

論文 FRP シートにより横方向補強されたコンクリートの圧縮性状に及ぼすハイブリッド効果に関する研究

須田康之^{*1}・三井雅一^{*2}・福澤公夫^{*3}・舟川勲^{*4}

要旨: FRP シートをコンクリート最外縁に巻立て圧縮靱性を向上させる報告がこれまで多く報告されてきている。報告によるとシートの種類によってコンクリートの圧縮性状が大きく変化することが確認されている。そこで、特長の異なる 2 種類の FRP シートを組み合わせることで単一の FRP シートでは実現できない効果(ハイブリッド効果)について実験的に検討を行った。実験では、巻立て方法の違いにより圧縮性状が大きく異なり、巻立て方法の一つである独立層ハイブリッド巻立てにおいては 7 %を超える終局圧縮ひずみを示し、高い圧縮靱性の向上効果が認められた。さらに、同巻立て方法においては緩衝材の厚さが大きく影響をすることなどを確認した。

キーワード: FRP シート, 巻立て, ハイブリッド, CFRP, GFRP, 靱性向上

1. 序論

近年、軽量、高強度、高耐腐食性などの優れた特長を持つ FRP をコンクリートの補強材に用いることが注目されている。柱状コンクリート構造物に対しては、その部材の最外縁に巻立てることで一軸圧縮に対する耐荷力や曲げあるいはせん断に対する変形性能を向上させる FRP シート巻立て工法が注目され多くの研究が行われるとともに実構造物へも盛んに適用されている。これまでの FRP シートによる横方向補強に関する報告は、単一の種類の FRP シートによるものであり、その成果によると FRP シートによる補強効果は、用いる連続繊維の種類により変化することが確認されている。例えば、高強度・高弾性の特長を有する FRP シートを用いて横方向補強を行うことで圧縮強度に顕著な増加が確認される。また伸び能力の大きい FRP シートを用いることで軸方向圧縮ひずみの向上が図れるが、巻立てる種類および繊維量に依存するものの、その終局圧縮ひずみは 2 %前後が最大と考えられる^{1),2),3)}。

本研究は、特長の異なる 2 種類の連続繊維シ

ートを組み合わせることで単一の連続繊維シートでは実現できない効果(以下、ハイブリッド効果という)について実験的に検討を行うものである。実験では、1)同一母材内に 2 つの連続繊維シートを重ね合わせ巻立てる方法(以下、層間ハイブリッド巻立て方法という⁴⁾)、それぞれの FRP シートを独立して配置させる巻立て方法(以下、独立層ハイブリッド巻立て方法という)の比較とともに、独立層ハイブリッド巻立てを行う供試体について、2)緩衝材の厚さが圧縮性状に及ぼす影響および 3)巻立て量が圧縮性状に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験方法

2.1 因子と水準

FRP シートの巻立てには、100 φ × 200mm の円柱供試体を用いた。表-1に供試体の作製に用いたコンクリートの配合を示す。細骨材には砕砂を、粗骨材には最大寸法 20mm の砕石を使用した。スランプは 8.0cm であり、材齢 28 日までの水中養生終了後、1 週間気中に静置した後、プライマー塗布および FRP シートの巻立てを行い 3 日後に圧

*1 茨城大学大学院 理工学研究科 博士前期課程 (正会員)
 *2 茨城大学大学院 理工学研究科 博士後期課程 (正会員)
 *3 茨城大学工学部 都市システム工学科 教授 工博 (正会員)
 *4 (株)青木建設 研究所 材料研究室 (正会員)

表-1 コンクリートの配合

W/C [%]	s/a [%]	スランプ [cm]	空気量 [%]	
55.0	41.9	8.0	4.0	
単位量 [kg/m ³]				
W	C	S	G	Ad.*
170	310	767	1019	0.775

* AE 減水剤使用

表-2 連続繊維シートの力学的特性

	炭素繊維	ガラス繊維
繊維目付 [g/m ²]	300	300
設計厚さ [mm]	0.165	0.118
引張強度 [MPa]	4028	1970
弾性係数 [GPa]	372	73
破断ひずみ* [%]	1.08	2.70

* 引張強度を弾性係数で除した値

表-3 因子と水準

因子	水準
巻立て方法	層間ハイブリッド, 独立層ハイブリッド
緩衝材厚さ [mm]	2, 4, 6
巻立て量 [層] (CFRP + GFRP)	1+3, 1+1, (1+0)

表-4 実験の組合せ

供試体	巻立て方法	緩衝材厚さ [mm]	巻立て量 [層]	
			CFRP	GFRP
A	層間ハイブリッド	—		
B	独立層ハイブリッド	2	1	3
C		4		
D		6		
E		4		
F	単一層	—	1	0

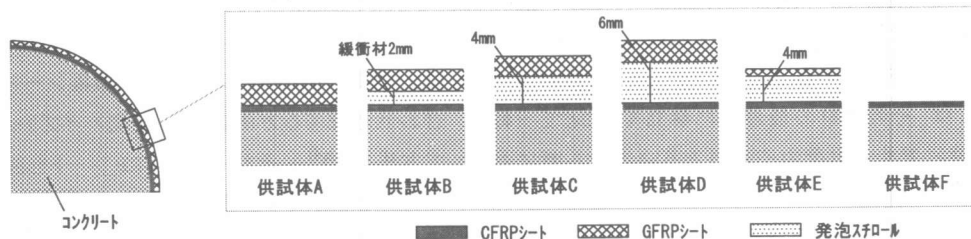


図-1 各供試体の巻立て補強方法

縮試験を行った。同一の養生を行ったコンクリートの試験時における一軸圧縮強度は 46.1MPa であった。使用した連続繊維シートの力学的特性を表-2に示す。表に示すように弾性係数が 372GPa と高弾性を有する炭素繊維シートと、破断ひずみが 2.70 % と高い伸び性能を有するガラス繊維シートを用いた。

巻立てを行うコンクリート表面は、サンドペーパー処理をした後プライマー塗布を行った。表-3に実験の因子と水準を示す。因子は、巻立て方法、および独立層ハイブリッド巻立てにおける緩衝材の厚さ・巻立て量である。巻立て方法としては、炭素繊維シートとガラス繊維シートを同時に巻立て、母材であるエポキシ樹脂層を共有する層間ハイブリッド巻立て方法と、それぞれの FRP シート間に緩衝材を配置する独立層ハイブリッド巻立て方法の

2 種類を行った。独立層ハイブリッド巻立て方法においては、緩衝材の厚さの影響を検討するために 2mm, 4mm および 6mm の 3 水準を設けた。

また、巻立て量がハイブリッド効果に及ぼす影響を検討すべく、表-3に示すように、内側に巻立てる CFRP シートを 1 層として、外側の GFRP シートを 1 層あるいは 3 層として試験を行った。ここで、式-1により算出される繊維拘束圧 σ_{Lf} ¹⁾にて拘束可能量を示すと CFRP シート 1 層は 20.9MPa, GFRP シート 3 層では 21.9MPa となり、内側の繊維拘束圧と外側の繊維拘束圧がほぼ同値となる。

$$\sigma_{Lf} = \frac{1}{2} p' f_t \quad (1)$$

ここに、 p' : 換算繊維比 (= $4 A_f / D h$)
 D, h : 供試体直径, 高さ (mm)
 A_f : h あたりの繊維断面積 (mm²)
 f_t : 繊維の引張強度 (MPa)

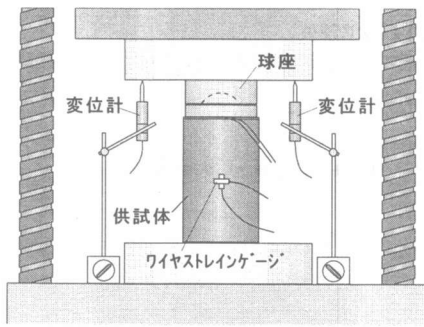


図-2 載荷方法

表-3に示すように比較のため CFRP シート 1 層のみの供試体についても行った。実験の組合せを、表-4に示す。各水準ごと 4 体の供試体を作製した。

2.2 各供試体の巻立て方法

図-1に各供試体の巻立て補強方法を示す。独立層ハイブリッド巻立てを行う供試体 B ~ E は、内側の CFRP シートを巻立て硬化した後に、供試体中央部に軸方向圧縮ひずみおよび周方向ひずみを測定するためのワイヤストレーンゲージを貼付した。ゲージの外側の FRP シートあるいは緩衝材の移動に伴う影響を受けないようにするためゲージはブチルゴムシートによって保護を行った。ゲージの貼付後、所定の厚さの緩衝材を巻き付けて、その上から GFRP シートの巻立てを行った。また、外側の GFRP シートについても、樹脂の硬化後、ゲージを軸方向および周方向に貼付した。層間ハイブリッド巻立てを行う供試体 A については、外側の GFRP シートのみにゲージを貼付した。なお、大きい軸方向ひずみが予想されたため FRP シートに貼付したゲージは 10 % 程度の大ひずみが測定できる塑性域用ゲージ(ゲージレンジ 10mm)を使用した。また、いずれの供試体ともに FRP シートのラップ長は 100mm とした。

2.3 載荷方法および計測方法

図-2に載荷方法を示す。載荷は容量 3MN の高剛性万能試験機にて行った。載荷速度は、推定される最大荷重の約 2/3 までは毎秒 0.25MPa にて載荷を行い、その後は、毎分 1500 μ の単調一軸圧縮状態にて最終破壊まで載荷を行った。供試体側面に貼付したワイヤストレーンゲージにて供試体

の軸方向圧縮ひずみおよび周方向ひずみの測定および変位計にて載荷板間の軸方向変位を測定した。荷重、ひずみおよび変位量は、急激な変化も測定できるように毎分 200 回の測定を行った。なお、補強を行わない供試体(以下、ブランク供試体という)の応力ひずみ関係の測定には、ワイヤストレーンゲージ(ゲージレンジ 60mm)およびコンプレッソメータを用いて行った。ワイヤストレーンゲージと変位計から求める軸方向圧縮ひずみはほぼ一致していたので応力ひずみ図には変位計から求めるひずみを使用した。

3. 実験結果

3.1 巻立て方法が圧縮性状に及ぼす影響

図-3(a)に、CFRP シート 1 層、GFRP シート 3 層を用いて、層内ハイブリッド巻立てを行う場合(供試体 A)と独立層ハイブリッド巻立てを行う場合(供試体 C、緩衝材厚さ 4mm)の圧縮性状の比較を示す。この図には CFRP シートを 1 層のみ巻立てた場合(供試体 F)および FRP シートによる補強を行わないブランクの応力ひずみ曲線も併せて示す。図-3(b)には、周方向ひずみと軸方向圧縮ひずみの関係を示す。

図-3(a)から、独立層ハイブリッドの供試体 C の圧縮性状は 2 つの峰部を有する曲線(以下、双峰曲線という)を示し、最初の峰部分までの曲線は CFRP シート 1 層のみを巻立てた供試体 F とほぼ同じ曲線を示す。図-3(b)の供試体 C と供試体 F の CFRP シートの周方向ひずみも、同じ挙動を示すことから、最初の峰部までは CFRP シートのみの横拘束力が作用しているといえる。供試体は内側の CFRP シートの破断直後に、外側の GFRP シートが拘束効果を発揮し、その結果として双峰曲線の圧縮性状を示すものと考えられる。それに対し、層間ハイブリッド巻立てを行った供試体 A では、圧縮強度および終局圧縮ひずみの顕著な増加が確認される。図-3(b)の供試体 F に示されるように CFRP シート単層では周方向ひずみが 0.6 % 程度にて破断するが、GFRP シートと組み合わせることで、破断時の周方向ひずみが約 1.5 倍となる。本研究

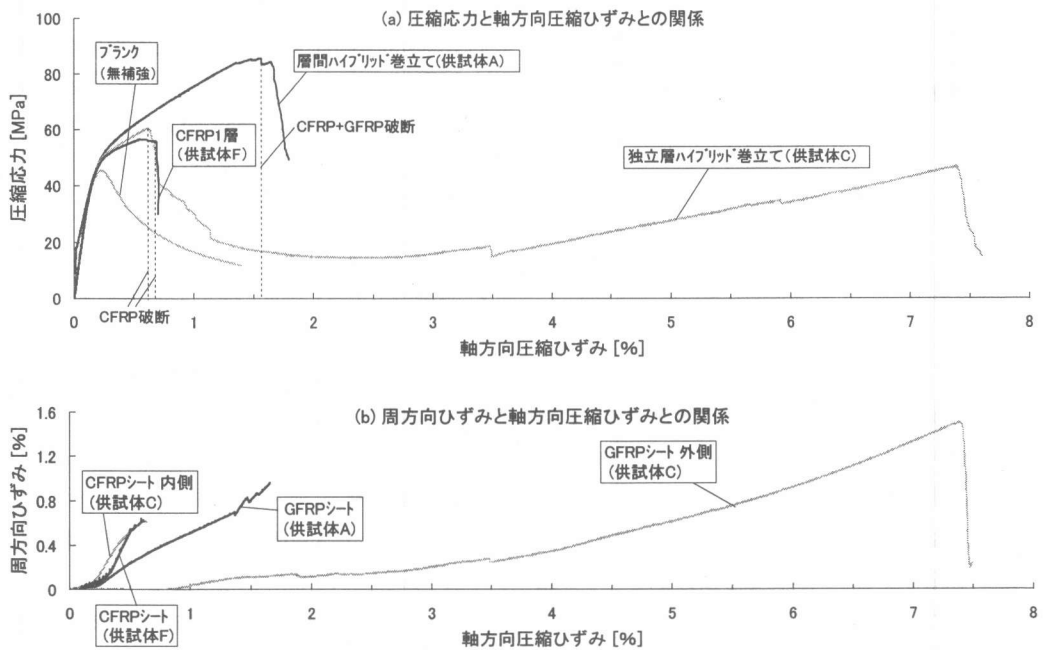


図-3 巻立て方法が圧縮性状および周方向ひずみに及ぼす影響

と同様に CFRP シートと GFRP シートを用いて層間ハイブリッド化した FRP シートの単純引張試験において、破断伸びが CFRP シート単体の破断伸びを上回るハイブリッド効果がこれまで報告されているが⁵⁾、巻立て補強を行った場合についても同様のハイブリッド効果を発揮することが確認された。

そこで、繊維拘束圧をもとに各巻立て方法における拘束過程を考えると以下のように推定されよう。すなわち、層間ハイブリッド巻立てを行う場合では、初期から炭素繊維シートとガラス繊維シートの両方により繊維拘束圧が発現するため、コンクリートの圧縮性状としては前述のように圧縮強度の増加が顕著となる。そして、炭素繊維の破断とともに両方で保持していた繊維拘束圧をガラス繊維のみで負担しなければならなくなる。その時点においてガラス繊維はその負担に耐えることができずにガラス繊維も同時に破断してしまう。それに対し、独立層ハイブリッド巻立てを行った場合では、初期には、炭素繊維のみが繊維拘束圧を発現し、炭素繊維が破断すると緩衝材を介して、外側のガラス繊維が内部のコンクリートの体積膨脹を受け繊維拘束圧

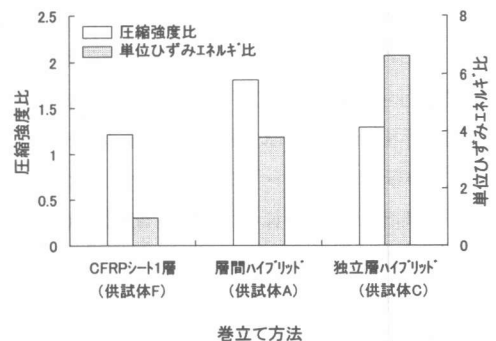


図-4 圧縮強度比, 単位ひずみエネルギー比の比較

が増加する過程を辿るものと推定される。

図-4に応力ひずみ曲線の面積で表される単位体積あたりのひずみエネルギー(以下、単位ひずみエネルギーという)についてブランク供試体の値に対する比で示す。ここで、単位ひずみエネルギーの算出は FRP シートの破断時までの応力ひずみ曲線の面積とした。ブランク供試体については圧縮強度の 1/3 の応力低下時点までの値とした。得られたブランク供試体の単位ひずみエネルギーは 0.301MPa である。図-4に示されるように、独立層

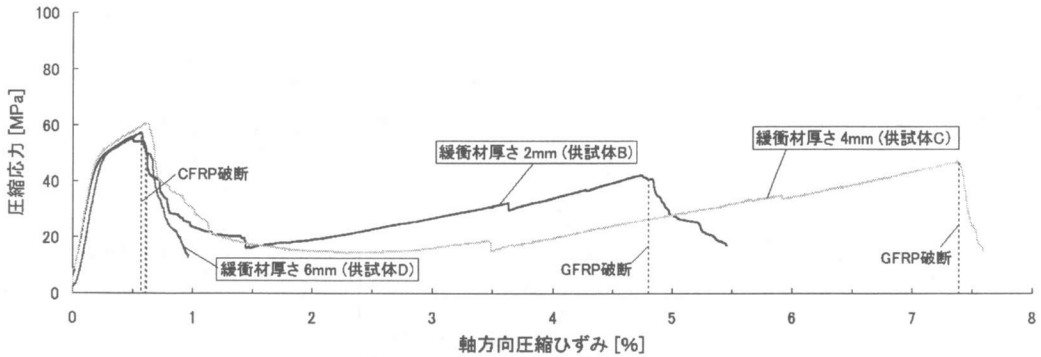


図-5 緩衝材の厚さが圧縮性状に及ぼす影響

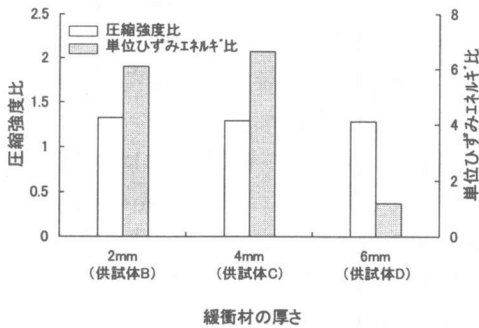


図-6 緩衝材の厚さが圧縮強度比および単位ひずみエネルギー比に及ぼす影響

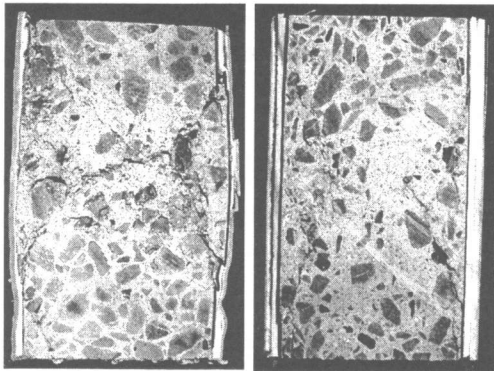


図-7 供試体内部の破壊状況

ハイブリッド巻立てを行ったコンクリートの単位ひずみエネルギーの増加はブランク供試体の約 6.6 倍と非常に大きく、独立層ハイブリッド巻立て方法が変形性能の向上に有効であることが改めて確認できる。

3.2 緩衝材の厚さが圧縮性状に及ぼす影響

図-5に、緩衝材の厚さを変化させて独立層ハイブリッド巻立てを行ったコンクリートの圧縮性状の比較を示す。図に示されるように、緩衝材の厚さが2mm(供試体B)から4mm(供試体C)へ増加すると、軸方向圧縮ひずみが顕著に増加することが確認できる。しかしながら、緩衝材の厚さを6mmとした供試体Dでは、内部のCFRPシートの破断後、荷重は再増加を示さず最終破壊に至った。図-6に圧縮強度および単位ひずみエネルギーのブランク供試体の値に対する比を示す。圧縮強度比は緩衝材厚さに関係なく1.3程度となった。図-7に試験後の供試体内部の状況を示す。前述のように、緩衝材の厚さが4mmの供試体Cでは外側のGFRPシートの破断まで圧縮変形したため内部には大きな損傷が確認されるが、緩衝材厚さ6mmの供試体Dには供試体Cのような損傷は確認されない。

3.3 巻立て量が圧縮性状に及ぼす影響

図-8に、内側のCFRPシートを1層とし、外側のGFRPシートの層数を1層とした供試体(供試体E)および3層とした供試体(供試体C)の圧縮性状を比較した結果を示す。また図-9に、両者の圧縮強度と単位ひずみエネルギーのブランク供試体との比について示す。図-8に示すように、外側のGFRPシートを1層としても、内部のCFRPシートが破断した後にその補強効果が、3層(供試体C)を巻立てた供試体に比べ少ないものの発揮された。また、終局圧縮ひずみについても約5%といった大きい値を示した。また、図-9に示すように、

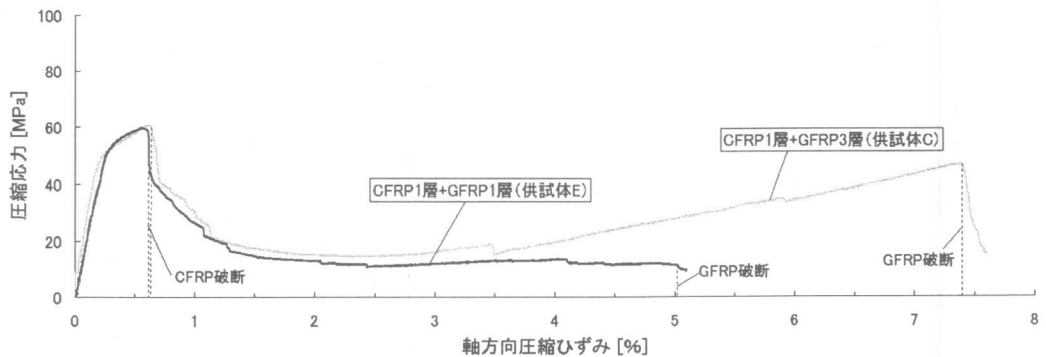


図-8 巻き立て量が圧縮性状に及ぼす影響

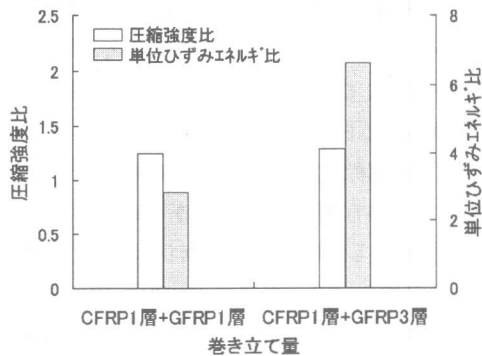


図-9 巻き立て量が圧縮強度比および単位ひずみエネルギー比に及ぼす影響

外側の GFRP シートを 1 層としてもブランク供試体の 2.8 倍の単位ひずみエネルギーを示し変形性能の向上が十分に図れることが示される。今後、この巻き立て量の影響について、さらに水準を設け検討を行うとともに、外側の FRP シートの種類についても検討を行い独立層ハイブリッド巻き立ての有効性を検証する予定である。

4. 結論

内側に炭素繊維シート、外側にガラス繊維シートという 2 種類の連続繊維シートを組合せて横方向補強する場合の圧縮性状について行った本研究の結果から次のことがいえよう。

(1) 炭素繊維シートとガラス繊維シートの強さをほぼ等しくして巻き立てを行った場合、層間ハイブリッド巻き立て方法では、圧縮強度および終局圧縮ひずみが顕著に増加する。それに対し、独立層ハイ

ブリッド巻き立て方法では、圧縮強度は変化がないものの、終局圧縮ひずみは層間ハイブリッド巻き立て方法よりもさらに増加する。本研究の場合、7% を超える値を測定した。

(2) 独立層ハイブリッド巻き立て方法における緩衝材の厚さは、圧縮性状に大きく影響を与える。厚すぎると、緩衝材にて内部のコンクリートの体積膨張が吸収され外側の GFRP シートに横拘束が伝達されずに最終破壊に至る。

(3) 外側に巻き立てる GFRP シートの強さを内側の CFRP シートのそれより小さくする場合、CFRP シート破断後の荷重の再増加傾向は低減するものの、終局ひずみは大きく、高い変形性能が得られる。

参考文献

- 1) 福澤公夫, 沼尾達弥, 三井雅一, 野崎秀洋: 炭素繊維およびアラミド繊維により横補強されたコンクリートの圧縮性状, 土木学会論文集, V-40, pp.119-130, 1998.
- 2) 細谷学, 川島一彦: 炭素繊維シートで横拘束したコンクリート柱の応力度~ひずみ関係に及ぼす既存帯鉄筋の影響とその定式化, 土木学会論文集, No.620, V-43, pp.25-42, 1999.
- 3) 渡部憲, 本田義博, 白井伸明, 金刀督純: FRP シートにより補強されたコンクリート柱の横補強効果に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.1189-1194, 1997.
- 4) 日本材料科学会編: 複合化と材料, 1993.
- 5) 日本複合材料学会編: 複合材料のはなし, 1997.