SiC ウィスカと BN を複合化した 4032 Al 合金の 機械的性質および摩耗特性*

Than Trong Long** 逢坂達吉***
合瀬路博*** 森田幹郎***

J. Japan Inst. Metals, Vol. 51, No. 9 (1987), pp. 864-870

Mechanical Properties and Wear Resistance of SiC Whisker Reinforced Aluminium Alloy 4032 Composites Containing BN Powders

Than Trong Long**, Tatsuyoshi Aisaka***,
Michihiro Ose*** and Mikio Morita***

The tensile properties and wear resistance of SiC whisker reinforced aluminium alloy 4032 composites were investigated.

The elastic modulus of T 6 heat treated SiC/4032 composites can be expressed as
$$E(\text{GPa}) = 180V_f(\text{vol}\%) + 85.$$

The wear loss of SiC/4032 composites decreases rapidly with an increase in the volume fraction of SiC whisker up to 14%, beyond which it remains unchanged.

The addition of BN gives rise to the degradation of the mechanical properties and also gives rise to the degradation of the coefficient of friction which improves the wear resistance of the composites.

The wear resistance of SiC/4032 composites depends remarkably on the size and distribution of Si particles of aluminium alloy 4032 matrix.

(Received April 13, 1987)

Keywords: metal matrix composite, SiC whisker, BN powder, hot press, aluminium alloy 4032, mechanical property, wear resistance, coefficient of friction

I. 緒 言

SiC ウィスカは高い引張強さと弾性係数を持ち、高温で強度の低下が少なく、耐酸化性、耐食性などの多くの特性において優れている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。従って、金属基複合材料の強化繊維として望ましい特性をもっている。最近、各社で SiC ウィスカの開発や事業化の動きが活発化しており、すでに何社かが量産体制を確立し、価格が大幅に低下した。一方、自動車のエンジンやミッション部品などのような可動構造部材などの軽量化や高性能の要求が高まっていることに助長され、近年、SiC ウィスカ強化アルミニウム合金複合材料に関する研究開発も盛んになって来ている。これまでに SiC ウィスカ強化した 6061 合金に関する多くの研究が行われ⁽⁴⁾⁻⁽¹⁰⁾、20 vol% SiC ウィスカで強化した 6061 合金複合材料の弾性係数は 122 GPa、引張強さは 584 MPa という水準に達している⁽⁹⁾。その他、母相として 1000 系、2000 系、4000 系、5000 系および 7000 系のアルミニウム合金についても多く報告されている⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾。しかし、これまでの研究では複合化のプロセス、複合材料の機械的性質や強化

繊維と母相の界面状態⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁹⁾に関する研究が主流であり、摩耗特性に関する報告は比較的少ない。

本研究では高剛性、高強度でしかも耐摩耗性の優れた材料を得ることを目的とし、SiC ウィスカと耐摩耗性の優れた 4032 合金をホットプレス法により複合化した。得られた複合材料の機械的性質および耐摩耗性を調べ、著者らが報告した⁽²⁰⁾ SiC ウィスカ強化した 6061 合金複合材料の特性と比較した。また SiC ウィスカ強化した 4032 合金複合材料の熱処理条件を変えることにより 4032 合金母相中の Si 粒子の大きさおよび分布を変化させ、摩耗特性に及ぼす影響について調べた。さらに、固体潤滑材として BN 粉末を添加し、その潤滑効果について検討した。

II. 試 験 方 法

1. 試料の作製

マトリックスとなる 4032 合金は平均粒径 40 μm のアトマイズ粉末を用いた。その合金粉末の化学組成の分析結果を Table 1 に示す。

また強化繊維として β-SiC ウィスカ、固体潤滑材とし

** (株)東芝新素材応用研究所(New Material Engineering Laboratory, Toshiba Corp., Yokohama)

*** (株)東芝総合研究所(Research and Development Center, Toshiba Corp., Kawasaki)

* SiC ウィスカ強化 Al 合金の研究(第1報)

Table 1 Chemical compositions of atomized 4032 powder(mass%).

Alloy	Si	Fe	Cu	Mg	Ni	Zn	Al
4032	12.80	0.24	0.89	0.96	1.10	0.01	bal.

Table 2 Physical properties of SiC whisker and BN powder.

	SiC	BN
Diameter(μm)	0.05~1.50	8
Length(μm)	20~200	0.5
Density(g/cm^3)	3.18	2.34
Elastic modulus(GPa)	551	94
Tensile strength(GPa)	2.1~13.8	—

Table 3 SiC whisker and BN powder contents of composites(vol%).

Materials	SiC	BN
4032	—	—
4032-10 SiC	10	—
4032-14 SiC	14	—
4032-20 SiC	20	—
4032-24 SiC	24	—
4032-30 SiC	30	—
4032-14 SiC-5 BN	14	5
4032-24 SiC-5 BN	24	5

で鱗片状の立方晶 BN 粉末を用いた。SiC ウィスカおよび BN 粉末の特性を Table 2 に示す。

本実験の複合材料の SiC ウィスカおよび BN 粉末の含有率を Table 3 に示す。所定の含有率の SiC ウィスカ、BN 粉末、4032 合金粉末を均一に混合した。それを直径 80 mm の黒鉛型に充てんし、約 8 MPa の圧力で冷間予備圧縮成形した後約 10^{-2} Pa の真空中で 800 K の温度と 40 MPa の圧力で熱間圧縮成形し、直径 80 mm、高さ 15 mm の試料を作製した。

2. 材料試験

得られた複合材料の特性を評価するため引張試験、硬さ試験および摩耗試験を行なった。

引張試験は平行部の幅 4 mm、厚さ 3 mm、標点間距離 15 mm の引張試験片を引張速度を約 7 mm/ks で行なった。なお、引張試験片の採取は平行部の幅方向をホットプレス方向とした。弾性係数は引張試験片に歪みゲージを貼り付け、負荷荷重と歪み量の関係から求めた。

硬さはビッカース硬度計を用いて 98 N の負荷荷重で測定した。

摩耗試験の条件を Table 4 に示す。

摩耗試験は Fig.1 に示す形状、寸法の複合材料の試料を 49 N の荷重をかけた状態で保持し、エタノール中で相手材を往復運動させた。相手材は表面あらし $R_m = 1.4 \mu\text{m}$ 、硬さ $H_v = 880$ の SKH-51 である。摩耗特性は摩耗

Table 4 Wear test conditions.

Sliding plate SKH-51	Vickers hardness $H_v = 880$ Roughness $R_{\max} = 1.5(\mu\text{m})$
Load(N)	49
Sliding distance(m)	500
Sliding speed(mm/s)	80
Atmospheric condition	Ethanol bath

a. Wear test specimen

b. Wear test method

Fig.1 Wear test method

(a) Dimensions of wear test specimen

(b) Schematic drawing of wear test method.

試験前後の試料の重量測定により摩耗減量の大小で評価した。

機械的性質および摩耗特性は熱間圧縮成形したままおよび T6 熱処理を施した試料について行なった。熱処理は標準の T6(793 K, 14.4 ks で溶体化および 443 K, 28.8 ks で時効)および溶体化処理の時間を長くした T6-A(793 K, 86.4 ks で溶体化および 443 K, 28.8 ks で時効)の 2 条件で行なった。

III. 結 果

1. 組 織

ホットプレスしたまま、標準の T6 および T6-A 熱処理を施した 4032 合金粉末ホットプレス材の走査電子顕微鏡組織および析出した Si 粒子の大きさの分布を Fig.2 に示す。Si 粒子の平均大きさは、ホットプレス後では約 $1.8 \mu\text{m}$ 、熱処理を施した材料は予想通り、標準の T6 熱処理後では約 $2.5 \mu\text{m}$ 、T6-A 熱処理後では約 $4.0 \mu\text{m}$ 、溶体化処理の条件によって Si 粒子がオストワルド成長によりその大きさや分布が変化した。

SiC ウィスカと 4032 合金粉末を均一に混合した後ホットプレスして作製した複合材料の代表的な SEM 組織を Fig.3 に示す。4032 合金粉末中では SiC ウィスカ無添加 4032 合金ホットプレス材と同様な Si 粒子の分布状態を示す。一方、アルミニウム粉末の境界では、SiC ウィスカが均一に分散した 3 次元のネットワーク状の組織が形成される。

Fig.2 Microstructures and distributions of Si particle sizes of 4032 alloy(NaOH etched).

Fig.3 Scanning electron micrograph of 4032-15 vol%SiC composite(NaOH etched).

2. 機械的性質

(1) 弾性係数

標準の T6 熱処理を施した SiC/4032 複合材料の弾性係数と SiC ウィスカ含有率との関係を Fig.4 に示す。著者らが報告した⁽²⁰⁾ SiC/6061 複合材料と比較した。SiC/4032 および SiC/6061 複合材料はいずれも弾性係数 E (GPa) と SiC ウィスカ含有率 V_f (vol%) は下記のように直線関係をなしている。

$$\text{SiC/4032 : } E \div 180V_f + 85$$

$$\text{SiC/6061 : } E \div 180V_f + 68$$

本実験の結果と複合則から計算された複合材料の弾性係数

Fig.4 Relationship between elastic modulus of SiC/4032 composites and volume fraction of SiC in comparison with that of SiC/6061.

$$E_c \div \alpha E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

$$\div (\alpha E_f - E_m) V_f + E_m$$

E_c : 繊維/Al 複合材料の弾性係数

E_m : Al 母相の弾性係数

V_f : 繊維の体積率

α : 繊維の配列形態によって決まる係数
と比較すると

$$(\alpha E_f - E_m) = 180$$

SiC ウィスカの弾性係数 $E_f \div 500$ GPa, 4032 合金の弾性係数 $E_m = 85$ GPa, 6061 合金の弾性係数 $E_m = 68$ GPa として計算すると $\alpha \div 0.5$ となることがわかった。

Fig.5 Relationship between Vickers hardness of SiC/4032 composites and volume fraction of SiC.

ホットプレスしたままおよび標準の T6 熱処理を施した SiC/6061 複合材料のピッカス硬さと SiC ウィスカ含有率との関係を Fig.5 に示す。標準の T6 熱処理を施した 4032 合金粉末ホットプレス材の硬さは H_v 115 であり, SiC ウィスカを添加することにより硬さは

$$H_v = V_f(1000V_f + 150) + 115$$

$$V_f: \text{SiC ウィスカ含有率 (vol\%)}$$

の関係で増加する。弾性係数の場合と異なり, V_f との単純な直線関係ではなかった。

(2) 引張特性

標準の T6 熱処理を施した SiC/4032 複合材料の引張特性と SiC ウィスカ含有率との関係を Fig.6 に示す。4032 合金粉末のホットプレス材の引張強さは 365 MPa, 0.2% 耐力は 285 MPa, 伸びは 7% であった。10~30 vol% SiC ウィスカを含有する複合材料の引張強さおよび 0.2% 耐力は SiC ウィスカ含有率の増加に伴い直線関係で増加する。30 vol% SiC ウィスカを含有する複合材料の引張強さは 470 MPa, 0.2% 耐力は 380 MPa, しかし伸びは 1% 以下であった。

一方, 固体潤滑材として 5 vol% BN を添加した複合材

Fig.6 Relationship between tensile property of SiC/4032 composites and volume fraction of SiC.

Fig.7 Scanning electron micrographs of fracture surfaces of tensile specimens.

(a) 4032, (b) 4032-24%SiC, (c) 4032-24%SiC-5%BN

料では無添加材と比較して引張強さが 10% 程度低下する。

なお, 本実験の材料の引張試験の荷重 - 歪み曲線には鋸歯状の変形過程が頻繁に観察された。特に BN を添加した複合材料はこの傾向が顕著に現われる。

引張試験片の破断面の SEM 観察の代表的な結果を Fig.7 に示す。4032 合金ホットプレス材では, Fig.7(a)に示すように, 破断面全体にディンプルパターンが観察され, 延性破壊の組織を示している。一方, SiC/4032 複合材料に

においても, Fig.7(b)に示すように, ディンプルパターンが観察され, SiC ウィスカの引き抜けが認められない. しかし, SiC ウィスカ含有率が 24 vol% 以上の複合材料では, SiC ウィスカの密度の高い 4032 合金粉末の界面に沿って破壊の伝播が見られ, 部分的に SiC ウィスカの引き抜けも認められた. BN を添加した複合材料では, Fig.7(c)に示すように, 鱗片状の BN 粉末の引き抜けが観察された. 前述した引張試験の荷重-歪み曲線上に顕著な鋸歯状の変形過程はこの BN 粉末の引き抜けに起因すると考えられる.

3. 摩耗特性

標準の T6 熱処理を施した本試験の材料の摩耗特性を Fig.8 に示す. 4032 合金ホットプレス材の摩耗減量の 1.4 mm^3 に対して 10 vol% SiC ウィスカを含有する複合材料では摩耗減量がその 1/7 と著しく軽減した. 14 vol% SiC ウィスカの添加ではさらに耐摩耗性が向上するが 14 vol% 以上を添加してもそれ以上の効果が見られない. 4032 合金ホットプレス材および SiC/4032 複合材料の摩耗減量はそれぞれ 6061 合金ホットプレス材および同じ SiC ウィスカ含有率の SiC/6061 複合材料と比較して約 1/2 と

Fig.8 Relationship between wear property of SiC/4032 composites and volume fraction of SiC in comparison with that of SiC/6061 composites.

Fig.9 Effect of BN addition on wear property of SiC/4032 composites.

Fig.10 Scanning electron micrographs of wear surfaces.

(a) 4032, (b) 4032-24%SiC, (c) 4032-24%SiC-5%BN

小さくなっている. これは主に 4032 合金母相中に高密度で均一に分散している Si 粒子の寄与によると考えられる.

BN を添加した SiC/4032 複合材料の耐摩耗性は Fig.9 に示すように, さらに向上している.

摩耗試験後の試料の摺動面の SEM 観察結果の代表例を Fig.10 に示す. 4032 合金ホットプレス材では摩耗の進行に伴い露出した Si 粒子が摺動方向にすべりを起こし, その結果 Si 粒子による母相の引き剥がりが生じ, Fig.10(a)に示すように, 多くの摩耗の溝が形成される. 一方, SiC/4032 複合材料では, Fig.10(b)に示すように, 摩耗の溝が

Fig.11 Wear mechanism of 4032 alloy and SiC/4032 composites.

ほとんど見られない。4032 合金ホットプレス材および SiC/4032 複合材料の摩耗の機構を Fig.11 に示す。SiC/4032 複合材料では 4032 合金粉末の境界でネットワーク状を形成している SiC ウィスカ分散層の存在により耐摩耗性が向上されると同時に Si 粒子の摺動方向のすべりによる母相の引き抜き作用が止められたためと考えられる。BN を添加した複合材料では、アルミニウム母相と共に削り取られた BN の摩耗粉が複合材料と相手材の間に存在する痕跡は光学顕微鏡でも観察された。

本実験の複合材料の摩擦係数の測定結果を Fig.12 に示す。SiC ウィスカを添加することによって軟かいアルミニウム母相の凝着摩耗が軽減することによって摩擦係数は小さくなっている。BN を添加するとさらに小さくなる。これは前述したように、BN の摩耗粉の潤滑効果によると考えられる。

4. 摩耗特性に及ぼす熱処理条件の影響

本試験では T6 熱処理の溶体化処理の時間を変え、Si 粒子の平均大きさ 2.5 μm および 4 μm の 2 水準の複合材料を得、これらの材料の摩耗特性に及ぼす Si 粒子の大きさおよび分布の影響を調べた。その結果を Fig.13 に示す。いずれの熱処理の条件においても硬さにはほとんど変化は見られないが溶体化処理の時間を長くして Si 粒子の平均

Fig.12 Effect of SiC and BN additions on coefficient of friction of composites.

Fig.13 Effect of Si particle size on wear property of SiC/4032 composites

粒径を 4 μm とした 4032 合金ホットプレス材および SiC/4032 複合材料の摩耗特性が Si 粒子の平均粒径 2.5 μm の場合と比較してより優れている。

このように、SiC/4032 複合材料の摩耗特性は 4032 合金母相中の Si 粒子の大きさおよび分布に大きく依存する。従って、4032 合金のアトマイズ粉末を用いた SiC/4032 複合材料は適当な熱処理を行なうことによって、従来の含浸加圧鋳造法では得られない金属組織が得られ、これにより良好な摩耗特性が期待できる。

IV. 結 言

(1) T6 熱処理を施した SiC/4032 複合材料の弾性係数 E (GPa) と SiC ウィスカ含有率 V_f (vol%) は

$$E = 180V_f + 85$$

の関係をなしている。30 vol% SiC ウィスカで強化した 4032 合金複合材料の引張強さは 470 MPa であった。

(2) T6 熱処理を施した SiC/4032 複合材料の摩耗特性は SiC ウィスカ含有率 10 vol% で著しく向上する。これは 4032 合金粉末の境界でネットワーク状を形成している SiC ウィスカ分散層の存在により耐摩耗性が向上されると同時に Si 粒子のすべりによる母相の引き抜き作用を止める効果によると考えられる。14 vol% 以上の添加で飽和状態に達する。

BN の添加によって機械的性質は若干低下するが摩擦係数が減少し、耐摩耗性が向上する。

(3) SiC/4032 複合材料の摩耗特性は 4032 合金母相中に析出した Si 粒子の分布状態に大きく依存する。

文 献

- (1) Albert P. Levitt: *Whisker Technology*, John Wiley and Sons, New York, (1970), 168.
- (2) E. Scala: *Composite Materials for Combined Functions*, New Jersey, (1970), 83.
- (3) C.H. Anderson and R. Warren: *Composites*, 15(1984), 16.

- (4) A.P.Divecha and S.G.Fishman: *Proc. ICM* 3, vol.3, Cambridge, England, (1979), 351.
- (5) T.G.Nieh: *Met. Trans.*, 15A(1984), 139.
- (6) T.Nishimura, A.Arai, M.Morita, H.Kashiwaya, K.Kiryu and T.Miamoto: *Developments in the Science and Technology of Composite Materials*, ECCM, Ed. by A.R. Bunsell, P.Lamicq and A.Massiad, Bordeaux, (1985), 628.
- (7) A.Kohyama, N.Igata, Y.Imai, H.Teranishi and T.Ishikawa: *Proc. ICCMV*, Ed. by W. C.Harrigan, J.Strike and A.K.Dhingra, California, (1985), 609.
- (8) A.Sakamoto, H.Hasegawa and Y.Minoda: *ibid.*, p.699.
- (9) C. R. Crowe, R. A. Gray and D. F. Hasson: *ibid.*, p.843.
- (10) 福永秀春, 合田公一, 田端伸雄: 材料, vol.34, No. 376, (1986), 64.
- (11) A.P.Divecha, S.G.Fishman and S.D.Karmarkar: *J. Metals*, 33(1981), 12.
- (12) R.J.Lederich and S.M.L.Sastry: *Mat. Sci. and Eng.*, 55(1982), 143.
- (13) J.G.Nieh and D.J.Chellman: *Script. Metall.*, 18(1984), 925.
- (14) 砥綿真一, 山田銑一: 日本金属学会誌, 2(1983), 159.
- (15) R.J.Arsenault and C.S.Pande: *Script. Metall.*, 18(1984), 1131.
- (16) 小原嗣朗, 武藤範雄: 日本金属学会誌, 45(1981), 411.
- (17) J.C.Viala, P.Fortier, C.Bernard and J. Bouix: *Developments in the Science and Technology of Composite Materials*, ECCM, Ed. by A.R.Bunsell, P.Lamicq and A.Massiah, Bordeaux, (1985), 585.
- (18) S.G.Fishman: *J. Metals*, 3(1986), 26.
- (19) M. Vogelsang, R. J. Arsenault and R. M. Fisher: *Met. Trans.*, 17A(1986), 379.
- (20) Than Trong Long, 逢坂達吉, 合瀬路博, 森田幹郎: 日本金属学会講演概要, (1987・4月), p.330.