

**ガラス繊維強化プラスチックの  
機械的性質と組織構造に関する研究**

2008年

**川 節 望**

# 目 次

第 1 章 序 論 .....	1
1.1 本研究の背景 .....	1
1.2 ガラス繊維強化プラスチックの研究動向 .....	3
1.2.1 プラスチック系複合材料について .....	3
1.2.2 GFRP の静的強度特性に関する研究動向 .....	9
1.2.3 GFRP の疲労強度特性に関する研究動向 .....	14
1.2.4 GFRP の製造法に関する研究動向 .....	18
1.3 本研究の目的 .....	21
1.4 本研究の構成と内容 .....	22
参考文献 .....	23
第 2 章 ガラスクロス繊維強化プラスチックの引張および 圧縮特性に及ぼす繊維構成の影響 .....	27
2.1 緒 言 .....	27
2.2 実験方法 .....	28
2.2.1 素 材 .....	28
2.2.2 供試体の製作 .....	28
2.2.3 試験方法 .....	31
2.3 実験結果 .....	36
2.4 考 察 .....	38
2.4.1 繊維積層構成と強度特性 .....	38
2.4.2 繊維含有量と強度特性 .....	45
2.4.3 マトリックス樹脂と強度特性 .....	48
2.5 結 言 .....	49
参考文献 .....	50
第 3 章 ガラスクロス繊維強化プラスチックの微視的疲労損傷 .....	51
3.1 緒 言 .....	51
3.2 実験方法 .....	52
3.2.1 素材と試験板の製作 .....	52
3.2.2 試験方法 .....	52
3.3 実験結果 .....	56
3.4 考 察 .....	59
3.4.1 疲労による微視的破壊形態について .....	59

3.4.2	微細樹脂き裂と繰り返し数の関係	61
3.4.3	弾性率と繰り返し数の関係	66
3.5	結 言	67
	参考文献	68

<b>第 4 章</b>	<b>ステッチ繊維を用いたガラス繊維強化プラスチックの 引張および圧縮特性</b>	<b>70</b>
4.1	緒 言	70
4.2	実験方法	71
4.2.1	素 材	71
4.2.2	供試体の製作	75
4.2.3	試験方法	76
4.3	実験結果	78
4.4	考 察	82
4.4.1	0°方向繊維含有量と強度	82
4.4.2	ガラス繊維の素線径と強度	84
4.4.3	0°方向繊維含有量および素線径と弾性率	84
4.4.4	ガラス繊維の織り形態と強度特性	86
4.5	結 言	94
	参考文献	95

<b>第 5 章</b>	<b>ステッチ繊維を用いたガラス繊維強化プラスチックの 静的強度および疲労強さに及ぼすマトリックス樹脂の影響</b>	<b>97</b>
5.1	緒 言	97
5.2	実験方法	98
5.2.1	強化繊維	98
5.2.2	マトリックス樹脂	101
5.2.3	供試体の製作	103
5.2.4	試験方法	105
5.3	実験結果	108
5.4	考 察	113
5.4.1	引張・圧縮強さとマトリックス樹脂	113
5.4.2	疲労強さとマトリックス樹脂	113
5.4.3	引張・圧縮強さと疲労強さの関係	116
5.5	結 言	119
	参考文献	120

第 6 章	風力発電装置用ガラス繊維強化プラスチック大型翼の 機械的性質	122
6.1	緒 言	122
6.2	実験方法	123
6.2.1	GFRP の素材	123
6.2.2	ガラス繊維基材の構成	123
6.2.3	試験板の製作	126
6.2.4	試験方法	126
6.3	実験結果	128
6.4	考 察	133
6.4.1	GFRP 翼の長さとの機械的性質	133
6.4.2	GFRP の破壊形態に及ぼすマトリックス樹脂の影響	134
6.5	結 言	138
	参考文献	139
第 7 章	風力発電装置用ガラス繊維強化プラスチック大型翼の 素材および製造法の検討と実用化	140
7.1	緒 言	140
7.2	大型 GFRP 翼の素材	141
7.2.1	強化繊維	141
7.2.2	マトリックス樹脂	142
7.3	大型 GFRP 翼の製造法	143
7.4	大型 GFRP 翼の製造法と材料特性および内部組織の関係	147
7.5	大型 GFRP 翼の実用化例	155
7.5.1	大型 GFRP 翼の種類と構造	156
7.5.2	大型 GFRP 翼の強度検証	160
7.6	結 言	162
	参考文献	163
第 8 章	総 括	165
	謝 辞	172
	発表論文	173
	出願特許	174

# 第 1 章 序 論

## 1.1 本研究の背景

ガラス繊維強化プラスチック（GFRP：Glass Fiber Reinforced Plastics）は、軽量で耐食性および耐候性が優れているため、1970年代初頭から船舶部材、建築部材、プラント構造材として多くの製品に使用されてきた<sup>(1)(2)</sup>。近年では、地球環境問題に対する関心の高まりにより急速に普及している風力発電装置<sup>(3)(4)</sup>の翼（以下ブレードと称す）にも用いられている<sup>(5)(6)(7)</sup>。図 1.1 に米国カリフォルニア州のウィンドファームの状況を、また図 1.2 に 600kW 風力発電装置用 GFRP ブレードの外観を示す<sup>(7)</sup>。ブレードには、装置寿命 20 年以上の長期の耐久性が要求されており<sup>(8)</sup>、大型 GFRP 構造物として、軽量化と信頼性確保の両立が求められている。

GFRP が工業製品に用いられ始めた当初は、静止部材や補強用 2 次構造部材への適用がほとんどであったことから、求められる特性は主に引張強さや引張弾性率であった。ところが、GFRP を大型・厚肉部材や繰り返し荷重が負荷される構造部材に使用するケースが増加しており、引張側の強度特性と同時に、圧縮側の強度特性や疲労強度が重要視されるようになった。

GFRP の材料特性は、組み合わせる素材、すなわちマトリックス樹脂と強化基材（ガラス繊維）に大きく左右される。GFRP のマトリックス樹脂には、不飽和ポリエステル樹脂やエポキシ樹脂、ビニルエステル樹脂などがあり、その製品の使用環境や必要な強度特性を考慮して選定する<sup>(9)(10)(11)</sup>。またガラス繊維基材には、連続繊維を織物にしたロービングクロスや、短い繊維をランダムに積層したチョップドストランドマットがあり、GFRP としての必要物性や製造法によりマトリックス樹脂に対して最適な組み合わせが決定される<sup>(12)(13)(14)</sup>。ここ数年、強化繊維は織物機械技術の急速な進歩にともない多くの新しい基材が開発されている。その 1 つにスティッチファブリックがあり、国内では 10 年ほど前から船舶用途を中心に使用が拡大している<sup>(15)(16)(17)</sup>。

一方、大型 GFRP 部材としての品質を確保しながら、同時に強度要求特性を満たすためには、使用素材の選定とともに製造法と施工条件の適正化が重要である。GFRP の製造法は、無加圧成形法、低加圧成形法、中高加圧成形法および真空成形法の 4 つに分けられる

が<sup>(18)</sup><sup>(19)</sup>，作業環境と大型部材の成形容易性から真空成形法の1種である真空含浸工法が，大型 GFRP 部材の製造法として注目されている<sup>(5)</sup><sup>(20)</sup><sup>(21)</sup><sup>(22)</sup>。

以上の背景に鑑み，本研究では，大型構造体への適用が今後も拡大すると予想される GFRP の機械的性質に及ぼすガラス繊維構成，マトリックス樹脂および微細組織構造の影響を追究すると同時に，大型 GFRP 部材として風力発電装置のブレードを例にとり，実機 GFRP 部材の機械的性質と破壊形態を調査して，大型 GFRP 部材の製造法と素材についての課題と今後の方向について考察した。



**Fig.1.1 Wind farm in California USA**



**Fig.1.2 GFRP blades for 600kW Wind turbines (Length: 20m)**

## 1.2 ガラス繊維強化プラスチックの研究動向

### 1.2.1 プラスチック系複合材料について

複合材料の定義は、「2種類以上の異なる材料を組み合わせ、それぞれの長所を生かし短所を補って、単一材料では得られない優れた特性を持たせ、かつ設計できる材料」である<sup>(23)</sup>。この定義を意識して考えると、我々の生活の中には複合材料で作られた構造物、機能材は多く存在している。たとえば、金属ワイヤでゴムを強化したゴムタイヤ、鉄筋でコンクリートを強化した鉄筋コンクリート、ガラス繊維で強化されたプラスチックなどがある。

機械構造用としての複合材料は、強化機構から粒子分散強化型と繊維強化型に大別される。一般に、力学的特性は繊維強化型のほうが優れているため、これまでの開発は繊維強化型に重点がおかれてきた。繊維強化複合材料は、マトリックスの種類で分けると以下のように分類される<sup>(24)</sup>。

- 1) ゴム系：繊維強化ゴム  
(Fiber reinforced rubber: FRR)
- 2) プラスチック系：繊維強化プラスチック  
(Fiber reinforced plastic: FRP)
- 3) 金属系：繊維強化金属  
(Fiber reinforced metal: FRM)
- 4) セラミックス系：繊維強化セラミックス  
(Fiber reinforced ceramics: FRC)

複合材料は、強化材とマトリックス材の組み合わせおよび強化基材の形態に自由度がある。また目的に応じて材料設計を行うことができ、弾性係数や熱膨張係数などの素材の微視構造に鈍感な特性は、要素の特性から予測しやすい物性である。一方、強度や靱性などは、素材の微視構造に敏感で予測が困難とされており、構成要素に起因する長所と短所を併せ持つことから注意が必要である。複合材料の材料設計では、構成要素の持つ長所と短所を明確にし、長所を引き出す設計を行うことが重要である。

複合材料の中でガラス繊維強化プラスチック(GFRP)は、機械構造用として早くから実機に用いられてきた代表的な実用材である。1940年代初めに米国でガラス繊維が発明され、その後、ポリエステル樹脂と組み合わせた複合材が、優れた強度と剛性を有するとして世界中に広まった。日本では1955年頃から工業化が始まり、比

強度（引張強さ/密度）がプラスチック単体の 20～30 倍という高い値を示すことから，船舶構造部材，建材，化学プラント部材，航空機 2 次構造部材などに幅広く用いられるようになった<sup>(24)(25)(26)</sup>。

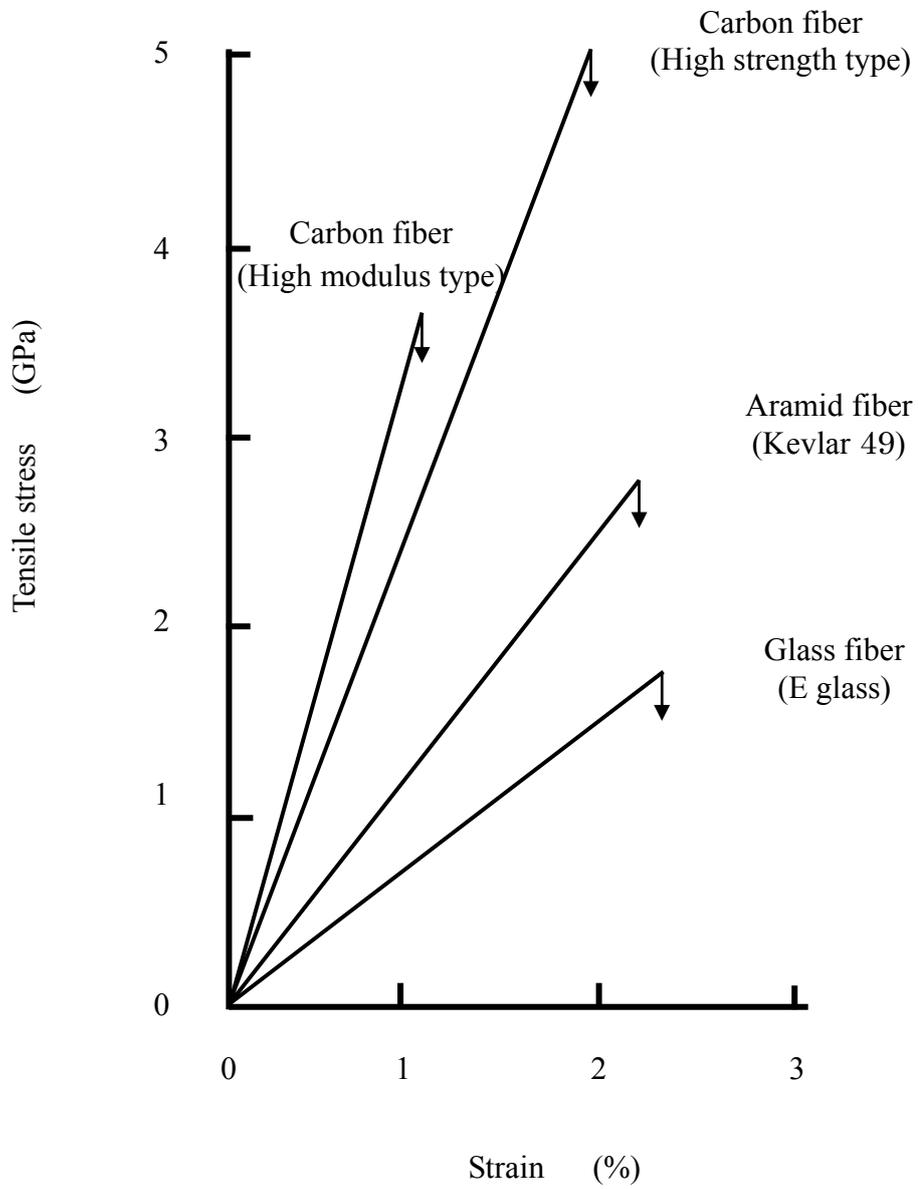
プラスチック系複合材料のマトリックス樹脂は，熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂に分けられるが，耐候性，耐食性，耐熱性ととも成形性が要求される工業用構造材料では，後者の熱硬化性樹脂が多く用いられている．表 1.1 にプラスチック系複合材のマトリックス樹脂として多く用いられている熱硬化性樹脂の特性を示す<sup>(9)</sup>。

**Table 1.1 Physical properties of matrix thermo-set resin<sup>(9)</sup>**

Resin	Unsaturated polyester resin	Vinyl ester resin	Epoxy resin
Tensile strength (MPa)	65~75	70~80	73~84
Tensile rupture Elongation (%)	1.5~2.5	3.0~5.0	3.0~7.3
Bending strength (MPa)	110~150	130~150	109~135
Bending modulus (GPa)	3.5~4.9	3.0~3.8	2.7~3.4

不飽和ポリエステル樹脂は主剤と硬化剤で構成され、硬化剤は主剤樹脂量の1~4%の範囲で添加される。汎用GFRP用の樹脂として、コストと物性および成形性のバランスの良さから最も多く使われている樹脂であるが、接着力が小さく、引張破断伸びが小さい欠点がある。ビニルエステル樹脂は、エポキシ樹脂にアクリル酸を付加し、これをスチレンモノマーに溶解したものである。この樹脂は、架橋硬化した際の主鎖の両端結合が強固な分子構造を形成することから、優れた耐食性を示す。また、引張破断伸びが大きく良好な耐衝撃性を示し、全般にバランスが取れた物性を示す。取り扱い性は、不飽和ポリエステル樹脂と同等で扱いやすいが、原料としてエポキシ樹脂が含まれるため素材コストは高い。エポキシ樹脂は、主剤と硬化剤の組み合わせが非常に多く、さらに実用材では、これに無機添加剤、希釈剤、可とう性付与剤などの配合物が添加され複雑である。これにより硬化物の物性も大きく変化するが、一般に接着力および引張破断伸びが大きく、複合材用のマトリックス樹脂として非常に良好な物性を示す。素材コストは高いが、優れた物性を示すことから航空・宇宙機器を中心に高性能複合材用樹脂として早くから使用されてきた。

一方、プラスチック系複合材料の強化繊維は、ガラス繊維、カーボン繊維およびボロン繊維などの無機質系繊維の他、アラミド繊維およびポリエチレン繊維などの有機系繊維が開発されている。図1.3に各繊維の繊維軸方向の引張応力とひずみの関係を、表1.2にプラスチック系複合材用として用いられている代表的な強化繊維の特性例を示す<sup>(12)(27)</sup>。各繊維は破断まで弾性的な特性を示し、引張破断伸びは0.5~2%と小さく、脆性材料である。引張強さおよび弾性率は、品種によって異なるが総じてカーボン繊維が最も高い値を示す。密度は、有機質のアラミド繊維が最も小さく、ガラス繊維が最も大きい値を示すが、それでも鉄鋼材料の1/3程度と非常に軽い素材である。またカーボン繊維とアラミド繊維は、繊維長さ方向と半径方向の熱膨張係数が異なり、繊維長さ方向の熱膨張係数がマイナス値を示す特徴がある。図1.4に強化繊維とプラスチック系複合材料の比強度(強度/比重)と比剛性(弾性率/比重)の関係を、金属材料と比較して示す<sup>(28)</sup>。複合材料の比強度および比弾性率は、織物材と一方向材の差が大きく、一方向材(繊維方向)では金属材料の値を大きく上回るが、織物材では優位性は大きく低下する。GFRPはガラス繊維自体の弾性率が小さいことから、その比弾性率はチタン合金やアルミ合金よりも小さい。



**Fig.1.3 Relation between tensile stress and strain of fiber** <sup>(27)</sup>

**Table 1.2 Physical properties of fiber** <sup>(12)</sup> <sup>(27)</sup>

Fiber	Carbon (High strength)	Carbon (High modulus)	Glass (E glass)	Aramid (Kevlar 49)
Tensile strength (MPa)	3,530~5,490	3,820~4,410	1,400~3,500	2,800~3,600
Tensile modulus (GPa)	230~294	377~588	72~76	125~131
Tensile rupture Elongation (%)	1.5~1.9	0.7~1.2	1.8~4.8	2.2~2.8
Diameter ( $\mu\text{m}$ )	5~7	5	8~24	12
Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.76~1.81	1.77~1.94	2.54~2.56	1.45
Thermal expansion coefficient (longitudinal direction) ( $10^{-6}/\text{K}$ )	-0.45~-0.56	-0.83~-1.1	4.9	-2

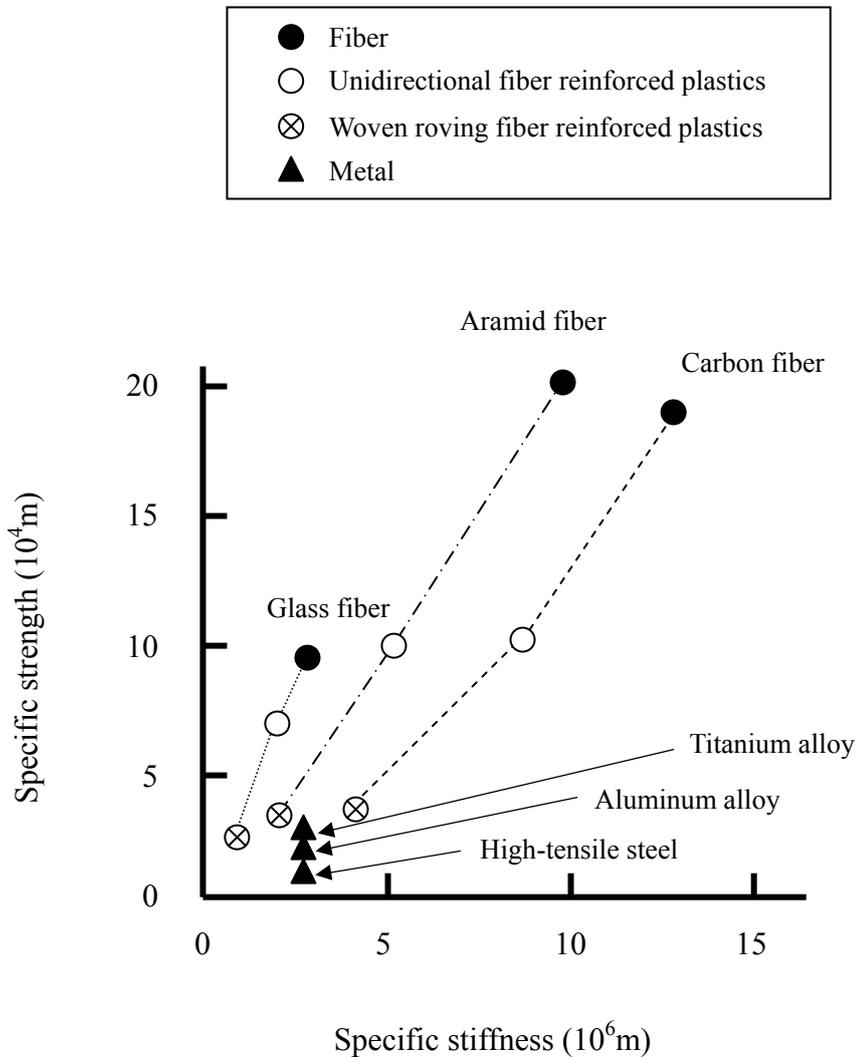


Fig.1.4 Relation between specific strength and specific stiffness <sup>(28)</sup>

### 1.2.2 GFRP の静的強度特性に関する研究動向

GFRP は車両，建材，船舶部材を中心に適用が拡大しており，特に船舶や海洋構造物，建築・土木部材などでは，耐食性と軽量性の観点から無くてはならない構造材料である<sup>(29)</sup>．当初，GFRP の実機製品への適用は，静止部材や補強用 2 次構造部材への適用がほとんどであったことから，求められる特性は引張特性や曲げ特性が主体であった．したがって，これらの材料特性に関しては多くのデータが取得，整備され破壊現象の解明も行われてきた．一方，近年は比強度および比剛性が優れた特徴を生かし，風力機械の回転部材等に用いられる例が報告されている<sup>(7)(30)</sup>．報告の中には，引張特性や曲げ特性の他，圧縮特性に関するものも増えている<sup>(31)(32)(33)(34)</sup>．

GFRP は，プラスチックをマトリックスとしガラス繊維を強化材とした繊維強化型の複合材で，鉄鋼材料などのような等質材とは大きく異なり力学的に異方性を持つ材料である．この異方性において，互いに直行する方向に弾性対称軸を持つものを直交異方性体と呼び，これには一方向強化材やロービングクロス強化材（2 方向強化）がある．一方，短い繊維をランダムに配したチョップドストランドマットなどを強化材とした GFRP は，面内では巨視的に等方性材料とみなすことができる<sup>(35)</sup>．

繊維方向に引張力を受ける一方向強化材において，繊維とマトリックスは，相互にすべることなく同じひずみ： $\varepsilon$  を受けるとすると，複合材料の引張弾性率： $E_c$  は，式(1)であらわされる．これが複合材料に用いられる複合則で，複合材の弾性率は繊維の体積含有量： $V_f$  に比例して増加することを示している<sup>(35)</sup>．

$$E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (1)$$

$E_c$  : 複合材の引張弾性率

$E_f$  : 繊維の引張弾性率

$E_m$  : マトリックスの引張弾性率

$V_f$  : 強化繊維の体積含有量

引張強さについては，破壊形態やメカニズムが一様に規定できないため複合則の適用は難しいが，引張弾性率の場合とほぼ同様に繊維の体積含有量： $V_f$  に比例して増加する．図 1.5 にガラス繊維やカーボン繊維のような脆性破壊をする繊維： $f$  と，ポリエステル樹脂やエポキシ樹脂のような延性を持ったマトリックス： $m$ ，これらを

組み合わせた複合材料：cの引張応力とひずみの関係を示す．一般に樹脂系複合材では，強化繊維の破断ひずみはマトリックス樹脂の破断ひずみより小さい．従って，繊維含有量が高い通常の複合材料は，繊維が破断したときにその応力をマトリックス樹脂のみでは負担できないため，繊維破断と同時に複合材料が破断すると考える．その場合，複合材料の引張強さは，ひずみ： $\epsilon = \epsilon_{fU}$ において式(2)であらわされる<sup>(35)(36)</sup>．

$$\sigma_{cU} = \sigma_{fU}V_f + \sigma_{m*} (1-V_f) \quad (2)$$

- $\sigma_{cU}$ ：複合材の引張応力
- $\sigma_{fU}$ ：マトリックス中で破断する繊維の平均引張強さ
- $\sigma_{m*}$ ：繊維破断時のひずみ  $\epsilon_{fU}$  に対応するマトリックスの引張応力

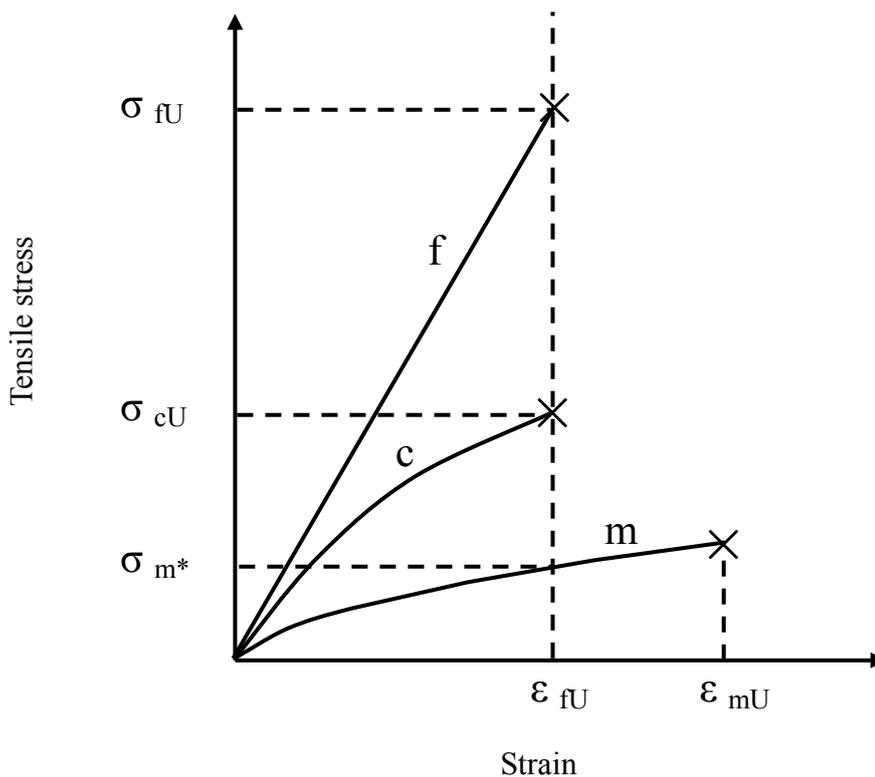


Fig.1.5 Relation between tensile stress and strain<sup>(36)</sup>

一方、主にガラスクロス材やガラスマット材を積層して作られる実用材の特性は、繊維のうねりや配向のばらつき、強化繊維の物性のばらつきおよび樹脂と繊維界面の接着強度ばらつきがあるため、式(2)の線形複合則に修正係数（経験係数）：K を乗じた形の簡易的な複合則で整理される<sup>(35)</sup>。図 1.6 にロービングクロスおよびチョップドストランドマット強化 GFRP の引張弾性率とガラス繊維体積含有量 ( $V_f$ ) の関係を示す。図中の曲線は主方向の弾性率とポアソン比から、積層理論により計算した弾性率に K を乗じて算出したものである。また図 1.7 に引張強さと  $V_f$  の関係を示す。図中の曲線は近似的に複合則が成り立つとして、弾性率と同様に K を乗じて算出した曲線である。引張強さおよび引張弾性率と  $V_f$  の関係は概ね比例関係にあり、K は引張弾性率よりも引張強さが小さいことが示されている<sup>(35)</sup>。

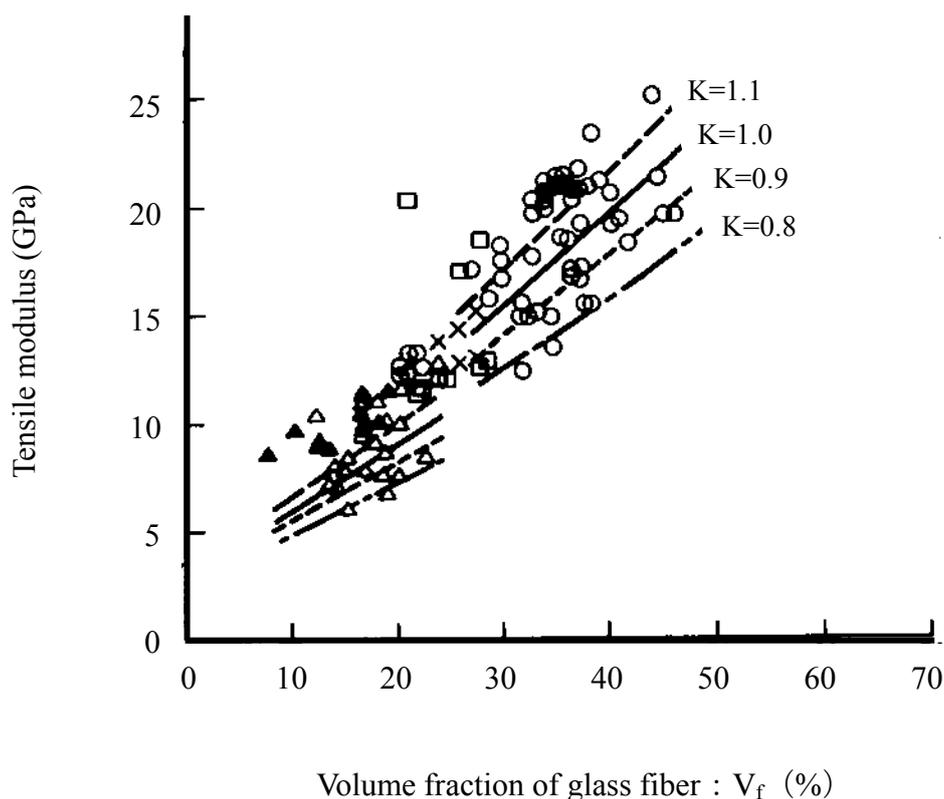
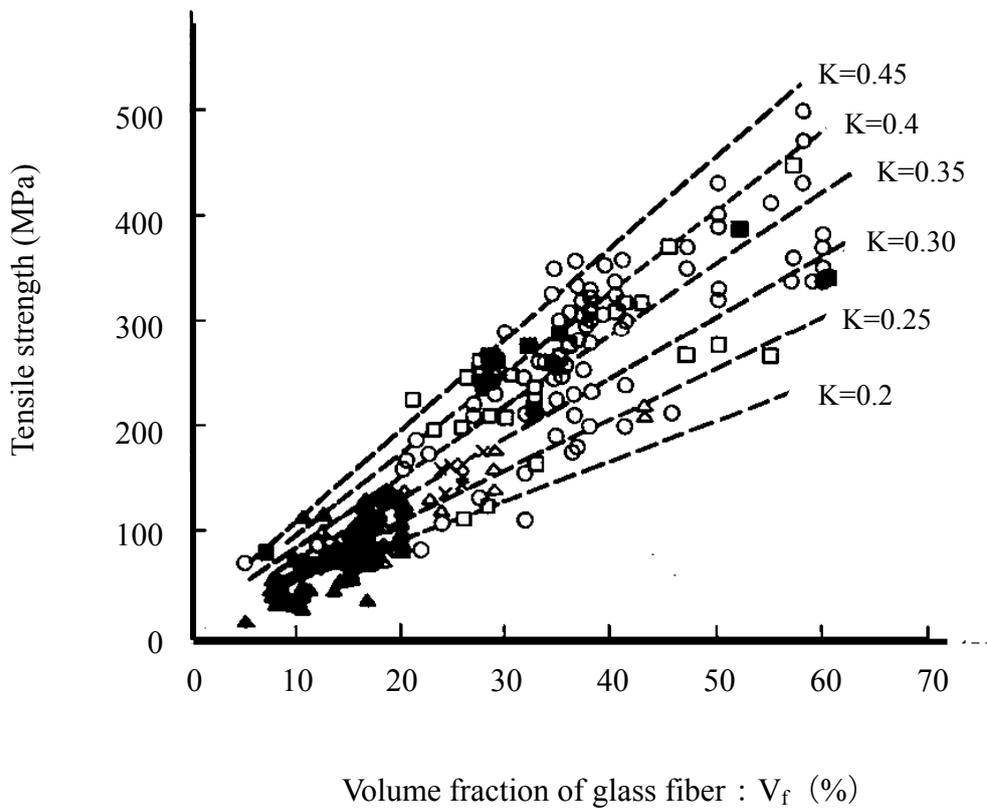


Fig.1.6 Relation between tensile modulus and volume fraction of glass fiber<sup>(35)</sup>



**Fig.1.7 Relation between tensile strength and volume fraction of glass fiber <sup>(35)</sup>**

一方、圧縮特性は引張特性とは若干異なる傾向を示し、圧縮弾性率は引張弾性率と同様に  $V_f$  によって決まるが、圧縮強さは引張強さのように複合則を単純に展開することはできない。この理由としては、繊維の微小座屈による不安定破壊などが考えられ、強化基材（織形態など）の種類により破壊機構が異なるため予測は難しいとされている <sup>(35)(36)</sup>。

GFRP のマトリックス樹脂は，汎用機器用としては安価な不飽和ポリエステル樹脂が，航空・宇宙機器などの高機能機器用としてはエポキシ樹脂が良く知られている<sup>(10)(11)</sup>．近年は，耐食性，耐薬品性に優れ，コストが比較的安価なビニルエステル樹脂も多用されるようになってきた<sup>(12)</sup>．靱性が優れるマトリックス樹脂は，引張強さの向上とばらつきの低減に効果があるとの報告もあり<sup>(23)</sup>，コストは高いが延性および靱性が優れているエポキシ樹脂は高強度 GFRP のマトリックスとして注目されている．

またガラス繊維基材では，ロービングクロスやチョップドストランドマットに代わり，繊維のうねり（蛇行）が少なく，直進性が優れるステッチファブリックが注目されている<sup>(5)(20)(33)</sup>．ステッチファブリックは，ガラスロービング（数千本のガラス素線が束ねられたもの）などの繊維束を任意の方向に配した後，ポリエステルなどの別の細い糸で固定した織物<sup>(15)</sup>でニットファブリックとも呼ばれている<sup>(16)(17)</sup>．十数年前から欧州の繊維メーカーを中心に開発が活発化しており，国内では 10 年ほど前から船舶用の GFRP 基材を中心に使用が拡大した．最近では大型風力発電装置の GFRP ブレード用基材としても多用されており，多くの種類が製造されている．ステッチファブリックを用いた GFRP に関する報告は，ガラスロービングクロスを使用した GFRP と比較して引張特性や圧縮特性が優れていることの報告<sup>(5)(33)(37)</sup>は多いが，引張および圧縮特性に及ぼす繊維構成の影響を詳細に調査，追究した報告は少ない<sup>(38)</sup>．

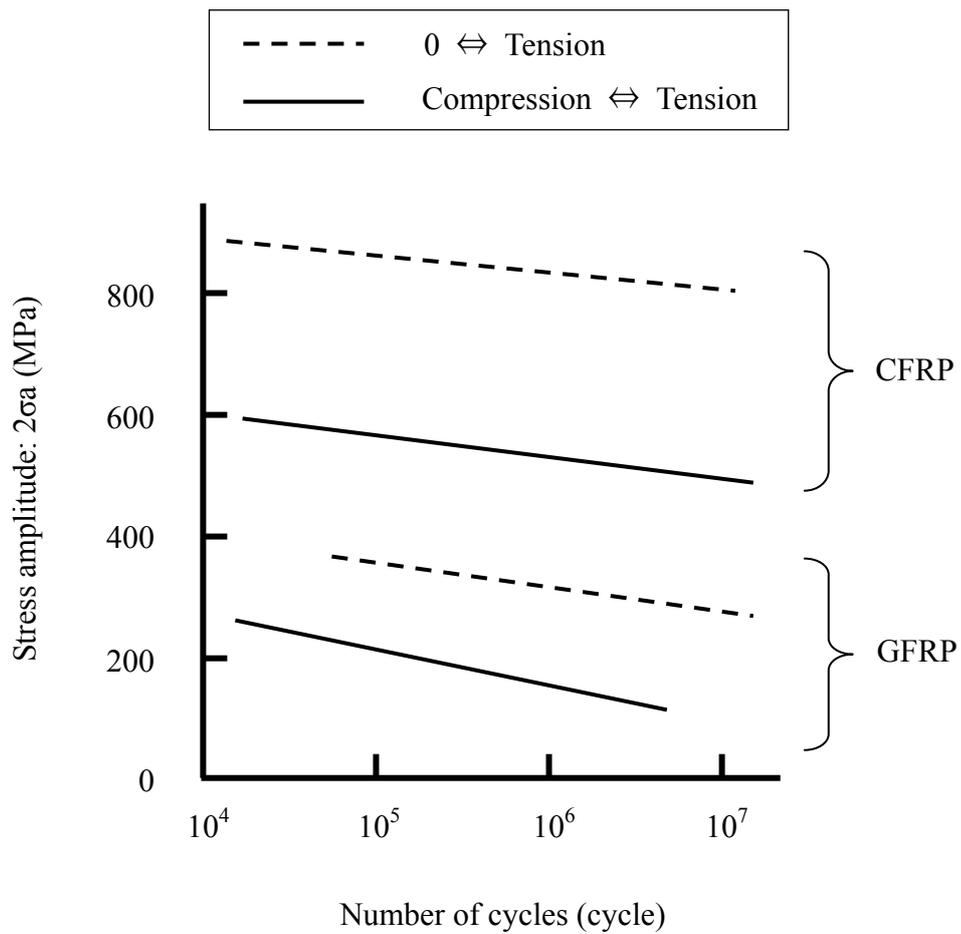
### 1.2.3 GFRP の疲労強度特性に関する研究動向

前述のように、軽量化、省エネルギー要求の急速な高まりにより、GFRP の実機製品への適用は、静止部材や補強用としての 2 次構造部材から、大型・厚肉部材や繰り返し荷重が負荷される構造部材に拡大している。このような製品では、静的強度の他、疲労強度が重要視されることが少なくない。例えば、風力発電装置のブレードは、台風などの強風時に耐えることができる最大強度（静強度）と、風の強弱や回転時の自重により負荷される繰り返し強度（疲労）の両方が求められる。最近の装置では、耐用寿命として 20 年以上の長期の耐久信頼性が要求されており<sup>(8)</sup>、小型試験片による疲労強度の確認と実機 GFRP ブレードを用いた実体疲労試験を実施し評価、検証が行われている<sup>(39)</sup>。

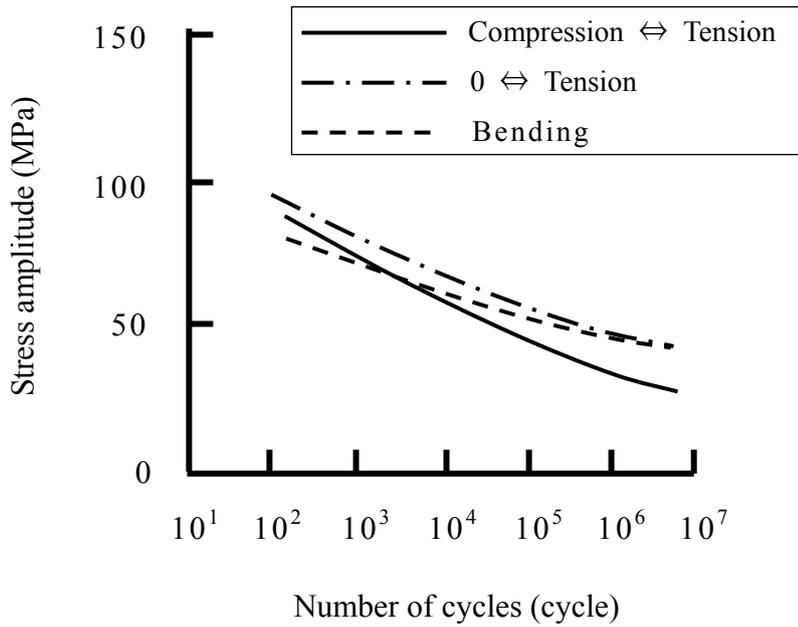
鉄鋼などの金属材料に繰り返し荷重が作用すると、その大きさが静的破壊強度あるいは降伏強度より低くても、繰り返し数の増加とともに材料内部に微小なき裂が生じる。これが疲労の初期現象であり、微小なき裂は繰り返し数の増加とともに徐々に成長し、やがて破断する。繰り返し荷重が小さい場合は、き裂は発生しないか、または発生したとしても成長せず破壊に至ることは無い。これが疲れ限度であり、一般的には繰り返し数： $10^7$  回で破断しない作用応力が目安とされる。一方、プラスチックをマトリックスとする FRP は、不均一な材料の組み合わせの影響（局所的な応力集中）もあり、疲労初期の段階で強度が低いマトリックス樹脂に複数の微小なき裂が発生する。これはトランスバースクラックと呼ばれており、このき裂が単独あるいは連結しながら成長することで、層間剥離や繊維破断に発展し最終破壊に至る<sup>(40)(41)(42)(43)</sup>。

図 1.8 に一方向繊維で強化されたカーボン繊維強化材（CFRP）とガラス繊維強化材（GFRP）の疲労曲線を示す<sup>(44)</sup>。また図 1.9 にガラスチョップドストランドマット強化材の疲労曲線を、図 1.10 にガラスロービングクロス強化材の疲労曲線を示す<sup>(45)</sup>。一般にカーボン繊維やガラス繊維は、環境劣化がなく、荷重の繰り返しのみの条件では材料劣化は起きないと言われている<sup>(46)</sup>。しかしながら複合材料になると、マトリックスのトランスバースクラックや繊維とマトリックス間の界面剥離および積層間の層間剥離が発生するため、疲労損傷は確実に起こる。CFRP は、カーボン繊維自体の疲労による劣化がほとんど無いことから疲労強さはかなり高い値を示すが、GFRP は疲労による強度低下が大きい。また、CFRP および GFRP のいずれも金属に見られるような疲れ限度は無く、繰り返し数が

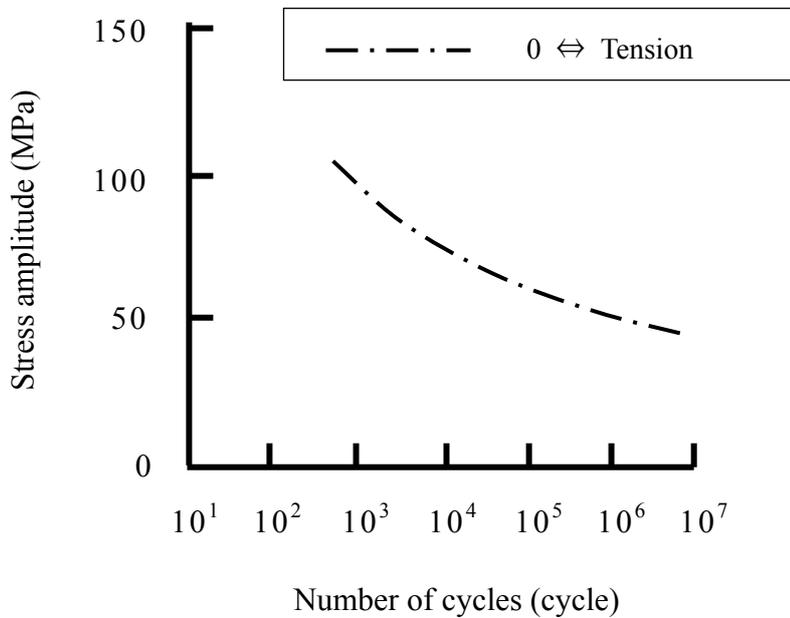
10<sup>7</sup>回を過ぎても減少傾向を示す。GFRPの静的強度と10<sup>7</sup>回における疲れ限度の比は、強化材の構成や荷重形式により異なるが、0.22～0.46の範囲にある<sup>(45)</sup>。



**Fig.1.8 Fatigue curve of unidirectional fiber reinforced plastics<sup>(44)</sup>**



**Fig.1.9 Fatigue curve of chopped strand mats GFRP <sup>(45)</sup>**



**Fig.1.10 Fatigue curve of woven roving GFRP <sup>(45)</sup>**

GFRP の疲労に関しては、応力振幅と繰り返し数の関係 (S-N 曲線) や、微細き裂の発生現象およびき裂の進展に関するものなど多くの報告があるが<sup>(40)(41)(44)(47)(48)(49)</sup>、その素過程と影響因子については未だ十分に理解されていない。また、実機適用が拡大しているステッチファブリックを用いた GFRP については、従来のガラスロービングクロスを使用した GFRP と比較して静的強度および疲労強度が優れているとの報告は多いが<sup>(5)(38)(37)(48)</sup>、引張および圧縮強さと疲労強さの関係や、疲労強さに与えるマトリックス樹脂の影響についての研究は少ない。ロービングクロスは繊維のうねりが避けられず、その影響で樹脂溜まり部 (レジンリッチ) が発生し、トランスバースクラックがより発生しやすい織物である。一方、ステッチファブリックは、繊維のうねりが少なく直進性が優れる織物であるが、ポリエステル製の織り糸 (ステッチ) が必要であり、ステッチ糸が疲労強度に与える影響を調査した研究がある<sup>(50)</sup>。

#### 1.2.4 GFRP の製造法に関する研究動向

プラスチック複合材料の製造（成形）は，金属のように市販の素材を購入し，これに切断，接合，穴加工などの機械加工を施すのではなく，強化材（繊維）とマトリックス（樹脂）を設計案に従って混合・配置し，同時に部材としての形状を作る作業になる．材料を作ることと形を作ることが同時進行するため，素材，構造設計，成形方法を一貫して考慮することはもちろん，これら間でのフィードバックとトレードオフが重要である．このように材料，設計，製造が密接に係わりあっているところは，金属などの従来材とは大きく異なる点である．GFRP の成形方法は，船舶や建材のような中～大型構造物を安価に作る成形法から，航空・宇宙機器に用いられるような，精密で高い強度と品質が要求される高度な成形法まで幅広い．GFRP の成形では，製品に要求される機能や性能，コスト，生産数量などによって，最適な材料システムおよび成形プロセスを選択することが非常に重要になる．

GFRP の成形方法には幾つかの分け方があるが，成形時の加圧力（加圧方法）によって分類すると，無加圧成形法，低加圧成形法，中高加圧成形法および真空成形法の4つに分けられる．表 1.3 に GFRP の代表的な成形方法と利点および欠点を整理して示す<sup>(18)(19)(51)(52)</sup>．ハンドレイアップ工法は無加圧成形法の代表的な工法で，船舶構造，建築部材，プラント構造材などの多くの製品に使用されてきた．この工法は，製造物の大きさに制限が無く，設備投資が最小限にできる利点があるが，人手がかかるため量産には不向きで，寸法精度，材料品質安定性および作業環境が悪いという欠点がある．

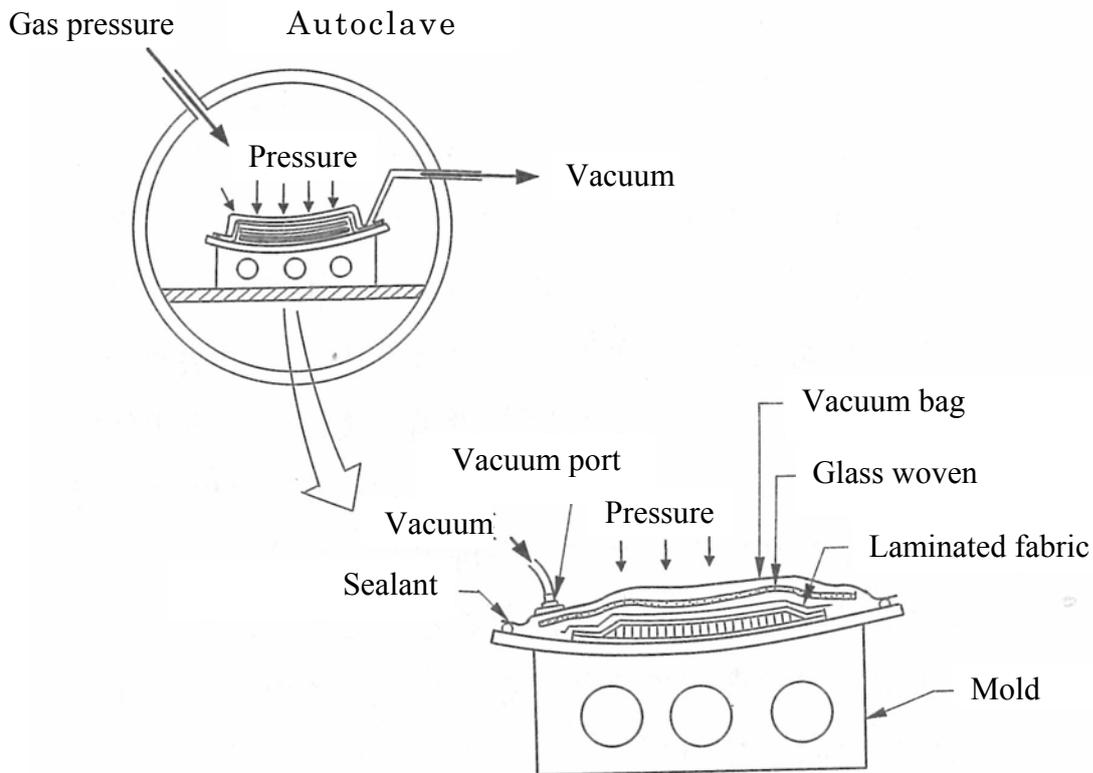
シートモールディング工法は，樹脂，強化繊維，充填材，硬化剤などを一体化した予備成形シートを，所定の寸法に裁断して必要な枚数を金型にセットしたのち，加熱・加圧して硬化させる成形法である．品質が安定し生産性が高く，生産コストが安価な反面，大型品の成形には不向きで設備コストがかさむ欠点がある．

航空および宇宙機器を中心に高強度，高品質の GFRP 製造法として拡大したオートクレーブ工法は，圧力釜を用いて気体による加圧および加熱保持を行う成形方法である．図 1.11 にオートクレーブ工法の模式図を示す<sup>(52)</sup>．本成形法は，作業環境が良く高強度，高品質部材の製造が可能である反面，大型の加熱設備が必要で作業工程が複雑となり，生産性が悪いという欠点がある．

**Table 1.3 Manufacturing method of GFRP**

Manufacturing method	Manufacturing pressure (MPa)	Advantage	Disadvantage
hand lay up/ Spray up	0.02~0.2	a)Equipment cost b)Manufacturing cost c)Jig cost d)Product size	a)Quality stability b)Size stability c)Mechanical characteristic d)Mass production e)Working environment
Filament winding	Depends on the filament tension	a)Manufacturing cost b)Mass production c)Automation	a)Product shape b)Product size c)Equipment cost d)Working environment
Resin injection	0.03~0.3	a)Quality stability b)Mass production c)Working environment	a)Product size b)Equipment cost c)Jig cost(Mold)
Sheet molding compound	5~20	a)Quality stability b)Mass production c)Manufacturing cost d)Automation	a)Product size b)Equipment cost c)Jig cost(Mold)
VaRTM*	0.1	a)Working environment b)Product size c)Quality stability d)Manufacturing cost	a)Mass production
Autoclave molding	0.3~1	a)Quality stability b)Mechanical characteristic c)Working environment	a)Product size b)Equipment cost c)Jig cost(Mold) d)Manufacturing cost e) Mass production

\* VaRTM: Vacuum assisted Resin Transfer Molding



**Fig.1.11 Outline of autoclave molding** <sup>(52)</sup>

一方、近年、大型 GFRP 部材の製造法として真空含浸工法が注目されている。この工法は真空成形法の 1 種で、バータム (VaRTM: Vacuum assisted Resin Transfer Molding) と呼ばれており、真空負圧による吸引で樹脂を含浸させる方法である。高強度で高品質の大型 GFRP 部材が低コストで製造でき、かつ作業環境も良いというメリットがあり、船舶構造や建築部材、自動車業界を中心に適用が急拡大している<sup>(5)(20)(21)(22)</sup>。風力発電装置用の大型 GFRP ブレードの製造法としても、大規模な設備投資が不要でかつ大型品の製造が高品質で安価にできることから、真空含浸工法の採用が急速に拡大している<sup>(7)(53)(54)</sup>。

### 1.3 本研究の目的

前述のように，軽量性と耐食性および耐候性が優れている GFRP は，軽量化と省エネルギーの観点から車両，建材，船舶部材を中心に適用が拡大しており，適用製品は小型静止部材や補強用 2 次構造部材から，大型 1 次構造部材へと移行しつつある．近年では，地球環境問題の世界的な高まりにより急速に普及している風力発電装置のブレードにも積極的に用いられている．

このような状況下，GFRP に求められる特性は，従来主体であった引張側の強度特性（引張強さ，引張弾性率）に加えて，圧縮側の強度特性や疲労強度が要求されるようになった．さらに，例えば出力 1000kW を越える大型風力発電装置のブレードは，長さ 30m 以上で最大肉厚が 100mm を超える超大型の厚肉部材となるので，大型 GFRP 構造物としての信頼性の確保も求められる．

このように，大型 GFRP 部材としての品質を確保しながら，同時に強度要求特性を満たすためには，使用素材の選定と同時に製造法の選定および施工条件の適正化が重要である．GFRP 用の強化繊維基材の分野では，近年，織物機械の技術が急速に進歩し多くの新しい基材が開発されている．また製造法の分野では，強度，品質およびコストのバランスがとれた大型一体成形の技術開発が急速に進んでいる．

本研究では，大型構造体への適用が今後も拡大すると予想されるガラス繊維強化プラスチック（GFRP）について，まず初めにこれまでに明らかにされていない機械的性質に及ぼす組織構造の影響について明らかにする．静的強度特性については，引張特性および圧縮特性に及ぼす繊維構成，繊維含有量，繊維織物形態およびマトリックス樹脂の影響を，ガラスクロス繊維およびスティッチ繊維を用いた GFRP で追究する．また疲労強度特性については，微視的破壊形態解明のほか，微細き裂と繰り返し数の関係，マトリックス樹脂の影響，引張および圧縮強さと疲労強さの関係について検討する．さらに，大型 GFRP 部材の 1 例として風力発電装置のブレードを例にとり，実機材の機械的性質と破壊形態を調査するとともに，素材および製造法の現状と課題について論じ，ブレードの構造と強度検証について述べる．

#### 1.4 本研究の構成と内容

本論文は全 8 章で構成されている。

第 1 章は序論であり，軽量化と省エネルギーの観点から GFRP の構造部材への適用が拡大しており，小型静止部材や補強用 2 次構造部材から，大型 1 次構造部材へと移行しつつあること，これに伴い大型 GFRP 構造体の信頼性確保から，引張側の強度特性と同時に圧縮側の強度特性や疲労強度が要求されるようになったことを述べた。また，大型 GFRP 部材としての品質を確保しながら，同時に強度要求特性を満たすためには，機械的性質と組織構造の関連性を追究，解明し，適正な素材選定を行うとともに，製造法の選定および施工条件の適正化が重要であることを述べ，本研究を行うに至った背景と目的を述べた。

第 2 章では，ガラスチョップドストランドマットとガラスロービングクロスを強化基材とした GFRP について，引張特性および圧縮特性に及ぼす繊維積層構成と繊維含有量の影響を追究すると同時に，不飽和ポリエステル樹脂およびビニルエステル樹脂の 2 種類のマトリックス樹脂の影響を調査，検討した。

第 3 章では，ガラスロービングクロスを強化基材とした GFRP について，疲労の微視的破壊形態を調査し微視的挙動の解明を試みた。特に微細樹脂き裂と繰り返し数の関係に着目し，樹脂き裂の定量化と繰り返し数比との関連性について分析・考察した。また疲労により低下する引張弾性率に着目し，引張弾性率の低下と繰り返し数との関連についても追究した。

第 4 章では，一方向ガラス繊維を主体とするスティッチファブリックを用いた GFRP について，引張特性および圧縮特性に及ぼす繊維構成，繊維含有量，繊維径の影響を調査，検討した。また  $0^{\circ}/90^{\circ}$  スティッチファブリックとロービングクロスを強化基材とした GFRP を比較しながら，繊維の織り形態と強度特性の関連について微視組織の観察結果をもとに追求した。

第 5 章では，スティッチ繊維を用いた一方向強化 GFRP において，引張・圧縮特性および疲労特性に及ぼすマトリックス樹脂の影響を調査するとともに，引張・圧縮の静的強度と疲労強度の関係について検討した。試験に用いたマトリックス樹脂は，不飽和ポリエステル樹脂，ビニルエステル樹脂およびエポキシ樹脂の 3 種である。

第 6 章では，大型 GFRP 部材の 1 例として風力発電装置のブレードを例にとり，適用されているガラス繊維およびマトリックス樹脂と GFRP の機械的性質を調査しその関連性を考察するとともに，破壊形態に及ぼすマトリックス樹脂の影響について追究した。

第7章では，GFRP 構造部材として早くから実用化され，最近，急速に大型化している風力発電装置用の GFRP ブレードについて，前章までの成果を踏まえながら素材および製造法の現状と課題について論じるとともに，その構造と強度検証について述べた．

第8章では，本研究の各章で得られた成果を総括するとともに，大型 GFRP 構造における素材および製造法選定の重要性と，今後の方向性について述べた．

## 参考文献

- (1) 強化プラスチック協会, FRP50年の歩み (FRP年表), (2005), pp. 275-345.
- (2) 日本複合材料学会, 複合材料活用辞典, 産業調査会, 第2刷, (2002), pp. 6-301.
- (3) Arakawa.C, Wind Power, Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.109, No.1052 (2006), pp. 549-552.
- (4) Ueda.Y, Shibata.M, Development of Next Generation 2MW Class Large Wind Turbines, Mitsubishi Juko Giho, Vol.41, No. 5, (2004), pp. 294-297.
- (5) 石田彪, 新世紀型強化材ニットファブリック, 繊維機械学会誌, vol. 57, No. 8, (2004), pp. 316-324.
- (6) 関和市, 新エネルギーと風力発電の現状および風車ブレード, 強化プラスチック, vol. 50, No. 8, (2004), pp. 12-22.
- (7) 川節望, 田北勝彦, 風力発電装置用複合材ブレード, FRP50年の歩み, 強化プラスチック協会, (2005), pp. 215-219.
- (8) M.George, Composites help improve wind turbine brade, Reinforced plastics, (2005), pp. 18-21.
- (9) 強化プラスチック協会, FRP構造設計便覧, (1994), pp. 12-21.
- (10) 日本複合材料学会, 複合材料活用辞典, 産業調査会, 第2刷, (2002), pp. 576-577.
- (11) 強化プラスチック協会, FRP50年の歩み (FRP年表), (2005), pp. 1-15.
- (12) 強化プラスチック協会, FRP構造設計便覧, (1994), pp. 1-6.
- (13) 日本複合材料学会, 複合材料活用辞典, 産業調査会, 第2刷, (2002), pp. 331-335.

- (14) 強化プラスチック協会, FRP50年の歩み (FRP年表), (2005), pp. 30-34.
- (15) Owens Corning, Fabric Handbook, (1994), pp. 7-16.
- (16) Kanamaru. R, Sanae. N, Knitted Fiber Reinforced Plastics, Journal of Textile Engineering, vol. 52, No. 7, (1999), pp. 15-20.
- (17) K.H. Leong, S. Ramakrishna, Z.M. Huang, G.A. Bibo, The potential of knitting for engineering composites-a review, Composites, Part A31, (2000), pp. 197-220.
- (18) 強化プラスチック協会, FRP構造設計便覧, (1994), pp. 317-320.
- (19) 昭和高分子株式会社, 不飽和ポリエステル樹脂カタログ, (2000), pp. 17-20.
- (20) 石田彪, FRP舟艇用ガラス繊維「ニットファブリック」の材料特性, 海洋水産エンジニアリング, vol. 2, No. 14, (2002), pp. 54-63.
- (21) 森本尚夫, 成形法の変遷, FRP50年の歩み, 強化プラスチック協会, (2005), pp. 93-103.
- (22) 青木修, 自動車の軽量化におけるFRPの現状と将来予測, FRP50年の歩み, 強化プラスチック協会, (2005), pp. 138-147.
- (23) 日本機械学会, 改定機械材料学, pp. 338-339.
- (24) 林毅, 複合材料工学, 日科技連出版社, 第3刷, (1972), pp. 3-24.
- (25) 日本複合材料学会, 複合材料ハンドブック, 日刊工業新聞社, 初版, (1989), pp. 459-464.
- (26) 養賢堂, 材料強度の統計的性質, pp. 212-213.
- (27) 日本複合材料学会, 複合材料活用辞典, 産業調査会, 第2刷, (2002), pp. 574-575.
- (28) 日本複合材料学会, 複合材料活用辞典, 産業調査会, 第2刷, (2002), pp. 581-582.
- (29) 日本複合材料学会, 複合材料活用辞典, 産業調査会, 第2刷, (2002), pp. 126-201.
- (30) Kawasetsu. N, Gotoh. M, Koga. M, Takita. K, Toshima. M, Development of FRP Rotor blades for large axial flow fans, The 12<sup>th</sup> Materials and Processing Conference (M&P 2004), The Japan Society of Mechanical Engineers, (2005), pp. 139 -140.
- (31) T. J. Wu, H. T. Hahn, Mechanical properties of E-glass/Vinyl ester composite fabricated by VARTM, 42<sup>nd</sup> International SAMPE Symposium, May 4-8, (1997), pp. 1-12.

- (32) C.Wonderly, J.Grenestedt, G.Fernlund, E.Cepus, Comparison of mechanical properties of glass fiber/vinyl ester and carbon fiber/vinyl ester composites, Composites: Part B 36, (2005), pp.417-426.
- (33) Kawasetsu.N, Shindo.K, Takita.K, The strength property of the FRP using stitch Fabric, Mechanical Engineering Congress 2005 Japan, The Japan Society of Mechanical Engineers, (2005), pp.587-588.
- (34) J.Fazli, E.Goeke, J.Nunes, Characterization of thick glass reinforced composites, AD Report, AD-A-256881, (1992), pp.1-16.
- (35) 強化プラスチック協会,FRP 構造設計便覧, (1994), pp.28-33.
- (36) 林毅, 複合材料工学, 日科技連出版社, 第3刷, (1972), pp.33-35.
- (37) 田渕賢, 斯波哉, 及川由紀, 天野晋武, 後藤卒土民, 宮入裕夫, 新しい形態のガラス繊維強化材を用いた FRP の機械的性能について, 強化プラスチック協会 45<sup>th</sup>CON-EX 講演会要旨集, (2000), pp.B-26/1-26/2.
- (38) A.P. Mouritz, B.N. Cox, A mechanistic approach to the properties of stiched laminates, Composites, Part A31, (2000), pp.1-27.
- (39) A.F.Blom, P.Svenkvist, S.E.Thor, Fatigue design of large wind energy conversion systems and operational experience from the Swedish prototypes, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 34, (1990), pp.45-76.
- (40) Bando.H, Zaco.M, Shiino.T, Kurashiki.T, Matsumura.K, On the Detection of Fatigue Damage in CFRP by Measuring Poisson's Ratio, The official journal of the Japan Society for Composite Materials, Vol.28, No. 1, (2002), pp.3-10.
- (41) Nishikawa.Y, Okubo.K, Fujii.T, Uenoya.T, Fatigue Damage Progression of Woven Fabric Composites under Cyclic Loading, The Japan Society of Mechanical Engineers Journal, Vol.70, No. 689, (2004), pp.101-106.
- (42) Nishikawa.Y, Okubo.K, Fujii.T, Evaluation of Fatigue Degradation with Configuration of Matrix Cracks for Plain - Woven CF/Epoxy Composites, The Japan Society of Mechanical Engineers Journal, Vol.71, No. 705, (2005), pp.775-779.
- (43) 増田雄市郎, ローピングクロス FRP の疲労破壊過程に関する研究, 日本機械学会論文集 (A 編), 47 巻, 424 号, (1981), pp.1266-1275.
- (44) 強化プラスチック協会,FRP 構造設計便覧, (1994), pp.70-71.

- (45) 日本複合材料学会, 複合材料ハンドブック, 日刊工業新聞社, 初版, (1989), pp.245-252.
- (46) 日本複合材料学会, 複合材料活用辞典, 産業調査会, 第2刷, (2002), pp.609-620.
- (47) A. M. V. Lima, A. T. Marques, Fatigue simulation of GFR composites in 3-Point Bending Tests, Science and Engineering of Composite Materials, Vol.12, (2005), pp.159-165.
- (48) Hirota. K, Noguchi. H, Lee. S.H, Kuroiwa. T, Takita. K, Fatigue Characteristics of GFRP with Stitched UD layers, The Japan Society of Mechanical Engineers Kyushu Branch Conference, (2005), pp.19-20.
- (49) Yokozeki. T, Ishikawa. T, Shinagawa. Y, Inspection of Matrix Cracks in CFRP Laminates, Symposium of New material and Nondestructive Evaluation of the Products, (2004), pp.29-32.
- (50) 藤井太一, 前川善一郎, 単位模型の疲労損傷過程に基づく繊維強化複合材料の疲労の研究, 日本機械学会論文集 (第1部), Vol.44, No.382, (1978), pp.1808-1819.
- (51) 日本複合材料学会, 複合材料活用辞典, 産業調査会, 第2刷, (2002), pp.462-520.
- (52) 強化プラスチック協会, FRP構造設計便覧, (1994), pp.317-368.
- (53) 川節望, 新藤健太郎, 田北勝彦, 加藤英司, 風力発電装置用大型FRPプレート, 強化プラスチック, vol.51, No.10, (2005), pp.18-23.
- (54) 新藤健太郎, 川節望, 田北勝彦, 加藤英司, VaRTM (真空含浸工法) による大型複合材製造技術, 三菱重工技報, vol.43, No.1, (2006), pp.11-12.

## 第 2 章 ガラスクロス繊維強化プラスチックの引張および 圧縮特性に及ぼす繊維構成の影響

### 2.1 緒 言

GFRP は軽量で耐食性および耐候性が優れているために、1970 年代初頭から汎用品、建築部材、プラント構造材として多くの製品に使用されてきた。その際、要求される特性は主に引張強さと引張弾性率であったが、近年、大型・厚肉部材や繰り返しの荷重が負荷される構造部材への適用が増加しており、引張側の強度特性のみならず圧縮側の強度特性も重要視されるようになってきた。また、必要とされる強度特性も高い値が要求されており、マトリックス樹脂および強化繊維の素材選定と組み合わせが重要となっている。

ところで、世界的な地球環境問題に対する関心の高まりにより、無尽蔵で環境負荷の小さい風力エネルギーを利用した風力発電装置が急速に普及しつつある<sup>(1)(2)</sup>。この装置のブレードには、軽量化の観点から主に GFRP が使われており、ブレードは 1000kW クラスの装置で約 30m の長さになり、一般の GFRP 構造部材に比べ著しく長大である。今後の風力発電装置の大容量化に対しては、FRP ブレードを大型、長大化することによって対応することになるが、その強度信頼性が最大の課題である<sup>(3)</sup>。

風力発電装置のブレードは、台風などの強風時に耐えることができる最大強度（静強度）を有し、風の強弱や回転時の自重によって発生する引張と圧縮の両方の荷重に耐えることが要求される。GFRP は、建材、船舶部材の他、回転部材等に用いられてきており<sup>(4)</sup>、従来から引張特性に関しては多くのデータが取得され破壊現象の解明も行われてきた<sup>(5)</sup>。また最近では、圧縮特性に関する報告も増えている<sup>(6)</sup>。しかしながら、引張特性と圧縮特性における繊維強化の差異と関連性を詳細に調査した報告は少ない。

そこで本研究では、ガラスチョップドストランドマットとガラスロービングクロスを強化基材とした GFRP について、引張特性および圧縮特性に及ぼす繊維積層構成と繊維含有量の影響を追究すると同時に、不飽和ポリエステル樹脂およびビニルエステル樹脂の 2 種類のマトリックス樹脂の影響を調査、検討した。

## 2.2 実験方法

### 2.2.1 素材

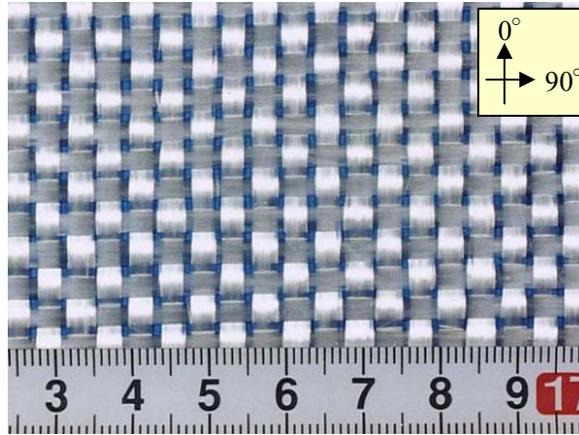
ガラス繊維は耐水性に優れ GFRP として最も多く使用されている E ガラスで、織物の形態は、最も一般的な平織りロービングクロス ERC580 (JIS R3417) とチョップドストランドマット EM450 (JIS R3411) である。ロービングクロスは、 $0^\circ$  方向とこれに直交する  $90^\circ$  方向のガラス繊維束（ロービング）で構成され、チョップドストランドマットは、長さ 50mm 以下に切断されたガラスロービングに、結合剤（バインダ）を加えて 2 次元ランダムに成形したシートである<sup>(7)</sup>。図 2.1 に本研究で用いたロービングクロスとチョップドストランドマットの外観を示す。

GFRP のマトリックス樹脂は、複合材の物性、取り扱い性、経済性などの観点から一般に不飽和ポリエステル樹脂、ビニルエステル樹脂およびエポキシ樹脂が多く用いられる。本研究では、日本ユピカ（株）製の不飽和ポリエステル樹脂（5105PT）と昭和高分子（株）製のビニルエステル樹脂（R804）の 2 種類を選定した。

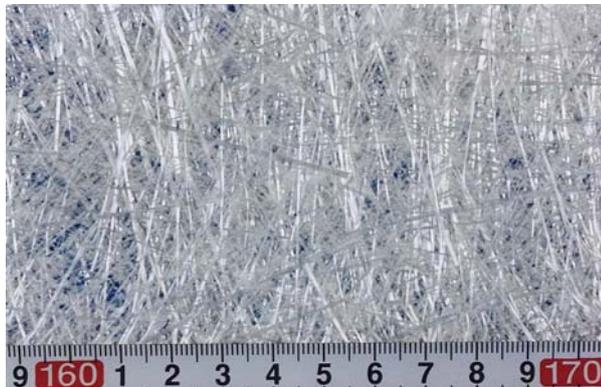
### 2.2.2 供試体の製作

試験用の積層板は、幅 300mm、長さ 600mm、厚さ 5~10mm とし、すべてゴムローラ含浸法によるハンドレイアップ工法で製作した。この工法による GFRP の製作では、樹脂の含浸性と作業性の観点から、チョップドストランドマットとロービングクロスを交互に積層する手法が一般的である。

表 2.1 にガラス繊維とマトリックス樹脂の組み合わせを示す。本研究では繊維積層構成の影響を評価する目的から、チョップドストランドマットとロービングクロスの交互積層（CM+RC）など、表 2.1 に示す 4 種類の積層構成を 2 種類のマトリックス樹脂と組み合わせた。ここで CM はチョップドストランドマットを、RC はロービングクロスをあらわし、CM+6RC は CM と 6 層の RC を組み合わせた積層を意味する。



a) Glass woven roving ERC580 (JIS R3417)



b) Glass chopped strand mats EM450 (JIS R3411)

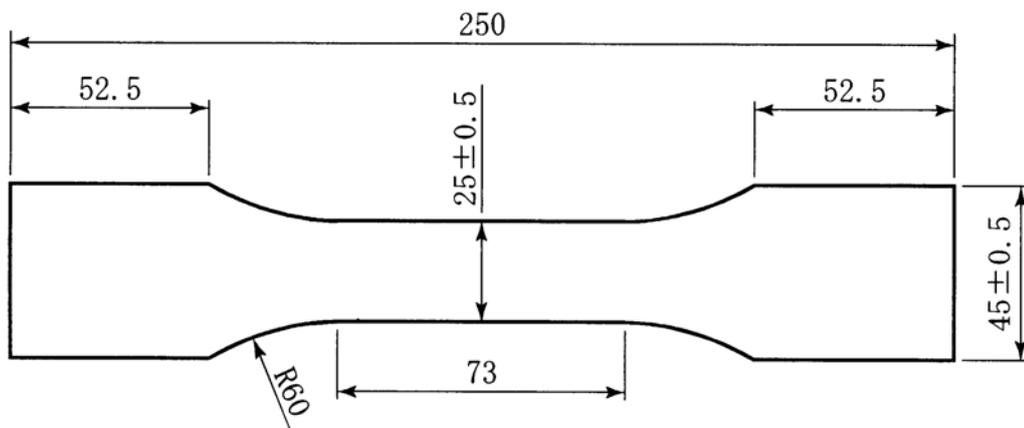
**Fig.2.1** Appearances of glass fiber fabric

**Table 2.1 Combination of glass fiber and matrix resin**

Resin	Laminated constitution of glass fiber			
	① CM	② CM +RC	③ CM +6 RC	④ RC
Unsaturated polyester resin	○	○	○	○
Vinyl ester resin	-	○	○	○

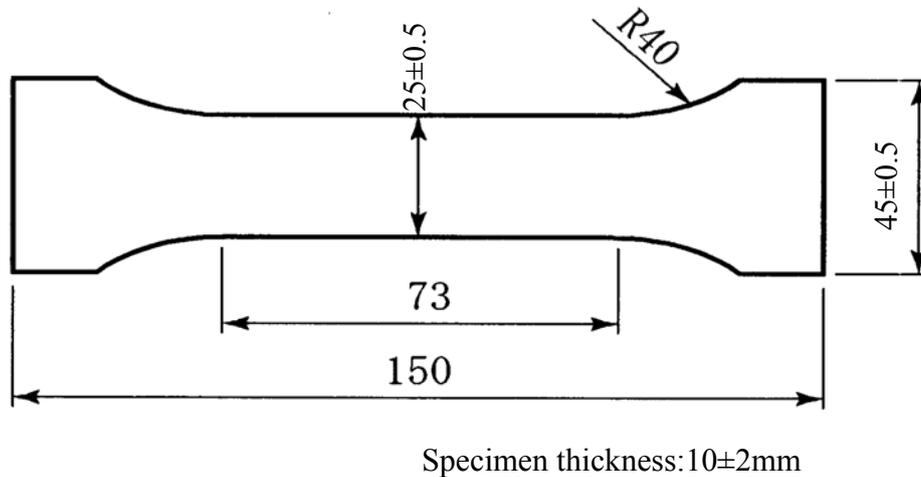
### 2.2.3 試験方法

全7種類の複合材について繊維含有量の測定と、室温における引張試験および圧縮試験を実施した。ガラス繊維含有量の測定はJIS K7052に準じ焼成法で実施し、重量含有量を算出後に体積含有量( $V_f$ )に換算した。引張試験はJIS K7054に準じて実施した。また圧縮試験には様々な手法が提案されているが、ここではJIS K7018(1999) A形試験片に準拠した大型試験片とし、JIS K7056(1995)に規定するA形試験片治具を用いた。本圧縮試験法は、表面がジグザグ形状を呈する2組の押え治具で試験片を挟み込み、面外座屈を防止しながら荷重を負荷する手法である。図2.2に引張試験片の形状を、図2.3に圧縮試験片の形状を示す。試験片の板厚は、 $10 \pm 2\text{mm}$ とした。



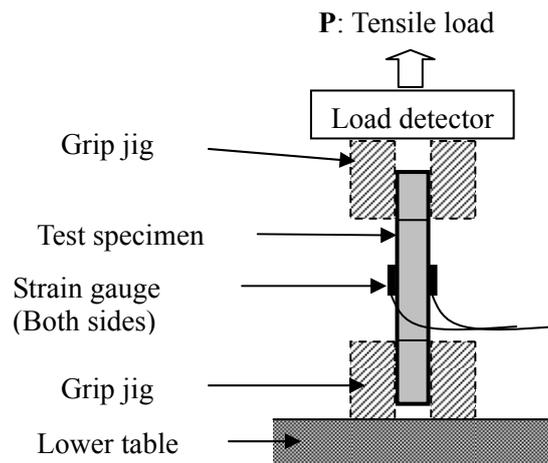
Specimen thickness:  $10 \pm 2\text{mm}$

**Fig.2.2 Tensile test specimen**

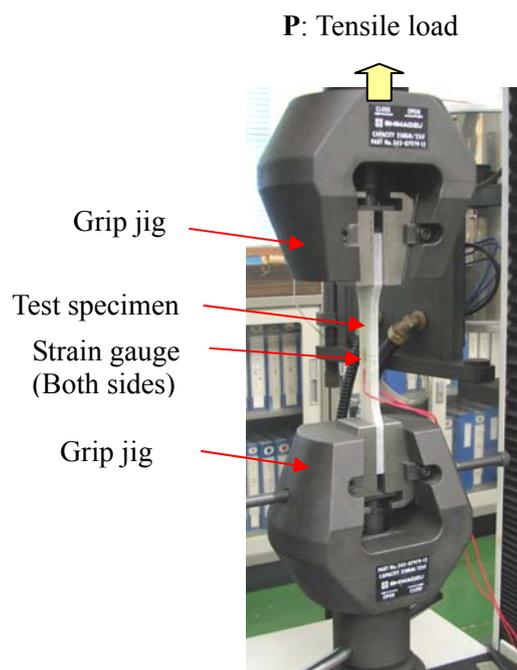


**Fig.2.3 Compressive test specimen**

引張および圧縮試験は，25T インストロン式 1127 型材料試験機で行った．試験機的主要仕様は，試験秤量：250kN，クロスヘッド速度：0.001～500mm/min，クロスヘッド有効ストローク：最大 600mm で，サーボモータ電気機械負荷方式の試験機である．図 2.4 に引張試験の状況を，図 2.5 に圧縮試験の状況を示す．試験時の荷重の負荷方向は，ロービングクロスの 0° 方向とした．またひずみの測定は，電気抵抗ひずみゲージを試験片の両面に各 1 枚，計 2 枚貼り付けて計測し，その平均値であらわした．ひずみゲージは，有効測定範囲が 5mm の共和電業社製 KFP-5-120-C1-651, 1M2R である．

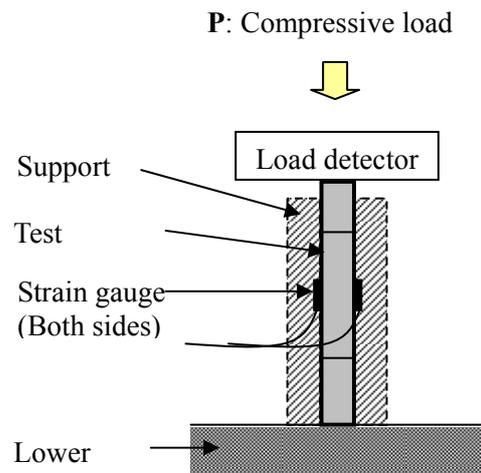


(a) Tensile test procedure

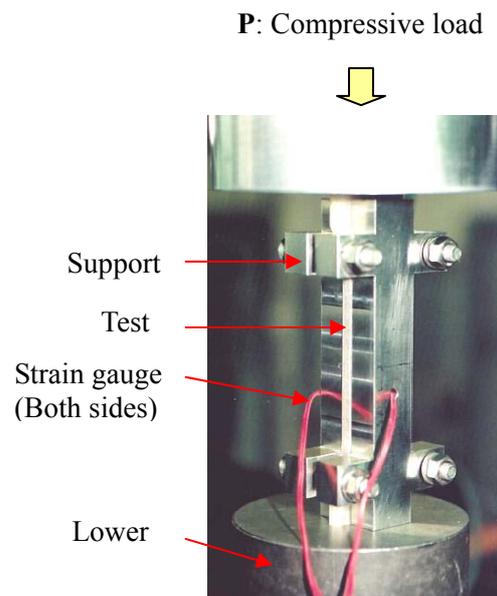


(b) Tensile test machine

**Fig.2. 4 Tensile test examination apparatus**



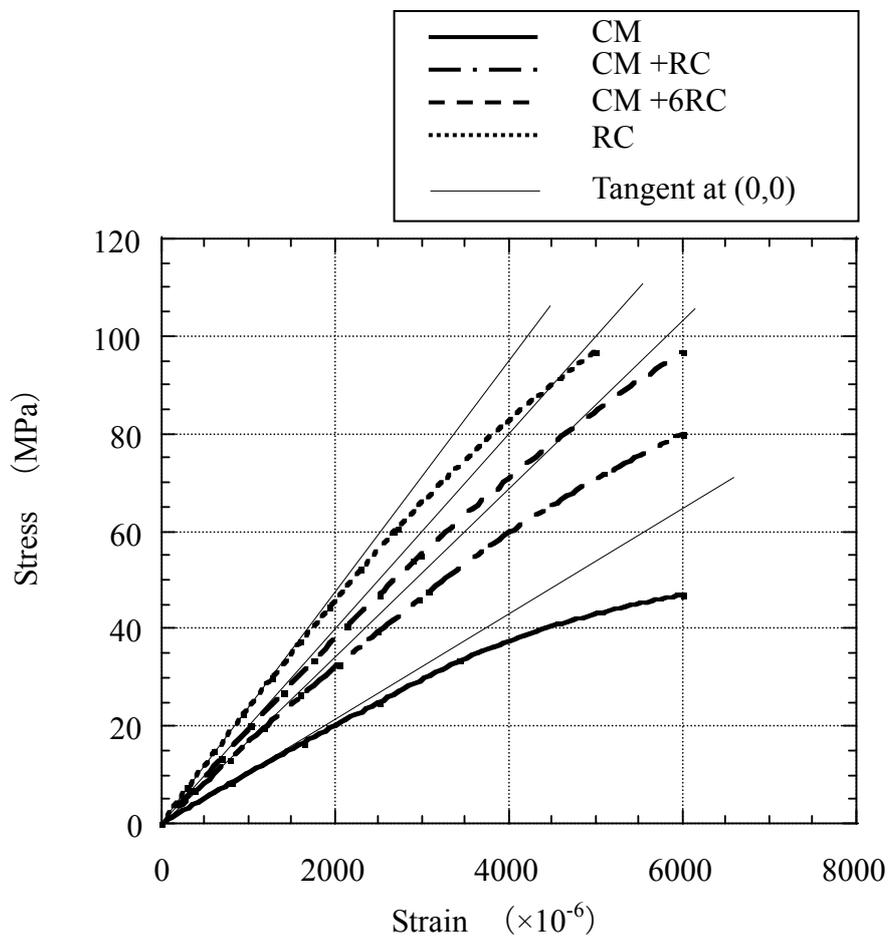
(a) Compressive test procedure



(b) Compressive test machine

**Fig.2.5 Compressive test examination**

弾性率は、応力-ひずみ曲線の傾きとして算出されるが（JIS K 7054）、その直線部の取り方によって若干の誤差が生じる場合がある。図 2.6 は、本試験で実施した不飽和ポリエステル樹脂をマトリックスとする GFRP の、引張試験初期（歪範囲：0～6000 $\mu$ ）の応力-ひずみ曲線を示す。本研究で示した弾性率は、図 2.6 に示すように、それぞれの応力-ひずみ曲線の原点（0，0）を通る接線の傾きとして算出した。圧縮弾性率についても同様の手法で算出した。



**Fig.2.6 Stress and strain curves for tensile test.  
(Unsaturated polyester resin matrix GFRP)**

### 2.3 実験結果

表 2.2 に引張試験，圧縮試験および繊維含有量測定の結果を示す．強度および弾性率は試験板毎に 2 点の数値を，繊維体積含有量 ( $V_f$ ) は試験板毎に 2 点の測定を行いその平均値を示した．

$V_f$  はチョップドストランドマット (CM) 強化材が 24.0% で最も低く，ロービングクロス (RC) 強化材が 43.6~44.6% で最も高くなった．CM と RC の両方で複合強化された GFRP の  $V_f$  は，その中間に位置する．

引張強さは， $V_f$  が最も高い RC 強化材 (43.6~44.6%) が 286~317MPa を示し， $V_f$  が最も低い CM 強化材よりも 2 割程度高い値になった．引張弾性率も同様の傾向を示し，CM 強化材が 10.6~10.7GPa であるのに対し，RC 強化材は 21.7~22.5GPa であった．CM と RC の両方で複合強化された GFRP の引張強さおよび引張弾性率は，その中間に位置する．なお，不飽和ポリエステル樹脂とビニルエステル樹脂のマトリックスの違いによる引張強さおよび引張弾性率の差は，ほとんど認められなかった．

一方，圧縮強さは， $V_f$  の増加に伴い高くなる傾向にあるが，引張強さと比較すると増加率は小さい．CM 強化材の圧縮強さが 210~230MPa であるのに対し，最も  $V_f$  が高い RC 強化材でも 235~268 MPa であった．また，ビニルエステル樹脂をマトリックスとする GFRP の圧縮強さは，わずかではあるが不飽和ポリエステル樹脂のそれよりも高い傾向にある．なお圧縮弾性率は，引張弾性率と同様に  $V_f$  の増加に比例して向上し，その数値は引張弾性率とほぼ同等の値となった．

**Table 2.2 Result of tensile and compressive test**

Resin	Glass fiber fabric	Tensile test		Compressive test		Volume fraction of glass fiber $V_f(\%)$
		Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Compressive strength (MPa)	Compressive modulus (GPa)	
Unsaturated polyester resin	CM	136	10.7	210	10.8	24.0
		152	10.6	214	11.0	
	CM+RC	187	16.5	217	16.6	33.5
		219	17.2	211	16.9	
	CM+6RC	257	20.5	217	21.1	40.5
		273	19.4	213	21.4	
	RC	304	22.5	238	23.1	44.6
		305	22.1	235	23.7	
Vinyl ester resin	CM+RC	246	16.2	216	16.8	35.3
		222	15.5	230	17.1	
	CM+6RC	261	20.8	258	21.4	42.4
		304	20.5	249	21.3	
	RC	317	22.2	268	22.1	43.6
		286	21.7	245	22.4	

## 2.4 考察

### 2.4.1 繊維積層構成と強度特性

第1章 1.2.2項で示したように、連続繊維で強化された複合材の強度特性は、繊維体積含有量 ( $V_f$ ) から算出される複合則に当てはめることができる。(1)式に、一方向強化材の主軸方向の弾性率を求める複合則を示す。同様に破壊強度に関しても、マトリックス樹脂と繊維間のすべりが無く、繊維破断と同時に複合材料が破断すると考えると複合則に当てはめて予測することができる。ただしこの式は、繊維が連続で直進性に優れ、かつ均質な場合に当てはめることができ、繊維が大きく蛇行しマクロ的に不均質な織物基材に対しては、そのまま適用することはできない。

また連続で直進性に優れている繊維の場合でも、実際には僅かな繊維のうねりや繊維配向のばらつき等により、強度特性は複合則で得られる数値よりも低くなることが多い。したがって実用材では、このような強化基材の形態や状態を示す修正係数:Kを乗じた式(2)および式(3)が簡易的に適用される<sup>(8)</sup>。

$$E_c = E_f V_f + E_m (1-V_f) \quad (1)$$

$$E_c = K \{E_f V_f + E_m (1-V_f)\} \quad (2)$$

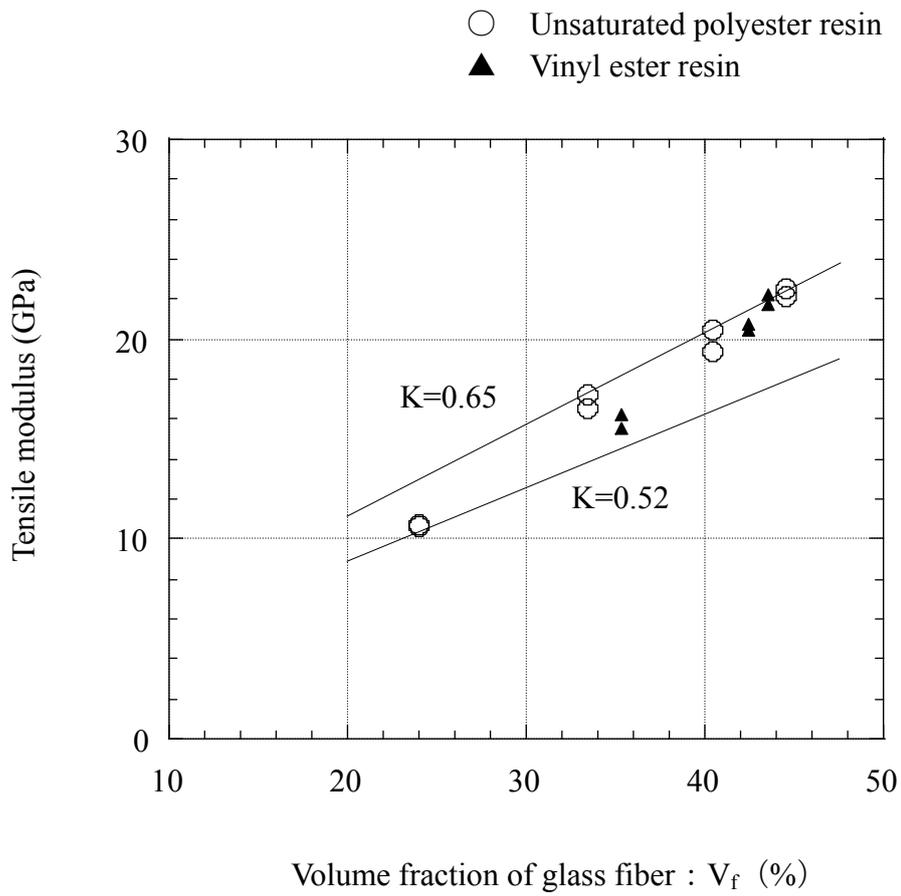
$$F_c = K \{F_f V_f + F_m (1-V_f)\} \quad (3)$$

- $E_c$  : 複合材の弾性率
- $E_f$  : 繊維の弾性率 (ガラス繊維 : 74GPa)
- $E_m$  : 樹脂の弾性率 (引張 : 3 Gpa, 圧縮 : 3 GPa)
- $F_c$  : 複合材の破壊強度
- $F_f$  : 繊維の破壊強度 (ガラス繊維 : 2GPa)
- $F_m$  : 樹脂の破壊強度 (引張 : 70MPa, 圧縮 : 150 MPa)
- $V_f$  : 繊維の体積含有量
- K : 修正係数

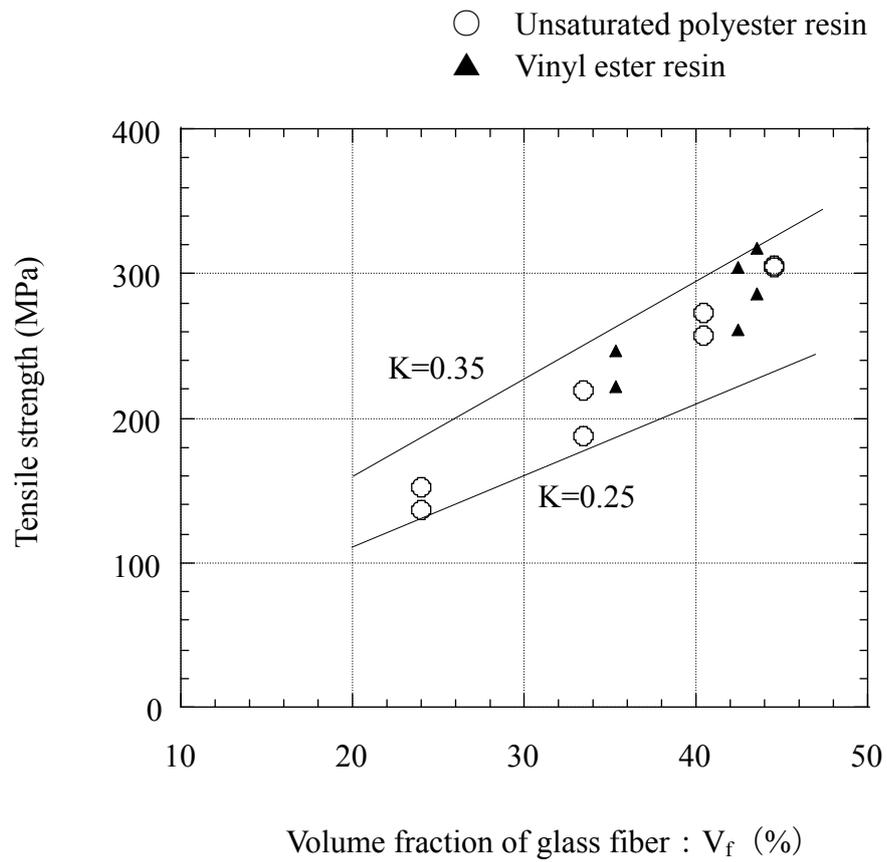
図 2.7 に引張弾性率と  $V_f$  の関係を示す。図には繊維の積層条件に関係なく、 $V_f$  を横軸にとりすべての試験データをプロットした。図中の 2 本の直線は、(2)式において修正係数：K を 0.52 と 0.65 とした場合を示すが、この図より CM 強化材および RC 強化材の混合積層複合材では、引張弾性率の K は 0.52～0.65 の範囲にあることがわかる。一方、図 2.8 に引張強さと  $V_f$  の関係を示す。図中の 2 本の直線は、(3)式において K を 0.25 と 0.35 とした場合を示すが、この図より引張強さの K は 0.25～0.35 の範囲にあることがわかる。

ここで K には、織物内の繊維のうねりや配向のばらつき、繊維物性のばらつき、マイクロボイドの影響および樹脂と繊維界面の接着強度のばらつきなどが総合的に含まれている。このうち繊維物性のばらつき、マイクロボイドの発生および樹脂と繊維界面の接着強度のばらつきについては、これらが大きな影響を与えるとすると、GFRP の強度特性は単純に繊維含有量に比例することなく、特性値そのものが大きくばらつくことになり、図 2.7 および図 2.8 のような  $V_f$  との相関は得られないと考えられる。また、ガラス繊維は表面処理が比較的容易な繊維であり、シラン系処理剤が良く知られている。早くから繊維メーカーで研究開発が行われ、メーカーごとに独自のノウハウを有し安定した処理技術を構築しており、繊維の集束性や樹脂との接着性などが改善されてきた<sup>(9)</sup>。したがってここでは、樹脂や繊維の物性および両者の界面強度のばらつきの影響は、どの素材に対しても同じでかつ影響は小さいと考え、K については織物内の繊維のうねりや配向のばらつきが主体であるとして考察した。

図 2.7 および図 2.8 において、引張強さと引張弾性率の K を比較すると、引張弾性率の方が大きくより 1.0 に近いことがわかる。すなわち CM および RC を用いた GFRP では、織物の加工時に発生する繊維のうねりや繊維配向のばらつきの影響は、弾性率よりも強度に大きくあらわれると考えられる。また(2)および(3)式において、CM と RC では織物形態が異なるため積層構成毎に K は異なると考えられるが、図 2.7 および図 2.8 をみると、CM と RC の混合積層材では積層構成に大きく影響されず  $V_f$  に比例する傾向がある。すなわち CM と RC を組み合わせた GFRP は、 $V_f$  が 20～50% の範囲において、K を同じ値とする 1 つの複合則で表現できる可能性を示唆している。



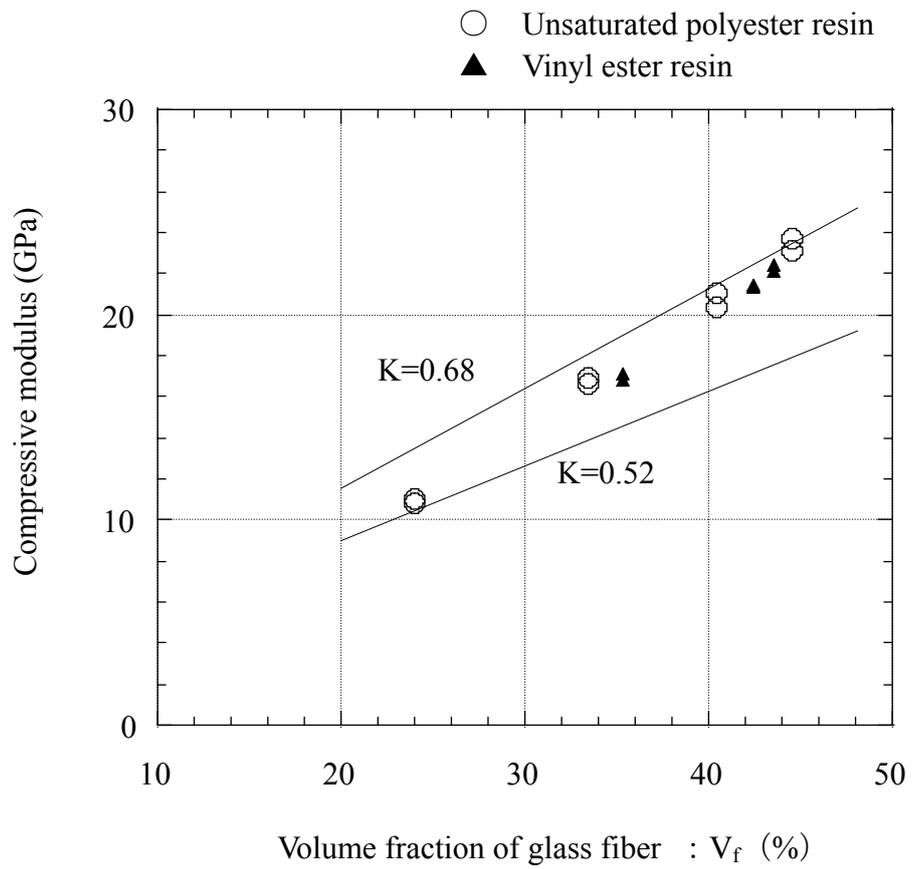
**Fig.2.7 Relation between tensile modulus and volume fraction of glass fiber**



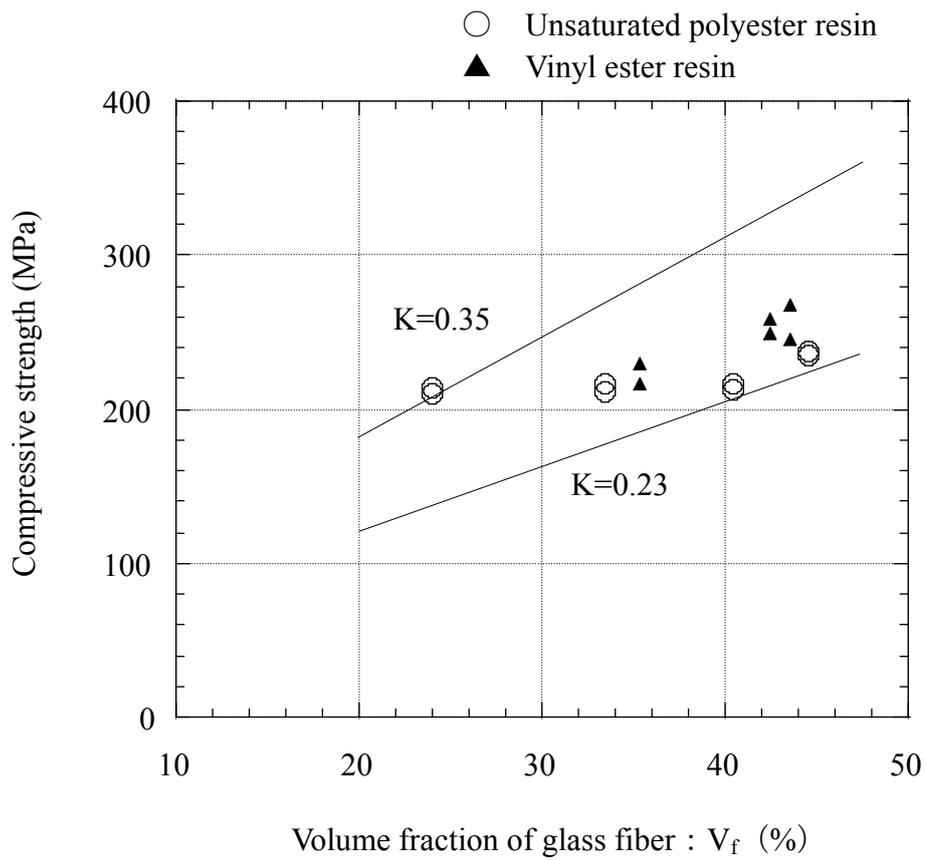
**Fig.2.8 Relation between tensile strength and volume fraction of glass fiber**

同様に図 2.9 に圧縮弾性率と  $V_f$  の関係を，図 2.10 に圧縮強さと  $V_f$  の関係を示す．図より，圧縮弾性率の  $K$  は 0.52～0.68 の範囲に，圧縮強さの  $K$  は 0.23～0.35 の範囲にあり，図 2.7 および図 2.8 で示した引張特性の  $K$  とほぼ一致することがわかる．ただし圧縮強さは， $V_f$  の増加に伴い高くなる傾向にはあるが，前述の引張強さと比較すると増加率は小さく， $V_f$  の増加とともに単純には増加しないことがわかる．特に不飽和ポリエステル樹脂をマトリックスとする GFRP では， $V_f$  が 40～60% の範囲において圧縮強さにはほとんど変化が見られなかった．一方，ビニルエステル樹脂をマトリックスとする GFRP の圧縮強さは，わずかではあるが不飽和ポリエステル樹脂のそれよりも高く， $V_f$  に比例して高くなる傾向が見られた．圧縮強さは，マトリックス樹脂の影響を受けやすい物性と考えられる．

以上より，CM と RC を組み合わせた GFRP の強度特性は， $V_f$  が 20～45% の範囲において，修正係数： $K$  を同じ値とする 1 つの複合則で表現できることがわかった．また  $K$  は，引張強さと圧縮強さおよび引張弾性率と圧縮弾性率でそれぞれほぼ同じ値を示した．従って，繊維とマトリックス樹脂間の接着が良好であると仮定すると，繊維のうねりや繊維配向のバラツキが強度および弾性率に与える影響度は，引張および圧縮特性に対しては同等であると言える．ただし圧縮強さについては，繊維含有量の増加にともない増加する傾向はあるものの，引張強さに見られるような明確な相関は認められなかった．同様の傾向は他の報告にも示されており<sup>(8)</sup>，今後，さらに詳細な調査と分析が必要と考える．



**Fig.2.9 Relation between compressive modulus and volume fraction of glass fiber**



**Fig.2.10 Relation between compressive strength and volume fraction of glass fiber**

## 2.4.2 繊維含有量と強度特性

次に繊維体積含有量 ( $V_f$ ) と強度特性について整理し考察する。図 2.11 は  $V_f$  を横軸にとり、引張強さと圧縮強さの全データを縦軸に対数表示した図である。引張強さおよび圧縮強さは、 $V_f$  が 20～50% の範囲において、それぞれ式 (4)、式 (5) で整理することができた。

$$y = 60.8e^{0.037x} \quad (4)$$

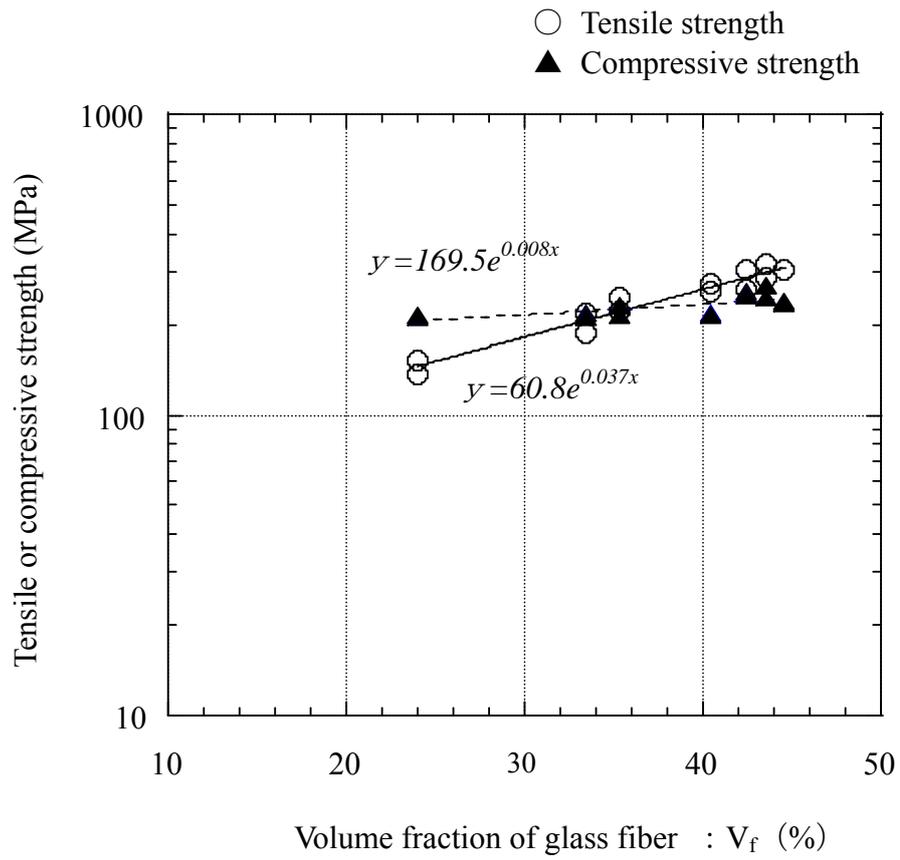
$$y = 169.5e^{0.008x} \quad (5)$$

ここで  $V_f$  が 35% 以下の範囲では、引張強さよりも圧縮強さが大きく、35% 付近で両者はほぼ同等になり、これを超えると引張強さが圧縮強さよりも大きくなることがわかる。すなわち、本材料を引張強さと圧縮強さの両方が関与する構造物に適用する場合は、 $V_f$  が 35% 以下の場合は引張強さを基準に、 $V_f$  が 35% を超える場合は圧縮強さを基準に考えなければならないことを意味する。

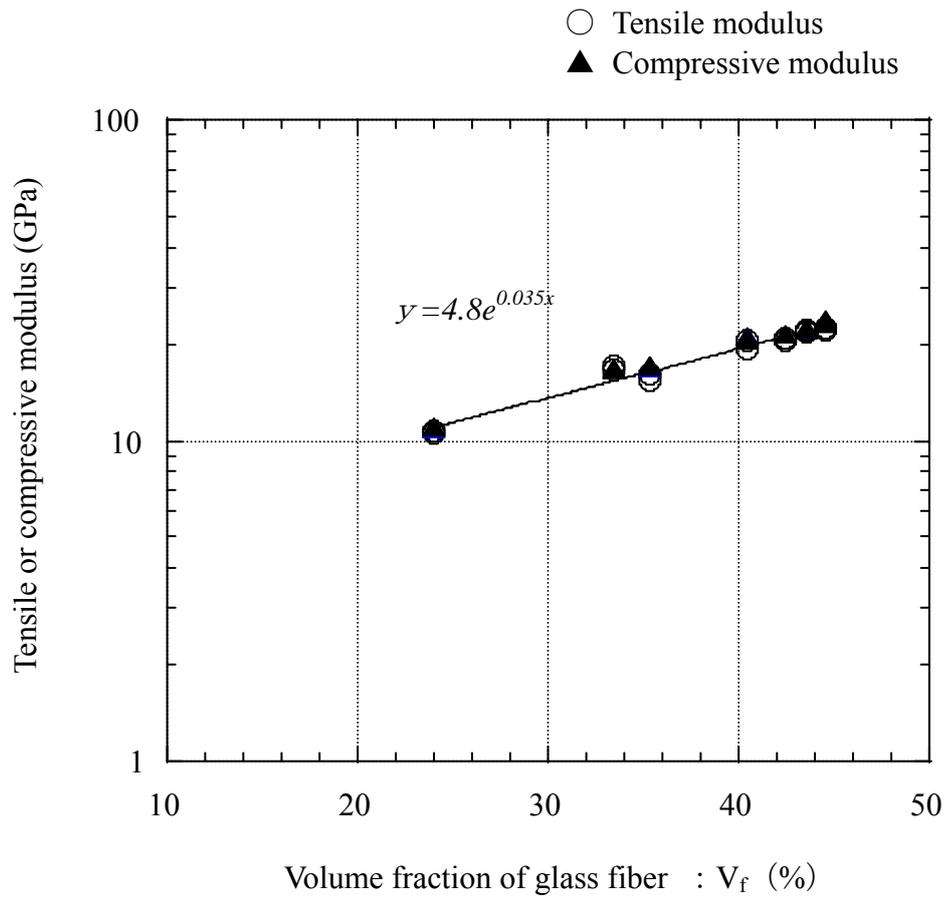
一般に引張強さと圧縮強さを比較した場合、引張強さよりも圧縮強さが低くなることは、多くの文献で示されている<sup>(10)(11)</sup>。この現象は GFRP のみならず、CFRP にも当てはまる現象であるが、 $V_f$  の違いによる影響まで言及した例はない。本研究において、CM と RC の 2 種類の強化繊維を任意に組み合わせた GFRP では、 $V_f$  が 35% を超えると圧縮強さが低くなることが明らかになった。

同様に図 2.12 は、 $V_f$  を横軸にとり弾性率の全データを縦軸に対数表示した図である。引張弾性率および圧縮弾性率は、 $V_f$  が 20～50% の範囲において同一の近似式 (6) で整理することができた。すなわち CM と RC の 2 種類の強化繊維を組み合わせた GFRP の引張および圧縮弾性率は、 $V_f$  に対する依存度が大きく、樹脂の種類や強化基材の組み合わせの影響は小さいことがわかった。

$$y = 4.8e^{0.035x} \quad (6)$$



**Fig.2.11 Relation between tensile or compressive strength and volume fraction of glass fiber**



**Fig.2.12 Relation between tensile or compressive modulus and volume fraction of glass fiber**

### 2.4.3 マトリックス樹脂と強度特性

前項において、引張および圧縮特性は  $V_f$  に大きく依存し、樹脂の影響は小さいことを述べた。特に弾性率に関しては、引張および圧縮ともに  $V_f$  の影響が支配的であり、マトリックス樹脂の影響はほとんど認められなかった。ただし圧縮強さに限っては、わずかではあるがビニルエステル樹脂をマトリックスとする GFRP が、不飽和ポリエステル樹脂マトリックスとする GFRP よりも高い傾向にある（図 2.10）。ビニルエステル樹脂は、エポキシ樹脂とアクリル酸との反応生成樹脂で、耐食性、接着性に優れ、機械性質的には延性および耐衝撃性に優れている。例えば引張破断伸びでは、不飽和ポリエステル樹脂が 1.5～2.5% であるのに対し、ビニルエステル樹脂は 3.0～5.0% の値を示す<sup>(12)</sup>。GFRP の強度特性は、全般的に  $V_f$  に大きく依存していることは明らかであるが、圧縮強さに関しては、これに加えてマトリックス樹脂の特性も影響する。GFRP の圧縮破壊は、純粋なせん断破壊の他、マトリックス樹脂と繊維間の接着強さが関係する繊維座屈破壊や層間破壊の影響も受けることから、これらの現象も踏まえて、さらなる調査と現象解明が必要と考える。

## 2.5 結 言

ガラスチョップドストランドマット (CM) とガラスロービングクロス (RC) を強化基材とした GFRP について、引張特性および圧縮特性に及ぼす繊維積層構成と繊維含有量の影響を追究すると同時に、不飽和ポリエステル樹脂およびビニルエステル樹脂の 2 種類のマトリックス樹脂の影響を調査、検討した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) CM と RC を組み合わせた GFRP の強度特性は、繊維体積含有量 ( $V_f$ ) が 20~45% の範囲において、修正係数:  $K$  を同じ値とする 1 つの複合則であらわすことができる。
- (2)  $K$  は引張強さと圧縮強さに対して、また引張弾性率と圧縮弾性率に対して、それぞれほぼ同じ値となった。従って、繊維とマトリックス樹脂間の接着が良好であると仮定すると、繊維のうねりや繊維配向のバラツキが強度および弾性率に与える影響度は、引張および圧縮特性に対しては同等であると考えられる。
- (3)  $V_f$  と引張および圧縮強さの関係は、横軸に  $V_f$  を線形表示し、縦軸に強度を対数表示したグラフにおいて、 $V_f$  が 20~50% の範囲でそれぞれ直線近似できる。また  $V_f$  が 35% 以下では引張強さよりも圧縮強さが大きく、35% 近傍で同等になり、これを超えると引張強さが圧縮強さよりも大きくなる。
- (4)  $V_f$  と引張および圧縮弾性率の関係は、 $V_f$  が 20~50% の範囲ではほぼ同一の近似式で整理できる。弾性率は、 $V_f$  に対する依存度が大きく、樹脂の種類や強化基材の組み合わせの影響は小さいことがわかった。
- (5) マトリックス樹脂の違いによる強度特性の差異は、若干ではあるが圧縮試験において認められ、延性および接着強さが優れているビニルエステル樹脂をマトリックスとする GFRP が高い圧縮強さを示した。

## 参考文献

- (1) Arakawa.C, Wind Power, Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.109, No.1052 (2006), pp 549-552.
- (2) Ueda.Y, Shibata.M, Development of Next Generation 2MW Class Large Wind Turbines, Mitsubishi Juko Giho, Vol.41, No. 5, (2004), pp.294-297.
- (3) M.George, Composites help improve wind turbine , Reinforced plastics, (2005), pp.18-21.
- (4) Kawasetsu.N, Gotoh.M, Koga.M, Takita.K, Toshima.M, Development of FRP Rotor blades for large axial flow fans, The 12<sup>th</sup> Materials and Processing Conference (M&P 2004), The Japan Society of Mechanical Engineers, (2005), pp.139 -140.
- (5) Kawasetsu.N, Shindo.K, Takita.K, Kato.E, Development of Large FRP Blades for Wind Turbines, Reinforced Plastics, Vol.51, No. 10, (2005), pp.496-501.
- (6) T. J. Wu, H. T. Hahn, Mechanical properties of E-glass/Vinyl ester composite fabricated by VARTM, 42<sup>nd</sup> International SAMPE Symposium, May 4-8, (1997), pp.1-12.
- (7) The Japan Reinforced Plastics Society, FRP structure design handbook, (1994), pp.2-3.
- (8) The Japan Reinforced Plastics Society, FRP structure design handbook, (1994), pp.30-33.
- (9) The Japan Reinforced Plastics Society, FRP structure design handbook, (1988), pp.6-8.
- (10) Kawasetsu.N, Shindo.K, Takita.K, The strength property of the FRP using stitch Fabric, Mechanical Engineering Congress 2005 Japan, The Japan Society of Mechanical Engineers, (2005), pp.587-589.
- (11) C.Wonderly, J.Grenestedt, G.Fernlund, E.Cepus, Comparison of mechanical properties of glass fiber/vinyl ester and carbon fiber/vinyl ester composites, Composites: Part B 36, (2005), pp.417-426.
- (12) The Japan Reinforced Plastics Society, FRP structure design handbook, (1994), pp.16-17.

## 第 3 章 ガラスクロス繊維強化プラスチックの微視的疲労損傷

### 3.1 緒 言

近年，軽量化，省エネルギーの要求が急速に高まり，GFRP を大型・厚肉部材や，繰り返し荷重が負荷される構造部材に使用するケースが増加している．このような製品では静的強度の他，疲労強度が重要視されることが少なくない．例えば，クリーンエネルギーの代表である風力エネルギーを利用した風力発電装置は，数～数十 kW クラスの小型装置では木製ブレードや金属のアルミニウム合金製ブレードが使用されていた時代もあったが，現在の大型機（数百～数千 kW）ではそのほとんどが複合材製で，中でも GFRP が主体である<sup>(1)(2)</sup>．

風力発電装置のブレードは，台風などの強風時に耐えることができる最大強度（静強度）と，風の強弱や回転時の自重により負荷される繰り返し強度（疲労）が求められる．最近の装置では，耐用寿命としては 20 年以上の長期の耐久性を要求されている<sup>(1)</sup>．プラスチックをマトリックスとする複合材（FRP）の疲労現象に関しては，応力と繰り返し数の関係（S-N 曲線）や，微細き裂の発生，進展および検知方法に関する報告がこれまでも多くの文献で示されているが<sup>(3)(4)(5)(6)(7)</sup>，その素過程と影響因子については未だ十分に理解されていない．

そこで本研究では，ガラスロービングクロスを強化基材とした GFRP について，疲労の微視的破壊形態を調査し微視的挙動の解明を試みた．特に樹脂き裂の発生状況と繰り返し数の関係に着目し，樹脂のき裂密度および平均長さとの繰り返し数比の関連性について分析・考察した．また疲労により低下する引張弾性率に着目し，引張弾性率の低下と繰り返し数との関連について追究した．

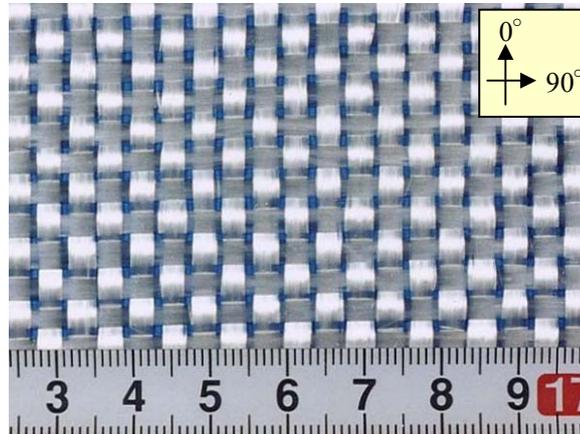
## 3.2 実験方法

### 3.2.1 素材と試験板の製作

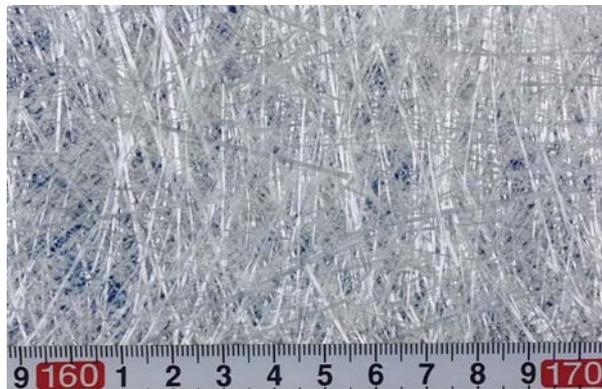
ガラス繊維は，耐水性に優れ樹脂補強用として最も多く使用されている E ガラスであり，織物の形態はロービングクロス ERC580 (JIS R3417) とチョップドストランドマット EM450 (JIS R3411) の 2 種類である．ロービングクロス (RC) は， $0^\circ$  方向とこれに直交する  $90^\circ$  方向のガラス繊維束 (ロービング) で構成され，チョップドストランドマット (CM) は，長さ 50mm 以下に切断されたガラスロービングに結合剤 (バインダ) を加えて 2 次元ランダムに成形したシートである<sup>(8)</sup>．図 3.1 に本研究で用いた RC と CM の外観を示す．またマトリックス樹脂は，複合材の物性，取り扱い性，経済性などの観点から，汎用 GFRP で多用されている不飽和ポリエステル樹脂が好ましいので，本研究では日本ユピカ (株) 製の不飽和ポリエステル樹脂 (5105PT) を選定した．試験用の積層板は，幅 300mm，長さ 600mm，厚さ 4~6mm とし，すべてゴムローラ含浸法によるハンドレイアップ工法で製作した．積層構成は，RC のみの積層材と CM と RC の交互積層材の 2 種とした．

### 3.2.2 試験方法

製作した 2 種類の GFRP は，疲労試験を実施する前に静強度を確認するため室温引張試験を実施した．引張試験は JIS K7054 に準じて実施し，試験片の板厚は  $10 \pm 2$ mm とした．図 3.2 に引張試験片の形状を示す．ひずみの測定は，引張試験片の平行部中央の表裏にひずみゲージを各 1 枚，計 2 枚貼り付けて行い，その平均値を算出した．ひずみゲージは，有効測定範囲が 5mm の共和電業社製 KFP-5-120-C1-651, 1M2R を用い，引張試験機は 25T インストロン式 1127 型材料試験機を使用した．疲労試験は，JIS K7082 および JIS K7083 に準じて実施し，試験片形状は JIS K7054 (引張試験) を参考に修正を加えた．図 3.3 に疲労試験片の形状を示す．ひずみの測定は，引張試験片と同様に試験片中央の表裏にひずみゲージを貼り付けて行い，その平均値を算出した．図 3.4 に疲労試験の状況を示す．試験機は島津式疲労試験機 EHK-UB10-20L 型を使用し，繰り返し速さは試験片の発熱を避けるため 2Hz とし，負荷応力比  $R (\sigma_{max} / \sigma_{min})$  は引張と圧縮を交互に繰り返す  $R=-1$  の条件とした．また試験開始時には，毎回ひずみゲージの左右の挙動を確認し，特に圧縮時に座屈が発生しないよう配慮した．

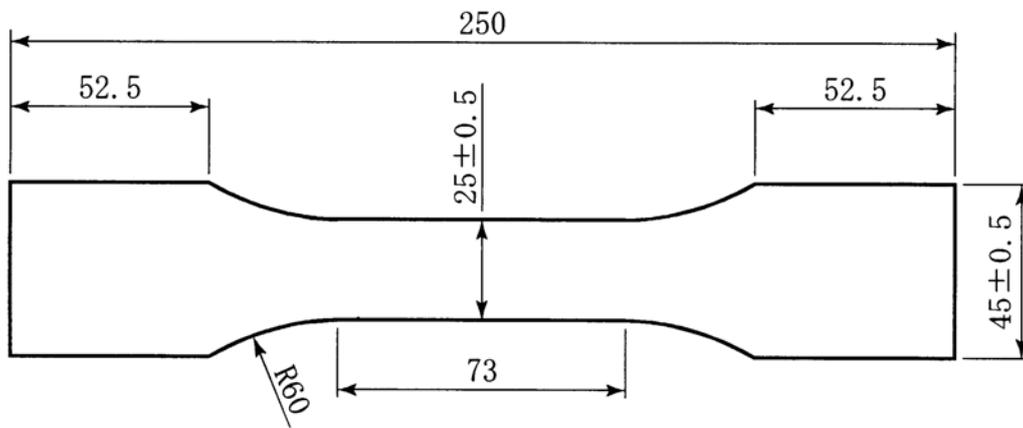


a) Glass woven roving ERC580 (JIS R3417): RC



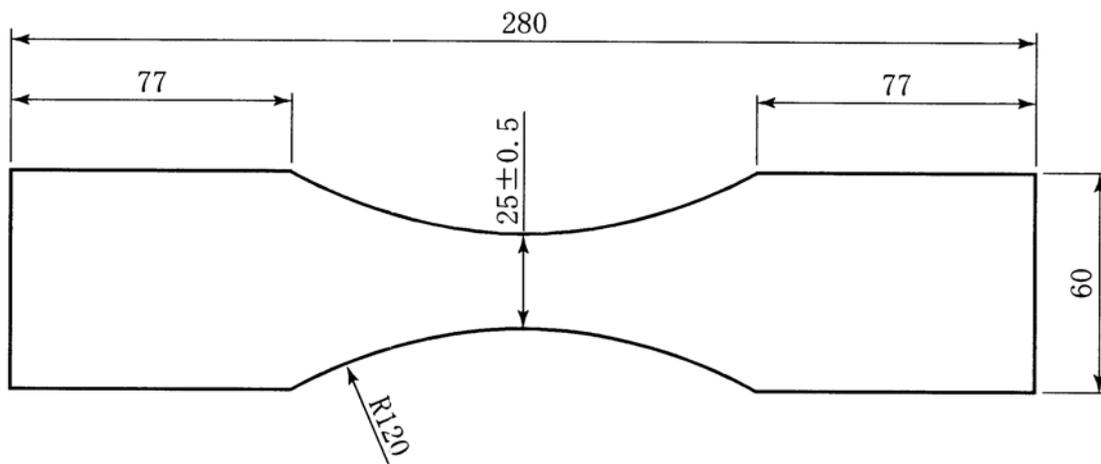
b) Glass chopped strand mats EM450 (JIS R3411): CM

**Fig.3.1** Appearances of glass fiber fabric



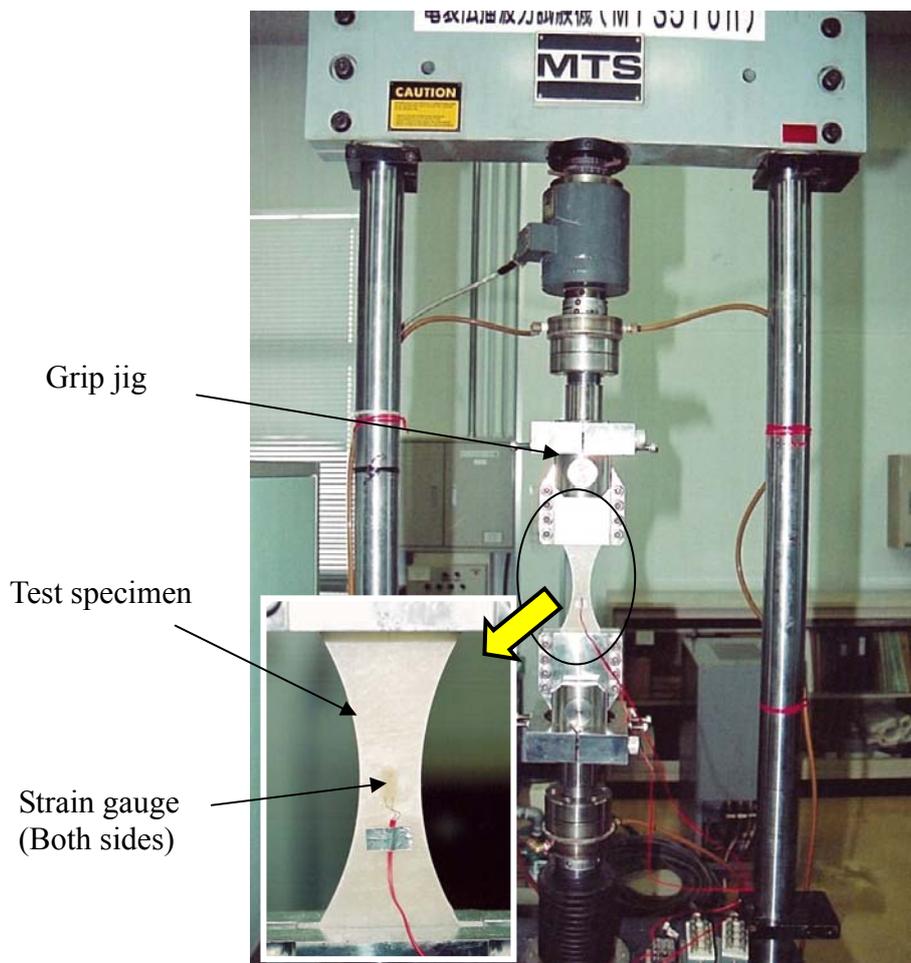
Specimen thickness:  $10 \pm 2$ mm

**Fig.3.2 Tensile test specimen**



Specimen thickness :  $10 \pm 2$ mm

**Fig.3.3 Fatigue test specimen**



**Fig.3.4 Apparatus of fatigue test**

### 3.3 実験結果

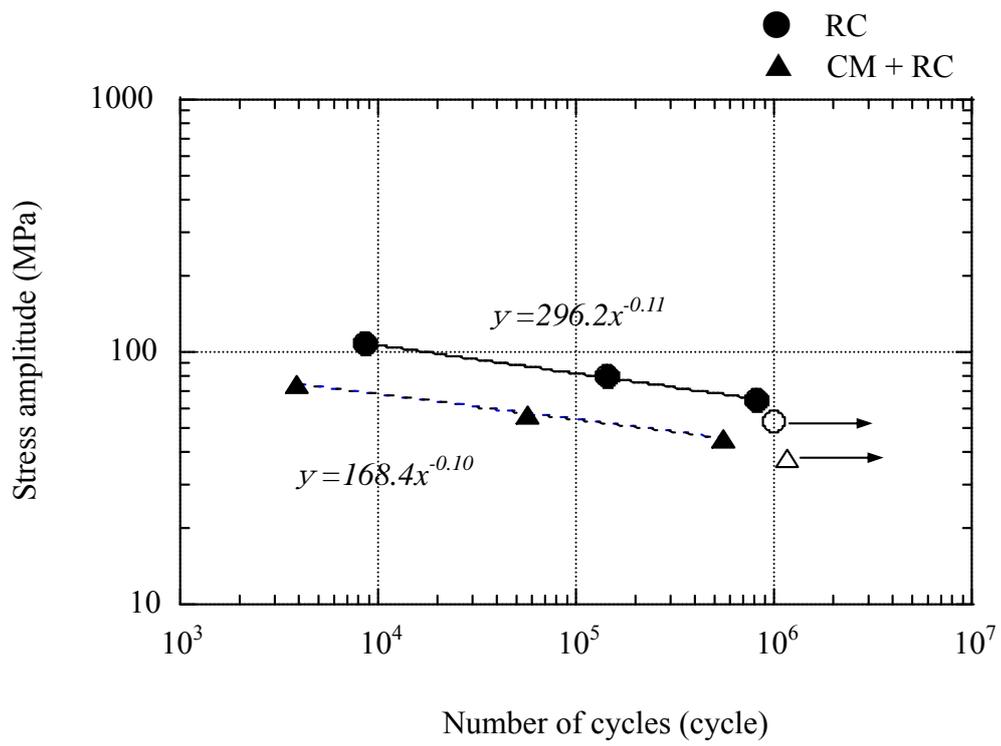
表 3.1 および表 3.2 にそれぞれ引張試験および疲労試験の結果を示す。図 3.5 は疲労試験結果から求めた応力振幅 ( $\sigma_a$ ) と繰り返し数 (N) の関係である。

**Table 3.1 Tensile test results**

Resin	Laminated constitution	Tensile test	
		Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)
Unsaturated polyester resin	RC	304	22.5
		305	22.1
	CM + RC	223	15.8
		211	15.3

**Table 3.2 Fatigue test results**

Laminated constitution of glass fiber	No	Stress amplitude (MPa)	Number of cycles for rupture: Nf	Remarks
RC	①	53.4	$1.00 \times 10^6$	Not rupture
	②	64.3	$8.17 \times 10^5$	Rupture
	③	80.5	$1.43 \times 10^5$	Rupture
	④	107.4	$8.49 \times 10^3$	Rupture
CM + RC	①	37.8	$1.16 \times 10^6$	Not rupture
	②	45.6	$5.6 \times 10^5$	Rupture
	③	56.8	$5.70 \times 10^4$	Rupture
	④	74.8	$3.89 \times 10^3$	Rupture



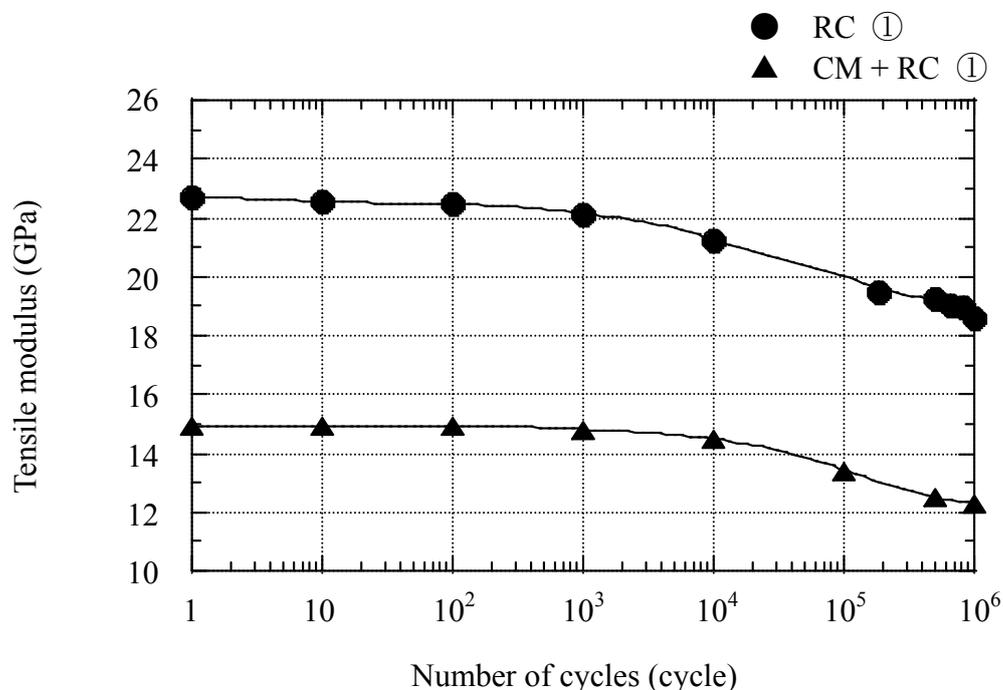
**Fig.3.5 Fatigue test result**

疲労試験では，応力振幅が小さくなるほど破断までの繰り返し数は大きくなり，RC 積層材の場合は，応力振幅 64.3MPa で破断時の繰り返し数は  $8.17 \times 10^5$  回であった．また試験結果は，縦軸（応力振幅）および横軸（繰り返し数）とも対数表示としたとき，それぞれ式 (1) および式 (2) で整理された．

$$y = 296.2x^{-0.11} \quad (1)$$

$$y = 168.4x^{-0.10} \quad (2)$$

さらに疲労現象をより詳細に把握するため，応力振幅がそれぞれ最も小さな試験片 No. ① において，疲労試験途中の引張弾性率の計測を試みた．弾性率の計測は疲労試験を中断し，試験片中央部の表裏のひずみゲージを毎回貼り直して行った．図 3.6 に引張弾性率と繰り返し数の関係を示す．引張弾性率は，繰り返し回数が  $1 \times 10^4$  回付近から明瞭に低下し始め， $1 \times 10^6$  では初期値からそれぞれ 18% 低下した．この現象は，絶対値は異なるが RC 積層材および CM+RC 積層材の両材料でほぼ同じ傾向であった．



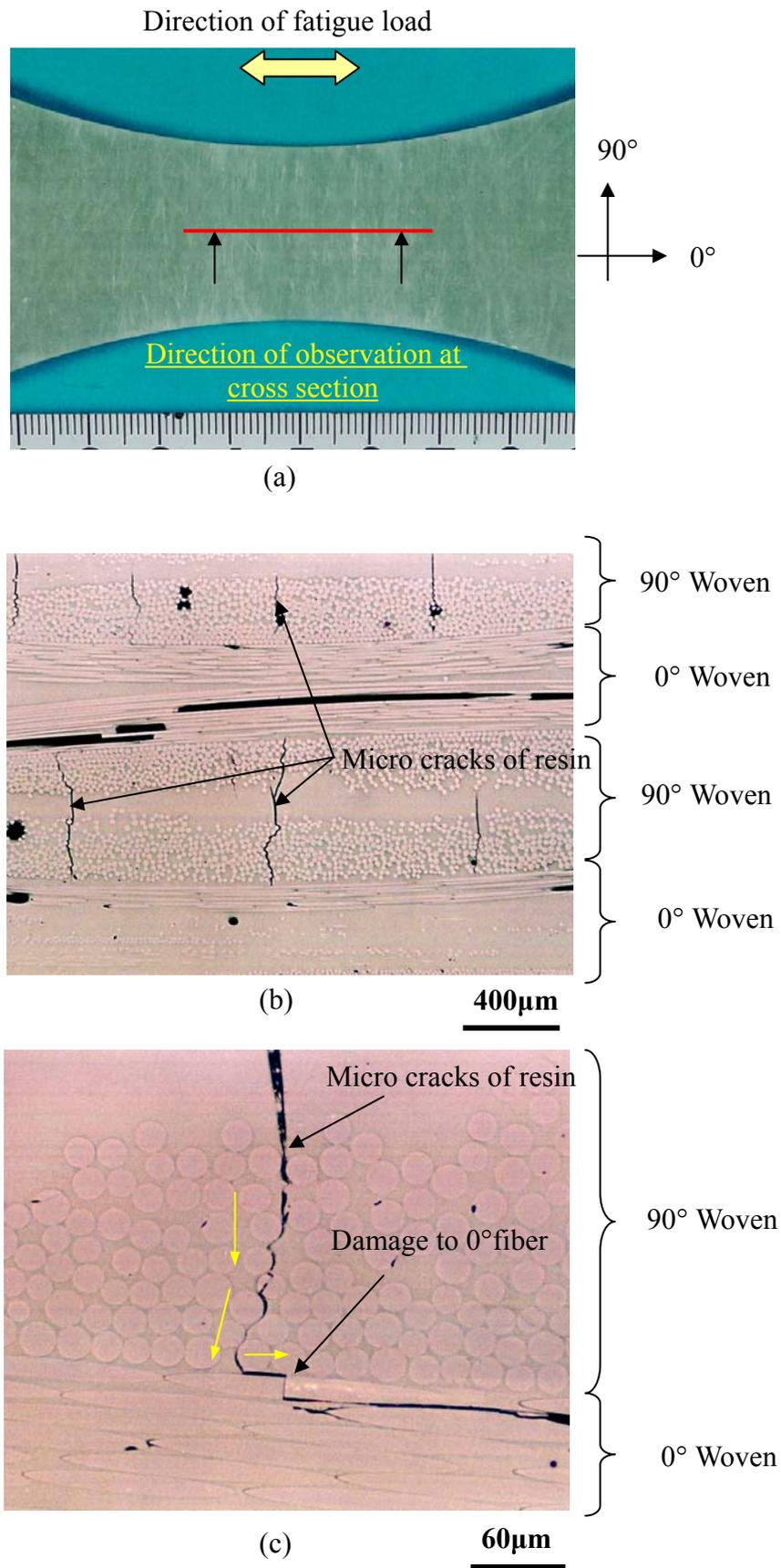
**Fig.3.6 Tensile modulus measurement results from fatigue test**

### 3.4 考察

#### 3.4.1 疲労による微視的破壊形態について

図 3.7 に 53.4MPa の応力振幅で  $1.00 \times 10^6$  回繰り返し負荷した後の、RC 積層材①の観察結果を示す。内部には荷重負荷方向に対し直角方向に開口した樹脂き裂が、多数発生していた(図 3.7 (b))。この樹脂き裂は  $90^\circ$  方向の繊維束内に発生しており、トランスバースクラックと呼ばれるき裂である。その発生メカニズムは、カーボン繊維強化プラスチック(CFRP)を中心に多くの文献で論じられている<sup>(3)(7)</sup>。しかし、その進展挙動の詳細を観察した例は少なく、挙動も明らかにされていない。

トランスバースクラックは、 $90^\circ$  方向の繊維束内に発生し繊維間を縫うように進展した後、そのほとんどは  $0^\circ$  方向繊維束に達したところで一旦停止する。その後、 $0^\circ$  方向繊維に沿って層間剥離に進展し、最終的には各層が分離することによって座屈破壊するか、または繊維破壊をともなって破断に至るとされている<sup>(3)</sup>。ところが、本研究でのロービングクロスを強化材とした GFRP では、図 3.7 (c) に示すように層間剥離に進展することなく、 $0^\circ$  方向繊維を破断して進展するき裂も確認された。一般にガラス繊維は、カーボン繊維と比較して疲労に弱いことが示されている<sup>(9)</sup>。したがって樹脂き裂が到達した部分では、応力集中も加わりガラス繊維が容易に破断することは十分に考えられる。また、繊維のうねりや繊維配向のばらつき等が発生しやすいロービングクロス等の織物を強化基材とした GFRP では、繊維の損傷がより顕著にあらわれやすく、き裂が層間方向に進む前に繊維自体が疲労により破断することが予想され、この場合、疲労破壊が急速に進展する可能性がある。この一連の疲労き裂の進展挙動は、特にロービングクロス等の織物基材を用いた GFRP において起こりやすい微視的破壊現象と考えられる。



**Fig.3.7 Microstructures of specimen after fatigue test**

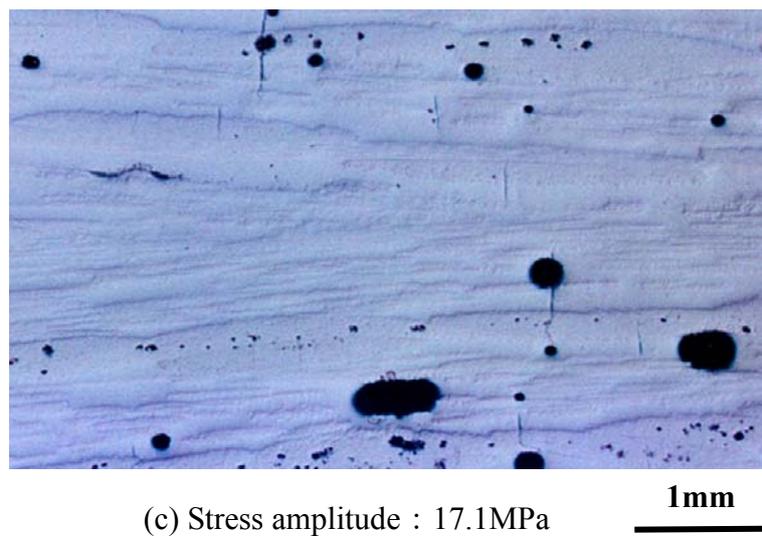
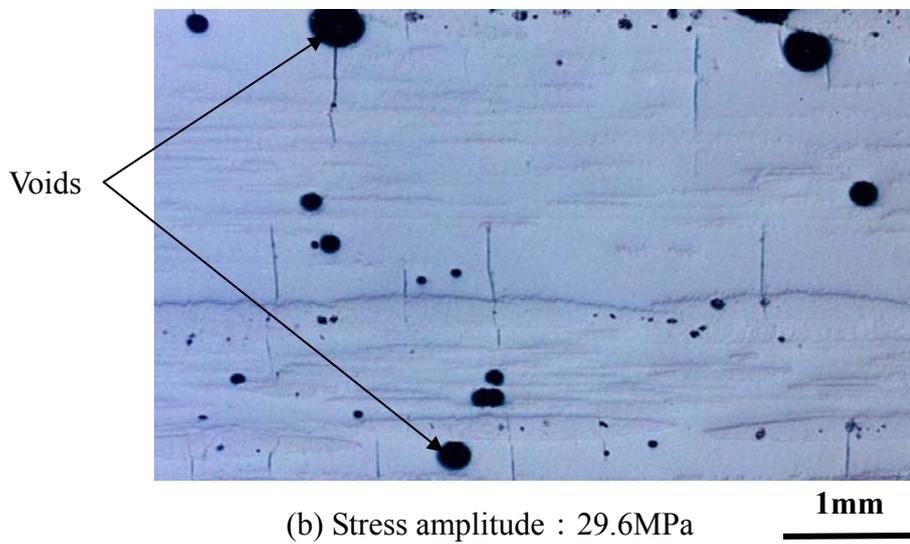
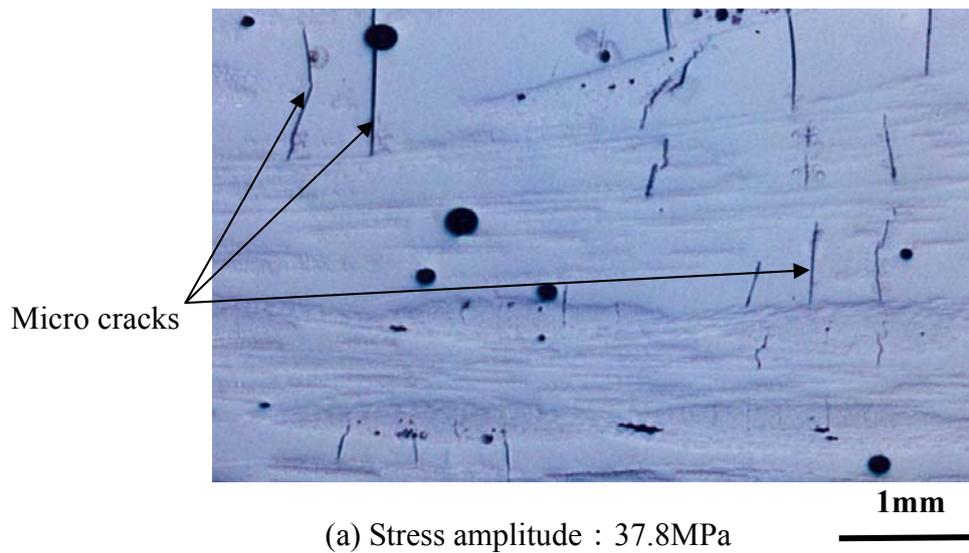
### 3.4.2 微細樹脂き裂と繰り返し数の関係

次に、疲労により発生する樹脂き裂と負荷応力および繰り返し数の関連について述べる。図 3.8 (a) ~ (c) は、CM+RC 積層材①（試験片中央部の応力振幅：37.8MPa）で、 $1.16 \times 10^6$  回の繰り返し負荷を与えた後の断面観察結果を示す。応力振幅は、それぞれ観察した位置の平均応力であらわした。図 3.9 はき裂の数と長さを応力振幅別に整理したグラフで、調査した面積はそれぞれ  $10\text{mm} \times 25\text{mm}$  である。発生した樹脂き裂の数と長さは、応力振幅によって明確に異なることがわかる。なお図 3.8 において、黒い斑点部分は試験片製造時（ハンドレイアップ工法）に混入したボイドであるが、樹脂き裂は必ずしもこのボイドを起点としてはいないことから、き裂の発生に対するボイドの影響は小さいと考える。

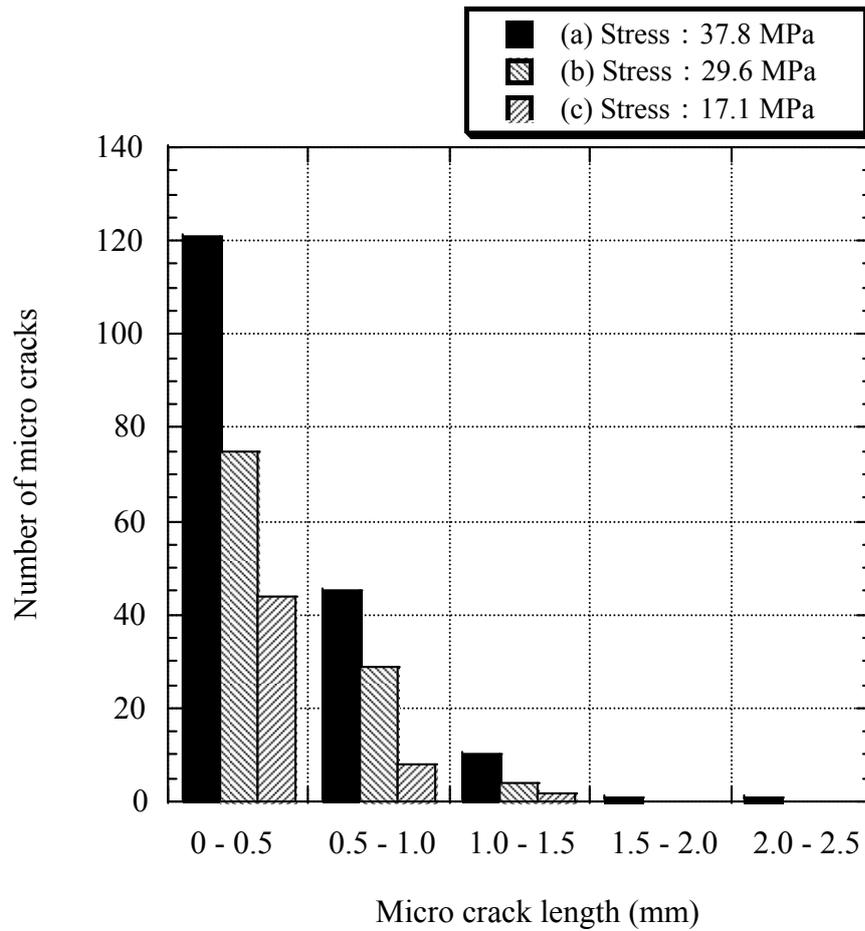
図 3.10 にき裂の密度と繰り返し数比 ( $N/N_f$ ) の関係を示す。 $N$  は  $1.16 \times 10^6$  とし、 $N_f$  は 3.3 項の式 (2) より算出した。き裂密度は、繰り返し数の増加とともに増えるが、 $N/N_f$  が 0.1 を超えると急速に増加することがわかる。RC はガラスロービング自体を上下に交差させて織物を形成するため、ガラス繊維のうねりが発生する。そのため、部分的に樹脂溜まりが発生しやすい傾向がある。このように、ガラス繊維のうねりが大きく、樹脂溜りが発生しやすい強化基材を用いた GFRP では、疲労による樹脂き裂が比較的少ない繰り返し数で発生し、また一旦き裂が増え始めるとひずみの再配分により周囲の樹脂にもき裂が発生し始め、急速に樹脂き裂が増加すると考えられる。

図 3.11 にき裂の平均長さと  $N/N_f$  の関係を示す。き裂平均長さと  $N/N_f$  の関係は、き裂平均長さを線形、 $N/N_f$  を対数表示したグラフ上で、式 (3) で直線近似できた。3.4.1 項で述べたように、 $90^\circ$  方向の繊維束内あるいは樹脂溜まり部に発生するトランスバースクラックは、そのほとんどは  $0^\circ$  方向繊維束に達したところで一旦停止する。一般に等質な材料の場合、き裂が発生すると平均応力および応力集中の増加により、き裂の進展速度はその長さとともに急速に早くなる。GFRP の場合もき裂発生初期は同じであるが、き裂の進展は  $0^\circ$  方向繊維束に達したところで一旦停止することから、図 3.10 のき裂密度とは異なり、き裂長さは急速には増加しないと考える。ただし  $0^\circ$  方向繊維が疲労により破断すると、き裂が急速に進展することが予想されるためこの点は注意が必要である。

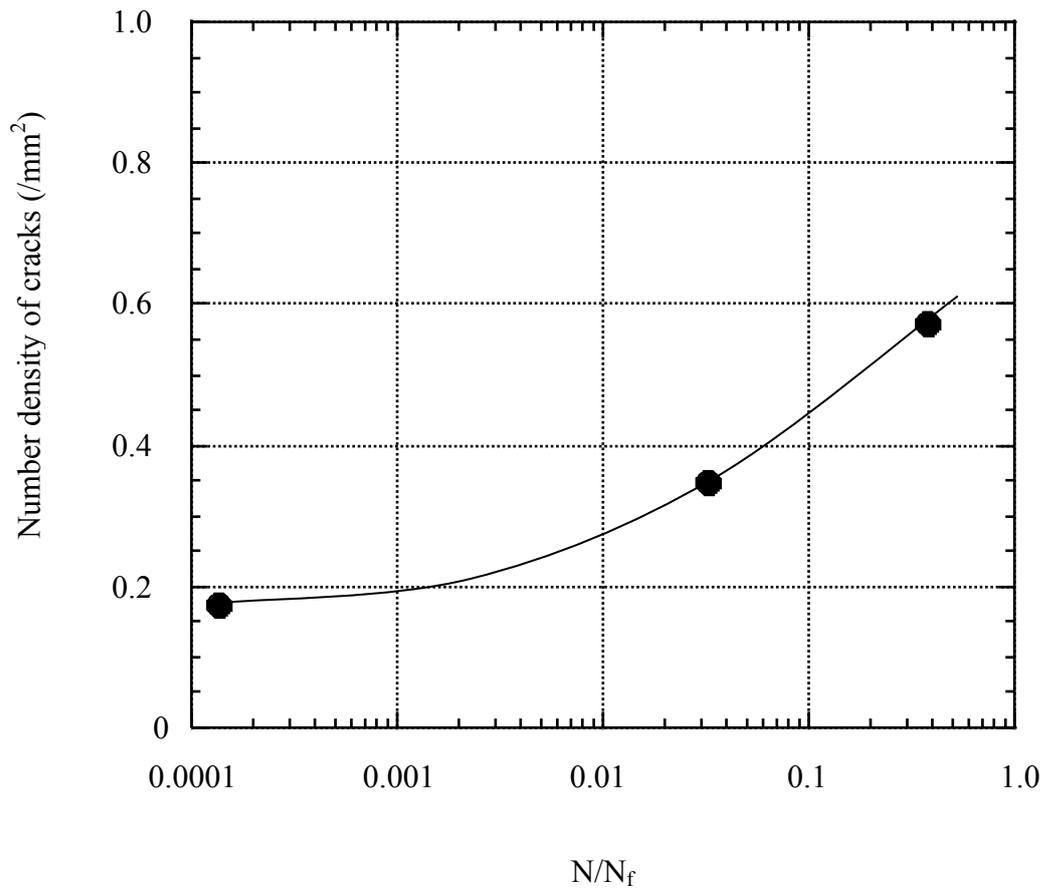
$$y = 0.46 + 0.026 \log x \quad (3)$$



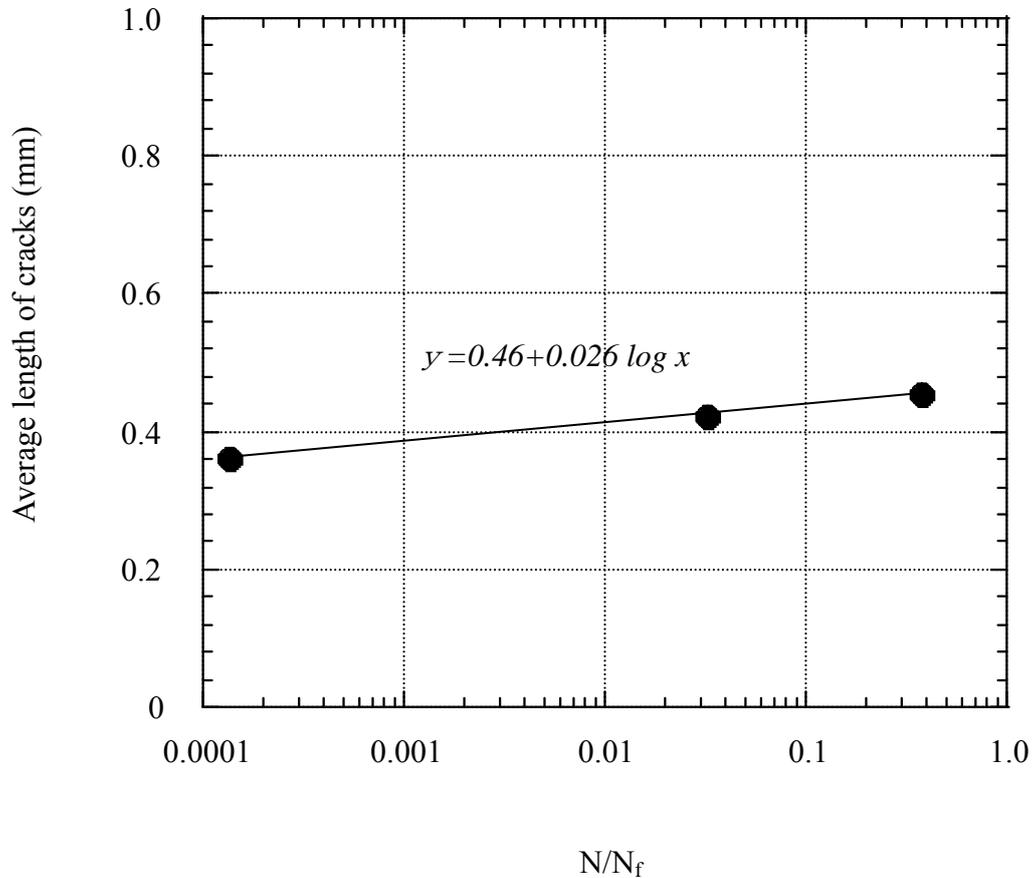
**Fig.3.8 Microstructures of specimen after fatigue test  
(Frequency number :  $1.16 \times 10^6$ )**



**Fig.3.9 Relation between number of micro cracks and micro crack length in specimen after fatigue test**



**Fig.3.10 Relation between number density of cracks and  $N/N_f$**



**Fig.3.11 Relation between average length of cracks and  $N/N_f$**

以上の結果から，疲労により発生する樹脂のき裂密度と  $N/N_f$  およびき裂平均長さと  $N/N_f$  との間には，密接な関係があることが見出された．これまで，CFRP の引張試験時の樹脂き裂発生挙動や樹脂き裂の分布状態と疲労強度の関係を示した例<sup>(10)(11)</sup>，あるいはGFRP の疲労き裂の進展挙動を観察した例<sup>(12)</sup>はあるが，樹脂き裂の発生状況と  $N/N_f$  の関係を定量的に論じた例は少ない．ガラス繊維の種類や織物の形態および樹脂の種類により関係式は異なることが予想されるが，内部の樹脂き裂を検知することで，ガラスクロスなどの織物基材を強化繊維とした GFRP においても疲労寿命を定量的に評価できる可能性がある．

### 3.4.3 弾性率と繰り返し数の関係

図 3.6 に示したように RC 積層材①および CM+RC 積層材①の引張弾性率は、疲労により  $1 \times 10^4$  サイクル付近から低下し始め、 $1 \times 10^6$  サイクルでは初期値からそれぞれ約 18%低下した。すなわち、疲労による弾性率の低下率は、同じ繰り返し数において RC 積層材と CM+RC 積層材でほぼ同じ値になる。この弾性率の低下は、前述した樹脂き裂の発生と関係があり、特にロービングクロスなどの織物基材を強化繊維とした GFRP では容易に起こりえる現象と考える。前項において、RC はガラス繊維束自体を上下に交差させて織物を形成するため繊維のうねりや樹脂溜まりが発生しやすく、その部分には容易に樹脂き裂が発生すること、また一旦発生すると急速に増加する可能性があるとして述べた。樹脂き裂が発生すると、その周囲では強化材であるガラス繊維への力の伝達が不均一になるため、この部分を含む断面では、相対的に弾性率が低下することになる。

一方、3.3 項の式 (1) および (2) から  $1 \times 10^6$  サイクルにおける各試験材の  $N/N_f$  を算出すると、RC 積層材は 17%、CM+RC 積層材は 32% になり、CM+RC 積層材の方が大きい値、すなわち余寿命が少ない結果となった。これには、強化繊維の種類と積層構成および繊維含有量が影響していると考えられる。ちなみに繊維体積含有量 ( $V_f$ ) は、RC 積層材が 44.6%、CM+RC 積層材が 33.5% であり、 $N/N_f$  は  $V_f$  が大きく、引張強度が高い RC 積層材が小さくなると推察される。

疲労による弾性率の低下現象は、GFRP の損傷状態の推移を示す重要なパラメータとして知られており、これまでも多くの研究が行われ、個々の素材毎に繰り返し数と弾性率の関係や伸びと弾性率の関係などが論じられてきた<sup>(11)(12)(13)(14)</sup>。本章の内容もその中の 1 例であるが、RC を強化基材とする GFRP は、その織物形態の特徴から疲労による樹脂き裂が発生しやすく、この影響により弾性率が低下すること、また弾性率の低下率は同じ繰り返し数の場合、RC 積層材と CM+RC 積層材とで同じであることがわかった。さらに  $N/N_f$  は  $V_f$  が大きく、初期の引張強度および弾性率が高い GFRP ほど小さくなることが示された。織物基材を用いた GFRP の疲労寿命は、弾性率の低下率と併せて強化繊維の種類、積層構成および繊維含有量を総合的に考慮することで、内部の微細組織観察などの破壊試験を行うことなく予測できると考えるが、定量かつ正確な予測のためにはさらに詳細な調査と評価が必要である。

### 3.5 結 言

ガラスロービングクロスを強化基材とした GFRP について，疲労の微視的破壊形態を調査し微視的挙動の解明を試みるとともに，樹脂のき裂密度および平均長さとの繰り返し数比の関連性について分析・考察した．また疲労により低下する引張弾性率との繰り返し数との関連について追究した．得られた結果は以下の通りである．

- (1) 疲労により発生した樹脂き裂（トランスバースクラック）は，そのほとんどが  $0^\circ$  方向繊維束に達したところで一旦停止する．その後，き裂は層間方向に進展するが，一部は少し進んだところで  $0^\circ$  方向繊維が疲労により破断する．この現象が起きると疲労破壊が急速に進展する可能性がある．
- (2) 疲労により発生する GFRP 内部の樹脂き裂は，繰り返し数の増加とともに増え，繰り返し数比 ( $N/N_f$ ) が 0.1 を超えると急速に増加する．ロービングクロスのようにガラス繊維のうねりが大きく，樹脂溜りが発生しやすい強化基材を用いた GFRP では，疲労による樹脂き裂は比較的少ない繰り返し数で発生しかつ増加しやすいと言える．
- (3) 疲労により発生するき裂の平均長さとの  $N/N_f$  の関係は，き裂平均長さを線形， $N/N_f$  を対数表示したグラフ上で直線近似できる．またき裂の進展は， $0^\circ$  方向繊維束に達したところで一旦停止することから，前述のき裂密度とは異なり急速に成長することはないと考える．
- (4) 疲労による弾性率の低下率は，同じ繰り返し数において RC 積層材と CM+RC 積層材でほぼ同じ値になる．一方， $N/N_f$  は同じ繰り返し数において RC 積層材よりも CM+RC 積層材の方が大きくなった．これには強化繊維の種類と積層構成および繊維含有量が関係していると考えられ，CM と RC を組み合わせた積層材では， $V_f$  が大きく引張強さおよび弾性率が高い GFRP ほど  $N/N_f$  は小さくなると推察される．

## 参考文献

- (1) M. George, Composites help improve wind turbine blade, Reinforced plastics, (2005), pp.18-21.
- (2) Kawasetsu.N, Shindo.K, Takita.K, Kato.E, Development of Large FRP Blades for Wind Turbines, Reinforced Plastics, Vol.51, No. 10, (2005), pp.496-501.
- (3) Bandoh.S, Zaco.M, Shiino.T, Kurashiki.T, Matsumura.K, On the Detection of Fatigue Damage in CFRP by Measuring Poisson's Ratio, The official journal of the Japan Society for Composite Materials, Vol.28, No. 1, (2002), pp.3-10.
- (4) Nishikawa.Y, Okubo.K, Fujii.T, Uenoya.T, Fatigue Damage Progression of Woven Fabric Composites under Cyclic Loading, The Japan Society of Mechanical Engineers Journal, Vol.70, No. 689, (2004), pp.101-106.
- (5) A.M.V.Lima, A.T.Marques, Fatigue simulation of GFR composites in 3-Point Bending Tests, Science and Engineering of Composite Materials, Vol.12, (2005), pp.159-165.
- (6) Hirota.K, Noguchi.H, Lee.S.H, Kuroiwa.T, Takita.K, Fatigue Characteristics of GFRP with Stitched UD layers, The Japan Society of Mechanical Engineers Kyushu branch Conference, (2005), pp.19-20.
- (7) Yokozeki.T, Ishikawa.T, Shinagawa.Y, Inspection of Matrix Cracks in CFRP Laminates, Symposium of New material and Nondestructive Evaluation of the Products, (2004), pp.29-32.
- (8) The Japan Reinforced Plastics Society, FRP structure design handbook, (1994), pp.2-3.
- (9) The Japan Reinforced Plastics Society, FRP structure design handbook, (1994), pp.70-71.
- (10) Kobayashi.S, Yamamoto.M, Wakayama.S, The Effect of Fiber Surface Morphology on the Microscopic Damage Behavior in CFRP Laminates, Material System, Vol.23, (2005), pp.49-54.
- (11) Nishikawa.Y, Okubo.K, Fujii.T, Evaluation of Fatigue Degradation with Configuration of Matrix Cracks for Plain - Woven CF/Epoxy Composites, The Japan Society of Mechanical Engineers Journal, Vol.71, No. 705, (2005), pp.775-779.

- (12) Fujii.T, Amijima.S, Microscopic Fatigue Processes in a Plain-Weave Glass-Fiber Composites, Composites Science and Technology 49, (1993), pp.327-333.
- (13) S.L.Ogin, P.A.Smith, P.W.R.Besaumont, Matrix Cracking and Stiffness Reduction during the Fatigue of a (0/90)<sub>s</sub> GFRP Laminate, Composites Science and Technology 22, (1985), pp.23-31.
- (14) 増田雄市郎, ロービングクロス FRP の疲労破壊過程に関する研究, 日本機械学会論文集 (A 編), 47 巻, 424 号, (1981), pp.1265-1274.

## 第 4 章 スティッチ繊維を用いたガラス繊維強化プラスチックの引張および圧縮特性

### 4.1 緒言

GFRP の一般的な強化基材としては、これまでは取り扱い性と入手性の観点から、例えばガラスロービングクロスに代表されるクロス織物基材が主に使用されてきた。しかしながらこのタイプの基材は、繊維束そのものを編み込んで織物とするため、繊維のうねりや隙間が発生しやすい欠点があった。したがって、これまで繊維含有量を増すことで強度向上を図ってきたものの、これには限界がありガラス繊維の強度特性を十分に引き出せるまでは至っていない。

このような状況下、近年、織物機械の開発が急速に進み、多くの新しい強化繊維基材が市場に出始めた。その1つがスティッチファブリックである。スティッチファブリックは、ガラスロービング(数千本のガラス素線が束ねられたもの)などの繊維束を任意の方向に配した後、ポリエステルなどの別の細い糸で固定した織物<sup>(1)</sup>でニットファブリックとも呼ばれている<sup>(2)(3)</sup>。十数年前から欧州の繊維メーカーを中心に開発が活発化しており、国内ではおよそ10年前から船舶用のGFRP基材を中心に使用が拡大した。最近では大型風力発電装置のGFRPブレード用基材としても使用されている。スティッチファブリックに関する報告としては、主に引張特性や圧縮特性を従来のガラスロービングクロスを使用したGFRPと比較し、その優位性について述べたものが多く<sup>(4)</sup>、引張および圧縮特性に及ぼす繊維構成の影響を詳細に調査した報告は少ない<sup>(5)</sup>。

そこで本研究では、一方向ガラス繊維を主体とするスティッチファブリックを用いたGFRPについて、引張および圧縮特性に及ぼす繊維構成、繊維含有量、繊維径の影響を調査すると同時に、 $0^{\circ}/90^{\circ}$ スティッチファブリックとロービングクロスを用いたGFRPを比較しながら、繊維の織り形態と強度特性の関連について微視組織の観察結果をもとに追究した。

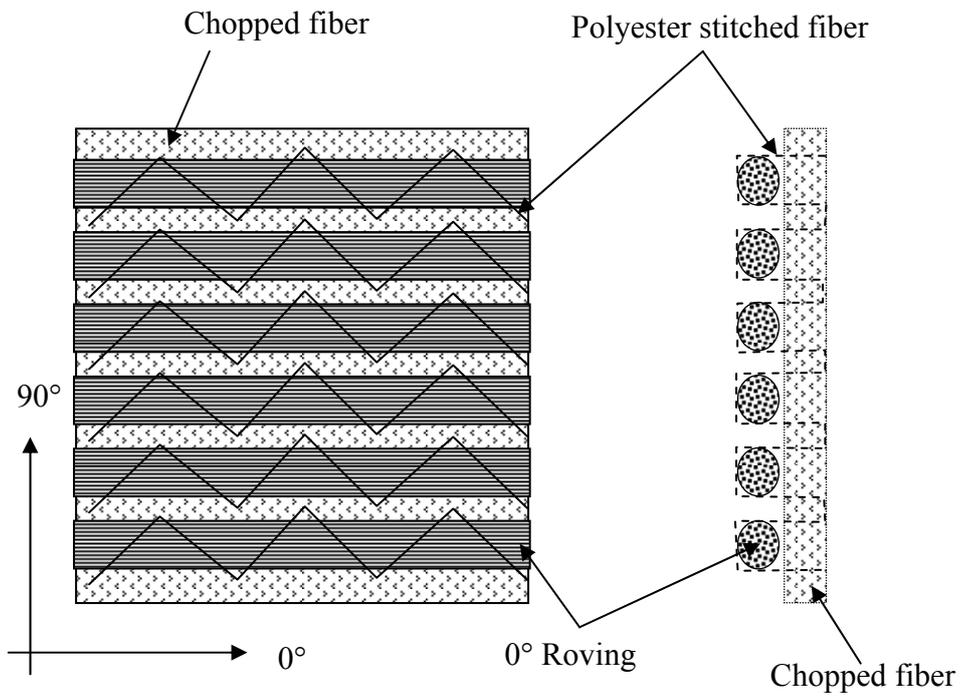
## 4.2 実験方法

### 4.2.1 素材

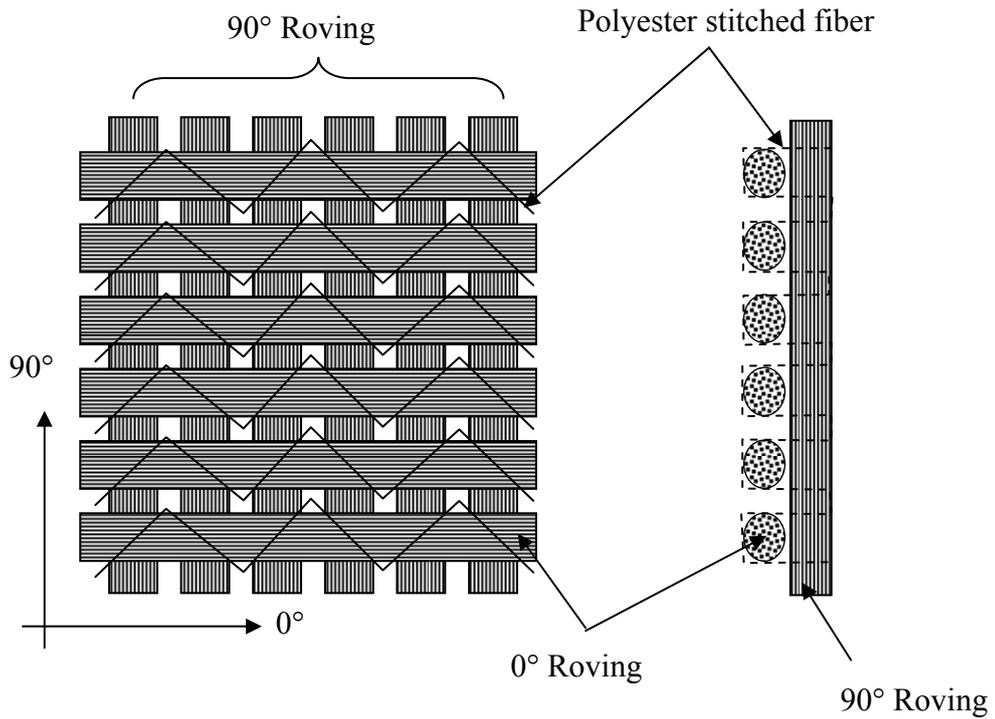
本研究で用いたガラス繊維基材は、オーエンス・コーニング社製のステッチファブリックで、繊維は耐水性に優れ GFRP として最も多く使用されている E ガラスである。織物の繊維構成は、一方向のロービングを主体としている。図 4.1 に代表的な 2 種類のステッチファブリックの模式図を示す<sup>(1)</sup>。ステッチファブリックは、ガラスロービングなどの繊維束を任意の方向に配した後、ポリエステルなどの別の細かい編糸で固定した織物である。この方法によれば、ガラス繊維のうねり（蛇行）が少なく、均一でかつ複数の層を有する織物、すなわち多層基材が容易に製造できる<sup>(6)</sup>。これに対して、従来から多用されてきたロービングクロスは、繊維束自体を編み込んで織物とするため、繊維のうねりや樹脂を含浸させた際に樹脂溜まりとなる隙間が多く発生する欠点がある。

本研究で用いたステッチファブリックの繊維構成を表 4.1 に示す。通常、一方向繊維を主体とする織物の場合は、これを支えて位置を固定するための補助的な繊維が必要となる。使用したステッチファブリックの補助繊維は、長さ 50mm 以下のガラスチョップファイバまたは 90° 方向の連続繊維で、繊維含有量は 150g/m<sup>2</sup> または 300g/m<sup>2</sup> である。No. ①, No. ②, No. ③ の基材は、0° 方向繊維とガラスチョップファイバを組み合わせた織物、No. ④ の基材は 0° 方向と 90° 方向繊維を組み合わせた織物である。なおガラス繊維素線の直径は、No. ①, No. ②, No. ④ 基材は  $\Phi 24 \mu\text{m}$ 、No. ③ 基材は  $\Phi 17 \mu\text{m}$  である。これらを固定する織糸には、細かいポリエステル繊維が用いられている。図 4.2 に代表例として No. ① 基材の外観（表裏）を示す。

一方、マトリックスの樹脂は、複合材の物性、取り扱い性、経済性などの観点から GFRP 用に多用されている不飽和ポリエステル樹脂（ディーエイチ・マテリアル(株)製）とした。



(a) 0°/ Chopped fiber type fabric

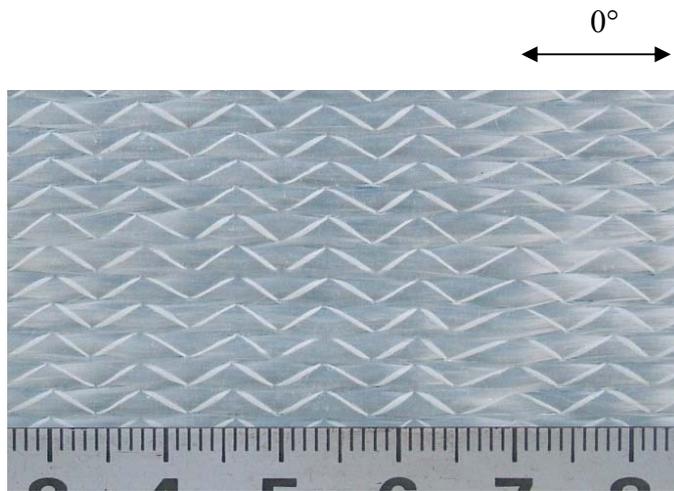


(b) 0°/90° type fabric

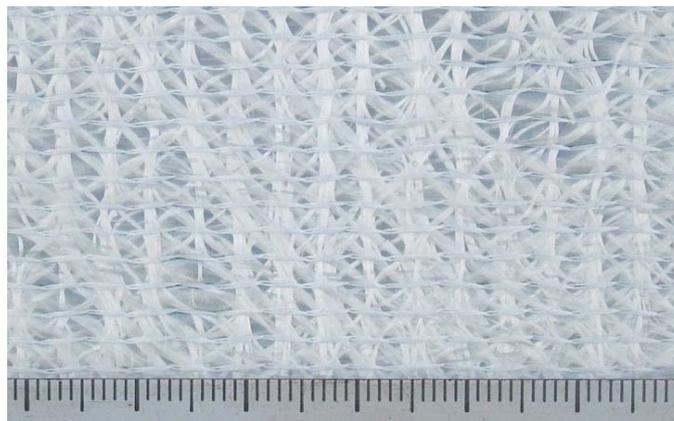
**Fig.4.1 Pattern diagrams of glass fiber stitched fabric**

**Table 4.1 Composition of stitched fabric**

No.	Fiber type and weight (g/m <sup>2</sup> )		
	0° continuous (Fiber diameter : μm)	90° continuous	Chopped fiber
①	720 (24)	0	300
②	720 (24)	0	150
③	960 (17)	0	150
④	1050 (24)	150	0



(a) Right side (0° continuous fiber surface)



(b) Back side (Chopped fiber surface)

**Fig.4.2 Appearances of stitched fabric (No.①)**

#### 4.2.2 供試体の製作

試験用積層板の製造には、真空成形法の1手法で、真空圧を利用して強化繊維基材に樹脂を含浸させる真空含浸工法（VaRTM: Vacuum assisted Resin Transfer Molding）を採用した。この工法は、一般的なハンドレイアップ工法と比較すると、高い繊維含有量で欠陥が少ない高品質のFRPを容易かつ安価に成形できるため、近年、世界中で注目されている<sup>(7)</sup>。また大型のFRP構造部材の成形が容易で、かつクローズド成形となるため作業環境改善（低臭気）の観点からも望ましい。

図4.3に真空含浸工法の模式図を示す<sup>(8)</sup>。GFRP成形の工程は、まず成形型の上に強化繊維基材（ガラス繊維）を積層し、ナイロンフィルム製のバキュームバッグでバギングして真空吸引する。強化繊維基材とバキュームバッグの間には、樹脂を拡散しやすくするための多孔質フィルム（パスメディア）と離型層（ピールプライ）を挿入した。次に目標とする真空度（本研究では0.095MPa以下）まで到達したことを確認後に、注入ポートを開放して樹脂を注入し、強化繊維全体に含浸させる。樹脂が完全に含浸した後は、自己発熱により硬化するのを待ち、硬化反応熱が低下して表面温度が室温になったことを確認後、脱型してGFRP成形体を得た。試験板の寸法は、幅300mm、長さ600mmとし、強化繊維基材の積層枚数はすべて6層とした。

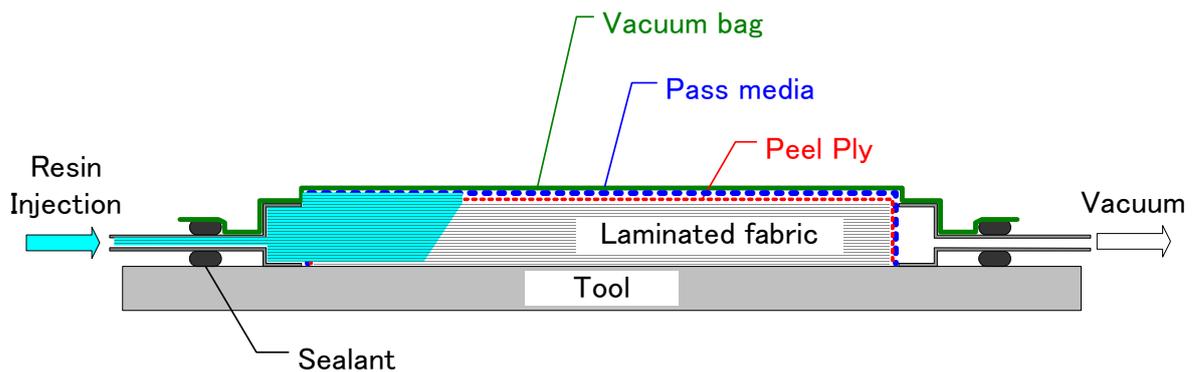


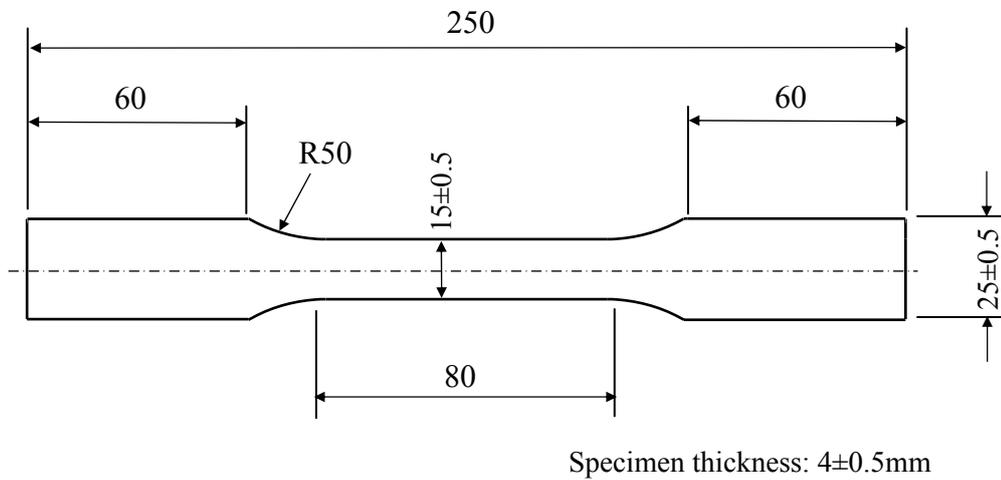
Fig.4.3 Outline of Vacuum assisted Resin Transfer Molding (VaRTM) <sup>(8)</sup>

#### 4.2.3 試験方法

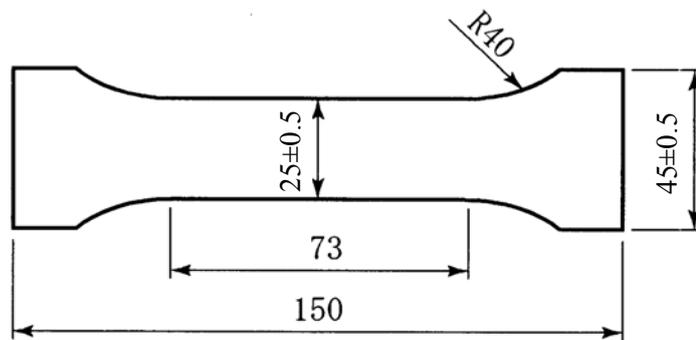
全 4 種類の GFRP について，ガラス繊維含有量の測定と室温における引張試験および圧縮試験を実施した．繊維含有量の測定は JIS K7052 に準じて焼成法で実施し，重量含有量を算出後に体積含有量 ( $V_f$ ) に換算した．引張試験は JIS K7054 に準じて実施した．また圧縮試験には様々な手法が提案されているが，ここでは JIS K7018 (1999) A 形試験片に準拠した大型試験片とし，JIS K7056 (1995) に規定する A 形試験片治具を用いた．この圧縮試験法は，押さえ治具と試験片間の摩擦の影響を回避するために，断面がジグザグ形状を呈する 2 組の治具で試験片を挟み込み，面外座屈を防止しながら荷重を負荷する手法である．

図 4.4 に引張試験片の形状を，図 4.5 に圧縮試験片の形状を示す．引張および圧縮試験は，25T インストロン式 1127 型材料試験機で行った．試験機的主要仕様は，試験秤量：250kN，クロスヘッド速度：0.001~500mm/min，クロスヘッド有効ストローク：最大 600mm で，サーボモータ電気機械負荷方式の試験機である．

試験荷重の負荷方向は主繊維方向 ( $0^\circ$  方向) とし，ひずみの測定は電気抵抗ひずみゲージを試験片の両面に各 1 枚，計 2 枚貼り付けて計測し，その平均値であらわした．ひずみゲージは，有効測定範囲が 5mm の共和電業社製 KFP-5-120-C1-651, 1M2R である．弾性率は引張および圧縮弾性率ともに，それぞれの応力-ひずみ曲線の原点 (0, 0) を通る接線の傾きとして算出した．



**Fig.4.4 Tensile test specimen**



**Fig.4.5 Compressive test specimen**

### 4.3 実験結果

表 4.2 および表 4.3 に引張試験および圧縮試験の結果を示す。ガラス繊維含有量は、繊維の形態や構成に関係なくそれぞれの GFRP の総繊維含有量（体積比： $V_f$ ）として示した。図 4.6 は  $V_f$  を横軸にとり、引張強さおよび圧縮強さを縦軸にプロットしたグラフである。引張強さは  $V_f$  の増加とともに上昇し、 $V_f$  が 56.1% で平均値 802MPa となった。一方、圧縮強さは、単純に繊維含有量の増加とともに向上はせず No. ③材が最も高い値を示し、 $V_f$  が 49.9% で平均値 528MPa を示した。なおいずれの GFRP も、圧縮強さより引張強さが高い結果となった。

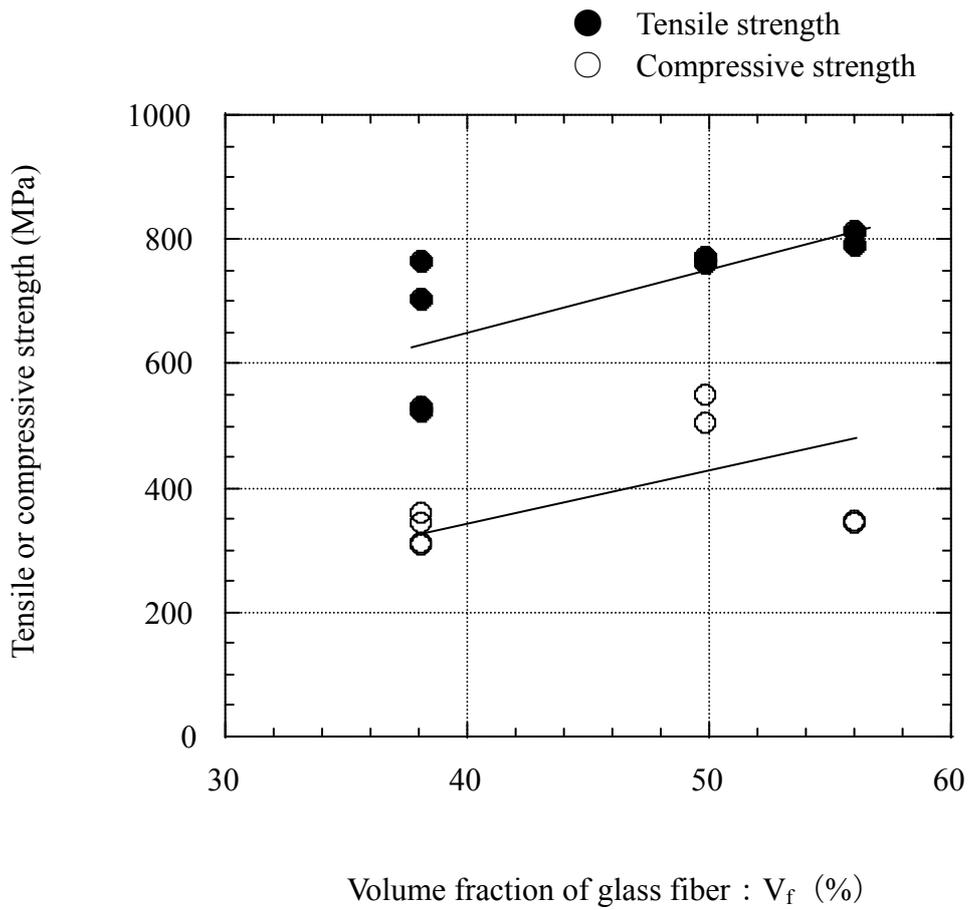
図 4.7 は  $V_f$  を横軸にとり、引張弾性率および圧縮弾性率を縦軸にプロットしたグラフである。弾性率は、引張および圧縮のいずれも  $V_f$  の増加とともに上昇し、 $V_f$  が 56.1% で 46~48GPa となった。また引張弾性率と圧縮弾性率は、同じ  $V_f$  の場合はほぼ同じ値になることが示され、単純に繊維含有量に比例する結果となった。

**Table 4.2 Tensile test result**

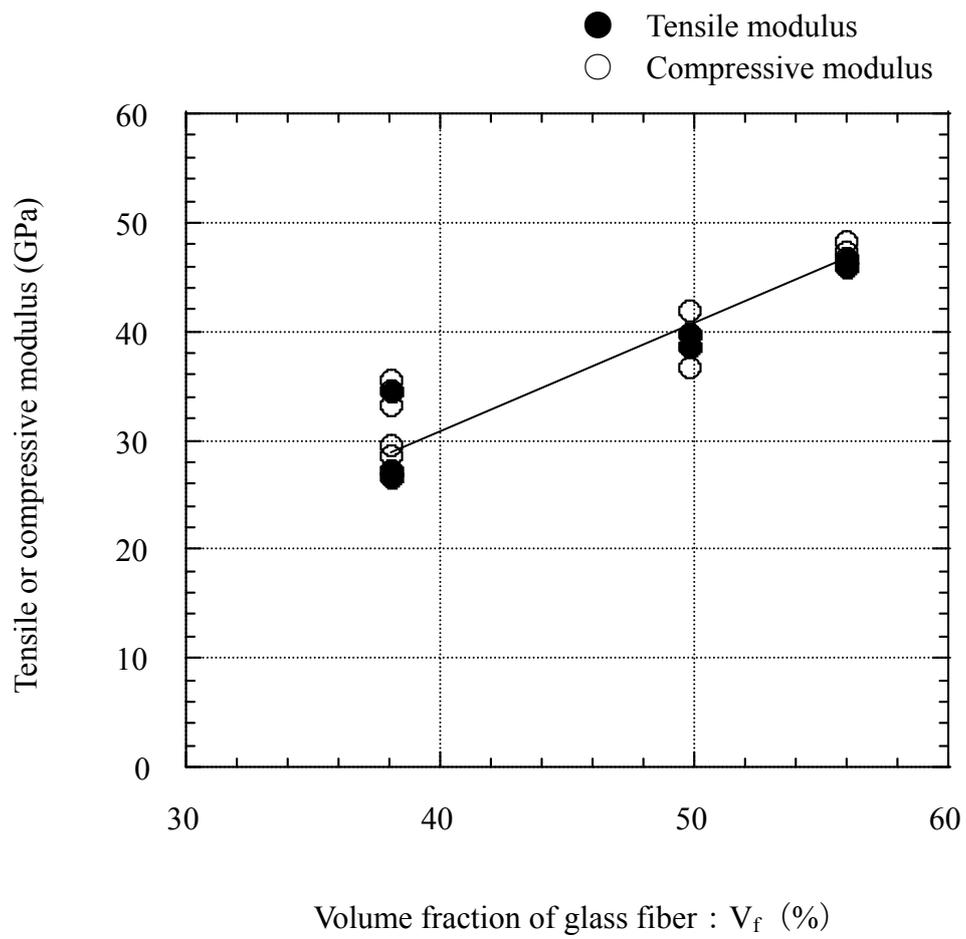
Specimen No.	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Volume fraction of glass fiber : $V_f$ (%)
①	525	26.7	38.2
	530	27.3	
②	767	34.5	38.2
	704	34.6	
③	762	39.7	49.9
	771	38.6	
④	813	45.9	56.1
	790	46.7	

**Table 4.3 Compressive test result**

Specimen No.	Compressive strength (MPa)	Compressive modulus (GPa)	Volume fraction of glass fiber : $V_f$ (%)
①	311	29.6	38.2
	309	28.5	
②	343	35.6	38.2
	360	33.2	
③	551	41.8	49.9
	504	36.7	
④	347	48.2	56.1
	345	47.3	



**Fig.4.6 Relation between tensile or compressive strength and volume fraction of glass fiber**



**Fig.4.7 Relation between tensile or compressive modulus and volume fraction of glass fiber**

## 4.4 考察

### 4.4.1 0°方向繊維含有量と強度

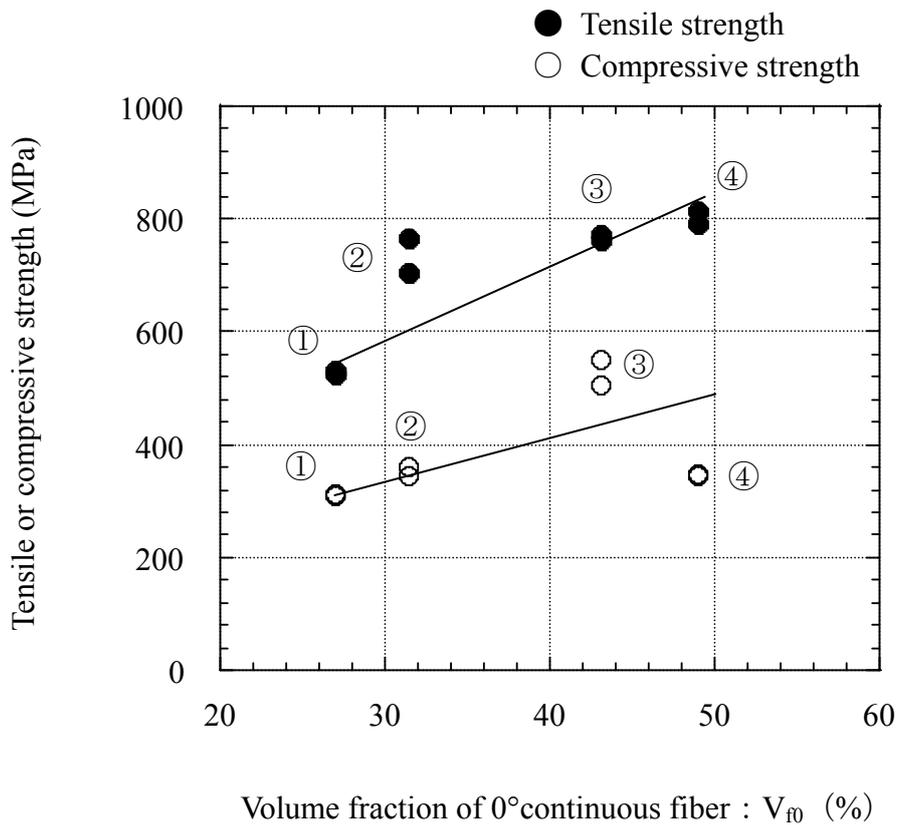
表 4.1 に示したように、使用したステッチファブリックは一方方向繊維（0° 方向）を主体とする織物であるが、固定用の補助繊維としてガラスチョップドファイバまたは 90° 方向の連続繊維が用いられており、GFRP の内部はこれらが混在した状態になっている。主繊維方向（0° 方向）の GFRP の強度特性は、当然ながら 0° 方向繊維に密接に関連していると考えられることから、引張特性および圧縮特性におよぼす 0° 方向繊維の影響について考察した。

表 4.4 に各試験片の総繊維含有量（ $V_f$ ）と 0° 方向繊維の含有量（ $V_{f0}$ ）を整理して示す。ここで、試験片①と②の  $V_f$  は 38.2% と同じ値であるが、 $V_{f0}$  はガラスチョップドファイバの単位面積当りの含有量の違いから、試験片①が 27.0%、試験片②が 31.5% と異なっている。

**Table 4.4 Volume fraction of glass fiber**

No.	All glass fiber $V_f$ (%)	0°continuous fiber $V_{f0}$ (%)
①	38.2 (0°+Chopped fiber)	27.0
②	38.2 (0°+Chopped fiber)	31.5
③	49.9 (0°+ Chopped fiber)	43.1
④	56.1 (0°+90°continuous fiber)	49.0

図 4.8 に引張強さおよび圧縮強さと  $V_{f0}$  の関係を示す. GFRP の引張強さと圧縮強さを比較した場合, 同等または圧縮強さの方が低い値を示し, 繊維含有量が高くなるほどその差が大きくなることがいくつかの文献で述べられているが<sup>(9)(10)</sup>, ステッチファブリックを用いた GFRP においても同じであることが示された. したがって, 引張強さと圧縮強さの両方が関与する構造物に適用する場合は, 基本設計は圧縮強さを基準に考える必要がある. また圧縮強さでは, 試験片③の値が若干高い値を示し, 試験片④の値は低くなる傾向を示した. 試験片④の圧縮強さが低い理由は, ガラス繊維基材の構成の違いが影響していると考えられるが, 試験片①, ②, ③では, 基材構成が同じでありながら試験片③の圧縮強さが若干高い値を示した. この要因については次項で考察する.



**Fig.4.8 Relation between tensile or compressive strength and volume fraction of 0°continuous fiber**

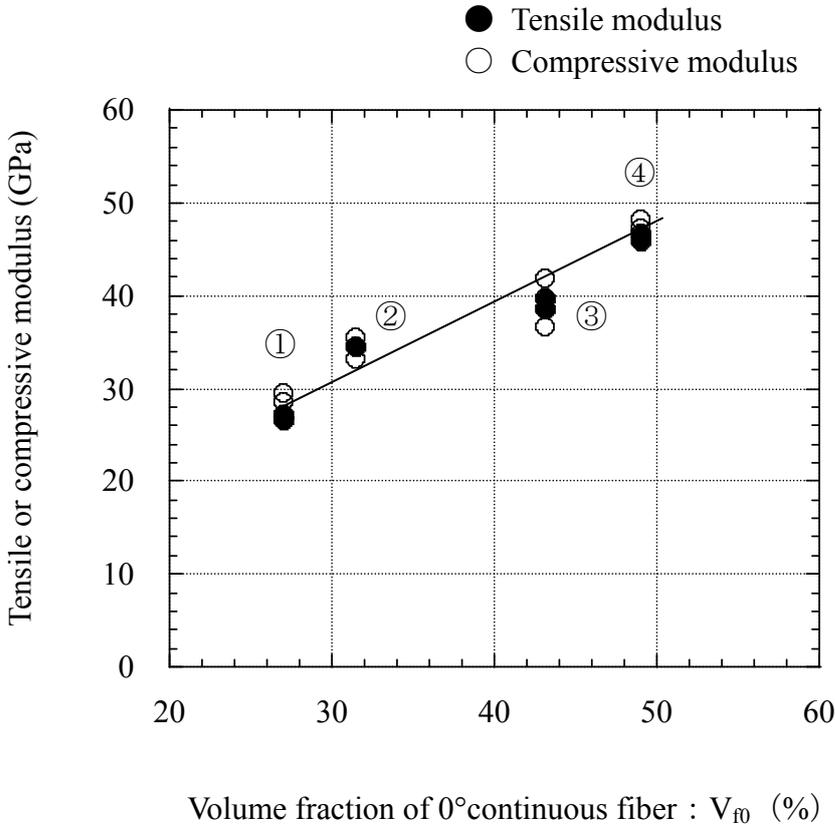
#### 4.4.2 ガラス繊維の素線径と強度

前項の図 4.8 において，試験片③は試験片①および②と同じガラス繊維基材の構成（ $0^\circ$  連続繊維 + チョップファイバー）でありながら，圧縮強さが若干高いことが示された．一般にガラス繊維は， $1400^\circ\text{C}$  以上の温度で溶融させたガラスを  $0.5\sim 2.0\text{mm}$  の穴径のダイスを通し， $2000\text{m}/\text{min}$  以上の高速で引き抜くダイレクトメルト法と呼ばれる製法で製造されている．この際，ガラス繊維の表面には欠陥が発生することが知られており，繊維径が細かい方が表面欠陥は少なく，強度も高いとされている<sup>(11)(12)</sup>．表 4.1 に示したように，試験片①，②，④のガラス繊維素線径は  $24\mu\text{m}$  であるのに対し試験片③のそれは  $17\mu\text{m}$  と細い．同じ繊維含有量の GFRP で比較した場合，ガラス繊維の素線径が小さいことの影響は，均一分散強化の効果が得られる反面，繊維数の増加やそれにとまなう樹脂と繊維接着面積の増加により，強度が低下する要因が増えることにもつながる．それにも関わらず，試験片③の圧縮強さが他の GFRP よりも高い値を示したことは，GFRP の圧縮強さは，ガラス繊維の素線径を小さくして均一分散強化の効果を付与する方が，より高くなる可能性があることを示している．一方，素線径は，ガラス繊維自体のうねりの状態（振幅，波長）にも影響を与えらる．これらの事象も含めて，GFRP の引張および圧縮強さに与える素線径の影響は，GFRP の破壊形態や破壊モードを考慮しながら詳細かつ総合的に解明する必要があり，今後の課題と考える．

#### 4.4.3 $0^\circ$ 方向繊維含有量および素線径と弾性率

図 4.9 に引張弾性率および圧縮弾性率と  $V_{f0}$  の関係を示す．弾性率は，引張および圧縮のいずれも  $V_{f0}$  の増加とともに上昇し，横軸および縦軸とも線形表示したグラフ上で直線近似できた．また引張弾性率と圧縮弾性率は，同じ  $V_{f0}$  の場合はほぼ同じ値となり，単純に繊維含有量に比例することが示された．この点は，先に述べた引張強さと圧縮強さの関係とは大きく異なる点であり，弾性率は数値自体のばらつきも小さく，比較的予測しやすい物性と言える．一方，圧縮強さほど明確ではないものの，ガラス繊維の素線径が小さい試験片③の弾性率が，他の試験片とは異なる傾向を示した．ただし圧縮強さとは逆に，ガラス繊維の素線径が小さい試験片③の弾性率が，繊維径が大きい他の試験片よりも低くなる傾向にある．弾性率は 4.2.3 項の試験方法で述べたように，応力-ひずみ曲線の原点（ $0, 0$ ）を通る接線の傾きとして算出される荷重負荷初期の特性であり，

繊維含有量と繊維方向の影響を大きく受ける。繊維径が小さい場合は、個々の繊維の剛性が小さくなることから繊維うねりが多く発生すると推察され、試験片③の弾性率が低くなった要因の1つとしてあげられる。

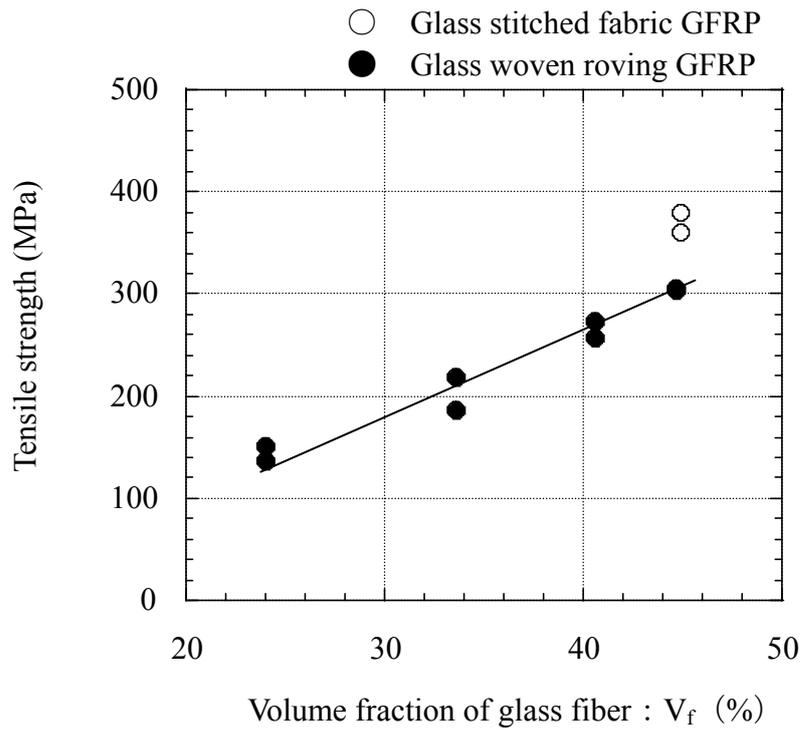


**Fig.4.9 Relation between tensile or compressive modulus and volume fraction of 0 degree fiber**

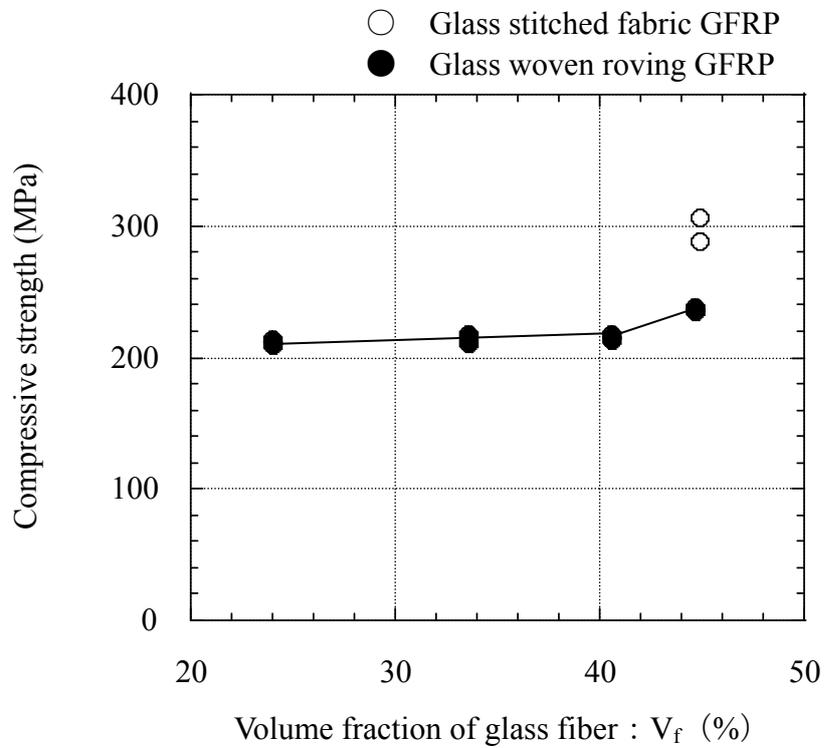
#### 4.4.4 ガラス繊維の織り形態と強度特性

ステッチファブリックは、その織り形態からガラス繊維のうねりが少ないことは4.2.1項（図4.1）において説明した。その効果もあり、ステッチファブリックを用いたGFRPは優れた強度特性を発揮することが多くの文献で報告されているが<sup>(4)(10)(13)</sup>、微視的な破壊現象と比較しながら、引張特性および圧縮特性の挙動を述べた例は殆ど見当たらない。そこでステッチファブリックとロービングクロスを強化基材としたGFRPを比較しながら、繊維含有量と引張および圧縮特性の関係を整理するとともに、圧縮試験における微視的破壊形態を分析し、ステッチファブリックの強化機構の特徴について考察した。

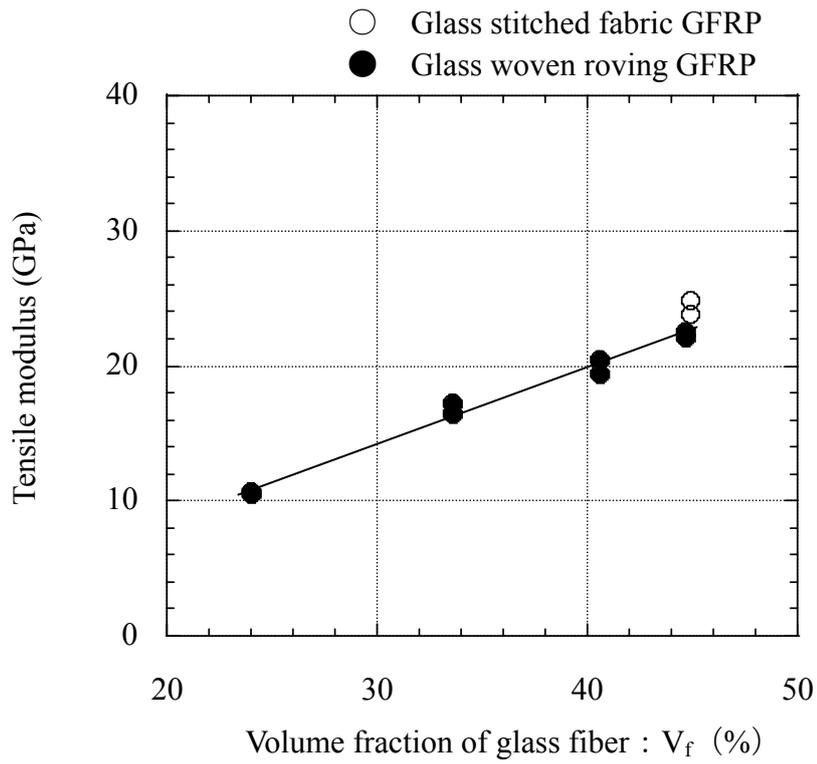
対象としたGFRPは、ステッチファブリックおよびロービングクロスともに $0^\circ/90^\circ$ の直交織物を強化基材としたもので、ステッチファブリックは縦および横糸ともに $400\text{g/m}^2$ 、ロービングクロスはそれぞれ $285\text{g/m}^2$ の基材である。図4.10および図4.11に引張強さおよび圧縮強さと繊維含有量( $V_f$ )の関係を、図4.12および図4.13に引張弾性率および圧縮弾性率と $V_f$ の関係を整理して示す。ステッチファブリック強化GFRPのデータは $V_f$ が1条件のみではあるが、引張および圧縮強さについては明らかにロービングクロス強化GFRPよりも優れていることがわかる。圧縮強度は、同じ $V_f$ のロービングクロス強化GFRPよりも約25%高くなる。一方、引張および圧縮弾性率は、同じ $V_f$ の素材において僅かにステッチファブリック強化GFRPが高い傾向にはあるが、大きな有意差は認められなかった。



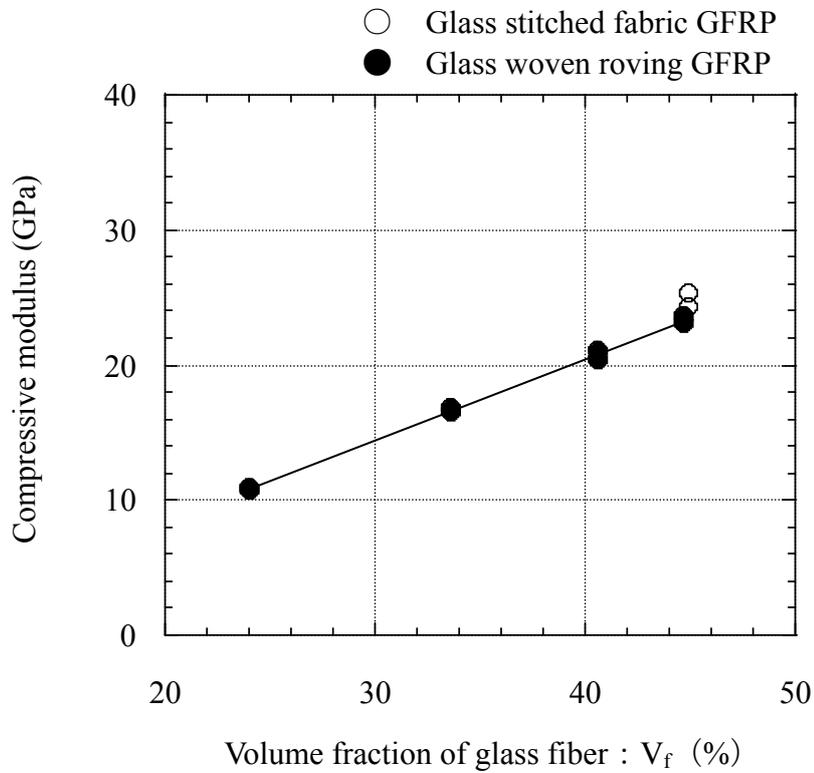
**Fig.4.10 Relation between tensile strength and volume fraction of glass fiber**



**Fig.4.11 Relation between compressive strength and volume fraction of glass fiber**



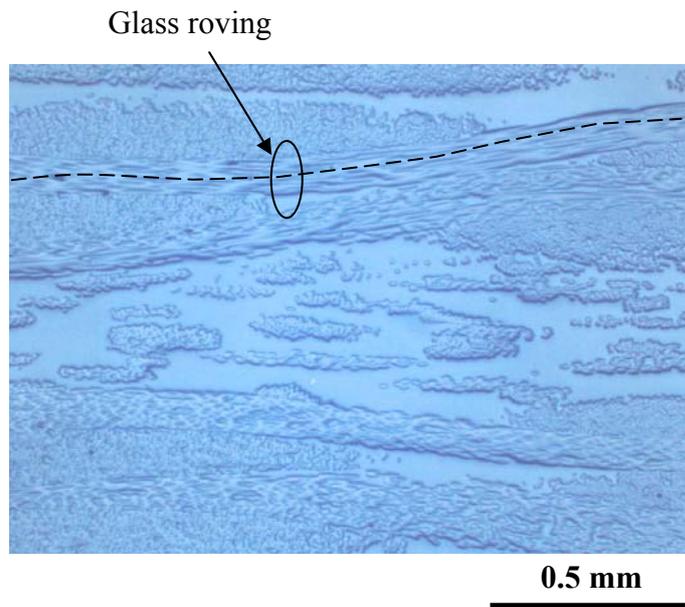
**Fig.4.12 Relation between tensile modulus and volume fraction of glass fiber**



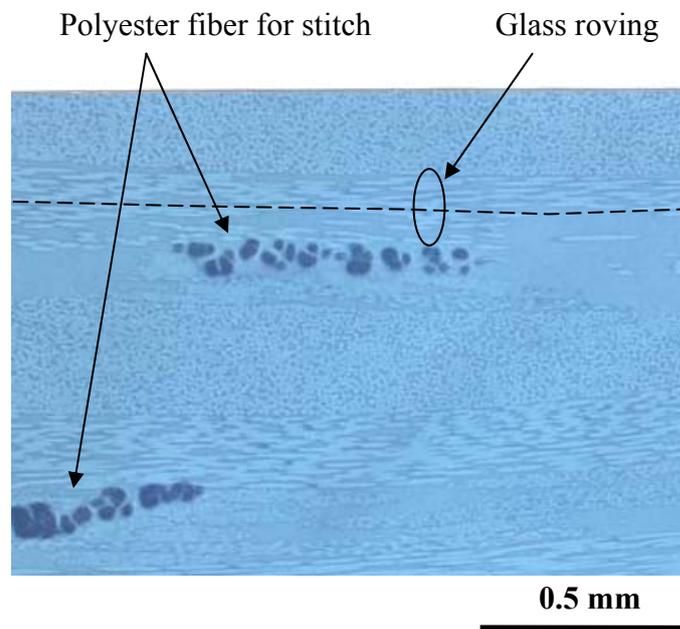
**Fig.4.13 Relation between compressive modulus and volume fraction of glass fiber**

図 4.14 にロービングクロス強化 GFRP とステッチファブリック強化 GFRP の断面マイクロ組織を示す。(a) ロービングクロス強化 GFRP は、(b) ステッチファブリック強化 GFRP と比較すると繊維束のうねりが大きいことがわかる。ロービングクロスは、図 4.15 に示すごとく繊維束が交互に蛇行しながら編み込まれており、 $0^\circ$  繊維方向に圧縮荷重  $P$  が負荷された場合、繊維束（ロービング）に対しては荷重負荷方向と直角方向に分力  $F$  が発生する。分力  $F$  の大きさは、繊維束のうねり係数 ( $d/l$ ) が大きくなるほど増加し、繊維束の座屈破壊が起きやすくなる。実際の破壊においては、うねり係数 ( $d/l$ ) は個々の繊維束で異なるため、全繊維束が同時に座屈破壊を起こすことは考えにくく、まず初めに最も繊維うねりが大きい最弱部の繊維束で座屈破壊が発生し、その後、連鎖的に伝播して最終破壊に至ると推定される。この現象が起こると、GFRP が破壊する際の圧縮強さは大きく低下する。同様に引張試験においても、繊維のうねりは繊維束への荷重負荷を不均一にする要因になるため、破壊する際の引張強さは低下することになる。一方、弾性率は先に述べたように、応力-ひずみ曲線の原点 ( $0, 0$ ) を通る接線の傾きとして算出される荷重負荷初期の特性である。従って、繊維束のうねりに起因する僅かな繊維配向角度のずれは、弾性率に対してはそれ程大きな影響は与えなかったものと考えられる。

織物基材の繊維束のうねりを考慮した 3 次元 FEM 解析は、クロス強化材のほか、最近ではステッチファブリック強化材においても多くの例が報告されているが<sup>(6)(14)(15)</sup>、基本的には同じ織物の中では同じ繊維うねりを持つ織物として取り扱われている。しかしながら実製品の製造においては、同じ織物基材を用いたとしても、積層方法や積層状態によりミクロ的には個々の繊維束のうねり状態は異なってくる。この点は、特に破壊強さを論じる場合に注意が必要と考える。

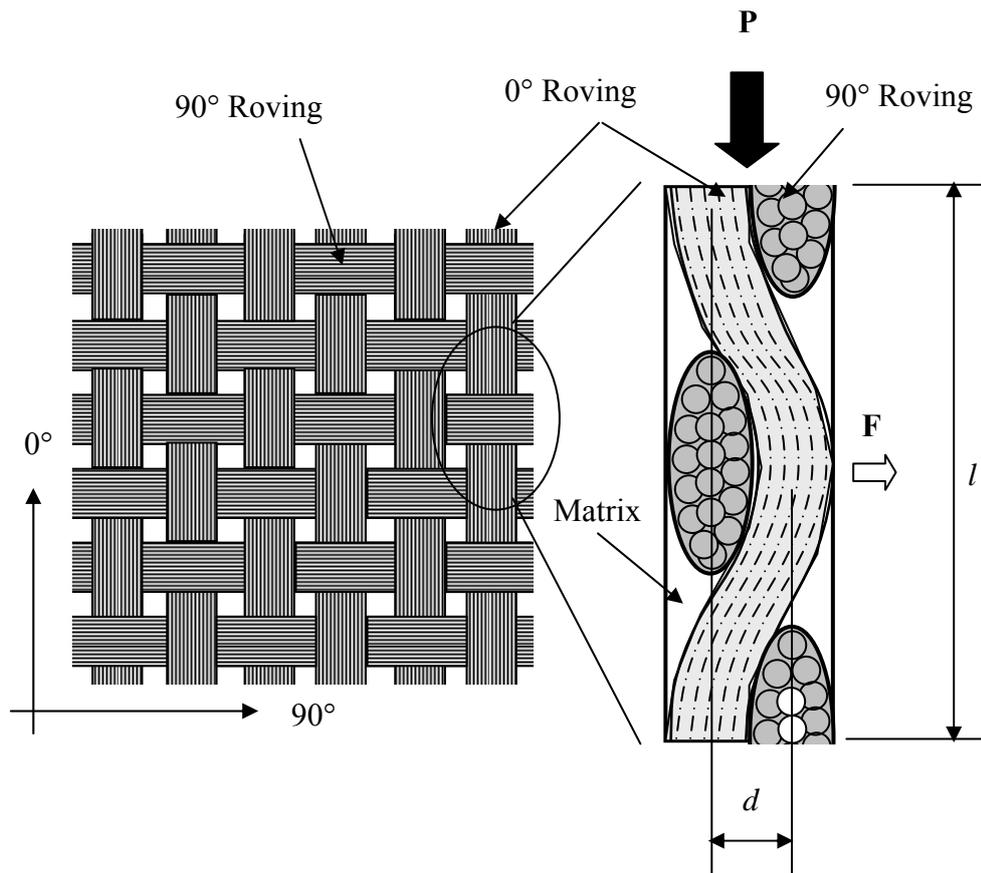


(a) Woven roving GFRP



(b) Stitched fabric GFRP

**Fig.4.14 Microstructure of cut section of GFRP**

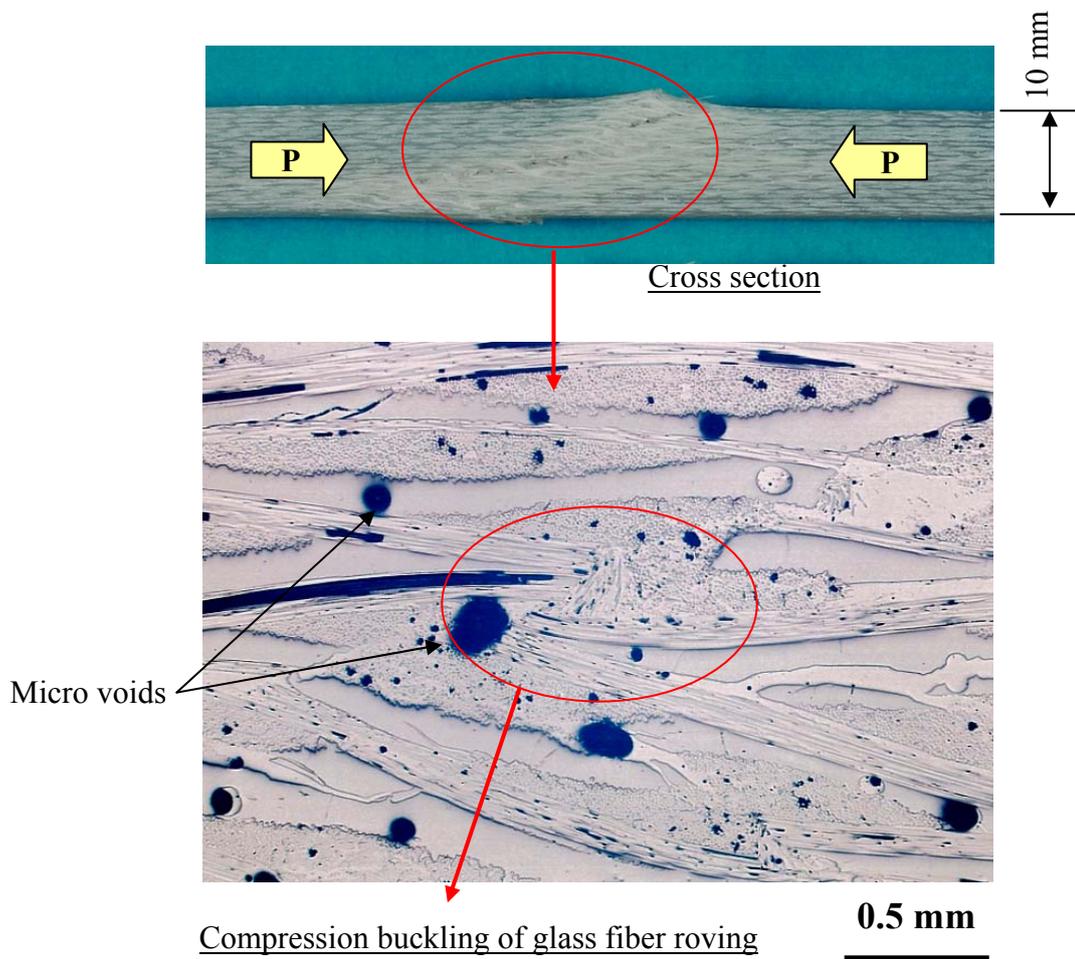


**Fig.4.15** Pattern diagrams of woven roving and cut section of GFRP

図 4.16 は、ロービングクロス強化 GFRP の圧縮破壊した試験片の断面観察例である<sup>(10)</sup>。マクロ的には全体がせん断破壊を起こした状態であるが、ミクロ的には繊維束（ロービング）が単独で座屈破壊していることがわかる。

GFRP の強度特性には、ガラス繊維のうねりの他、繊維物性のばらつき、マイクロボイドの発生および樹脂と繊維界面の接着強度のばらつきなどの影響が総合的に関与してくる。この中で繊維物性のばらつき、マイクロボイド、樹脂と繊維界面の接着強度のばらつきについては、これらが大きな影響を与えたとすると、GFRP の強度特性は図 4.10～図 4.13 に示すように単純に  $V_f$  で整理することができず、特性値そのものが大きくばらつくと考えられる。またガラス繊維は、表面処理が比較的容易でかつ安定した処理ができる繊維であり、シラン系処理剤が良く知られている。特に不飽和ポリエステル樹脂用の表面処理技術は、早くから繊維メーカーで研究開発が行われ、メーカーごとに独自のノウハウを有し安定した処理技術を構築しており、繊維の集束性や各樹脂との接着性などが改善されてきた<sup>(16)</sup>。

以上より GFRP の強度特性に与える影響は、繊維物性のばらつき、マイクロボイド、樹脂と繊維界面の接着強度のばらつきについてはどの GFRP に対しても同じでかつ小さいと考え、織物基材形態に起因する繊維うねりの影響が最も大きいと推察した。ガラス繊維のうねりが少ないスティッチファブリックは、GFRP の強度特性において、引張弾性率や圧縮弾性率よりも引張強さおよび圧縮強さの向上に大きな効果があると考えられる。



**Fig.4.16 Microstructure after compressive test  
(Glass woven roving GFRP)**

#### 4.5 結 言

一方向ガラス繊維を主体とするステッチファブリックを用いた GFRP について、引張および圧縮特性に及ぼす繊維構成、繊維含有量、繊維径の影響を調査すると同時に、 $0^\circ/90^\circ$  ステッチファブリックとロービングクロスを用いた GFRP を比較しながら、繊維の織り形態と強度特性の関連について微視組織の観察結果をもとに追究した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) ステッチファブリック強化 GFRP の引張強さと圧縮強さの関係は、圧縮強さの方が低い値を示し、 $V_f$  が高くなるほどその差は大きくなる。引張強さと圧縮強さの両方が関与する構造物に適用する場合は、基本設計は圧縮強さを基準に考える必要がある。一方、引張および圧縮弾性率は  $V_f$  に比例して増加し、ばらつきも小さく予測しやすい物性である。
- (2) ステッチファブリック強化 GFRP は、ロービングクロス強化 GFRP と比較して、引張および圧縮強さが優れている。弾性率は、僅かに高い傾向を示すが大きな有意差は認められない。
- (3) ステッチファブリックは、ガラス繊維のうねりが少ないことが特徴であるが、このことは GFRP の引張強さおよび圧縮強さの向上に大きな効果がある。一方、引張および圧縮弾性率に対しては、大きな効果は期待できない。
- (4) ステッチファブリック強化 GFRP の圧縮強さは、ガラス繊維の素線径が小さい方がより高くなる可能性がある。GFRP の引張および圧縮強さに与える素線径の影響については、GFRP の破壊形態や破壊モードを考慮しながら詳細かつ総合的に解明する必要があり、今後の課題と考える。

## 参考文献

- (1) Owens Corning, Fabric Handbook, (1994), pp.7-16.
- (2) Kanamaru. R, Sanae. N, Knitted Fiber Reinforced Plastics, Journal of Textile Engineering, The Textile Machinery Society of Japan, vol. 52, No.7, (1999), pp.15-20.
- (3) K.H. Leong, S. Ramakrishna, Z.M. Huang, G.A. Bibo, The potential of knitting for engineering composites-a review, Composites, Part A31, (2000), pp.197-220.
- (4) Ishida. T, New Frontier Reinforced Plastics, Journal of Textile Engineering, The Textile Machinery Society of Japan, vol. 57, No.8, (2004), pp.316-324.
- (5) A.P. Mouritz, B.N. Cox, A mechanistic approach to the properties of stitched laminates, Composites, Part A31, (2000), pp.1-27.
- (6) M. Bannister, I. Herszberg, A. Nicolaidis, F. Coman, K.H. Laong, The manufacture of glass/epoxy composites with multilayer woven architectures, Composites, Part A 29A, (1998), pp.293-300.
- (7) Kawasetsu. N, Shindo. K, Takita. K, Kato. E, Development of Large FRP Blades for Wind Turbines, Reinforced Plastics, vol. 51, No.10, (2005), pp.18-23.
- (8) Shindo. K, Kawasetsu. N, Takita. K, Kato. E, Manufacturing Process of Large Size FRP by Vacuum Assisted Resin Transfer Molding, Mitsubishi Juko Giho, vol. 43, No.1, (2006), pp.11-12.
- (9) The Japan Reinforced Plastics Society, FRP structure design handbook, (1994), pp.30-33.
- (10) Kawasetsu.N, Shindo.K, Takita.K, The strength property of the FRP using stitch Fabric, Mechanical Engineering Congress 2005 Japan, The Japan Society of Mechanical Engineers, (2005), pp.587-588.
- (11) Shoji. Y, The view of reinforced glass fiber for ship, Techno Marine, No.777, (1994), pp.168-173.
- (12) The Japan Reinforced Plastics Society, FRP structure design handbook, (1994), pp.1-5.
- (13) Tabuchi. S, Shiba. H, Oikawa. Y, Amano. S, Gotoh. S, Miyairi. H, A Primary Approach to Evaluate New Form Glass Fiber Reinforced Plastics, The Japan Reinforced Plastics Society 45<sup>th</sup>CON-EX, (2000), pp.B-26/1-26/2.

- (14) S. C. Quek, A. M. Waas, V. Agaram, K. Shahwan, Compressive Instabilities in Braided Textile Composites, Proceeding of 2001 ASME International Mechanical Engineering congress and Exposition, AD-vol. 66, (2001), pp. 55-65.
- (15) K. H. Ji, S. J. Kim, Dynamics Direct Numerical Simulation of Woven Composites for Low-velocity Impact, Journal of Composite Materials, vol. 41, No. 2, (200), pp. 175-200.
- (16) The Japan Reinforced Plastics Society, FRP structure design handbook, (1988), pp. 6-8.

## 第 5 章 スティッチ繊維を用いたガラス繊維強化プラスチックの 静的強度および疲労強さに及ぼすマトリックス樹脂の影響

### 5.1 緒 言

GFRP の一般的な強化基材としては、これまでは取り扱い性と入手性の観点から、例えばガラスロービングクロスに代表されるクロス織物基材が主体として使用されてきた。

一方、近年、織物機械の開発が急速に進み、多くの新しい強化繊維基材が市場に出始めた。その 1 つがスティッチファブリックである。スティッチファブリックは、ガラスロービングなどの繊維束を任意の方向に配した後、ポリエステルなどの別の細い糸で固定した織物<sup>(1)</sup>でニットファブリックとも呼ばれている<sup>(2)(3)</sup>。十数年前から欧州の繊維メーカーを中心に開発が活発化しており、国内ではおよそ 10 年前から船舶用の GFRP 基材を中心に使用が拡大した<sup>(4)</sup>。最近では大型風力発電装置の GFRP ブレード用基材としても使用され始めている。

スティッチファブリックの特徴については、従来のガラスロービングクロスを使用した GFRP と比較して、引張特性や圧縮特性が優れているとの報告が多い<sup>(5)(6)</sup>。しかしながら、引張・圧縮強さと疲労強さに及ぼすマトリックス樹脂の影響について、詳細に調査した研究は少ない<sup>(7)(8)</sup>。

そこで本研究では、スティッチ繊維を用いた一方向強化 GFRP において、引張・圧縮特性および疲労特性に及ぼすマトリックス樹脂の影響を調査するとともに、引張・圧縮の静的強度と疲労強度の関係について検討した。試験に用いたマトリックス樹脂は、不飽和ポリエステル樹脂、ビニルエステル樹脂およびエポキシ樹脂の 3 種類である。

## 5.2 実験方法

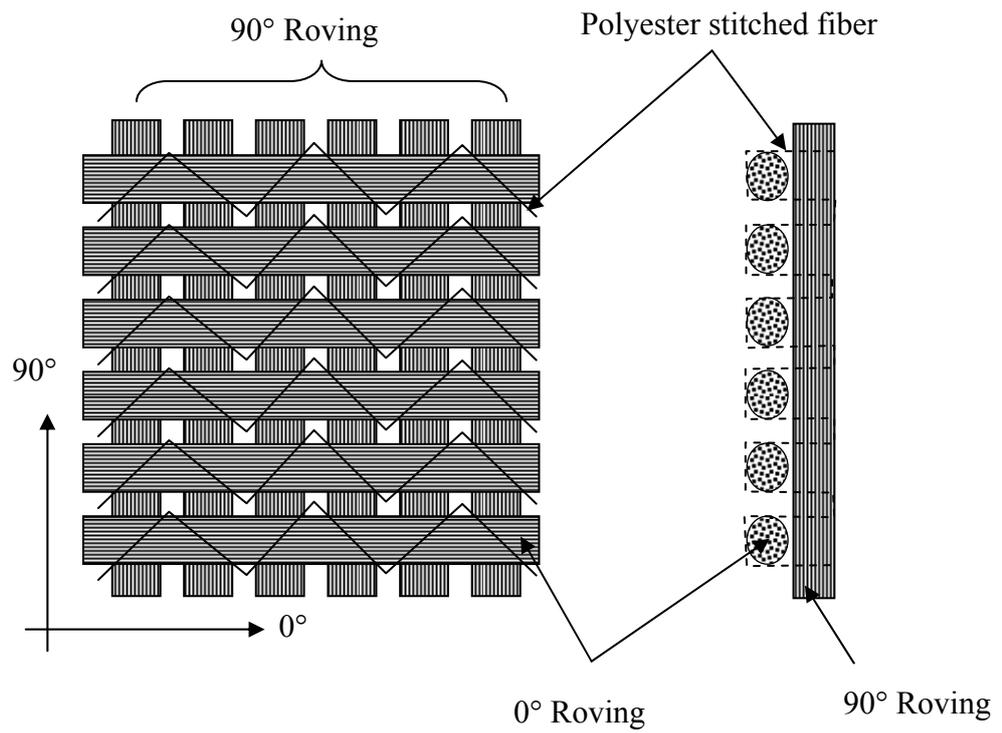
### 5.2.1 強化繊維

本研究で使用したガラス繊維基材は、オーエンス・コーニング社製のステッチファブリックで、繊維は耐水性に優れ GFRP として最も多く使用されている E ガラスである。ステッチファブリックは、ガラスロービングなどの繊維束を任意の方向に配した後、ポリエステルなどの別の細かい編糸で固定した織物である。この方法によれば、ガラス繊維のうねりが少なく、均一でかつ複数の層を有する織物（多層基材）が容易に製造できる。近年、国内外で多くの品種が作られており、繊維強化プラスチック用の基材として注目されている<sup>(9)</sup>。

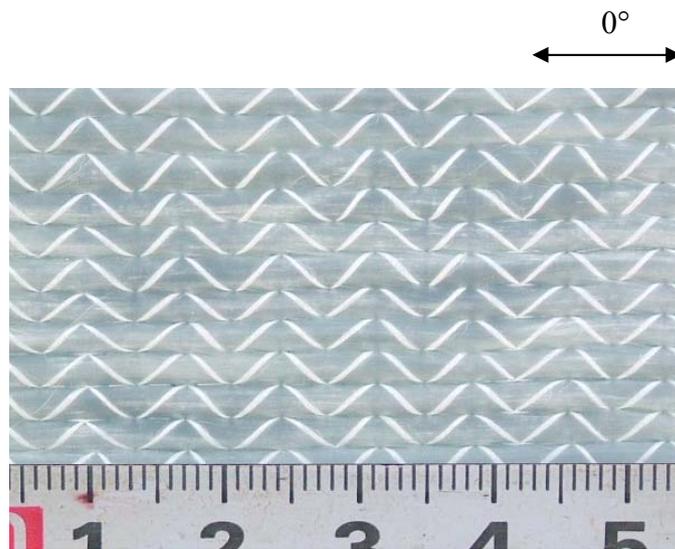
表 5.1 に使用したステッチファブリックの構成を、図 5.1 にその模式図を示す<sup>(1)</sup>。ガラス繊維の層構成は 0° 方向繊維が主体で、これを支えるための補助繊維として 90° 方向繊維を約 6 重量%配し、細かいポリエステル繊維で編みこんだものである。図 5.2 に用いたステッチファブリックの外観（表裏）を示す。

**Table 5.1 Composition of stitched fabric**

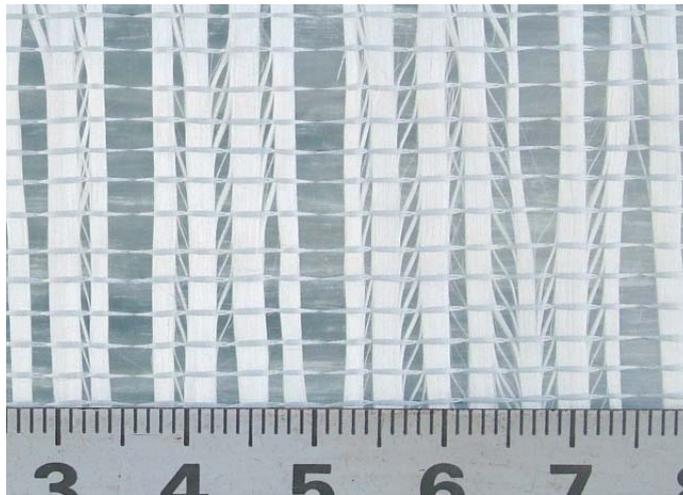
Fiber type and weight (g/m <sup>2</sup> )			
0° continuous	90° continuous	+45°	-45°
1,764	118	—	—



**Fig.5.1 Pattern diagrams of glass fiber stitched fabric (0/90 type)**



(a) Right side ( $0^\circ$  continuous fiber surface)



(b) Back side ( $90^\circ$  fiber surface)

**Fig.5.2** Appearances of 0/90 degree type fabric

### 5.2.2 マトリックス樹脂

繊維強化プラスチック用のマトリックス樹脂としては、生産量、経済性、適用実績などの観点から、主に不飽和ポリエステル樹脂、ビニルエステル樹脂およびエポキシ樹脂が使用されている。この中で不飽和ポリエステル樹脂は、最も安価でガラス基材への含浸がしやすく比較的取り扱いやすい樹脂であり、船舶部材や建材などに早くから使われてきたが、引張破断伸びが小さく脆い、接着力が小さい、硬化収縮が大きい等の課題がある。一方、エポキシ樹脂は、価格は高いが硬化収縮が小さく、寸法安定性に優れかつ延性が良好で接着力が強い高性能樹脂である。ビニルエステル樹脂は、不飽和ポリエステル樹脂とエポキシ樹脂の中間の性質を有し、不飽和ポリエステル樹脂よりも少し高価ではあるが、接着力および延性は優れている樹脂である。また耐薬品性も優れており、近年、耐食用途のGFRP用マトリックス樹脂として需要が急増している<sup>(10)(11)(12)</sup>。

表 5.2 に本研究で使用した不飽和ポリエステル樹脂、ビニルエステル樹脂およびエポキシ樹脂の物性を示す。GFRP の強度特性を向上させる手段としては、ガラス繊維含有量の増大が最も確実な手段ではあるが、マトリックス樹脂の選定も重要である。引張破断伸びが大きく、接着力が高いビニルエステル樹脂およびエポキシ樹脂は、高性能 GFRP 用の樹脂として注目できる。

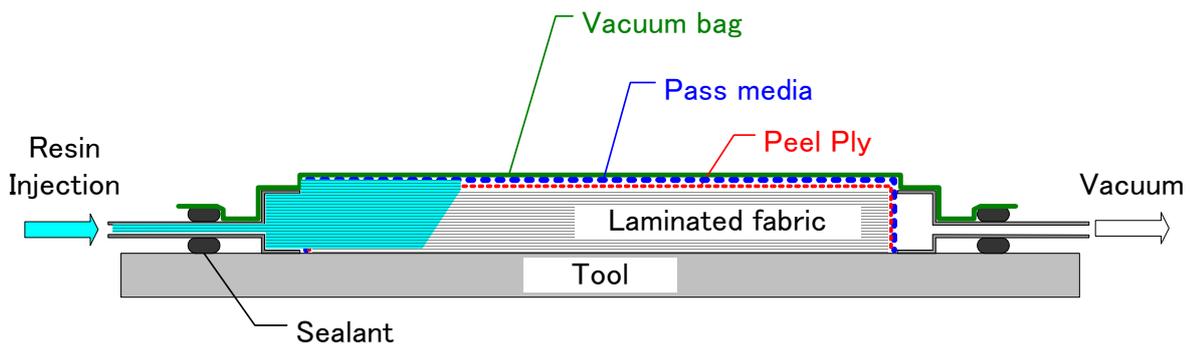
**Table 5.2 Physical properties of matrix resin**

Resin	Unsaturated polyester resin	Vinyl ester resin	Epoxy resin
Producing company	JAPAN U-PiCA Company, Ltd.	SHOWA HIGHPOLYMER Company, Ltd.	Dainippon Ink and Chemicals Incorporated
Tensile strength (MPa)	68	60	88
Tensile modulus (GPa)	3.4	2.7	3.5
Tensile rupture elongation (%)	3.2	7.0	5.2
Bending strength (MPa)	124	95	143
Bending modulus (GPa)	3.5	2.9	3.5

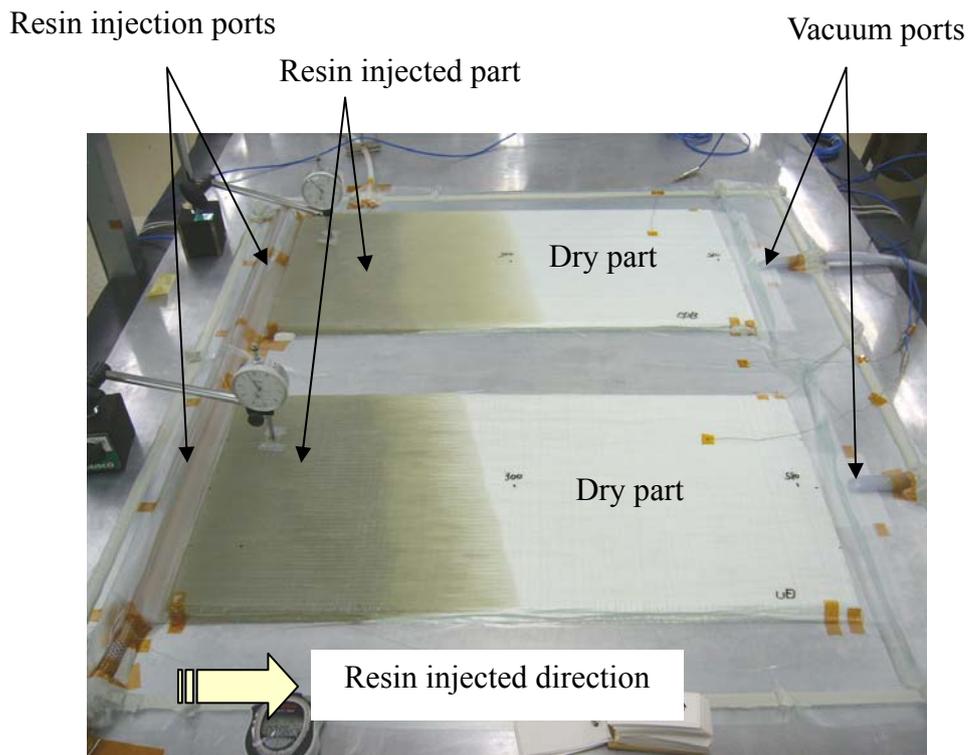
### 5.2.3 供試体の製作

試験用積層板の製造には、真空成形法の1手法で、真空圧を利用して強化繊維基材に樹脂を含浸させる真空含浸工法（VaRTM）を採用した。この工法は、一般的なハンドレイアップ工法と比較すると、高い繊維含有量で欠陥が少ない高品質のFRPを容易かつ安価に成形できるため、近年、世界中で注目されている<sup>(13)</sup>。また大型のFRP構造部材の成形が容易で、かつクローズド成形となるため作業環境改善（低臭気）の観点からも望ましい。

図5.3に真空含浸工法の模式図を示す<sup>(14)</sup>。GFRP成形の工程は、まず成形型の上に強化繊維基材（ガラス繊維）を積層し、ナイロンフィルム製のバキュームバッグでバギングして真空吸引する。強化繊維基材とバキュームバッグの間には、樹脂を拡散しやすくするための多孔質フィルム（パスメディア）と離型層（ピールプライ）を挿入した。次に目標とする真空度（本研究では0.095MPa以下）まで到達したことを確認後に、注入ポートを開放して樹脂を注入し強化繊維全体に樹脂を含浸させる。図5.4に真空含浸工法による試験板の製作状況を示す。試験板の寸法は幅300mm、長さ600mmで、強化繊維基材の積層枚数は8層とした（試験板の板厚：10±2mm）。樹脂が完全に含浸した後、不飽和ポリエステル樹脂およびビニルエステル樹脂については自己発熱により硬化するのを待ち、硬化反応熱が低下して表面温度が室温になったことを確認後に脱型してGFRP成形体を得た。また樹脂を完全硬化させるために、50℃×12Hrのアフターキュアを施した。一方、エポキシ樹脂は、自己発熱硬化タイプの樹脂ではないため、含浸後に連続して80℃×5Hrの加熱処理を行い完全硬化させた。



**Fig.5.3 Outline of Vacuum assisted Resin Transfer Molding (VaRTM) <sup>(14)</sup>**



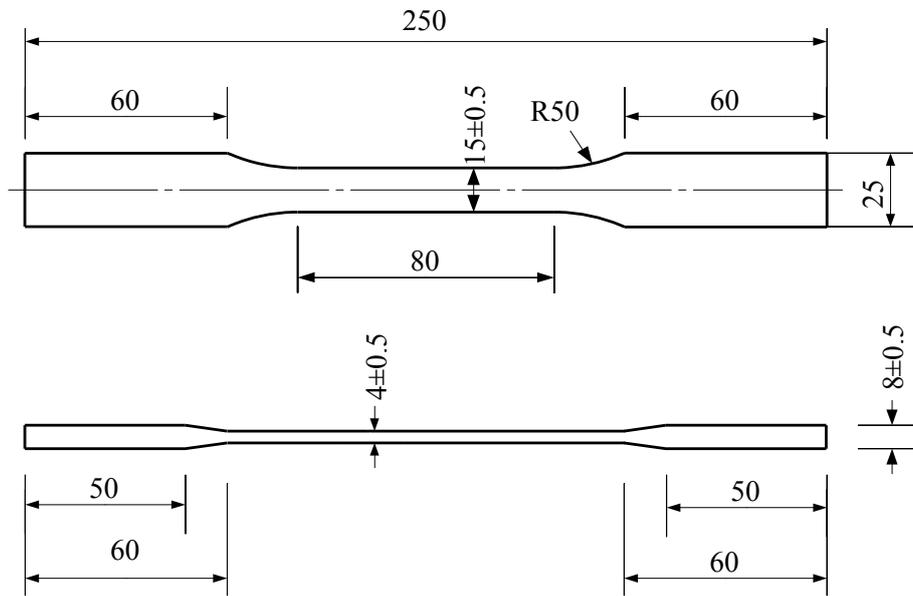
**Fig.5.4 Manufacturing method of test panel by VaRTM**

#### 5.2.4 試験方法

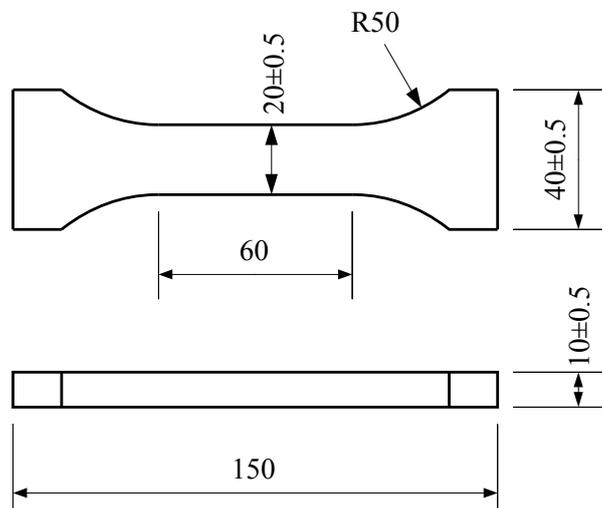
マトリックス樹脂が異なる 3 種類の複合材について、繊維含有量の測定と室温における引張試験、圧縮試験および疲労試験を実施した。ガラス繊維含有量の測定は JIS K7052 に準じて焼成法で実施し、重量含有量を算出後に体積含有量 ( $V_f$ ) に換算した。

引張試験は JIS K7054 に準じて実施した。また圧縮試験には様々な手法が提案されているが、ここでは JIS K7018 (1999) A 形試験片に準拠した大型試験片とし、JIS K7056 (1995) に規定する A 形試験片治具を用いた。この圧縮試験法は、表面がジグザグ形状を呈する 2 組の押え治具で試験片を挟み込み、面外座屈を防止しながら荷重を負荷する方法である。図 5.5 に引張試験片の形状を、図 5.6 に圧縮試験片の形状を示す。引張試験片の厚さと幅は、平行部において掴み部よりもひと回り小さい形状とした。引張および圧縮試験は、25T インストロン式 1127 型材料試験機で行った。試験機の主な仕様は、試験秤量:250kN, クロスヘッド速度:0.001~500mm/min, クロスヘッド有効ストローク:最大 600mm で、サーボモータ電気機械負荷方式の試験機である。試験荷重の荷重方向は主繊維方向 ( $0^\circ$  方向) とし、ひずみの測定は電気抵抗ひずみゲージを試験片の両面に各 1 枚、計 2 枚貼り付けて計測し、その平均値であらわした。ひずみゲージは、有効測定範囲が 5mm の共和電業社製 KFP-5-120-C1-651, 1M2R である。弾性率は、引張および圧縮弾性率ともに、それぞれの応力-ひずみ曲線の原点 (0, 0) を通る接線の傾きとして算出した。

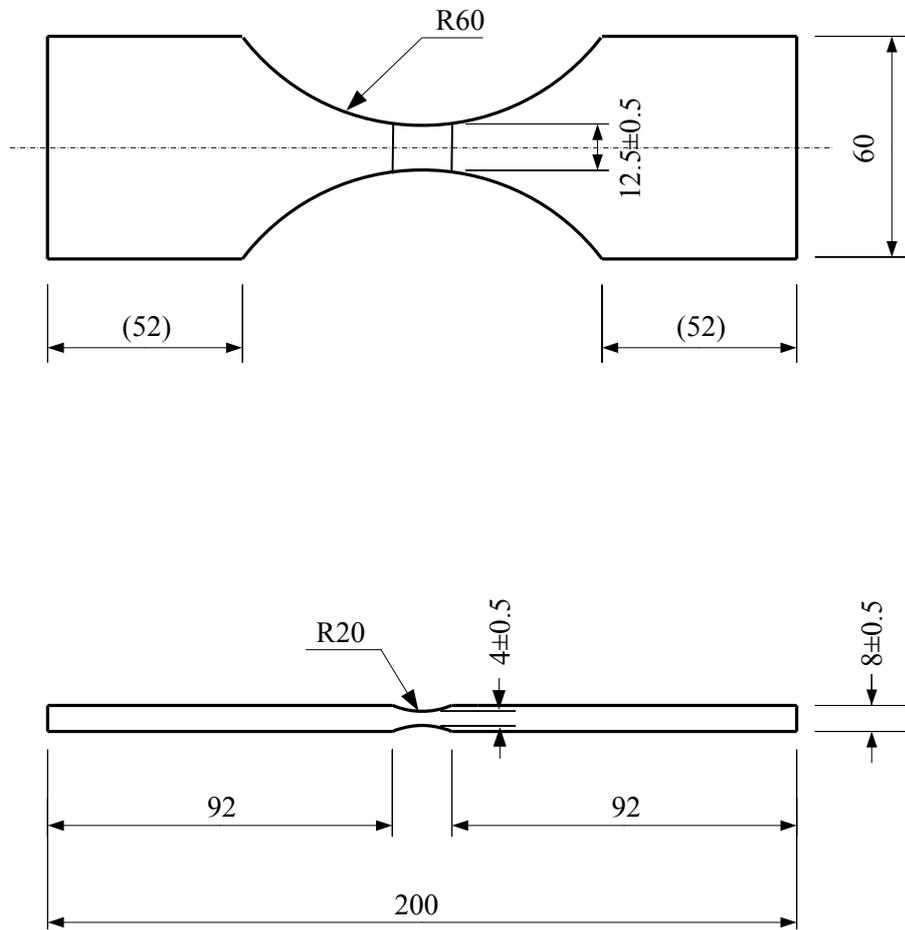
疲労試験は、JIS K7082 および JIS K7083 に準じて実施し、試験片形状は JIS K7054 (引張試験) を参考に修正を加えた。図 5.7 に疲労試験片の形状を示す。引張試験片と同様に板厚中央部 (試験評価部) を部分的に薄肉化した形状とした。試験機は、島津式疲労試験機 EHK-UB10-20L 型を使用し、繰り返し速さは試験片の発熱をおさえる狙いから 2Hz とし、負荷応力比  $R$  ( $\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$ ) は引張と圧縮を交互に繰り返す  $R=-1$  (両振り) の条件とした。なお試験実施に当っては、圧縮時に座屈が発生しないよう配慮した。



**Fig.5.5 Tensile test specimen**



**Fig.5.6 Compressive test specimen**



**Fig.5.7 Fatigue test specimen**

### 5.3 実験結果

表 5.3 および表 5.4 に引張試験，圧縮試験およびガラス繊維含有量測定の結果を示す．繊維体積含有量 ( $V_f$ ) は 56~60 %の範囲で，3 種の材料で大きな差は認められなかった．図 5.8 に引張強さと圧縮強さを，図 5.9 に引張弾性率と圧縮弾性率をマトリックス樹脂別に整理して示す．GFRP の強度は，いずれのマトリックス樹脂の場合も圧縮強さよりも引張強さが 25~35%程度高い値となった．一方，弾性率は引張と圧縮でほぼ同じ値を示し，マトリックス樹脂の違いによる差はほとんど認められなかった．

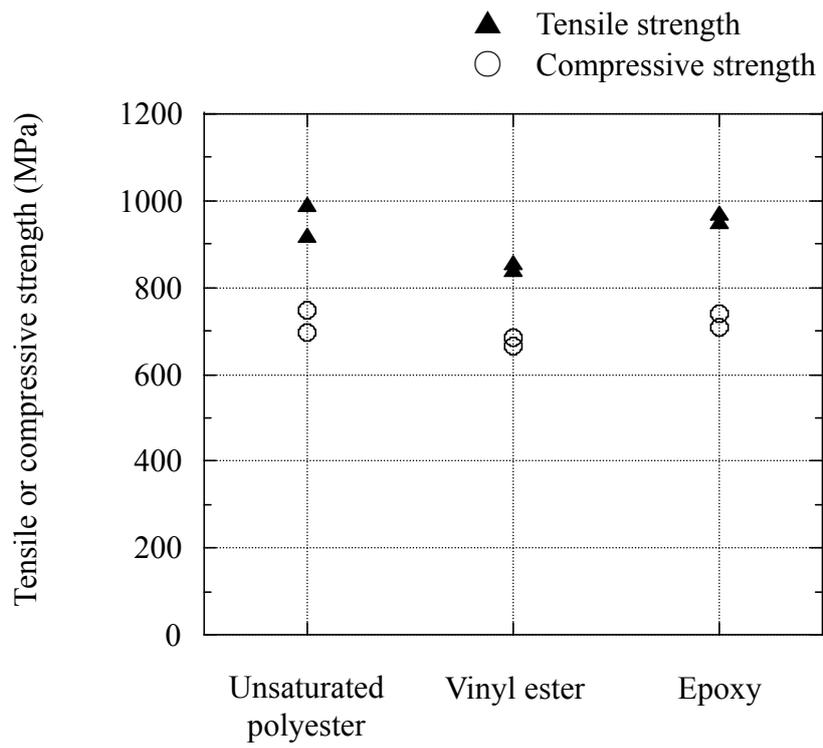
表 5.5 に疲労試験の結果を示す．破断までの繰り返し数は，いずれの材料も応力振幅が小さくなるほど大きくなった．また同じ応力振幅で比較した場合，破断までの繰り返し数は，エポキシ樹脂 > ビニルエステル樹脂 > 不飽和ポリエステル樹脂の順に大きくなった．

**Table 5.3 Tensile test result**

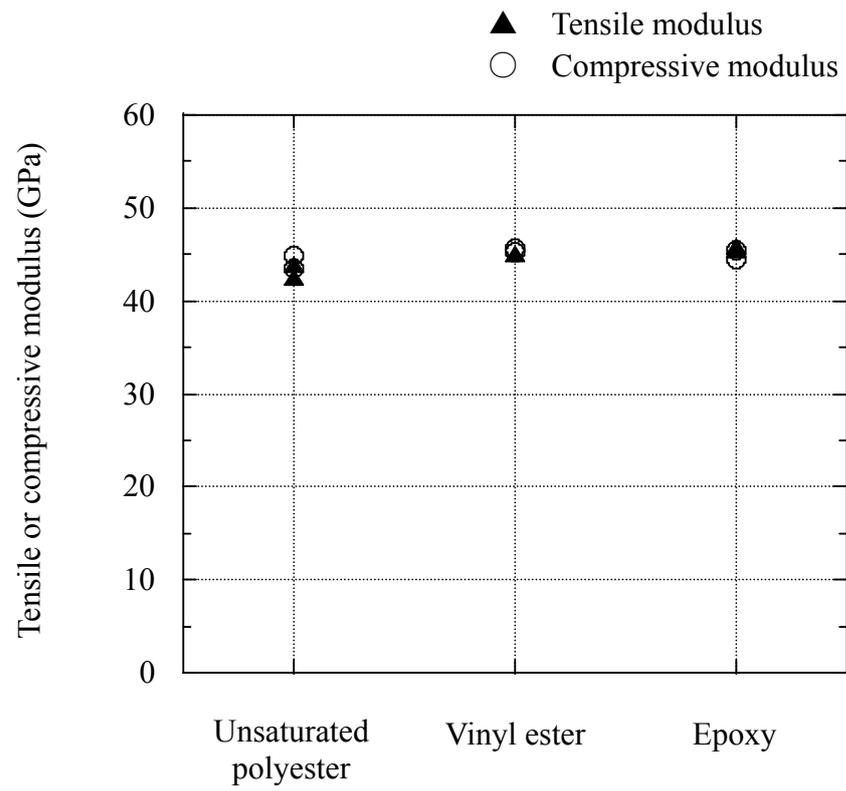
Resin	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Volume fraction of glass fiber : $V_f$ (%)
Unsaturated polyester	990	42.5	58.2
	922	43.8	
Vinyl ester	841	45.0	60.3
	859	45.0	
Epoxy	973	45.8	56.5
	951	45.4	

**Table 5.4 Compressive test result**

Resin	Compressive strength (MPa)	Compressive modulus (GPa)	Volume fraction of glass fiber : $V_f$ (%)
Unsaturated polyester	748	43.5	58.2
	696	44.9	
Vinyl ester	683	45.3	60.3
	664	45.7	
Epoxy	710	44.5	56.5
	738	45.5	



**Fig.5.8 Tensile and compressive strength**



**Fig.5.9 Tensile and compressive modulus**

**Table 5.5 Fatigue test result**

Resin	Stress amplitude (MPa)	Number of cycles for rupture: $N_f$	Remarks
Unsaturated polyester	150	$1.45 \times 10^5$	Rupture
	200	$42.8 \times 10^4$	Rupture
	250	$9.41 \times 10^3$	Rupture
Vinyl ester	250	$1.00 \times 10^5$	Rupture
	280	$1.75 \times 10^4$	Rupture
	300	$7.45 \times 10^3$	Rupture
Epoxy	300	$2.70 \times 10^5$	Rupture
	350	$2.21 \times 10^4$	Rupture
	400	$1.43 \times 10^3$	Rupture

## 5.4 考 察

### 5.4.1 引張・圧縮強さとマトリックス樹脂

図 5.8 に示したように，GFRP の強度はいずれのマトリックス樹脂の場合も圧縮強さより引張強さが高い値を示した．一般に GFRP の引張強さと圧縮強さを比較した場合，同等かまたは引張強さの方が高い値を示し， $V_f$ が高くなるほどその差が大きくなることはいくつかの文献で述べられているが<sup>(15)(16)</sup>，ステッチファブリックを用いた一方向 GFRP においても同じであることが示された．また  $V_f$  がほぼ同等で，マトリックス樹脂の違いによる引張および圧縮強さの差はほとんど認められないことから，GFRP の静強度は，マトリックス樹脂の影響よりもガラス繊維の影響（含有量，織り形態など）が強く関与していると考えられる．

一方，弾性率については，図 5.9 に示したように引張と圧縮でほぼ同じ値を示し，かつマトリックス樹脂の違いによる差もほとんど認められなかった．このことは，第 2 章のガラスクロス強化材でも同様の結果が得られており，すなわち，GFRP の弾性率はガラス繊維の形態と含有量で決まり，マトリックス樹脂の影響は小さいことがより明確になった．

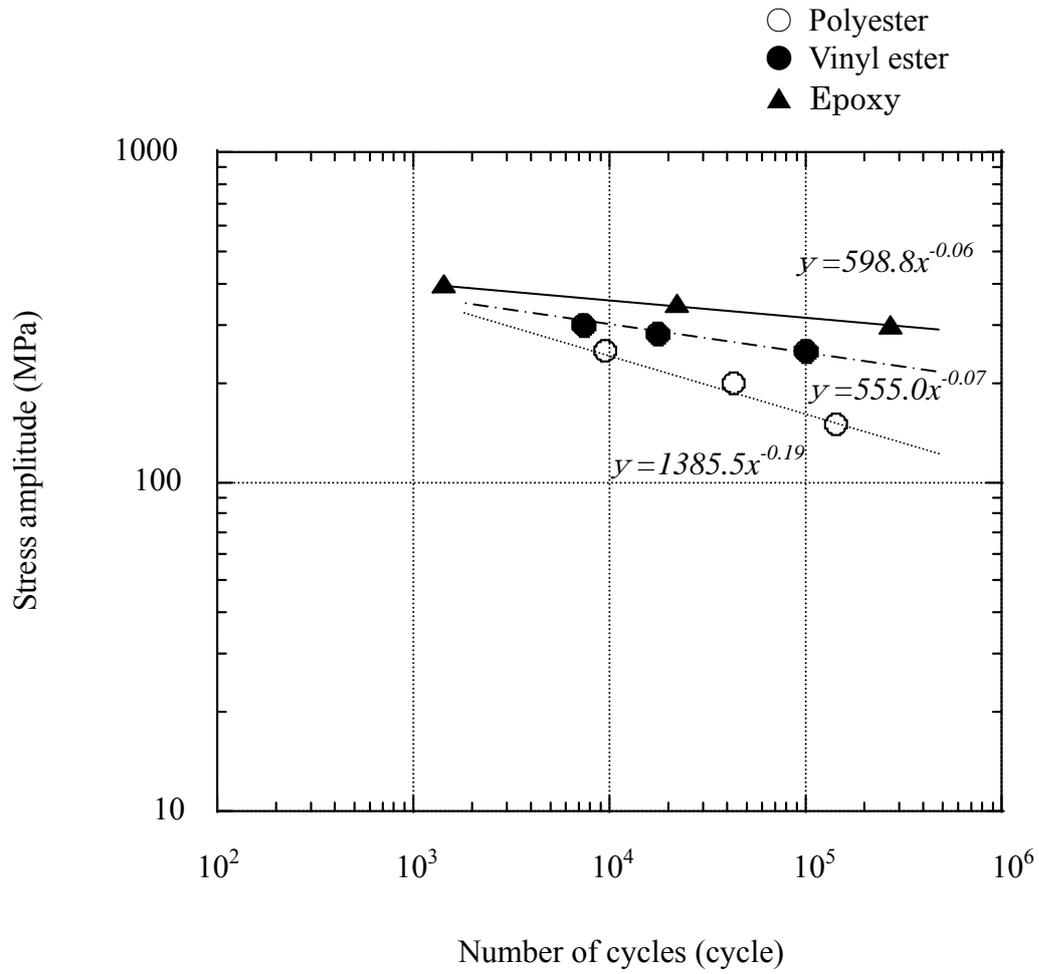
### 5.4.2 疲労強さとマトリックス樹脂

図 5.10 に疲労試験結果から求めた応力振幅（ $\sigma_a$ ）と繰り返し数（ $N$ ）の関係を示す．関係式は縦軸（応力振幅）および横軸（繰り返し数）とも対数表示としたとき，不飽和ポリエステル樹脂，ビニルエステル樹脂およびエポキシ樹脂でそれぞれ式(1)，(2)および式(3)で整理することができた．

$$y = 1385.5x^{-0.19} \quad (1)$$

$$y = 555.0x^{-0.07} \quad (2)$$

$$y = 598.8x^{-0.06} \quad (3)$$



**Fig.5.10 Fatigue test result**

ここで図 5.10 より，疲労強さに関してはマトリックス樹脂の影響が明確にあらわれることがわかる．すなわち，エポキシ樹脂＞ビニルエステル樹脂＞不飽和ポリエステル樹脂の順に疲労強さが優れており，かつ高サイクル側ほどその差がより大きくなる．例えば， $1 \times 10^5$  サイクルで破断する応力振幅を比較すると，不飽和ポリエステル樹脂は 155MPa であるのに対し，エポキシ樹脂は 300MPa と約 2 倍近い値になる．この要因はマトリックス樹脂の特性に起因していると推察され，関連している物性は樹脂の延性（破断伸び），ガラス繊維との接着性（接着強さ）および硬化時の収縮率が考えられる．

GFRP の疲労現象は，その初期段階では荷重負荷方向に対し直角方向に微細な樹脂き裂（トランスバースクラック）が発生し，この微細き裂が徐々に進展または増加して最終破断に至ることは知られている<sup>(17)(18)</sup>．本研究で使用した 3 種類の樹脂の引張破断伸びは，ビニルエステル樹脂＞エポキシ樹脂＞不飽和ポリエステル樹脂の順に大きい値を示した（表 5.2）．疲労によるトランスバースクラックは，延性が優れている（破断伸びが大きい）マトリックス樹脂ほど発生しにくいと予測されることから，この順で疲労強さが優れていることが推察できる．

一方，接着強さは，エポキシ樹脂＞ビニルエステル樹脂＞不飽和ポリエステル樹脂の順に大きい値を示し，特にエポキシ樹脂は非常に優れた接着特性を有していることが知られている<sup>(10)(11)(12)</sup>．エポキシ樹脂が，種々の材料の 2 次接着剤として多用される大きな理由はここにある．

また樹脂が硬化する際の体積収縮率は，不飽和ポリエステル樹脂およびビニルエステル樹脂が 7～8% であるのに対し，エポキシ樹脂は 1～3% と小さい<sup>(10)(12)</sup>．このことは，成形硬化時の内部残留応力に対して大きく影響を与える．すなわち，硬化時の収縮が大きい不飽和ポリエステル樹脂およびビニルエステル樹脂の場合は，成形直後からガラス繊維と樹脂の界面に比較的大きな剥離力が残存することが予想される．この状態に，さらに外力が負荷されることで，樹脂自体あるいは樹脂と繊維界面にき裂が生じやすくなり，疲労強さが低下する要因になると考える．

### 5.4.3 引張・圧縮強さと疲労強さの関係

図 5.11 に引張強さと疲労強さの強度比と繰り返し数の関係を、同様に図 5.12 に圧縮強さと疲労強さの強度比と繰り返し数の関係を示す。

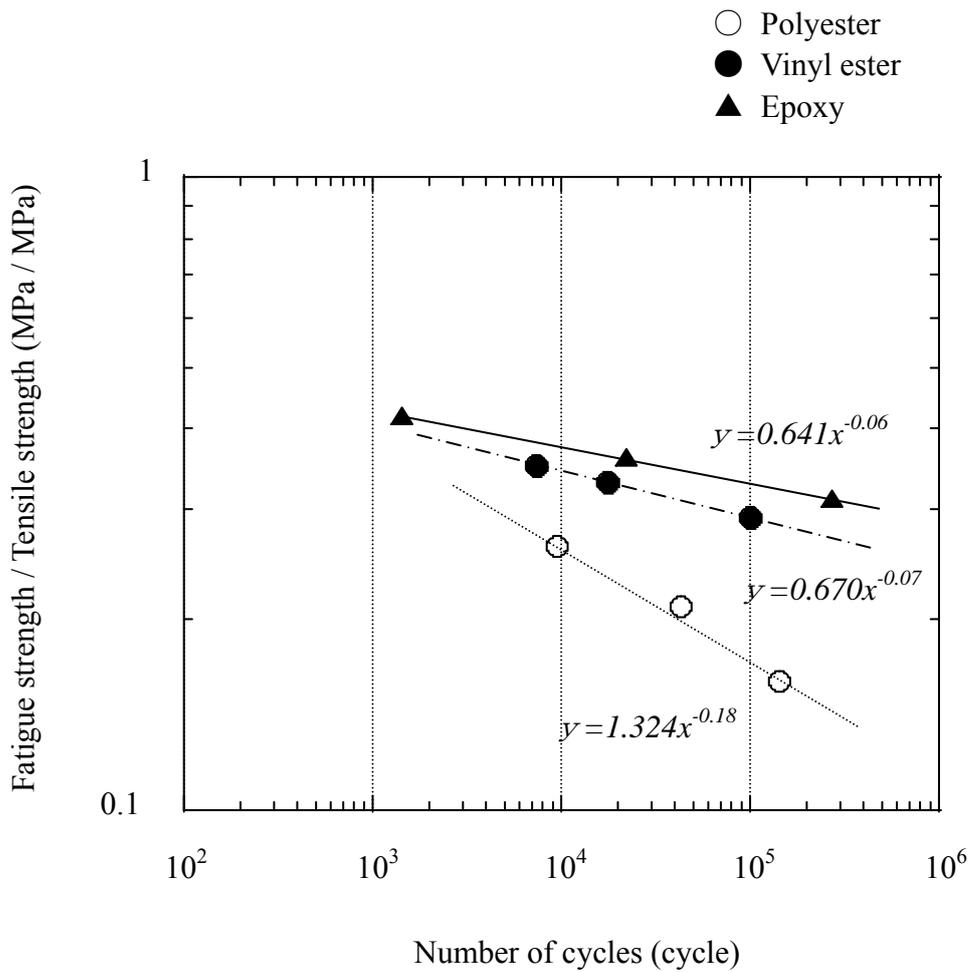
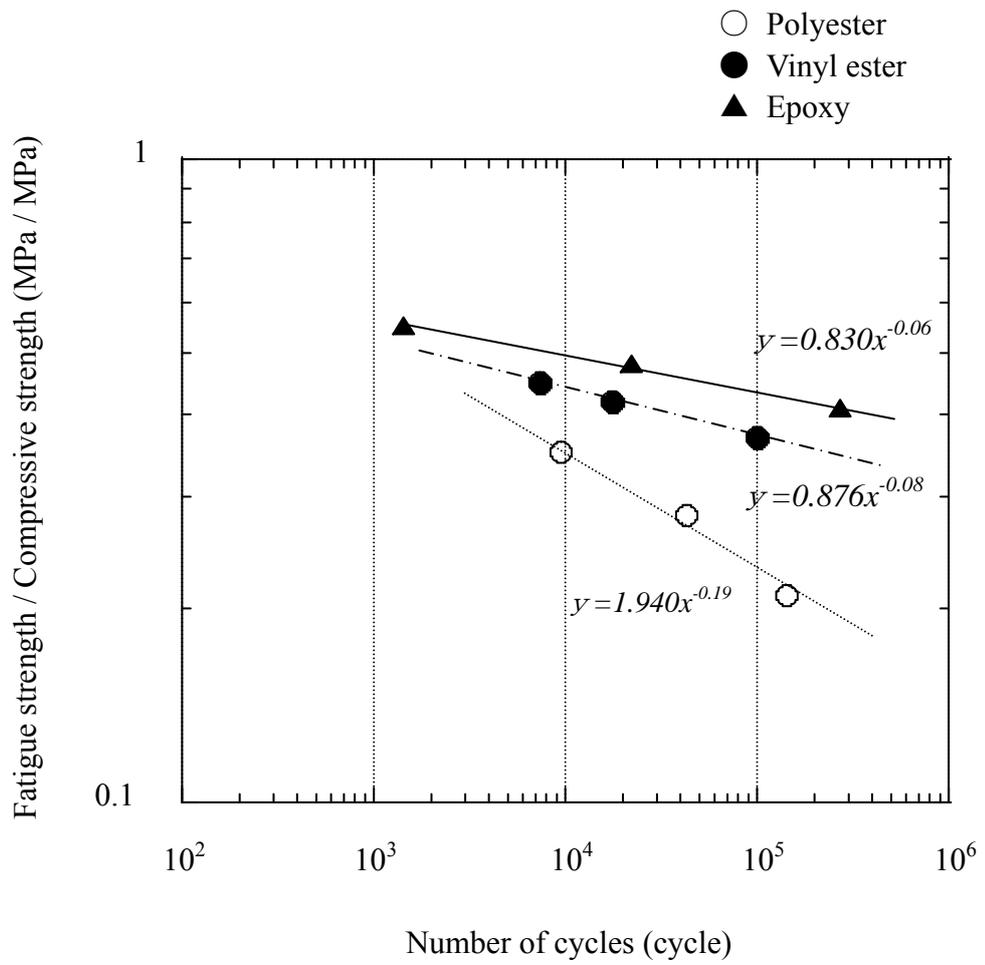


Fig.5.11 Relation between fatigue and tensile strength



**Fig.5.12 Relation between fatigue and compressive strength**

図 5.11 および図 5.12 より，静強度に対する疲労強さの比率は，マトリックス樹脂による違いが明確にあらわれ，エポキシ樹脂＞ビニルエステル樹脂＞不飽和ポリエステル樹脂の順に大きくなることがわかる．すなわち，引張強さおよび圧縮強さの静強度に対して，エポキシ樹脂をマトリックスとした GFRP が最も高い疲労強さを示し，逆に不飽和ポリエステル樹脂をマトリックスとした GFRP は最も低い疲労強さを示すことを意味する．このことは，前項でも述べたように同じ強化基材で同じ静強度を有する GFRP であっても，疲労強さはマトリックス樹脂により異なることを示唆している．そこで静強度と疲労強さの関連性をより詳細に評価するために，それぞれの GFRP の引張強さおよび圧縮強さと， $1 \times 10^5$  回の繰り返し数で破断する疲労強さの強度比を表 5.6 に整理した．

**Table 5.6 Relation between  $10^5$  fatigue strength and static strength**

Resin	$10^5$ Fatigue strength/ Tensile strength	$10^5$ Fatigue strength/ Compressive strength
Unsaturated polyester	0.162	0.215
Vinyl ester	0.291	0.368
Epoxy	0.312	0.414

エポキシ樹脂 GFRP の引張強さおよび圧縮強さと  $1 \times 10^5$  回で破断する疲労強さとの強度比は、不飽和ポリエステル樹脂 GFRP のそれに対して、いずれも 1.9 倍であり良く一致する。また同様に、ビニルエステル樹脂 GFRP の引張強さおよび圧縮強さと疲労強さの強度比も、不飽和ポリエステル樹脂 GFRP のそれに対して、1.7~1.8 倍と良く一致した。以上の結果から、スティッチファブリックを用いた GFRP は、マトリックス樹脂が決まれば引張強さおよび圧縮強さを計測することで、疲労強さを予測することができると考えられる。なお、これは他の GFRP でも当てはまる現象と考えるが、静強度に対する疲労強さの比率は個々の材料組み合わせで異なることが予想されるため、この確認は必要である。また図 5.11 および図 5.12 からもわかるように、これは繰り返し数が 1000 回以上の高サイクルの疲労強さに関して言及できる現象であり、これ以下の低サイクル領域では、別途試験データを取得、整備して検証する必要がある。

## 5.5 結 言

スティッチ基材を用いた一方向 GFRP において、引張・圧縮特性および疲労特性に及ぼすマトリックス樹脂の影響を調査するとともに、引張・圧縮の静的強度と疲労強度の関係について検討した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) スティッチファブリックを用いた一方向 GFRP の引張および圧縮特性は、ガラス繊維の形態と含有量で決まり、マトリックス樹脂の影響は小さいことがわかった。
- (2) 一方、疲労強さはマトリックス樹脂の影響が明確にあらわれ、エポキシ樹脂 > ビニルエステル樹脂 > 不飽和ポリエステル樹脂の順に優れ、かつ高サイクル側ほどその差が大きくなる。同じ強化基材で同じ静強度を有する GFRP であっても、疲労強さはマトリックス樹脂により異なることが明らかになった。
- (3) マトリックス樹脂が決まれば、引張強さおよび圧縮強さを計測することによって、疲労強さを予測できる可能性が示された。これは強化基材が異なる他の GFRP でも当てはまる現象と考えられるが、静強度に対する疲労強さの比率は、個々の材料の組み合わせによって異なることが予想されるため確認が必要である。

## 参考文献

- (1) Owens Corning, Fabric Handbook, (1994), pp.7-16.
- (2) 金丸亮二, 早苗徳光, ニットFRP, 繊維機械学会誌, vol. 52, No.7, (1999), pp.15-20.
- (3) K.H. Leong, S. Ramakrishna, Z.M. Huang, G.A. Bibo, The potential of knitting for engineering composites-a review, Composites, Part A31, (2000), pp.197-220.
- (4) 石田彪, FRP 舟艇用ガラス繊維「ニットファブリック」の材料特性, 海洋水産エンジニアリング, vol. 2, No.14, (2002), pp.54-63.
- (5) 石田彪, 新世紀型強化材ニットファブリック, 繊維機械学会誌, vol. 57, No.8, (2004), pp.316-324.
- (6) 田渕賢, 斯波哉, 及川由紀, 天野晋武, 後藤卒土民, 宮入裕夫, 新しい形態のガラス繊維強化材を用いた FRP の機械的性能について, 強化プラスチック協会 45<sup>th</sup>CON-EX 講演会要旨集, (2000), pp.B-26/1-26/2.
- (7) A.P. Mouritz, B.N. Cox, A mechanistic approach to the properties of stitched laminates, Composites, Part A31, (2000), pp.1-27.
- (8) Hirota. K, Noguchi. H, Lee.S.H, Kuroiwa. T, Takita. K, Fatigue Characteristics of GFRP with Stitched UD layers, The Japan Society of Mechanical Engineers Kyushu Branch Conference, (2005), pp.19-20.
- (9) M. Bannister, I. Herszberg, A. Nicolaidis, F. Coman, K.H. Laong, The manufacture of glass/epoxy composites with multilayer woven architectures, Composites, Part A 29A, (1998), pp.293-300.
- (10) 強化プラスチック協会, FRP 設計便覧, (1994), pp.12-20.
- (11) 栗原福次, 大石不二夫, 活用ガイド高分子材料, オーム社, 第 1 版 第 13 刷, (1984), pp.129-141.
- (12) 松崎昭二, ビニルエステル樹脂, 化学工業日報社, 初版 1 刷, (1993), pp.32-33.
- (13) 川節望, 新藤健太郎, 田北勝彦, 加藤英司, 風力発電装置用大型 FRP ブレード, 強化プラスチック, vol. 51, No.10, (2005), pp.18-23.
- (14) 新藤健太郎, 川節望, 田北勝彦, 加藤英司, VaRTM (真空含浸工法) による大型複合材製造技術, 三菱重工技報, vol. 43, No.1, (2006), pp.11-12.
- (15) 強化プラスチック協会, FRP 設計便覧, (1994), pp.30-33.

- (16) 川節望, 新藤健太郎, 田北勝彦, ステッチ強化基材を用いた樹脂系複合材の強度特性, 日本機械学会 2005 年度年次大会講演論文集(1), No. 5-1, (2005), pp. 587-588.
- (17) Bando, S, Zaco, M, Shiino, T, Kurashiki, T, Matsumura, K, On the Detection of Fatigue Damage in CFRP by Measuring Poisson' s Ratio, The official journal of the Japan Society for Composite Materials, Vol. 28, No. 1, (2002), pp. 3-10.
- (18) Yokozeki, T, Ishikawa, T, Shinagawa, Y, Inspection of Matrix Cracks in CFRP Laminates, Symposium of New material and Nondestructive Evaluation of the Products, (2004), pp. 29-32.

## 第 6 章 風力発電装置用ガラス繊維強化プラスチック大型翼の機械的性質

### 6.1 緒言

GFRP は、軽量で耐食性および耐候性が優れていることから、1970 年代初頭から汎用品、建築部材、プラント構造材として多くの製品に使用されてきた<sup>(1)</sup>。その際、求められる特性は主に引張強さと引張弾性率であったが、近年、大型の厚肉部材や繰り返し荷重が負荷される構造部材への適用が増加しており、引張側の強度特性と同時に圧縮側の特性および疲労強さも重要視されるようになってきた。

ところで、世界的な地球環境問題に対する関心の高まりにより、無尽蔵で環境負荷の小さい風力エネルギーを利用した風力発電装置が急速に普及しつつある<sup>(2)(3)</sup>。風力発電装置の高性能化・大容量化に対しては、ブレードの大型、長大化は必須であるが、ブレードには台風などの強風に耐えることができる最大強度（静強度）と、風の強弱や回転時の自重によって発生する繰り返しの負荷荷重に耐える疲労強さが求められる。最新の装置では 20 年以上の長期耐久性が要求され、強度信頼性が最大の課題となっている<sup>(4)(5)</sup>。

この装置のブレードには、軽量化の観点から主に GFRP が使われており、ブレードは 1000kW クラスの装置で約 30m の長さになり、一般の GFRP 構造部材と比べると著しく長大である。大型構造部材としての品質を確保しながら、静強度と疲労強度の要求特性を満たすためには、樹脂および強化繊維の素材選定と組合せの適正化が重要である。

本章では、大型 GFRP 部材の 1 例として風力発電装置のブレードを例にとり、適用されているガラス繊維およびマトリックス樹脂と GFRP の機械的性質を調査しその関連性を考察するとともに、破壊形態に及ぼすマトリックス樹脂の影響について追究した。

## 6.2 実験方法

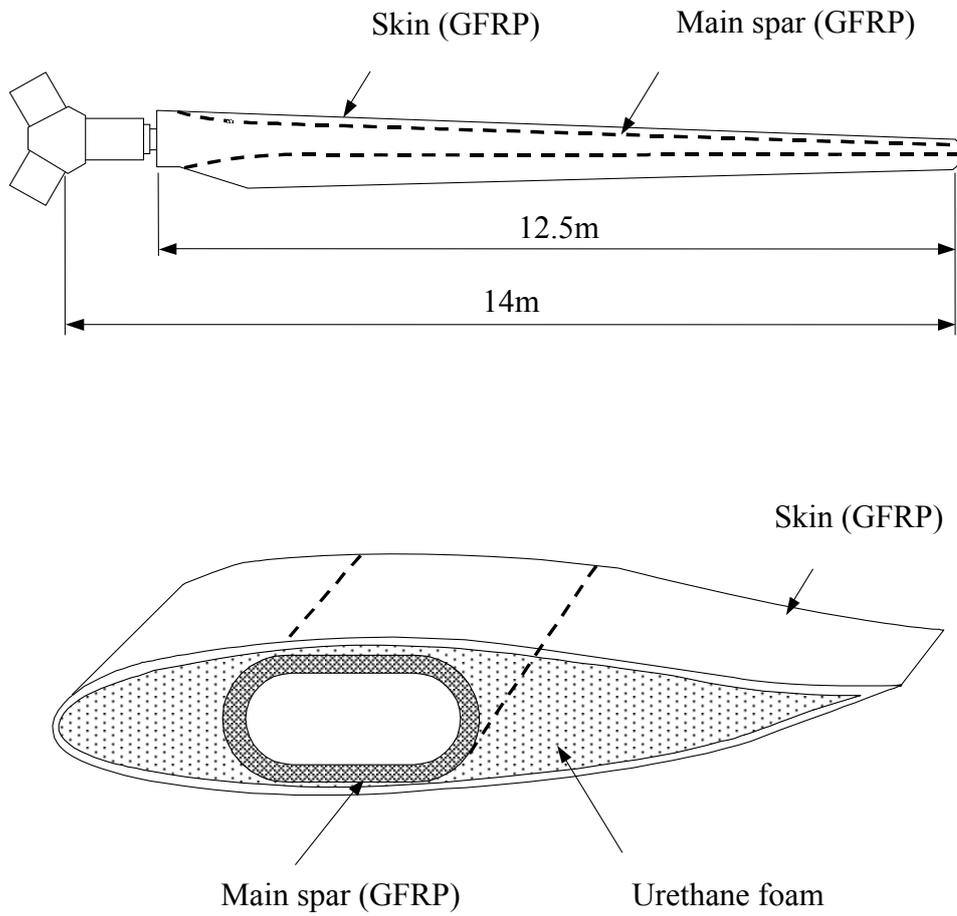
### 6.2.1 GFRP の素材

ガラス繊維基材とマトリックス樹脂は，250kW～2400kW 風力発電装置用の GFRP ブレード（長さ：12m～45m）に実際に用いられている実用素材とした．ガラス繊維は，耐水性および強度特性に優れ GFRP として最も多く使用されている E ガラスで，織物形態は平織りロービングクロス ERC580 (JIS R3417) とチョップドストランドマット EM450 (JIS R3411) のほか，一方向クロスおよびスティッチアップリックである．

マトリックスは不飽和ポリエステル樹脂で，複合材の物性，取り扱い性，経済性などの総合的観点から多くの製品で用いられており，風力発電装置の GFRP ブレード用としても早くから適用されてきた．またビニルエステル樹脂は，不飽和ポリエステル樹脂と比較すると延性および接着性が優れることから大型部材用として注目されており<sup>(6)(7)(8)</sup>，本研究では一部の試験材において，強度および破壊形態に及ぼすマトリックス樹脂の影響を比較，追究するために用いた．

### 6.2.2 ガラス繊維基材の構成

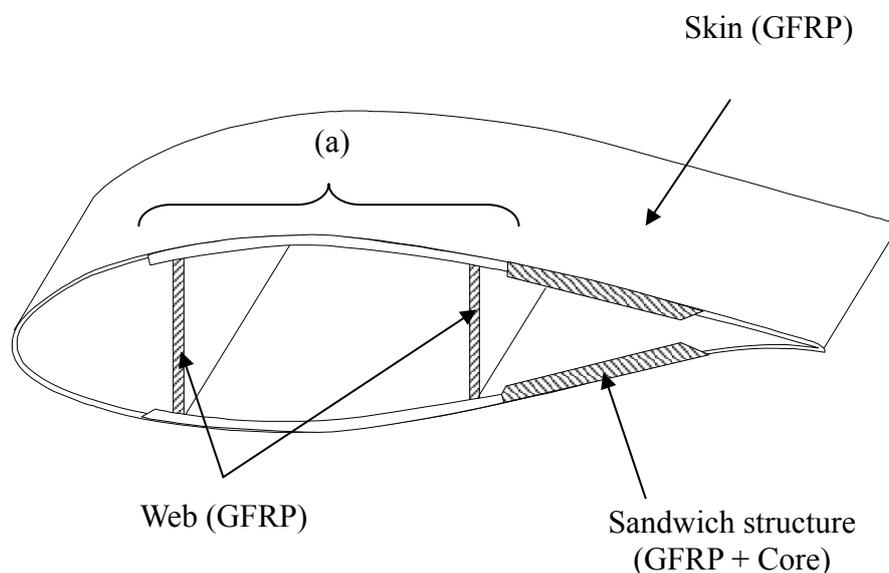
対象とするガラス繊維の積層構成は，風力発電装置用 GFRP ブレードの主要強度部材を対象とした．図 6.1 に小型の 300kW 風力発電装置用 GFRP ブレードの外形と代表的な断面構造例を示す．ブレードは，主桁（メインスパー），外皮（スキン）および硬質ウレタンフォームで構成され，主桁は翼断面中心に位置し荷重を支持する骨組に相当する．外皮は翼型を形成しブレードの空力性能を決める．またウレタンフォームは，外皮と主桁の一体性を高め，かつ座屈強度を向上させるために用いられている．このブレードでは主桁が主要強度部材であり，ガラス繊維の積層構成は平織りロービングクロスとチョップドストランドマットの交互積層である．



**Fig. 6.1 GFRP blades for 300kW wind turbines**

図 6.2 に大型の 1000kW 風力発電装置用 GFRP ブレードの代表的な断面構造例を示す。全体構造は外皮（スキン）と桁（ウェブ）で構成され，軽量化の観点から中空構造となっている。またブレードの長さ方向の曲げ強度および剛性を高めるために，桁間の中央外皮（図 6.2（a）部）は厚肉の GFRP となっている。これ以外の外皮は軽量化のために桁間に比べると薄くなっており，座屈強度を高めるため一部は軽量コア材を挟み込んだサンドイッチ構造としている。桁はブレードの断面形状の保持と，曲げせん断力に対して抵抗力を高めるための役目を果たす。現在，この構造が世界の風力発電装置用 GFRP ブレードの主流である。このブレード構造では中央外皮（図 6.2（a）部）が主要強度部材となり，ガラス繊維の積層構成は一方向のステッチファブリックである。

本研究では，以上のような構造をもつ長さ 12m～45m の 7 種の GFRP ブレードについて，その主要強度部材を対象とした試験板を製作し，機械的特性の評価を行った。



**Fig. 6.2 Cut section of 30m GFRP blades**

### 6.2.3 試験板の製作

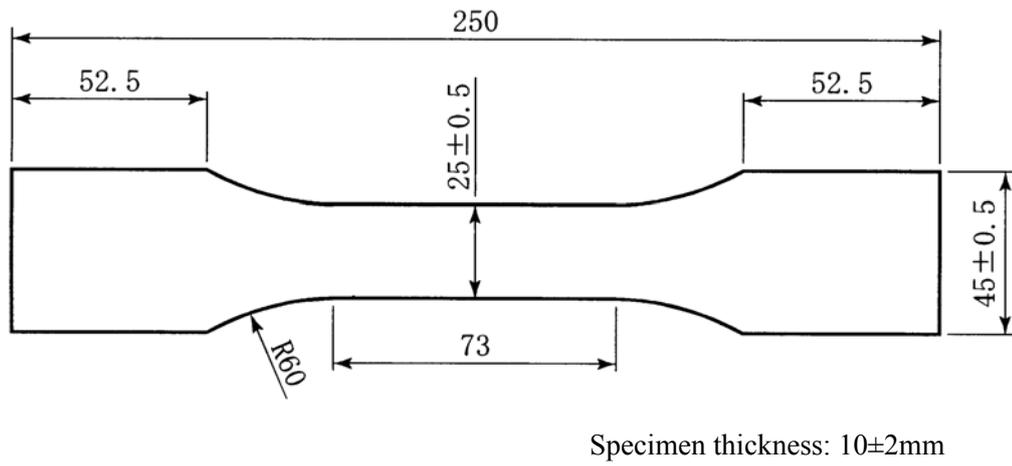
試験板の寸法は，幅 300mm，長さ 600mm，厚さ 10mm とした．成形方法はそれぞれのブレードの製造法とし，長さが 20m 未満のブレード材（12m および 18m ブレード）はゴムローラ含浸法によるハンドレイアップ工法で，これ以上の長さのブレード材は真空含浸工法（VaRTM）である．真空含浸工法は，真空圧を利用して強化繊維基材に樹脂を含浸させる工法であり，ハンドレイアップ工法と比較すると，高い繊維含有量で欠陥が少ない高品質の GFRP を容易かつ安価に成形できる．この成形法は，近年，世界中で注目されており，風力発電装置用 GFRP ブレードにおいてもその適用が拡大している<sup>(9)(10)</sup>．

### 6.2.4 試験方法

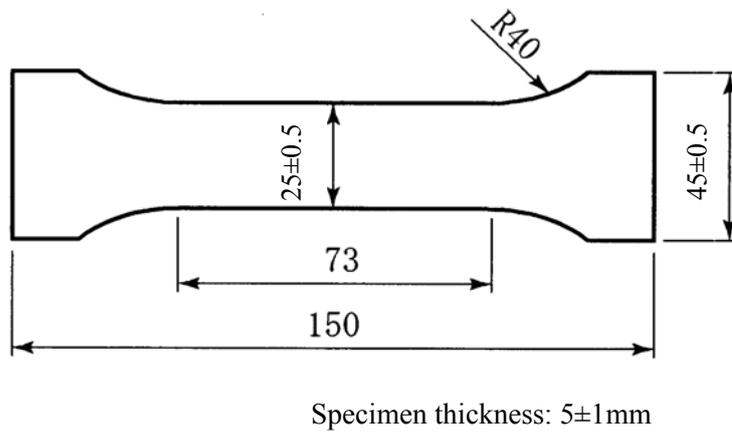
各試験板の物性評価として，ガラス繊維含有量の測定と室温における引張試験を実施した．ガラス繊維含有量の測定は JIS K7052 に準じて焼成法で実施し，重量含有量を算出後に体積含有量（ $V_f$ ）に換算した．引張試験は JIS K7054 に準じて実施した．

また，不飽和ポリエステル樹脂とビニルエステル樹脂のマトリックス樹脂の比較のために圧縮試験を追加した．圧縮試験には様々な方法が提案されているが，ここでは JIS K7018（1999）A 形試験片に準拠した大型試験片と，JIS K7056（1995）に規定する A 形試験片治具を用いた．この圧縮試験法は，表面がジグザグ形状を呈する 2 組の押え治具で試験片を挟み込み，面外座屈を防止しながら荷重を負荷する手法である．図 6.3 に引張試験片の形状を，図 6.4 に圧縮試験片の形状を示す．試験片の板厚は， $10 \pm 2$ mm および  $5 \pm 1$ mm とした．

引張および圧縮試験は，25T インストロン式 1127 型材料試験機で行った．試験機の主な仕様は，試験秤量：250kN，クロスヘッド速度：0.001～500mm/min，クロスヘッド有効ストローク：最大 600mm で，サーボモータ電気機械負荷方式の試験機である．試験荷重の負荷方向は主繊維方向（ $0^\circ$  方向）とし，ひずみの測定は電気抵抗ひずみゲージを試験片の両面に各 1 枚，計 2 枚貼り付けて計測し，その平均値であらわした．ひずみゲージは，有効測定範囲が 5mm の共和電業社製 KFP-5-120-C1-651, 1M2R である．弾性率は，引張および圧縮弾性率ともに，それぞれの応力-ひずみ曲線の原点（0，0）を通る接線の傾きとして算出した．



**Fig. 6.3 Tensile test specimen**

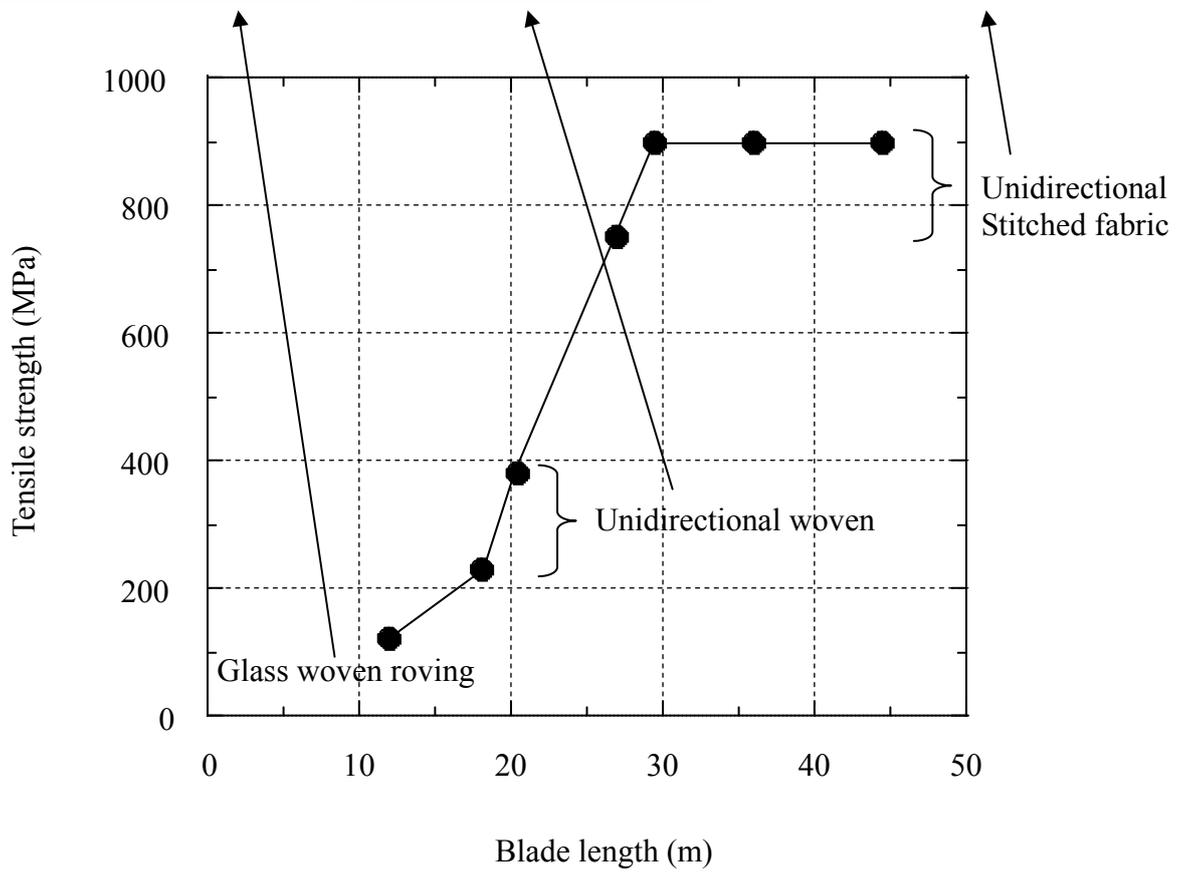
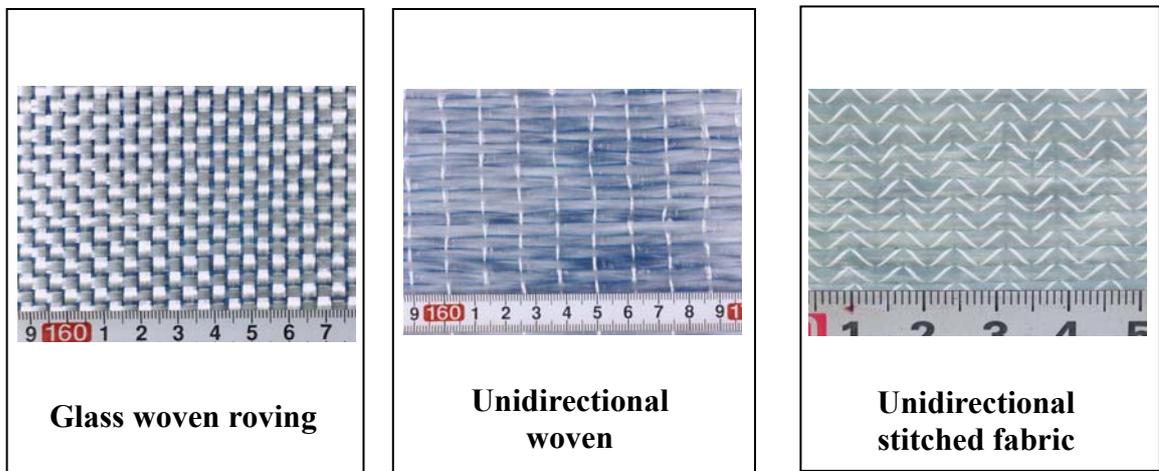


**Fig. 6.4 Compressive test specimen**

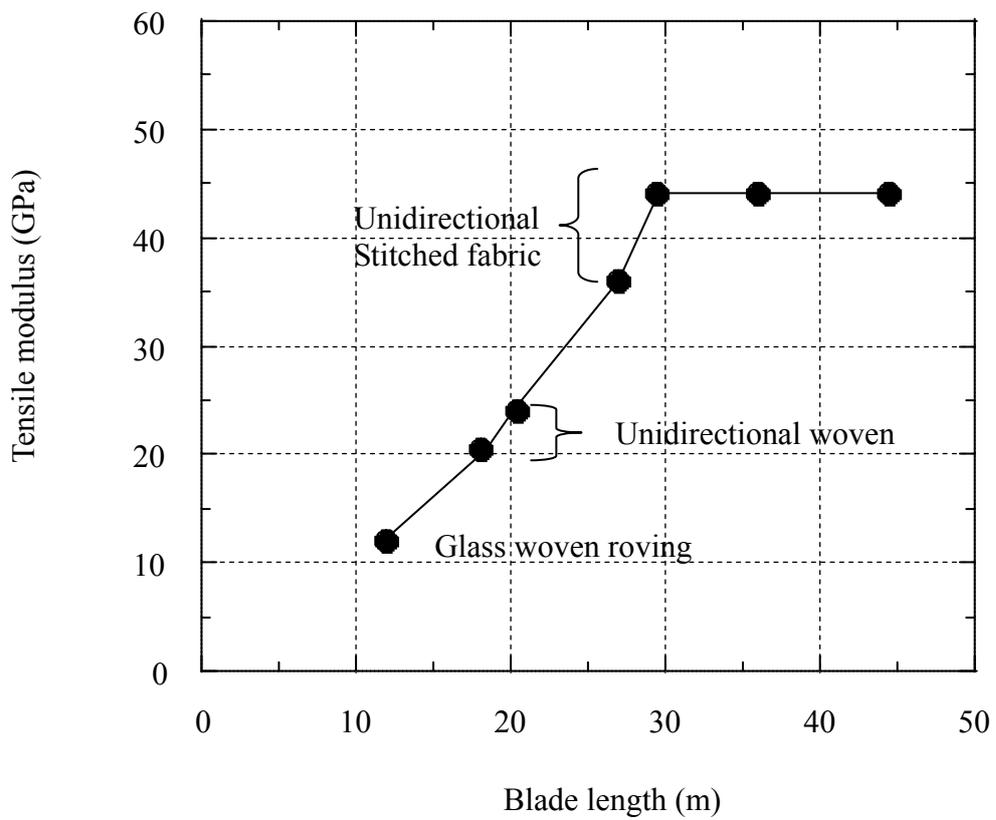
### 6.3 実験結果

図 6.5 および図 6.6 に GFRP の引張強さおよび引張弾性率とブレード長さの関係を示す。図 6.5 には用いられているガラス繊維基材の外観も示した。GFRP の引張強さはブレードが長大化するにともない向上し、長さ 30m を超える大型ブレード材では、約 900Mpa と最も短い 12m ブレード材と比較すると約 9 倍の高い強度を示した。また引張弾性率も同様であり、長さ 30m を超える大型ブレード材では、約 45Gpa と最も短い 12m ブレード材と比較すると約 4 倍の高い値を示した。図 6.7 に  $V_f$  とブレード長さの関係を示す。長さが 20m より短いブレード材は  $V_f$  が 35 %以下と低いが、30m を超える大型ブレード材では約 55%と非常に高い値であった。

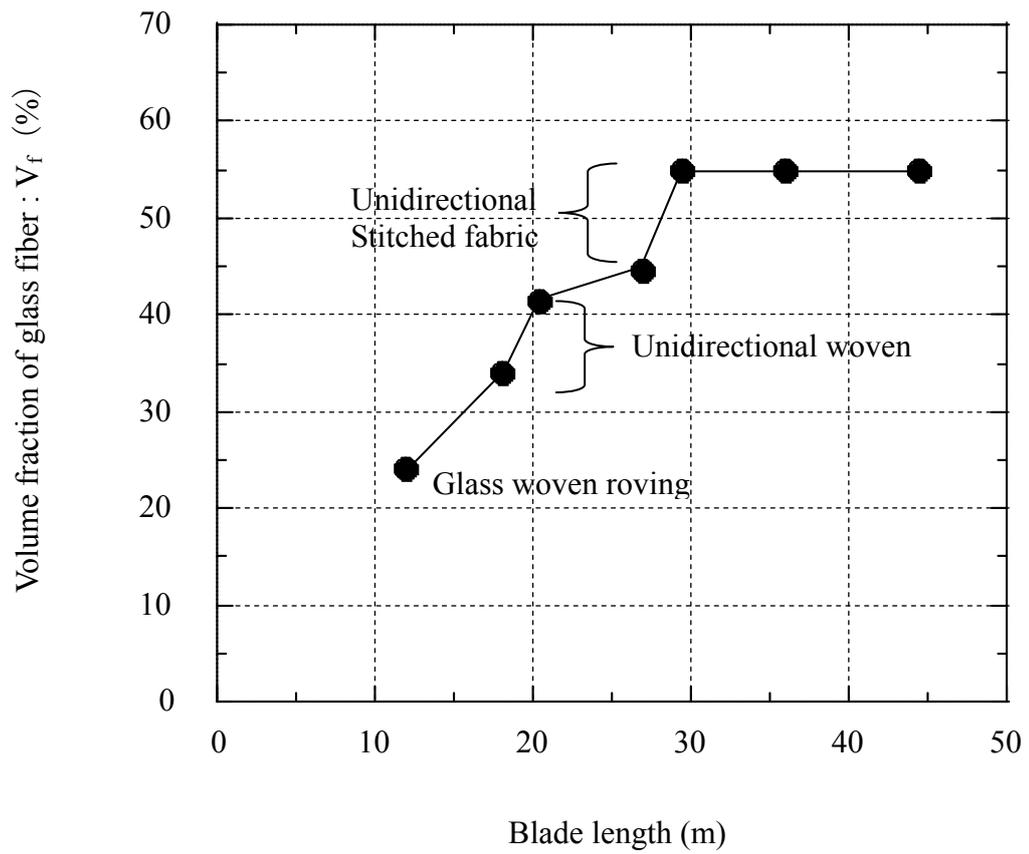
表 6.1 にガラス繊維基材としてロービングクロス (RC) とチョップドストランドマット (CM) を用い、マトリックス樹脂を変えた場合の引張および圧縮強度試験の結果を示す。不飽和ポリエステル樹脂とビニルエステル樹脂のマトリックスの違いによる強度特性についてみると、引張および圧縮弾性率ではほとんど差が認められなかった。一方、引張および圧縮強さでは、わずかではあるがビニルエステル樹脂をマトリックスとした GFRP が高い値を示した。第 2 章でも、マトリックス樹脂の影響は特に圧縮強度に対してあらわれることを述べたが、本章ではその理由を破壊形態から追求した。



**Fig.6.5 Relation between tensile strength and blade length**



**Fig.6.6 Relation between tensile modulus and blade length**



**Fig.6.7 Relation between volume fractions of glass fiber and blade length**

**Table 6.1 Result of tensile and compressive test**

Resin	Glass fiber fabric	Tensile test		Compressive test		Volume fraction of glass fiber $V_f$ (%)
		Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Compressive strength (MPa)	Compressive modulus (GPa)	
Unsaturated polyester resin	RC	304	22.5	238	23.1	44.7
		305	22.1	235	22.7	
	CM+RC (Alternate lay-up)	187	16.5	217	16.6	33.6
		219	16.2	211	16.9	
Vinyl ester resin	RC	317	22.2	268	22.1	43.7
		296	21.7	245	22.4	
	CM+RC (Alternate lay-up)	246	16.2	226	16.8	35.4
		222	15.5	230	17.1	

RC: Roving cross, CM: Chopped strand mats

## 6.4 考 察

### 6.4.1 GFRP 翼の長さ と 機械的性質

図 6.5 および図 6.6 に示したように、ブレードが長大化するにともない、用いられている GFRP の引張強さおよび引張弾性率はともに大きく向上している。この理由は次のように考えられる。

まず 12m ブレード材と 18m および 20m ブレード材の大きな違いは、一方向クロスの使用にある。一方向クロスはガラスロービングを用いた織物基材であるが、ロービング（繊維束）を特定の方向に多く配置したもので、通常の平織りロービングクロスと比較するとガラス繊維のうねりが少ない基材である。したがって、必要な方向に多くの繊維を配することができ、さらにガラス繊維の直進性が良いことから、繊維の強度特性を有効に引き出すことができる。また繊維含有量が増加することから機械的特性の向上も期待できる。このことは図 6.7 に示したように、同じ製造法（ハンドレイアップ工法）で同じ形態の織物基材（Woven）を用いているにもかかわらず、12m ブレード材よりも 18m ブレード材の繊維含有量が大きく増加していることから推察できる。また長さ 20m 以上のブレードでは、製造法として真空含浸工法を採用している。この製造法は、真空圧を利用して強化繊維基材に樹脂を含浸させる工法であり、ハンドレイアップ工法と比較すると、高い繊維含有量で欠陥が少ない高品質の GFRP が製作できる。したがって 18m ブレード材と 20m ブレード材の強度特性の差は、真空含浸工法の適用による繊維含有量の増大が寄与していると考えられる。

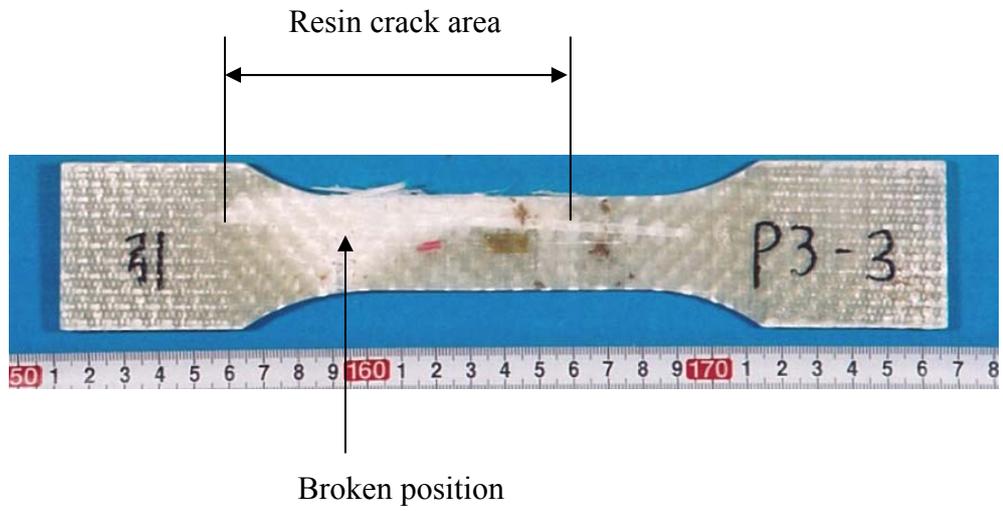
次に、20m ブレード材とこれを超える長さの 27～45m ブレード材の大きな違いは、スティッチファブリックの採用にある。スティッチファブリックは、これまでも述べたようにロービング（繊維束）を任意の方向に配した後、ポリエステルなどの別の細い編糸で固定した織物基材である。この方法によれば、ガラス繊維のうねりが少なく、均一でかつ複数の層を有する織物（多層基材）が容易に製造できる<sup>(1)(11)</sup>。第 4 章においてスティッチファブリックを用いた GFRP は、ロービングクロス強化 GFRP と比較して引張および圧縮強さが優れていることが示されたが、風力発電装置用の実機ブレード材においてもその優れた特性が証明された。スティッチファブリックを用いた GFRP が優れた強度特性を発揮することは、他にも多くの文献で報告されている<sup>(12)(13)(14)</sup>。スティッチファブリックは、今後、風力発電装置用の大型 GFRP ブレードにおいて主要な強化基材になると考える。

#### 6.4.2 GFRP の破壊形態に及ぼすマトリックス樹脂の影響

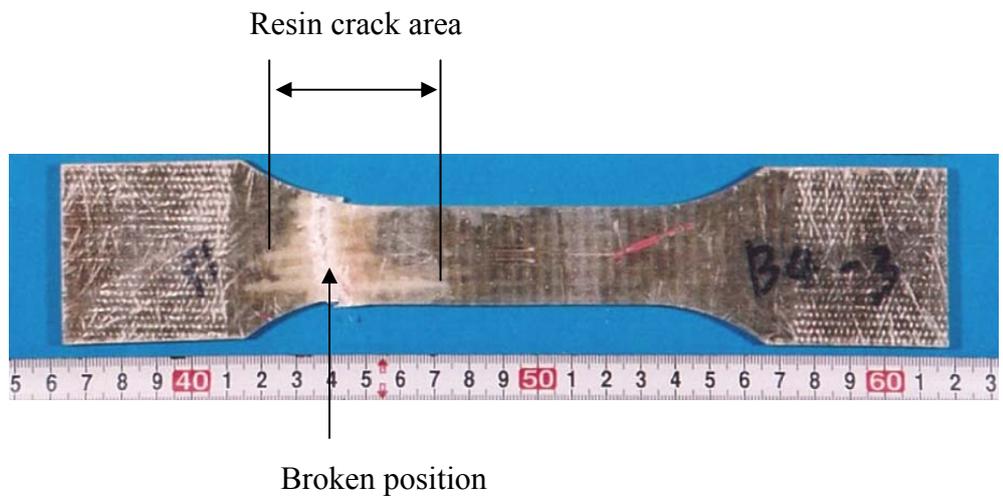
表 6.1 に示したようにマトリックス樹脂の違いによる GFRP の強度特性の違いは，引張および圧縮弾性率では認められなかったが，引張および圧縮強さでは，僅かではあるがビニルエステル樹脂をマトリックスとした GFRP が高い値を示した．ビニルエステル樹脂はエポキシ樹脂とアクリル酸との反応生成樹脂で，耐食性，接着性に優れ，機械性質的には延性および耐衝撃性に優れている．これまでの章で述べてきたように，GFRP の強度特性は基本的にはガラス繊維の含有量に大きく依存するが，引張および圧縮強さについては，これに加えてマトリックス樹脂の特性も影響すると考える．

図 6.8 に引張試験後の試験片の外観を示す．最終破断部の近傍において，不飽和ポリエステル樹脂をマトリックスとした GFRP の方が，ビニルエステル樹脂をマトリックスとするそれよりも樹脂の微細き裂の発生範囲（白色部）が広いことがわかる．これはマトリックス樹脂の延性と，樹脂と繊維間の接着強さの違いが影響したものと考える．一般にビニルエステル樹脂の引張破断伸びは 3.0～5.0% であるが，不飽和ポリエステル樹脂の破断伸びは，その半分の 1.5～2.5% で脆くかつ接着力も小さい<sup>(15)</sup>．従って不飽和ポリエステル樹脂をマトリックスとした GFRP では，最終破断時の主き裂の周囲において，樹脂の副き裂（微細き裂）が多くかつ広範囲に発生すると推察される．

同様に図 6.9 および図 6.10 に圧縮試験後の試験片の破断状況を示す．不飽和ポリエステル樹脂をマトリックスとする GFRP (図 6.9) は，破壊時の層間剥離が広範囲に発生しており，剥離範囲はビニルエステル樹脂をマトリックスとする GFRP (図 6.10) と比較すると 3 倍ほど広い結果となった．これも前述の引張破断片と同様に，樹脂と繊維間の接着強さの違いが顕著にあらわれた結果と考えられる．ビニルエステル樹脂と比較して，不飽和ポリエステル樹脂をマトリックスとする GFRP の強度が低くなる要因の 1 つには，樹脂の延性や接着力が小さいことがあげられるが，この影響を受ける層間剥離の発生範囲の違いをマクロ的な観察から明らかにすることができた．なお弾性率は，応力-ひずみ曲線の原点を通る接線の傾きとして算出される荷重負荷初期の特性であることから，破壊の最終段階に近い所で発生する層間剥離との関連性はなく，従って樹脂の違いによる弾性率の差はあらわれなかったと考える．

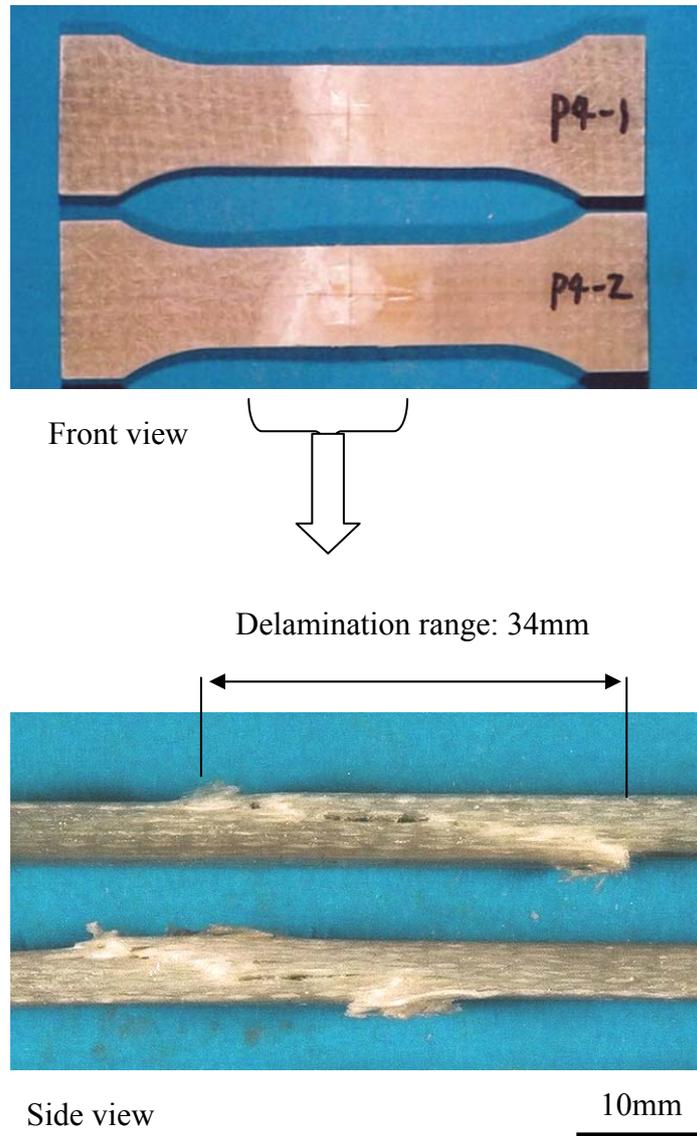


(a) Unsaturated polyester resin GFRP

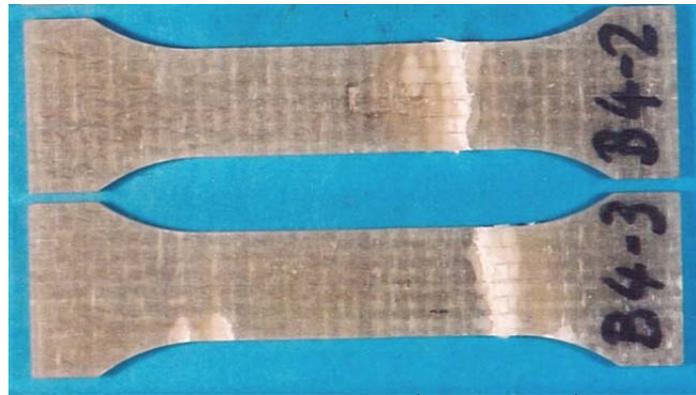


(b) Vinyl ester resin GFRP

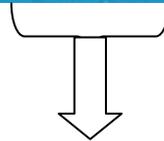
**Fig.6.8 Situation of specimen after tensile test  
(CM+RC : Alternate lay-up)**



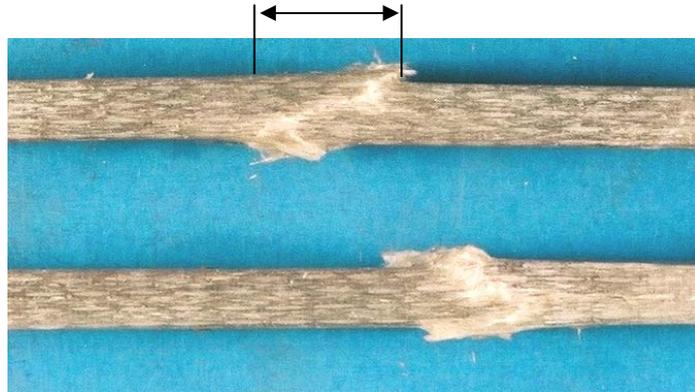
**Fig.6.9 Situation of specimen after compressive test  
(Unsaturated polyester resin / CM+RC : Alternate lay-up)**



Front view



Delamination range: 12mm



Side view

10mm

**Fig.6.10 Situation of specimen after compressive test  
(Vinyl ester resin / CM+RC : Alternate lay-up)**

## 6.5 結 言

本章では，大型 GFRP 部材の 1 例として風力発電装置のブレードを例にとり，適用されているガラス繊維基材およびマトリックス樹脂と GFRP の機械的性質を調査しその関連性を考察するとともに，破壊形態に及ぼすマトリックス樹脂の影響について追究した．得られた結果は以下の通りである．

- (1) 風力発電装置用ブレードの GFRP 素材は，ブレードが長大化するにともないより高い強度のものとなり，長さ 30m を超える大型ブレード材では，引張強さは約 900Mpa，引張弾性率は約 45Gpa を示した．この値は，小型の 12m ブレード材と比較すると，それぞれ約 9 倍および約 4 倍の非常に高い値である．
- (2) 高強度化の理由の 1 つは，一方向クロスの適用がある．一方向クロスは必要な方向に多くの繊維を配することができ，さらにガラス繊維の直進性に優れることから，一般的なローピングクロスと比較すると繊維の強度特性を有効に引き出すことができる．また繊維含有量も増大することから機械的性質が向上する．
- (3) 高強度化のもう 1 つの理由は，ステッチファブリックの適用である．第 4 章において，ステッチファブリックを用いた GFRP は引張および圧縮特性が優れていることが示されたが，風力発電装置用の実機ブレード材においてもその優れた特性が証明された．ステッチファブリックは，今後，風力発電装置用の大型 GFRP ブレードにおいて主要な強化基材になると考えられる．
- (4) 不飽和ポリエステル樹脂をマトリックスとする GFRP は，ビニルエステル樹脂をマトリックスとする GFRP と比較して，引張および圧縮強さが低く，破壊の際の樹脂き裂の発生範囲が広いことがわかった．この要因の 1 つには，不飽和ポリエステル樹脂の方が破断伸びおよび接着力が小さいことがあげられる．

## 参考文献

- (1) 強化プラスチック協会, FRP50年の歩み (FRP年表), (2005), pp. 275-345.
- (2) Arakawa, C, Wind Power, Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 109, No. 1052 (2006), pp. 549-552.
- (3) Ueda, Y, Shibata, M, Development of Next Generation 2MW Class Large Wind Turbines, Mitsubishi Juko Giho, Vol. 41, No. 5, (2004), pp. 294-297.
- (4) 藤川卓爾, 岩崎信顕, 勝呂幸男, 岩永洋一, 柴田昌明, 三菱高性能大形風力発電設備, 三菱重工技報, vol. 39, No. 3, (2002), pp. 140-143.
- (5) M. George, Composites help improve wind turbine blade, Reinforced plastics, (2005), pp. 18-21.
- (6) The Japan Reinforced Plastics Society, FRP structure design handbook, (1994), pp. 12-20.
- (7) 栗原福次, 大石不二夫, 活用ガイド高分子材料, オーム社, 第1版第13刷, (1984), pp. 129-141.
- (8) 松崎昭二, ビニルエステル樹脂, 化学工業日報社, 初版1刷, (1993), pp. 32-33.
- (9) 川節望, 田北勝彦, 風力発電装置用複合材ブレード, FRP50年の歩み, 強化プラスチック協会, (2005), pp. 215-219.
- (10) 川節望, 新藤健太郎, 田北勝彦, 加藤英司, 風力発電装置用大型 FRP ブレード, 強化プラスチック, vol. 51, No. 10, (2005), pp. 18-23.
- (11) A. P. Mouritz, B. N. Cox, A mechanistic approach to the properties of stitched laminates, Composites, Part A31, (2000), pp. 1-27.
- (12) 川節望, 新藤健太郎, 田北勝彦, ステッチ強化基材を用いた樹脂系複合材の強度特性, 日本機械学会 2005年度年次大会講演論文集(1), No. 5-1, (2005), pp. 587-588.
- (13) 石田彪, 新世紀型強化材ニットファブリック, 繊維機械学会誌, vol. 57, No. 8, (2004), pp. 316-324.
- (14) 田淵賢, 斯波哉, 及川由紀, 天野晋武, 後藤卒土民, 宮入裕夫, 新しい形態のガラス繊維強化材を用いた FRP の機械的性能について, 強化プラスチック協会 45<sup>th</sup> CON-EX 講演会要旨集, (2000), pp. B-26/1-26/2.
- (15) The Japan Reinforced Plastics Society, FRP structure design handbook, (1994), pp. 16-17.

## 第 7 章 風力発電装置用ガラス繊維強化プラスチック大型翼の 素材および製造法の検討と実用化

### 7.1 緒言

第 2 章および第 3 章において，一般的なガラスクロス繊維を強化材とした GFRP の引張および圧縮特性に及ぼす繊維構成の影響と微視的疲労損傷について述べ，第 4 章および第 5 章では，ステッチ繊維を用いた GFRP の引張および圧縮特性に及ぼす繊維構成の影響と，静的強度および疲労強さに及ぼすマトリックス樹脂の影響について論じた．また 6 章では，大型 GFRP 部材の 1 例として風力発電装置のブレードを例にとり，適用されているガラス繊維基材およびマトリックス樹脂と GFRP の機械的性質の関連性について述べた．その結果，GFRP の強度特性はガラス繊維含有量と繊維のうねりに大きく影響を受けること，また疲労強さはこれに加えてマトリックス樹脂の影響も受けることが明らかになった．さらに，繊維のうねりが小さいステッチファブリックを用いた GFRP は引張および圧縮特性が優れていることが示され，今後，大型 GFRP 構造部材において主要な強化基材になると述べた．

本章では，GFRP 構造部材として早くから実用化され，最近，急速に大型化している風力発電装置用のブレードについて，前章までの成果を踏まえながら素材および製造法の現状と課題について論じるとともに，GFRP ブレードの構造と強度検証について述べる．

## 7.2 大型 GFRP 翼の素材

風力発電装置用の GFRP ブレードは、これまでは船舶や建築部材において多くの実用実績がある素材の組み合わせで、設計、製造されてきた。強化基材は、一般的なロービングクロスとチョップドストランドマットで、マトリックス樹脂は不飽和ポリエステル樹脂が主体である。この組み合わせとする理由は、素材の取り扱い易さとコストにある。ところがブレードの大型化にともない、圧縮強さや疲労強さを向上させる必要性が生じ、大型で軽量のブレードに適した強化繊維とマトリックス樹脂の選定および組み合わせの最適化が必要になってきた。そこで、風力発電装置用の大型ブレードに適する高強度 GFRP を対象とし、強化繊維とマトリックス樹脂の選定に対する考え方について述べる。

### 7.2.1 強化繊維

ロービングクロスは、樹脂含浸性に優れており裁断も容易であることから、従来から GFRP 用の強化基材として多用されてきた。しかしながら繊維束自体を編み込んで織物を形成するため、繊維のうねりや樹脂を含浸させた際に樹脂溜まりとなる隙間が多く発生し、これが GFRP の材料特性向上の妨げになっている。このことは第 4 章でも述べたが、引張強さおよび圧縮強さに対しては影響が大きくあらわれる。

一方、ガラスロービングなどの繊維束を任意の方向に配した後、ポリエステル繊維などの別の細かい編糸で固定したステッチファブリックは、繊維のうねりが少なく、均一でかつ複数の層を有する多層織物が容易に製造できる<sup>(1)(2)</sup>。ステッチファブリックを用いた GFRP は、優れた強度特性を発揮することが既に多くの文献でも報告されており<sup>(3)(4)(5)</sup>、本論文の第 4 章および第 5 章においても、その優れた特性が明らかになった。ステッチファブリックは、今後、風力発電装置用の大型 FRP ブレードにおいて主要な強化基材になると考える。なおガラス繊維単独のステッチファブリックは、引張および圧縮強さの向上に対しては効果が期待できるが、弾性率に対しては大きな効果は期待できない。弾性率を向上させるためには、たとえばカーボン繊維などの高強度・高弾性繊維とガラス繊維を混合したハイブリッドのステッチファブリックが有効と考えられるが、コストとのバランスを考慮しながら適材適所で適用を進める必要がある。

### 7.2.2 マトリックス樹脂

繊維強化プラスチック用のマトリックス樹脂としては、生産量、経済性、適用実績などの観点から、主に不飽和ポリエステル樹脂、ビニルエステル樹脂およびエポキシ樹脂が使用されている。この中で不飽和ポリエステル樹脂は、安価でガラス基材への含浸がしやすく取り扱いやすいため、早くから船舶部材や建材などに使われてきたが、引張破断伸びが小さく脆い、接着力が小さい、硬化収縮が大きい等の課題がある。一方、エポキシ樹脂は、価格は高いが硬化収縮が小さく寸法安定性に優れ、かつ延性が良好で接着力も優れた高性能樹脂である。ビニルエステル樹脂は、不飽和ポリエステル樹脂とエポキシ樹脂の中間の性質を有し、不飽和ポリエステル樹脂よりも少し高価ではあるが、接着力および延性は優れている樹脂である。また耐薬品性も優れており、近年、耐食用途の GFRP 用マトリックス樹脂として需要が急増している<sup>(6)(7)(8)</sup>。繊維強化プラスチックの強度特性を向上させる手段としては、ガラス繊維含有量の増大が最も確実な手段ではあるが、マトリックス樹脂の選定も非常に重要と考える。引張破断伸びが大きく、接着力が高いビニルエステル樹脂およびエポキシ樹脂は、高性能 GFRP の樹脂として有望である。

GFRP の強度特性において、マトリックス樹脂の影響が大きくあらわれる物性の 1 つに疲労強さがある。GFRP の疲労現象は、その初期段階では荷重負荷方向に対し直角方向に微細な樹脂き裂（トランスバースクラック）が発生し、この微細き裂が徐々に増加して最終破断に至る<sup>(5)(9)(10)</sup>。樹脂の引張破断伸びは、一般にエポキシ樹脂 > ビニルエステル樹脂 > 不飽和ポリエステル樹脂の順に大きい値を示す。疲労によるトランスバースクラックは、延性が優れている（破断伸びが大きい）マトリックス樹脂ほど発生しにくいと考えられることから、この順で疲労強さが優れていることが推察できる。

また接着強さも、エポキシ樹脂 > ビニルエステル樹脂 > 不飽和ポリエステル樹脂の順に大きい値を示し、特にエポキシ樹脂は非常に優れた接着特性を有している。エポキシ樹脂が、種々の材料の 2 次接着剤として多用される理由はここにあり、GFRP の特性としてもガラス繊維との接着強さが大きい樹脂ほど優れていると考える。

GFRP の静的強度および疲労強さに及ぼすマトリックス樹脂の影響については第 5 章でも論じたが、強化繊維とマトリックス樹脂を目的に合わせて選定し、織物形態や積層構成などの組み合わせを最適化することで、風力発電装置用大型ブレードの軽量化と品質向上に、さらに貢献する高性能 GFRP の提供は十分に可能と考える。なお、

当然のことであるがコストと性能のバランスをしっかりと見極めることも重要である。

### 7.3 大型 GFRP 翼の製造法

GFRP の製造法は、加圧方法によって無加圧成形法、低加圧成形法、中高加圧成形法および真空成形法の 4 つに分けられる<sup>(11)(12)</sup>。ハンドレイアップ工法は無加圧成形法の代表的な工法で、設備投資が最小限にできることから船舶、建築部材、プラント構造材などの多くの製品に使用されてきた<sup>(13)(14)</sup>。一方、航空および宇宙機器を中心に高強度、高品質 GFRP の製法として拡大したオートクレーブ工法は、中高加圧成形法の 1 種で、作業環境が良く高強度部材の製造が可能である反面、大型の加熱設備が必要で作業工程が複雑となり、製造コストが高いという欠点がある。これらの中間的な位置にあるのが真空含浸工法である。本製法は真空成形法の 1 種で、バータム (VaRTM: Vacuum assisted Resin Transfer Molding) と呼ばれており、真空負圧による吸引で樹脂を含浸させる方法である<sup>(15)(16)</sup>。高強度で高品質の大型 GFRP 部材が低コストで製造でき、かつ作業環境も良いというメリットがあり、船舶構造や建築部材、自動車業界を中心に適用が急拡大している<sup>(4)(17)(18)(19)</sup>。

これまで GFRP ブレードの製造法は、成形の容易さおよびコストの安さから、主にハンドレイアップ工法やテープワインディング工法が採用されており、一部には大幅な軽量化を図る目的から、航空宇宙機器で適用されているプリプレグ素材を用いた成形法 (真空 + 加熱成形) もある。主流はコストの観点からハンドレイアップ工法であるが、近年、大規模な設備投資が不要で、かつ大型品の製造が高品質で安価にできる真空含浸工法の採用が急速に拡大している<sup>(20)(21)(22)</sup>。

図 7.1 にハンドレイアップ工法による GFRP ブレードの製造状況を示す。長さ 20m 以下の小型ブレードは、コスト優先の観点からハンドレイアップ工法で製造されることが多い。一方、長さが 20m を超える大型ブレードでは、高い素材強度と安定した品質および広い面積と厚肉の GFRP 製造が求められるため、ハンドレイアップ工法からプリプレグ工法または真空含浸工法に移行しつつある。ハンドレイアップ工法は、個々の作業員により樹脂の含浸状態が異なってくるため、繊維含有量および気泡欠陥のばらつきは避けられない。また大型部材になるほど多くの作業員が必要となり、ばらつき要因はさらに拡大し作業工数 (コスト) も増大する。ハンドレイアップ

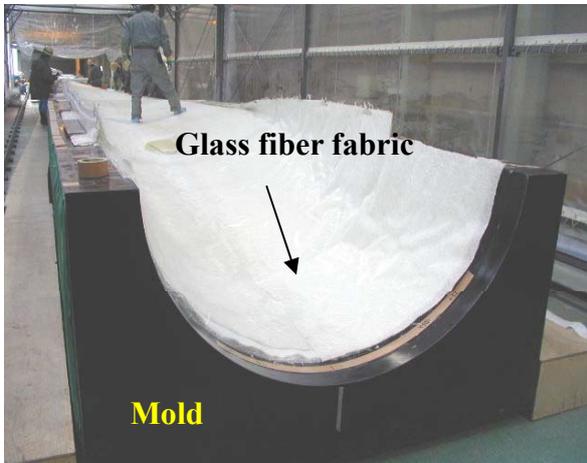
工法は，初期の設備投資は最小限に抑えられるが，製造物の大きさがある範囲を超えると，品質およびコストの両面で課題が顕在化すると考える．



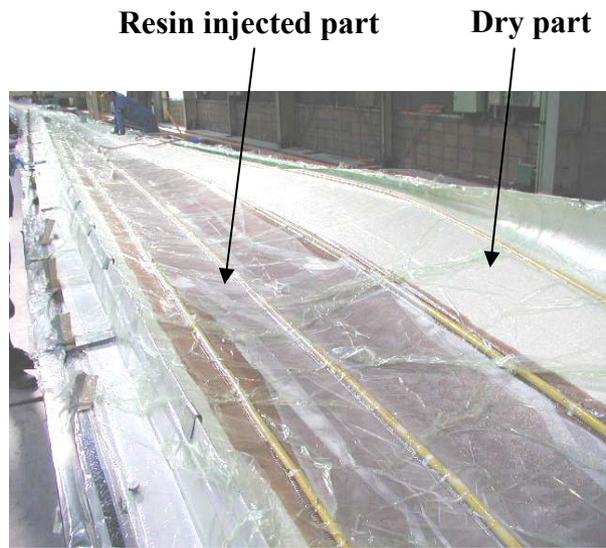
**Fig.7.1 GFRP blade production by hand lay-up method**

図 7.2 に真空含浸工法を用いた大型 GFRP ブレードの製造状況を示す<sup>(23)</sup>。成形工程は、まずブレードのプロファイルを決める外皮成形型の上にガラス繊維基材を積層し、樹脂注入口および真空吸引口を設置後にナイロンフィルム製のバキュームバッグでバギングする。この時、ガラス繊維基材とバキュームバッグの間には、樹脂を拡散しやすくするための多孔質フィルム（パスメディア）と、離型層（ピールプライ）を挿入する。バギングが完了後、真空吸引を開始し目標とする真空度まで到達したところで、樹脂注入ポートを開放して樹脂を繊維全体に含浸させる。樹脂の含浸と硬化が完了した後、成形型から脱型して GFRP ブレードの外皮が完成する。

この工法は、ハンドレイアップ工法と比較すると、繊維含有量が高く欠陥が少ない高品質の GFRP ブレードを容易かつ安価に成形できる。また大型・厚肉部材の成形が容易で、かつクローズド成形となるため作業環境（低臭気）の観点からも好ましく、世界中で注目されている<sup>(23)(24)</sup>。全長 30m を超える大型ブレードは、翼根近傍の板厚が 100mm を超え GFRP としては他に例をみない超厚物部材であるが、真空含浸工法を用いることにより 1 回の樹脂含浸工程で容易に製造できるようになった。真空含浸工法の課題としては、GFRP 成形後に不要（廃棄物）となる真空バッグフィルムやシールテープなどの副資材の削減や、繊維積層時のシワ発生防止（繊維うねりの低減）および薄板部と厚板部の繊維含有量の均一化などがあげられる。



(a)  
Lay-down glass fiber fabric on the mold



(b)  
Resin infusion after vacuum bag



(c)  
After re-mold



(d)  
Finished product

Fig.7.2 GFRP blade production by VaRTM

#### 7.4 大型 GFRP 翼の製造法と材料特性および内部組織の関係

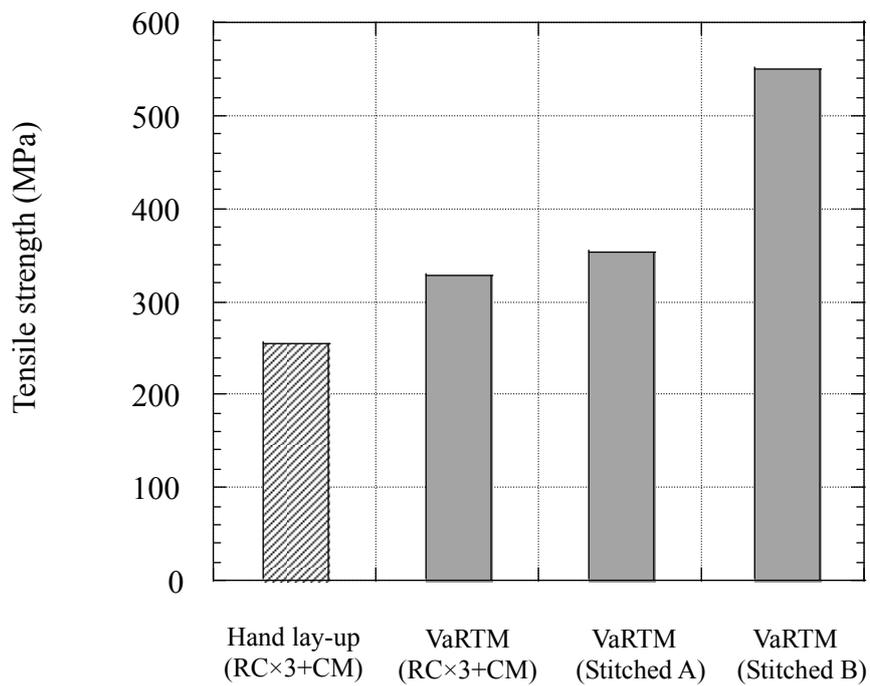
風力発電装置用の大型 GFRP ブレードは、例えば 1000kW クラスの場合、長さ：約 30m、最大幅：約 2.5m、重さ：約 4000kg になる。また板厚は、ブレードの先端では 10mm 以下であるが、翼根部では 100mm を超え GFRP としては超厚板構造体になる。このため通常のハンドレイアップ工法では、繊維積層＋樹脂含浸＋硬化の製造サイクルを複数回繰り返す必要があり製造工数が膨大になる。また、繊維含有量のばらつきや気泡の混入、硬化収縮による層間割れなどの FRP 特有の欠陥が発生し、品質の低下が課題となる。一方、真空含浸工法によれば、大面積で厚肉の GFRP 構造体を 1 サイクルの工程（繊維積層＋樹脂含浸＋硬化）で製造でき、かつ気泡の混入や層間割れなどの欠陥の発生も少なくなる。

そこで、大型 GFRP ブレードの製造法と材料特性および内部組織の関係を把握する目的から、300kW～1000kW の風力発電装置用 GFRP ブレード（長さ：12m～30m）の素材で、表 7.1 に示す組み合わせの試験板を製作して引張試験および内部組織観察を行った。試験板の寸法は、幅 300mm、長さ 600mm、厚さ 10mm とした。また製造法は、ゴムローラ含浸法によるハンドレイアップ工法と真空含浸工法とし、ガラス繊維基材の積層構成は 580g/m<sup>2</sup> のロービングクロス (RC) と 450g/m<sup>2</sup> のチョップドストランドマット (CM) を組み合わせた積層材 (RC×3+CM の繰り返し) のほか、ステッチファブリックの 2 種類である。ステッチファブリックの 1 つは、950g/m<sup>2</sup> のロービングクロス (RC) と 300g/m<sup>2</sup> のチョップドストランドマット (CM) が一体となった基材 (A)、もう 1 つは 0°、+45°、-45° 方向および CM の 4 層が、それぞれ 880、520、520、200g/m<sup>2</sup> で一体となった多層のステッチファブリック (B) である。なおステッチファブリックは、織物自体の厚みが厚く織目が詰まっているため、ハンドレイアップ工法による樹脂含浸は非常に困難であり、よって真空含浸工法のみでの試験板とした。

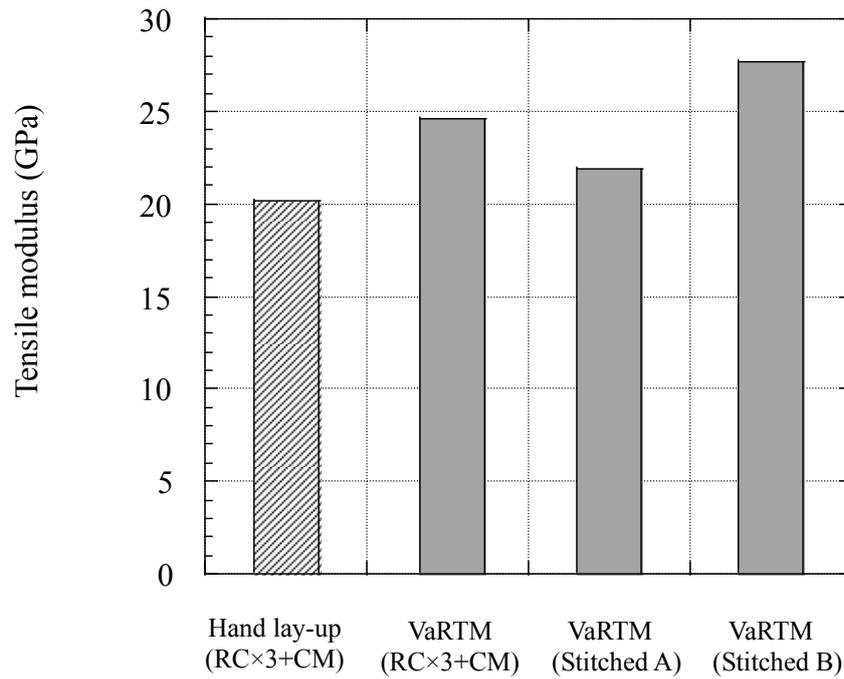
図 7.3 および図 7.4 に各試験材の引張強さと引張弾性率の平均値を示す。RC と CM を組み合わせた積層材 (Woven fabric: RC×3+CM) で比較すると、真空含浸材はハンドレイアップ材に対して引張強さで約 30%、引張弾性率で約 22%程度高いことがわかる。図 7.5 にガラス繊維体積含有量 ( $V_f$ ) の比較を示す。 $V_f$  についても引張特性と同様に、真空含浸材はハンドレイアップ材に対し 10%程度高い値を示した。

**Table 7.1 Combination of glass fabric**

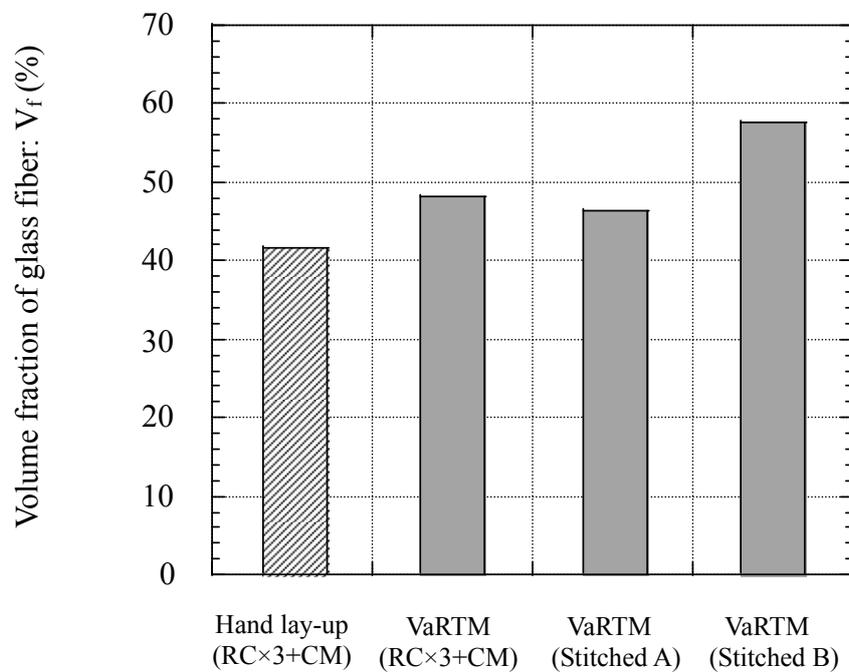
Manufacturing method	Woven fabric (RC×3+CM)	Stitched fabric (A)	Stitched fabric (B)
Hand lay-up	○	-	-
VaRTM	○	○	○



**Fig.7.3 Comparison of tensile strength (Mean value)**

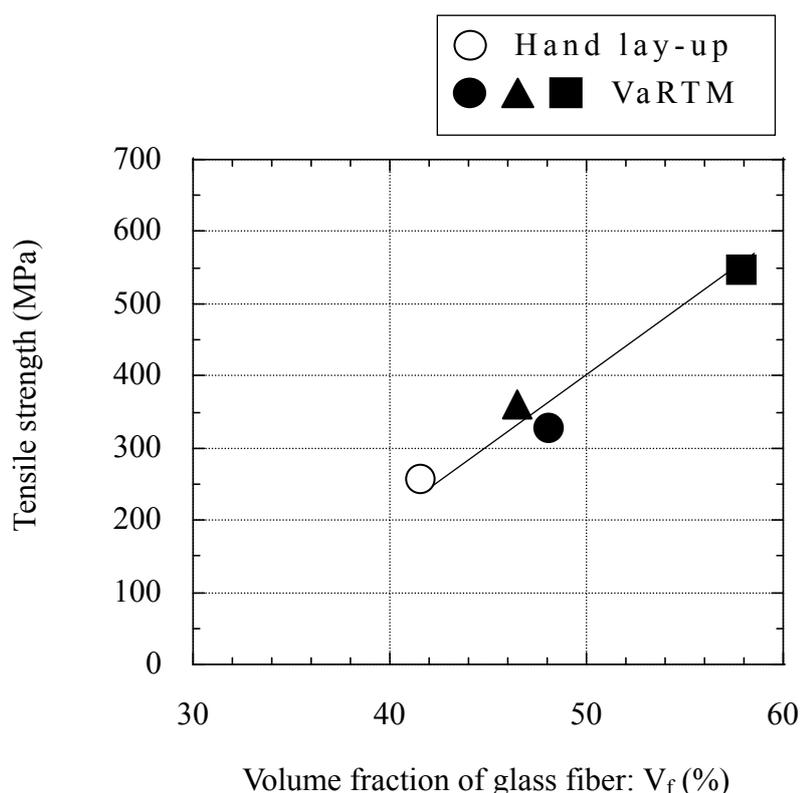


**Fig.7.4 Comparison of tensile modulus (Mean value)**

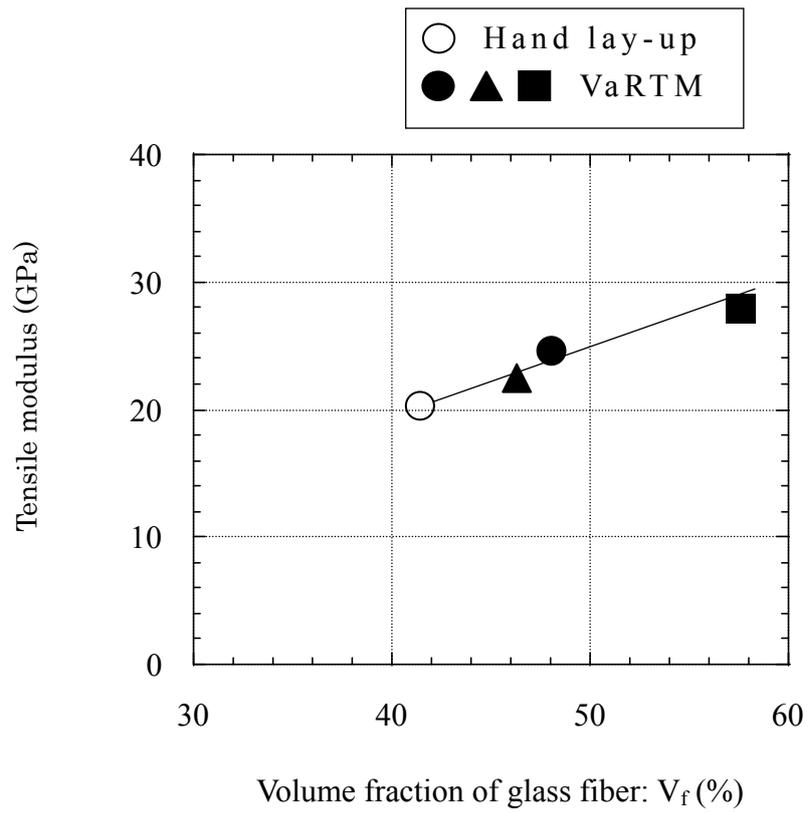


**Fig.7.5 Comparison of volume fraction of glass fiber**

図 7.6 に引張強さと  $V_f$  の関係を，図 7.7 に引張弾性率と  $V_f$  の関係を示す。 $V_f$  で整理すると，引張強さおよび引張弾性率のいずれも，ハンドレイアップ材（○）と真空含浸材（●：Woven fabric，▲：Stitched fabric(A)，■：Stitched fabric(B)) に関係なく，ほぼ比例関係にある．第 2 章および第 4 章において，GFRP の引張特性はマトリックス樹脂よりも繊維含有量に大きく依存することを述べた．この現象は製造法に関係なく当てはまり，真空含浸工法によれば，高い繊維含有量で強度特性が優れる GFRP の成形が可能であることを，風力発電装置用 GFRP ブレードの素材でも確認できた．なお図 7.6 において，▲印と●印で同じ真空含浸工法であるにもかかわらず  $V_f$  と引張強さの大小関係が逆転しているが，これはガラス繊維基材の形態が関係しており，繊維うねりが少ないステッチファブリックを用いた▲印の GFRP が高い引張強さを示す結果になったと考える．第 4 章において強化基材の繊維うねりの影響は，弾性率よりも破壊強さに大きな影響を与えることを述べたが，本章でも同じ結果が得られた．



**Fig.7.6 Relation between tensile modulus and volume fraction of glass fiber**



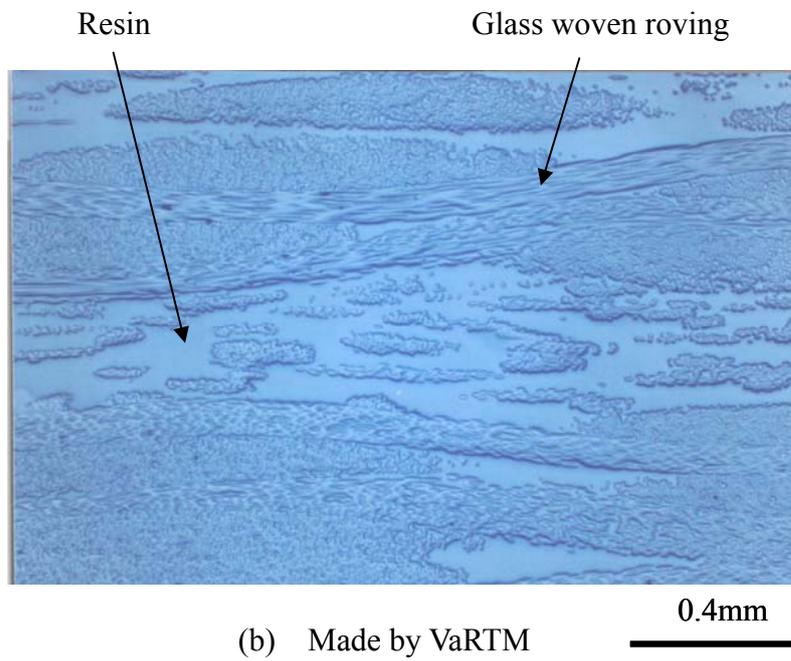
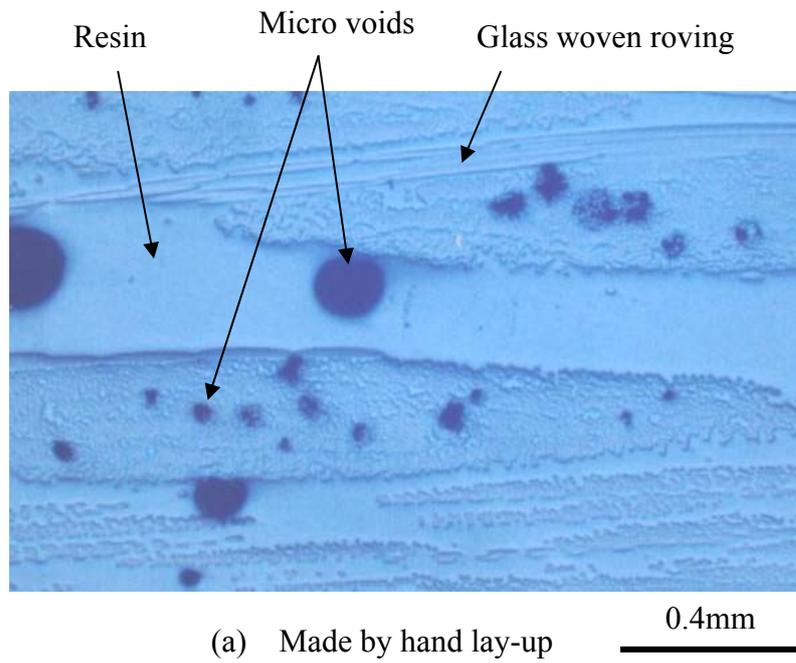
**Fig.7.7 Relation between tensile strength and volume fraction of glass fiber**

図 7.8 に RC と CM を組み合わせた GFRP (Woven fabric: RC×3+CM) の断面マイクロ組織を示す。ハンドレイアップ工法で製造した GFRP は、繊維層間の樹脂層が厚く、気泡 (マイクロボイド欠陥: 円状の黒色部分) が層間および繊維束内に多く点在している。ハンドレイアップ工法で GFRP を製造する場合は、気泡の巻き込みによるマイクロボイドの発生は不可避である。

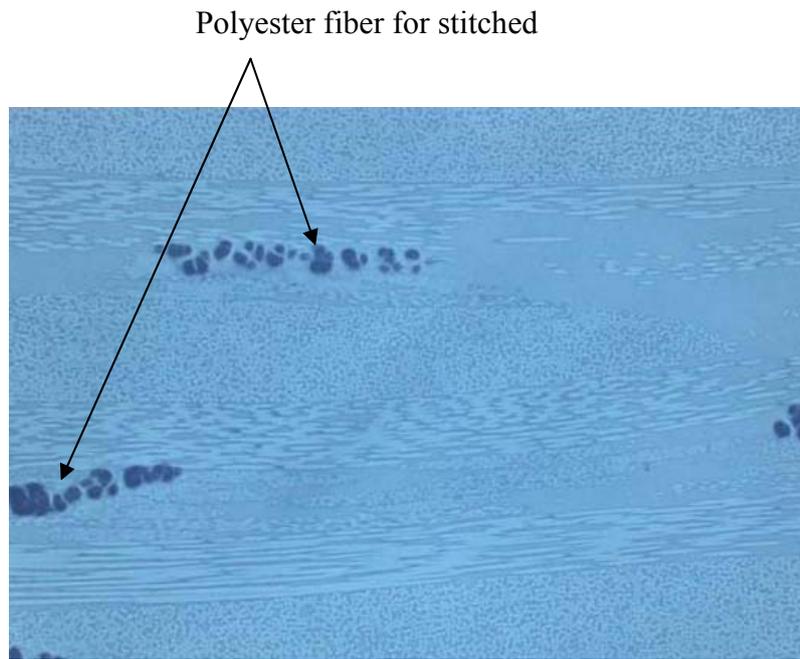
一方、真空含浸工法で製造した GFRP は、ガラス繊維の若干の分布差はあるものの密に分散しており、気泡の発生も無く、マイクロ組織的に見ても均一であることがわかる。図 7.3, 図 7.4 および図 7.5 で示したように、真空含浸材はハンドレイアップ材と比較すると、同じ積層構成でも繊維含有量が増加し、引張強さと引張弾性率が向上する。真空含浸工法で製造した GFRP は、真空吸引の効果によりガラス繊維層間の余分な樹脂が排除され繊維含有量が増大すること、また層間および繊維束内の空気が排出されることで、マイクロボイド欠陥がほとんど発生しないことが特徴である。ここでは、真空含浸工法で製造した GFRP の機械的性質が優れている理由を、内部微細組織の観察結果から明らかにすることができた。なお図 7.6 および図 7.7 で示されたように、引張強さおよび弾性率は製造法および組織 (マイクロボイドの有無) にかかわらず  $V_f$  に比例する形で整理できたことから、図 7.8(a)に見られるような 0.5mm 以下のマイクロボイドは、繊維束内および繊維積層間のいずれに存在しても引張特性に対しては大きな影響は与えないと考える。ただし欠陥の大きさや量によっては、ある範囲を超えると材料物性に影響を与えることは容易に想像できることから、製造時には極力気泡が残存しないように配慮する必要がある。

図 7.9 にステッチファブリックを用い真空含浸工法で製作した GFRP の断面マイクロ組織を示す。ステッチファブリック (A) およびステッチファブリック (B) のいずれにも気泡の発生がなく、かつ均一な組織であることがわかる。また図 7.8 に示した RC と CM を組み合わせた GFRP と比較すると、ステッチファブリックを用いた GFRP は繊維のうねりが小さくかつ緻密で、繊維含有量が高く強度特性が優れていることは容易に推測できる。

以上より、真空含浸工法は均質で強度特性が優れた GFRP を製作できる製造法であり、風力発電装置用の大型ブレード素材を用いた試験においても、その優れた成形性が確認された。また真空含浸工法とステッチファブリックを組み合わせることで、より材料特性の優れた GFRP の成形が可能であることがわかった。

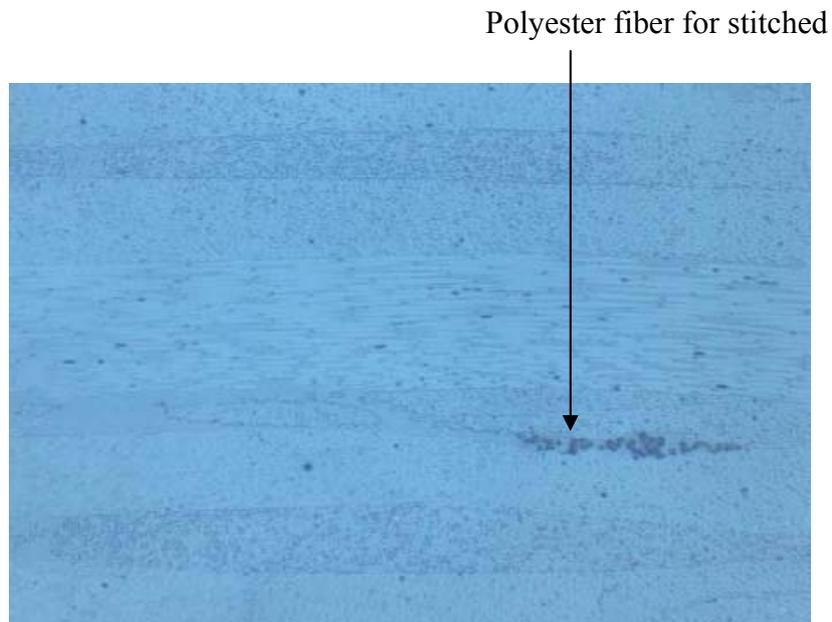


**Fig.7.8 Microstructure of cut section of GFRP (Woven fabric)**



(a) Stitched fabric (A)

0.4mm



(b) Stitched fabric (B)

0.4mm

**Fig.7.9 Microstructure of cut section of GFRP  
(Made by VaRTM / Stitched fabric)**

### 7.5 大型 GFRP 翼の実用化例<sup>(20)(21)(23)(24)</sup>

本項では、国内の風力発電装置メーカーである三菱重工業（株）の大型 GFRP ブレードについて、その実用化状況とブレード構造および強度検証について述べる。三菱重工業（株）は、1982 年に出力 250kW の量産型風力発電装置を開発して以来、450kW 機、600kW 機、1000kW と大型機を市場投入し、2006 年には 2400kW の超大型・高性能機種を開発した。図 7.10 に 1000kW 機および 2400kW 機の外形図とブレード形状図を示す。ブレード素材は、軽量化とコストの観点からガラス繊維強化プラスチック（GFRP）が使われており、ブレード長さは 1000kW 機用が 27～30m、2400kW 機用が 45～47m である。

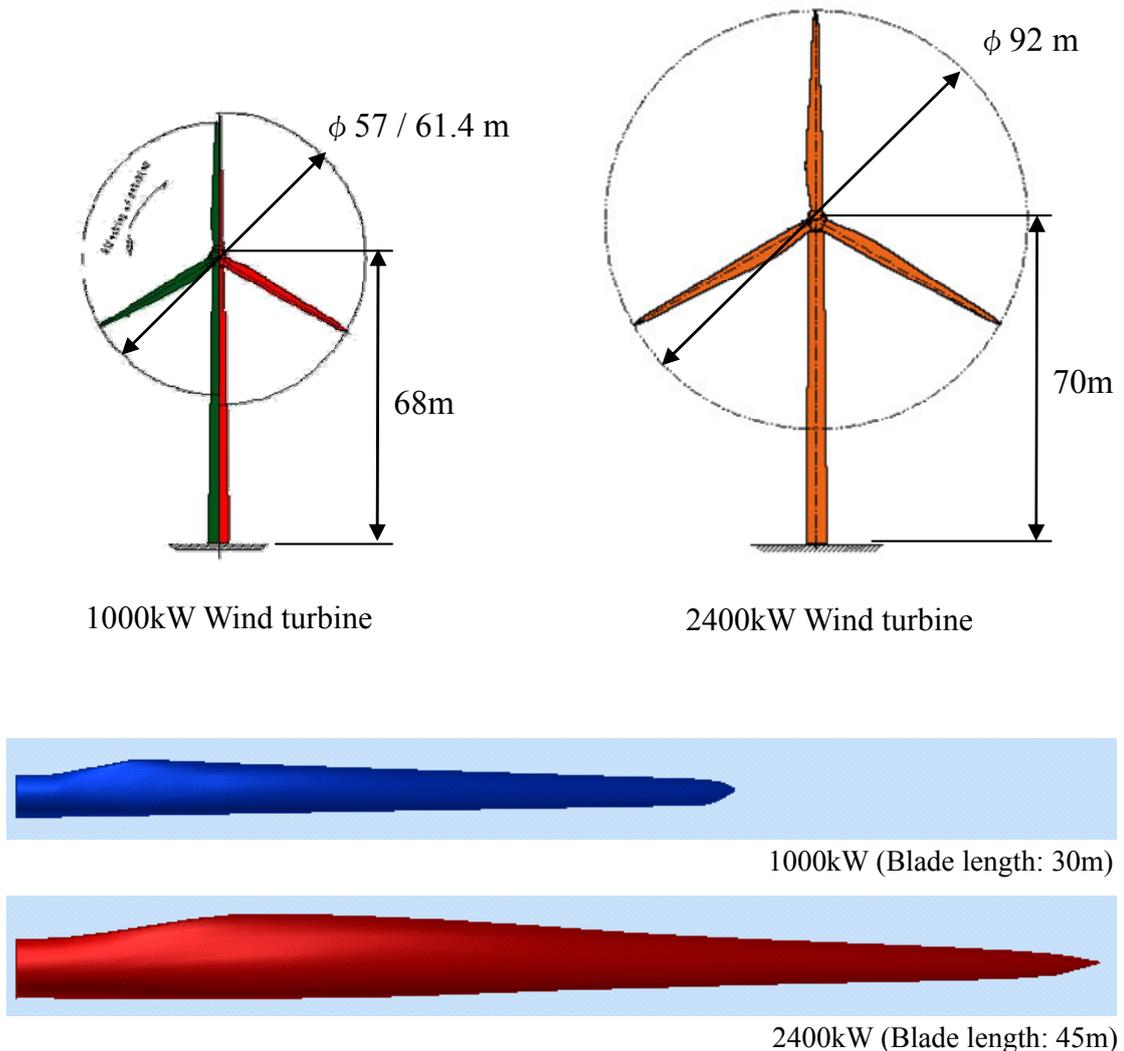
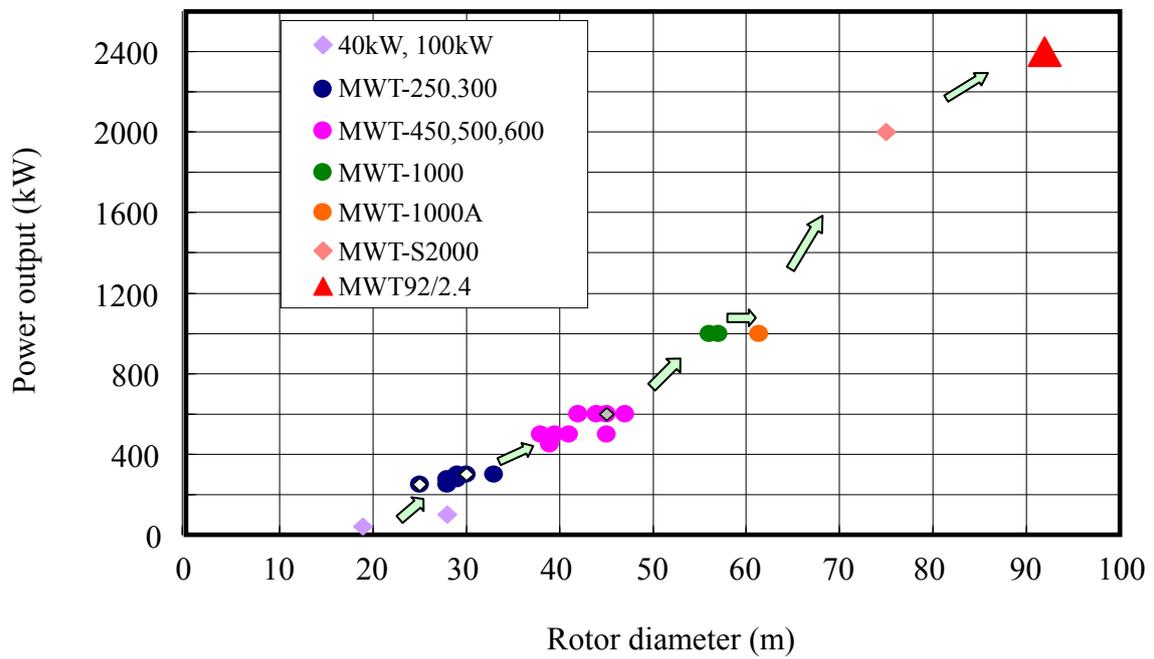


Fig.7.10 1000kW and 2400kW Wind turbines and GFRP blades

### 7.5.1 大型 GFRP 翼の種類と構造

図 7.11 に三菱重工業（株）製風力発電装置の出力とローター径の関係を示す。1980 年後半に開発されたローター径 28m の風力発電装置は、初めて GFRP 製の一体ブレード採用したアップウインド方式の 250kW 機で、量産機のベースとなったモデルである。図 7.12 に米国カリフォルニア州モハーベ砂漠にある世界最大級のウインドファームを示すが、同機はここに 660 台設置され、運転実績は最長で 15 年を超えた。

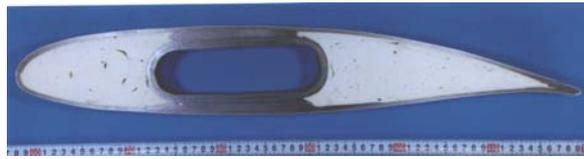
図 7.13 に 250kW 風力発電装置と GFRP ブレードの外観および断面を示す。GFRP ブレードは長さ約 12m で、形状は低風速域での性能を向上させるためテーパ翼とし、翼根から翼先端にかけて翼幅を変化させている。またその構造は、GFRP 製の主桁および外皮と硬質ウレタンフォームより構成され、主桁は翼断面の中央に配されて荷重を支持する骨組に相当し、外皮は翼型を形成してブレードの空力性能を決める。硬質ウレタンフォームは、外皮と主桁の一体性を高めかつ座屈強度を向上させるために用いられている。GFRP ブレードに用いられている樹脂は不飽和ポリエステル樹脂で、強化繊維はロービングクロスとチョップドストランドマットである。また外皮の表面には、耐候性塗料（ゲルコート）が塗布されている。この塗料は、イソ系不飽和ポリエステル樹脂をベースとしたもので、船舶あるいは建築用 GFRP 部材に用いられ 10 年以上の耐久性があるとされているが<sup>(25)</sup>、このことは 15 年を超える運転実績がある 250kW 風力発電装置の GFRP ブレードでも証明された。



**Fig.7.11 Power output and rotor diameter of Wind turbines**



**Fig.7.12 Wind farm in California USA (Mojave desert)**



Cross section of blade



**Fig.7.13 250kW Wind turbines and GFRP blades (Length: 12m)**

図 7.14 に 600kW 風力発電装置と GFRP ブレードの外観を示す. このブレードの基本構造は 250kW 機とほぼ同じであるが, 軽量化のために硬質ウレタンフォームを排除した中空構造とし, GFRP 外皮にはプラスチックの発泡コア材を用いたサンドイッチ構造を, 主桁にはガラス一方向クロスを採用した高強度 GFRP を用い, 軽量・大型化を強く意識したブレード構造となっている.



**Fig.7.14 600kW Wind turbines and GFRP blades (Length: 18m)**

図 7.15 に 1000kW 風力発電装置と GFRP ブレードの外観および断面を示す。ブレードの基本構造は外皮（スキン）と桁（ウェブ）で構成され，軽量化の観点から中空構造となっている。外皮は，長さ方向の曲げ強度および剛性を高めるために中央部を厚肉の GFRP とし，これ以外の部分は軽量化のために軽量コア材を挟み込んだ GFRP サンドイッチ構造としている。桁はブレード断面の形状保持と，曲げせん断力に対し抵抗力を高める役目を果たす。現在，この構造が世界の風力発電装置用 GFRP ブレードの主流である。このブレードでは，主要な強度部材となる外皮中央部に一方向スティッチファブリックが，それ以外の部分には $\pm 45^\circ$ とチョップファイバを一体化したスティッチファブリックが用いられており，高強度素材を用いることで大幅に軽量化されている。図 7.16 に国内最大級の 2400kW 風力発電装置の外観を示す。GFRP ブレードの長さは約 45m で，基本構造は 1000kW 機のブレードと同じである。



**Fig.7.15 1000kW Wind turbines and GFRP blades (Length: 27m)**



**Fig.7.16 2400kW Wind turbine (Blade Length: 45m)**

### 7.5.2 大型 GFRP 翼の強度検証

実機 GFRP ブレードの強度検証は，最大荷重試験と設計寿命（例えば 20 年相当）に対する疲労荷重を負荷する疲労試験を行い評価する．図 7.17 に実機 GFRP ブレードの最大荷重試験の状況を示す．試験は，ブレードの翼根部をスタンドに固定し，複数の位置に所定の荷重をかけて最大設計荷重に相当する曲げモーメントを負荷する．この試験により最大荷重に対してブレードが損傷しないこと，外皮に座屈が発生しないことを確認する．また，ブレード先端のたわみ量や各部の歪み計測を行い，試験前に実施した有限要素法に基づく解析結果と比較して健全性を検証する．

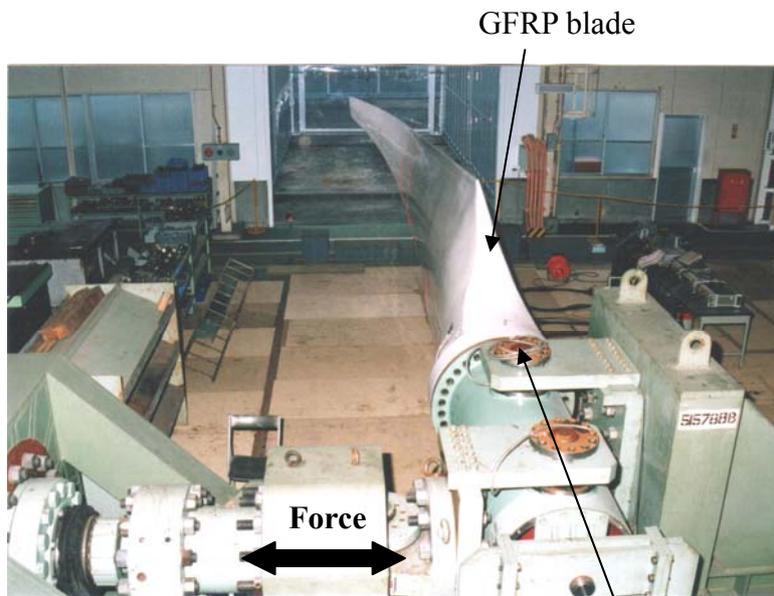
一方，疲労試験は，ブレードの翼根部を試験装置に固定した状態で，翼根部に周期荷重を負荷して行う．図 7.18 に実機ブレードの疲労試験の状況を示す．試験時の荷重負荷の周期は，ブレードの固有振動数に近い周波数とし，試験回数は 1 例として  $10^6$  サイクルを目標とする．実機では，ブレードの自重による荷重の繰り返し数はローターの回転数と同じであり，設計寿命を 20 年とすると繰り返し数は約  $10^8$  サイクルになる．これに対し，疲労試験を  $10^6$  サイクル前後の短時間で行う場合は，実際の疲労荷重よりも大きい荷重を負荷する加速試験で評価することになる．実機ブレードの設計に用いられる基準強度は，この実翼疲労試験の結果と第 3 章や第 5 章で論じた試験片レベル（ばらつきを考慮するため複数本の試験を実施）の疲労線図から算出され，さらに部分安全係数で除して設定される．部分安全係数は，たとえばドイツの承認機関である GL-Wind (Germanischer Lloyd Wind Energie) のレギュレーション<sup>(26)</sup>に準じて 1.5～2.0 の範囲で設定されるが，この中には経年劣化等の基礎安全係数，温度の影響，ガラス繊維形態および加熱硬化条件などが含まれている．

風力発電装置は，風エネルギーをブレードで受け回転エネルギーに変換して発電する装置である．自然の風は，設置場所により強弱や分布が大きく異なるため，これを外力として受けるブレードの疲労寿命の予測は非常に困難である．一方，風力発電装置は，地球環境問題および省エネルギーの観点から，今後も大型化が進み設置が拡大すると予想され，大型 GFRP ブレードの寿命を正確に予測し，信頼性を確保することはますます重要になる．またブレードの大型化に際しては，その運搬性と同時に外力荷重を支える機械構造部品の軽量化と信頼性の確保も考慮する必要がある．ブレードの軽量化は今後の大きな課題になると考える．大型 GFRP ブレードの軽量化

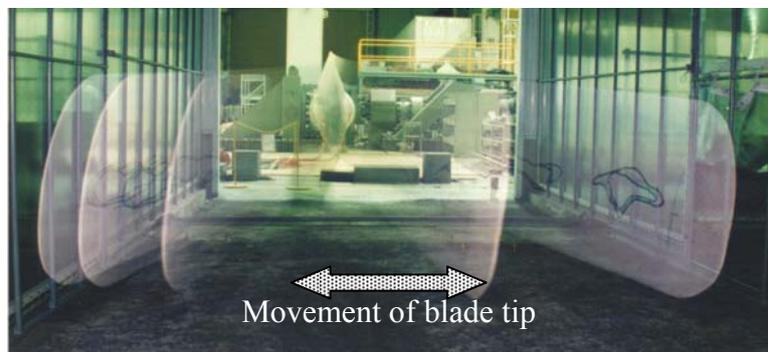
と強度信頼性を両立するためには、使用する GFRP の強度特性と同時に風の外力データを十分に取得、整備し、解析と実験の両方から検証する必要がある。



**Fig.7.17 Static load test of GFRP blade**



(a) View from blade root      Support point



(b) View from blade tip

**Fig.7.18 Fatigue load test of GFRP blade**

## 7.6 結 言

本章では，GFRP 構造部材として早くから実用化され，最近，急速に大型化している風力発電装置用のブレードについて，前章までの成果を踏まえながら素材および製造法の現状と課題について論じるとともに，GFRP ブレードの構造と強度検証について述べた．結論は以下の通りである．

- (1) スティッチファブリックはガラス繊維のうねりが小さく，これを強化基材とした GFRP は優れた強度特性を発揮する．また引張破断伸びが大きく，接着力が強いビニルエステル樹脂およびエポキシ樹脂は，高性能 GFRP の樹脂として有望である．強化繊維とマトリックス樹脂を目的に合わせて選定し，織物形態や積層構成などの組み合わせを最適化することで，風力発電装置用大型ブレードの軽量化と品質向上に貢献する高性能 GFRP の提供は十分に可能と考える．
- (2) 真空含浸工法は，大面積かつ厚肉の GFRP 成形が 1 回の樹脂含浸工程で可能であり，風力発電装置用ブレードのような大型 GFRP 部材の製造に適した工法である．またスティッチファブリックと真空含浸工法組み合わせた GFRP は優れた引張強度特性を示し，繊維のうねりが小さく組織が緻密であることが内部微細組織の観察から明らかになった．
- (3) 風力発電装置は，地球環境問題および省エネルギーの観点から，今後も大型化が進み設置が拡大すると予想され，大型 GFRP ブレードの寿命を正確に予測し，信頼性を確保することはますます重要になる．大型 GFRP ブレードの軽量化と強度信頼性を両立するためには，使用する GFRP の強度特性と同時に風の外力データを十分に取得，整備し，解析と実験の両方から検証する必要がある．

## 参考文献

- (1) Owens Corning, Fabric Handbook, (1994), pp.7-16.
- (2) A.P.Mouritz, B.N. Cox, A mechanistic approach to the properties of stitched laminates, Composites, Part A31, (2000), pp.1-27.
- (3) 川節望, 新藤健太郎, 田北勝彦, ステッチ強化基材を用いた樹脂系複合材の強度特性, 日本機械学会 2005 年度年次大会講演論文集(1), No.5-1, (2005), pp.587-588.
- (4) 石田彪, 新世紀型強化材ニットファブリック, 繊維機械学会誌, vol.57, No.8, (2004), pp.316-324.
- (5) 田渕賢, 斯波哉, 及川由紀, 天野晋武, 後藤卒土民, 宮入裕夫, 新しい形態のガラス繊維強化材を用いた FRP の機械的性能について, 強化プラスチック協会 45<sup>th</sup>CON-EX 講演会要旨集, (2000), pp.B-26/1-26/2.
- (6) The Japan Reinforced Plastics Society, FRP structure design handbook, (1994), pp.12-20.
- (7) 栗原福次, 大石不二夫, 活用ガイド高分子材料, オーム社, 第 1 版第 13 刷, (1984), pp.129-141.
- (8) 松崎昭二, ビニルエステル樹脂, 化学工業日報社, 初版 1 刷, (1993), pp.32-33.
- (9) Bandoh.S, Zaco.M, Shiino.T, Kurashiki.T, Matsumura.K, On the Detection of Fatigue Damage in CFRP by Measuring Poisson's Ratio, The official journal of the Japan Society for Composite Materials, Vol.28, No. 1, (2002), pp.3-10.
- (10) Yokozeki.T, Ishikawa.T, Shinagawa.Y, Inspection of Matrix Cracks in CFRP Laminates, Symposium of New material and Nondestructive Evaluation of the Products, (2004), pp.29-32.
- (11) 強化プラスチック協会, FRP 構造設計便覧, (1994), pp.317-320.
- (12) 昭和高分子株式会社, 不飽和ポリエステル樹脂カタログ, (2000), pp.17-20.
- (13) 強化プラスチック協会, FRP50 年の歩み (FRP 年表), (2005), pp.275-345.
- (14) 日本複合材料学会, 複合材料活用辞典, 産業調査会, 第 2 刷, (2002), pp.462-467.
- (15) 強化プラスチック協会, FRP 構造設計便覧, (1994), pp.345-347.
- (16) 日本複合材料学会, 複合材料活用辞典, 産業調査会, 第 2 刷, (2002), pp.519-520.

- (17) 石田彪, FRP 舟艇用ガラス繊維「ニットファブリック」の材料特性, 海洋水産エンジニアリング, vol. 2, No.14, (2002), pp.54-63.
- (18) 森本尚夫, 成形法の変遷, FRP50年の歩み, 強化プラスチック協会, (2005), pp.93-103.
- (19) 青木修, 自動車の軽量化におけるFRPの現状と将来予測, FRP50年の歩み, 強化プラスチック協会, (2005), pp.138-147.
- (20) 川節望, 田北勝彦, 風力発電装置用複合材ブレード, FRP50年の歩み, 強化プラスチック協会, (2005), pp.215-219.
- (21) 川節望, 新藤健太郎, 田北勝彦, 加藤英司, 風力発電装置用大型FRPブレード, 強化プラスチック, vol.51, No.10, (2005), pp.18-23.
- (22) 関和希, 新エネルギーと風力発電の現状および風車ブレード, 強化プラスチック, vol.50, No.8, (2004), pp.12-18.
- (23) 川節望, 複合材料の製造技術～大型構造“物作り”への挑戦～, Materials and Processing Division Newsletter, No.30, November, 日本機械学会, (2005), pp.5-6.
- (24) 新藤健太郎, 川節望, 田北勝彦, 加藤英司, VaRTM(真空含浸工法)による大型複合材製造技術, 三菱重工技報, vol.43, No.1, (2006), pp.11-12.
- (25) 日本複合材料学会, 複合材料活用辞典, 産業調査会, 第2刷, (2002), p.886.
- (26) Germanischer Lloyd WindEnergie GmbH, 5.5 FiberReinforced Plastics(FRP) and Bonded Joints, Rules and Guidelines IV Industrial Services, (2003), pp.5\_17-5\_18.

## 第 8 章 総 括

軽量で耐食性および耐候性が優れているガラス繊維強化プラスチック（GFRP）は，軽量化と省エネルギーの観点から車両，建材，船舶部材を中心に適用が拡大している．最近では，地球環境問題の世界的な高まりにより急速に普及している風力発電装置用の大型 GFRP 翼において，強度や信頼性の向上がますます重要視されている．本研究では，今後も大型構造体への適用が拡大すると予想される GFRP について，これまでに明らかにされていない機械的性質と組織構造の関連性の解明を試みた．静的強度特性は，ガラスクロス繊維およびスティッチ繊維を用いた GFRP で引張特性および圧縮特性に及ぼす繊維構成，繊維含有量，織物形態およびマトリックス樹脂の影響を追究した．また疲労強度特性については，微視的破壊形態解明のほか，微細き裂と繰り返し数比（ $N/N_f$ ）の関係，マトリックス樹脂の影響，引張および圧縮強さと疲労強さの関係について調査，検討した．さらに，大型 GFRP 部材の 1 例として風力発電装置のブレードを例にとり，実機 GFRP の機械的性質と破壊形態を調査するとともに，素材および製造法の現状と課題について論じ，ブレードの構造と強度検証について述べた．以下に，各章で得られた成果を総括する．

第 1 章の序論では，プラスチック系複合材料の現状とその中の GFRP の位置づけを説明し，昨今の軽量化と省エネルギーの要求の高まりから，GFRP の適用製品が小型部材や 2 次構造部材から大型 1 次構造部材に拡大していることを述べた．また GFRP の静的強度特性および疲労強度特性の研究動向を紹介するとともに，大型 GFRP 構造に対しては，信頼性確保の観点から引張側の強度特性と同時に圧縮側の強度特性と疲労強度が要求されるようになったことを示し，本研究を行うに至った背景と必要性を論じて研究の目的を述べた．例えば出力 1000kW の風力発電装置用大型 GFRP ブレードは，長さが 30m で最大肉厚は 100mm を超える超大型の厚肉部材であり，軽量化と同時に長期信頼性の確保が強く要求されている．ここ数年，製織技術が急速に進み大型 GFRP 構造への適用を考えた多くの新しいガラス繊維基材が開発されているが，品質を確保しながら，同時

に強度要求特性を満たすためには、機械的性質と組織構造の関連性を解明し、適正な素材選定を行う必要がある。さらに、製品に要求される機能や性能、コスト、生産数量などによって最適な材料システムおよび成形プロセスを選択することが重要であることを述べた。

第2章では、ガラスチョップドストランドマット（CM）とガラスロービングクロス（RC）を強化基材としたGFRPについて、引張特性および圧縮特性に及ぼす繊維積層構成と繊維含有量の影響を追究すると同時に、不飽和ポリエステル樹脂およびビニルエステル樹脂の2種類のマトリックス樹脂の影響を調査、検討した。

その結果、CMとRCを組み合わせたGFRP積層材の強度特性は、繊維体積含有量（ $V_f$ ）が20～45%の範囲において、修正係数：Kを同じ値とする1つの複合則であらわされ、Kは引張強さと圧縮強さに対して、また引張弾性率と圧縮弾性率に対して、それぞれほぼ同じ値になることを示した。このことから、強化基材の繊維のうねりや繊維配向のバラツキが強度および弾性率に与える影響度は、引張および圧縮特性のいずれに対しても同等であると推論した。さらに $V_f$ と引張および圧縮強さの関係は、横軸に $V_f$ を線形表示し、縦軸に強度を対数表示したグラフにおいて、 $V_f$ が20～50%の範囲でそれぞれ直線近似できること、また $V_f$ が35%以下では引張強さよりも圧縮強さが大きく、35%近傍で同等になり、これを超えると引張強さが圧縮強さよりも大きくなることを明らかにした。一方、引張および圧縮の弾性率は $V_f$ が20～50%の範囲でほぼ同一の近似式で整理でき、弾性率は $V_f$ に対する依存度が大きく、樹脂の種類や強化基材の組み合わせの影響は小さいことがわかった。またマトリックス樹脂の違いによる強度特性の差異は、若干ではあるが圧縮試験において認められ、延性および接着強度が優れているビニルエステル樹脂をマトリックスとするGFRPが高い圧縮強さを示すと結論した。

第3章では、ガラスロービングクロス（RC）を強化基材としたGFRPについて、疲労の微視的損傷挙動の解明を試みた。特に微細樹脂き裂と繰り返し数の関係に着目し、樹脂き裂の定量化と繰り返し数比との関連性について分析・考察した。また疲労により低下する引張弾性率に着目し、引張弾性率の低下と繰り返し数との関連についても追求した。

その結果，疲労により発生した樹脂き裂（トランスバースクラック）は，そのほとんどが  $0^\circ$  方向繊維束に達したところで一旦停止すること，そしてその後，き裂は層間方向に進展するが，一部は少し進んだところで  $0^\circ$  方向繊維が疲労により破断する現象が起こり，これにより疲労破壊が急激に進展することを示した．また，疲労により発生する GFRP 内部の樹脂き裂は，繰り返し数の増加とともに増え，繰り返し数比 ( $N/N_f$ ) が 0.1 を超えると急速に増加することを示し，ロービングクロスのようにガラス繊維のうねりが大きく，樹脂溜りが発生しやすい強化基材を用いた GFRP では，疲労による樹脂き裂は比較的少ない繰り返し数で発生し，かつ増加しやすいと結論した．一方，き裂平均長さ  $l$  と  $N/N_f$  の関係は，き裂平均長さを線形， $N/N_f$  を対数表示したグラフ上で直線近似できることを示した．さらに，疲労による弾性率の低下率は，同じ繰り返し数において RC 積層材と CM+RC 積層材でほぼ同じ値になるが， $N/N_f$  は弾性率の低下率とは異なり，RC 積層材よりも CM+RC 積層材の方が大きくなることを示した．これには強化繊維の種類と積層構成および繊維含有量が関係していると考えられ，CM と RC を組み合わせた積層材では， $V_f$  が大きく引張強さおよび弾性率が高い GFRP ほど  $N/N_f$  は小さくなると推論した．

第 4 章では，一方向ガラス繊維を主体とするスティッチファブリック強化 GFRP について，引張特性および圧縮特性に及ぼす繊維構成，繊維含有量および繊維径の影響を調査，検討した．また  $0^\circ/90^\circ$  スティッチファブリックとロービングクロスを強化基材とした GFRP を比較しながら，繊維の織り形態と強度特性の関連について微視組織の観察結果をもとに追求した．

その結果，スティッチファブリック強化 GFRP の引張強さと圧縮強さの関係は，圧縮強さの方が低い値を示すことから，基本設計は圧縮強さを基準に考える必要があると言及した．また圧縮強さは，ガラス繊維の素線径が小さい方が，より高くなる可能性があることが示された．一方，引張および圧縮弾性率は，単純に繊維含有量に比例して増加し，複合則によって予測しやすい物性であることがわかった．スティッチファブリック強化 GFRP は，ロービングクロス強化 GFRP と比較して引張および圧縮強さは大きく優れるが，弾性率は僅かに高い程度である．スティッチファブリックは，ガラス繊維のうねり（蛇行）が少ないことが特徴であり，これは GFRP の引張強さおよび圧縮強さの向上に対しては効果があるが，引張および圧

縮弾性率に対しては、大きな効果は期待できない。すなわち、GFRPの引張および圧縮特性において、ガラス繊維のうねりは、弾性率よりも破壊強さに対して大きな影響を与えると結論した。

第5章では、スティッチ繊維を用いた一方向GFRPにおいて、引張・圧縮特性および疲労特性に及ぼすマトリックス樹脂の影響を調査するとともに、引張・圧縮の静的強度と疲労強度の関係について検討した。

その結果、スティッチファブリックを用いた一方向強化GFRPでは、マトリックス樹脂の違いによる引張強さと圧縮強さの差および引張弾性率と圧縮弾性率の差は、ほとんど認められないことがわかった。引張および圧縮強度特性は、ガラス繊維の形態と含有量で決まり、マトリックス樹脂の影響は小さいと言える。一方、疲労強さはマトリックス樹脂の影響が明確にあらわれ、エポキシ樹脂>ビニルエステル樹脂>不飽和ポリエステル樹脂の順に優れており、かつ高サイクル側ほどその差がより大きくなることを示し、同じ強化基材で同じ静強度を有するGFRPであっても、疲労強さはマトリックス樹脂により異なると結論した。なお、マトリックス樹脂が決まれば、引張強さおよび圧縮強さを計測することで疲労強さを予測できる可能性があることを示したが、静強度に対する疲労強さの比率は、個々の材料の組み合わせによって異なることが予想されるため確認が必要である。

第6章では、大型GFRP部材の1例として風力発電装置のブレードを例にとり、適用されているガラス繊維基材およびマトリックス樹脂とGFRPの機械的性質を調査しその関連性を考察するとともに、破壊形態に及ぼすマトリックス樹脂の影響について追究した。

風力発電装置用ブレードのGFRP素材は、ブレードの長大化にともないより高い強度が要求されているので、強化基材としては一方向クロスとスティッチファブリックを適用している。一方向クロスは、必要な方向に多くの繊維を配し、ガラス繊維の直進性が良いことから、ロービングクロスと比較すると繊維の強度特性を有効に引き出すことができ、また繊維含有量も増大することから機械的性質が向上する。スティッチファブリックは、ガラス繊維のうねりが少なく、均一でかつ複数の層を有する多層基材である。第4章において、スティッチファブリックを用いたGFRPは引張および圧縮特性が優れていることを示したが、風力発電装置用の実機ブレード素材

においても，その優れた特性が証明された．ステッチファブリックは，今後，風力発電装置用の大型 GFRP ブレードにおいて主要な強化基材になると考える．一方，不飽和ポリエステル樹脂をマトリックスとする GFRP は，ビニルエステル樹脂をマトリックスとする GFRP と比較して，引張および圧縮強さが低く，破壊の際の樹脂き裂の発生範囲が広いことがわかった．この要因の 1 つには，不飽和ポリエステル樹脂の方が破断伸びおよび接着力が小さいことがあげられるが，この影響を受ける GFRP の層間剥離の発生範囲の違いをマクロ的な観察から明らかにした．

第 7 章では，GFRP 構造部材として早くから実用化され，最近，急速に大型化している風力発電装置用のブレードについて，前章までの成果を踏まえながら素材および製造法の現状と課題について論じるとともに，GFRP ブレードの構造と強度検証について述べた．

その結果，第 4 章および第 5 章でも述べたように，ステッチファブリックはガラス繊維のうねりが小さく，これを強化基材とした GFRP は優れた強度特性を発揮すること，また引張破断伸びが大きく接着力が強いビニルエステル樹脂およびエポキシ樹脂は，高性能 GFRP の樹脂として有望であると言及した．

一方，製造法では，真空含浸工法は大面積かつ厚肉の GFRP 成形が 1 回の樹脂含浸工程で可能であり，風力発電装置用ブレードのような大型 GFRP 部材の製造に適した工法であると述べた．またステッチファブリックと真空含浸工法組み合わせた GFRP は優れた引張強度特性を示し，繊維のうねりが小さく，組織が緻密であることを内部微細組織の観察から明らかにした．

以上のように，本研究ではガラス繊維強化プラスチック（GFRP）について，これまでに明らかにされていない機械的性質と組織構造の関連性の解明を試みると同時に，大型 GFRP 構造部材としての素材と製造法の課題および今後の方向性について，風力発電装置のブレードを対象に論じた．

まず引張および圧縮の静的強度特性については，強度および弾性率に及ぼす強化繊維とマトリックス樹脂の影響を調査，検討して，弾性率は繊維含有量の影響を最も大きく受け，強度は繊維含有量に加えて繊維うねりの影響も大きく受けると結論した．またロービングクロス強化材とステッチファブリック強化材においては，引張強さと圧縮強さの関係は同等かまたは圧縮強さの方が低い値を示

すことから，引張力と圧縮力の両方が加わる GFRP 構造物の基本設計は，圧縮強さを基準に考える必要があることを述べた．なおステッチファブリック強化材の引張および圧縮強さは，ロービングクロス強化材と比較すると大きく優れている．

一方，疲労強度特性では，微視的破壊形態解明のほか，微細き裂と繰り返し数の関係，マトリックス樹脂の影響，引張および圧縮強さと疲労強さの関係について追究した．その結果，疲労により発生する樹脂き裂のき裂密度と繰り返し数比 ( $N/N_f$ ) の関係，き裂平均長さと  $N/N_f$  の関係および剛性低下率と  $N/N_f$  の関係を明らかにすることができた．またマトリックス樹脂が与える影響は，静的強度特性に対しては小さく，疲労強さに対して大きいことを示し，同じ強化基材で同じ静強度を有する GFRP であっても，疲労強さはマトリックス樹脂により異なることを明らかとした．なお，マトリックス樹脂が決まれば，引張強さおよび圧縮強さを計測することによって疲労強さを予測できる可能性があるが，静強度に対する疲労強さの比率は，個々の材料の組み合わせによって異なることが予想されるため確認が必要である．

GFRP を大型主要構造体に適用するにあたっては，強化基材およびマトリックス樹脂の選定と同時に，製造法の選定が非常に重要になる．真空含浸工法 (VaRTM) は，高強度，高品質の大型 GFRP 構造部材が容易かつ低コストで製造でき，作業環境 (低臭気) からも優れた工法であることを述べた．一方，ステッチファブリックはガラス繊維のうねりが小さく，均質で繊維含有量も向上することから静強度特性および疲労強度特性の向上が期待でき，今後，GFRP の主要な強化基材になると考えた．また真空含浸工法とステッチファブリックは，それぞれに GFRP の機械的性質と品質の向上に対して有効な手段であるが，両者を組み合わせることで，より材料特性の優れた高品質の GFRP 成形が可能になることがわかった．

風力発電装置は，地球環境問題および省エネルギーの観点から，今後も大型化が進み設置が拡大すると予想され，大型 GFRP ブレードの寿命を正確に予測し，信頼性を確保することはますます重要になる．また，ブレードの大型化に際しては，その運搬性と同時に外力荷重を支える機械構造部品の軽量化と信頼性の確保も考慮する必要があり，ブレードの軽量化は今後の大きな課題になると考える．大型 GFRP ブレードの軽量化と強度信頼性を両立するためには，使用する GFRP の強度特性と同時に風の外力データを十分に取得，整備し，解析と実験の両方から検証する必要がある．本研究で得られ

た機械的特性と組織構造および製造法に関する知見は，大型 GFRP 構造体である風力発電装置用ブレードの強度評価と信頼性向上に大きく貢献すると考える．

## 謝 辞

本論文をまとめるにあたり，3年間終始懇切なるご指導を賜りました九州工業大学大学院工学研究科教授 増山不二光博士に謹んで心からお礼申し上げます。論文の構成から文章の組立および考察に至るまで，細部にわたるご丁寧なご指導に対して深く感謝申し上げます。また九州工業大学大学院工学研究科教授 山崎二郎博士，同教授 原田昭治博士，同教授 赤星保浩博士および同大学院生命体工学研究科教授 西尾一政博士には有益なご助言とご討論を賜りました。深く感謝申し上げます。

本論文は，著者の三菱重工業（株）長崎研究所における研究の中で，永年にわたって行ってきた主要研究テーマのひとつについてまとめたものです。同社に勤めながら社会人学生として入学する機会を与えていただくとともに，通学に対してご理解と温かいご支援を頂いた三菱重工業（株）長崎研究所技師長 納富啓博士，同次長角屋好邦博士，同材料・溶接研究室室長 鎌田政智博士，同サービス技術課長 西村宣彦博士および高砂研究所主席 藤田明次博士に深謝いたします。特に納富啓技師長には，研究に関してはもとより，研究以外の面においても大変温かいご指導とご助言を頂くとともに，研究に対する姿勢や研究者としての在り方など多くのご教示を賜りましたことに心より感謝申し上げます。さらに本研究を遂行するに当たり，終始ご助言とご援助を賜りました三菱重工業（株）長崎造船所主幹 田北勝彦様，ならびに多大なご協力を戴きました長崎研究所 材料・溶接研究室研究員 新藤健太郎様ほか室員の皆様および同研究所 強度研究室主任 浜口輝久様ほか室員の皆様に心から感謝の意を表します。

## 発表論文

- (1) 川節望, 複合材料の製造技術～大型構造“物作り”への挑戦～, Materials and Processing Division Newsletter, No.30 November, 日本機械学会, (2005), pp.5-6.
- (2) 川節望, 新藤健太郎, 田北勝彦, 加藤英司, 風力発電装置用大型 FRP ブレード, 強化プラスチック, Vol.51, No.10, (2005), pp.496-501.
- (3) 川節望, 田北勝彦, 風力発電装置用大型 FRP ブレード, FRP50 年誌, 強化プラスチック協会, (2005), pp.215-219.
- (4) 戸島学, 川節望, 古閑正憲, 軸流ファン動翼の軽量化, Boiler Turbine Avenue, SPRING No.28, (2003), pp.58-61.
- (5) 川節望, 後藤充成, 田北勝彦, 古閑正憲, 戸島学, 火力発電所用大形軸流送風機 FRP 動翼の実用化, 三菱重工技報, Vol.41, No.5, (2004), pp.302-305.
- (6) 川節望, 青木清隆, 田北勝彦, 加藤英司, 厚肉 FRP の非破壊検査技術の開発, 日本機械学会第 12 回機械材料・材料加工技術講演会論文集, (2004), pp.127-128.
- (7) 川節望, 新藤健太郎, 田北勝彦, 加藤英司, FRP 構造体の VaRTM 成形における樹脂挙動, 日本機械学会第 12 回機械材料・材料加工技術講演会論文集, (2004), pp.137-138.
- (8) 川節望, 後藤充成, 古閑正憲, 田北勝彦, 戸島学, 大型軸流送風機用 FRP 動翼の開発, 日本機械学会第 12 回機械材料・材料加工技術講演会論文集, (2004), pp.139-140.
- (9) 川節望, 新藤健太郎, 田北勝彦, 加藤英司, 風力発電装置用大型 FRP ブレードの開発, 強化プラスチック協会 49<sup>th</sup> FRP CON-EX 2004 講演会要旨集, (2004), pp.A-25/1-A-25/2.
- (10) 川節望, 新藤健太郎, ステッチ強化基材を用いた樹脂系複合材の強度特性, 日本機械学会 2005 年度年次大会, 講演論文集, Vol.1, (2005), pp.587-588.
- (11) 戸島学, 川節望, 軸流ファン FRP 動翼の開発について, 火力原子力発電技術協会東北支部 H14 年度研究発表会予稿集, (2002), pp.1-5.

## 出願特許

- (1) 特許第 3337243 号 ; 風車翼
- (2) 特許第 3576262 号 ; 破壊予知可能型 G F R P 製風車翼  
およびその破壊予知方法
- (3) 特許第 3530261 号 ; 風車翼
- (4) 特許第 3930200 号 ; 風力発電翼の製造方法
- (5) 特許第 3825346 号 ; 風力発電装置用複合材ブレード
- (6) 特許第 3680041 号 ; 繊維強化樹脂構造体の製造装置
- (7) 特許第 3671037 号 ; 繊維強化プラスチック用の強化  
繊維基材
- (8) 特許第 3686405 号 ; 繊維強化プラスチックの製造装置
- (9) 特許第 3986426 号 ; 繊維強化プラスチックの製造方法
- (10) 特願 2002-299032 号 ; 繊維強化樹脂構造体の製造方法  
およびその製造装置
- (11) 特願 2003-342783 号 ; 樹脂含侵センサ・補修器および  
樹脂含侵補修器並びに補修方法
- (12) 特願 2003-346461 号 ; 繊維強化樹脂構造体の製造方法  
およびその製造装置
- (13) 特願 2004-053229 号 ; カーボンナノチューブ強化樹脂  
構造体およびその製造方法
- (14) 特願 2005-004854 号 ; 複合材構造物形成装置, 複合材  
構造物の形成方法
- (15) 特願 2006-052918 号 ; 複合材を用いた構造部材の成形  
方法および複合材料を用いた構  
造部材
- (16) 特願 2006-050813 号 ; 強化繊維基材及び繊維強化プラ  
スチック