アルミニウム-タングステン繊維系複合合金における 繊維のアスペクト比と強度との関係*

三浦 維四** 本間 久夫** 平野 進**

Ishi Miura, Hisao Honma and Susumu Hirano : The Relations between the Aspect Ratio of Fibers and Tensile Strength in Tungsten-Fiber-Reinforced Aluminum Composites. In order to investigate the relations between the aspect ratio of the tungsten fiber and the tensile strength in tungsten-fiber-reinforced aluminum composites, specimens were made by means of a foil metallurgy technique which has already been reported⁽¹⁾. The sandwiches of aluminum foils with the tungsten fibers were changed by rolling reduction. The used fibers were 10, 25, 50, 100 and 200 μ in diameter and their aspect ratios ranged from 15 to 35. The results were as follows :

(1) The tensile strength of the composites increased linearly to the volume fraction of the tungsten fiber in composites, and also increased with the aspect ratio of the tungsten fibers. (2) The tensile strength was higher than that calculated on the basis of Kelly's theory. These results imply that the elastic stress transfer in the fiber plays a more important role in discontinuous fibers, especially with low aspect ratio in composites.

(Received May 29, 1969)

I. 緒 言

繊維強化合金は従来の合金と比較すると、その強化機構が全く異なっている。この型の合金の強化におよぼす因子としては繊維の強さ、繊維の割合などの他に、繊維の整列性、分布状況などが考えられているが、とくに繊維が非連続の形である場合にはアスペクト比（繊維の長さ/直径）が大きく影響することが知られているが、その報告はごくわずかで二、三の例があるだけである^{(2)~(4)}。著者ら⁽¹⁾はいままで金属箔を主原料とし、圧延あるいは圧接法によってタングステン-アルミニウム系複合体を作り、その複合体の引張強さ、クリープ強さなどの機械的性質を調べてきた。本報告では繊維のアスペクト比の影響を調べる目的で前報告⁽⁵⁾と同じく圧延によってタングステン-アルミニウム系複合体を作り、この場合の圧延率を変えることによってタングステン線のアスペクト比を変え、これらの試料について引張強さを調べた結果について述べる。

II. 実験方法および結果

この報告で採用した試験片の作り方、素材は前報⁽⁵⁾で述べたものと同じであり、用いたアルミニウム箔は 7 μ の厚

** 東京医科歯科大学医用器材研究所 (Tokyo Medical and Dental University, Institute for Medical and Dental Engineering, Tokyo)

* 1968 年 5 月軽金属学会高岡大会に発表；金属組織と機械的性質の関係について(第 15 報)

(1) 三浦, 太田, 本間, 佐々木 : 金属学会誌, **30** (1966), 655.

(2) A. Kelly : Proc. Roy. Soc., **A 282** (1964), 63.

(3) A. Kelly and W. R. Tyson : *High Strength Material*, (1964), 578.

(4) D. L. McDanel et al : Trans. Met. Soc. AIME, **233** (1965), 630.

(5) 三浦, 本間 : 金属学会誌, **31** (1967), 475.

さのものである。繊維として用いたタングステン線の直径は 10, 25, 50, 100, 200 μ の 5 種類のものである。タングステン線の配合率は体積にして 10% と 15% のものを作り、タングステン線をアルミ箔の間にはさみ込み、500°C にて数回圧延して複合体を得た。繊維のアスペクト比は 15~35 であり、これは圧延による加工度を変えることにより得られた。圧延加工度は 45~75% である。複合体中の繊維のアスペクト比は 30% 塩酸溶液中でアルミニウムを溶かし、タングステン線を取り出して測定した。

Fig. 1 はこれらの複合体の応力-ひずみ線図を示したものである。図中 7 μ Al と記されているものは 7 μ の厚さのアルミニウム箔のみを圧延して作ったものであり、 $L/d = \infty$ と記されているものは連続繊維を体積割合で 10% (以

Fig. 1 Stress-strain curves of aluminum composites containing various discontinuous tungsten fibers

下すべて体積割合で示し vol% と略す) 含んだものである。図よりタングステン線を同じ割合で含むものではアスペクト比 L/d の値が大きいものの方が引張強さが大きくなる傾向がある。また応力-ひずみ線図は連続繊維の場合に比較してアスペクト比の小さいものの方がアルミニウムマトリックスのそれに近い挙動をするようである。

Fig. 2 は複合体の引張強さと繊維の体積割合の関係を示したものである。連続繊維の場合と同じく、非連続繊維の場合もやはり繊維の割合が増えると引張強さが増えることがわかるが、繊維の直径による違いは Fig. 1 と同様見られず、むしろアスペクト比の大きいものの方が引張強さが高くなる傾向を示している。なお図中に σ'_f で示されているのはこれら複合体の引張試験結果から外挿して得られる繊維自体の強さを表わしている。また σ_m は繊維の破断強さ σ_f のときの伸びに相当する伸びをマトリックスに与えたときのマトリックスの応力である。

Fig. 2 Effect of the amount of tungsten fibers on the tensile strength of aluminum composites containing tungsten fibers with various aspect ratios

Table 1 は複合体に使用した各々の径のタングステン線について複合作製時における圧延加工度、アスペクト比、繊維の強さ σ_f などについてまとめたものである。 l_c/d は臨界アスペクト比で、 m は繊維の全長 L に対する臨界伝達長さ (critical transfer length) である。繊維の強さ σ_f は直径が同じものでは複合作製のための圧延加工度が大きいものの方が小さく、直径のちがうものとの違いははっきりと認められていない。

Table 1 Properties of reinforcing tungsten fibers

Diameter (μ)	Reduction (%)	Aspect ratio (l/d)	σ_m (kg/mm ²)	σ_f (kg/mm ²)	σ'_f (kg/mm ²)	V_f crit (%)	m (l/L)	(l_c/d)
200	65	23	6.6	65	49	2.8	0.43	9.8
	75	15	6.6	41	29	4.6	0.41	6.2
100	55	35	6.3	86	73	2.3	0.39	13.7
	75	25	6.3	73	55	3.0	0.46	11.6
50	55	25	6.3	73	55	3.0	0.46	11.6
	75	15	6.3	61.5	43	3.8	0.65	9.8
25	50	25	6.3	73	55	3.0	0.46	11.6
	75	15	6.3	61.5	43	3.8	0.65	9.8
15	45	25	6.3	85	64	2.6	0.54	13.5

Fig. 3 は同様に複合体のヤング率と繊維の体積割合について測定した結果である。これはインストロン型引張試験機に差動トランスを応用した精密伸び計によって応力-ひずみ曲線を求め、これからヤング率の値を求めたものである。

Fig. 3 Effect of the amount of tungsten fiber on the Young's modulus of aluminum composites containing tungsten fibers with various aspect ratios

複合体のヤング率 E_c は複合法則 $E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$ で表わされ、繊維量の増加によってヤング率も増加することを示している。なお E_f, E_m はそれぞれ繊維およびマトリックスのヤング率で V_f は繊維の体積割合である。図中 calculated で示された直線は複合法則に基づくもので、 $E_m = 7000 \text{ kg/mm}^2$, $E_f = 45000 \text{ kg/mm}^2$ で計算してある。直径 200μ で連続繊維としてタングステン線を含む複合体和、直径 100μ でアスペクト比が 35 の複合体についてはほぼ複合法則にしたがうが、他のものではヤング率はいずれも下回っていて、これはさきに報告したものにおいても同じような結果が得られている。とくに直径 200μ でタングステンのアスペクト比が 23 の複合体と、 25μ の直径でアスペクト比が 15 のタングステン線を含む複合体においてはヤング率が低く、非連続繊維を含む複合体において

は、そのヤング率はやはり繊維のアスペクト比となんらかの関係があるのではないかと考えられる。

Photo. 1 は試験に供した複合体の横断面の顕微鏡写真で、タングステン線の含有量はいずれも 10 vol% である。丸印に見えるのがタングステン線で、そのまわりに黒く見えるのは、研磨の際にアルミニウムの部分が摩耗したもので、複合体作製の際のタングステンとアルミニウムとの反応層ではない。

σ_f , V_f は繊維の強さと複合体中にしめる繊維の体積割合である。また L は繊維の全長で、 L_c は臨界の繊維長さである。 σ_m は繊維の破断時の伸びに相当する伸びをマトリックスに与えたときのマトリックスの応力である。

この式より L の長さが L_c の 10 倍に相当すると連続繊維による強化の場合の 95% の強化が可能であることが示されている。

このとき臨界アスペクト比、繊維の強さとマトリックス

Photo. 1 Cross-section of Al composites containing 10% W fiber with various diameters

III. 考 察

繊維が連続でなく非連続の場合でも強化が可能であるということは、繊維強化合金の発展にとって大きな発見であった。非連続繊維における強化の考え方はマトリックスから繊維への応力伝播によって研究されてきている。Kelly⁽⁶⁾ はマトリックスから繊維への応力の伝達はマトリックスの plastic flow によって起こると仮定して、1本の繊維にかかる応力分布を簡単な“台形近似”によるモデルとして考えて、よく知られた非連続繊維を含む場合の複合体の引張強さ σ_c を導き出している。すなわち

$$\sigma_c = \sigma_f V_f \left(1 - \frac{L_c}{2L}\right) + \sigma_m' (1 - V_f) \quad (1)$$

のせん断強さの間には $L_c/d = \sigma_f/2\tau$ の関係があり、この式をアスペクト比 $p (=L/d)$ に関係させた式を導くことにする。すなわち $L_c = (\sigma_f d)/2\tau$ を代入すると

$$\sigma_c = \frac{a \sigma_f}{1+a} \left(1 - \frac{\sigma_f}{4p\tau}\right) + \frac{\sigma_m'}{1+a} \quad (2)$$

この式では $V_f = a/(1+a)$ なる形で表わしている。 a はマトリックスの体積割合を 1 とした時の繊維の占める体積を表わすものである。

実際の複合材料においては繊維が長い場合には繊維の中心付近ではマトリックスと繊維との間の変位は少ないことが知られている。最近 Piggott⁽⁷⁾ は繊維の端近くでは Kelly と同じくマトリックスは plastic flow をするが、中心部付近では elastic であると考えたモデルを発表し、そのモデ

(6) A. Kelly and G. Davies : Metall. Rev., 10 (1965), 1.

(7) M. R. Piggott : Acta Met., 14 (1966), 1429.

ルの適合性について計算を行なった。

Fig. 4 は彼の考えたモデルを示したもので、ここでは AOA' においては elastic であり、AB, A'B' においては Kelly と同じく plastic flow によっていると考えられている。Kelly との相異は AOA' の部分についてであり、この部分で破線で示されているのが Kelly の考えたモデルである。この AOA' において Piggott の考えたモデルの方が繊維の応力分布が大きくなっている。ここで繊維にかかる応力を計算してみると、AB のような plastic flow 部分では B から A への応力分布は直線的に増加するので、AB においては繊維にかかる応力はつぎのように表わされる。

$$\sigma_f^* = \left(\frac{2\tau_m}{r} \right) (L - X) + \sigma'_m \quad (3)$$

Fig. 4 Schematic representation of interfacial shear stress (τ) and fiber tensile stress (σ_f) (after Piggott)

つぎに OA においては Fig. 3 でわかるように繊維にかかるせん断応力 τ は τ_m 以下であるので、この部分では Cox⁽⁸⁾ による弾性的な取扱いをして σ_f^* を求めた。すなわち

$$\sigma_f^* = \frac{2l}{r} \tau_m + \sigma'_m + \frac{2\tau_m}{\beta r} \left(1 - \frac{\cosh \beta X}{\cosh \beta (L-l)} \right) \quad (4)$$

ここに r は繊維の半径であり、 β は $\beta^2 = H/E_f \cdot \pi r^2$ で示されるもので、 E_f は繊維のヤング率、 H は $H = 4\pi G / \log [2\pi(a+1)/a\sqrt{3}]$ で、マトリックスの剛性率 G と繊維の体積割合 a に関係するものであることがわかる。

この(4)式の elastic に応力の伝達をうける部分とさきの(3)式の plastic flow によって応力の伝達をうける部分とを合わせると一本の繊維が負担する全応力がわかり、それによって単位長さにかかる平均の応力 σ_f を計算してみると、

$$\bar{\sigma}_f = \sigma'_m + \frac{l}{Lr} \tau_m (2L-l) + \frac{2\tau_m}{\beta^2 r L} [\beta(L-l) \coth \beta(L-l) - 1] \quad (5)$$

一方マトリックスの平均の応力 $\bar{\sigma}_m$ はマトリックスと繊維のひずみが全体として同じであると考え、つぎの式が成立して $\bar{\sigma}_f$ の関数として表わされるようになる。

$$\epsilon = \frac{\bar{\sigma}_m}{E_m} = \frac{\bar{\sigma}_f}{E_f} \quad \text{より} \quad \bar{\sigma}_m = \frac{E_m}{E_f} \bar{\sigma}_f \quad (6)$$

そこで複合体の強さ σ_c を $\sigma_c = (a\sigma_c + \bar{\sigma}_m)/(1+a)$ の式より求めてみる。 $\sigma'_m \approx 2\tau_m$ とすると

$$\bar{\sigma}_c = 2\tau_m \cdot \frac{a + \frac{E_m}{E_f}}{1+a} \left[1 + mp \left(1 - \frac{m}{2} \right) + \frac{1}{n^2 p} (np(1-m) \coth np(1-m) - 1) \right] \quad (7)$$

ここで m は $m = l/L$ でこれは繊維の全長に対する plastic flow によって応力の伝達をうける部分の割合を示すものである。 n は $n = r\beta$ なるもので置換したものであり、 $n^2 = 4G/E_f \log [2\pi(a+1)/a\sqrt{3}]$ で示される。この n は G_f/E_f の平方根に比例するが a にはほとんど無関係で、繊維の体積割合にはそれほど影響されないことを示している。また $n \rightarrow 0$ になる時には elastic な応力伝達が最大になり、 $n = 1.0$ のときには elastic な応力伝達が全くないということになる。またアスペクト比 p については n が 0.1 以下では $p = 100$ 以上で、また $n = 0.03$ では $p = 300$ 以上で複合体の強化の割合が一定となる。

繊維にかかる最大応力 σ_{fmax} は Fig. 4 で示されるように繊維の中心部で生じることが明らかで、この部分でせん断応力はゼロになっている。 σ_{fmax} は(4)式より導かれ、

$$\sigma_{fmax} = 2\tau_m \left[1 + mp + \frac{1}{n} \tanh \frac{np}{2} (1-m) \right] \quad (8)$$

この式を使って(1)式で示される Kelly の繊維の臨界長さ (critical transfer length) L_c との比較を行ってみる。 $m = l/L$ であり、 l は plastic flow によって応力を伝達する部分の長さであるので、Kelly の繊維の臨界長さ L_c とみなすことができる。そのため $L_c = m_c L$ となり、この m_c を臨界応力伝達比と呼ぶことにする。

一本の繊維にかかる最大応力 σ_{fmax} が繊維の破断強さ σ_f に等しい時に破断するのが可能であると考え、 $m_c p = L_c/d = \sigma_f / 2\tau_m$ より(8)式はつぎのように展開できる。

$$m_c p = \frac{\sigma_f}{2\tau_m} = 1 + mp + \frac{1}{n} \tanh \frac{np}{2} (1-m) \quad (9)$$

一般の繊維すなわち臨界伝達長さ (critical transfer length) 以上の長さの繊維では $\tanh(np/2) (1-m) \rightarrow 1$ であるのでつぎの(10)式のように展開される。

$$\frac{m_c - m}{m} = \frac{1 + \frac{1}{n}}{\frac{\sigma_f}{2\tau_m} - 1 - \frac{1}{n}} \quad (10)$$

この式より $\sigma_f / 2\tau_m$ と n が比較的低い場合には elastic な伝達による部分の影響が大きいがわかる。

Fig. 5 は複合体の強さ σ_c をマトリックスの強さ σ_m で除したもので、すなわち複合体による強化の割合を縦軸にとり、横軸には m をとり、繊維の長さすなわちアスペクト比によって強化の割合がどのように変化するか調べたものである。

この場合も直径 100μ のタングステン線について、アスペクト比 p が 25~300 までの範囲で 10 vol%, 15 vol% のタングステン線を含む複合体について調べたが、アスペクト比が大きくなると強化される割合も大きくなるのは当然

であるが、やはりアスペクト比が100以上になると m の値がわずかに大きくなるだけで急激に強化されることがわかる。アスペクト比が25および35のものでは、 m の値の変化によってもそれほど強化の割合は変化していない。なお $m=1$ の場合は全域が plastic flow によって応力が伝達される場合で Kelly の臨界伝達長さ (critical transfer length) に相当するものである。(9)式より計算される臨界応力伝達比 m_c と $p=35$ の場合の試験した複合体の m とはほぼ一致した値となり、この場合はマトリックスの2倍程度まで複合体によって強化されるようになる。

Fig. 5 The relations between strengthening factor (σ_c/σ_m) and the value of m ($m=1/L$, l =plastic stress transfer length, $2L$ =fiber length)

Kelly による理論と Piggott によるものと実験値とを比較したのが Fig. 6 である。これは直径 100μ 、アスペクト比 35 のタングステン線を含む複合体の場合について調べたものである。マトリックスの剛性率は 2700 kg/mm^2 、ヤング率は 7000 kg/mm^2 で、タングステン線のヤング率を 45000 kg/mm^2 として計算した。このときの n は 0.2 であり、繊維の体積割合が変化してもほとんど変化がないのはさきに述べたとおりである。そのため、Piggott の理論式によっても繊維の体積割合が直線的に変化している。10 vol% および 15 vol% のタングステン線を含む複合体では Piggott の理論式によると引張強さは 18.8 kg/mm^2 、 22.0 kg/mm^2 という値となる。この値は非常に高く、連続繊維によって強化された場合を計算してみると、10 vol% で 14.3 kg/mm^2 、 18.3 kg/mm^2 となる連続繊維によって強化されたものよりも大きい原因として、タングステン線のヤング率が複合体制作時に変化しないものとして取り扱った結果と思われる。

一方 Kelly のモデルから計算した複合体の強さはそれぞれ 7.7 kg/mm^2 、 11.2 kg/mm^2 で連続繊維による場合に比べると、アスペクト比が 35 で臨界アスペクト比が 13.7 であるので、連続繊維を含む場合の 61% の強さしか得られないことになる。実際に得られた複合体の強さは 10 vol% のときには 13.2 kg/mm^2 、15 vol% のときには 16.2 kg/mm^2 であり、10 vol% のときには 5.5 kg/mm^2 、15 vol% のときでも 5 kg/mm^2 で Kelly の非連続繊維の理論より上回っていて、連続繊維を含む場合の 90% の割合で強化されている。これは実験上の誤差として取り扱うのには大きすぎる値で、やはり elastic な応力伝達の割合がアスペクト比の小さいものでもかなり大きく作用していると考えるのが妥当であると思われる。

Fig. 6 Comparison for experimental value, and the theoretical values derived from Kelly's and Piggott's theory

IV. 総 括

マトリックスとしてアルミニウム箔を用いて、アルミニウム箔を重ね合わせ、その間にタングステン線を入れて圧延によって接合させ、その圧延加工度を変えることによりタングステン線のアスペクト比を変えた複合体を作製し、これらの複合体について引張試験を行ない、つぎのような結果を得た。

繊維のアスペクト比がかなり小さいものでも強化の効果があり、このことは Kelly の提案しているモデルでは説明不十分と考えられ、このようにアスペクト比の小さい繊維を含む複合体では elastic な応力の伝達が大い役割を果たすのではないかと考えられることを示した。

この研究の遂行に協力した飯島一法君、井筒かはる君に深く感謝の意を表します。