黒鉛分散した過共晶 Al-23%Si-6%Cu-1%Mg 合金 複合材の摺動特性

菅藤 昭良*・田上 道弘**
白坂 康弘*・小田 裕介*

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 52, No. 8 (2002), pp. 365-370

Sliding properties of hypereutectic Al-23%Si-6%Cu-1%Mg alloy composites containing dispersed graphite

Akira SUGAFUJI*, Michihiro TAGAMI**
Yasuhiro SHIRASAKA* and Yuusuke ODA*

Al-23%Si-6%Cu-1%Mg cast alloy composites containing dispersed graphite were prepared by means of die cast method to develop the wear resistance of bearings in boundary lubrication. An influence of graphite content and graphite particle size on the wear characteristics of the aluminum cast composites were investigated by the radial thrust test and the radial journal bearing test. As the results, the strength of composites decreased with increase in graphite contents, and consequently, the load carrying capacity of bearing showed lower value. The good wear resistance of bearings were obtained at the graphite contents of 6 to 8 vol% in composites. Furthermore the graphite particle size had more effect on improvement of the load carrying capacity of bearing. Higher the load carrying capacities of bearings were obtained at the conditions of composites containing 10 vol% dispersed graphite with particle sizes 0.85~0.42 mm and 0.42~0.25 mm for the radial thrust rubbing test.

(Received January 15, 2002)

Keywords: composites, aluminum cast alloy, wear resistance, graphite dispersion, bearing, boundary lubrication

1. 緒 言

アルミニウム合金は軽量で熱伝導性がよく、加工性にも優れていることからエンジン用メタル等の軸受材に採用されている¹⁾。しかしアルミニウム合金は凝着を生じやすく負荷容量も小さいことなどから、カム平軸受など²⁾一部の適用例を除いて起動停止が頻繁に生じる場所、あるいは低速で摺動しながら荷重が変動するような、いわゆる境界潤滑領域においてはほとんど実用に供されていない。そこで著者らは、境界潤滑用のアルミニウム合金軸受を開発するため、耐凝着性や耐荷重性の向上を目的とした各種合金組成について検討してきた^{3),4)}。その結果、いくつか軸受材として良好な摺動特性を示す合金組成が見出された。本研究ではこの中の過共晶 Al-Si-Cu-Mg 合金⁵⁾を選び、これに軸受寿命の向上を図る目的で黒鉛を分散させた複合材の創製を試みた。アルミニウム合金に黒鉛を添加した複合材の摺動特性については Rohatgi⁶⁾や Das⁷⁾等の報告がある。これらの研究では内燃機関用シリンダライナ等の耐焼付性向上を目的として攪拌した溶湯中に黒鉛を添加するボルテックス法や溶湯を高速回転して黒鉛との複合化を図る遠心鋳造法などにより複合材を創製し、いくつかの条件にて評価している。しかし境界潤滑領域

下における黒鉛粒度と耐摩耗性の関係などについて十分明らかにされていない。そこで本研究では、とくに生産性に劣るボルテックス法や寸法形状に制約がある遠心鋳造法によらず、量産性のよいダイカスト鋳造法により黒鉛を分散した複合材を創製し境界潤滑領域下の摺動特性に及ぼす黒鉛添加量とその粒度の影響を明らかにするとともに、ラジアルジャーナル試験により本複合材の軸受としての実用性について検討した。

2. 実験方法

2.1 複合材の製造

Al-25 mass%Si 合金、Al-40 mass%Cu 合金、99.9 mass%Mg を電気炉にて1023 K で溶解し、Al-23 mass%Si-6 mass%Cu-1 mass%Mg 合金（以下、組成表記の mass は省略）を目標組成とする母合金を溶製した。次にこの母合金を再溶解し、粒度調整した黒鉛を1033 K の1 チャージ量300 g の合金溶湯に添加して黒鉛攪拌棒にて約3 s で8回攪拌したのち1.2 MN のダイカスト鋳造機に溶湯を流し込み、縦40×横40×厚さ8 mm と内径17×外径33×長さ24 mm の複合材（以下供試材と呼ぶ）を鋳造によって製造した。合金の化学組成を Table 1 に示す。黒鉛は固定炭素分99.7%の人造黒鉛を使用

* オイレス工業(株)テクニカルセンタートライボロジー研究室 (〒252-0811 神奈川県藤沢市桐原町8)。Tribology Laboratory of Technical Center, Oiles Corporation (8. Kiriharachou, Fujisawa-shi, Kanagawa 252-0811). E-mail: sugafuji@oiles.co.jp

** 秋田大学工学資源学部材料工学科 (秋田市)。Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University (Akita-shi, Akita).

Table 1 Chemical composition of casting alloy (mass%)

	Si	Cu	Mg	Al
Alloy	23.24	6.31	1.22	bal.

し、黒鉛量として粒子径1.1~0.85 mmの黒鉛を溶湯1チャージに対しそれぞれ4, 6, 8および10 vol%になるよう添加した。添加黒鉛の粒度については粒子径 A: 1.1~0.85 mm, B: 0.85~0.42 mm, C: 0.42~0.25 mm および D: 0.25~0.17 mm (以下、数値を省略しA~Dで表示)の4種類の人造黒鉛を選び、それぞれ10 vol%添加した。

2.2 摺動試験

試験方法の概略を Fig. 1 に示す。試験は鋳造材から機械加工した縦30×横30×厚さ5 mmの供試材を Fig. 1 に示すように下にして固定し、SUS304製の内径20×外径25.6×長さ25 mmの相手材を上から荷重を加えながら回転摺動させるラジアルスラスト摩擦試験を行った。摺動試験は相手材のすべり速度を0.08 m/s一定とし、面圧を600 sごとに0.4 MPaずつ累積負荷する耐荷重試験を実施した。この方法では供試材が許容面圧を越えたときに異常摩耗ないしは焼付きを発生して摩擦係数が急上昇する。この現象を利用し、このときの面圧を限界荷重として軸受負荷容量を判断した。さらに軸受としての実用性を評価するためラジアルジャーナル軸受試験機による耐久試験を実施した。

Fig. 2 に試験方法の概略を示す。このときの供試材の寸法は内径20×外径26×長さ15 mmで、相手軸にS45Cを使用した。試験は面圧を1.5 MPa一定とし、相手軸のすべり速度を0.08, 0.16, 0.33および0.5 m/sの4条件を選び各々28.8 ksの摺動試験と相手軸のすべり速度を0.16 m/s一定として、それぞれ軸受面圧を2, 2.5, 3および3.5 MPaの4条件を選び各々28.8 ksの摺動試験を実施した。

潤滑条件はそれぞれの供試材をエンジン油中に浸漬したのち油分をふき取り、試験前に供試材摺動面にリチウム系グリスを薄く塗布した。

3. 実験結果および考察

3.1 黒鉛添加量の影響

過共晶 Al-23%Si-6%Cu-1%Mg 合金のダイカスト鋳造材の光学顕微鏡による金属組織を Fig. 3 に示す。デンドライト状の α 相と Al と Si の二元共晶および Al, Si, CuAl₂ の三

Fig. 1 Schematic representation of radial thrust rubbing test.

Fig. 2 Schematic representation of radial journal bearing test.

元共晶相からなる組織中に微細な初晶 Si が分散している。この組織で観察された α 相のセルサイズと初晶 Si の粒径は10 μ m 前後であった。Table 1 と同じ組成を持つ合金を金型重力鋳造した場合、 α 相のセルサイズと初晶 Si の粒径は約50~100 μ m とダイカスト材に比べて大きい。これは溶湯を高速、高圧で金型内に射出充填するダイカスト鋳造法による影響と考えられる⁸⁾。

本実験では添加する黒鉛を人造黒鉛とした。一般に人造黒鉛は微細な空孔を多く有しており⁹⁾黒鉛自身の潤滑性ととも、その空孔内部に潤滑油を吸収する特徴がある。このため人造黒鉛は天然黒鉛と比較して境界潤滑領域下において優れた潤滑性を発揮できると推定される。そこで潤滑油の保持性を高める上で人造黒鉛の粒子径は一般の市販天然黒鉛と比べ、より大きな粒径が望まれる。ここでは粒子径 A の人造黒鉛を選び、ラジアルスラスト摩擦試験により黒鉛を添加した供試材の耐荷重性を調べた。複合材をフライス盤で研削加工し、ラジアルスラスト摩擦試験の供試材としたときのマク

Fig. 3 Optical micrographs of hypereutectic aluminum casting alloy.

Fig. 4 Dispersion of graphite particles in hypereutectic aluminum casting alloy composites with various graphite contents for radial thrust rubbing test.

Fig. 5 Optical micrographs of dispersed graphite in the hypereutectic aluminum casting alloy.

Fig. 6 Results of load carrying capacities of the hypereutectic aluminum casting alloy composites with various graphite contents by radial thrust rubbing test under the lubrication of oil impregnation and greases.

Fig. 7 Effect of graphite contents on radial crushing strength of the hypereutectic aluminum casting alloy composites.

組織を Fig. 4 に示す。黒鉛は均一に分散しているのがわかる。この供試材に分散した人造黒鉛の状態を Fig. 5 に示す。黒鉛の切削表面には人造黒鉛の持つ特有の空孔が多数観察されるほか、黒鉛とアルミニウム合金との界面は剥離や空隙がなくよく密着している。

Fig. 6 にラジアルスラスト摩擦試験による耐荷重結果を示す。黒鉛添加量の多い10 vol%供試材は荷重 3 MPa を越えると摩擦係数が急増し、耐荷重値は3.5 MPa 付近にある。これより黒鉛量の少ない6 vol%と8 vol%供試材はともに耐荷重値は5 MPa 前後と高い値を示した。これに関連して、内径20×外径26×長さ15 mm の供試材をアムスラ圧縮試験機により破壊したときの圧環強度を調べた。その結果を Fig. 7 に示す。黒鉛添加量が増えるに従い強度は直線的に低下し、

黒鉛量10 vol%の供試材ではおよそ強度が30%も減少している。すなわち黒鉛を10 vol%添加した供試材で耐荷重値が向上しなかった原因は黒鉛量増加による強度の低下が大きく影響したものと考えられる。一方、黒鉛添加量の低い4 vol%の供試材は、黒鉛量が少なすぎるために潤滑性に乏しく、さらに摺動面における油やグリスの保持性が低下して小さい荷重で摩擦係数が増加し、耐荷重値も低い値を示したと考えられる。摺動性の観点から6 vol%と8 vol%の黒鉛を含む供試材は摺動面に黒鉛が適量存在するため、黒鉛による潤滑性と油の保持性に優れ耐荷重値が増加したのと考えられる。すなわち黒鉛量が多いと複合材の強度が減少して耐荷重性が低下し、また少なすぎても黒鉛による潤滑性と油の保持性が低下するため耐荷重性は低下する。これらの結果から摺動材と

Fig. 8 Dispersion of graphite particles in hypereutectic aluminum casting alloy composites with various graphite particle sizes for radial thrust rubbing test.

して適切な黒鉛の添加量が存在し、ここでは黒鉛 6~8 vol% の添加が摺動性の向上に効果のある範囲であった。この試験で示された供試材は黒鉛を含まない铸造材で得られた耐荷重値の約2.5倍の値を示し、境界潤滑領域下での摺動性を大きく向上させた。

3.2 黒鉛粒度の影響

黒鉛粒子径 A, B, C および D の 4 種類の人造黒鉛をそれぞれ 10 vol% 添加した铸造材をフライス盤で研削加工し、ラジアルスラスト摩擦試験の供試材としたときの外観を Fig. 8 に示す。黒鉛の分散は供試材の摺動面に一様に分散しているのがわかる。これらの供試材による耐荷重試験の結果を Fig. 9 に示す。供試材 B と供試材 C はもっとも高い耐荷重値を示す。これらに比べ黒鉛粒子径の大きな供試材 A と、またもっとも小さな黒鉛粒子径の供試材 D はより低い値を示した。供試材 B と供試材 C の耐荷重値はこれまでの試験結果でもっとも高い 7.2 MPa の値であり、摩擦係数もこれまでの結果に比べ 0.05~0.1 と低い値を示した。本実験で使用した人造黒鉛の粒径は 1.1 mm から 0.17 mm のかなり大きい粒径としている。これは黒鉛への含浸油量を高めることで境界潤滑下の低摩擦と耐荷重性の向上を図るためである。Rohatgi¹⁰⁾等は Al-12%Si 共晶合金に粒径 0.02~0.06 mm の黒鉛を添加した铸造合金について滴下給油条件下で摺動試験を行い、黒鉛粒径と耐焼付性との関係を調べている。黒鉛 2 mass% 以上の添加により境界潤滑下で焼付は発生せず耐焼付性に及ぼす黒鉛の形状や粒径の影響は少ないとしている。しかし本実験では耐荷重値に及ぼす粒径の影響は明確に現れ、異なる結果を示した。本実験の摺動試験は滴下給油条件と異なり潤滑油量が限定されているために黒鉛の持つ含浸油量和その黒鉛の分布状態が耐荷重値に影響したものと考えられる。

供試材 A から D について、それぞれ供試材の摩擦面 1 cm² の範囲を選び、この中に等間隔に縦と横 12 本ずつの交差線を引き計 24 本の線上にある黒鉛粒子数を計数することにより黒鉛の平均間隔を算出し、耐荷重値との関係を求めた。その結果を Fig. 10 に示す。平均黒鉛間隔 1 mm を越える付近に耐荷重値の頂点が見られる。各供試材の含浸油量を調べると供試材 A は 0.377 mass%，供試材 B は 0.34 mass%，供試材 C は 0.288 mass% そして供試材 D は 0.219 mass% であり、粒子径が大きくなるほど含浸油量は多くなっていた。

すなわち供試材 A では摺動面における黒鉛粒子間の間隔が大きいため黒鉛の潤滑作用が十分でなく、さらに黒鉛に含まれる潤滑油が摺動面へ一様に供給されにくいいため摺動面温

Fig. 9 Results of load carrying capacities of the hypereutectic aluminum casting alloy composites with various graphite particle sizes by radial thrust rubbing test under the lubrication of oil impregnation and greases.

Fig. 10 Relation between load carrying capacities of the hypereutectic aluminum casting alloy composites with 10 vol% graphite and mean graphite space value on contact faces. Sliding condition; sliding velocity: 0.08 m/s, cumulative pressure: 0.4 MPa/600 s, lubrication: oil impregnation and grease application.

度が上昇して潤滑油の消費量が増え、耐荷重値が低下したと考えられる。一方供試材 D の場合は黒鉛粒子間の間隔が小さく、摺動初期における潤滑性はよいが含浸油量が少ないために耐荷重値も向上しなかったと考えられる。これに対して供試材 B と C は黒鉛の潤滑作用域が互いに重なりあう距離に黒鉛粒子が分布していることで摺動面を一様に潤滑し、ま

Fig. 11 Relation between coefficient of friction and sliding velocities of the hypereutectic aluminum casting alloy composites with 8 vol% graphite of particle size 1.1~0.85 mm by radial journal bearing test.

Fig. 12 Relation between coefficient of friction and pressures of the hypereutectic aluminum casting alloy composites with 8 vol% dispersed graphite of particle size 1.1~0.85 mm by radial journal bearing test.

た黒鉛の含浸油量がこれらと相互に補完しあい耐荷重値が向上したものと考えられる。すなわち境界潤滑領域下では黒鉛に含浸される油量と黒鉛の持つ潤滑性を有効に作用させるため、摺動面には単位面積当たり適切な粒径の黒鉛が一定量分布する¹¹⁾ことが重要と考えられる。

この試験で得られた7.2 MPaの耐荷重値は黒鉛を含まない鋳造材で得られた耐荷重値の約3.7倍の値を示した。そしてAl-23%Si-6%Cu-1%Mg 過共晶合金に対して粒子径BおよびCの黒鉛を添加することにより顕著な摺動性の向上が確認された。

3.3 ラジアルジャーナル試験における軸受性能

Fig. 11に粒子径Aの黒鉛を8 vol%添加した供試材について、面圧を1.5 MPa一定としてすべり速度を変えたときの摩擦係数の推移を示す。速度0.08 m/sから0.5 m/sの各条件における摩擦係数は摺動初期にやや係数の変動が見られる。14.4 ks後ではいずれも摩擦係数0.05~0.1と低く安定し、試験が終了する28.8 ksでは0.06前後の値を示し、すべり速度の条件が変わっても摩擦係数に大きな変化がなく安定した摺動性能を示した。軸受および軸の摩耗は観察されず、相互の摺動面にはきずもなく滑らかな状態を示していた。

次にFig. 12に同じく粒子径Aの黒鉛を8 vol%添加した供

Fig. 13 Results of friction coefficient of the hypereutectic aluminum casting alloy composite with 8 vol% graphite of particle size 1.1~0.85 mm and the hypereutectic aluminum casting alloy without graphite by radial journal bearing test of 180 ks durability.

Fig. 14 Appearances of the hypereutectic aluminum casting alloy composite with 8 vol% dispersed graphite and mating shaft after radial journal bearing test of 180 ks durability.

試材について、それぞれすべり速度を0.16 m/s一定として、軸受面圧を変えたときの摩擦係数を示す。この試験においても、それぞれ軸受面圧を2~3.5 MPaとした範囲で摩擦係数は0.05~0.1と低く安定した値を示した。この試験での軸受および軸の摩耗は認められず、互いの摺動面も滑らかな状態であった。

次に軸受としての耐久性を評価するため同じく粒子径Aの黒鉛を8 vol%添加した供試材について軸受面圧1.5 MPa、すべり速度0.33 m/s、試験時間180 ksのラジアルジャーナル軸受試験を実施した。軸材はS45Cとし、比較のために黒鉛を含まない鋳造材を同一条件にて試験した。潤滑条件はこれまでと同じくエンジン油に供試材を浸漬したのち、摺動面の油を拭き取り、試験前に供試材摺動面にリチウム系グリスを薄く塗布して行った。その結果をFig. 13に示す。黒鉛を含まない鋳造材はおよそ25.2 ks後に摩擦係数が急上昇し試験を中止した。一方、黒鉛を8 vol%添加した供試材は72 ksまでは徐々に摩擦係数は上昇したが、これ以降はほぼ試験終了の180 ksまで摩擦係数0.11~0.15の安定した値にあった。試験後の供試材および相手軸の摺動面の外観をFig. 14に示す。軸受および軸の摺動面は摩耗痕がなく滑らかな鏡面状態を呈し、摩耗量としては計測できなかった。これらの結果から人造黒鉛を含有したAl-23%Si-6%Cu-1%Mg 過共晶合金の軸

受試験では面圧1.5 MPaですべり速度0.08~0.5 m/sの条件下およびすべり速度0.16 m/sで面圧2~3.5 MPaの条件下において、ともに安定した摺動性能を示した。また180 ksのラジアルジャーナル軸受試験の結果においても本複合材は軸受としての耐久性を備えているものと思われる。

4. 結 言

境界潤滑領域下で適用可能なアルミニウム基合金の軸受開発を目的として、耐凝着性、耐摩耗性に優れた過共晶アルミニウム合金に黒鉛を添加しダイカスト鋳造した黒鉛分散複合材を作製し、摺動特性に及ぼす黒鉛添加量とその粒径の影響について調べ、以下の結論を得た。

(1) ダイカスト鋳造した過共晶 Al-23%Si-6%Cu-1%Mg 合金の α デンドライトセルおよび初晶 Si の粒径は重力鋳造に比べ小さく、かつ添加した黒鉛も様な分散が認められた。

(2) 粒子径Aの人造黒鉛を6~8 vol%添加した Al-23%Si-6%Cu-1%Mg 合金複合材はラジアルスラスト摩擦試験において耐荷重性が向上し、6 vol%で5.6 MPaの値を示した。

(3) 粒子径BおよびCの人造黒鉛を10 vol%添加した Al-23%Si-6%Cu-1%Mg 合金複合材はラジアルスラスト摩擦試験において共に7.2 MPaの耐荷重値を示した。

(4) 粒子径Aの人造黒鉛を8 vol%添加した Al-23%Si-6%Cu-1%Mg 合金複合材のラジアルジャーナル軸受試験では面圧1.5 MPaですべり速度0.08~0.5 m/sの条件下およびすべり速度0.16 m/sで面圧2~3.5 MPaの条件下において、ともに安定した摺動性能を示した。

参 考 文 献

- 1) 神谷荘司：トライボロジスト，**46** (2001)，129.
- 2) 社団法人自動車技術会：自動車のトライボロジー，養賢堂，(1994)，24.
- 3) 田上道弘，菅藤昭良，曾根葉平，武藤 侃，大口健一：軽金属学会第99回秋期大会講演概要，(2000)，109.
- 4) 田上道弘，菅藤昭良，曾根葉平，武藤 侃，大口健一：軽金属学会第101回秋期大会講演概要，(2001)，257.
- 5) 菅藤昭良，田上道弘，白坂康弘，小田裕介：軽金属学会第101回秋期大会講演概要，(2001)，149.
- 6) B. P. Krishnan, H. R. Shetty and P. K. Rohatgi: AFS Trans, **84** (1976), 73.
- 7) S. Das and S. V. Prasad: Wear, **133** (1989), 173.
- 8) 西 直美，佐々木英人，平原俊之，高橋庸輔：鋳物，**60** (1988)，777.
- 9) C. L. Mantell: Carbon and graphite handbook, Roberte E. Krieger Publishing Co., Inc, New York, (1979), 24.
- 10) B. C. Pai, P. K. Rohatgi and S. Venkates: Wear, **30** (1974), 117.
- 11) E. Takeuchi: Wear, **15** (1970), 201.