⑧ 粉末冶金法による SiC ウィスカ強化 アルミニウム合金複合材料*

SiC Whisker Reinforced Aluminum Alloy Composites Produced by
the Powder Metallurgical Method*

森本 啓之**, 大内権一郎**, 米田陽一郎**

Hiroyuki MORIMOTO**, Ken-ichiro OHUCHI**, Yoichiro Yoneda**

キーワード: 複合材料, ウィスカ強化アルミニウム合金, SiC ウィスカ,
粉末冶金法, 接合, 強度, 弾性率, 体積率

1. はじめに

近年, あらゆる産業分野で軽量化, 高性能化が指向され, 材料に対する要求もますます苛酷になってきている。このような要求にこたえるには従来の単一素材では困難な場合もあり, 新しい材料として複合材料の開発が試みられている。その中でも SiC ウィスカ強化アルミニウム合金複合材料(以下, SiC_w/Al と略す)は, 軽量で剛性, 強度が高く, 耐熱性, 耐摩擦性, 熱的寸法安定性に優れると同時に, 押出, 圧延, 鍛造などの加工成形が可能で, 実用化可能性の高い複合材料として注目されている¹⁻⁵⁾。

著者らも SiC_w/Al の開発を進め, 粉末冶金法により製造する技術を開発した⁶⁻⁹⁾。本報告では, 開発材の製造方法と各種特性さらに接合例を紹介する。

2. 製造方法

SiC_w/Al の代表的な製造方法としては, 図1に示すように粉末冶金法と溶湯含浸法がある。両者には一長一短があるが, 粉末冶金法は SiC ウィスカを均一に分散させやすく, SiC ウィスカ体積率(以下, V_f と略す)を広範囲にわたって任意に精密よく調整することができる⁹⁾。また, 材料特性のばらつきが少なく, 品質的にも優れ⁹⁾, さらにピレットの大形化, 長尺化が可能であるなどの利点もあり, ここでは粉末冶金法を採用した。

SiC ウィスカは, 直径約 $0.4\mu\text{m}$, 長さ約 $14\mu\text{m}$ の β 型 SiC 単結晶である。Al 合金粉末は窒素ガスアトマイズ法で作製し, 分級して 350 メッシュ以下の粉末を用いた。この SiC ウィスカと Al 合金粉末を溶媒中で混合したのち, 溶媒を除去して混合粉を作製した。次に混合粉を HIP (熱間静水圧プレス) を用いて高温高压下で固化成形してピレットを作製した。

SiC_w/Al のピレットを製造する場合, 材料特性は固化成形条件に依存するのでその最適化が必要である。図2⁹⁾に一例として 6061 をマトリックスとした場合の, ピレット材の機械的性質に及ぼす固化成形温度条件の影響を示す。引張強度及び衝撃値は, マトリックス Al 合金の固液 2 相温度域である 625°C で最大となり, ミクロポアや粗大な反応生成物は認められない。それより高温で固化成形した場合の強度と衝撃値の低下原因は, SiC ウィスカの損傷や界面結合力の問題というよりも, むしろ, 反応生成物 Si 及び Al-Fe (Cr, Mn)-Si 系晶出物の粗大化が支配的と考えられる⁹⁾。また, 最適固化成形温度はマトリックスの Al 合金の組成によって異なる。例えば, Mg 含有量の多い 5056 (5%Mg) がマトリックスの場合は, 図3に示すように 6061 (1%Mg) に較べて SiC ウィスカと反応しやすいため, より低温で固化成形しなければならない⁹⁾。

SiC_w/Al の製造においては, 以上のような粗大な反応生成物, 晶出物の他, ミクロポアの生成防止, ウィスカ原料中の異形物の除去が重要である。

当社では $150\phi \times 350\text{Lmm}$ のピレットを標準的に

*原稿受付 平成元年 11 月 17 日

**** 神戸製鋼所材料研究所 Kobe Steel LTD.

図1 製造プロセス

図2 20%SiC_w/6061の固化成形温度と機械的性質の関係
(T_s:固相線温度, T_L:液相線温度)

図3 20%SiC_w/6061 および 20%SiC_w/5056の固化成形温度とAl₄C₃生成量の関係
(T_s:固相線温度, T_L:液相線温度)

図4 各種成形加工品

製造している。SiC_w/Al は、ビレットから切削加工により製品に仕上げる場合もあるが、ビレットを押出、圧延、鍛造などの加工により各種形状に成形して製品とする場合が多い。また、加工により意図的にSiC whiskerを特定の方向に配向させて配向方向の特性を向上させることも可能である。パイプ、棒、型材、板、鍛造品など各種成形加工品の例を図4に示す。このように各種成形加工が可能であるのは、本複合材料が強化材としてwhiskerという不連続繊維を利用しているため、これは連続繊維強化金属複合材料にはない重要な特徴である。

3. 特 性

3.1 引張強度

6061をマトリックスとし、押出比11の押出加工によりwhiskerを一方に配向させた複合材料の、常温引張特性に及ぼすV_fの影響を図5⁸⁾に示す。0.2%耐力はV_f0~40%において、引張強度もV_f20%以下で、V_fに比例して上昇する。V_f1%あたりの0.2%耐力の上昇量は0.75kgf/mm²、引張強度の上昇量は1.1kgf/mm²である。引張強度の上昇率は、V_fが20%以上になると徐々に減少する。

短繊維強化で繊維が一方に配向している場合の強度に関する複合則として、Kelly-Tysonの式¹⁰⁾がよく知られている。

$$\sigma_c = \sigma_f V_f \cdot F(l/l) + \sigma_m(1 - V_f) \quad (1)$$

図5 SiC_w/6061 押出材の引張特性とウィスカ体積率の関係

図6 20%SiC_w/6061 押出材中のSiC ウィスカの形態

ここで $F(l_c/l)$ は繊維の長さに関する係数であり、繊維の平均長さ l が臨界長さ l_c より長い場合は $1 - l_c/2l$ 、短い場合は $1/2l_c$ で表される。SiC ウィスカは、押出加工により図6⁸⁾に示すように押出方向にほぼ一方に配向するが、折損も起こり長さは短くなる。押出材中のSiC ウィスカの平均直径及び長さは $0.4\mu\text{m}$ 、 $4\mu\text{m}$ であった。SiC ウィスカの臨界長さを計算すると $11\mu\text{m}$ となり、実際のSiC ウィスカは臨界長さに較べるとかなり短くなっていることがわかる。この理論式を用いて計算した引張強度を比較のため図5にあわせて示したが、 $V_f 20\%$ 以下では実験値と理論値により一致がみられる。しかし、押出材中のSiC ウィスカの長さを例えば臨界長さ $11\mu\text{m}$ として計算すると、理論値ははるかに大きくなる。Kelly-Tysonの式がSiC_w/Alにも適用可能かどうかなど厳密な意味では問題もあろうが、SiC ウィスカを分断させない固化成形および塑性加工ができればSiC_w/Alの特性はまだまだ向上することが期

図7 各種アルミニウム合金をマトリックスにしたSiC_w/Al 押出材の引張強度とウィスカ体積率との関係

図8 SiC_w/6061の押出材とビレット材の引張強度の比較

待される。

複合材料の強度上昇のためには、(1)式からも明らかのように、マトリックスに高強度のAl合金を使用することも有効な手段である。図7⁸⁾に示すようにマトリックスが2024, 7075と高強度になるほど複合材料の強度は上昇し、20%SiC_w/7075では引張強度 80kgf/mm^2 が得られる。しかし、高強度のAl合金ほど延性は低くなるため、複合材料内部でマトリック

ス Al 合金のはたす応力集中緩和の能力は低下する。このため、高強度 Al 合金複合材では、高 V_f 側で著しい延性の低下により引張強度は低下する。

一方、SiC whisker が 3 次元ランダム配向状態であるビレット材の引張強度は、図 8⁹⁾ に示すように一方向配向の押出材より小さい。

3.2 弾 性 率

SiC_w/6061 の押出材 (押出比 11) の弾性率は、図 9⁹⁾ に示すように V_f の増加に伴って著しく上昇する。

図 9 SiC_w/6061 の押出材およびビレット材の弾性率と whisker 体積率の関係

図 10 20%SiC_w/2024 押出材の高温引張特性

最も標準的な V_f 20%材の弾性率は $12,000 \text{ kgf/mm}^2$ で比弾性率にすると $4.3 \times 10^9 \text{ mm}$ となり、代表的な Al 合金 (7075) 及び Ti 合金 (Ti-6Al-4V) の 1.7 倍となる。比弾性率は、鋼, Al 合金, Ti 合金など金属材料ではその種類によらず約 $2.6 \times 10^9 \text{ mm}$ でほぼ等しいので、SiC whisker の複合化による比弾性率向上は SiC_w/Al の魅力ある優れた特徴である。SiC whisker の弾性率 $59,300 \text{ kgf/mm}^2$ ¹¹⁾ を用いて、Cox¹²⁾ により提唱されている弾性率に対する複合則により理論値を計算すると実験値よりやや大きくなる。SiC whisker の弾性率については Petrovic ら¹¹⁾ の測定でも $36,800 \sim 90,800 \text{ kgf/mm}^2$ とバラツキが大きく、理論値と実験値の比較は難しい。ちなみに理論値と実験値の整合性が得られるように SiC whisker の弾性率を逆算すると $43,000 \text{ kgf/mm}^2$ の値が得られた。SiC whisker が 3 次元ランダム配向状態であるビレット材の弾性率を押出材と比較して図 9 に示す。引張強度の場合と同様、ビレット材の弾性率は押出材よりも小さい。

3.3 高 温 強 度

SiC_w/Al に期待される特性の一つに耐熱性がある。図 10 は 20%SiC_w/2024 押出材の高温引張性質である。高温強度はマトリックス Al 合金の 1.6~1.9 倍に向上する。なお、300°C では急激に強度低下が起こるが、それと同時に延性も回復し、このことが各種塑性加工を可能にしている。

3.4 疲 労 強 度

SiC whisker の複合化による強度上昇に伴って疲労強度も著しく向上する。20%SiC_w/2024, 6061, 7075 押出材の回転曲げ疲労強度 (10^7) は、それぞれ 25, 22, 29 kgf/mm^2 でマトリックス Al 合金に比較して約 1.5 倍に向上する。

3.5 耐 摩 耗 性

SiC whisker は硬度が高いため複合化することにより耐摩耗性も大幅に向上する。一例として、22% SiC_w/6061 の比摩耗量はマトリックス Al 合金に比べて 1/10 以下に低減された。

表 1 物理的性質

	20% SiC Whisker/ 6061-T6 Extruded Rod	6061-T6
Density g/cm^3	2.79	2.70
Coefficient of Thermal Expansion $25 \sim 180^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$	14.8×10^{-6}	24.0×10^{-6}
Specific Heat $\text{J/g} \cdot \text{K}$	0.839	0.896
Thermal Conductivity $\text{W/m} \cdot \text{K}$	143	167

図 11 TIG 溶接継手の断面マクロ組織

3.6 物理的性質

物理的性質の一例を表 1⁶⁾に示す。密度は Al 合金と同程度である。Al 合金は線膨張係数が他の金属に較べて大きく、これがしばしば問題となるが、20% SiC_w/6061 押出材ではマトリックス Al 合金の約 60% の $14.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ で、ステンレス鋼よりも小さい。V_r を上げたり、AC8A のような低線膨張係数の合金をマトリックスに使用すると、さらに線膨張係数の小さい材料を得ることができる。これに対して Al 合金の熱伝導性の良さは複合化しても保たれており、熱伝導率はマトリックス Al 合金より約 15% 低下するにとどまっている。

4. 接 合

SiC_w/Al を構造物として適用する際には、複合材料どうしあるいは複合材料と従来金属との接合が必要である場合がある。SiC_w/Al の TIG, MIG 溶接については Ahearn ら¹³⁾が検討し、複合材部と熔融金属は混ざり合いにくい³⁾が、Al はよく溶融しており、接合は可能であることを報告している。

著者らは SiC_w/Al と Al 合金の接合を TIG 溶接法と摩擦溶接法により試みた⁷⁾。TIG 溶接は断面マクロ組織の一例を図 11 に示したように可能であるが、溶接部の健全性には改善の余地がある。ただし、20%SiC_w/6061 と 6061 の継手引張試験では破断位置は Al 合金の熱影響部で、溶接部は Al 合金熱影響部以上の強度であった。また、摩擦溶接も可能でその断面マクロ組織を図 12 に示す。TIG 溶接と同じ材料で摩擦溶接した継手の引張強度は 30kgf/mm² で、これは 6061-T6 の強度にほぼ匹敵する。つまり、摩擦溶接は SiC_w/Al に適した溶接法の一つと言える。

図 12 摩擦溶接継手の断面マクロ組織

5. む す び

SiC_w/Al の粉末冶金法による製造方法と開発材の優れた機械的特性及び接合例を紹介した。本材料が新素材の一つとして市民権を得るためには、コスト低減、非破壊検討法を含めた品質保証技術の確立など、なお未解決の課題もあるが、本材料は軽量化、高性能化など時代の要請に十分にこたえうる新材料の一つとして期待できる。

参 考 文 献

- 1) A. P. Divecha, S. G. Fishman and S. D. Karmarkar : J. Metals, No. 9(1981), 12.
- 2) 福永, 合田, 田端 : 材料, 34(1985), 64.
- 3) F. Kloucek and R. F. Singer : 31st International SAMPE Symposium April, (1986), 1701.
- 4) 軽金属複合材料特集号 : 軽金属, 38, No 10 (1988).
- 5) 複合材料特集号 : 鉄と鋼, 75, No 9 (1989).
- 6) 大内, 森本, 南出 : 神戸製鋼技報, 37 (1987), 31.
- 7) 森本, 米田 : 溶接学会 第 111 回溶接法研究委員会資料 (1987).
- 8) 森本, 大内 : 軽金属, 38 (1988), 658.
- 9) 森本, 大内 : 鉄と鋼, 75 (1989), 1541.
- 10) A. Kelly and W. R. Tyson : J. Mech. Phys. Solids, 13 (1965), 329.
- 11) J. J. Petrovic, J. V. Milewski, D. L. Rohr and F. D. Gac : J. Mater. Sci., 20 (1985), 1167.
- 12) H. L. Cox : Brit. J. Appl. Phys., 3 (1952), 72.
- 13) J. S. Ahearn, C. Cooke and S. G. Fishman : Metal Construction, April (1982), 192.