

アルミナ長繊維を用いた複合インペラーの開発

水田 明能*・中村 敏則*・堺 邦益*

Development of Alumina-fiber/Aluminum Composite Impeller

Akiyoshi MIZUTA, Toshinori NAKAMURA and Kuniyasu SAKAI

Synopsis :

Recently, fiber-reinforced metal (FRM) has called much attention in various fields of industry where high strength-to-weight ratios are required, such as jet-engine parts and structure members of aircraft. In order to fabricate alumina-fiber/aluminum composite, we tried to develop a method to incorporate molten aluminum alloy into reinforcing fibers by pressurized casting method. This method was applied to investment moulds for precision castings, and consequently complex and large composite products, such as impellers, were produced more easily than conventional method.

In this paper we investigated desired properties of alumina-fiber/aluminum a composite impeller for gas turbine engines and manufacturing method. Prototype impeller had good composite structure and improved tensile strength. But the results were not satisfactory enough.

Key words : composite ; alumina-fiber ; impeller ; jet-engine ; aluminum.

1. 緒 言

繊維強化金属 (FRM : Fiber Reinforced Metal) については、今後さらに開発が進み応用分野が広がるものと思われるが、特にこの中でも航空機やジェットエンジン用の材料としての進展が大きく期待されている¹⁾²⁾。FRM が実用材料としてより多く利用されていくには、力学的特性がより向上すると共に二次成形加工技術も含めて経済的に優れた製造法が確立されることが不可欠である。しかし、現在の FRM 製造法の多くは、複雑な形状を有する製品を得るのには適当でないのが実状である。

そこで著者らは複雑形状の製品を得るのに最も適している精密鑄造法を、FRM の製造に応用することができればより多くの実用部品にこれを活用していくことができると考えその基礎的製造条件を検討した。

そして FRM の採用による軽量化で、航続距離などの性能が大きく向上することが期待される小型ジェットエンジン用インペラーの試作を行ったので、その詳細について報告する。

2. 複合インペラーの基本概念

2.1 軽量化効果

Photo. 1 のような構造のジェットエンジンの中でインペラーは燃焼器の前にあり、その回転により外部から空気を取り入れ圧縮して燃焼器へ送る役割を持つ。ジェットエンジンにおいて部材の軽量化を行うことは燃料経済性と航続性能を向上させるために極めて重要であり、中でもインペラーのような回転部材は軽量化の効果が大きい³⁾。

いま Photo. 1 の小型航空機用の 1 軸ターボジェット

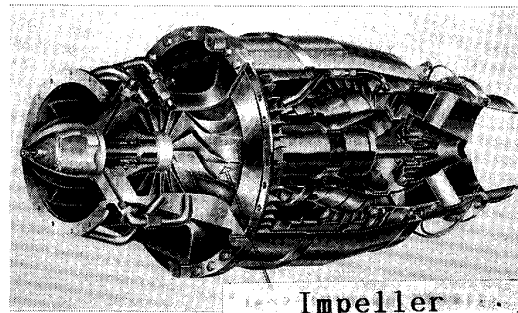


Photo. 1. Structure of turbo-jet engine and impeller.

エンジン(圧縮器1段地上静止時推力1470 N 乾燥重量40 kg⁴⁾)で、現用のステンレス鋼製インペラーをアルミニウム合金で製造すると、その重量は約2 kgとなり現状より約3.3 kg(エンジン全体としては約8%)の軽量化となる。そしてこれはジェットエンジン本体に、次のような性能の向上をもたらす。

(1) 減量分3.3 kg相当の装備を新たに搭載できる。例えば燃料を3.3 kg分多く搭載できると、高度1000 m、速度マッハ0.9の最大出力の状態でも12%の運転時間が延長できる。

(2) 回転軸周りの慣性モーメント(I_x)が約64%に減少するので、エンジンの加速時間も現在の64%に短縮できる。

(3) ベアリング、ベアリングサポートの担力荷重も低減できる。

このようにインペラーの材質をアルミニウム合金に変更できれば、エンジン本体で大きな性能向上が得られる。しかしこのジェットエンジンでは運転時のインペラーの表面温度が最大180°Cに達し、従来のアルミニウム合金ではこの温度付近の強度が低いため回転により発生する応力に耐えられず、実際に材料の変更を行うのは不可能であった。

これに対し例えば炭素繊維などを用いたアルミニウム基FRMは、常温での強度が高いばかりでなく300°C付近までの温度範囲で強度低下が小さく、比重の点ではアルミニウム合金とほとんど変わらないため、上述のインペラーの軽量化が可能である。

2.2 応力解析

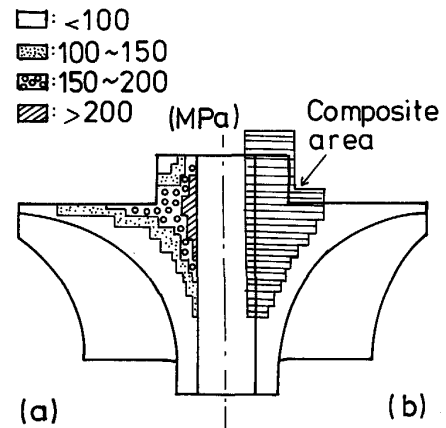
インペラーのような回転部材で、使用材料の機械的性質を評価する際には耐力を密度で割った値が指標として用いられる。FRMがこのインペラーの材料として使用できるには、運転時の最高温度である180°Cまでこの比が、現在の材質である析出硬化型ステンレス鋼と同等以上であることが前提となる。

そこでFRMによる複合インペラーの成否を検討するため、試作の対象とした1軸ターボジェットエンジン用インペラー(最大径196 mm、翼枚数17)の、回転時の発生応力を計算した。計算には2次元有限要素法応力解析プログラムを用い、荷重として次の二つを考慮した。熱応力は考慮していない。

(1) インペラー自体の回転による遠心力(回転数53 000 rpm、周速490 mm/s)

(2) インペラーブレードによる外力

計算に必要な物性値がアルミニウム合金基のFRMについては十分に明らかになっていないので、アルミニウ



(a) Distribution of Mises equivalent stress
(b) Composite area

Fig. 1. Results of stress analysis of impeller and composite area.

Table 1. Impeller description.

	Conventional impeller	Composite impeller
Material	17-4 PH stainless steel	Fiber/aluminum composite
Density (D)	$7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$2.7 \sim 3.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Weight	5.3 kg	$\leq 2.0 \text{ kg}$
Yield strength (Y)	$> 1098 \text{ MPa}$	Disk $> 490 \text{ MPa}$ Blade $> 196 \text{ MPa}$
Strength ratio (Y/D)	$10.8 \times 10^6 \text{ mm}$	Disk $> 15.6 \times 10^6 \text{ mm}$ Blade $> 7.4 \times 10^6 \text{ mm}$

ム合金 AC 4 C (密度 $2.68 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、縦弾性係数 $7.35 \times 10^3 \text{ MPa}$ 、ポアソン比 0.33)の値を使用した。

計算結果のインペラーの軸方向の断面でのミーゼス型相当応力の分布の概略を、Fig. 1(a)に示す。応力の発生軸方向は主に半径方向と円周方向で、最大応力は262 MPaであった。

2.3 必要特性と候補材料

応力解析結果からアルミニウム基FRMの密度を $3.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ と仮定し設計上の安全率を2.0として、複合インペラーの目標とする特性をTable 1のように設定した。この材料特性に対し、現在まで公表されているアルミニウム基FRMは引張強さ500~1000 MPaで比強度が $20 \sim 30 \times 10^6 \text{ mm}$ の範囲にあり¹⁾FRMでは引張強さと耐力が近い値を持つのでこの特性を満足することができるものと考えられる。

FRMに使用する繊維材料としては、炭素繊維、アルミナ繊維、炭化けい素繊維、ボロン繊維などの長繊維や各種短繊維、さらにウイスキーなども検討されているが、今回の開発では後述の製造条件の検討を進める中でアルミニウム合金との濡れ性が良く、しかもプリフォームの作製に適した形で供給されているアルミナ長繊維(住友化学工業株式会社製)を選定した。

Table 2. Properties of alumina fiber

Crystal phase	Spinel (γ)
Chemical composition	
Al_2O_3	85 wt%
SiO_2	15 wt%
Physical properties	
Density	$3.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Filament characteristics	
Diameter	17 μm
Filament length	Continuous
Filament/yarn	380
Mechanical properties	
Tensile strength	1.8 GPa
Tensile modulus	210 GPa
Thermal properties	
Max. use temperature	1250°C
Coef. of thermal expansion	$8.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

このアルミナ繊維の特性は Table 2 に示すとおりであるが、特に複合材への応用を考えた時には以下の特徴を有している⁵⁾。

- (1) 空気中では高温まで安定であり、1000°C で長時間保持しても特性の劣化は少ない。
- (2) 熔融金属に侵されにくい。
- (3) 織布などの加工が可能である。

2.4 部分複合化領域の検討

応力解析結果によれば、発生する応力の高いのはインペラーのボス部の中心部で、一方翼部は応力は低く、形状が複雑で繊維の配列も難しい。そこで複合化は応力が高く強化が必要なボス部の中心部のみ行うこととし、その領域を Fig. 1 (b) のように設定した。

3. 雰囲気加圧鋳造法

3.1 新製造法のねらい

スクイズキャスト法による複合材の製造では、熔融金属に 50~100 MPa の圧力をかけ配列した繊維間に浸透させ複合化させるが⁶⁾、複合材料の製造法の中では比較的複雑な形状の部材が得られるとされている。しかし、使用する圧力が大きいので鋳型として金型を用いる必要があり、3次元の形状の翼部を持つインペラーを製造するのは難しい面が多い。また圧力が大きいので、大型の設備が必要となる点も問題である⁷⁾。

そこで今回の複合インペラーの製造には、新しい複合化法の開発が必要であった。

福永らによると、アルミニウム合金と炭化けい素 (SiC) 繊維のスクイズキャスト法による複合化で、実際に溶湯が繊維間に浸透するのに必要な圧力は 1 MPa 以下である⁸⁾。一方このインペラーのような複雑形状の部材は、一般にセラミックスシェル鋳型を用いた精密鋳造法により製造される。

そこで筆者らはこの二つを考えあわせた、ガスの加圧

による複合化方法に着目した。これは繊維の周りの熔融金属を、雰囲気ガスの加圧により繊維間に浸透させ複合化を得ようとするもので、使用する圧力が低く静水圧なので、金型に代わりセラミックスシェル鋳型を使用することが可能となり、インペラーのような複雑な形状を有する部材も、容易に製造することができる。

3.2 複合化条件の検討

ガス加圧により複合材を製造するためには、加圧力と繊維の予熱温度が複合化にどのような影響を及ぼすかを把握し、その製造条件を確立する必要がある。今回はガス圧を安全上 0.98 MPa 以下に限定したので、繊維の予熱温度と複合化の関係を中心に実験を行った。

溶湯が繊維間に含浸していく過程で溶湯の凝固が進行すれば、複合化は得られない。そこで繊維の予熱温度を高くして浸透距離を伸ばすことが、加圧力が小さく溶湯が繊維間に浸透する速度も小さい場合には重要である⁹⁾。しかし、予熱温度が高くなると繊維の劣化が起こり、複合材の強度が低下することがある。このため予熱温度は複合可能な範囲で、できるだけ低く抑えることが重要である。

実験では 0.9 MPa のガスの圧力を用いて複合化に必要な繊維及び鋳型の予熱条件を、使用するアルミナ繊維の劣化が少ない 1000°C までの範囲で検討した。内径 24 mm、長さ 200 mm のアルミナ製の小型るつぼの中に、アルミナ繊維を 100 mm 長さで一方向に配列し、これを各温度で 1 h 予熱して加圧容器中に置いた。つぎに純アルミニウムの溶湯をるつぼ上部に入れた後、容器内を窒素により加圧した。溶湯温度は 700~750°C であった。これらの実験結果を整理した、予熱温度および加圧力と複合化との関係を Fig. 2 に示す。これにより加圧力

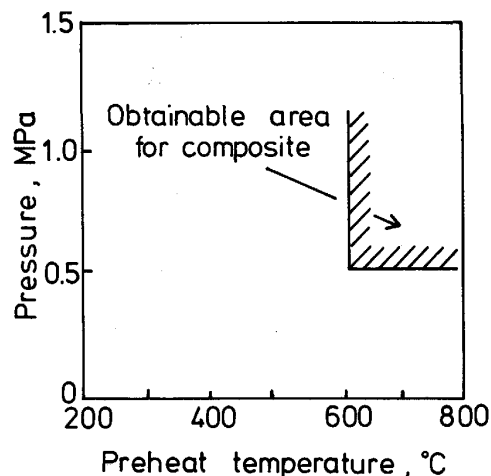


Fig. 2. Obtainable condition (preheat temperature and pressure) for composite.

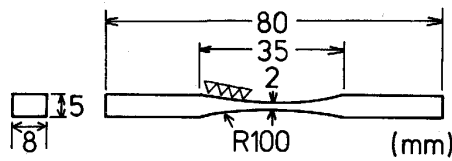


Fig. 3. Shape and dimension of tensile test specimen.

0.49 MPa 以上, 予熱温度 600°C 以上の条件で, アルミナ繊維と純アルミニウムとの複合材が得られることが明らかになった。

次に加圧力 0.9 MPa, 予熱温度 800°C の条件で製造した, 純アルミニウム基の複合材から, Fig. 3 に示す形状の引張試験片を作成し機械的性質を測定した。得られた引張強さは 448 MPa で, 同様に铸造した時の基地金属の引張強さ 56 MPa と比較して繊維強化による大きな強度の上昇が認められた。この試料の金属組織を 1 視野 $0.4 \times 0.3 \text{ mm}$ で 50 視野画像解析装置を用いて観察したところ, 繊維体積率は平均 41.4% であった。

これらの実験結果から, 今回考案した製造法(以下, 雰囲気加圧铸造法と呼ぶ)により, 特性の優れたアルミニウム基複合材料が製造できることが明らかになった。この新しい雰囲気加圧铸造法には, 以下の特徴がある。

- (1) 精密铸造鑄型を使用できる。
- (2) 高価な大型の装置を必要としない。
- (3) 複雑な形状や大型の部品の製造が可能である。

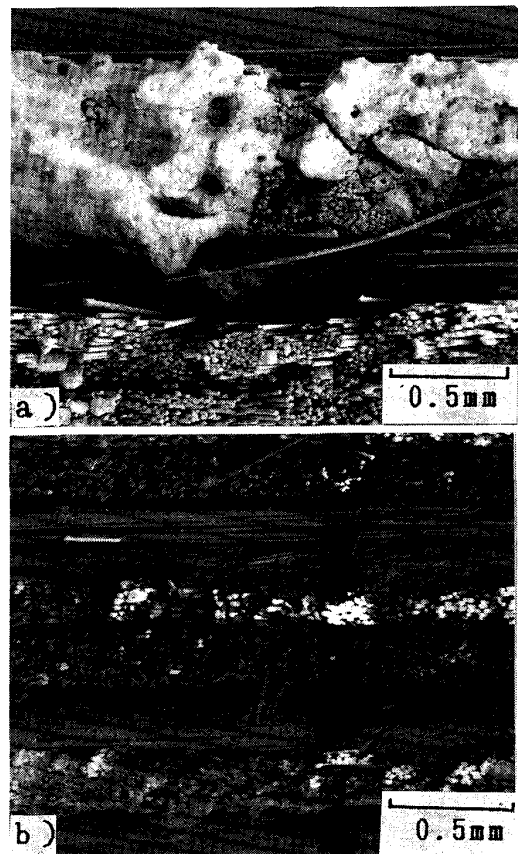
4. 複合インペラーの製造

4.1 プリフォームの作製

強化繊維は長繊維でその強さは一軸方向のみに発揮されるが, 発生する応力は場所によりその主方向と大きさが変化するので, 全体を通じて応力の小さな回転軸方向を除いては, 繊維の配列には等方性を持たせる必要がある。そこで 2 次的に擬似等方体となるように 60° おきに繊維を配列した Fig. 1 (b) の形状のプリフォームを以下のように製作した。

一方向に配列した繊維を熱硬化性樹脂により接着した平均繊維体積率 50% のプレシート (250 mm 角, 厚さ 250 μm) を, 60° 配列で 12 枚積み重ねて 200~230°C でホットプレスし, 厚さ約 3.5 mm の擬似等方体を得た。そしてこれより複合化領域にあわせて 21 枚の円盤を切断して積み重ね, 全体をステンレス製の治具により固定した。

プレシートの切断については YAG レーザーによる方法と, ウォーター・ジェットを用いる方法を比較検討し



a) Cut by YAG Laser b) Cut by water jet
Photo. 2. Scanning electron micrographs of cross section of alumina-fiber presheet.

た。Photo. 2 にプレシートの切断面の走査型電子顕微鏡の観察結果を示す。レーザーによる切断面では繊維や有機バインダーの一部が熔融し, 切断面をその残滓が覆っている。このような状態ではアルミニウム合金の溶湯の繊維間への浸透が妨げられ, また切断面と基地部とが密着せず十分な強度が得られない。一方ウォーター・ジェットを用いた場合にはこのような残滓はみられず, 切断面と溶湯との濡れ性も良好であった。従って今回のプレシートの切断には, この方法を採用した。

4.2 基地合金の選定

複合インペラーの基地合金として最適なアルミニウム合金を選定するため, 3.2 の予備的検討と同様の小型るつぽを用いる方法で得た鑄造用アルミニウム合金とアルミナ繊維を複合化した試料から, Fig. 3 に示す形状の試験片を加工し引張試験を行った。対象とした合金は Al-Cu-Mg 合金 (AC1A), Al-Si-Cu-Mg 合金 (AC4B), Al-Si-Mg 合金 (AC4C) の 3 種である。なお製造条件の検討で使用した純アルミニウムは単独では強度が低く, また実際の鑄造には適さないことから除外した。

Table 3. Tensile strength of alumina-fiber/aluminum composite.

Alloy	Chemical composition (wt%)			Heat treatment	Tensile strength (MPa)
	Cu	Si	Mg		
AC1A	4.80	0.07	0.16	—	375
AC4B	2.30	8.41	0.34	T6*	446
AC4C	0.25	7.04	0.16	—	165
				T6*2	223
					275

* AC1A-T6 510°C, 8h, water quench 155°C, 20h, air cool

*2 AC4C-T6 510°C, 8h, water quench 155°C, 20h, air cool

Table 4. Manufacturing condition of alumina-fiber/aluminum composite impeller.

Fiber composition	Alumina fiber					
Matrix composition	Cu	Si	Mg	Fe	Ti	(wt%)
Melting condition	4.3	0.19	0.12	0.11	0.14	
Preheat condition	Weight 14 kg					
Pressure	Melting temperature 760°C					
Heat treatment condition	Pouring temperature 700°C					
	800°C, 2h					
	0.9 MPa					
	510°C, 8h, water quench					
	155°C, 20h, air cool					

複合化条件はすべて圧力 0.9MPa, 予熱温度は 800°C とし, 注湯時に鋳型と繊維の温度が複合化に必要な 600°C より低下することがないように配慮した. また注湯時の溶湯温度は 720~730°C であった. AC1A および AC4C については, 溶体化処理焼入れおよび焼もどし (T6 処理) を実施した.

引張試験の結果を Table 3 に示す. この結果から最高の引張強さが得られた AC1A-T6 材を, 複合インペラーの基地合金に採用した.

4.3 複合インペラーの製造

以上のようなプリフォームの作製と基地合金の選定結果をもとに, 雰囲気加圧鋳造法により複合インペラーの試作を行った. 製造条件を Table 4 に, 製造工程を以下に示す.

(1) セラミックシェル鋳型の所定の位置に, アルミナ長繊維のプリフォームを固定する.

(2) 鋳型を予熱する. ここでプリフォーム中の樹脂は除去される.

(3) 予熱した鋳型を加圧容器中にセットし, アルミニウム合金を注湯する.

(4) 注湯後ただちに加圧容器を閉め, 窒素で加圧し凝固終了まで保持する.

4.4 複合インペラーの特性

製造したインペラーの中央部を切断した状況を, Photo. 3 に示す. 擬似等方体に成形したプリフォーム中に溶湯が十分含浸しており, また翼の先端への湯回りも良好で鋳物としてほぼ完全な物が得られている. 断面

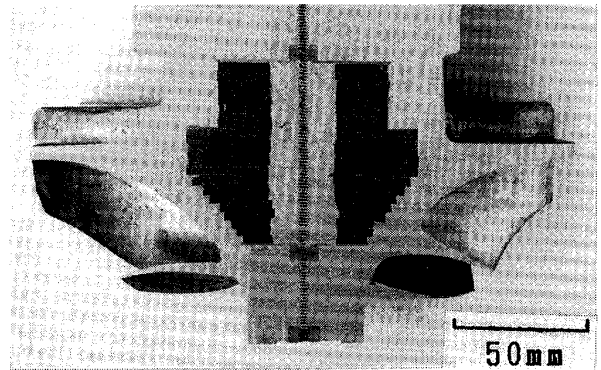


Photo. 3. Macro photograph of cross section of alumina-fiber/aluminum composite impeller.

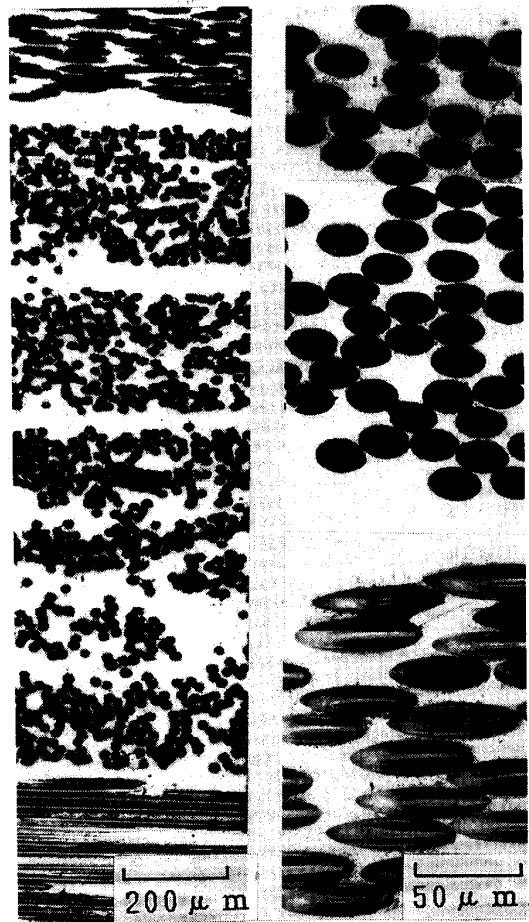


Photo. 4. Micrographs of alumina-fiber/aluminum composite of impeller.

中央部で黒く見える複合化部分を観察した状況を Photo. 4 に示す. 繊維の断面形状は 60° 配列のため円形, 楕円形, 線状となっている. 繊維の含有率を, 3.2 と同じ条件で画像解析装置を用いて測定したところ平均 34% であった.

試作したインペラーから引張試験片を採取し, 常温お

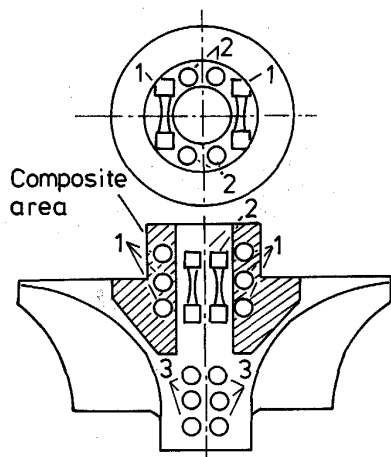


Fig. 4. Sampling positions of test specimens for composite impeller. Samples of number 1, 2 and 3 show different angle between fiber direction and tensile test load axis.

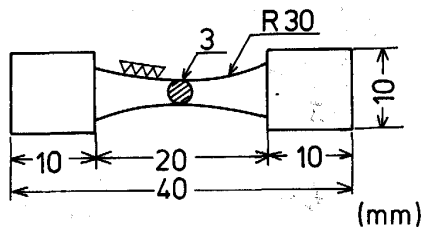


Fig. 5. Shape and dimension of tensile test specimens.

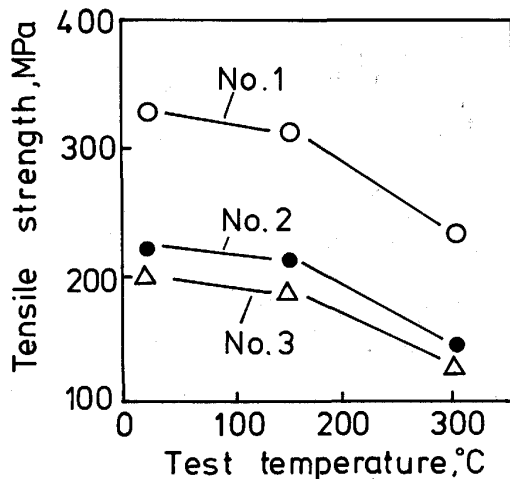


Fig. 6. Tensile strength of different position in alumina-fiber/aluminum composite impeller. The angle between fiber (laminate) direction and load direction are indicated by No. 1=0°, No. 2=90° and No. 3=matrix area.

よび 150°C, 300°C の試験温度で各 2 本引張試験を行った。試験片採取位置を Fig. 4 に、試験片の形状を Fig. 5

に示す。

試験結果を試験温度と引張強さの平均値の関係として Fig. 6 に示す。引張方向が繊維の配列方向に平行な場合 (Fig. 6, No. 1) は、基地部と比較して約 100 MPa の引張強さの向上が見られ、試験温度 300°C でも 200 MPa 以上の引張強さを有している。一方繊維の配列方向に直角な方向 (Fig. 6, No. 2) では、基地部と同じ程度の値となっている。なお繊維との複合化部の密度は $3.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ であった。

5. 考 察

本研究ではガス加圧による複合化法を開発し、従来の製造法よりも簡易な方法で、複雑な形状を有する小型ジェットエンジン用の複合インペラーが製造できることを実証した。また強度面においても従来のアルミニウム合金では実現することが難しい、試験温度 300°C で 200 MPa 以上の引張強さを実現した。

しかし実際に得られた、繊維を一方に配列した複合材の引張強さは、同じ繊維を用いた溶湯鍛造法の 650 MPa (基地金属は Al-5% Cu) に比較して約 2/3 であった¹⁰⁾。

そしてインペラーの複合化部の耐力/密度の比は最大 $10.8 \times 10^6 \text{ mm}$ と目標の約 70% にとどまり、当初の開発目標を十分に満足することはできなかった。

複合インペラーが実用化されるには強度面で従来材を凌駕することが不可欠である。そこで本研究の中で見られる複合材の強度阻害要因について以下のような考察を行った。

5.1 熔融金属と繊維の反応

雰囲気加圧 casting 法では予熱温度が比較的高いため、全体の凝固が完了するまでのアルミナ繊維と熔融アルミニウム合金の接触時間が長くなり、大気中では 1000°C まで安定なこの繊維も溶湯と反応して強度が低下したことが考えられる。そこで純アルミニウムとアルミナ繊維を複合化させた試料から、10% 塩酸により基地金属を除去して繊維を取り出し、JIS-R-7601 の炭素繊維試験方法に準拠してその強度を測定した。その結果 10 本の引張強さの平均は 1270 MPa となり、複合化していない繊維を同様に試験した時の平均引張強さ 1630 MPa と比較して約 30% の強度低下が確認された。

このアルミナ繊維は約 15% の SiO_2 を含むので、界面で次のような反応が起こり、繊維が損傷を受け強度が低下したものと考えられる¹¹⁾¹²⁾。

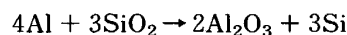




Photo. 5. Scanning electron micrograph of alumina-fiber.

5.2 繊維周囲の析出物

Cu を含むアルミニウム基複合材の繊維周辺に共晶と考えられる相が析出すると、複合材の強度低下がおこることが指摘されているが¹³⁾、本実験でもそのような相の析出が認められており、その成分組成は θ 相 (CuAl_2) と α 相 (Cu を含む固溶体) の混合物と推定された。また純アルミニウム基の複合材で、基地金属を塩酸により除去して繊維の表面状態を観察したところ、Photo. 5 に示すような付着物も観察された。

このような析出相や付着物の形成されていく過程は明らかではないが、従来から指摘されているように繊維に機械的な損傷を与え、これが応力集中部となって複合材の強度を低下させたものと考えられる。

これらに加えて繊維間に残留した空気による空孔の存在なども、今回実体の強度が目標を満足できなかった原因とも考えられる。

6. 結 言

新たに開発した雰囲気加圧鋳造法を用いて、小型

ジェットエンジン用の複合インペラーをアルミナ繊維とアルミニウム合金により試作した。その結果は、以下のようによまとめられる。

(1) ガス加圧を用いた複合法では、精密鋳造用鋳型を用いることが可能で、複雑形状で大型の FRM 製部材を製造することができる。

(2) 試作したインペラーでは、アルミナ繊維との複合化により基地金属に対し 1.5 倍の強度上昇を得た。また試験温度 300°C でも、200 MPa 以上の強度を確保することができた。

(3) 当初目標とした特性と実験結果との差については、繊維の溶湯中での劣化と繊維周囲の析出物や付着物の影響であると推定された。

終わりに本研究の遂行に関し多大の御助力をいただいた、住友化学工業株式会社に対して厚く感謝致します。

文 献

- 1) 大蔵明光: 鉄と鋼, 74 (1988), p. 413
- 2) 中川幸也: 第108, 109回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1985), p. 81
- 3) 西山幸夫: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 1257
- 4) 川崎重工業株式会社カタログ (1983)
- 5) 安部康明, 藤村和稔, 堀切尚三: 日本複合材料学会誌, 6 (1980), p. 89
- 6) 福永秀春: 軽金属, 38 (1988), p. 740
- 7) 香川 豊: 鋳物, 58 (1986), p. 614
- 8) 福永秀春, 栗山 稔: 日本機械学会論文集 (C), 47 (1981), p. 1207
- 9) 福永秀春, 合田公一: 日本機械学会論文集 (C), 49 (1983), p. 1808
- 10) 安部康明, 中谷光久, 山蔦浩治: 工業材料, 31 (1983), p. 37
- 11) 大蔵明光, 松木理悌: 生産研究, 36 (1984), p. 429
- 12) 日本国特許願 105729 (1980年7月30日)
- 13) 福永秀春, 合田公一: 日本機械学会論文集 (C), 50 (1984), p. 1054