擬等方性積層複合材料の機械的性質†

芳 我 攻*

Mechanical Properties of Quasi-Isotropic Laminated Composites

by

Osamu HAGA*

Mechanical properties of quasi-isotropic glass-cloth laminated composites under uni-axial tension and uni-axial bending loadings were discussed experimentally and theoretically. The results obtained are summarized as follows.

(1) In regard to the elastic properties, the results calculated by the lamination theory agreed well with the experimental results.

(2) The degree of anisotropy of flexural modulus decreased with decreasing the thickness of homologous lamina and the laminated plate became approximately isotropic. "Homologous lamina" means the lamina group which has the same orientation angle of fiber.

(3) It is clear that both the tensile and flexural strength are anisotropic and their anisotropy can be relaxed by dividing each homologous lamina into many thin laminate and laying-up them alternately.

(4) A way of theoretical prediction of anisotropic strength was proposed based on the fracture mechanism. In regard to the tensile strength, the estimated values agreed well with the experimental results. As to the flexural strength, however, the estimation did not agree well with the experimental ones except the plate composed of four layers.

キー・ワード: FRP, 擬等方性積層板, 機械的性質, 単純引張り, 単純曲げ

1 緒 言

一方向繊維強化プラスチックは強い異方性をもつがこれを等角対称積層すると、片側積層数 $N \geq 3$ のとき、引張弾性特性は面内等方性となる。また単層板が織物状繊維強化プラスチックのような正方晶系に属する¹⁾場合には $N=2$ でも等方性となることが知られている。このような積層板を擬等方性積層板という。これらFRP積層板では応力がある大きさに達すると材料内部の繊維とマトリックスの界面はく離やマトリックスの割れなどが発生し、以後の変形は弾性変形と塑性変形の合成されたものとなり、しかもその割合は応力に依存する²⁾。したがってそのような変形挙動の延長上にある引張強度は異方性となるかもしれない。一方この積層板の曲げ特性を考えると、曲げに対しては最外層の材料特性が大きく影響することから、負荷方向と最外層板の繊維方向¹⁾の位置関係によって弾性特性は変化し異方性となる。単層板に強度的異方性があるから当然曲げ強さにも異方性があると思われる。このようにFRPの擬等方性板には特異な性質があるがこのことについては主に弾性理論的に検討されており、破壊強度にまで言及した研究は、擬似等方性積層板の引張特性に関する研究³⁾以外は極めて少ない。そこで本報

では前述の正方晶系単層板として、経糸と緯糸の打込み数の等しいロービングガラス平織クロス強化材とするFRPを用い、繊維方向を 45° 回転させつつ積層して得られる擬等方性板について、その引張りと曲げに関する諸特性を実験的に検討した。また強度の理論的推定についても破壊様相との関連から若干の考察を試みたので合せて報告する。

2 実験方法

2.1 積層板の構成

一般に積層板は板厚を必要とするために数多くの単層板から成り立っている。本報でも板厚5mm程度をもつ場合を考え、ロービングクロス16枚で積層することにした。したがって前述の 45° 等角対称積層板を構成する方法としては次の3とおりの方法がある。

(i) 4枚を一組としてその繊維方向を 45° 回転させて対称積層する。

(ii) 2枚を一組として同様に積層する。

(iii) 1枚ずつ 45° 回転させつつ対称積層する。

今積層板の最外層の繊維方向をX軸とY軸にとれば各層の繊維方向はX軸と 0° および 90° となるか、 $\pm 45^\circ$ となるかのいずれかであるから、上記3種類の積層板の構成を次のような記号で表すことにし、それぞ

† 原稿受理 昭和59年8月23日 Received Aug. 23, 1984

* 正会員 千葉大学工学部 千葉市弥生町, Faculty of Engineering, Chiba University, Yayoi-cho, Chiba

Fig. 1. Constitution of quasi-isotropic laminates.

れ4層構造, 8層構造, 16層構造のように呼ぶことにする。またこれら種々の厚さをもつ層は同一繊維配向角を有する単層板の集りであることから同位層 (homologous lamina) とよび単層板と区別する。

- (i) $[(0-90)^4/(\pm 45)^4]_s$, (ii) $[(0-90)^2/(\pm 45)^2]_{2s}$
(iii) $[(0-90)/(\pm 45)]_{4s}$

Fig. 1 に X 軸方向から見た積層構造を示す。なお単層板の基本的性質を測定するため全層繊維方向をそろえた積層板を製作した。構造記号は $[(0-90)^8]_s$, $[(\pm 45)^8]_s$ である。

2.2 試験片

- (1) 基材。樹脂=不飽和ポリエステル
(触媒 B. P. O 1.5 w%)
繊維=ロービング平織クロス
(打込み比 1 : 1)

(2) 製作法。ハンドレイアップ+ホットプレス加熱硬化 90℃ 3 時間, 脱型後 120℃ 4 時間アフタキュア。繊維含有率 45±1%。1 枚積層ごとに減圧脱泡槽にて脱気。総積層枚数=16

(3) 寸法。最外層の繊維方向の一つを基準として負荷方向が 0°, 22.5°, 45° を成すような以下に示す寸法の試験片を作製した。

- a) 引張試験片: 300(L)×30(w)×5(t), チャック部 1.5 mm 厚ボール紙補強, 短冊形。
b) 曲げ試験片: 120(L)×15(w)×5(t),

2.3 実験方法

(1) 引張試験: 3 種積層構造×3 負荷方向, 計 9 種の測定種類に対し各々 4~5 個の試験片を用いその平均値をもって測定値とした。ヤング率, ポアソン比は試験片中央部両面に貼付した二軸直交ひずみゲージにより測定した。

(2) 曲げ試験: 支点間距離 80 mm, 3 点曲げ, 試験数は引張試験と同じ, 曲げ弾性係数はひずみゲージにより測定した。

試験機はクロスヘッド定速駆動式, 容量 10 トンを使用, 引張試験はクロスヘッドスピード 3 mm/min, 曲げ試験は同 2 mm/min とし, いずれも温度 24℃, 湿度 65% RH の室内で行った。単層板の基本的性質の測定も以上と同様にして行った。

3 実験結果と考察

3.1 弾性的性質

Table I. Experimental results on tensile elastic properties.

Loading direction	Young's modulus (kgf/mm ²)			Poisson's ratio ν		
	0°	22.5°	45°	0°	22.5°	45°
Constitution						
$[(0-90)^4/(\pm 45)^4]_s$	2 120	2 120	2 060	0.19	0.22	0.18
$[(0-90)^2/(\pm 45)^2]_{2s}$	2 130	2 130	2 100	0.20	0.24	0.23
$[(0-90)/(\pm 45)]_{4s}$	2 050	2 180	2 135	0.25	0.26	0.24
Calculation	2 190			0.23		
$[(0-90)^8]_s$	2 450			0.13		
$[(\pm 45)^8]_s$	1 910			/		

Table II. Experimental and calculated results on flexural modulus.

Loading direction	Flexural modulus E_b (kgf/mm ²)			
		0°	22.5°	45°
Constitution				
$[(0-90)^4/(\pm 45)^4]_s$	Exp.	2 500	2 250	1 930
	Cal.	2 610	2 190	1 860
$[(0-90)^2/(\pm 45)^2]_{2s}$	Exp.	2 410	2 290	2 060
	Cal.	2 450	2 250	2 070
$[(0-90)/(\pm 45)]_{4s}$	Exp.	2 360	2 230	2 180
	Cal.	2 390	2 260	2 140
$[(0-90)^8]_s$		2 720		
$[(\pm 45)^8]_s$		1 970

Fig. 2. Coordinate axes.

Table I と II に実験結果と積層板の理論による計算結果を示す。ヤング率, ポアソン比は以下の式(1), (2), 曲げ弾性係数は式(3)~(6)により求めた。

$$E = \frac{2E_x \left(\frac{E_x}{1+\nu_x} + 2G_{xy} \right)}{(3+\nu_x)E_x + 2G_{xy}} \quad (1)$$

$$\nu = \frac{(3\nu_x+1)E_x - 2G_{xy}}{(3+\nu_x)E_x + 2G_{xy}} \quad (2)$$

$$E_b = \frac{3(1-\nu_b^2)D}{2T^3} \quad (3)$$

$$D = \frac{D_{11}D_{22}D_{ss} + 2D_{12}D_{1s}D_{2s} - D_{11}D_{2s}^2}{D_{22}D_{ss}} - \frac{D_{22}D_{1s}^2 - D_{ss}D_{12}^2}{D_{2s}^2} \quad (4)$$

$$\nu_b = \frac{D_{12}D_{ss} - D_{1s}D_{2s}}{D_{22}D_{ss} - D_{2s}^2} \quad (5)$$

$$D_{ij} = \frac{2}{3} \left(\frac{T}{n} \right)^3 \sum_{k=1}^n [\{3k(k-1)+1\} E_{ij}(\phi - \alpha_k)], \quad (6)$$

ここで、 E_X , G_{XY} , ν_X は単層板の弾性定数、 n および T はそれぞれ同位層の総数の $1/2$ 、積層板厚の $1/2$ である (Fig. 1 参照). また $E_{ij}(\phi - \alpha_k)$ は第 k 番目の同位層の弾性定数であり、Fig. 2 のように基準軸 x とその層の繊維の方向の成す角 α_k および基準軸と積層板にかかる負荷の方向の成す角度 ϕ の関数として与えられる.

ヤング率とポアソン比を T と同位層厚 t の比 T/t との関係で整理すると Fig. 3 のようになる. $T/t \rightarrow$ 大のとき同位層の厚さは薄くなることを意味する. ヤング率は負荷方向によらず一定の値を示し、面内等方性であることが確認された. また同位層の厚さの影響も無

Fig. 3. Relation between elastic modulus and thickness ratio T/t .

いこともわかった. ポアソン比は各負荷方向とも同位層の厚さが薄い程大きくなる傾向を示したが負荷方向によるばらつきは比較的小さく、やはり面内等方性となっている. 計算値はほぼ全体の平均値を示しているので実用的には同位層の厚さの影響は無視して差支えない.

曲げ弾性係数について Fig. 4 に示す. 同位層の厚さの影響が著しい. すなわち $T/t=2$ の場合 0° 方向曲げ弾性係数は 45° 方向よりも約 40% も大きい. $T/t=8$ では約 9% 大ききに過ぎずこの場合は実際上等方性で見なしてよい. すなわち曲げに対しては積層板全体の厚さに対する同位層の厚さを薄くすることによって異方性を緩和し等方性板として扱えるようにすることができることが確認できた.

3・2 破壊強度

Fig. 4. Relation between flexural modulus E_b and thickness ratio T/t .

3・2・1 引張強度

(1) 実験結果の考察 Fig. 5 に実験結果を示す. $T/t=2$ では明らかに強度異方性がありその他でも異方性があるが $T/t \rightarrow$ 大とすることにより異方性は減少すること、強度が上昇する傾向があること、引張方向に対する強さの順位は $0^\circ > 45^\circ > 22.5^\circ$ であること等がわかった. このような強さの異方性が生ずる理由や強さの積層構造依存性が生ずる理由を破壊機構の面から考察してみる.

Fig. 5. Relation between tensile strength and thickness ratio T/t .

Fig. 6 (a), (b), (c) は引張破断した試験片の写真である. 0° 方向と 45° 方向の引張りでは繊維方向が負荷方向と 45° をなす層が白化現象を生じ降伏しているが破断はせず、最終強度は負荷方向にある繊維の切断により決まる. 22.5° 方向引張りでは繊維に沿うせん断すべりを生じ最終強度が決まっている. すなわちいずれの方向の負荷に対しても先ずせん断降伏が生ずるが、負荷方向に配列された繊維が無い場合はこのときの荷重が最終強度となり、負荷方向に配列されている繊維がある場合はその繊維が破断するまで負荷は増大する.

(a), (b) and (c) show the tensile failure modes in the directions of 0, 22.5 and 45 degrees, respectively. (e), (f) and (g) show the delamination modes of $\{(0-90)^2/(\pm 45)^2\}_8$, $\{(0-90)^2/(\pm 45)\}_{16}$ and $\{(0-90)/(\pm 45)\}_{16}$ specimens, respectively.

Fig. 6. Photographs of the tested specimens.

よって 0° , 45° , 22.5° の強度順となる。つぎに $0^\circ > 45^\circ$ の強度順の理由であるが、二、三の研究結果からこれは edge-effect によるものであると考えられる。 0° 方向と 45° 方向の引張試験片の X 軸に垂直な断面を見ると前者は対称面から見て外側に $0^\circ-90^\circ$ 層、内側に $\pm 45^\circ$ 層があるが後者は逆に $\pm 45^\circ$ 層が外側に、 $0-90^\circ$ 層が内側になっている。前述の研究結果から類推すると前者では層間に圧縮応力を生じ、後者では逆に引張応力を生ずると考えられる。 45° 方向引張りではこの引張応力によって破断する前に層間にき裂を生

Fig. 7. Tensile stress-strain curves in the directions of 0 and 45 degrees.

じ、各層間の応力伝達が不十分となり最終強度が低下するのである。よって $0^\circ > 45^\circ$ の強度順を生ずる。Fig. 7 は 4 層構造積層板 ($n=2$) の 0° 方向と 45° 方向の引張りの応力-ひずみ図である。 45° 引張りの場合横断方向圧縮ひずみ ϵ_{22} が不連続的に急増している。これは内側の $0-90^\circ$ 層により拘束されていた $\pm 45^\circ$ 層の圧縮ひずみが、層間き裂発生のために拘束がなくなり、瞬間的に急増したためであろう。したがって Fig. 7 は前述の層間応力の積層構造依存性の存在を間接的に証明していると言える。このような層間き裂は同位層の薄い場合にも発生するが層間応力は小さくなるために Fig. 7 にあるような大規模なものではなく局部的なものとなるであろう。したがって同位層の薄い積層板の方が強度が高いと考えられる。Fig. 6 (d), (e), (f) は破断後の層間はく離の様相を示す写真であるが、同位層の厚さの順は $(d) > (e) > (f)$ であり、層間はく離の規模もやはりこの順であるが強度は Fig. 5 に ●印で示されているようにこの逆順となっている。

(2) 引張強度の推定 Fig. 2 の基準軸を繊維交角の二等分線とする。第 k 層の繊維方向応力成分を $\{\sigma_x^{(k)}\}$ 、負荷方向の巨視的応力成分を $\{\sigma_{11}\}$ と書けば両者の関係は次のように表せる。

$$\{\sigma_x^{(k)}\} = [T^{(k)}][E_{ij}(\phi - \alpha_k)[C]\{\sigma_{11}\} \quad (7)$$

$$[C] = n \left(\sum_{k=1}^n \{E_{ij}(\phi + (-1)^k \times 22.5)\} \right)^{-1} \quad (8)$$

$$[T^{(k)}] = \begin{bmatrix} L^2 & M^2 & -LM \\ M^2 & L^2 & LM \\ 2LM & -2LM & L^2 - M^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$L = \sin(\phi + (-1)^k \times 22.5)$$

$$M = \cos(\phi + (-1)^k \times 22.5)$$

前項で述べた破壊機構に基づき降伏-破壊条件として最大応力説を採用する。すなわち単層板の繊維方向引張強度を F_x 、せん断強度を F_{xy} としてこれらを式(7)の左辺に代入して降伏する層を決定し、その層の $G_{xy} = 0$ として層全体の弾性定数の変化を考慮して再応力計算を行い、全層が降伏すればそのときの応力をもって破壊強度とし、そうでない場合は残りの層が繊維破断するときの応力をもって破壊強度とする。ただし式(7)によれば $\phi = \pm 22.5^\circ$ (0° 方向および 45° 方向の引張りに相当) のときの応力は $\{\sigma_x^{(k)}\}_{\phi=22.5} = \{\sigma_x^{(k+1)}\}_{\phi=-22.5}$ となるので 0° 方向と 45° 方向の引張強度は理論的には等しくなり実験結果と合わない。そこで 45° 方向引張りの場合は前項で述べた破壊機構に基づき $\pm 45^\circ$ 層と $0-90^\circ$ 層は破断のかかなり前にはく離しており最終的には各々独立に負荷を分担しているとすれば 11 方向の単純引張りに対する層応力 $\sigma_{11}^{(k)}$ と巨視的応力 σ_{11} の関係は次の単純平均となる。

$$\sigma_{11} = \frac{\sum_{k=1}^n \sigma_{11}^{(k)}}{n} \quad (10)$$

このとき中立面から見て奇数番目の層は $0-90^\circ$ 層, 偶数番目の層は $\pm 45^\circ$ 層となっているので k が奇数のとき $\sigma_{11}^{(k)} = F_x$, k が偶数のとき $\sigma_{11}^{(k)} = F_{45}$ (ただし F_{45} は単層板の繊維方向引張破断ひずみに等しいひずみに対応する単層板の 45° 方向引張応力, Table III 参照) とすれば 45° 方向の引張強度が求められる。

以上の計算結果と測定値の比較を Table III に示す。擬等方性板の 0° と 45° 方向の引張りでは負荷方向の繊維数は $[(0-90)^8]$ 。板の $1/2$ であるが, 強度は

Table III. Experimental and calculated results on tensile strength.

Loading direction	Tensile strength σ (kgf/mm ²)					
	0°		22.5°		45°	
Constitution	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.
$[(0-90)^4/(\pm 45)^4]_8$	26.1	26.7	21.0	21.7	24.1	24.0
$[(0-90)/(\pm 45)^2]_{28}$	27.9	/	25.7	/	26.7	/
$[(0-90)/(\pm 45)]_{48}$	28.3	/	25.9	/	27.6	/
$[(0-90)^8]_8$	39.0 (Ultimate strain $\epsilon=2.3\%$) 12.5 (Ultimate strength) (Tensile stress= 9.0 kgf/mm ² at tensile strain $\epsilon=2.3\%$)					
$[(\pm 45)^8]_8$						

$1/2$ よりかなり大きいことがわかる。これは前述したように $\pm 45^\circ$ 層が降伏した後も応力を分担し, 負荷方向繊維層にかかる応力を軽減しているためである。4層構造板 ($n=2$) では実験値と良く一致した。しかし以上の計算では同位層の厚さの影響は考慮されていないので $n>2$ の場合には両者は一致しない。層厚の効果については今後の検討にまたねばならない。

3・2・2 曲げ強度

(1) 実験結果の考察 Fig. 8 に結果を示す。これが

Fig. 8. Relation between flexural strength and thickness ratio T/t .

ら明らかなように明確な異方性を示すものは4層構造板 ($n=2$) だけであり, 他のは実際上等方化されていると見なしてよい。 $n>2$ では単層板の曲げ強度とほぼ等しい強度となっているがこれは引張りでは擬等方化することにより単層強度より最低でも27%も強度低下を生じたことと比べて極めて対照的なことである。

つぎに曲げ破壊の様相について考察する。Fig. 9 に積層構造別に分けた各方向曲げの応力-ひずみ図を示す。この図と試験中の変形の様子の観察および試験後の試験片の観察から曲げ破壊の機構は次のように説明される。

0° 方向曲げ……引張側の繊維破断で最大強度が決まるが図中(a), (b)の 0° 方向曲げでは一度応力が低下してから最大強度が現れている。これは圧縮側荷重点付近で座屈が発生するためであり, この場合は最大強度はかなり低下する。

(a) : $[(0-90)^4/(\pm 45)^4]_8$, (b) : $[(0-90)^2/(\pm 45)^2]_{28}$, (c) : $[(0-90)/(\pm 45)]_{48}$.

Fig. 9. Flexural stress-strain diagrams of the three types of laminate constitution.

45° 方向曲げ……16層構造板を除いて 0° 方向曲げに比べてゆるやかな応力の上昇を示し極大値を生ずる。このとき引張側の $\pm 45^\circ$ 層は完全に白化しておりせん断降伏していることがわかった。また同時に圧縮側が座屈していくのが観察された。図中比較的大きな応力の減少がみられるのはこの座屈の発生によるものと思われる。よってこの方向の曲げ強度は $\pm 45^\circ$ 層のせん断降伏によると考えられる。

22.5° 方向曲げ…… 45° 方向と非常に良く似ている。異なる点は 45° 方向より $d\sigma/d\epsilon$ が大きいこと, 極大値が大きいことである。よって破壊機構は 45° 方向曲げと同様であると推定される。

45° 方向も 22.5° 方向も16層板を除いて最大応力に達した後の変化がゆるやかなのはせん断降伏が次々に内層に及んでいくためであろう。16層構造板では各方向共曲げ軸に垂直に折損することが多く, 応力-ひずみ図でも相違が明確ではなくほぼ等方性板の曲げ破壊の様相となる。以上いずれの場合にも最終段階での応

力の急減が見られるがこれは内層の負荷方向繊維の切断によるものと考えられる。

(2) 曲げ強度の推定 Fig. 2 の 11-22 軸に関する曲げモーメントを $\{M_{11}, M_{22}, M_{12}\}^T = \{M_{11}\}$ と書けば第 k 層の繊維方向の応力成分 $\{\sigma_x\}^{(k)}$ は次式で与えられる。

$$\{\sigma_x\}^{(k)} = [T^{(k)}]_z [E_{ij}(\phi - \alpha_k)] [D_{ij}]^{-1} \{M_{11}\} \quad (11)$$

ただし z は中立面から第 k 層のある面までの距離であり、各層での最大応力を問題とするならば $z = kl/n$ となる。

前項の破壊機構に基づき第 k 層の降伏-破壊条件として引張りの場合と同じく最大応力説を適用する。すなわち式(11)の左辺に $\sigma_x = \sigma_y = F_x$, $\tau_{xy} = F_{xy}$ を代入しこれらの値を与える M_{11} を求める。(単純曲げを考え $M_{22} = M_{12} = 0$ とする) M_{11} の最小値が F_x を与える場合には繊維切断が生じたとして破壊曲げモーメントが決まる。 F_{xy} を与える場合にはせん断降伏を生じたとして降伏後の処理を行い再計算し、いずれかの層が繊維破断するまで繰返し計算を行う。このようにして得られる曲げモーメントのうち最小値を用いて当該方向の曲げ強度を計算する。以上の計算結果と実験値を Table IV に示す。基礎強度 F_x , F_{xy} は 0-90° 層板と $\pm 45^\circ$ 層板の曲げ試験の結果から $F_x = 40.3 \text{ kgf/mm}^2$, $F_{xy} = F_{\pm 45}/2 = 11.5 \text{ kgf/mm}^2$ を用いた。

Table IV. Experimental and calculated results on flexural strength.

Loading direction Constitution	Flexural strength σ_b (kgf/mm ²)			
		0°	22.5°	45°
[(0-90) ⁴ /(± 45) ⁴] _s	Exp.	39.9	36.8	32.3
	Cal.	39.0	35.3	31.1
[(0-90) ² /(± 45) ²] _{2s}	Exp.	37.3	40.4	39.5
	Cal.	37.3	39.3	28.6
[(0-90)/(± 45) _{1s}	Exp.	41.8	38.6	41.3
	Cal.	36.4	41.3	29.3
[(0-90) ⁸] _s		40.3		
[(± 45) ⁸] _s		23.1		

計算値と実験値を比較すると 0° および 22.5° 方向曲げでは両者は良く一致していることがわかる。一方 45° 方向曲げでも 4 層構造板では両者は一致しているが多層構造となると計算値は実験値の 70~80% の低い値となり、これは引張りの場合と同様多層化によるなんらかのプラスの効果を考慮すべきことを示唆しているものである。以上荒い近似ではあるが一応曲げ強度の異方性を推定できた。

4 結 言

経糸方向と緯糸方向の強度の等しいガラス繊維織物を強化材とする、一定数量の FRP 単層板を 45° 等角積層して作られる擬等方性積層板の引張りと曲げ特性について実験的ならびに理論的に検討した。その結果得られた結論は次のとおりである。

(1) 一般積層板の理論から予想されたように、弾性特性は引張りに対しては等方性、曲げに対しては異方性であること、引張弾性定数に対しては積層構造の影響はないこと、曲げ弾性率の異方性は実用的には 8 層構造以上では等方性としてよいことなどが確認された。

(2) 実験による引張強度および曲げ強度は最も単純な 4 層構造の場合かなり強い異方性を示すが、多層構造化することにより両者共等方性化されることがわかった。

(3) 破壊機構を明らかにし、その結果に基づき強度の理論的推定を行い、引張強度について実験値との良い一致が得られた。しかし曲げ強度については推定値が低く精度が不十分であった。引張り、曲げ共に多層化による強度向上の効果があることがわかったが、これを理論的にどのように評価するかは今後の課題としたい。

(昭和 58 年 9 月 28 日 第 27 回材料研究連合講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 林 毅編, “複合材料工学”, p. 542 (1971) 日科技連。
- 2) 芳我 攻, 日本複合材料学会誌, **6**, 24 (1980)。
- 3) 植村益次, 井山向史, 材料, **33**, 91 (1984)。
- 4) 例えば, A. S. D. Wang, J. Composite Materials, **11**, 92 (1977)。