

繊維強化複合材料の開発 —異方積層複合材料の強度—

Development of Fiber Reinforced Composite Materials
— Strength of Laminate Composite Material —

大蔵明光*・本田 紘一*・寺沢 優一**
Akimitsu OKURA, Kouichi HONDA and Yuichi TERASAWA

1. はじめに

省エネルギー用材料として、特に可動構造材として強く強い材料の開発が急がれている。炭素繊維強化複合材料もその一例である。炭素繊維は製造工程上の問題で、まだ価格が高く特殊な機能用複合材としてのみ使用されているが、一般可動構造材には使用されるに至っていない。しかし最近では化繊メーカーが競って量産の方向を打ち出し、価格の低廉化を目標に検討され始めた。したがって極めて近い将来に一般可動構造材に使用される可能性があると言える。

従来の多くは一方向繊維強化アルミニウム複合材の研究であったが、本研究では異方積層複合材料の製造を研究調査し、その複合材と一方向強化繊維複合材との強度特性を比較検討したのでその結果について述べる。

2. 異方積層複合材の弾性率

プラズマプレー溶射による一方向繊維プリプレグシート¹⁾を素材として異方強化複合材をホットプレス法により作製した。²⁾この場合の繊維の方向は Fig. 1 に示すごとく等角対称になるようプリプレグシートを積層にしてある。このようにして製造した複合材の弾性率を次のように求めた。

プリプレグシートの上(下)積層にした場合の厚さ方向の第 m 層の軸に対する傾き角 α_m は、

$$\alpha_m = \pi/2n + \pi/n \cdot (m-1) \quad (n=1, 2 \dots n) \quad (2-1)$$

この場合、面内剛性マトリックス要素、 A_{ij} ($ij=1, 2 \dots n$), ($n \geq 3$) は

$$\left. \begin{aligned} A_{11} &= A_{22} = \frac{nt}{4} \left[\frac{3(E_L + E_T) + 2\nu_L \cdot E_T}{1 - \nu_L \nu_T} + 4G_{LT} \right] \\ A_{33} &= \frac{nt}{4} \left[\frac{E_L + E_T - 2\nu_L \cdot E_T}{1 - \nu_L \nu_T} + 4G_{LT} \right] \\ A_{12} &= \frac{nt}{4} \left[\frac{E_L + E_T + 6\nu_L \cdot E_T}{1 - \nu_L \nu_T} - 4G_{LT} \right] \\ A_{13} &= A_{23} = 0 \end{aligned} \right\} (2-2)$$

* 東京大学生産技術研究所 複合材料技術センター, 第4部

** 現 KK 神戸製鋼所

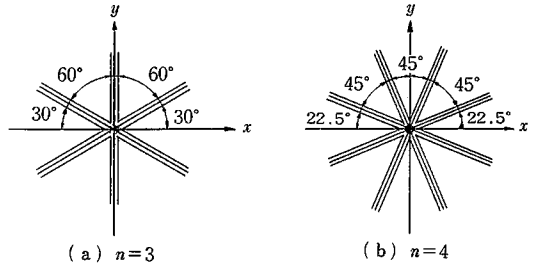


Fig. 1 Schematic of symmetry equal angle laminate plate

任意の Y 方向の弾性係数 $E_1(\phi)$, ポアソン比 $\nu_1(\phi)$, 剪断弾性率 $G_{12}(\phi)$ は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} E_1(\phi) &= N_1 / 2nt \epsilon_1^0 \\ &= (A_{12} \cdot A_{22} \cdot A_{33} - A_{11} \cdot A_{22}^2 + 2A_{12} \cdot A_{13} \cdot A_{23} \\ &\quad - A_{12}^2 \cdot A_{33} - A_{13}^2 \cdot A_{22}) / 2nt (A_{22} \cdot A_{33} - A_{23}^2) \\ \nu_1(\phi) &= -\epsilon_2^0 / \epsilon_1^0 \\ &= (A_{12} \cdot A_{33} - A_{13} \cdot A_{23}) / (A_{22} \cdot A_{33} - A_{23}^2) \\ G_{12}(\phi) &= N_{12} / 2nt \tau_{12}^0 = (A_{13}^2 \cdot A_{22} - 2A_{12} \cdot A_{13} \cdot A_{23} \\ &\quad + A_{11} \cdot A_{22}^2 + A_{12}^2 \cdot A_{33} - A_{11} \cdot A_{22} \cdot A_{33}) / 2nt \\ &\quad \cdot (A_{12}^2 - A_{11} \cdot A_{22}) \end{aligned} \right\} (2-3)$$

(2-3) に (2-2) を代入して

$$\left. \begin{aligned} E_1(\phi) &= \frac{\frac{E_L + E_T + 2\nu_L \cdot E_T}{1 - \nu_L \nu_T} \left\{ \frac{E_L + E_T - 2\nu_L \cdot E_T}{1 - \nu_L \nu_T} \right\}}{\frac{3(E_L + E_T) + 2\nu_L \cdot E_T}{1 - \nu_L \nu_T} + 4G_{LT}} \\ \nu_1(\phi) &= \frac{\frac{E_L + E_T + 6\nu_L \cdot E_T}{1 - \nu_L \nu_T} - 4G_{LT}}{\frac{3(E_L + E_T) + 2\nu_L \cdot E_T}{1 - \nu_L \nu_T} + 4G_{LT}} \\ G_{12}(\phi) &= \frac{1}{8} \left\{ \frac{E_L + E_T - 2\nu_L \cdot E_T}{1 - \nu_L \nu_T} + 4G_{LT} \right\} \end{aligned} \right\} (2-4)$$

(2-4) 式から積層材の弾性率を計算する。ただし、繊維のポアソン比のデータがないので、植村ら³⁾の計算結果、 $\nu_f = 0.30$ を採用する。またマトリックスのポアソン

比はストレインゲージにより実測し、 $\nu_m=0.32$ を得た。

計算のための物性値は、

$$CF : E_f = 23.8 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2, \nu_f = 0.30$$

$$G_f : E_f / 2(1 + \nu_f)$$

$$Al : E_m = 6.2 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2, \nu_m = 0.32$$

$$G_m = E_m / 2(1 + \nu_m)$$

である。

V_f を 10% としたとき、

$$E_c = 7024 \text{ kg/mm}^2$$

$$\nu_c = 0.310$$

V_f を 20% としたとき、

$$E_c = 7890 \text{ kg/mm}^2$$

$$\nu_c = 0.314$$

V_f を 30% としたとき、

$$E_c = 8913 \text{ kg/mm}^2$$

$$\nu_c = 0.316 \quad \text{となる。}$$

3. 実験結果と検討

Fig. 2 中の実線は理論値である。 $n=3$ の実験値は比較的理論値に近い値を示している。 一方向強化材の場合には繊維の配向性が複合材の特性に非常に影響を与えるが、積層材になると多方向の素材の効果ははいつてくるために、一方向強化材の場合ほどその影響をうけないことが考えられる。

Fig. 2 に示した結果で、 $n=3$ と $n=4$ の弾性率を比べてみると、対称等角積層板の理論から考えると、両者は同じはずであるが、実測値は $n=3$ の方が弾性率は高くなっている。これは弾性率の測定を共鳴振動法によったことに起因すると考えられる。すなわち弾性率の測定時に試験片は Fig. 3 のような共振をしているとするならば、曲げの効果がはいつてくる。この対称等角積層板は、Cross elasticity 効果⁴⁾は消えておらず、曲げ剛性に関しては異方性を示す。それゆえに最外層の素材の性質に大きく影響をうけるのである。

最外層の繊維方向が長軸方向となっている $n=3$ と、 22.5° の角度をもった $n=4$ の差違が表れたものと言える。

3-1. 複合材の高温強度

Fig. 4 に一方向強化複合材の高温強度の結果を示す。引張り強度は 550°C で室温の約 50% まで低下している。本研究で得られた結果では 400°C および 550°C での差違は明確ではない。

Fig. 5 に異方強化複合材の引張り強度の温度依存性を示した。この場合は一方向強化材のものと同様の温度依存性を示している。すなわち引張り強度は 300°C 付近まではほとんど低下していないが、 $400\sim 550^\circ\text{C}$ 付近から著しく低下している。

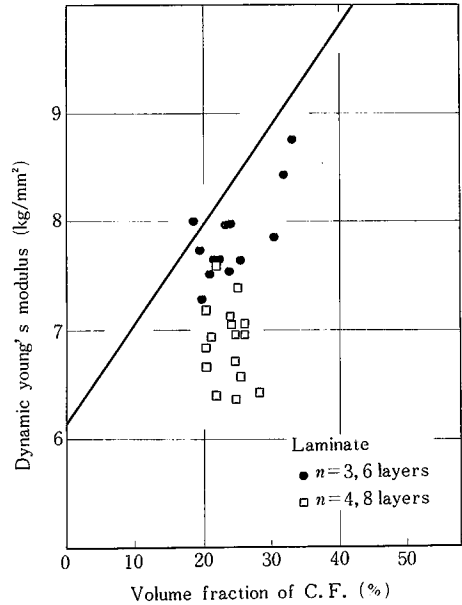


Fig. 2 Dynamic young's modulus of CFRM as a function of V.f.

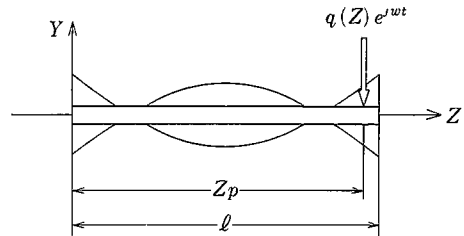


Fig. 3 Forced vibration of unconstrained beam

3-2. 顕微鏡観察

Photo. 1 に一方向強化複合材 ($V_f: 20\%$) の各試験温度での SEM による破面観察を示した。マクロ的には 400°C 以上の試験片は凹凸が多くみられる。これは温度が高くなるにつれ、成型時のマトリックス間の接合の不完全な部分で破断が進行するからであろう。また繊維のプルアウトも非常に多くなっていることがわかる。このプルアウトした繊維の表面には、アルミニウムマトリックスがほとんど残っていない。

単繊維の破断歪みにも大きなバラツキがあることが確認されているが、複合化してもこの影響が表れ、繊維の破断歪みの小さなものから破断する可能性がある。

試験温度 300°C 以下の場合にはマトリックスは軟化しておらず、Fig. 6 に示すように破断したまわりの破断していない繊維によって荷重をささえることができるが、温度が高くなるとマトリックスが軟化し、しかも熱膨張係数の差によって、マトリックスと繊維界面とがルーズ

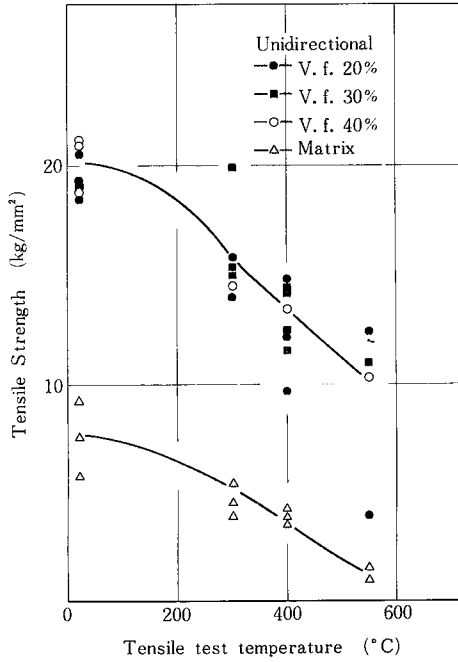


Fig. 4 Temperature dependence of tensile strength of CFRM

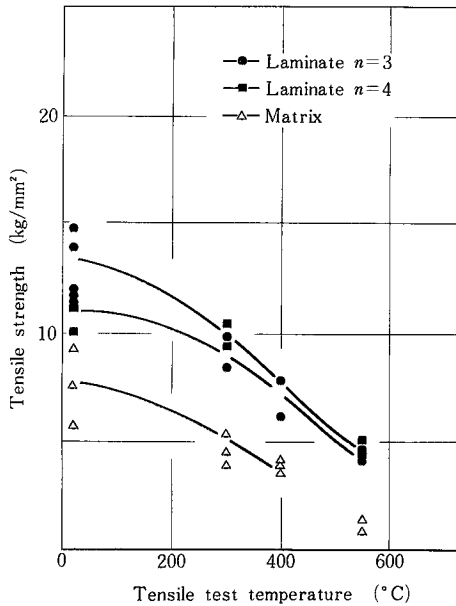
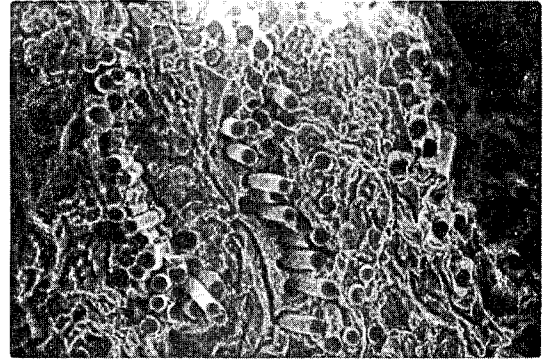
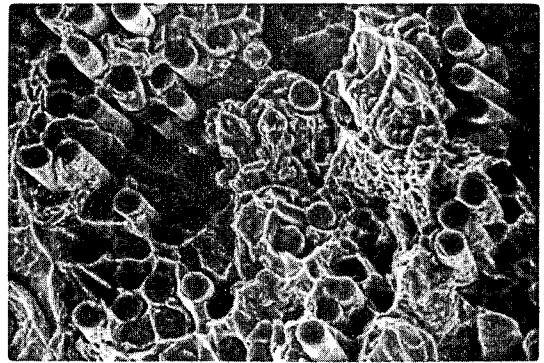


Fig. 5 Temperature dependence of tensile strength of laminate

になってくる. したがってマトリックスには応力が伝播されず, 破断した繊維は強度に寄与しなくなる. その結果繊維のプリアウトおよび強度低下が 550°C 以上におい



(1) ×112



(2) ×560

Photo. 1 Scanning electron micrograph of tensile test specimen Unidirectional V. f. 20% (test temp. R. T.)

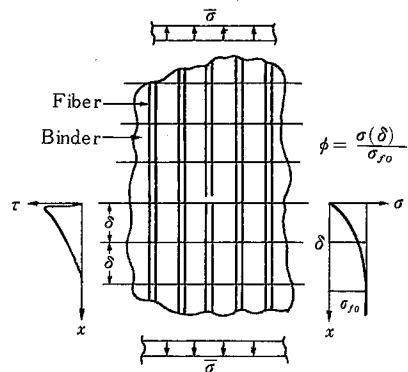
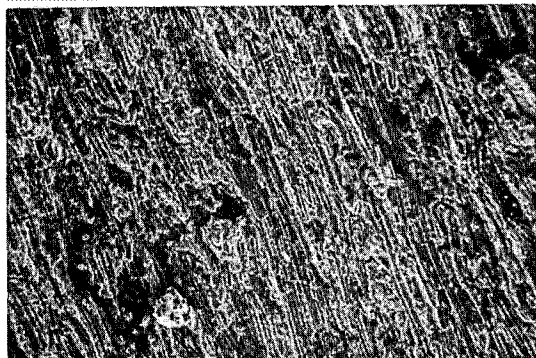


Fig. 6 Fiber reinforced composite (failure model)

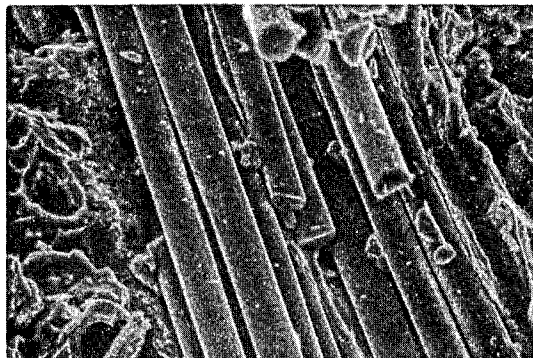
て生ずるものと考えられる.

3-3. 異方積層複合材の破壊

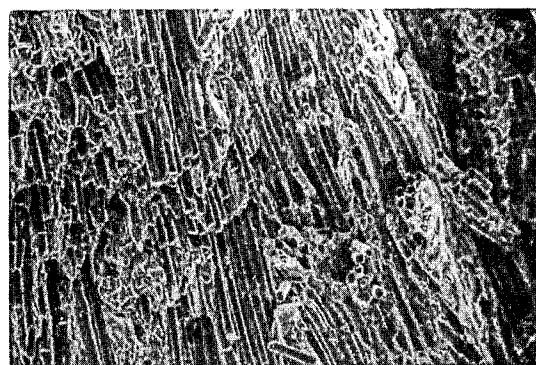
Photo. 2 に $n=3, n=4$ の積層板の高温引張り試験後



$n=3$ $\times 28$

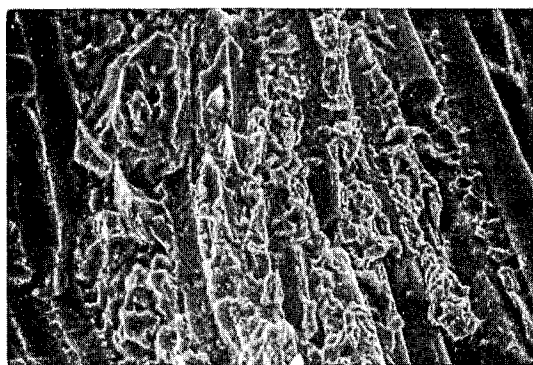


(Test temp. 300°C) $\times 448$



$n=4$ $\times 56$

Photo. 2 Scanning electron micrograph of tensile test specimen (test temp. 300°C)



(Test temp. 550°C) $\times 448$

Photo. 3 Scanning electron micrograph of transverse test specimen

の SEM による破断面観察の結果を示す。

マクロ的には一方向強化材と同様に R.T~400°Cまではそれほど顕著な結果はみられない。 $n=3$ の場合、550°Cにおいて最外層に亀裂を生じているのが認められる。そして S-S 曲線においても最大応力を過ぎた後、ただちに破壊するのでなく、内側の層がある程度まで荷重をささえているのが認められた。 $n=4$ の場合も同様で R.T および 300°C までの破面はほとんど変化がないが、550°C で最も顕著な結果を示した。この結果は層間で剥離を生じ、低温のものに比較して、マトリックスと繊維の界面がよりルーズとなった結果生じたものと考えられる。なお破断モードの比較のために 300°C および 550°C における剪断試験、すなわち引張り軸と繊維との方向が 45° の角をもつもの、および横引張り試験したものの破面写真を Photo. 3 に示した。この結果では 300°C と 550°C では著しい相違が認められる。すなわち試験温度 300°C の破面では繊維表面が露出している場合が多いが、試験温度 550°C になると繊維表面にマトリックスが附着している。これはマトリックスが延性破壊を起こしたことを意味する。

4. ま と め

対称等角積層板の弾性率の理論値と $n=3, n=4$ の結果を比較し、 $n=3$ の試料は計算値に比較的近い値を示したが、 $n=4$ の場合は Cross elasticity 効果が取り除けないため計算値より低い値を示した。また高温強度特性も一方向強化材と同様に高温になるに従い急激に低下する傾向を示した。なお破壊モードの比較のために 300°C および 500°C における剪断試験の結果、試験温度 300°C においては破面に露出した繊維表面に附着物が少ないが、550°C になるとマトリックスが附着していることから、この温度近傍に延性破壊の下限範囲が存在することが明らかになった。

(1980年7月16日受理)

文 献

- 1) 大蔵ほか：生産研究 32 (1980) p. 435
- 2) " " "
- 3) 植村：材料 24 (1975) 156
- 4) 林：複合材料 (1979) p. 88