自動車エンジンのピストンの強化材として使用される
金属基複合材料の材料特性*岡 本 伸 吾^{*1}, 滝 政 信^{*2}
萩 原 多 津 美^{*3}, 府 山 伸 行^{*4}Material Properties on Metal Matrix Composite Used as
Reinforcement for Pistons of Engines in AutomobilesShingo OKAMOTO^{*5}, Masanobu TAKI,
Tatsumi HAGIHARA and Nobuyuki FUYAMA^{*5} Department of Mechanical System Engineering, Hiroshima University,
1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima-shi, Hiroshima, 739-8527 Japan

The purpose of this study is to ascertain the material properties of metal matrix composite (MMC) that is used to reinforce pistons of automobile engines. The MMC investigated in the present study consisted of metal fibers ($\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{20}\text{Si}_5$) in an aluminum alloy matrix (AC8A). Tensile tests were performed on 100%-AC8A and MMC at temperatures of 25°C, 150°C, 250°C and 300°C. The stresses and strains of the test samples were measured; their yield stresses, Young's moduli and tensile strengths were also determined from the experimental results.

Key Words: Metal Matrix Composite, MMC, Piston, Tensile Test, Material Quality

1. 緒 言

金属基複合材料 (Metal Matrix Composite: MMC) は、従来の金属材料と比べて高比弾性、高比強度化させることができるので、航空、宇宙、自動車等のさまざまな分野で高温構造用材料として期待されている。自動車のエンジンについても、従来のエンジンのピストンは、一般に、AC8A アルミニウム合金で作られているが、燃料が燃焼するときにピストンは高温下で大きな力を受けるので、ピストンに亀裂が生じる場合がある。そこで、本研究は、ピストンの一部分に MMC を用いてピストンを強化することを目的としている。

本研究では、AC8A のマトリックスに強化材として $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{20}\text{Si}_5$ の金属繊維を複合させた MMC を対象にしているが、AC8A がマトリックスとして使用された MMC については、従来、以下のような研究がなされている。M.FUJINE ら⁽¹⁾ は、AC8A および AC9A のマトリックスに、ほう酸 Al ウィスカおよび長繊維炭素を複合させた MMC を、ガス圧含浸法により製作し、材

料組織、引張強さおよび摩耗性におよぼす含浸保持時間と金型温度の影響について調べた。Y.KUROKI ら⁽²⁾ は、マトリックスが AC8A および AC9A の MMC について、金型および溶湯の温度を変えて、ガス圧含浸法により MMC を作成し、作成した試験片の引張試験を行い、MMC の機械的性質におよぼす製造諸因子の影響について調べた。H.W.NAM ら⁽³⁾ は、アルミナ繊維と炭素繊維が 15%(体積) 含まれた MMC を圧搾キャスティング法で成形し、作成した試験片について引張試験と振動試験を行い、MMC の引張破壊強度と弾性係数を測定するとともに、低速衝撃試験を行い動的挙動について調べた。しかし、本研究で対象としている、AC8A のマトリックスに、 $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{20}\text{Si}_5$ の金属繊維を複合させた MMC の材料特性はまだ明らかにされていない。

そこで、本研究では、AC8A のマトリックスに、体積含有率が異なる $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{20}\text{Si}_5$ の金属繊維を複合させた MMC の試験片を作成し、異なる温度条件下で引張試験を行い、MMC の機械的性質を明らかにした⁽⁴⁾。

2. 試 験 片

試験片としては、MMC のマトリックスとなる AC8A が 100 % の AC8A 単体の試験片と、AC8A のマトリックスに、体積含有率 (V_f) が 15 %, 20 %, 25 % の金属繊維 $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{20}\text{Si}_5$ を複合させた MMC の試験片を作成した。MMC の製作工程を以下に説明する。

* 原稿受付 2006 年 6 月 19 日。

^{*1} 正員、広島大学大学院工学研究科 (〒739-8527 広島市鏡山 1-4-1)。^{*2} 広島大学大学院工学研究科。^{*3} コルベンシュミット(株) (〒739-2124 東広島市高屋町郷 660-1)。^{*4} 広島県立西部工業技術センター (〒737-0004 呉市阿賀南 2-10-1)。

E-mail: sokamoto@hiroshima-u.ac.jp

[MMCの製作工程]

(1) まず最初に, $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{20}\text{Si}_5$ の金属繊維 (繊維の直径: $30\sim 50\ \mu\text{m}$, 繊維の長さ: $4\sim 200\ \text{mm}$, ヤング率: $190\ \text{GPa}$ (常温), 破壊強度 $950\ \text{GPa}$ (常温), 破壊伸び率: 95% (常温), 熱膨張係数: $11.5\times 10^{-6}\ \text{K}^{-1}$) を $1\sim 2\ \text{mm}$ 程度の厚さにプレス加工し, それを必要な厚さまで積層してプレス成形し, 最後にプレスカットを行って立方体のプリフォーム (長さ: $80\ \text{mm}$, 幅: $60\ \text{mm}$, 厚さ: $25\ \text{mm}$) を作成する. (2) 高圧鑄造容器に入れたプリフォームを $425\ ^\circ\text{C}$ に予熱し, $750\ ^\circ\text{C}$ に溶融した AC8A を鑄造容器に流し込み, $3,000\ \text{KN}$ の圧力をかけた状態で自然冷却して MMC を作成する. (3) 作成した MMC を, $500\ ^\circ\text{C}$ で 5 時間加熱した後, 常温の水に入れて急冷し, 溶体化処理を行う.

以上の方法で製作した MMC のプリフォームおよび AC8A 単体の材料から, 図 1 に示す寸法・形状の試験片を作成した.

Fig. 1 Dimensions of test pieces used on tensile test.

3. 実験方法

材料試験機 (AG-25TA: 島津製作所) を用いて, 作成した試験片の引張試験を行った. 試験片の側面の中央部の相面する 2 カ所にひずみゲージを貼り付け, 各荷重ごとの, 負荷方向のひずみを測定した. なお, ひずみの値としては, 2 カ所のひずみゲージの平均値を用いた. また, 試験片の雰囲気温度としては, $25\ ^\circ\text{C}$, $150\ ^\circ\text{C}$, $250\ ^\circ\text{C}$, $300\ ^\circ\text{C}$ の四種類の温度条件下で試験を行った. また, 引張試験のクロスヘッド (試験片の取り付け治具) の移動速度は, $0.5\ \text{mm/分}$ とした.

4. 結果

AC8A 単体の試験片の引張試験によって求められた応力-ひずみ線図を図 2 に示す. 試験片に大きな荷重が

加わり試験片の変形が大きくなると, 試験片に貼り付けていたひずみゲージは剥がれたり損傷する. 従って, 応力-ひずみ線図のデータは, ひずみゲージが損傷するまでの, つまり, ひずみゲージが正常に動作したときの値のみが示されている. また, 図中の各印 ($\circ$, $\square$, $\diamond$, $\triangle$) は, $25\ ^\circ\text{C}$ (5 本), $150\ ^\circ\text{C}$ (3 本), $250\ ^\circ\text{C}$ (5 本), $300\ ^\circ\text{C}$ (3 本) の各温度における実験結果を表している. 図中の各曲線は実験値をもとに最小自乗法によって求めた直線と曲線である. なお, ひずみが零から比較的小さい領域では, 応力とひずみの関係を直線で近似し, 近似した直線にデータが載らなくなった領域は曲線で近似した. また, 求めた直線と曲線の交点における応力を降伏応力とした. 図 2 より, 同じ応力に対して温度が高くなるにつれてひずみは大きくなった.

Fig. 2 Stress-strain diagram of AC8A on tensile test.

Fig. 3 Stress-strain diagram of MMC including metal fiber of $V_f=15\%$ on tensile test.

Fig. 4 Stress-strain diagram of MMC including metal fiber of $V_f=20\%$ on tensile test.

Fig. 5 Stress-strain diagram of MMC including metal fiber of $V_f=25\%$ on tensile test.

Fig. 6 Relationship between Yield stress and volume fraction of metal fiber.

Fig. 7 Relationship between Young's modulus and volume fraction of metal fiber.

Fig. 8 Relationship between tensile strength and volume fraction of metal fiber.

これより、温度が高くなるにつれてAC8Aは軟化することが分かった。

図3は金属繊維 $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{20}\text{Si}_5$ の体積含有率 (V_f) が15%の応力-ひずみ線図 (25°C (2本), 300°C (3本)) を、図4は V_f が20%の応力-ひずみ線図 (25°C (2本), 150°C (2本), 250°C (3本), 300°C (2本)) を、図5は V_f が25%の応力-ひずみ線図 (25°C (2本), 300°C (3本)) を示している。いずれの場合も、AC8Aと同様に温度が高くなるにつれてMMCは軟化することが分かった。

図2から図5に示した応力-ひずみ線図から求めた降伏応力 (σ_y) と $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{20}\text{Si}_5$ の V_f との関係を図6に示す。温度が150°C, 250°C, 300°Cの高温では、各温度において、AC8A単体もMMCも、 $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{20}\text{Si}_5$ の V_f に関わらず σ_y は、ほぼ同じ値であった。一方、

温度が 25℃の常温では, MMC の σ_y の値は AC8A 単体の σ_y より小さくなった. また 25℃では, V_f が大きくなるにつれて σ_y は大きくなった. 図 2 から図 5 に示した応力-ひずみ線図において, 応力が零から降伏応力に達するまでの実験値を用いてヤング率 (E) を求めた. その結果を図 7 に示す. 図 7 より, いずれの温度においても, V_f が大きくなるにつれて E は大きくなることが分かった.

引張強度 (σ_B) と金属繊維の体積含有率との関係を図 8 に示す. 温度が 25℃の常温では, MMC の σ_B の値は AC8A 単体の σ_B より小さかった. また, V_f が大きくなるにつれて σ_B は大きくなった. 一方, 温度が 150℃, 250℃, 300℃の高温では, 各温度において, V_f が大きくなるにつれて σ_B は大きくなった.

5. 結 言

MMC のマトリックスとして使用する AC8A アルミニウム合金が 100%の AC8A 単体の試験片および AC8A のマトリックスに $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{20}\text{Si}_5$ の金属繊維を 15%, 20%, 25%複合させた MMC の試験片を用いて, 25℃, 150℃, 250℃, 300℃の温度条件下で引張試験を行った結果, 以下のことが明らかになった.

- (1) AC8A も MMC も温度が高くなるにつれて軟化する.
- (2) いずれの温度においても, 金属繊維の体積含有率が大きくなるにつれてヤング率は大きくなった.
- (3) 150℃, 250℃, 300℃の高温では, MMC の引張強度は AC8A 単体の引張強度よりも大きくなる.

文 献

- (1) M.FUJINE and J.OKIJIMA, Development of Aluminum MMC Hub for Crankshaft Damper Pulley (written in Japanese), *Proceedings of Annual Congress of Society of Automotive Engineers of Japan*, **Vol.1, No.924** (1992), 101-104.
- (2) Y.KUROKI, S.KURODA, N.YUZUKI and T.TANAKA, Mechanical properties and process parameters effects on MMC produced by gas-pressure infiltration (written in Japanese), *Proceedings of Academic Conference of the Japan Institute of Light Metals conference*, **Vol.86** (1994), 21-22.
- (3) H.W.NAM, S.K.HAN, G.A.AGGAG and K.TAKAHASHI, The dynamic behavior of metal-matrix composites under low-velocity impact (written in Japanese), *Compos. Sci. Technol.*, **Vol.60, No.6** (2000), 817-823.
- (4) M.TAKI, S.OKAMOTO, T.HAGIWARA, T.TADOKORO and N.FUYAMA, Material Qualities on Fiber Reinforced Metal Used as Reinforcement for Pistons of Engines in Automobiles (written in Japanese), *Proceedings of JSME Academic Conference*, **Vol.1** (2004), 315-316.