

# アルミニウム基複合材料の エンジン部品への適用技術開発

Development of technology for Applying  
Aluminum-base Composite Material to Engine Parts

芥川 知孝\*

Chitaka Akutagawa

栗田 洋敬\*

Hiroataka Kurita

## 要旨

アルミニウム基複合材料は、内部にSiC粒子を分散させることにより、アルミニウムの軽量性を生かしつつ、硬さ、強度、耐熱性、耐摩耗性などの特性向上をはかったものである。この複合材料は、軍用航空機を中心として開発され、民生用としても様々な部品への検討が行なわれているが、実用化された例は少なく、疲れ強さおよび耐摩耗性等の特性を含め、加工特性でも未解明な点が多い。今回、二輪車用ピストン、船外機プロペラに焦点を絞り、これらの部品に対して要求される様態、生産での加工工程をふまえ、この複合材料の適用化技術開発を進めた結果、大幅な特性の向上を図ることが出来た。本稿では、この検討過程で明らかになった項目のうち、機能面の特性について報告する。

## Abstract

In addition to the lightness of Aluminum, Aluminum Metal Matrix Composite (Al-MMC) features improved mechanical properties such as hardness, strength, heat resistance and abrasion resistance caused by dispersing SiC particles. Al-MMC has been developed for the purpose of applications to military aircrafts. Applications to consumer appliances have also been studied, the material is put to practical use in very few cases. There are many unelucidated points in the processing properties and in the functional properties such as fatigue strength and abrasion resistance as well. In this study, we made efforts toward developing application technology of this composite material to motorcycle pistons and outboard motor propellers, taking into account the functions required for these parts and the machining processes for production. As a result, the properties of the material have been remarkably improved. Of all the properties elucidated in the course of this study, the properties concerning functions are reported in this paper.

## 1 はじめに

最近の自動車に対しては、高性能、快適性などのユーザーからのニーズ、地球環境、省エネルギー、安全性などの社会的な要求、コストなどの経済情勢からの要求など様々なことが求められている。従って、使用される部品は高機能化、複雑化しており、従来の機能、品質、コストに加え、素材についてはあらたにリサイクル性の課題も取り上げられている。これらの要求を満たすと考えられているアルミニウム基複合材料については、材料としてのポテンシャルは高いが、生産方法、コストの課題もあり、現実には普及していない。今回の開発は、素材の特性評価結果、加工における技術開発結果及びノウハウをより具体的な形で明らかにすることにより、この新しい素材、技術の

普及を図るため、静岡県科学技術振興財団の依頼を受け

産：株式会社日軽技研

学：豊橋技術科学大学

官：静岡県沼津工業技術センター

で共同研究・開発を行ったものである。

## 2 材料

今回の開発に使用した材料(DURALCAN)はDuralcan USAが開発した粒子分散型複合材料(図1、以下MMC)であり、種々のアルミニウムマトリックス中にSiC粒子を分散させたものである。<sup>(1)(2)</sup>

ピストンには耐熱性が要求されることから、Cu、Ni、ならびにMgを多く含むF3Kマトリックスを選定した。また、プロペラについては耐食性が要求されるため、Cuを含まないF3Sおよび

\* 技術本部 基盤技術研究センター



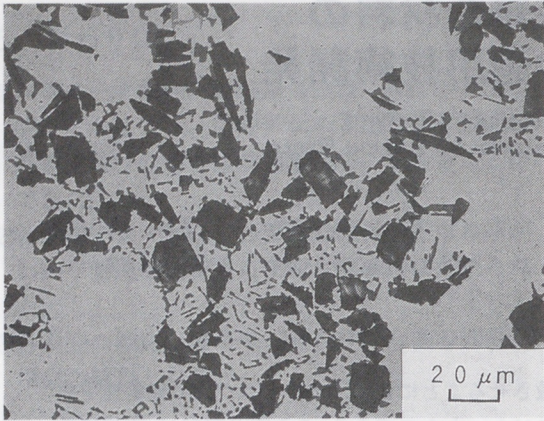


図1 アルミニウム基複合材料の組織

表1 粒子分散型複合材料のマトリックス組成

	Si	Fe	Cu	Mg	Ni	Ti	Mn	Zn	Al
F3K, x x S	9.50-10.50	0.20-2.80- MAX	2.80-3.20	0.80-1.20	1.00-1.50	0.20- MAX			REM
F3S, x x S	8.50-9.50	0.20- MAX	0.20- MAX	0.45-0.65		0.20- MAX			REM
F3N, x x S	9.50-10.50	0.80-1.20	0.20- MAX	0.50-0.70		0.20- MAX	0.50-0.80	0.03- MAX	REM
AC9B	18.0-20.0	0.80- MAX	0.50-1.50	0.50-1.50	0.50-1.50	0.20- MAX	0.50- MAX		REM
ADC5	9.50-10.50	0.80-1.20	0.20- MAX	0.50-0.80		0.20- MAX	0.50-0.70		REM

単位 (%)

F3Nマトリックスを選定した。開発に使用した素材のマトリックスおよび両者の現在使用素材の成分を表1<sup>(3)</sup>に示す。

3 材料特性

3.1 力学的特性

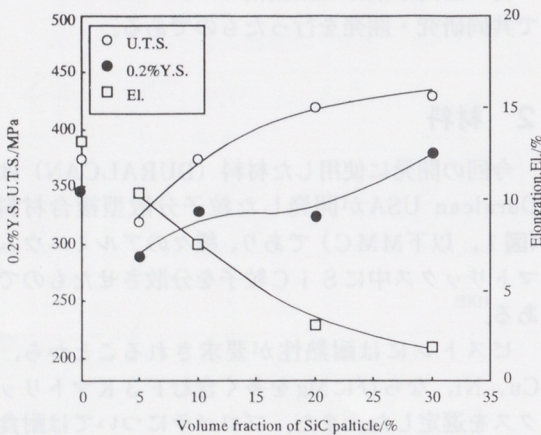


図2 SiCpアルミニウム合金複合材料の機械的性質

図2に、実験したMMCの最大引張り強さ(U.T.S)、耐力(0.2%Y.S)、及び伸び(El.)とSiC粒子の関係を示す。SiC粒子の体積率の増大にともない、0.2%Y.SおよびU.T.Sの強度特性は上昇するがEl.の延性特性値は減少する。図3に同複合材料の動的破壊靱性値(Jd)およびき裂進展抵抗靱性値(Tmat)とSiC粒子体積率との関係を示す。SiC粒子体積率の上昇に伴い、両値は減少する傾向にあり、SiC粒子によりマトリックスを強化した場合、靱性および延性値の改善が必要であり、粒子添加量としては10%~20%が適当であることがわかった。

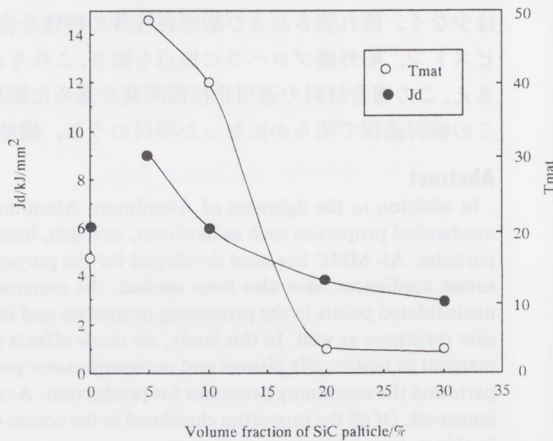


図3 SiCp/アルミニウム合金複合材料の動的破壊靱性値(Jd)およびき裂進展抵抗靱性(Tmat)

3.2 疲れ強さ

強化粒子体積率を10%に設定した金型鑄造材料と金型鑄造鍛造材複合材料(F3K10S)および現状材(AC9B)の疲労試験における応力と繰り返数の関係を図4に示す。鍛造材では疲労特性は格段に向上し高い疲労強度を有しており、高温時においても金型鑄造材をしのぐ疲労特性を示している。これは鍛造による鑄造欠陥の改善およびマトリックスと強化材界面間の強度向上が大きく作用していると考えられる。鑄造材に鍛造を加えることにより疲労強度が大幅に改善されることから、ピストンに使用する場合にはこの工程が最も良いことが明確になった。



### 3.3 衝撃強さ

図5に体積率10% (F3S10S), 20% (F3S20S)のMMCにより鋳造したプロペラおよび各社実機プロペラ (アルミニウム合金製) のシャルピー衝撃吸収エネルギー値を示す。ここで $E_t$ は全吸収エネルギー,  $E_i$ は最大荷重点の公称き裂発生エネルギー,  $E_p$ はその後の公称き裂伝播エネルギーを示す。MMCで試作したプロペラと実機のプロペラを比較するとMMCの衝撃吸収エネルギーは著しく低く, SiCの体積率については他の試験同様20%のほうが衝撃吸収エネルギーは低く靱性が低いことがわかる。この結果よりMMCを実機プロペラとして用いる場合は, 強化材の体積率を低くすると共に製造工程において鋳造欠陥を減少させる等の靱性の改善を図る必要があると考えられる。

図6にマトリックス材 (AC9B), 強化材の体積率が10%の金型鋳造材 (F3K10S) および強化材の体積率が10%の金型鋳造鍛造材 (F3K10S) について, 常温および高温 (250°C) における衝撃吸収エネルギーを示す。常温について各試料の最高荷重点をみると, 金型鋳造鍛造材は他のAC9Bや金型鋳造材に比べ高い値を示し衝撃強さが向上している。また, いずれの材料も常温に比べ高温で衝撃吸収エネルギーは増加し, いずれの場合も, 公称き裂伝播エネルギー ( $E_p$ ) の増加が高く, き裂進展に対する抵抗が向上したものと考えられる。特に金型鋳造鍛造材では他の材料と比較して著しく高い衝撃吸収エネルギーを示しており, この理由としては高温におけるマトリックス材の塑性変形態の増加, 複合材料の界面反応などの影響が少なく界面強度劣化が小さいことが考えられる。金型鋳造鍛造材の衝撃吸収エネルギー増加割合は他の試料と比較して著しく高く, 特に高温状況下においては疲れ強さを含め大変有利な材料であることがわかった。

### 3.4 耐摩耗性

#### 3.4.1 対スリーブ摩耗試験

図7にスリーブ用材料を相手材とし, 周速を変化させたときのMMCと従来 (AC9B) との比摩耗量を比較した結果を示す。この範囲ではMMCは従来材に比べ優れた耐摩耗性を示しており, SiC粒子による相手材への攻撃性も従来材と同レベルであることが判った。試験後の表面観察では, 従来材の摩耗は凝着ではなく, 粗大なSi粒子が脱落し摩耗面間で碎かれ, 研摩砥粒のように働くこ

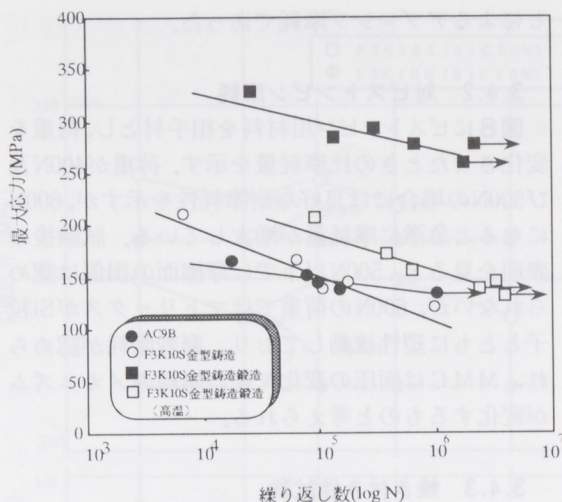


図4 各試料における疲労特性

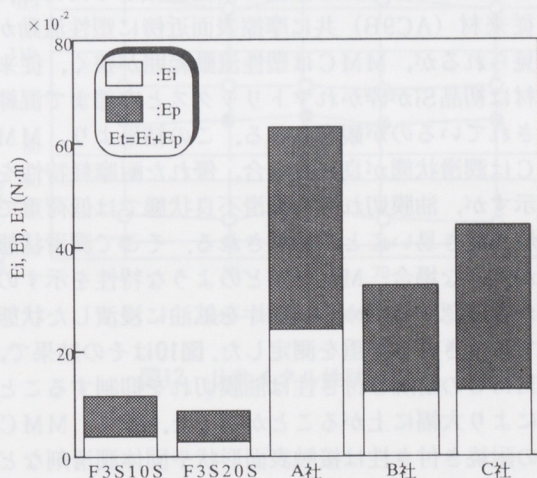


図5 各社実機プロペラの衝撃吸収エネルギー値

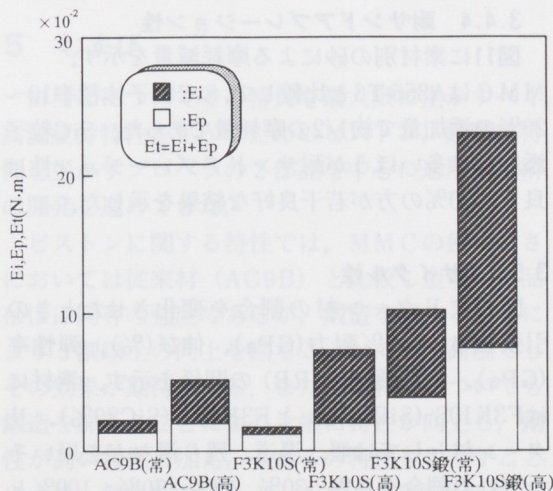


図6 各試料における衝撃吸収エネルギー



とによるアブレシブ摩耗であった。

### 3.4.2 対ピストンピン摩耗

図8にピストンピン用材料を相手材とし、荷重を変化させたときの比摩耗量を示す。荷重が400N及び500Nの場合には良好な耐摩耗性を示すが、600Nになると急激に摩耗量が増大している。試験後の表面を見ると、500N以下では摩擦面の損傷は認められないが、600Nの荷重ではマトリックスがSi粒子とともに塑性流動しており、凝着摩耗が認められ、MMCは面圧の変化に伴い摩耗のメカニズムが変化するものと考えられる。

### 3.4.3 焼き付き性試験

図9に試験片の周速と焼き付きの発生する荷重との関係を示す。摩擦面の断面組織からMMC、従来材（AC9B）共に摩擦表面近傍に塑性流動が見られるが、MMCは塑性流動範囲が狭く、従来材は初晶Siが砕かれマトリックスと内部まで混練されているのが観察される。この結果より、MMCは潤滑状態が良好な場合、優れた耐摩耗特性を示すが、油膜切れ等の潤滑不良状態では低荷重で焼き付き易いことが予想される。そこで潤滑状態が良好な場合、MMCがどのような特性を示すのかを確認するため、試験片を鉱油に浸漬した状態での焼き付き荷重を測定した。図10はその結果で、MMCの耐焼き付き性は油膜切れを抑制することにより大幅に上がることが判った。即ち、MMCの耐焼き付き性は接触表面形状や固体潤滑剤などによる保油性の改善により向上すると思われる。

### 3.4.4 耐サンドアブレーション性

図11に素材別の砂による摩耗減量を示す。MMCはA356-T6と比較して、SiC粒子体積率10～20%の添加量で約1/2の摩耗量であった。SiC粒子添加量が多いほうが耐サンドアブレーション性は良く、20%の方が若干良好な結果を示した。

## 3.5 リサイクル性

図12にリターン材の割合を変化させたときの引張強さ、0.2%耐力(GPa)、伸び(%), 弾性率(GPa)、及び硬さ(HRB)の関係を示す。素材にはF3K10S (SiC10%)とF3K20S (SiC20%)、リターン材としては堰、湯道、残り湯などを用いそれぞれの割合を0%, 30%, 50%, 70%, 100%と変化させ、金型に鋳込み、引張試験片を作製した。

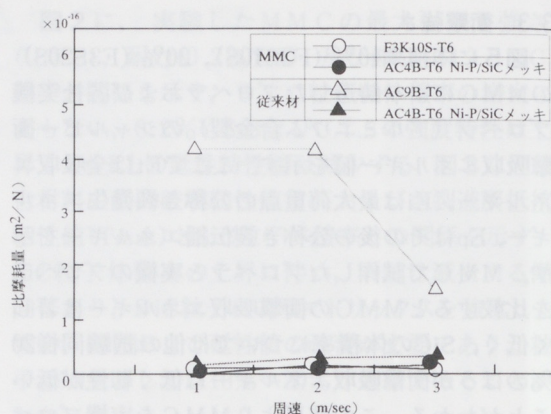


図7 各材料の比摩耗量の比較

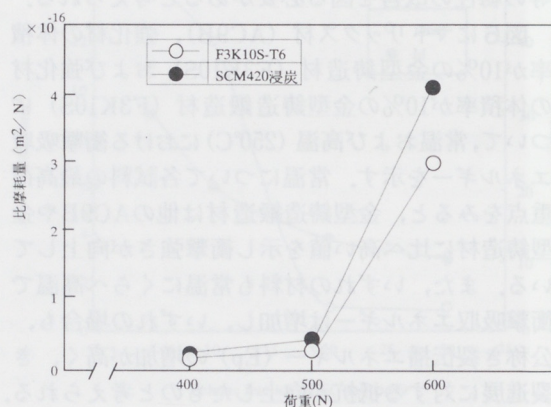


図8 比摩耗量におよぼす荷重の影響

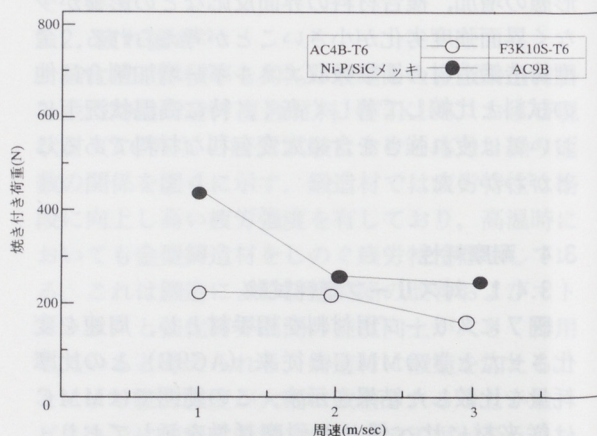


図9 焼き付き荷重に及ぼす周速の影響



この結果、リターン材100%でも新材だけの場合とほとんど特性が変わらないことが明確になった。また組織的にも変化なく、SiC粒子が凝集したような部分も認められなかった。これらの結果からこの材料のリサイクルは可能であると思われる。

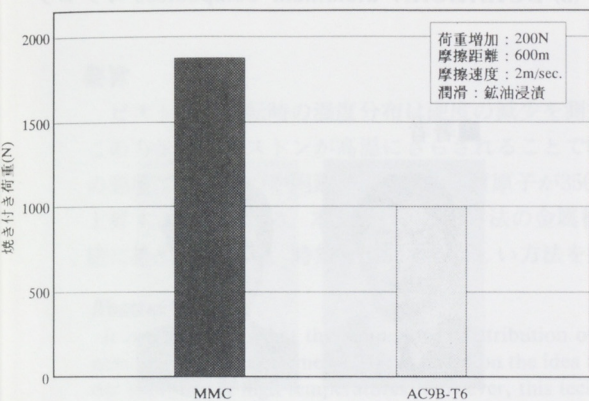


図10 耐焼き付き性評価

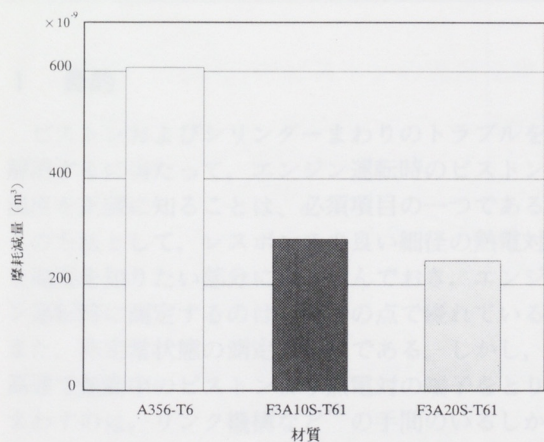


図11 サンドアブレーション試験

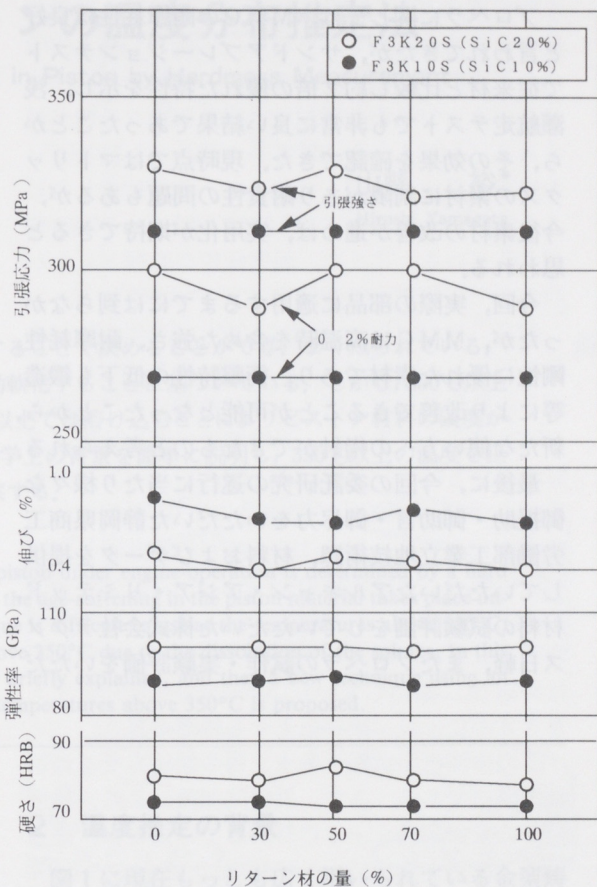


図12 リサイクル性試験

## 5 むすび

MMCについてその特長を最大限に生かすべく、高温疲労特性を生かすためのピストン、耐摩耗特性を生かすプロペラの2部品を中心に適用化技術の開発を進めてきた。

ピストンに関する特性では、MMCの疲れ強さにおいては従来材 (AC9B) と比較し金型鋳造品はほぼ同等の強度であるが、鍛造を加えることにより5割以上の向上を図ることができ、高温でもその効果が期待出来る。また衝撃特性についても鍛造を加えることにより大幅に特性が向上し、剛性が高い特性に加え、これらの特性を生かすことにより、軽量化を図ることができる素材として期待できる。



プロペラに関しては、MMCの耐摩耗性は良好と言われてきたが、サンドアブレーションテストで従来材と比較し約2倍の優れた特性を示し、浅瀬航走テストでも非常に良い結果であったことから、その効果を確認できた。現時点ではマトリックスの素材に制限があり耐食性の問題もあるが、今後素材の改善が進めば、実用化が期待できると思われる。

今回、実際の部品に適用するまでには到らなかったが、MMCは高温時を含めた強さ、耐摩耗性、剛性に優れた素材であり、衝撃特性の低下も鍛造等により改善できることが可能となったことから、新たな使い方への指針ができたものと考えられる。

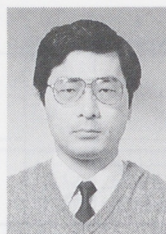
最後に、今回の委託研究の遂行に当たり様々な御援助・御助言・御尽力をいただいた静岡県商工労働部工業立地技術課、材料およびデータを提供していただいたアルキャン・アジア・リミテッド、材料の試験評価をしていただいた株式会社テクノス日軽、またプロペラの試作・実験評価をいた

いた三信工業株式会社の関係者の皆様方に心より御礼申し上げます。

#### ■参考文献

- (1) United States Patent No.4,759,995
- (2) United States Patent No.4,786,467
- (3) DURALCAN aluminum composites カタログ

#### ■著者



芥川 知孝



栗田 洋敬