カーボン/アラミドハイブリッドFRP積層板の 曲げ特性の材料設計に関する一考察[†]

中 田 政 之* 宮 野 靖**
鈴 木 恵** 服 部 陽 一***

A Study on Material Design for Flexural Behavior of Carbon/Aramid Hybrid FRP Laminates

by

Masayuki NAKADA*, Yasushi MIYANO**, Megumu SUZUKI**
and Yoichi HATTORI***

A material design guideline for the flexural behavior of carbon/aramid hybrid unidirectional FRP laminates (C/A hybrid FRP) was studied from the viewpoint of laminate constitution and time-temperature dependence. As the results, it was found that the flexural behavior under static, impact and cyclic loads changed remarkably with laminate constitution, time or temperature and that the flexural fracture patterns were classified clearly into two modes according to laminate constitution and time-temperature dependence. One is the compressive fracture of the most out CFRP layer in the compression side, and the other is the tensile fracture of the surface AFRP layer in the tension side. Furthermore, the temperature dependent flexural behavior of C/A hybrid FRP predicted by the laminated beam theory using the mechanical properties of CFRP and AFRP agreed approximately with the experimental results mentioned above. Therefore, this proposed deformation and failure criteria are applicable to the material design of C/A hybrid FRP.

Key words: Fiber reinforced plastics, Carbon fiber, Aramid fiber, Hybrid, Laminate, Mechanical properties

1 緒 論

異なる機械的性質を有する2種類以上の強化繊維を組み合わせたハイブリッドFRPは、個々の繊維単独のFRPでは得られない優れた特性が期待でき、構造材の多様化する要求特性に応じてその材料設計が可能であるという特徴を持つ。

ハイブリッドFRPの機械的性質については現在までに数多くの研究報告がなされているが、それらは単なる複合則によって予測される以上の強度が現われるいわゆるハイブリッド効果の機構の解明に関するものが大半を占めていた¹⁾。しかし、最近になってFRPを適当にハイブリッド化することにより、破壊じん性の向上や耐疲労、耐衝撃性の向上といった実用的な機械的性質の改善効果の得られることも見出され、それとともに、ハイブリッドFRPの構造材への適用という観点に立って、材料設計のための基礎的指針を得ようとする研究が行なわれるようになってきた²⁾⁻⁸⁾。

ハイブリッドFRPの機械的性質に及ぼす影響因子としては、積層構成といった構造因子とマトリックス樹脂の粘弾性挙動に関わる時間および温度といった環境因子がまず挙げられる。したがって種々の積層構成において、あるいはマトリックス樹脂の機械的性質が大きく変化する広い時間および温度範囲においてハイブリッドFRPの力学挙動や破壊挙動を調べれば、上述の因子がハイブリッドFRPの機械的性質にどのように影響を及ぼすのかを概観することができ、さらにはハイブリッドFRPの構造材への適用に関する材料設計の基礎的指針をも得られると考えられる。

著者らは現在までに、カーボン繊維とアラミド繊維からなるカーボン/アラミドハイブリッド一方向FRP積層板(以下、C/AハイブリッドFRPと略称する)を取り上げ、構造材において最も一般的な負荷形態である曲げに注目し、その静的特性のみならず衝撃、疲労といった動的特性に及ぼす積層構成ならびに

[†] 原稿受理 平成3年3月26日 Received Mar. 26, 1991

* 金沢工業大学大学院 〒921 金沢南局区内野々市町, Graduate School, Kanazawa Inst. of Tech., Nonoichi-cho, Kanazawa-south, 921.

** 正 会 員 金沢工業大学材料システム研究所 〒921 金沢南局区内野々市町, Mat. Syst. Res. Lab., Kanazawa Inst. of Tech., Nonoichi-cho, Kanazawa-south, 921

*** 金沢工業大学材料システム研究所 〒921 金沢南局区内野々市町, Mat. Syst. Res. Lab., Kanazawa Inst. of Tech., Nonoichi-cho, Kanazawa-south, 921

時間および温度の影響について検討してきた。^{10)~13)}

本報は、著者らのこれまでの研究成果を基に C/A ハイブリッド FRP の静的ならびに衝撃、疲労といった動的な曲げ特性に及ぼす積層構成ならびに時間および温度の影響について概観すると同時に、これらの実験事実を基盤として C/A ハイブリッド FRP の曲げの変形および破壊基準を示し、C/A ハイブリッド FRP の構造材への適用に関する材料設計の基礎的指針を得ることを目的とするものである。

2 実験方法

種々の積層構成の一方方向 C/A ハイブリッド FRP について静的、衝撃および疲労の曲げ試験を行ない、さらに一つの積層構成に限定して種々の温度および負荷速度条件の下でこれらの試験を行なった。また、比較のために CFRP および AFRP 単独の積層板についてもこれらの試験を行なった。試料および試験条件の詳細を以下に示す。

2.1 供試材料

取り上げた一方方向 FRP 積層板の積層構成は、カーボン繊維層のみの CFRP とアラミド繊維層のみの AFRP および Fig. 1 に示す 8 種類の C/A ハイブリッド FRP の計 10 種類である。C/A ハイブリッド FRP の積層構成は、Fig. 1 に示すように、CFRP 層と AFRP 層の積層比率をほぼ 1:1 とし、表面近傍での繰返し単位層厚さを 4 段階に変え、さらに表面層が CFRP 層の C シリーズと AFRP 層の A シリーズからなる。これらの積層板の繊維体積含有率 V_f はすべて 52~55% である。

2.2 試験条件

No. of layer		Number of layer in a repeating unit [Thickness of repeating unit (mm)]			
		1 [0.2]	2 [0.4]	3 [0.6]	4 [0.8]
8	7				
		C-1	C-2	C-3	C-4
		A-1	A-2	A-3	A-4

Thickness of layer $t = 0.2$ mm

CFRP layer AFRP layer

Fig. 1. Laminate constitutions of FRP.

FRP 積層板について静的 3 点曲げ試験、シャルピー衝撃試験および 3 点曲げ疲労試験を行なった。これら 3 種類の曲げ試験の試験片形状、負荷方法はすべて同じであり、試験片は長手方向を繊維方向とし、その形状は厚さ 3 mm、幅 10 mm、長さ 100 mm の短冊形で、3 点曲げのスパンは 60 mm である。

上述の 10 種類の積層構成の FRP 積層板について、静的試験はたわみ速度 $V=20$ mm/min で、衝撃試験は $V=1.2 \times 10^5$ mm/min で行ない、疲労試験では荷重振幅一定で繰返し負荷速度 $f=2$ Hz の正弦波形による片振り曲げ負荷を室温において加えた。^{10), 11)}

さらに、CFRP, AFRP および Fig. 1 の A-4 の C/A ハイブリッド FRP については、静的および衝撃試験を室温から 120°C の範囲の種々の一定温度の下で、疲労試験を $f=2$ Hz では室温、60, 80°C, $f=0.02$ Hz では 40, 60°C の各一定温度の下で行なった。^{12), 13)}

3 曲げ特性と積層構成

静的、衝撃および疲労の曲げ特性と積層構成の関連について考察する。

3.1 静的および衝撃曲げ特性

CFRP, AFRP および C/A ハイブリッド FRP の曲げ強度 σ_b 、破断ひずみ ϵ_b および破壊するまでの吸収エネルギー E_i を Fig. 2 に示す。図中の丸印は静的

Fig. 2. The flexural strength, ultimate strain and energy to peak load of CFRP, AFRP and C/A hybrid FRP.

Fig. 3. Fracture appearances of CFRP, AFRP and C/A hybrid FRP.

曲げ試験，三角印は衝撃試験によるものである。また，黒塗りの印は Fig. 3 に示すように荷重点圧縮側最外 CFRP 層の圧縮破壊が起点となる破壊を示し，白抜き印は荷重点引張側表面 AFRP 層からの引張破壊が起点となる破壊を示す。

Fig. 2 より，C/A ハイブリッド FRP の σ_b ， ϵ_b ， E_t は積層構成によって大きく変化する。また，静的試験と衝撃試験による荷重-たわみ曲線と試験片の破壊状況の本質的な相違はまったくなく，たわみ速度 $V = 1.2 \times 10^5$ mm/min 程度の衝撃試験はたわみ速度の大きい静的試験と見なせる。すなわち，いずれの試験においても σ_b は A シリーズの A-3 材で最大を示し，この値は CFRP のそれとほぼ同じとなる。 ϵ_b は C シリーズでは繰返し単位層厚さによってそれほど変化せず，CFRP の値とほぼ一致するが，A シリーズでは単位層厚さが厚くなるにしたがって増加し，AFRP の値に近づく。 E_t は A-3 材で最大を示し，この値は AFRP の約 1.5 倍，CFRP の約 3 倍にも達する。そして， σ_b ， E_t が最大となる積層構成を境として破壊様式は CFRP 層の圧縮破壊と AFRP 層の引張破壊に明確に分けられる。

3・2 曲げ疲労特性

CFRP の S-N 曲線は，Fig. 4 の ● 印で示すように破壊繰返し数 N_f の増加に伴いかなり大きな低下を示す。そして， N_f の直前の繰返し数まで試験片には外観上の破壊は観察されず，破壊は N_f において圧縮側表面からの圧縮破壊が起点となって生じる。一方，

Fig. 4. The S-N curves of CFRP and AFRP.

AFRP の S-N 曲線は，Fig. 4 の ○ 印で示すように CFRP に比べてかなり低い， N_f の増加に対してほとんど低下しない。試験片には試験開始時から圧縮側荷重点近傍に白化現象が観察されるが，破壊は N_f において引張側表面からの引張破壊が起点となって生じる。

C/A ハイブリッド FRP の S-N 曲線の代表例を Fig. 5 に示す。図中の ● 印は破壊の起点が圧縮側最外 CFRP 層の圧縮破壊，○ 印は引張側表面 AFRP 層の引張破壊であることをそれぞれ示す。すなわち，C シリーズのすべてと A シリーズの A-1，A-2 材は，この図に示す C-4 材のように，CFRP と同様に N_f において圧縮側最外 CFRP 層からの圧縮破壊が起点となって破壊し，S-N 曲線も CFRP と同様に N_f の増加に対してかなり大きく低下する。一方，A シリーズの A-3，A-4 材の破壊は， N_f の小さい領域では AFRP と同様に引張側表面 AFRP 層からの引張破壊が起点となって生じるが， N_f の大きい領域では圧縮

Fig. 5. Typical S-N curves of C/A hybrid FRP.

側最外 CFRP 層からの圧縮破壊が起点となって生じ, $N_f=10^4$ 近傍を境として破壊の様相が明確に分けられると同時に, S-N 曲線も N_f の増加に対してそれほど低下しない領域と大きく低下する領域に分けられる。

4 曲げ特性の時間および温度依存性

静的および疲労の曲げ特性に及ぼす時間（ひずみ速度や繰返し負荷速度）と温度の影響について考察する。

4・1 静的曲げ特性

CFRP, AFRP および A-4 の積層構成の C/A ハイブリッド FRP の各温度における曲げ強度 σ_b とひずみ速度の逆数 $1/R$ （単位は時間）の関係を Fig. 6 の左側に示す。ここで, 3・1 節で述べたように静的試験と衝撃試験の結果には本質的な相違がないことから, 衝撃試験をひずみ速度の大きい静的試験と位置づけて考察する。この図より, 3 種類の FRP の σ_b は著しい温度依存性を示し, 温度の上昇とともにひずみ速度依存性も顕著となる。

3 種類の FRP の σ_b に時間-温度換算則を適用してみると, Fig. 6 の右側に示すように各温度の σ_b はそれぞれ 1 本の滑らかな曲線上にのり, 基準温度 $T_0=100^\circ\text{C}$ における σ_b のマスター曲線が求まり, 時間-温度換算則の成立が確かめられた。この時の時間-温

Fig. 6. The master curves for the flexural strength of CFRP, AFRP and C/A hybrid FRP.

Fig. 7. Time-temperature shift factors of CFRP, AFRP and C/A hybrid FRP.

度移動因子は, Fig. 7 に示すようにマトリックス樹脂のガラス転移温度 $T_g=105^\circ\text{C}$ 近傍を境として低温領域と高温領域で異なる活性化エネルギーを持つ二つのアレニウス式で表わされ, マトリックス樹脂の力学的挙動におけるそれとほぼ一致した。これより, CFRP, AFRP および C/A ハイブリッド FRP の曲

げ強度の時間および温度依存性は, マトリックス樹脂の力学挙動の時間および温度依存性に支配されていると言える。さらに, ここでは衝撃試験を速度の大きい静的試験と見なして整理したが, 上述のようにその曲げ強度には静的な場合のそれを含めて時間-温度換算則が適用できたことから, この衝撃試験は速度の大きい静的試験と位置付けられることの傍証が得られたことになる。

マスター曲線上の実験点は試験片の破壊様式別に表現したが, CFRP はすべて圧縮側表面からの破壊であり, AFRP のそれは引張側表面からの破壊, あるいは明確な破壊が認められないものである。これに対して, C/A ハイブリッド FRP の破壊様式は温度とひずみ速度によって二つに分けられる。すなわち, 高温・長時間（低ひずみ速度）領域では内層 CFRP 層の圧縮破壊が起点となる破壊であり, 低温・短時間（高ひずみ速度）領域では引張側 AFRP 層の引張破壊が起点となる破壊である。そして, 前者の領域では曲げ強度は温度やひずみ速度によって大きく変化するが, 後者においては曲げ強度は多少ばらつくが温度やひずみ速度によってほとんど変化しない。

4・2 疲労特性

4・2・1 S-N 曲線の温度依存性 CFRP,

Fig. 8. The S-N curves of CFRP, AFRP and C/A hybrid FRP (2 Hz).

AFRP および C/A ハイブリッド FRP の繰返し負荷速度 $f=2$ Hz における各温度での S-N 曲線を Fig. 8 に示す。CFRP の S-N 曲線は温度の上昇によって大きく低下する。一方、AFRP の S-N 曲線は室温では破壊繰返し数 N_f の増加に対してそれほど低下しないが、温度が上昇すると N_f の増加に対して低下するようになる。

C/A ハイブリッド FRP の疲労の破壊様式は N_f と温度により二つに分けられる。一つは引張側 AFRP 層の引張破壊であり、図中に白抜きの印で示す。他方は内層 CFRP 層の圧縮破壊であり、黒塗りの印で示す。まず、室温および 60°C ではそれぞれ $N_f=10^4$ および 10^3 近傍を境として N_f の領域により破壊の様相が明確に異なる。また、S-N 曲線は AFRP 層の引張破壊となる領域では N_f の増加に対してそれほど低下しないが、CFRP 層の圧縮破壊となる領域では急激に低下する。一方、 80°C における破壊は N_f の全領域で CFRP 層の圧縮破壊となり、S-N 曲線も単調に大きく低下する。

4・2・2 曲げ疲労強度における時間-温度換算則の成立 CFRP, AFRP および C/A ハイブリッド FRP の $f=2$ Hz における各温度での S-N 曲線にマトリックス樹脂の力学挙動における時間-温度換算則を適用して求めた $f=0.02$ Hz での各温度における S-N 曲線の予測値を Fig. 9 に実線および一点鎖線で示す。これらの予測値はいずれも三角印や四角印で示す同じ条件下の実験値とよく一致することから、曲げ疲労強度の時間および温度依存性もマトリックス樹脂の

Fig. 9. The S-N curves of CFRP, AFRP and C/A hybrid FRP (0.02 Hz).

力学挙動の時間および温度依存性に支配されていると言える。

4・3 静的、衝撃および疲労挙動の相関

3・1 節と 4・1 節で述べたように、C/A ハイブリッド FRP の衝撃挙動はたわみ速度の大きい静的挙動と解釈できる。したがって、衝撃を含めた静的挙動は時間と温度の拡がりの中で観察でき、その時間依存性と温度依存性の間にはマトリックス樹脂の力学挙動に成立するものと同一の時間-温度換算則が成立する。さらに、疲労挙動についても破壊繰返し数に依存することはもちろんのこと、静的挙動と同様に時間（繰返し負荷速度）と温度にも依存し、マトリックス樹脂の力学挙動に成立するものと同一の時間温度換算則が成立する。

このような事実の見方をかえれば、衝撃を含む静的試験は繰返し負荷回数が 1 回である場合の繰返し負荷（疲労）試験と位置付けられ、静的、疲労のいずれの試験も試験条件は時間 t （ひずみ速度または繰返し負荷速度）、温度 T および破壊繰返し数 N_f の拡がりの中の 1 点として位置付けられ、得られる破壊挙動も試験条件 t , T , N_f の拡がりの中で統一的にとらえることができ、 t , T , N_f の条件によって一義的に決定される。具体的には、C/A ハイブリッド FRP の曲げ挙動は、積層構成によっては時間 t 、温度 T および破壊繰返し数 N_f の増加に対してさほど変化しない t , T , N_f の領域と大きく変化する領域に明確に分けられ、破壊様式も前者では AFRP 層の引張破壊、後者では CFRP 層の圧縮破壊となり明らかに区分できる。

5 曲げ特性の予測

C/A ハイブリッド FRP の曲げに関する変形および破壊基準を示し, 前節で取り上げた積層構成の C/A ハイブリッド FRP の静的曲げ特性の温度依存性を予測し, 実験結果と比較検討する。

5.1 変形および破壊基準

CFRP の応力-ひずみ曲線は, Fig. 10 (a) の模式図に示すように引張りおよび圧縮の最大応力に達するまでは直線であり, それぞれの最大応力に達すると瞬時に破壊する。縦弾性係数 E_c や引張強度 σ_{CT} は温度によってほとんど変化しないが, 圧縮強度 $\sigma_{CC}(T)$ は温度によって大きく変化する。したがって, 室温における引張試験結果より E_c と σ_{CT} を, また種々の一定温度における曲げ試験結果より $\sigma_{CC}(T)$ を容易に決定することができる。一方, AFRP の応力-ひずみ曲線は, Fig. 10 (b) に示すように引張側では最大応力に達するまで直線であり, 最大応力に達すると瞬時に破壊する。圧縮側では最大応力に達しても試験片は破壊せ

Fig. 10. Stress-strain diagrams of CFRP and AFRP.

Fig. 11. Temperature dependence of mechanical properties of CFRP and AFRP.

Fig. 12. Stress and strain distribution models in C/A hybrid FRP.

ずに降伏し, 応力はひずみの増加に対してほぼ一定値を保つ。そして, この降伏応力 $\sigma_{AY}(T)$ が温度によって大きく低下する。したがって, 室温における引張試験結果より縦弾性係数 E_A と引張強度 σ_{AT} を, また種々の一定温度における曲げ試験結果より $\sigma_{AY}(T)$ を容易に決定することができる。このようにして求めた CFRP および AFRP の機械的性質の温度特性を Fig. 11 に示す。

C/A ハイブリッド FRP を構成する CFRP 層と AFRP 層がそれぞれ Fig. 11 に示す機械的性質を保持し, かつ C/A ハイブリッド FRP をこれらの層からなる積層はりで見なすと, その応力およびひずみ分布は Fig. 12 に示すものとなる。この C/A ハイブリッド FRP の破壊は, 引張側 AFRP 層の表面の応力が AFRP の引張強度 σ_{AT} に達した時, あるいは内層 CFRP 層の圧縮側最外面の応力が CFRP の圧縮強度 $\sigma_{CC}(T)$ に達した時のいずれかで生じるものとして行うことができる。

5.2 予測結果と実験結果の比較

C/A ハイブリッド FRP の荷重-たわみ曲線の実験結果と予測結果を Fig. 13 にそれぞれ破線と実線で示

Fig. 13. Load-deflection diagrams of C/A hybrid FRP.

Fig. 14. Comparison of ideal, theoretical and experimental values on the flexural strength of C/A hybrid FRP.

Fig. 15. Comparison of ideal and experimental values on the compressive strength of CFRP and the tensile strength of AFRP.

す。また、曲げ強度の実験値と予測値を Fig. 14 に示す。図中の○、●印は破壊様式が AFRP 層の引張破壊と CFRP 層の圧縮破壊である実験値を示し、細い破線および実線はそれぞれの破壊を基準とした場合の予測値である。

これらの図より、変形に関する予測結果は実験結果とよく一致し、破壊様式が温度によって二つの様式に分けられることも予測できる。ただし、曲げ強度の予測値は 100°C 以上では実験値と一致するが、それ以下の温度では実験値より多少低いものとなる。Fig. 15 の細い実線および破線はそれぞれ CFRP の圧縮強度 $\sigma_{CC}(T)$ および AFRP の引張強度 σ_{AT} の実験値であるが、これらの強度がそれぞれ太線で示すものであるならば、C/A ハイブリッド FRP の曲げ強度も Fig. 14 の太線となり、実験結果と一致することになる。この曲げ強度の予測結果と実験結果の室温近傍における不一致は CFRP の圧縮強度あるいは AFRP の引張強度にあることは上述の通りであるが、ハイブリッド化することによりこれらの強度が実質的に上昇した原因としてはまずハイブリッド効果があげられる。しかし、CFRP の圧縮強度あるいは AFRP の引張強度を正確に評価する実験方法がいまだ確立していないことも要因と考えられ、これらに関しては今後の検討課題である。

本節で示した C/A ハイブリッド FRP の静的曲げに関する変形および破壊基準は最も基本的な力学モデルを基盤とするものである。そしてこの変形および破壊基準により求めた曲げたわみと曲げ強度の予測値は、室温近傍における曲げ強度の予測値が実験値を多少下回ることを除いてよく一致することより、この変形および破壊基準が C/A ハイブリッド FRP の静的曲げに関する材料設計に対して適用可能であることを示している。

6 結 論

C/A ハイブリッド FRP の静的および動的曲げ特

性に及ぼす積層構成ならびに時間および温度の影響について検討した。その結果、静的、衝撃および疲労の曲げ挙動は、試験条件である時間 t (ひずみ速度または繰返し負荷速度)、温度 T および破壊繰返し数 N_f の拡がりの中で統一的にとらえることができ、 t , T , N_f の条件によって一義的に決定された。具体的には、C/A ハイブリッド FRP の曲げ挙動は、積層構成によっては時間 t 、温度 T および破壊繰返し数 N_f の増加に対してさほど変化しない t , T , N_f の領域と大きく変化する領域に明確に分けられ、破壊様式も前者では AFRP 層の引張破壊、後者では CFRP 層の圧縮破壊となり、明らかに区分できた。さらに、C/A ハイブリッド FRP を CFRP 層と AFRP 層からなる積層はりとして見なして各層がそれぞれ単独の機械的性質を保持するとして変形および破壊基準が材料設計に適用可能であることを見出した。

以上の結果はハイブリッド FRP の構造材への適用に関する材料設計の基礎的指針を与えるものである。

(平成 3 年 3 月 19 日 第 20 回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 例えば、A. R. Bunsell and B. Harris, *Composites*, **7**, 157 (1974); R. R. Dixon, 35th SPI, p. 344 (1977); S. Fischer, G. Marom and F. R. Tuler, *Jour. of Mater. Sci.*, **14**, 863 (1979); P. W. Manders and M. G. Bader, *Jour. of Mater. Sci.*, **16**, 2233 (1981); C. Zweben, *Jour. of Mater. Sci.*, **12**, 1325 (1977); 福田 博, 日本複合材料学会誌, **9**, 118 (1983).
- 2) 金原 勲, 材料システム, **3**, 59 (1984).
- 3) 宮入裕夫, 材料システム, **3**, 69 (1984).
- 4) 天城滋夫, 宮野 靖, 日本複合材料学会誌, **11**, 62 (1985).
- 5) 後町光夫, 吉田光則, 野口達夫, 強化プラスチック, **32**, 428 (1986).
- 6) 天城滋夫, 宮野 靖, 材料システム, **5**, 69 (1986).
- 7) 天城滋夫, 宮野 靖, 強化プラスチック, **32**, 415 (1986).
- 8) 天城滋夫, 宮野 靖, 材料科学, **25**, 77 (1988).
- 9) 例えば、J. Bischoff, E. Catsiff and A. V. Tobolsky, *Jour. of American Chemical Society*, **74**, 3378 (1952); M. L. Williams, R. F. Landel and J. D. Ferry, *Jour. of American Chemical Society*, **77**, 3701 (1955); 牟岐鹿楼, 日本機械学会論文集, **64**, 34 (1961); Y. Miyano, M. Kanemitsu, T. Kunio and H. A. Kuhn, *Jour. of Composite Materials*, **20**, 520 (1986).
- 10) 中田政之, 天城滋夫, 新保 実, 宮野 靖, 強化プラスチック, **34**, 503 (1988).
- 11) M. Shimbo, M. Nakada, S. Amagi and Y. Miyano, *Proc. of the Seventh International Conference on Composite Materials*, Vol. **2**, 267 (1989).
- 12) 中田政之, 宮野 靖, 鈴木 恵, 服部陽一, 日本複合材料学会誌, **16**, 22 (1990).
- 13) 中田政之, 宮野 靖, 鈴木 恵, 服部陽一, 材料, **40**, 199 (1991).