特 集 号

技術資料

ハイブリッド繊維強化アルミニウム基複合材料の摩耗特性と
自動車エンジンブロックへの応用牛尾 英明*・林 直義*
柴田 一雄*・海老沢賜寿雄**Wear properties of hybrid fiber reinforced aluminum matrix composites and
application to an automotive engine blockHideaki USHIO*, Tadayoshi HAYASHI*
Kazuo SHIBATA* and Masuo EBISAWA**

Alumina short fiber and carbon short fiber reinforced aluminum composites were fabricated by squeeze casting. Tensile and sliding tests and metallography of the composites were carried out. It was revealed that hybrid fiber composites of alumina and carbon fibers had good sliding properties, especially under dry conditions. Crystallinity of the carbon fiber showed important effects to the composite properties. It was revealed that composite engine blocks were of light-weight and high performance compared with other mass-produced engine blocks.

Keywords: alumina fiber, carbon fiber, composites, squeeze casting, engine block.

(Received June 20, 1990)

1. 緒 言

アルミニウム合金にセラミック系の繊維を複合させることにより、耐摩耗性が大幅に向上することは一般によく知られている¹⁾。これは、アルミニウム合金中に分散された硬質の繊維が、もう一方の摺動部材と接触し、アルミニウム合金と直接に接触する部分を少なくすること、およびアルミニウム合金そのものを強化するためによるものと考えられる。

実際の工業用部品への応用を考えたとき、様々の潤滑条件が使用中に考えられるため、繊維の種類やその体積率 Vf (Volume fraction) 等は、上記の各種潤滑条件にて最適な仕様とする必要がある。

本研究は、アルミナ繊維の高硬度、高耐摩耗性と炭素繊維の自己潤滑性に注目し、これらの繊維を混合分散(ハイブリッド)複合化することにより、自動車エンジ

ンのシリンダーボア部の摺動条件に十分耐えられる材料を開発するために行った。

従来、自動車用エンジンブロックとして、鋳鉄材料製、鋳鉄スリーブを具えたアルミニウム合金製、高シリコンアルミニウム合金製が一般的であるが、シリンダーボア部のアルミニウム合金を複合強化により改質することで、耐摩耗性に優れ大幅な軽量化が実現できるエンジンブロックが可能と考えられる。

2. 実験方法

本研究に用いたアルミナ短繊維と炭素短繊維の性質を Table 1 に示した。繊維長さは、繊維長分布のメデアン値が約130 μm となるものをそれぞれ使用した。炭素短繊維は、パン系の炭素繊維を用い、その弾性率を変化させた場合の複合材料特性への影響も調べた。これらの繊維を無機バインダーを含んだ溶液中に分散させ、吸引法

* (株)本田技術研究所栃木研究所 (栃木県)。Tochigi Center, Honda R & D Co., Ltd. (Haga-gun, Tochigi)。

** (株)ホンダエンジニアリング (狭山市)。Honda Engineering Co., Ltd. (Sayama-shi, Saitama)。

Table 1 Fiber materials

	Al ₂ O ₃ F	CF (Pan)
Trade name	ICI Saffil (RG)	TORAY T300
Density (g/cc)	3.4	1.8
Fiber diameter (μm)	3	7
Tensile strength (MPa)	1000	2000~3000
Young's modulus (GPa)	300	200~300

およびプレス加圧にて所定のカサ密度とし、さらに乾燥、焼成を行うことによりプリフォームを作成した。また、エンジンのスリーブ用プリフォームの製造に当たっては、一方向プレス加圧の替わりに、ラバープレスを用いて高精度の円筒プリフォームを作成した。

この円筒プリフォームを Fig. 1 に示す。このように成形した繊維とアルミニウム合金との複合化は、試験片、エンジンブロック共加圧鋳造法により行った^{2),3)}。複合材のマトリックス合金として、JIS 規格 ADC 12 合金を用いた。この成分を Table 2 に示す。鋳造時の金型温度は約250°C、プリフォームの予熱温度は350°Cにて鋳造を行い、加圧圧力は20~30 MPa とした。鋳造後、溶体化と人工時効を実施した後、特性評価を行った。複合材料中の繊維体積率は、鋳造後のプリフォーム変形量と画像解析の両方で確認した。特性評価にあたり、摺動テストは、シリンダーボアとピストンリング、ピストン

Fig. 1 Overview of a preform.

Table 2 Aluminum matrix material

	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Sn	Al
ADC12 (wt%)	1.5 ~3.5	9.6 ~12	<0.3	<1.0	<1.3	<0.5	<0.5	<0.3	Bal.

の組合わせを考え、それぞれの材料組合わせにてチップオンディスク法で行った。ピストンリング材料として表面をちっ化処理した AISI420 鋼、ピストン材料として、鉄めっきを施した AC8C 合金を用いた。テスト条件は、エンジンのシリンダーボア部の Fig. 2 に示す部分の条件を代表的なものとし、これにエンジン始動時の最悪条件を考えた無潤滑条件を加えた、Table 3 に示す条件を設定し、テストを行った。このとき、試験片の初期摺動面を研磨しておき、きず付き限界は摺動面の表面に微妙なきずが観察できる面圧限界を、焼付き限界は摩擦係数 μ の立上りより、摩擦特性はチップの摩耗量より評価した。この摺動装置を Fig. 3、試験片を Fig. 4 に示す。金属組織観察は光学顕微鏡により行い、引張試験片の破面を SEM にて観察した。また、この改質された複合材スリーブを持つエンジンブロック (Fig. 5) を使用し、実際のエンジンにて、台上耐久テストと実走テストを行い、他の材料より構成されるブロックと耐摩性等について比較した。

Table 3 Sliding test condition

Condition	E	A	B	P
Stress P (kgf/cm ²)	20	65	40	30
Velocity V (m/s)	2.5	2.5	20	12.5
Oil film thickness t (μm)	—	0.2~0.5	≈2.0	0.2~0.5

Fig. 2 Actual conditions of piston-ring-bore slidings.

Fig. 3 Chip-on-disk type sliding tester.

Fig. 4 Test pieces for the sliding test.

Fig. 5 Overview of an MMC engine block.

3. 実験結果

3.1 強度特性

本実験に用いたテストピースの代表的金属組織を Fig. 6 に示す。また、繊維強化複合部以外の金属部は、Fig. 7 のごとくなっている。Fig. 8 に得られた複合材料の室温での引張り強さを示した。複合材料の強度は、アルミナ繊維単一の場合、マトリックス合金の強度より若干向上する傾向がある。アルミナ繊維と炭素繊維をハイブリッド化し複合させた場合の、アルミナ繊維体積率の複合材強度への影響は、炭素繊維量が3~6%と少ないとき、強度への影響は少ないが、炭素繊維量が6%以上になるとアルミナ繊維の体積率の増加に伴い強度は低下する。一方、炭素繊維については、アルミナ繊維が同一量るとき、体積率増加に従って複合材強度は大きく低下していく。特に炭素繊維体積率約10%以上でこの傾向は顕著となっている。破断面のSEM写真をFig. 9に示す。この写真にてわかるようにアルミナ繊維とアルミニウム合金との密着性は良好であるのに対して、炭素繊維とアルミニウム合金とは密着性がよくないと考えられる。

炭素繊維の結晶化度が、複合材料強度に与える影響を確認した結果を Fig. 10 に示す。このテストでは、アルミナ繊維、炭素繊維の体積率をそれぞれ12%、9%とした。炭素繊維の結晶化率が高い繊維はヤング率が高くなるが、複合材としての強度は低下している。これは、結

Fig. 6 Microstructure of a hybrid composite (Vf=12% alumina+9% carbon).

Fig. 7 Microstructure of the aluminum matrix: ADC12.

Fig. 8 Effect of fiber volume fraction on the tensile strength of hybrid MMCs.

晶化率の増加による繊維強度の低下と、炭素繊維とアルミニウム合金との界面の強度低下が原因と考えられる。

3.2 摺動特性

アルミナ繊維と炭素繊維を複合したハイブリッド複合

Fig. 9 Fracture surface of a hybrid MMC.

Fig. 10 Effect of CF Young's modulus on the strength of MMCs.

材で、繊維体積率を変えた場合の焼付き限界ときず付き限界を Fig. 11 に示す。繊維体積率の増加に伴い、焼付き限界、きず付き限界共向上する。きず付き限界特性では、添加する繊維の体積率に対する特性向上は炭素繊維とアルミナ繊維とは同じ程度であるが、焼付き限界特性では、繊維体積率に対する特性向上は炭素繊維の方がアルミナ繊維より大きい。

境界潤滑条件下 A では、摩耗特性は Fig. 12 に示すように繊維体積率の増加に伴い、複合材の摩耗量は減少し、その反面、相手摺動部材の摩耗量は増加する。アルミナ繊維のみの場合やアルミナ繊維の体積率を同一にして炭素繊維の体積率を変化させた場合は、同じような変化傾向を示す。このことにより、アルミナ繊維、炭素繊維の体積率変化の耐摩耗特性に対する寄与度は同程度と考えられる。さらに潤滑油膜が厚く摺動速度が速い B 条件では、Fig. 13 に示すごとく繊維体積率の摩耗量に対する影響は小さい。

3.3 エンジンブロックによる耐久性

上に述べたテスト結果が得られたことより、アルミナ

Fig. 11 Effect of fiber volume fraction on seizure and scratch limits of MMCs.

Fig. 12 Effect of fiber volume fraction on wear of MMCs and AISI420 (condition A).

繊維と炭素繊維から成る同筒形ブリフォームを、加圧鋳造法により、スリーブ部の内面より約 2 mm の厚さでハイブリッド複合強化したエンジンブロックを製作した。この摺動部を改質したエンジンブロックとちっ化処理ピストンリング、鉄めっきしたピストンを用いて、実際にエンジンを運転し、その耐久性を確認し、従来エンジンブロックと比較した。耐久性として以下の項目に注目した。

- (i) スリーブ部の上死点位置の摩耗
- (ii) トップピストンリングの摩耗
- (iii) シリンダーボアの変形

テストは、直列 4 気筒の 1958cc 無鉛ガソリン仕様エンジンで行った。台上テストと実走テストでは摩耗量の差はあるものの、各仕様間の摩耗量の相対的差異は、ほぼ

Fig. 13 Effect of fiber volume fraction on wear of MMCs and AISI420 (condition B).

同じであった。実走テストの結果を Fig. 14 に示す。ハイブリッド複合材のシリンダーボアの上死点での摩耗量は、過共晶シリコンアルミニウム合金製のシリンダーボアよりも少なく、铸铁スリーブと同等である。また、相手摺動材であるちっ化ビストンリングの摩耗量は過共晶シリコン合金ボアの場合が最も大きく、複合材シリンダーボアと铸铁スリーブは同等の摩耗量となっている。過共晶シリコンアルミニウム合金の場合、ボアとピストンリング共に摩耗量が大きくなっているのは、発生した摩耗粉が研磨剤として働き、摩耗を促進させていると考えられる。

シリンダーボアの耐久テスト後の変形については、変形量のパラメーターとしてクランク軸方向のボア直径(X)とその垂直方向のボア直径(Y)との差の絶対値 $|X-Y|$ で評価することにした。実走テスト後のハイブリッド複合材のシリンダーの変形は、過共晶シリコンアルミニウム合金製シリンダーとはほぼ同程度で、铸铁スリーブを铸込んだシリンダーに対しきわめて小さいことがわかった。ボア変形が小さいことは、ピストンリングがボア表面を摺動するとき、シール性がよくなる効果があり、エンジンの機能に大きく影響する。これは、ハイブリッド複合材、過共晶シリコン材共にシリンダーボアとブロック本体が一体となっているため、エンジン製造後の運転で、熱が加わっても、铸铁スリーブ铸込みエンジンブロックのような、铸造時や加工時に発生する残留ひずみの解放がないためと考えられる。

また、ハイブリッド複合材エンジンブロックは、エンジンの機能としての出力特性、オイル消費等についても、テスト初期と耐久後で、変化はほとんどみられなかった。

● A50,000 MILE FLEET DURABILITY TEST

	Cylinder bore wear (μm)	Piston-ring wear (μm)	Cylinder deformation (μm)
	0 10 20	0 10 20	0 10 20
MMC * block engine	☐	☐	☐
Hypereutectic Al-Si block engine	☐	☐	☐
Cast-iron liner block engine	☐	☐	☐

• TEST ENGINE: IN-LINE, FOUR (4)
CYLINDER ENGINE 1958 cc

* Fiber volume fraction of MMC cylinder bores is 12% $\text{Al}_2\text{O}_3\text{F}$ and 9% CF

● MAX. TEMPERATURE

[MMC ENGINE BLOCK]—[AL ENGINE BLOCK WITH CAST-IRON LINERS] $\approx -10^\circ\text{C}$

Fig. 14 Engine evaluation test results.

4. 考 察

炭素繊維とアルミニウム合金のぬれ性が悪いことは、一般によく知られているが^{4)~6)}、本研究においても炭素繊維の添加による複合材の強度低下が確認された。特に、炭素繊維の体積率が、10%を超えると複合材の強度が急激に低下している。これは、体積率が増加し、界面の密着性がよくない炭素繊維の繊維間の距離が近くなり、切欠き効果が大きくなったためと考えられる。

摺動特性を考えた場合、自動車のごとく各種環境下でいろいろな使われ方をする製品では、無潤滑条件が存在し、無潤滑条件下では炭素繊維の効果は大きい。これらの結果より、繊維の配合比については、上記の特性を考慮し、アルミナ繊維を主体に炭素繊維をアルミナ繊維の1/2程度の割合とすべきと考える。

実際のエンジンを用いたテストで確認した摩耗量と、チップオンディスク装置を用いたテストピース摩耗量では、絶対値は大きく異なるものの、材料の組み合わせ間の相対的な比較は十分可能であり、設定した代表条件は評価条件として妥当であることが確認できた。また、耐久テスト後の燃焼室周りのハイブリッド複合材部において、燃焼熱によるアルミニウム合金と炭素繊維間の反応によるアルミニウムカーバイドの生成が懸念されたが、耐久テスト後の解析では、生成物は確認されず、水冷エンジンの燃焼室程度の温度(測温テストでは 200°C ~ 250°C)では、今回使用したバン系炭素繊維とアルミニウム合金の反応はほとんど起こっていないものと考えられる。

5. 結 言

アルミナ短繊維と炭素短繊維を混合したハイブリッド複合材料を、加圧鋳造法により製造し、その複合材料の特性を調べ、また自動車用のシリンダーブロックのボア部にこの材料を使用することにより、次のようなことが明らかになった。

(1) アルミナ繊維と炭素繊維を比較した場合、炭素繊維とアルミニウムマトリックス合金との界面強度が低いため、炭素繊維の体積率を10%以下にすることが、大幅な強度低下を防止するため望ましい。

(2) 炭素繊維は、高弾性仕様より高強度仕様の方が、ハイブリッド複合材の強度特性上好ましい。

(3) 炭素繊維は、アルミナ繊維に対し、耐摩耗性において同等の効果を示すが、無潤滑条件下での焼付き限界の向上に対しては、アルミナ繊維より大きな効果がみら

れる。

(4) このハイブリッド複合材をエンジンブロックシリンダーボアに用い、表面を改質することにより、耐久性に優れるエンジンブロックが実現でき、現在一般に使用されている鋳鉄ライナー入りエンジンブロックに対し、軽量化が期待できる。

参 考 文 献

- 1) Y. Fuwa et al: Proceedings of the JSLE International Tribology Conference, July 8-10, (1985), 257.
- 2) 大中逸雄: 鋳物, **60** (1988), 292.
- 3) 福永秀春: 軽金属, **38** (1988), 740.
- 4) P. W. Jackson: ASM Metals Quarterly, Aug, (1969), 22.
- 5) G. J. Blankenburgs: J. Australian Inst. Metals, **14** (1969), 236.
- 6) 坂本昭: 金属, **2** (1989), 4.