

# 金型材料の複合化による高性能化技術

メカニクス系工学専攻 准教授 浅野 和典

## 1. 緒言

アルミニウムは軽量で、耐食性、熱伝導性、加工性、審美性などに優れていること、また合金化・熱処理などによって強度や硬度の上昇も可能であることから、試作用金型やブロー成形用金型などに用いられている。しかし鉄鋼材料などに比べて高温強度や剛性・耐摩耗性に劣る、熱膨張係数が大きいなどの理由により、射出成形用金型などの高温・高圧下での使用は困難である。アルミニウム合金のこれら諸性質を改善する手法として注目されている手法の一つとして、セラミックス繊維などの複合化が挙げられる。強化材として用いられるセラミックスには種々の性質のものが存在し、求められる特性やアルミニウム合金との複合化の容易さ、コストなどにあわせて使い分けられる。射出成形用金型材料に求められる常温および高温強度、剛性、硬度、熱膨張および熱伝導特性、耐摩耗性といった性質もこの複合化によって可能になることが期待できるが、金型材料への適用を考慮し、その特性を系統的に調べた報告はきわめて少ない。

本研究では、金型の熱交換能力と耐摩耗性の向上を図るためにピッチ系炭素繊維を、また金型の寸法精密化、高強度化・高剛性化を図るためにチタン酸カリウム短繊維をそれぞれ強化材に用いたアルミニウム合金複合材料を作製し、これらの諸性質を明らかにすることで、従来見落とされがちであった、金型素材の材質改善の観点から射出成形の生産性向上を考えるための知見を得ることを目的とする。

## 2. 複合材料の作製とその諸特性

### 2.1 ピッチ系炭素繊維強化アルミニウム合金複合材料の諸特性

マトリックスには JIS-AC8A アルミニウム合金 (Al-Si-Cu-Ni-Mg 系合金) を用いた。強化材にはピッチ系炭素短繊維を使用した。炭素繊維の諸特性を Table 1 に示す。まずシリカバインダと繊維を蒸留水と混合・加圧成形し、大気中で 458 K で 2 時間乾燥させてプリフォーム (予備成形体) を作製した。このプリフォームに AC8A 溶湯を加圧含浸させて複合化を行った。複合材料の繊維体積率は 30 および 40 vol% とした。Fig. 1 に作製した複合材料 (30 vol%) の顕微鏡組織を示す。炭素繊維 (写真中の黒色相) はランダムに配向していることがわかる。

複合材料からピン試験片 ( $\phi 5 \times 15$  mm) を切り出し、熱膨張計を用いて 310~780 K の範囲で膨張-収縮曲線を求め、平均線熱膨張係数を算出した。また複合材料からディスク試験片 ( $\phi 10 \times 1.5$  mm) を切り出し、レーザフラッシュ法熱定数測定装置を用いて室温における熱拡散率を測定し、別に求めた密度と比熱の値を積

Table 1 Properties of carbon fiber

Density (Mg / m <sup>3</sup> )	Diameter (μm)	Length (μm)	Thermal Conductivity (W/m · K)	Coefficient of Thermal Expansion (×10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )
2.2	10	193	629	-1.5

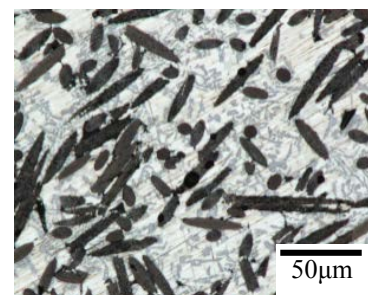


Fig. 1 Optical micrograph of a carbon fiber-reinforced composite (30 vol%).

算して熱伝導率を算出した. Fig. 2 に AC8A および複合材料の各温度間における平均線膨張係数を示す. いずれの温度においても, 炭素繊維の複合化により平均線膨張係数は低下することがわかる. これらの値は, Shi の式<sup>1)</sup>を用いた計算によりおよそ予測できることがわかった. Fig. 3 に AC8A および複合材料の熱伝導率を示す. 炭素繊維の複合化により熱伝導率は上昇した. 複合化による熱伝導率の上昇量は加算則 (複合則) で得られる値に比べて小さいものの, 繊維体積率が 40 vol% の複合材料の熱伝導率は純アルミニウムのそれ (238 W/(m・K)<sup>2)</sup>に近い値が得られた.

複合材料からピン試験片(φ5×15 mm)を切り出し, SUJ-2 ディスク試験片を相手材として組み合わせ, 室温でピンオンディスク方式による摩擦試験を行った. 摩擦速度 (v) は 0.3 m/s および 3.0 m/s, 押付け荷重は 19.6 N として, 摩擦距離 1000 m までの試験片の摩擦量と摩擦試験中の摩擦係数を測定した. Fig. 4 に AC8A および複合材料 (30 vol%) の摩擦距離と摩擦量の関係を示す. 炭素繊維との複合化により, AC8A の摩擦量は大きく減少することがわかる. また Fig. 5 に AC8A および複合材料 (30 vol%) の摩擦試験中における摩擦係数を示す. 図中のエラーバーは摩擦係数値の変動幅を示している. いずれの摩擦速度においても摩擦係数の変動幅が炭素繊維の複合化によって小さくなることをわかる.

なお, 相手材の摩擦量も複合材料と組み合わせさせた場合の方が少なかった. 相手材の摩擦面を観察すると, AC8A と組み合わせさせた場合には AC8A の凝着や溶着が見られたが, 複合材料と組み合わせさせた場合はそれが少なかった. これらの結果から, 複合化により合金の摩擦量が減少したのは, 摩擦試験により破碎した炭素繊維が摩擦面に残留し, 固体潤滑剤の役割を果たしたためと考えた.

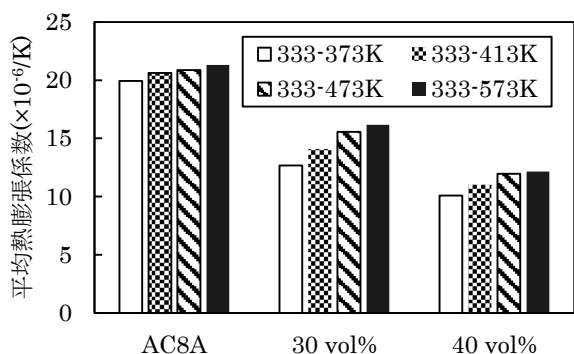


Fig. 2 Average coefficient of thermal expansion of AC8A alloy and composites.

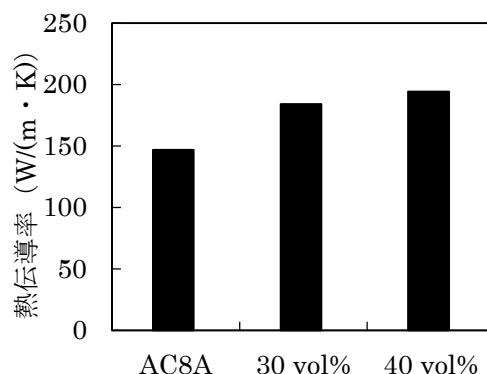


Fig. 3 Thermal conductivity of AC8A alloy and composites at room temperature.

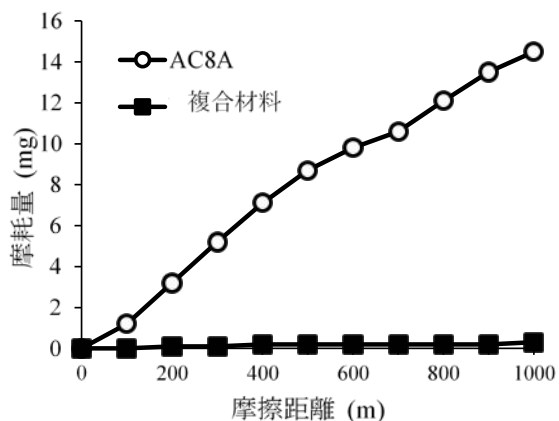


Fig. 4 Relationship between wear loss and sliding distance of AC8A alloy and composites(30 vol%) (v = 0.3 m/s).

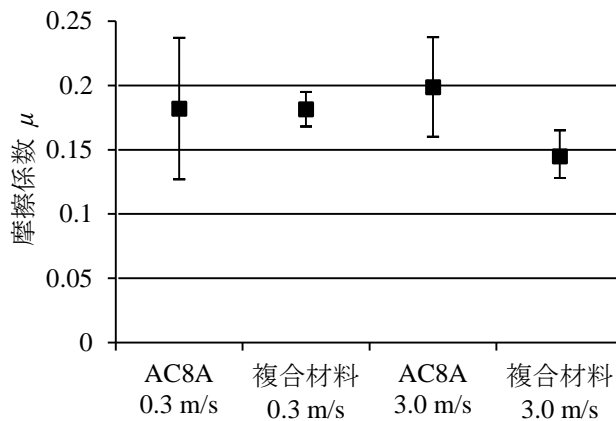


Fig. 5 Coefficient of friction of AC8A alloy and composite(30 vol%) under wear test.

また射出成形金型への適用を想定し、耐ヒートチェック性の評価を行った。試験片（ $\phi 13 \times 12$  mm）を赤外線イメージ加熱炉を用いて急速加熱させ、673K 保定後に急速冷却、の工程を 100 回繰り返した。試験前後の複合材料試験片（30 vol%）の外観を Fig. 6 に示す。試験片表面にはヒートチェックによるクラック等は観察されなかった。

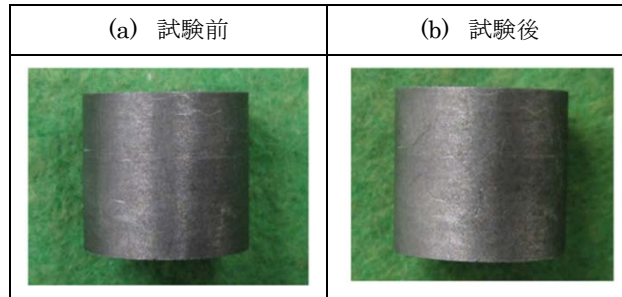


Fig. 6 Appearance of composite test piece (30 vol%) (a) before and (b) after heat-checking test.

## 2.2 チタン酸カリウム短繊維強化アルミニウム合金複合材料の諸特性

強化材にはチタン酸カリウム短繊維を用いた。短繊維の諸特性を Table 2 に示す。マトリックス、複合化方法・条件は炭素繊維を強化材とした場合（2-1）と同じとし、複合材料中の繊維体積率は 25 vol% および 45 vol% とした。Fig. 7 に作製した複合材料の顕微鏡組織（25 vol%）を示す。チタン酸カリウム短繊維（写真中の暗色相）はランダムに配向していることがわかる。

複合材料から切り出した円柱状試験片（ $\phi 8 \times 12$  mm）を用いて室温と 523 K で圧縮試験を行い、弾性係数と 0.2 % 耐力を求めた。Fig. 8 に AC8A および複合材料の室温および 523K における縦弾性係数を示す。いずれの温度においても繊維の複合化により合金の縦弾性係数が上昇していることがわかる。

Fig. 9 に AC8A および複合材料の室温および 523K における 0.2 % 耐力を示す。いずれの温度においても繊維の複合化により合金の耐力が上昇していることがわかる。

Fig. 10 に AC8A および複合材料の 333 K- 373 K 間における平均線膨張係数を示す。繊維の複合化により平均線膨張係数は低下することがわかる。また Fig. 11 に AC8A および複合材料の熱伝導率を示したが、繊維の複合化により熱伝導率は上昇することがわかった。

また 2-1 と同条件で耐ヒートチェック性の評価を行ったが、複合材料試験片表面にはヒートチェックによるクラック等は観察されなかった。

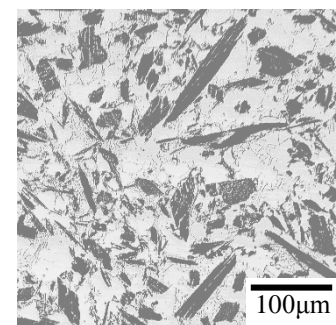


Fig. 7 Optical micrograph of a potassium titanate fiber-reinforced composite (25 vol%).

Table 2 Properties of potassium titanate fiber.

Density (Mg / m <sup>3</sup> )	Diameter (μm)	Length (μm)	Vickers hardness	Thermal Conductivity (W/(m · K))	Coefficient of Thermal Expansion (×10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	Elastic modulus (GPa)
3.5	13	65	250	1.7	6.8	280

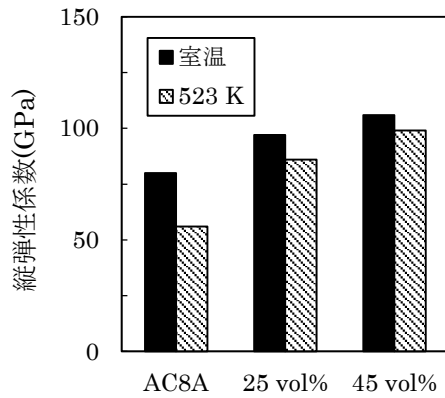


Fig. 8 Young's moduli of AC8A alloy and composites.

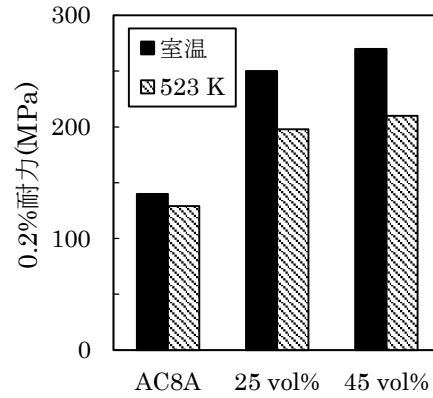


Fig. 9 0.2% proof stress of AC8A alloy and composites.

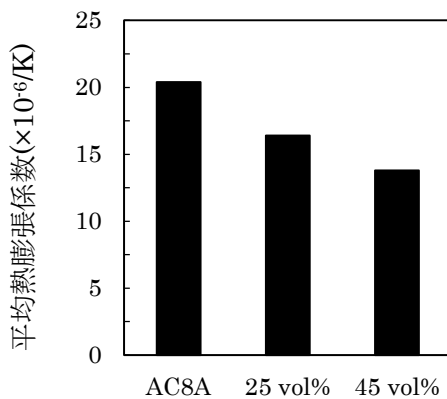


Fig. 10 Average coefficient of thermal expansion between 333K and 373K of AC8A alloy and composites.

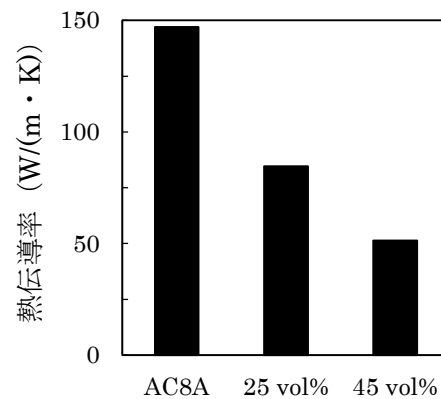


Fig. 11 Thermal conductivity of AC8A alloy and composites at room temperature.

### 3. 結言

アルミニウム合金とセラミックス繊維の複合材料を作製し、その組織解析や特性調査を行った。いずれの強化材を用いた場合も、アルミニウム合金が持つ軽量性を保持しながら、複合化によってアルミニウムの低熱膨張化が行われた。これに加え、ピッチ系炭素短繊維の複合化により、純アルミニウムに近い高い熱伝導率が得られるとともに、耐摩耗性が著しく向上した。チタン酸カリウム短繊維の複合化により、高強度化・高剛性化を達成するとともに、熱伝導率が小さくなった。

低熱膨張化は金型の寸法精密化、高硬度化・高剛性化と耐摩耗性向上は金型の寿命向上に寄与すると考える。また金型材料の高熱伝導化は熱交換能力の向上（生産性の向上）に、低熱伝導化はキャビティ内の保温効果の増大につながると考える。強化材の種類や体積率などを制御することで、求められる特性に応じた金型材料の作製が可能である。

### 4. 参考文献

- [1] H. Li, Z. Li, L. Qi and H. Oy, "Effect of extrusion on the thermal expansion behavior of Al<sub>18</sub>B<sub>4</sub>O<sub>33</sub> whisker-Mg composites", Scripta Materialia. Vol. 61, pp.512–515 (2009).
- [2] 日本金属学会編, 金属データブック, 丸善 (1974), p.12.