

# 制御鍛造技術を使ったパウダーメタルピストン(PM-P)の実用化

## Development of the Controlled Forged Powder-Metal Piston (PM-P)

小池俊勝 Toshikatsu Koike 山縣 裕 Hiroshi Yamagata

●技術本部 基盤技術研究室

### 要旨

鋳造では実現不可能な高い要求機能にこたえられるピストンを適正なコストで生産することを目的として、ピストン用パウダーメタル材および制御鍛造技術を開発した。ピストン用パウダーメタル材は室温から523Kの温度域で鋳造ピストン材に比べ約50%高い疲労強度を示し薄肉設計を可能にする。また硬質SiC粒子を必要に応じ適量混ぜることによって耐摩耗性を改善することができる。一方、制御鍛造技術はパウダーメタル材などの難加工性アルミ合金を、ピストン形状にニアネットでかつ効率よく成形する技術である。制御鍛造技術を使ったパウダーメタルピストンは軽量化と耐久性向上に顕著な効果があり、1990年より当社の世界GPレース用マシンYZR500に採用されている。本年より世界に先駆けて市販車への採用を始めた。

### 1 はじめに

エンジンに対する高出力化、燃費改善、排気ガスおよび騒音低減、あるいは長寿命化の要求が強まる20世紀末の今日、エンジンの心臓部品であるピストンにもより一層、機能の向上が求められている。高温高圧の燃焼ガスにさらされ、シリンダの中を高速で往復運動するピストンは高い強度と耐摩耗性を備え、かつ軽量であることが要求される。

ピストンの材質としては1920年代にドイツで発明された高Siのアルミ合金が広く使われており、その成形法は金型鋳造が主流である。しかし鋳造技術の向上にもかかわらず、金型鋳造ピストンには以下のような材質、工法上の制約が依然としてある。

- (1) 脱ガスなどの溶湯処理を行っても、巻き込みや巣などの欠陥が発生する。
- (2) 肉厚部の鋳造組織が粗いため疲労強度が低い。
- (3) 鋳造に向けた合金の成分は限られているため、耐熱性を向上させる元素を多くは添加できない。

ほかの鋳造法、例えばハイプレッシャーダイキャストは薄肉部の湯周りがよく組織の微細化が図れるが、製品中に含まれるガス量が多く、高温でブリスター欠陥が発生するため使えない。また、スクイーズキャスティング

などの加圧鋳造法により、セラミックスウェイバーを部分的に複合化して強度の不足を補う方法も開発されているが<sup>(1)</sup>、セラミックスとアルミ界面の接合強度の信頼性確保と品質管理に手間がかかり、結果的に大幅なコストアップになるため、一部のディーゼルエンジン用ピストンへの使用にとどまっている。いずれにせよ、ピストンの高機能化を今以上に行うには、既存の鋳造ベースの技術では限界がある。今回、我々は鋳造ピストンでは不可能な高い要求機能にこたえられるピストンを適正コストで生産することを目的として、ピストン用パウダーメタル材およびその鍛造技術を開発した。

### 2 ピストン用パウダーメタル材の開発

1945年にスイスで開発されたSAP (Sintered Aluminum Powder)を始めとするアルミの粉末冶金技術は、1980年代に入って押し出しによる粉末の成形固化技術が進歩し、高品質な素材が工業的に利用できるようになった。今回、パウダーメタルピストン（以下、PM-Pという）で用いたパウダーメタル素材も基本的にはこの流れの中にある。図1に鍛造前棒素材の製造工程を示す。以下この方法によって作られた素材をパウダーメタル材と呼ぶ。この方法の大きな特徴は

- (1) 溶湯を噴霧し粉末にすることにより103K/s以上の急冷凝固が行え、高Siのアルミ合金においては初晶Siをはじめとする析出物の微細化が可能になる。

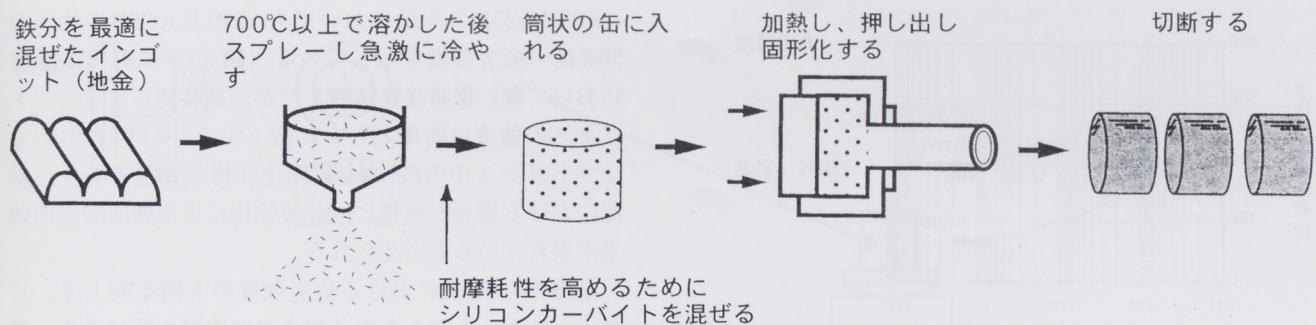


図1 パウダーメタル材の製造工程

(2) 溶湯中にFeなどの成分を多く添加し高融点の化合物を積極的に分散させることによって、耐熱性を飛躍的に高めることができる。

(3) アルミ合金粉末の成形固化時にSiCなどの硬質粒子を必要に応じて混ぜ、耐摩耗性の向上も自在に行うことができる。

などである。

アルミ基パウダーメタル材は、現在までにコンプレッサ<sup>(2)</sup>やシリンダライナ<sup>(3)</sup>など、耐摩耗性を主に要求される部品に実用化例がある。しかし、これらと比べ、けた違いに使用環境のきびしいピストン材としては、室温から高温までの広い温度域で、強度と韌性および耐摩耗性をバランスよく備えていることが要求される。

今回、我々は高Siのアルミ合金をベースとして、Fe,SiCをはじめとする成分の最適化を行い、ピストンのための実用パウダーメタル材を新たに開発した。その一つであるAFP1 (Al-20Si-5Fe-1Cu-0.5Mg-1Zr+2mass%SiC) の、ピストンの実用温度域における疲労および耐摩耗特性を、鋳造ピストン合金 JIS AC9B(Al-19Si-1Cu-1Mg-1Ni)と比較する。

図2に疲労強度試験プロセスを、図3<sup>(4)</sup>に試験結果を示す。 AFP1の室温における107回疲労強度は200MPaで、AC9Bの135MPaに比べ約50%高い値を示している。この理由として、 AFP1のマトリクス中にナノミクロンオーダで微細に析出しているFe-Al金属間化合物による分散強化が考えられる。さらに図4のミクロ組織写真に示すように、 AFP1の初晶SiはAC9Bに比べ微細かつ均一に析出しているため、ミクロ的な応力集中が緩和され疲労クラックの発生がおこりにくくなっていることも強度

向上に寄与していると考えられる。両合金中のCu,Mgの量はほぼ等しいため、時効硬化による強度向上への寄与は同程度と考えられる。

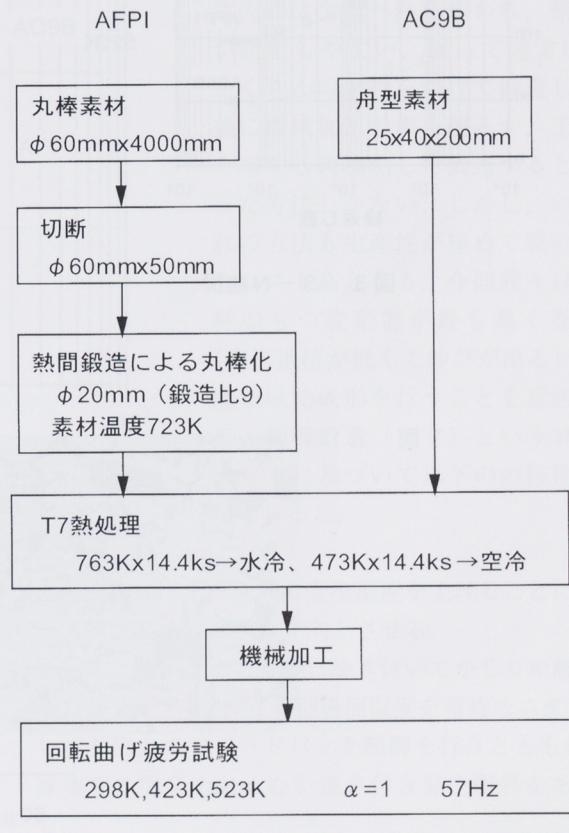


図2 疲労強度の試験プロセス

## 制御鍛造技術を使ったパウダーメタルピストン(PM-P)の実用化

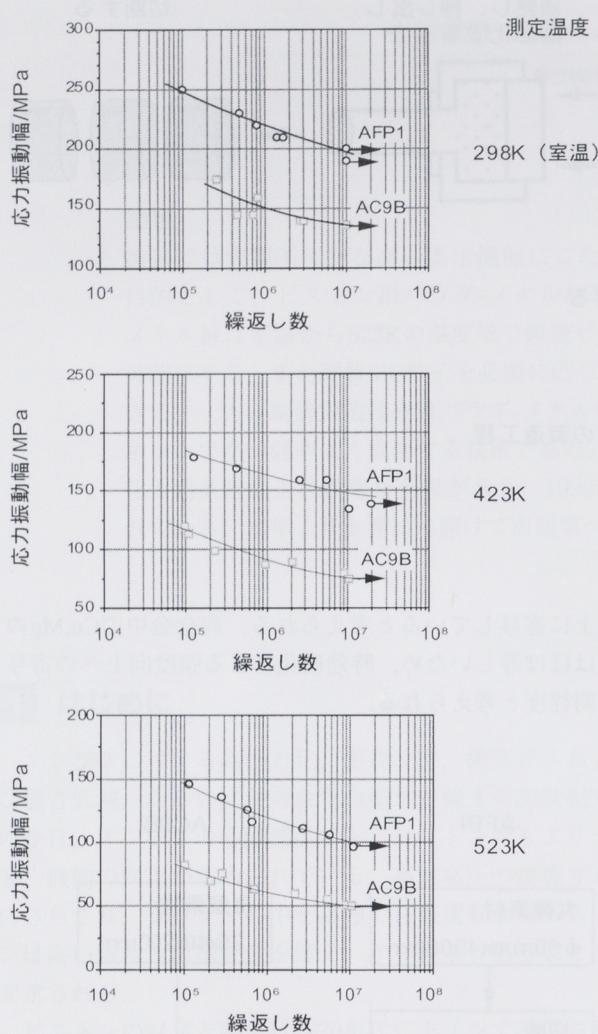


図3 S-N曲線

423K, 523Kの高温においても AFP1はAC9Bに比べ約50%高い疲労強度を示している(図3)。これらの温度においては、保持後に試験したが、過時効によってマトリクスの強度は時間とともに低下する。 AFP1においてはマトリクス中のFe-Al金属間化合物が安定であり、室温における場合と同様に、分散強化による強度向上の効果が表れていると考えられる。

室温から523Kにおける疲労強度の大幅な向上は、ピストンスカート部から天井部までの肉厚を低減でき、薄肉軽量化に直接つながる。

つぎに耐摩耗性の比較について述べる。試験はフレッチング摩耗試験機によって行った。図5に示すように、一定角度で揺動するロータ(ピストン材)にライダ(SCM415浸炭焼入れ材)を一定回数押し付け、試験後のロータの摩耗あととの面積の大きさを画像解析装置付の光学顕微鏡によって測定し、摩耗量とした。潤滑条件はドライで行った。

523Kにおける測定結果を図6<sup>(4)</sup>に示す。 AFP1はAC9Bよりも摩耗量が少なく、耐摩耗性にすぐれていることがわかる。この理由としてはAl-Fe化合物の分散強化によるマトリクスの強化に加え、硬質のSiC粒子(硬さHv 2900)がマトリックス中に均一に分散していることが考えられる。

高温における耐摩耗性の向上は、ピン孔やリング溝部の耐久性向上につながる。また、シリンダ摺動部の耐焼付き性を改善し、ピストン、シリンダ間のクリアランスをつめられるようになるため、燃費やピストン打音の低減を図ることができる。

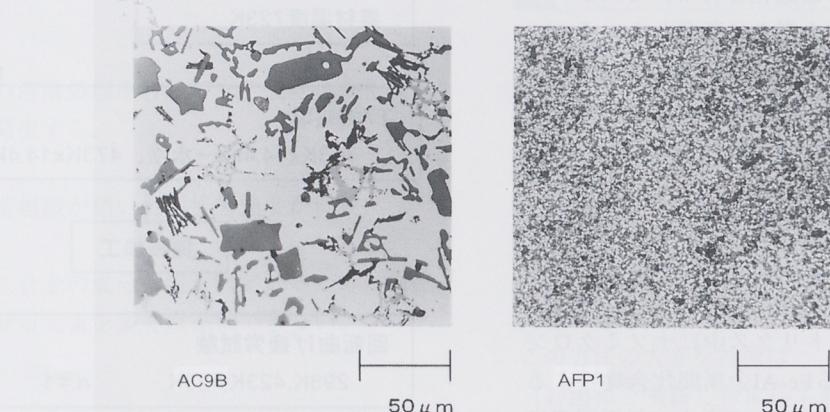


図4 ミクロ組織写真

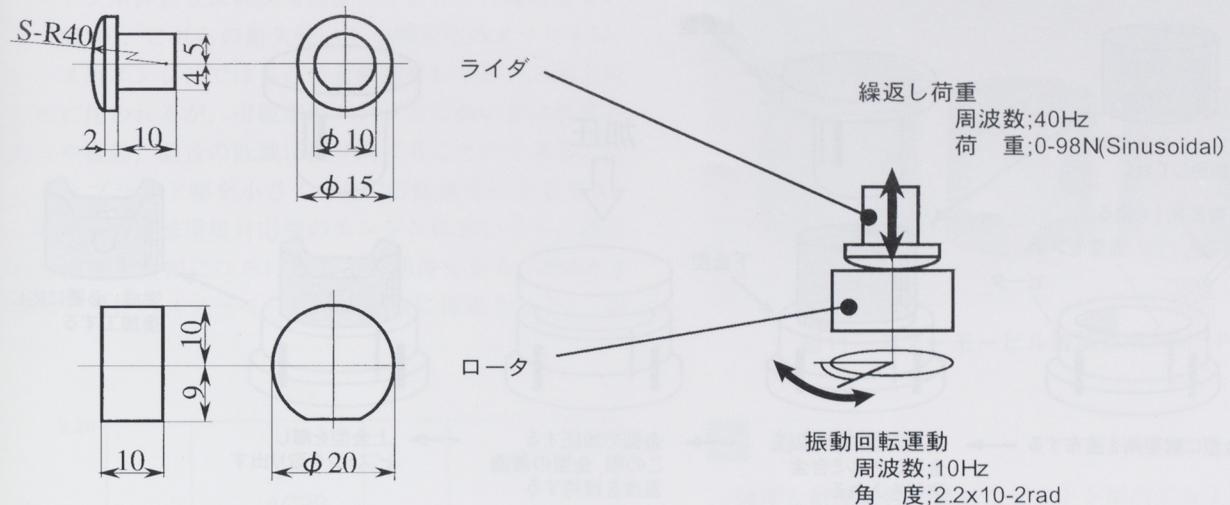


図5 フレッチング摩耗試験

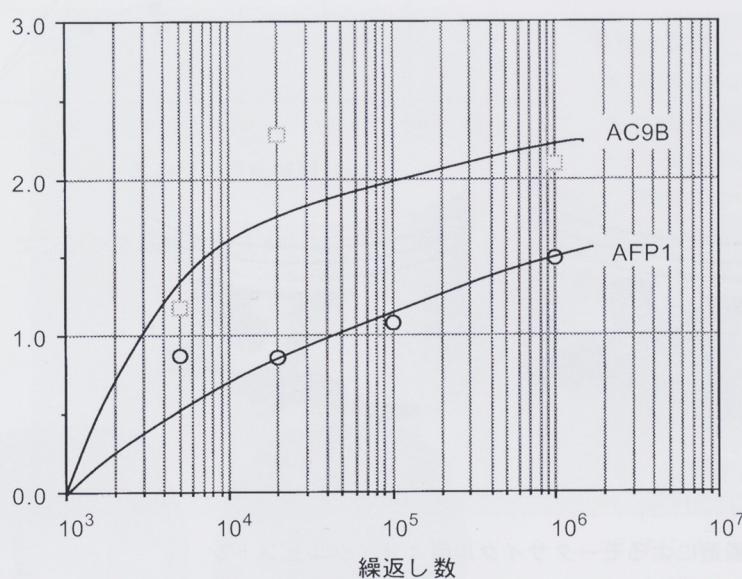
摩耗面積/mm<sup>2</sup>

図6 フレッチング摩耗試験結果

が、金型の加熱は予熱程度にとどまり、金型温度は鍛造のサイクルタイムで成りゆきで決まるという側面があった。そのため成形時に薄肉部は金型へ熱を奪われ、割れが発生しやすい。従って通常は、たくさんの余肉をつけて鍛造した後に機械加工で肉を削るか、工程を増やし再加熱して鍛造するといった方法しかない。しかし、いずれの方法も生産性が極めて悪いためコスト高となる。今回我々は素材のもつ変形能が最も高くなる(変形抵抗が低くて伸びが出る)温度領域で成形を行うことを意図して、制御鍛造(図7)というコンセプトに基づいて以下の技術開発を行った。

- (1) 金型内にヒータを配置し金型温度を上げることによって薄肉部の成形限界を向上させる。
- (2) 温度を上げすぎると金型に焼き付いてかじりや離型不良が発生するため、金型表面温度を常時モニタし、ヒータ出力のフィードバック制御を行うとともに、離型剤の開発をおこない焼き付き発生限界をあげる。
- (3) 純型剤の精密な吹き付け技術を開発し、型の場所によって吹き付け量の変化をつけることにより、局部的な焼き付きにも対応できるようにする。

### 3 制御鍛造技術の開発

高Si系アルミ合金は伸びが少なく鍛造性が非常に悪い。PM-Pで用いたパウダーメタル材は部品の要求機能上高温強度が高く、そのため成形荷重が上がり鍛造性がさらに悪い。また一般の熱間鍛造では素材の加熱は行う

## 制御鍛造技術を使ったパウダーメタルピストン(PM-P)の実用化

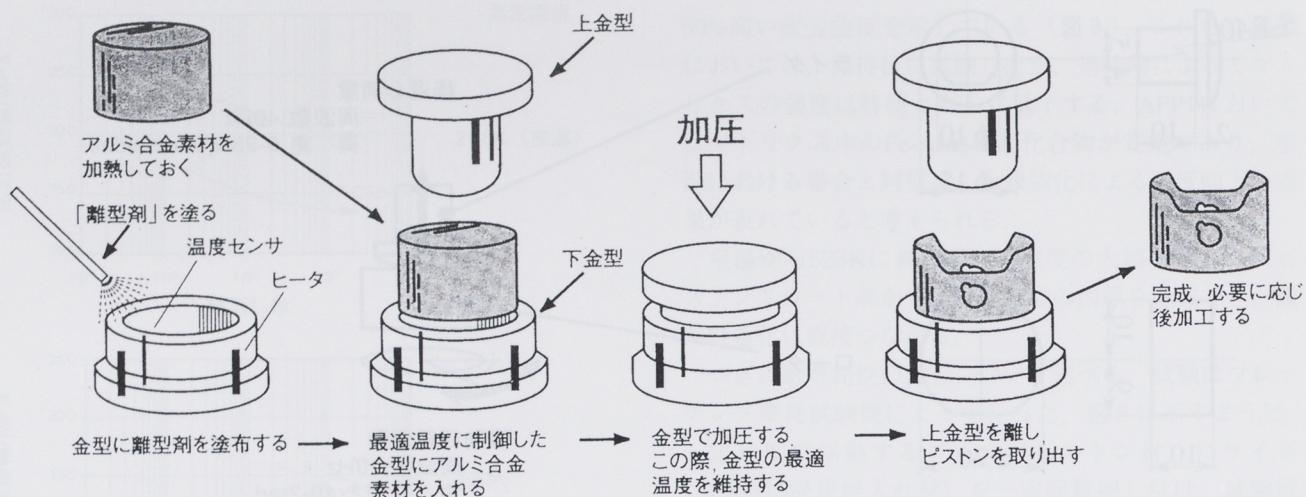


図7 制御鍛造プロセス

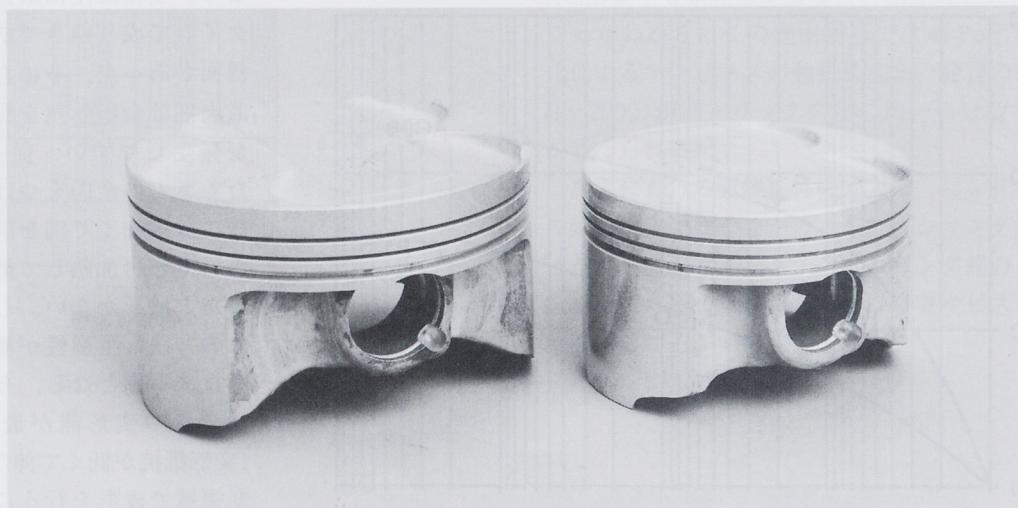


図8 制御鍛造によるモータサイクル用4サイクルピストン

本技術により、従来の熱間鍛造では一般に3工程が必要であった薄肉のリブ形状をもつピストンを、1工程で成形することが可能になった。また、金型にかかる応力が下がり閉そく鍛造化が可能になったため、成形品の精度が向上した（一般的な熱間鍛造では±0.2mm以上が本技術では±0.1mm）。これによって、機械加工が常識であった4サイクルエンジン用ピストンのバルブ逃げ形状の鍛造成形が可能になり（図8）<sup>(5)</sup>、大幅なコスト低減につながった。制御鍛造とは、従来の熱間鍛造や恒温鍛造というカテゴリーに含まれるものではあるが、離型剤を含めた鍛造条件の制御を、より精密に積極的に行うと

いう意味でつけたものである<sup>(6)</sup>。

#### 4 PM-Pの特徴

PM-Pは1990年よりYZR500をはじめとする世界GPレース用マシンに採用され、材質および形状の最適化を進めてきた。図9<sup>(7)</sup>にエンジン限界性能で連続運転を行った場合の、天井へこみ量と運転時間の関係を示す。同じ天井肉厚の铸造ピストンと比較して天井へこみが起こりにくいPM-Pは、レースエンジンにおいて優れた耐久性を示す。またエンジン出力が約10%向上するなかで、

ピストン単体重量は約20%軽量化することに成功している(図10)。これらの耐久性向上や軽量化のメリットは、レース用エンジンではさらなる性能やレスポンス向上のために使われるが、市販車用エンジンにおいては燃費の向上や振動、騒音の低減に振り向けることができる。またトップランド幅を小さくしH/Cの低減を行えるなど、これから地球環境対応型のエンジンにおいても、設計の自由度を大幅にひろげることが期待できる。PM-Pは今年、当社のスノーモービル市販車に採用される。(図11)。

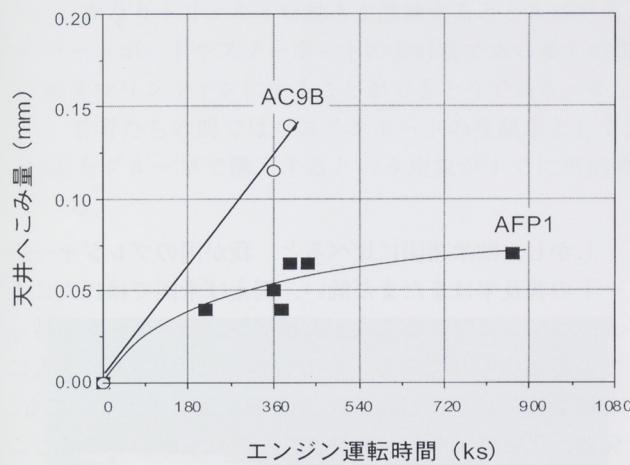
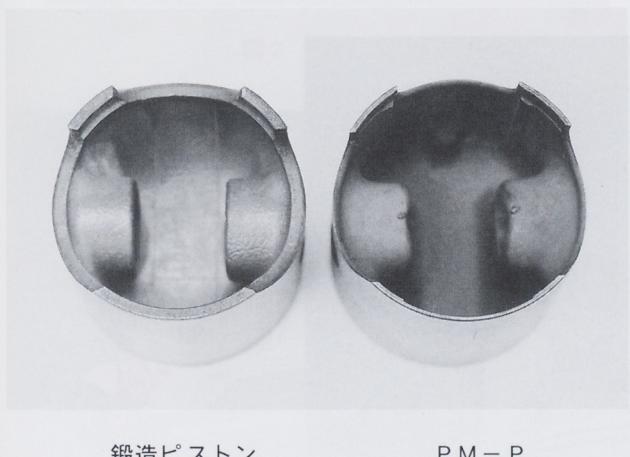


図9 エンジン運転時間と天井へこみ量の関係



鍛造ピストン PM-P  
図10 鍛造ピストンとPM-Pの肉厚比較



図11 スノーモービル市販車用PM-P

## 5 おわりに

強度と耐摩耗性に優れたピストン用のアルミ合金パウダーメタル素材と、薄肉かつ高精度な成形を可能にする制御鍛造技術を開発し、鋳造ピストンの限界を打ち破る高機能なパウダーメタルピストンを実用化した。

### ■参考文献

- (1) T.Donomoto,K.Funamati,N.Miura and N.Miyake : SAE Paper, No.830252.
- (2) T.Hayashi,Y.Takeda,K.Akechi and T.Fujiiwara : SAE Paper, No.900407.
- (3) E.Koya,Y.Hagiwara and S.Miura : SAE Paper, No.940847.
- (4) T.Koike,H.Kurita and H.Yamagata : Proc. 4th Japan International SAMPE Symposium, 1995, pp.501-506.
- (5) 小池俊勝, 山縣 裕 : 軽金属91回秋期講演概要, 1996, pp.145-146.
- (6) 小池俊勝, 山縣 裕 : 第47回塑加講論, 1996, pp.113-114.
- (7) T.Koike and H.Yamagata : Proc.of PM' 94, Les Edition de Physique Les Ulis, Paris, 1994, pp.1627-1630.

### ●著者



小池 俊勝



山縣 裕