マトリックスに埋め込まれた状態での繊維強度を考慮した
SiC/Al 合金複合材の引張強度*福永秀春^{*1}, 魯云^{*2}Tensile Strength of SiC/Al Alloy Composite Wires Considering Strength
of Fiber Embedded in Matrix

Hideharu FUKUNAGA and Yun LU

In the present study, three kinds of composite wires of continuous SiC (Nicalon)-fiber-reinforced Al alloys, pure-Al, Al-5.7 %Ni and Al-4.0 %Cu, were employed for tensile tests. The strength of the matrix was changed by heat treatment to check the relationship between the tensile strength and the matrix strength. The strength of composite wires was calculated by the conventional rule of mixture. The results showed that the effect of matrix strength on the composite strength could not be predicted as it was. The rule of mixture was modified to relate reasonably well with matrix strength by determining the critical fiber length. The calculated strength of composite wire based on the devised rule of mixture was in good agreement with experimental results. It has been demonstrated that the matrix strength makes the fiber increase in strength by decreasing the critical fiber length.

Key Words: Composite Wire, Fiber-reinforced Metal, Tensile Strength, Rule of Mixture, SiC-fiber-reinforced Al Alloy, Weibull

1. 緒 言

強化繊維およびマトリックスのそれぞれ固有の強度を用いて複合材料の強度を予測することができれば、大変都合が良い。従来のいわゆる複合則は繊維の強度と繊維破断時のマトリックスの応力にそれぞれの存在割合を乗じて、加算したものであり、単純で物理的意味が明瞭であるため、しばしば複合材料の強度の予測式として用いられている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

FRM (Fiber Reinforced Metals) についても、その材料をなんらかの複合プロセスで製造したとき、達成すべき強度の目標値とされることがある⁽⁶⁾。しかし、この複合則は2本棒モデル、すなわち、繊維とマトリックスとの間の接合力が全く考えられていない状態でさえ成立する性格のものであり、この意味においてマトリックスの寄与を取り入れていないことが欠陥の一つである。また、この複合則を使うとき、繊維の強度として、平均値を用いるか、束強度を用いるか、また繊維強度のゲージ長さをいくらすとするかについて、決定する根拠を欠き、任意の要素が多いことも問題である。

もとより破壊強度は複合組織に敏感であり、正確な破壊強度を予測することは困難であるが、この研究ではマトリックスの強度が繊維の臨界長を変化させ、結果として繊維強度が変わると考え、従来の複合則を修正して、脆性繊維強化延性マトリックス FRM の強度の計算式を提案した。続いてマトリックスの強度を変化させた SiC/Al 合金複合材に適用したところ、この修正した計算式がマトリックスの強度の寄与を適正に表すことが認められたので報告する。

2. マトリックスに埋め込まれた状態での
繊維強度と複合則への適用

脆性繊維が延性マトリックスに埋め込まれ、良好な界面接合を有する FRM を想定する。連続繊維が引張荷重方向に平行にはいつているとき、従来の複合則では、繊維、マトリックスおよび複合材のひずみが等しいとして、複合材の強度 σ_c は次式で表されている。

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \cdots \cdots (1)$$

ここで、 σ_f は繊維の強度、 V_f は繊維の体積含有率、 σ_m は繊維の破断ひずみにおけるマトリックスの応力である。従来、 σ_f については繊維束の強度⁽⁴⁾、バージン単繊維の平均強度⁽³⁾ あるいは抽出繊維の平均強度⁽⁵⁾ を用いたりして FRM の強度を予測していたが、こ

* 原稿受付 平成3年5月15日。

*1 正員、広島大学工学部 (〒724 東広島市西条町鏡山 1-4-1)。

*2 正員、広島大学大学院。

では FRM が破断する直前に繊維が受け持つことができる強度を考える。繊維がマトリックスに埋め込まれており、界面でマトリックスから荷重が伝達されているとして、式(1)を σ_m で偏微分すると次式が得られる。

$$\frac{\partial \sigma_c}{\partial \sigma_m} = \frac{\partial \sigma_f}{\partial \sigma_m} \cdot V_f + \sigma_f \cdot \frac{\partial V_f}{\partial \sigma_m} + (1 - V_f) - \sigma_m \cdot \frac{\partial V_f}{\partial \sigma_m} \quad (2)$$

FRM が与えられたとき、明らかに $\partial V_f / \partial \sigma_m = 0$ であるが、 σ_f は製造時の繊維の劣化およびマトリックスの荷重伝達能に依存すると考えられるから、 $\partial \sigma_f / \partial \sigma_m \neq 0$ と考えなければならない。言い換えれば、マトリックスに埋め込まれた状態での σ_f の値をとりあげる必要がある。

脆性繊維の強度のばらつきはワイブル分布によってよく表され、そのとき破壊確率 $F(\sigma)$ およびその平均強度 σ_f はそれぞれ、式(3)および式(4)となる。

$$F(\sigma) = 1 - \exp \{-L/L_0(\sigma/\sigma_0)^m\} \quad (3)$$

$$\sigma_f = \sigma_0(L/L_0)^{-1/m} \Gamma(1+1/m) \quad (4)$$

ここで σ_0 は尺度母数、 m は形状母数で、 L および L_0 はそれぞれ、対象とするゲージ長さおよび形状母数を推定するときのゲージ長さである。

繊維とマトリックス界面がよく接合された FRM 内の繊維は、たとえ切断されていてもその長さが臨界長さ以上であれば、その繊維強度を最大限に発揮できる。ここで臨界繊維長さ L_c を求めるために、SiC/Al 合金 FRM の破断ひずみはおおむね 1.5～数%であるから、破断直前にはマトリックスは十分降伏しているため、Kelly-Tyson の式を利用することができる。

$$L_c = d_f \cdot \sigma_f(L_c) / 2\tau_m \quad (5)$$

ここで d_f は繊維直径、 σ_f は L_c の長さの繊維強度、 τ_m はマトリックスのせん断強さである。式(5)におい

て、脆性繊維の強度分布はワイブル分布に従うと仮定したので、 L_c 長さの脆性繊維の強度は式(4)を用いて与えられる。

$$\sigma_f(L_c) = \sigma_f(L_f) \cdot (L_c/L_f)^{-1/m_f} \quad (6)$$

式(5)と式(6)から L_c が次式のように求められる。

$$L_c = [\sigma_f(L_f) \cdot L_f^{1/m_f} \cdot d_f / 2\tau_m]^{1/(1+1/m_f)} \quad (7)$$

ここで L_f 、 m_f および $\sigma_f(L_f)$ は、それぞれ、FRM から抽出した繊維の引張試験におけるゲージ長さ、形状母数および引張強さのワイブル平均値である。また、 $\sigma_f(L_c)$ を求めると次式となる。

$$\sigma_f(L_c) = \sigma_f(L_f) \times \{L_f / [\sigma_f(L_f) \cdot L_f^{1/m_f} \cdot d_f / 2\tau_m]^{1/(1+1/m_f)}\}^{1/m_f} \quad (8)$$

式(8)によれば $\sigma_f(L_c)$ はマトリックス強度の関数となり、FRM の中に埋め込まれた状態での繊維に期待できる強度である。したがって、式(1)の σ_f の代わりに $\sigma_f(L_c)$ を代入することによって、次式によりマトリックス強度を取り入れた FRM の強度の計算式を導くことができる。

$$\sigma_c(L_c) = \sigma_f(L_c) V_f + \sigma_m(1 - V_f) \quad (9)$$

この式では図1のように、 L_c ゲージ長さをもつ FRM の強度の最大値を与えると考えることができる。一般に L_c は小さいので、実験値と比較するために試験ゲージ長さに換算する必要がある。脆性繊維強化延性マトリックス FRM の破壊確率は再びワイブル分布によって比較的によく整理されるので、ゲージ長さが L_a になれば FRM の強度は次式によって計算される。

$$\sigma_c = (L_a/L_c)^{-1/m_a} \sigma_c(L_c) \quad (10)$$

ここで、 m_a は複合材の強度の形状母数であり、引張試験によって求めなければならない値である。

3. 試料および実験方法

3.1 試料および熱処理 試料には約 500 本の連続 SiC 繊維束に Al 合金を溶浸して作られた直径 0.5 mm のプリフォームワイヤ（日本カーボン製）を用いた。マトリックスは純 Al、Al-5.7%Ni および Al-4.0%Cu の 3 種類である。以下、これらの FRM をそれぞれ、SiC/pure-Al、SiC/Al-5.7 Ni および SiC/Al-4.0 Cu と記する。熱処理はいずれもアルゴン雰囲気中 200°C～600°C の温度範囲で行い、加熱保持時間は 10 min とした。加熱保持後、ただちに水に入れマトリックスの組織を固定させた。マトリックスの硬度はビッカース微小硬度計を用いて荷重 25 g で 20 点を測ってその平均値をマトリックスの硬度とした。

3.2 引張試験 プリフォームワイヤの引張試験

図1 想定した繊維破断の様子

はインストロン形引張試験機にエアーチャックを取付けて行い、荷重はロードセルの信号を動ひずみアンプを介してペンレコーダに記録した。試験条件としてゲージ長さは 50 mm、引張速度は 0.5 mm/min を採用した。試料本数は各試験条件につき 40 本とした。

抽出繊維のワイブル母数はプリフォームワイヤのマトリックスを 10%NaOH 水溶液で溶かして抽出した単繊維の引張試験によって得た。このとき、ゲージ長さは 10 mm、引張速度は 0.2 mm/min とし、試料本数を各 60 本とした。

3・3 高温引張試験 プリフォームワイヤの外側に内径 4 mm、長さ 150 mm の環状電気炉 (5°C 以内均熱帯 60 mm、その内 50 mm は $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内) を取付け、大気雰囲気中で高温引張試験を行った。また高温引張試験用のプリフォームワイヤは熱処理を施さなかった。なお、引張試験前の加熱保持時間は 10 min とした。

そのほかの引張試験機および試験条件は 3・2 節と同じである。

表 1 SiC/pure-Al の高温引張試験の結果

T °C	n	σ GPa	σ_b GPa	m
R.T	40	1.098	1.115	35.38
200	55	1.059	1.077	34.00
300	45	0.998	1.019	23.99
400	58	0.891	0.914	21.26

表 2 SiC/Al-5.7 Ni の高温引張試験の結果

T °C	n	σ GPa	σ_b GPa	m
R.T	35	1.270	1.290	42.05
300	40	1.170	1.188	47.58
400	40	1.074	1.091	33.80

図 2 プリフォームワイヤの平均引張強度と熱処理温度 ($G, L=50$ mm)

4. 実験結果

4・1 プリフォームワイヤの強度 図 2 は熱処理によりマトリックスの強度を変化させた 3 種類のプリフォームワイヤの平均強度と熱処理温度の関係を示す。この図から 400°C まで 3 種類の試料の平均強度はほとんど変化していないことがわかる。熱処理温度が 400°C を超えるとそれぞれ挙動が異なる。すなわち、SiC/pure-Al と SiC/Al-5.7 Ni の平均強度は低下し、SiC/Al-5.7 Ni の平均強度の低下が SiC/pure-Al のそれより大きい。一方、SiC/Al-4.0 Cu の平均強度は温度とともに上昇している。熱処理を受けた SiC/Al 合金プリフォームワイヤの平均強度の変化はすでに報告したように⁽⁵⁾、熱処理によるマトリックスの強度変化に強く関係し、マトリックスが強くなるとプリフォームワイヤも強くなる。図 3 は 3 種類のプリフォームワイヤの強度のワイブル形状母数を熱処理温度の上昇に伴いプロットしたものである。マトリックスの強度が低くなると m 値は低くなり、マトリックスの強度が高くなると m 値は高くなる傾向にある。

表 1 および表 2 は SiC/pure-Al と SiC/Al-5.7 Ni の高温引張試験の結果である。ここで、 T は試験温度、

図 3 プリフォームワイヤの平均引張強度のワイブル形状母数と熱処理温度

n は試料本数, σ は平均引張強度, σ_0 および m は, それぞれ, ワイブル尺度および形状母数を表わす。これから試験温度が高くなるにつれプリフォームワイヤの平均強度が低くなることがわかる。また, 試験温度が高くなるとマトリックスの強度は低下するが, このとき, m 値が減少することが認められる。

4.2 マトリックスの硬度と抽出繊維強度 図4はマトリックスの硬度の測定結果である。この図から SiC/pure-Al のマトリックスは熱処理を受けても硬度の変化がなかったことがわかる。一方, SiC/Al-5.7 Ni と SiC/Al-4.0 Cu の硬度には 400°C までの変化は少なかったが, 400°C を超えると SiC/Al-5.7 Ni の硬度が低下し, SiC/Al-4.0 Cu の硬度は大きく上昇した。マトリックス硬度の変化は熱処理による組織と関連している⁽⁵⁾。このマトリックスの硬度変化はマトリックスの強度変化に比例していると考え, この強度変化のプリフォームワイヤ強度への寄与について検討したい。図5は抽出繊維の引張試験結果である。この図からわかるように熱処理の加熱時間が短かったため繊維の平均強度の低下はさほど多くない。なお, この短時間の熱処理加熱により抽出繊維の強度のワイブル形状母数は熱処理温度に対しあまり変化しなかった。表

図4 マトリックスの硬度と熱処理温度

図5 抽出繊維の引張強度 ($G, L=10$ mm)

3には抽出繊維強度のワイブル尺度母数 m の平均値を示す。

また, 複合則での計算には抽出繊維強度を用いるため, その平均強度として図5の回帰により決定した次の式を用いる。

SiC/pure-Al :

$$\sigma_{f(L_f)} = 1.894 + 6.432 \times 10^{-4} T - 1.783 \times 10^{-6} T^2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

SiC/Al-5.7 Ni :

$$\sigma_{f(L_f)} = 2.263 + 3.522 \times 10^{-4} T - 1.707 \times 10^{-6} T^2 \quad \dots\dots\dots (12)$$

SiC/Al-4.0 Cu :

$$\sigma_{f(L_f)} = 2.268 + 9.384 \times 10^{-5} T - 6.788 \times 10^{-7} T^2 \quad \dots\dots\dots (13)$$

5. 複合則の適用および考察

図6は式(7)を用いて計算した平均繊維臨界長さ L_c とマトリックスのせん断強さのプロットである。計算には繊維直径がレーザ外径測定器で測定した平均値の 15 μ m を用い, 単繊維強度は抽出繊維の平均強度の回帰式(11)~(13)で計算したものを用いた。この図からマトリックスのせん断強さが強くなると L_c が短くなることがわかる。式(6)により L_c が短くなるとマトリックスに埋め込まれた強化繊維の平均強度が大きくなる。図7は修正した複合則の式(9)と式(10)および従来の複合則の式(1)による計算結果である。図からわかるように修正した複合則による FRM の強度は強くマトリックスの強度の影響を受けているが, 従来

表 3 抽出繊維強度のワイブル形状母数

試 材	SiC/pure-Al	SiC/Al-5.7Ni	SiC/Al-4.0Cu
m	3.48	4.48	4.50

図6 強化繊維の臨界長さに及ぼすマトリックスのせん断強さ

の複合則はあまりマトリックスの強度の影響を受けないことがわかる。修正した複合則と従来の複合則の大きな違いは、従来の複合則がマトリックスに埋め込まれている繊維の状態を考慮していないためである。図 8 および図 9 は熱処理を受けたプリフォームワイヤの引張試験および高温引張試験から得られたワイブル母数を用いて修正した複合則による計算値、実験値ならびに従来の複合則による計算値を示したものである。

図 7 複合則および修正した複合則による複合材の強度 ($G, L=50 \text{ mm}$)

図 8 複合則および修正した複合則による熱処理を受けたプリフォームワイヤの引張強度と実験値 ($G, L=50 \text{ mm}$)

計算にマトリックスのせん断強さとして供試状態で pure-Al: 30 MPa, Al-5.7 Ni: 65 MPa および Al-4.0 Cu: 75 MPa を用いた。なお、熱処理によるマトリックスの強度変化はマトリックスの硬度の変化と比例するとして図 4 の結果を用いて計算し、せん断強さは引張強さの半分と仮定した。また、高温でのマトリックスせん断強さについては室温では pure-Al: 30 MPa, Al-5.7 Ni: 65 MPa, 融点では $\tau_m=0$ とし、せん断強さと温度を直線関係として取扱った。式(10)の換算に用いた m_a は試験結果の回帰による値(例えば図 3)を用いた。図 8 および図 9 から修正した複合則による計算値は実験値よりやや高いが、傾向としては実験値とかなりよく一致している。一方、従来の複合則による計算値は複合材へのマトリックスの強度の寄与がよく評価されていないことを指摘することができる。なお、修正した複合則による計算値と実験値が完全に一致していないのは、計算に用いた最終の破断モデルは非累積的な破断であるが、実際の複合材の破断は累積的な破断を伴っていること、また、切れている繊維による応力集中を考慮していないことが主な原因であると考えられる。また、実験に用いたプリフォームワイヤに関しては強化繊維が必ずしも一方向に整理していないことも不一致の一因と考えられる。熱処理を受けたプリフォームワイヤの強度変化は上述の計算値と実験値の比較により、マトリックス強度の複合材強度への影響はマトリックスが強くなると、マトリックスに埋め込まれた繊維の臨界長さが短くなることによって繊維の荷重負担能力が上昇する結果として現れ

図 9 複合則および修正した複合則によるプリフォームワイヤの高温引張強度と実験値 ($G, L=50 \text{ mm}$)

たとえられる。複合材の引張強度へのマトリックスの強度の寄与についてはシアラグ法によるモンテカルロシミュレーション結果も本研究と同じ傾向となっている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

上述の修正した複合則による計算と本実験の比較からマトリックスに埋め込まれた強化繊維の状態を考慮して複合則を計算するのが合理的であると思われる。しかし、ここに提案した計算式は、 $\sigma_{f(L_f)}$ と m_a が実験によって決定しなければならない問題を含んでいる。なお、セラミック繊維強化 Al 合金複合材の強度へのマトリックス強度の寄与はマトリックスの強度変化による繊維の強化効果の変化として考えることができる。

6. 結 言

本研究ではマトリックスに埋め込まれた繊維の強度はマトリックスの強度の関数と考え、従来の複合則の修正を試みた。さらに、熱処理を受けたプリフォームワイヤ SiC/pure-Al, SiC/Al-5.7 Ni および SiC/Al-4.0 Cu の引張試験結果と SiC/pure-Al および SiC/Al-5.7 Ni の高温引張試験結果に適用し、従来の複合

則と比較した。その結果、以下のことがわかった。

(1) SiC/Al 合金プリフォームワイヤの強度へのマトリックス強度の寄与はマトリックスによる繊維の強化効果、すなわちマトリックスに埋め込まれた状態での繊維強度の変化によるものである。

(2) SiC/Al 合金プリフォームワイヤの強度に関し、修正した複合則による計算値は傾向として実験値とかなりよく一致した。これより、セラミック繊維強化 Al 合金複合材の強度については従来の複合則にマトリックス強度の変化による繊維強度の変化を取り入れたほうがよい。

文 献

- (1) 福田・邊, 複合材の力学序説, (1989), 218, 古今書院.
- (2) D.ハル (宮入・池上・金原訳), 複合材料入門, (1984), p. 116, 培風館.
- (3) 例えば, 山森・ほか 2 名, 軽金属, 40-11 (1990), 845-849.
- (4) 合田・福永, 鉄と鋼, 75-9 (1989), 1761-1768.
- (5) 福永・ほか 2 名, 機論, 57-535, A (1991), 536-541.
- (6) 手塚・ほか 3 名, 文献(4)の 1470-1477 ページ.
- (7) 落合・長村, 文献(4)の 1730-1737 ページ.
- (8) K. Goda and H. Fukunaga., *Comp. Sci. and Tech.*, 35 (1989), 181-193.