

繊維強化複合材料について

大阪大学工学部冶金学科 教授 山 根 寿 己

1. 緒 言

最近の材料および金属材料関係の学協会では複合材料に関係した研究の発表が多くなり、複合材料分科会を形成している。複合材料を金属と非金属に分けて考えると、金属関係では硬い、あるいはその他の特殊な性質をもつ粒子状の第2相を含有する複合材料が実用上の主流をなしているが繊維強化複合金属は実用の面では未だ大きな比重を占めるに至っていない。一方、非金属の繊維強化複合材料は工業上重要な役割を占めることが多く、例えば繊維強化プラスチック (F.R.P) を用いた舟艇、自動車、航空機および航宇宙体はすでに実用上大きな地位を占めるに至っている。

古典的な有史以来使われている繊維強化複合材料の典型的な例は第1図¹⁾に示すわら、粘土壁であり、鉄筋コンクリートを経て最も新しい材料としてウイスカ強化金属材料があげられる

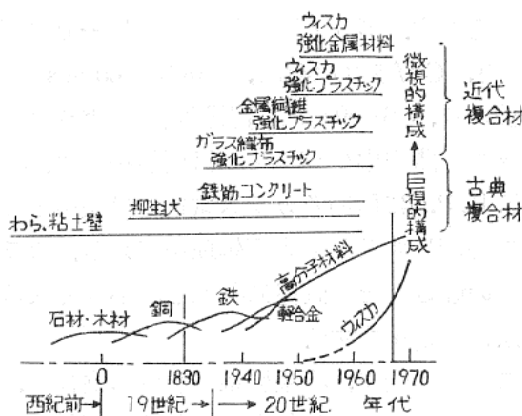


図1 おもな材料の歴史の変遷

ここでは金属を主体にした繊維強化複合材料について述べるが、実用上の重要性から非金属材料についても触れることにする。

2. 繊維強化複合材料として使用される素材

第1表は強化複合材料と母材を成形技術を媒介として示したものである。非金属系の成形は強化プラスチックの製造と考えられ、その詳細はすでにまとめられている²⁾。金属系のものについては後述する。

表1 強化材マトリックスと成形法の関連

強化材	成形技術	マトリックス
金属系 粉・粒状 銅・アルミニウム 繊維状 ステンレス アルミニウム タングステン ベリリウム ウイスカ 鉄...	金属系 Plasma Spraying Diffusion Bonding Electro Deposition Powder Metallurgy Vacuum Casting	金属系 鉄・銀 アルミニウム ホワイトメタル 銅
非金属系 無機材料 ガラス 石綿 炭素 (繊維状) (クロス状) 有機材料 綿、麻 合成高分子繊維 (繊維状) (クロス状)	非金属系 Filament Winding Sandwicheing Lamination Foams Polymeric Adhesives ...	非金属系 無機材料 コンクリート セラミック 有機材料 熱硬化性高分子 不飽和ポリエステル エポキシ 熱可塑性高分子 ナイロン ポリカーボネート

2・1 金属およびセラミック繊維

金属および合金繊維の特長は連続した繊維につくりやすいこと、および金属と合金がもっている物理的、機械的、その他性質を生かすことができることなどであるが、一方金属と合金のもっている欠点はそのまま弱点となる。

複合材料の強化材としての繊維は繊維の形状、寸法のような形状と繊維自身の有する性質により、その有用性が決まる。第2表は主な繊維の性質を示す³⁾。この表で、ウイスカ、特に非金属ウイスカは引張強さが高く、その有効利

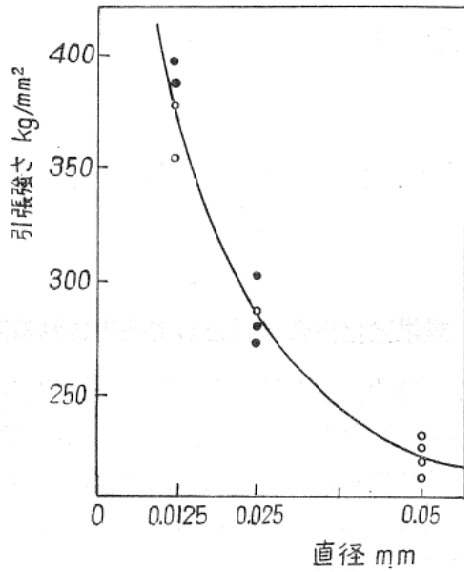


図2 タングステン線の引張強さと直径の関係

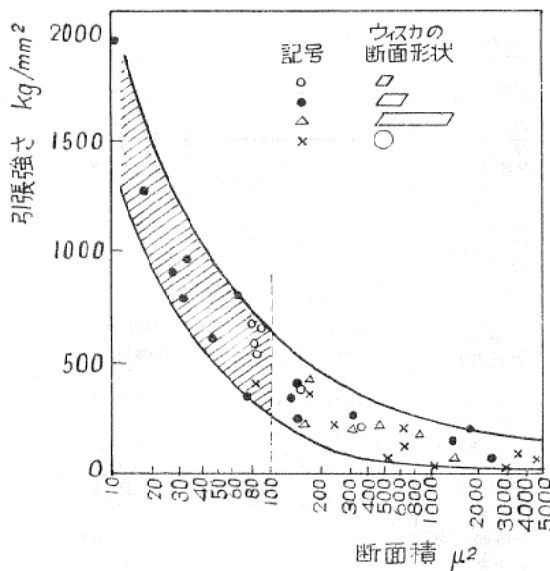


図3 サファイヤウイスカの引張強さと断面積の関係

用は待たれることが明らかである。タングステン繊維の引張強さと直径の関係を第2図⁴⁾に、第3図⁵⁾に $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$ ウイスカの強さと断面積の関係を示す。

このような例から分るように繊維は直径が小さくなると急激に強くなる。この直径が小さくなると何故強くなるかについては未だによく説明はされていないが、直径が小さくなると迂りを容易にする内部欠陥が少なくなるからであるとか、断面積に対する表面積が大きくなるため

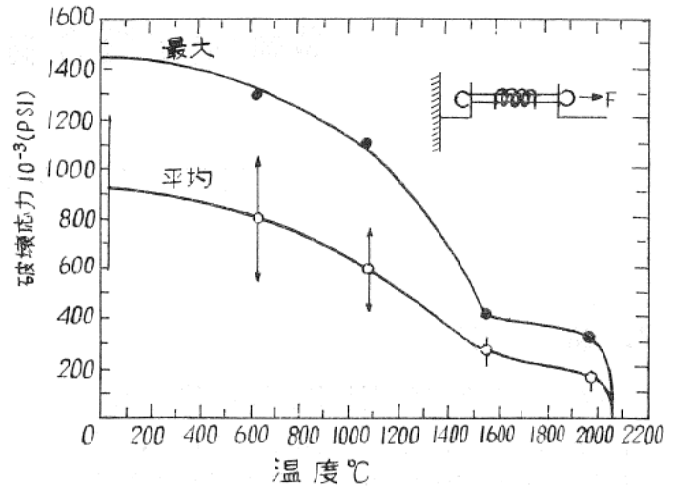


図4 サファイヤウイスカの高温強さ

表面酸化膜と転位の相互作用が増し、強化するという考え⁶⁾が提唱されている。

ウイスカの強度の温度依存性の例としてサファイヤ・ウイスカ ($\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$) の測定結果を第4図に⁷⁾示す。この図から分るように Al_2O_3 ウイスカの破壊強度は大きな温度依存性を有している。また降伏応力と破壊応力は殆ど一致して塑性変形が認められない特長もある。〔100〕方位が長さ方向にある鉄ウイスカの引張強さに対する温度の影響を第3表に示す⁸⁾。

2・2 ガラス繊維

ガラス繊維は F. R. P. の強化のための繊維として重要な役割を果している。ガラス繊維の性質には化学組成、強度には表面状況が大きな影響を示す。第3表⁹⁾のEガラスは一般 F. R. P. 用、Cガラスは耐酸、High modulus は高弾性係数、S-994 は高引張強さのガラスでXガラスは開発中のガラスの目標値を示す。

F. R. P. に用いるガラス繊維には樹脂との結合を強固にするため表面処理を与える。ガラス繊維の強さはその直径に関係し、小さくなると急激に強さをます⁹⁾。

これらの金属、非金属系いずれの繊維も、単独での性質よりも母相との相対的な関係で選定せねばならない。

3. 繊維強化複合材の製造法

第5図は (a) Plasma Spraying, (b) Diffusion Bonding, (c) Electrodeposition, (d) Powder

表2 複合材料用繊維強化材の特性⁽¹⁾

繊維の種類	繊維の材料	融点または軟化点℃	密度 g/cm ³	引張強さ kg/mm ²	比強さ cm×10 ⁶	縦弾性係数 kg/mm ²	比弾性係数 cm×10 ⁶	概算コスト(b) ¥/kg	直径 μ	実用性
連続繊維										
ガラス繊維 (広義)	Eグラス ^(ロ)	700	2.55	350	14	7,400	290	400	10	商品
	Sグラス ^(ハ)	840	2.49	460	18	8,800	350	800	10	商品
	4H-1 ^(ニ)	900	2.66	510	19	10,200	380	—	—	試作品
	溶融石英 (SiO ₂)	1,660	2.19	600	27	7,400	340	24,000	35	試作品
多結晶質 繊維	アルミナ (Al ₂ O ₃)	2,040	3.16	210	6.6	17,600	560	—	—	試作品
	ジルコニヤ (ZrO ₂)	2,650	4.81	210	4.3	35,100	730	—	—	試作品
	炭素(a)	3,650	1.58	180	11	28,100	1,780	440,000	7~10	商品
	炭素(b)	3,650	1.91	220	12	43,600	2,280	—	8~10	商品
	窒化ほう素	2,980	1.91	140	7	9,100	480	140,000	7	商品
複合繊維	ほう素/タングステン	2,300	2.63	280	11	38,600	1,470	400,000	102	商品
	ほう素/溶融石英	2,300	2.35	230	10	37,300	1,590	—	102	試作品
	炭化ほう素/ほう素/ タングステン	2,450	2.35	270	12	43,600	1,850	—	—	試作品
	炭化けい素/タングステン	2,690	3.46	210	6.1	47,100	1,360	1,700,000 ~2,400,000	102	商品
	ほう化チタン	2,980	—	11	—	4,900	—	—	—	試作品
金属繊維	タングステン	3,400	19.3	410	2.0	41,500	220	560,000	13	商品
	モリブデン	2,620	10.2	220	2.3	36,600	360	506,000	25	商品
	Rene 41 ^(ホ)	1,350	8.25	200	2.5	16,900	210	480,000	25	試作品
	鋼	1,400	7.75	420	5.3	20,400	260	40,000	13	商品
	ベリリウム	1,280	1.83	130	7	24,600	1,350	8,000,000	127	商品
ウイスカ										
セラミック ウイスカ	アルミナ (Al ₂ O ₃)	2,040	3.96	2,110	53	43,600	1,100	2,140,000 ~9,500,000	3~10	商品
	酸化ベリリウム (BeO)	2,570	2.85(c)	1,340	47	35,200	1,230	—	10~30	試作品
	炭化ほう素 (B ₄ C)	2,450	2.52	1,410	56	49,200	1,950	—	—	試作品
	炭化けい素 (SiC)	2,690	3.21	2,110	66	49,200	1,540	160,000 ~200,000	<1~3	商品
	窒化けい素 (Si ₃ N ₄)	1,900	3.18	1,410	44	38,700	1,210	—	—	商品
	黒鉛	3,650	1.66	2,000	120	71,700	4,320	—	—	試作品
金属 ウイスカ	クロム	1,890	7.20	910	13	24,600	340	—	—	試作品
	鋼	1,080	8.91	330	3.7	12,700	140	—	—	試作品
	鉄	1,540	7.83	1,340	17	20,400	260	—	—	試作品
	ニッケル	1,450	8.97	390	4.3	21,800	240	—	—	試作品

注 (a) アメリカ製品。 (b) イギリス製品。 (c) 曲げ強さ。 (d) コストは大幅に変わることもあり得る。
 筆者注 (イ) 表の数値は単位換算にもとづく若干の誤差を含む。 (ロ) 電気絶縁ならびに一般 FRP 用ガラス。
 (ハ) 高引張強さのガラス (Owens-Corning Fiberglas 社)。 (ニ) アルミナけい酸ガラスの一種 (Aerojet-General社)。 (ホ) 超耐熱ニッケル合金。

Metallurgy, (e) Vacuum Casting の方法を示す模式図である。第6図¹⁰⁾ はシリカの繊維にアルミを連続的に被覆する方法を、またロールや押し出しにより不連続繊維を回転させて一方に並ばせる加工法を第7図¹¹⁾ に、さらに液体中で流出する際のノズルにおける液体の押し出し力

による速度勾配と粘性と円柱の回転力の関係によって不連続繊維を一方に揃える方法¹²⁾ もある。その他、Foil Metallurgy¹³⁾ と呼ばれる箔と箔の間に繊維を整列させてホットプレスや圧延をする方法、小規模な実験室的方法として、整列させた繊維のすきまにマトリックスとなる

表3 長繊維用ガラス

ガラスの種類		Eガラス	Cガラス	High modulus (YM31A など)	Sガラス (S 994)	Xガラス
化学組成%	SiO ₂	52~56	≈65	45~65	≈65	
	CaO	16~25	≈14	9~13		
	Al ₂ O ₃	12~16	≈4		≈25	
	B ₂ O ₃	8~13	≈5			
	K ₂ O	0~1	≈9	LiO1~6		
	Na ₂ O					
	MgO	0~6	≈3	6~9	≈10	
	BeO			7~12		
	TiO ₂			4~8		
	その他			ZrO ₂ 1~3		
引張強さ kg/mm ²		350	250	350	490	700
引張弾性係数 kg/mm ²		7,400 ~7,700	≈7,000	12,000	8,400 ~8,800	11,260 ~12,600
比重		2.54~2.6	2.49	2.84	2.49	2.49

(注) 引張強さは単繊維に関する値。

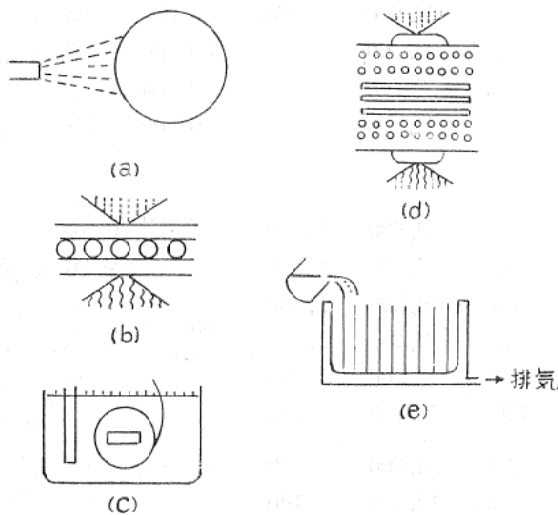


図5 金属系強化材, 金属マトリックス複合材の成形法

溶融金属を浸透させる方法, あるいは共晶合金に利用される一方向性凝固法などがある。

4. 繊維強化材料の機械的性質

繊維強化材料の特長は連続した繊維を用いなくてもその繊維の直径 (d) に対する長さ (l) との比 l/d (アスペクト比という) がある値以上になると連続繊維と同じ強化効果を有するようになることである。これに関する有名な実験は銅をマトリックスとしタンゲステン線で強

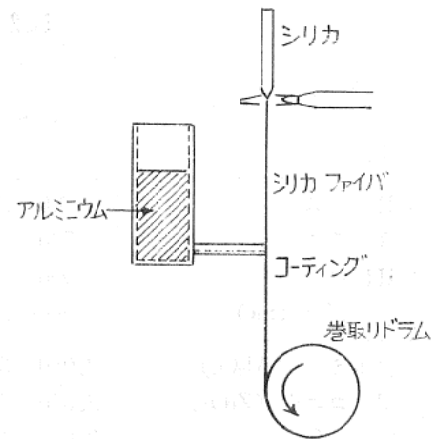


図6 アルミニウム被覆シリカファイバの成形

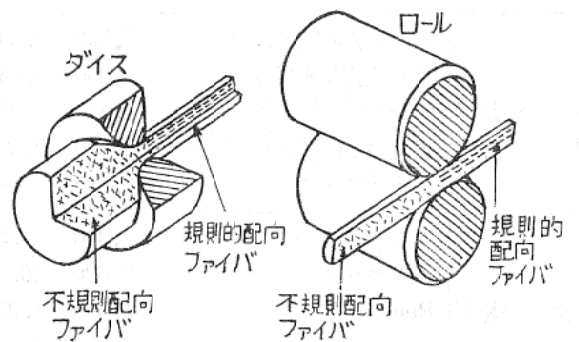


図7 ウィスカまたは短いフイバに規則的な配向を与えるための押しおよび圧延加工法

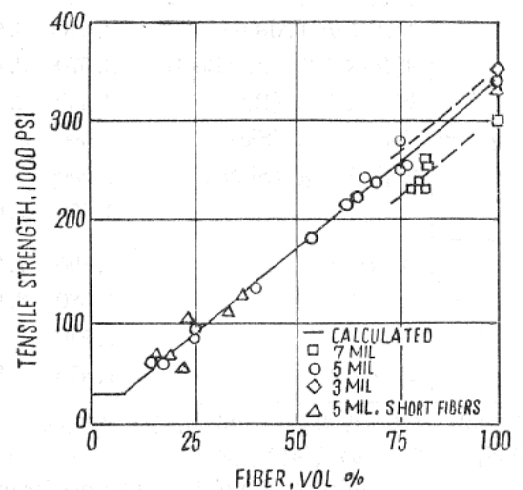


図8 銅-タンゲステンファイバ-繊維強化合金の強さの連続繊維と不連続繊維による違い

化した合金を引張った試験結果¹⁴⁾ (第8図) である。

4.1 繊維強化理論

繊維が連続している場合で, 繊維の長さ方向に引張り応力が作用すれば, 繊維強化複合材の

強度 σ_c は次式¹⁵⁾ で表わされるという。

$$\sigma_c = V_f \cdot \sigma_f + \sigma_m' V_m = V_f \sigma_f + \sigma_m' (1 - V_f) \dots \dots \dots (1)$$

ここで V_f は繊維の体積割合、 σ_f は繊維の強度、 σ_m' は繊維がその最大引張歪まで変形した時母相に生じた引張強さ、 V_m は母相の容積割合である。この(1)式を混合則といい、繊維強化複合材の強度を知るのに極めて有用な式である。(1)式は V_f の値が小さい範囲では成立しない。というのは繊維の量が少な過ぎると繊維が破断してもその歪ではマトリックスは未だマトリックスの切断応力になっていないためである。この繊維強化が有効になる臨界繊維容積割合 V_{crit} は

$$V_{crit} = \frac{\sigma_u - \sigma_m'}{\sigma_f - \sigma_m'} \dots \dots \dots (2)$$

で表わされる。ここで σ_u は母相の引張強さを示す。これらの関係を第9図に示す。

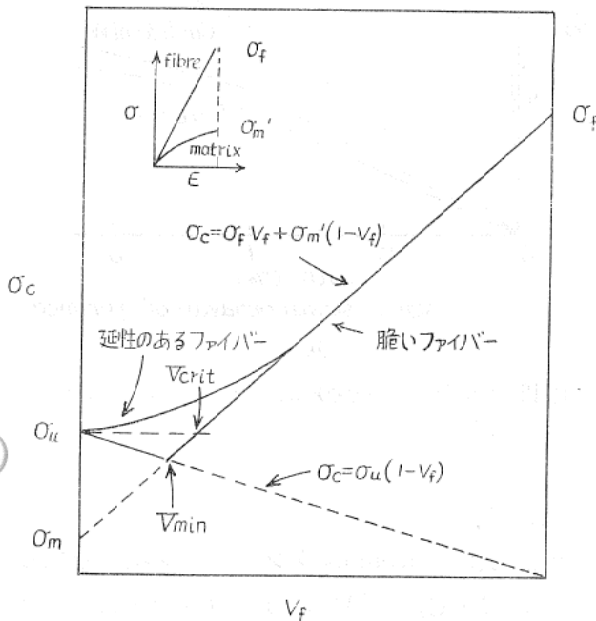


図9 繊維強化複合材の強さと連続ファイバーの容積割合 V_f との理論的關係

連続していない繊維が存在する場合の母相から繊維への応力の伝わり方は Kelly¹⁵⁾ 等によって取扱われている。この取扱いは非常に簡便なので紹介すると、第10図(a)のように引張応力が作用したとする。繊維に作用する引張荷重を

P_z , 剪断応力を τ_z とすると

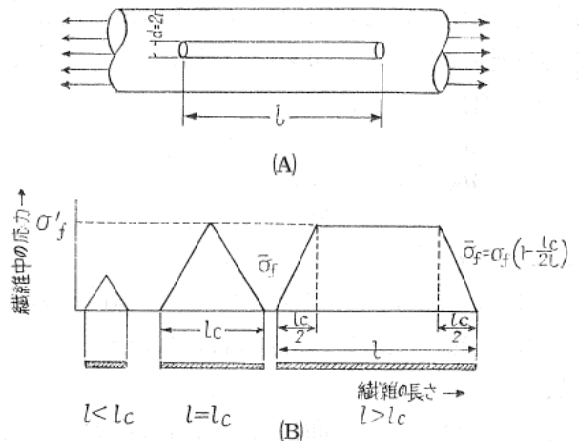


図10 繊維の長さで繊維中の応力分布の關係

$$\frac{dP_z}{dz} = 2\pi r \tau_z \dots \dots \dots (3)$$

母相は降伏応力 τ_m になると一定になるような加工硬化をしない塑性体を仮定すると複合材料が母相以上の引張応力を受けていると母相は τ_m の剪断応力を受けていると考えられる。繊維中の応力を σ_f' とすると(3)式から

$$\sigma_f' = \frac{2\tau}{r} z \dots \dots \dots (4)$$

がえられる。繊維中の歪は複合材の歪 e より大きくなるから σ_z は eE_f より大きくはならない。 σ_f' が繊維の破断応力になると破断がおきるが、破断のおきる最小の長さを臨界長さ l_c で表わすと(4)式から

$$\frac{l_c}{2} = \frac{r\sigma_c}{2\tau} \text{ 又は } \frac{l_c}{d} = \frac{\sigma_f}{2\tau} \dots \dots \dots (5)$$

この l_c/d を臨界アスペクト比という。

繊維中の引張応力 σ_f は第10図(b)のように軸方向に沿って変化する。その平均応力 $\bar{\sigma}_f$ は $l > l_c$ で

$$\bar{\sigma}_f = \sigma_f (1 - (l_c/2l)) \dots \dots \dots (6)$$

連続していない繊維が平行に並んでいると、この平均応力が強化に寄与すると考えられるから(1)式は

$$\sigma_c = \sigma_f V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l} \right) + \sigma_m' (1 - V_f) \dots \dots \dots (7)$$

で表される。 $\beta = 1 - (l_c/2l)$ とおくと β は繊維が連続していないための係数と考えられる。例えば $l = 10l_c$ であれば $\beta = 0.95$ となり連続繊維の95%の強度があることになる。

連続していない繊維への応力伝播に関してはその他の取り扱いがある.^{16)~19)} 林は,^{20),21)} 内部に短い単繊維を含むマトリックス板が繊維方向に一様に引張応力 σ_m をうける場合の応力を2次元的に解析した結果

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_m} = \frac{l}{d} \cdot \frac{1}{\frac{E_m \cdot l}{E_f d} + 1.40} (1 - u^5) \dots (8)$$

ここで $u = \xi / (l/2)$, $0 \leq \xi \leq (l/2)$,

(8)式による計算値は繊維応力と繊維に沿う剪断応力の分布の正しい値と非常によく一致している。

以上述べた繊維方向における引張応力のみを考えるだけでは実際には不十分で繊維強化材料の強度の方向性についても考慮を払う必要がある。これについては文献²⁰⁾によくまとめられているので参照されれば幸である。

4・2 繊維強化複合材料の引張強度

前の項で述べたように繊維強化複合材料の引張強度は強い繊維の体積含有割合によって決ま

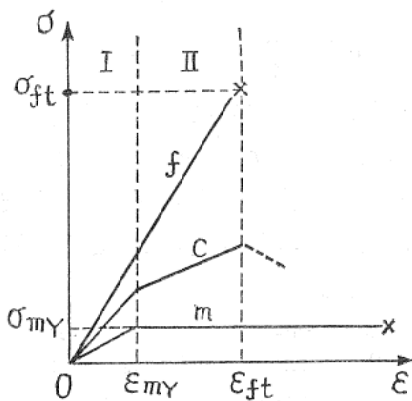
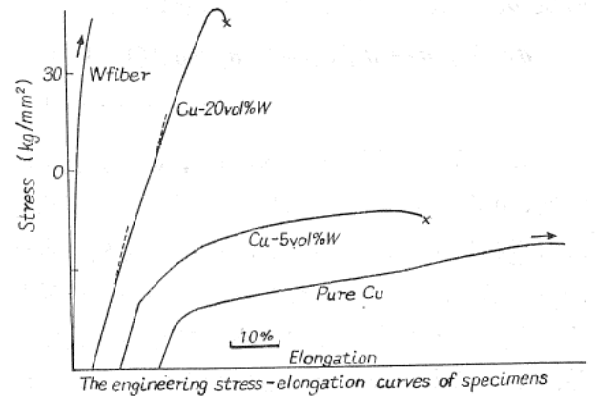


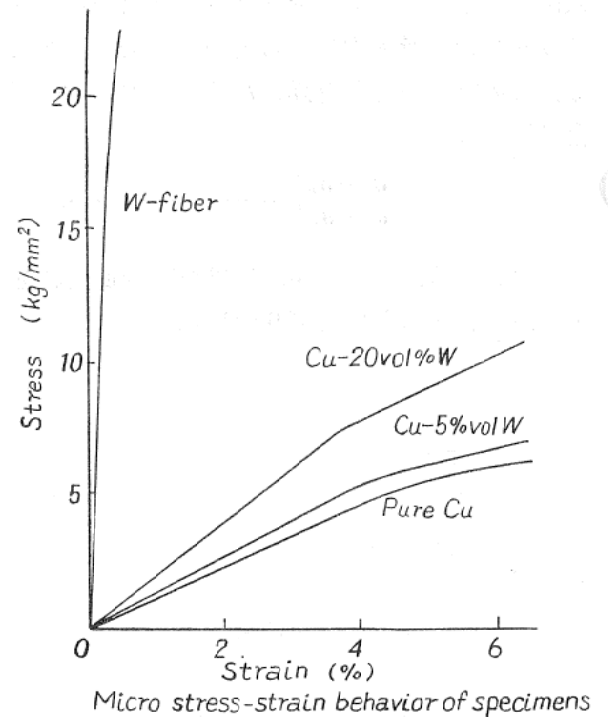
図11 基材およびコンポジットの応力-ひずみ ($\sigma-\epsilon$) 曲線

f: ファイバー, C: 複合材, m: マトリックス

る。繊維強化複合材の応力-歪曲線は第11図に示すように弱いマトリックスの弾性変形領域 I と、マトリックスは塑性領域であるが繊維の弾性変形領域である領域 II と、マトリックスと繊維共に塑性変形をする領域の3つに分けられる。第12図²³⁾は銅をマトリックスとし、これにタングステン線 ($50\mu\phi$) を熔融法で埋込んだ銅基タングステン線強化合金を引張った時の応力-歪曲線で第11図で説明した各領域が明瞭に認



(a)

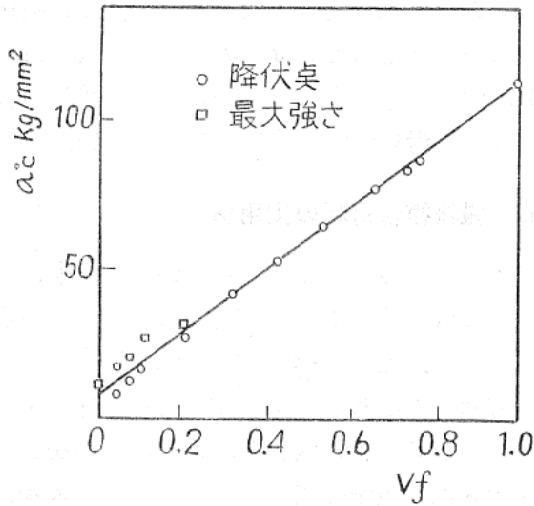


(b)

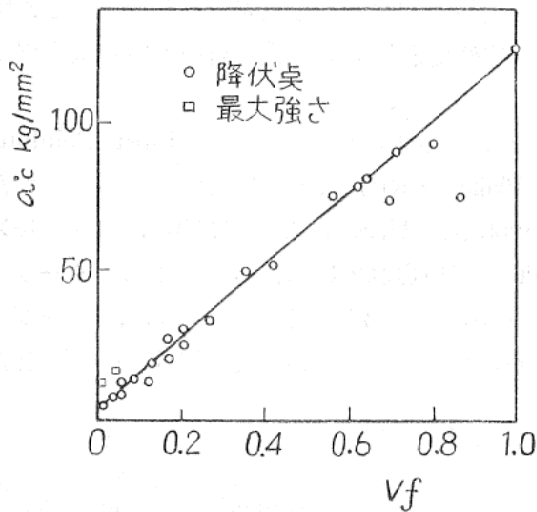
図12 Cu-W線 ($50\mu\phi$) 繊維強化合金の応力-歪曲線

められる。

0.2 および $0.5\text{mm}\phi$ タングステン線で強化した銅の 250°C 、室温における引張強度とタングステン線の含有割合に関する複合則についての測定側を第13図²⁴⁾に示す。以上述べたのは連続繊維についての測定結果であるが、不連続繊維に関しては、アスペクト比 l/d を変えたタングステン線で強化した銅の複合合金の測定結果を第14図²⁵⁾に示す。線の混合割合が同じなれば l/d が小さくなる程、強度は低下し、高温になる程、この傾向は明瞭になる。



(a) 0.2mm W 線にて強化した Gu の 250°C における引張強さ σ_c と V_f



(b) 0.5mm W 線にて強化した Gu の室温特性

図13 複合則に関する実験 (連続繊維)

金属を繊維強化した場合の最大の利点は高温材料として他の種類に見られないような強度を示すことであろう。第15図¹⁾は銀をアルミナのウイスカで繊維強化した合金の降伏応力/密度の比を他の金属合金と比較したものである。超合金でさえも1000°C以上での耐熱材料としては実用は殆ど不可能である。Al₂O₃ ウイスカで強化した銀、ニッケル共に他の金属に比して耐熱材料として優れていることがわかる。第16図²⁾は Al₂O₃ ウイスカで繊維強化した銀が単体の銀に比して高温での強度がどのように違うかを示したものである。繊維強化銀は母相の銀の溶融点の近くまで高温強度を保持出来る。

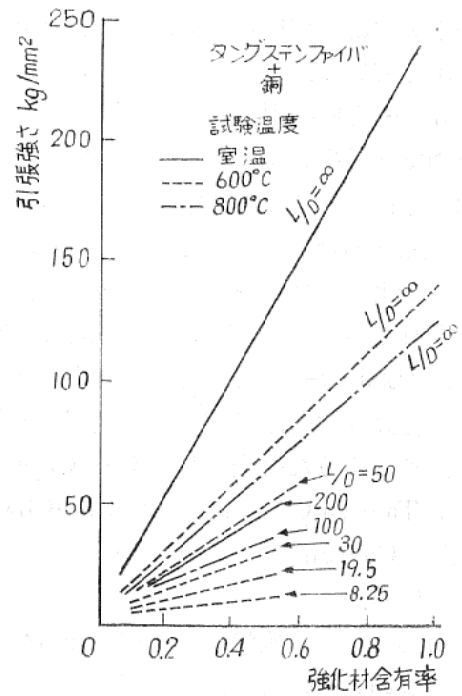


図14 ファイバの長さ、直径比および温度の引張強さにおよぼす影響

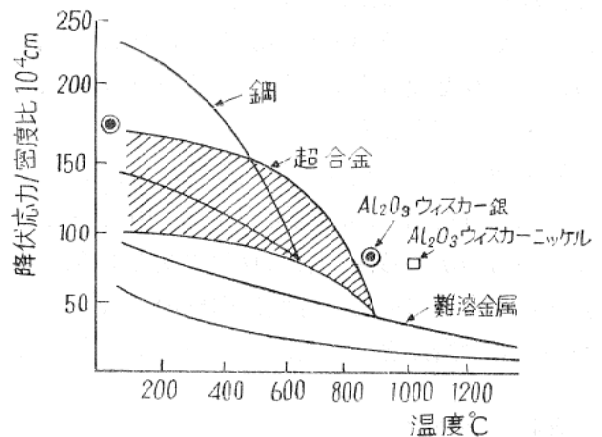


図15 各種金属材料の高温強度

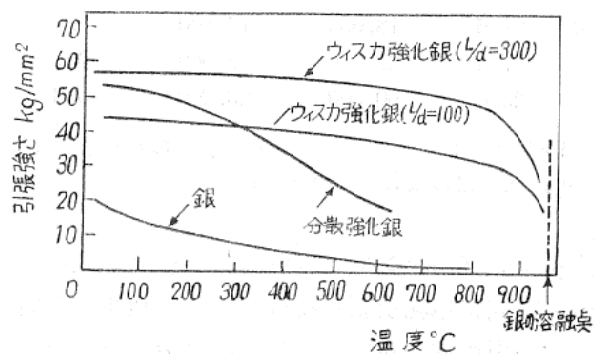


図16 銀と分散強化銀およびファイバウイスカ強化銀の試験温度と引張強さの関係 (L/d = ウイスカのAspect比, ウイスカの量は明示されていない)

この事実は耐熱材料として極めて有望であることを示している。

4・3 一方向凝固

状態図で共晶を有する合金、あるいは金属間化合物が存在する特殊な状態図をもつ合金では、ある相が一方向からの凝固により繊維化し、ウイスカのような性質をもつことがある。最もよく知られている例はAl-Al₃Ni共晶合金^{27),28)}である。Al₃Niは一方向凝固により繊維状に並び、その合金の強度はAl₃Niの容積率に關係している。このような合金としてCu-Cr共晶合金^{29),30)}、Ta-Ta₂C共晶合金³¹⁾、Cb-Cb₂C共晶合金³²⁾、Cu-Sn合金のCu₆Sn₅³³⁾などが報告されている。

これらの合金で繊維状にある相をならせるためには合金の純度、冷却速度の調節等の諸条件がある条件の中に入らねばならない。一方向凝固に関する研究は凝固現象に対する興味からよく行なわれているが、この組織を実用に供するに至った報告は数が少ないがタービン羽根を作り、すぐれた性質を報告している例³²⁾もある。

4・4 疲労強度

繊維強化複合材料は引張性質、高温強度では優れた性質を示すが、機械的性質の中で好ましくないものがある。それは疲労強度である。繊維強化複合材料の疲労強度は繊維の容積増加にかかわらず殆んど増大を示さない。第4表³⁴⁾は

表4 銅基タングステンファイバー強化合金の単純引張疲労試験結果

V_f (%)	σ_0 (psi)	σ_{cf} (psi)	σ_{cf}/σ_0
0又は1.5	18,600	14,800	0.8
7.4	22,200	16,600	0.7
23.0	60,300	20,200	0.3

V_f : ファイバー容積率, σ_0 複合材の引張強さ, σ_{cf} 複合材の疲れ強さ (10⁶回)

銅をタングステンで繊維強化した複合合金を繊維の方向に単純引張りを繰り返し10⁶回で破断しない引張応力をもって疲労強さ σ_{cf} とした試験結果である。引張強さ σ_0 はタングステンを23Vol%入れることにより銅の引張強さの3倍以上の値を示すが σ_{cf} の上昇は非常に小さく、

σ_{cf}/σ_0 の比は0.3と低くなっている。繊維強化プラスチックでもこの σ_{cf}/σ_0 の比は低く0.1~0.3の間にあり、金属材料の0.5に比較して著しく低く、耐疲労性は良好とはいえない。

5. 繊維複合材料の実用例

金属を繊維強化して使用している例は未だそれ程多くはなく、未だ研究段階のものが多く考えられる。先に述べたCb-Cb₂C共晶合金を一方向凝固法によりタービン羽根を作りすぐれた性質がある旨の報告³²⁾、あるいは銅をタングステン線で繊維強化してロケットのノズルにした例³³⁾、アルミをウラニヤ・ベヤリング・ファイバーガラスで強化し燃料として使用後アルミを薬品に溶解して燃料処理をしやすくした実験や³³⁾軸受として繊維強化鉛を用いる試み³³⁾がなされている。

一方繊維強化プラスチック (Fiber Reinforced Plastics, FRP) は高強度と軽量化に有効なため1966年にU.S.Aで、254×10³t、日本で18×10³tも使用されている。ロケットモーターケースの軽量化は第5表に示すように、比強度はS994ガラス線を用いると鋼より1桁も上がる。

表5 ロケットモーターケースの軽量化

材 料	強 度 kg/mm ²	強度/密度 ×10 ⁶ mm	重 量 kg
鋼	140	18.0	243.0
チ タ ニ ウ ム	112.5	25.4	145.5
Eガラスファイラメント	246	96.6	136.5
S-994 ガラス ファイラメント	308	126.0	115.0

FRPで作られた舟は最大23.4mであり、U.S.Aではすでに150万隻以上も作られている。航空機では総重量の僅か3%がFRPで作られており日本のYS-11の部品としての数はプレス成形品84個、真空成形品91個である。また自動車³²⁾ではボディをFRPで作ったものがあり、シボレー・コルベット, "Sting Ray", トラバント601 (東独), サイラコック CRV などがある。

6. 結び

以上述べたようにFRPの分野では繊維強化

複合材料は高強度、軽量化のホープとして広く用いられているが、金属をマトリックスとする系統の複合材料については、未だ研究段階のものが多い。然し将来、高温における高強度材料としてその開拓分野は広いものと考えられる。

文 献

- 1) 藤井太一, 日本機械学会誌 **71** (1968), p. 704
- 2) 大橋, 強化プラスチックハンドブック, 昭42.7, 日刊工業新聞社
- 3) 滝川浄一郎, 機械学会誌, **71** (1968), p.740
- 4) T. J. Koppenaal, H. M. Parikh, I. I. T. Tech. Center, ARF-2221-6 NOW 61-0555 (1962)
- 5) W. H. Sutton, G. E. TIS, R62 SD994, (1962), p.15
- 6) N. Cabrera, P. B. Prinse, Growth and Perfection of Crystals, (1958), p.204, John Wily, N. Y.
- 7) S. S. Brenner, J. Appl. Phys.,33 (1962), p.33
- 8) S. S. Brenner. Fiber Composite Materials. p.25
- 9) 滝川浄一郎, 機械学会誌, **71** (1968), p.740
- 10) R. G. C. Arridge "Proceeding of the 1964 Symposium of the Union Scientifique Continentale de Verre"
- 11) R. W. Jech, E. P. Weber, and A. D. Schwoppe "Reactive Metals" 1958, p. 109, Interscience Publishers.
- 12) C. A. Calow and R. J. Wakelin, J. Inst. Metals, 96 (1968), p.147
- 13) 三浦維四他, 日本金属学会誌, **30** (1966), p. 655
- 14) D. L. McDanel, R. W. Jech, and J. W. Weeton, Metal Progress 78 (1960), No. 6, p.118
- 15) A. Kelly, W. R. Tyson, High Strength Materials (1965), John Wily Sons, N. Y.
- 16) H. L. Cox, Brit. J. Appl. Phys. 3(1952-3), p. 72
- 17) J. D. Eshelby, Proc. Roy. Soc., A241(1957), p. 376
- 18) G. A. Horridge, Brit. J. Appl. Phys., 6 (1955-9), p.314
- 19) D. M. Schuster, E. Scala, Trans. Met. Soc. AIME 230 (1965), p.1635
- 20) 林毅, 日本機械学会誌, **71** (1968), p. 721
- 21) T. Hayashi, Proc. Symposium on "Non-homogeneity in Elasticity and Plasticity" in Warsaw (1958), p.501
- 22) T. Hayashi, Proc. 5 th Intern. Symposium on Space Technology and Science, Tokyo, (1963), p. 683
- 23) 山根寿己, 馬越佐吉, 富島正人, 中井一吉, 未発表, 材料国際会議, 京都, 昭和46年8月19日 発表予定
- 24) A. Kelly, Proc. Roy. Soc., A 282 (1964), p. 63
- 25) A. Kelly, W. R. Tyson, Proc. 2nd International Materials Symposium, Berkeley, Calif. (1964)
- 26) 三浦維四, 浜中人士, 平野進, 日本機械学会誌, **71** (1968), p.813
- 27) D. Lemkey, ほか, Trans. Met. Soc. AIME 233 (1965), p.336
- 28) D. McDanel, ほか, Trans. Met. Soc. AIME 233 (1965), p.636
- 29) R. W. Kraft, R. Hertzberg, Trans. Met. Soc. AIME, 227 (1963), p. 580
- 30) F. Lemkey, R. W. Kraft, Rev. Sci. Instr., 33 (1962), p.846
- 31) F. Lemkey ほか, Final Report DA-19-020-AMC-00434×(1967-7-31)
- 32) J. F. Judge, Technology Week, (1966-12-19), p. 32
- 33) D. Cratchley, Metallurgical Reviews. 10 (1965), p. 79
- 34) R. K. Ham, T. A. Place, J. Mech. Phys. Solid, 14 (1966), p. 271
- 35) 阿曾, プラスチック自動車の最近の傾向, 「自動車と高分子'66」(昭41, p.32, 日刊自動車新聞社)