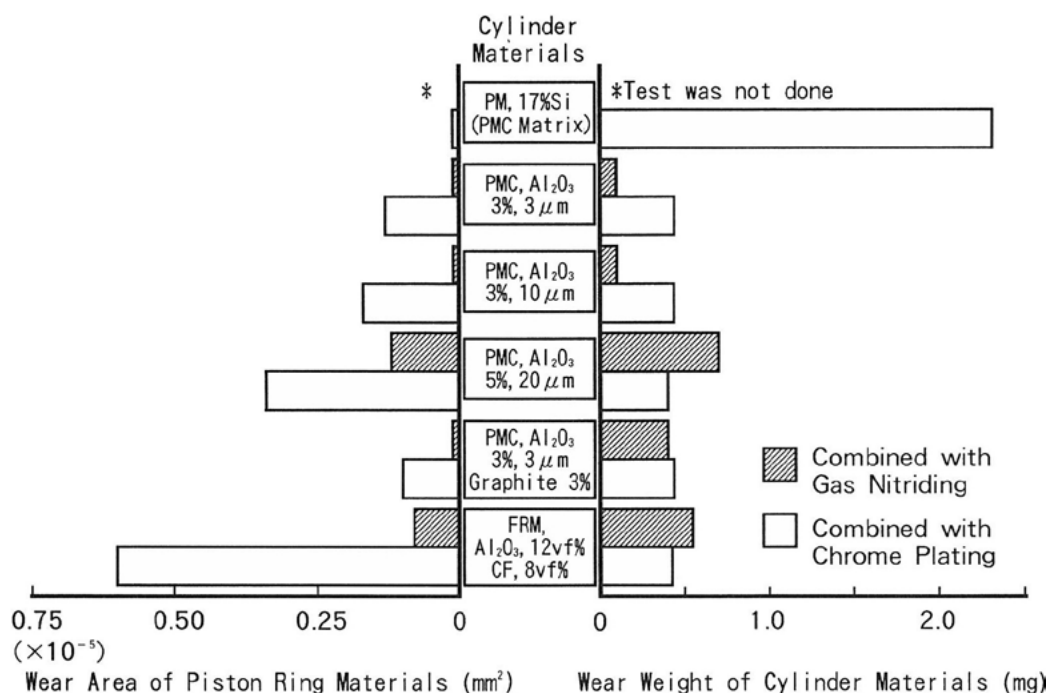
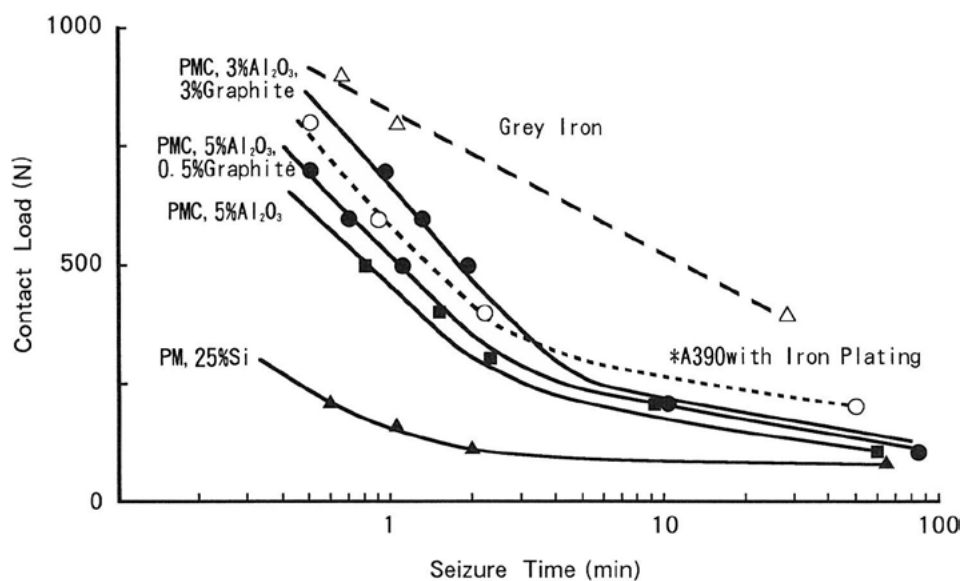


Fig. 8(a) Effect of Hard Particle Size on Wear at Piston Ring Materials in Sliding Test

Fig. 8(b) Effect of Hard Particle Size and Lubricant on Wear at PMC Liner Materials in Sliding Test



\* Aluminum piston material is used except this combination

Fig. 9 Influence of Liner Materials on Relation between Contact Load and Seizure Time

| Materials      | PMC                                          |                                  | PM<br>25%Si Alloy | Cast Grey Iron |
|----------------|----------------------------------------------|----------------------------------|-------------------|----------------|
|                | 3%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /3%Graphite | 5%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                   |                |
| Wear of Liner  | Mild                                         | Mild                             | Severe            | Mild           |
| Piston Surface |                                              |                                  |                   |                |

Fig. 10 Liner Wear and Piston Surface View after Firing Seizure Test

## 5. 加工性と機械的性質

### 5.1 機械加工性

通常、材料の耐摩耗性を向上させると機械加工性は損なわれる。この問題を解決するため、筆者らは加工性に及ぼすアルミナの粒子径と添加量の影響について調査した。

#### (1) アルミナの粒子径

Fig. 11 にアルミナ粒子径および初晶 Si 径とシリンダ

ボア内径切削加工時の円筒度の関係を示す。硬質粒子を添加した場合、刃具が摩耗しやすいためダイヤモンドの刃具が使用されるが、ここでは材料間の加工性の差を明確にするため超硬刃具により比較を行った。

円筒度はアルミナ粒子径や初晶 Si 径が大きいと急に悪くなる。切削精度に対しては粒子径の影響が大きい。アルミナを微細化しても耐摩耗性が損なわれないことから、平均粒径  $3\mu\text{m}$  のアルミナを採用した。

## (2) アルミナの添加量

Fig. 12 にアルミナの添加量と刃具摩耗量を示す。5%までは鋳鉄と同等の摩耗量である。耐摩耗性と刃具摩耗からアルミナの添加量は3~5%とした。

## 5.2 機械的性質

## (1) アルミナの影響

Fig. 13 にアルミナの粒子径および形状の引張り強度、伸びに与える影響を示す。粒子径は細かい程、添加時の強度、伸びの低下は少ない。また同一粒子径でも破碎し

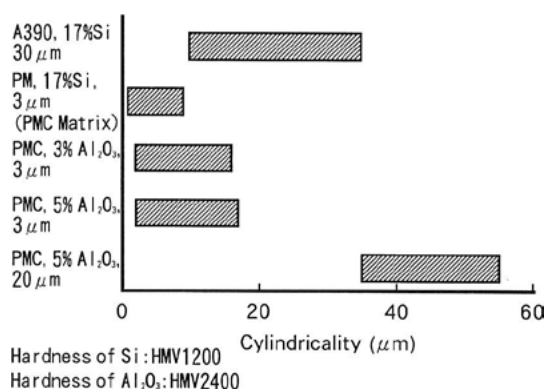


Fig. 11 Influence of Hard Particle Materials on Liner Cylindricity

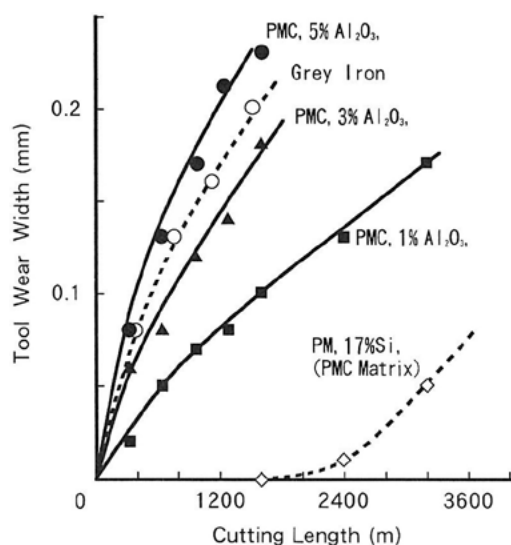


Fig. 12 Influence of Alumina Quantity on Tool Wear

た物と球状のものでは、球状のほうが低下は少ないことから、球状化アルミナを採用した。

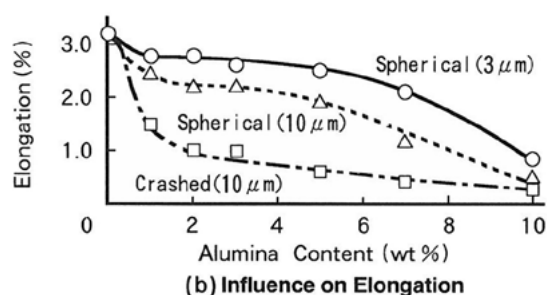
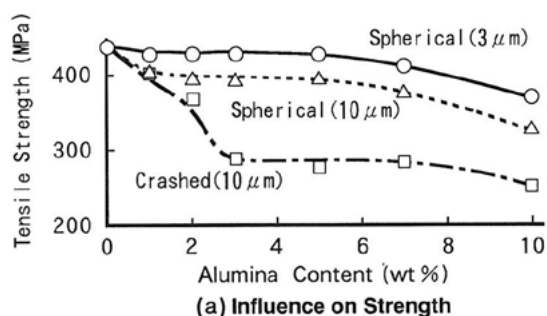


Fig. 13 Influence of Alumina Content on Liner Strength and Elongation

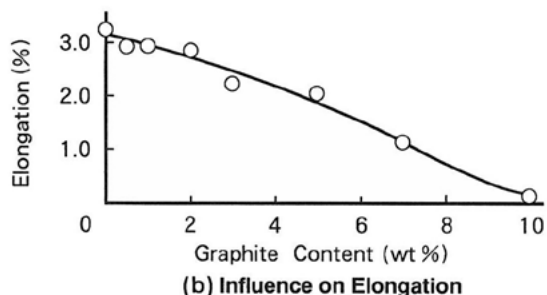
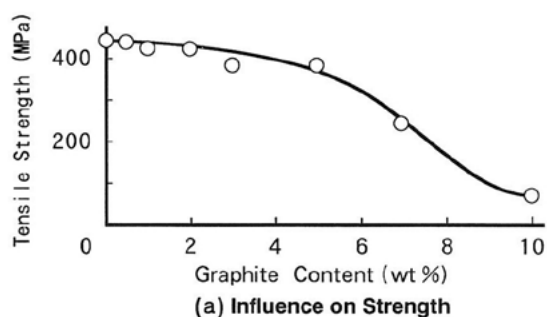


Fig. 14 Influence of Graphite Content on Liner Strength and Elongation

## (2) 黒鉛の影響

Fig. 14 に黒鉛が引張り強度、伸びに与える影響を示す。黒鉛は添加量の増加とともに強度、伸びが低下するが、3% 前後まではその影響は少ない。このため黒鉛の添加は 0.5~3% とした。

## 6. 製造工程

Fig. 15 に粉末をシリンダライナに固化成型する工程を示す。マトリックス粉末にアルミナ粉末と黒鉛粉末を添加し、均一に混合された粉末は CIP (Cold Isostatics Press) により押出用ビレットとして成形される。

押出工程では粉末の金属結合とライナ形状のニアネット成形が同時に行われる。鋳造時の圧力に対して十分な強度を得るには、8 以上の押出比が必要である。一方、耐熱型急凝固粉末を使用していることから、押出抵抗

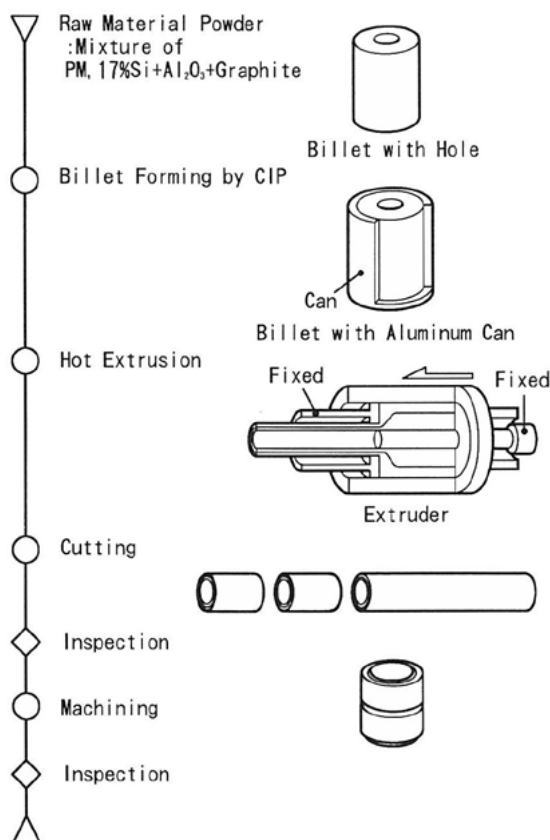


Fig. 15 Cylinder Liner Forming Process

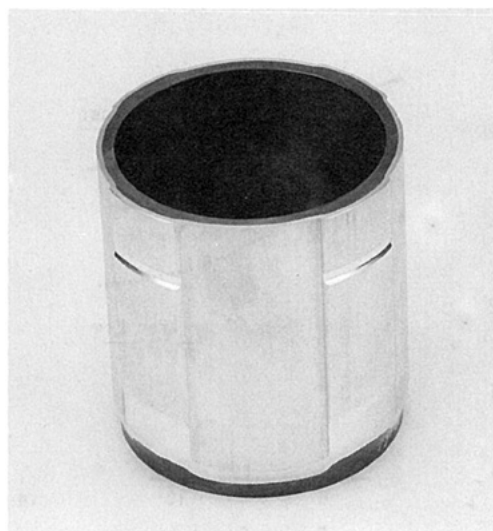


Fig. 16 Outer View of PMC Liner Final Product

は高くなり押出速度は遅くなる。また黒鉛およびアルミナを添加しているため、むしれや割れが発生しやすい。これらの問題を解決するために、CIP 体を押出抵抗の少ない A6061 のシース管に入れ押出を行い、押出速度の向上およびむしれの防止をはかっている。

Fig. 16 にライナの外観を示す。シース層は鋳造時にアルミ溶湯から受ける熱によるライナ最表面の溶けを防ぐ効果も有する。

## 7. 実車エンジン特性

## 7.1 性能

ライナを鋳鉄から PMC へ材質変更することにより、熱伝導率が良くなり冷却性の向上が期待される。冷却性の向上はノック限界や熱だれ特性に対して効果があると思われるため、これらについて調査を行った。

## (1) 冷却性

冷却性については、全負荷運転中にウォータジャケット出口と入口との冷却水温度差を測定することにより確認した。その結果を Fig. 17 に示す。両ライナ材共にエンジン回転数の上昇と共に冷却水流量が増加するため出入口の温度差が減少しているが、鋳鉄ライナに比べ PMC ライナではこの減少の程度が少なく、高回転でも冷却性が良い。またどの回転数においても PMC ライナの方が温度差が大きく、燃焼によって生じた熱を効率良

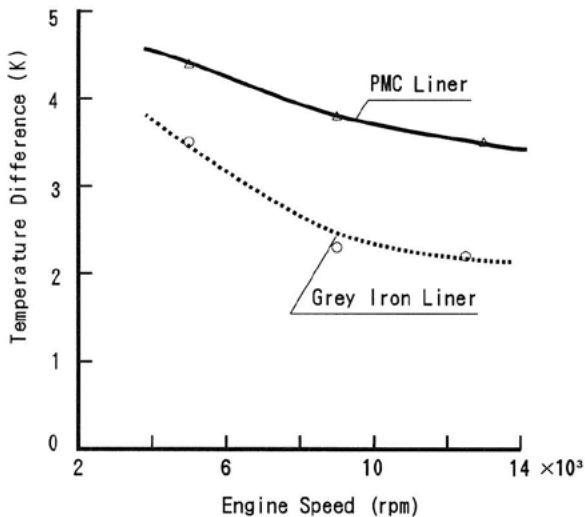


Fig. 17 Effect of Liner Material on Cooling Water Temperature Difference between Inlet and Outlet of Water jacket

く冷却水に伝えていることがわかる。しかし、これは冷却損失の増大を意味しており、出力の低下が懸念されたが、供試エンジンでは有意差は認められなかった。この理由として、以下の項目が考えられる。

- ①排気ガス温度を比較してみたところ PMC ライナの方が温度が低く、排気損失が減少している。
- ②燃焼室内壁温度が下がったことにより、圧縮工程での新気への熱伝達が減少し、圧縮仕事が減少したもののと思われる。

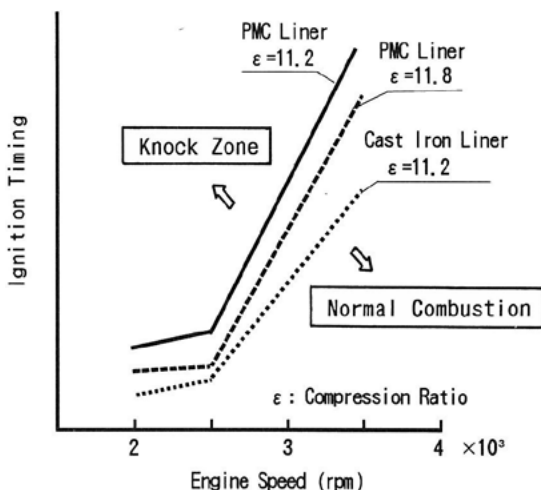


Fig. 18 Influence of Liner Material on Knock Zone at Low Engine Speed

## (2) ノック限界への影響

Fig. 18 にライナ材変更によるノック限界への影響を示す。鋳鉄ライナに比べ PMC ライナでは、同一圧縮比においてノック限界に点火時期で最大 10 度以上の余裕ができた。このため、ノック限界の最悪ポイントを鋳鉄ライナと同等に保ちながら圧縮比を約 5% 向上することが可能となった。この圧縮比向上による出力特性の変化を Fig. 19 に示す。全回転範囲において出力が向上しており、その効果はエンジン回転数によって異なるが、最大で約 6% であった。

## (3) 熱だれ特性

Fig. 20 に示すように、冷却性の向上効果は熱だれ特性に顕著に表われた。回転速度一定での全負荷運転状態で潤滑油温を約 350K から 410K 程度まで上昇させたところ、鋳鉄スリーブでは約 2.6% の出力低下が認められたが、PMC ライナでは低下が全く見られなかった。従って台上より実車運転時、特にレース中など温度条件が過酷であるほど PMC ライナのメリットが明確になると言える。

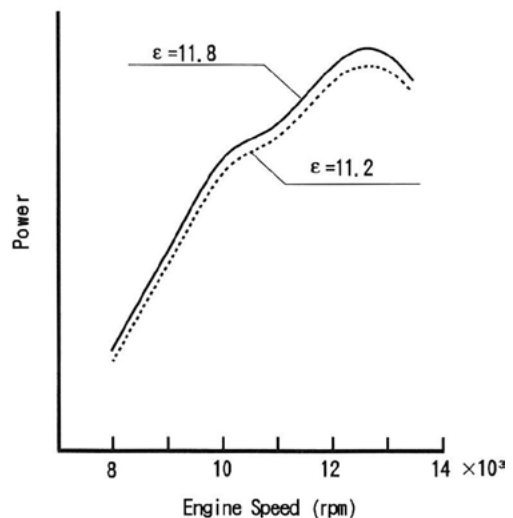


Fig. 19 Effect of Compression Ratio on Full Load Performance of PMC

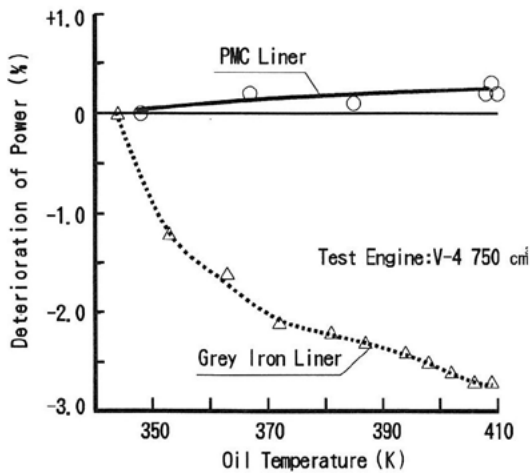


Fig. 20 Influence of Liner Material on Power Deterioration

## 7.2 機能

内径真円度、摩耗量および熱膨張率増加によるピストンクリアランスの拡大は、オイル消費量・ブローパイガス量に対して影響する。このため開発にあたり特に注意を払った。

### (1) 真円度

ライナ内径真円度を全負荷台上試験後で比較してみたところ、PMC ライナは Fig. 21 に示すように鋳鉄材より多少劣っていたが、ダイキャスト後のシリンダブロック素材に歪取り熱処理 (498K×1 時間) を行なうことで大幅に改善され、鋳鉄ライナと同等以上の値を得ることができた。

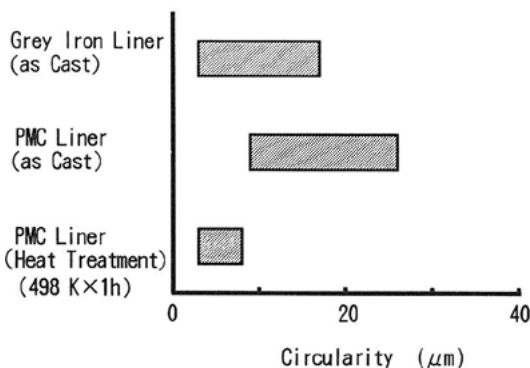


Fig. 21 Influence of Heat Treatment on Liner Circularity after Firing Test

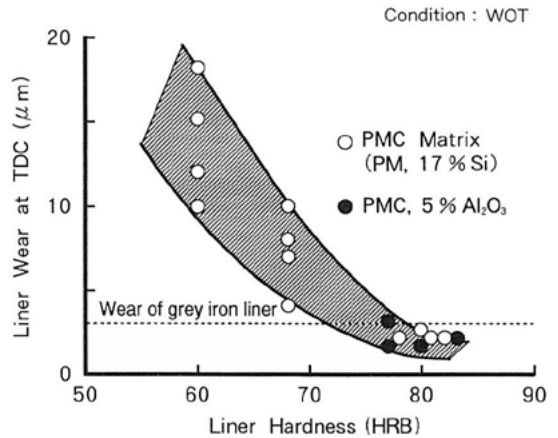


Fig. 22 Effect of Hardness of PMC Matrix and PMC on Liner Wear at TDC

### (2) 摩耗量

Fig. 22 に全負荷台上試験後の上死点摩耗量を示す。従来のアルジル合金は、ダイキャスト時の熱による硬度低下により摩耗は増加するが、PMC は硬度低下しないため鋳鉄と同等以上の値を得ることができた。

### (3) ピストンプロフィール

ピストンクリアランスのコントロールは、各ランド径および短径方向スカート部を拡大することで対応した。

## 8. 結論

PM 法による 17Si 合金をベースとした複合材の開発により以下の特性が得られた。

- (1) アルミナを 3~5% 添加することにより、鋳鉄なみの耐摩耗性が得られた。
- (2) ピストン材に対する耐焼付性は、黒鉛を 0.5~3% 添加することにより、鉄メッキと同等の耐焼付性が得られた。
- (3) アルミナの粒径を 3 μm に微細化することにより、加工性の向上がはかられた。
- (4) マトリックス粉末を 5%Fe の急凝固粉末とすることにより、770K までの短時間加熱に対して硬度低下しない耐熱性が得られ、ダイキャスト鋳込みが可能となった。

従来のシリンダブロックのオールアルミ化手法は、生産設備および生産方案を大幅に変更する必要があったが、本ライナ方式では生産設備の変更を伴わず、シリンダブロックのオールアルミ化が可能となった。

## 謝 辞

本材料の開発にあたり、住友電気工業株式会社様に多大な御協力を頂いたことを感謝いたします。

## 参考文献

- 1) J. L. Jorstad: "Reynolds 390 Engine Technology" SAE 830010
- 2) 石森、大塚: 複合めっきについて  
自動車技術 Vol.32、No.9、1978
- 3) T. Hayashi, H. Ushio and M. Ebisawa: "The Properties of Hybrid Fiber Reinforced Metal and It's Application for Engine Block" SAE 890557
- 4) M. Ebisawa, T. Hara, T. Hayashi and H. Ushio: "Production Process of Metal Matrix Composite (MMC) Engine Block" SAE 910835
- 5) G. Renninger, D. Abendroth and M. Bolien: "Casting engine blocks in GK Al Si 17 Cu 4 Mg" SAE 830003
- 6) W. Dahm and R. G. Putter: "Light alloy engines-experience gained from research and development" SAE 830005
- 7) E. G. Jacobsen: "General Motors 390 aluminum alloy 60° V6 engine." SAE 830006
- 8) H. H. Hofmann, K. Schellmann and E. Wacker: "Aluminum 390 alloy engine blocks: Design and Manufacturing." SAE 830007

## ■著 者■



小屋 栄太郎



萩原 好敏



鈴木 達夫



三浦 静止



真田 誠



津野 宏



柳田 国男