

材料強度設計No.10

知能機械システム工学科

坂本東男

Sakamoto.haruo@kochi-tech.ac.jp

教員室A429、TEL:0887-57-2317

研究室A213、TEL:57-2243

講義内容(No.10)

複合材料、テキストp217-227

- 1. 繊維など強化材料とその性質
- 2. プラスチック基複合材料
- 3. 金属基複合材料
- 4. グラファイト基複合材料
- 5. 複合材料の製造方法
- 6. 複合材料の破壊

複合材料とは

- “2つ以上の異なる材料要素を組み合わせ、種々の要素にない特有な性質をもたせた人工の材料”
- 繊維強化複合材料と粒子分散複合材料
- プラスチック基、金属基、セラミックス基、カーボン基、セメント基、ゴム基
- Fiber Reinforced Plastics (プラスチック基繊維強化材料)が一般

繊維の物性値

表 12.1 主要繊維の物性値

| 繊維 | 種類 | 繊維径 (μm) | 密度 (g/cm^3) | 引張り強度 (GPa) | 弾性率 (GPa) |
|-------|----------|--------------------------|----------------------------------|----------------|--------------|
| ガラス | S-2 | 9 | 2.49 | 3.6 | 71 |
| カーボン | PAN系 HT* | — | 1.75-1.82 | 3.5-4.5 | 230-260 |
| アラミド | HM** | — | 1.45 | 3 | 130 |
| 炭化ケイ素 | 蒸着法 | 100 | 3.3-3.4 | 3 | 135 |
| ボロン | 蒸着法 | 50-100 | 2.5-3.0 | 3.5-3.7 | 400 |
| アルミナ | 住友化学法 | 9 | 3.2 | 2.6 | 250 |
| ウイスキー | SiC原料 | — | 3.2 | 3-14 | — |

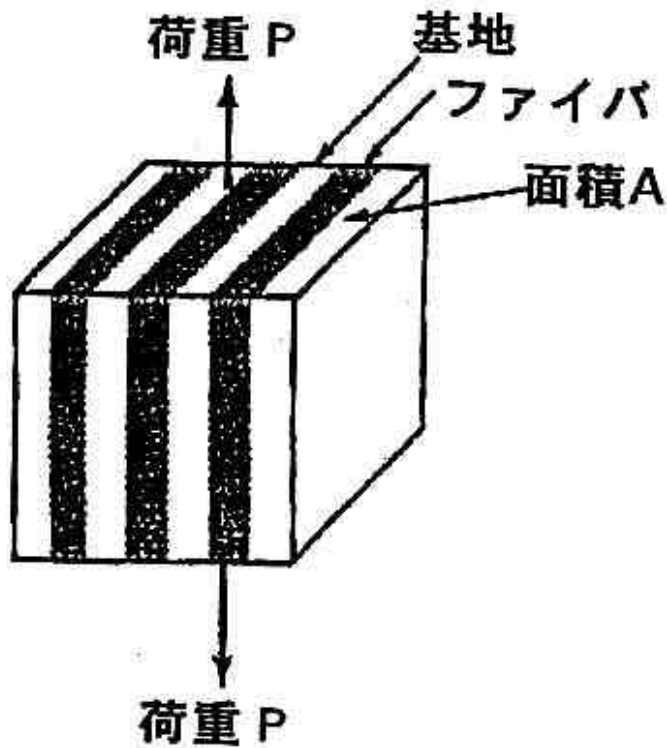
* High Tensile, ** High Modulus

比重量、比強度、比弾性率の比較

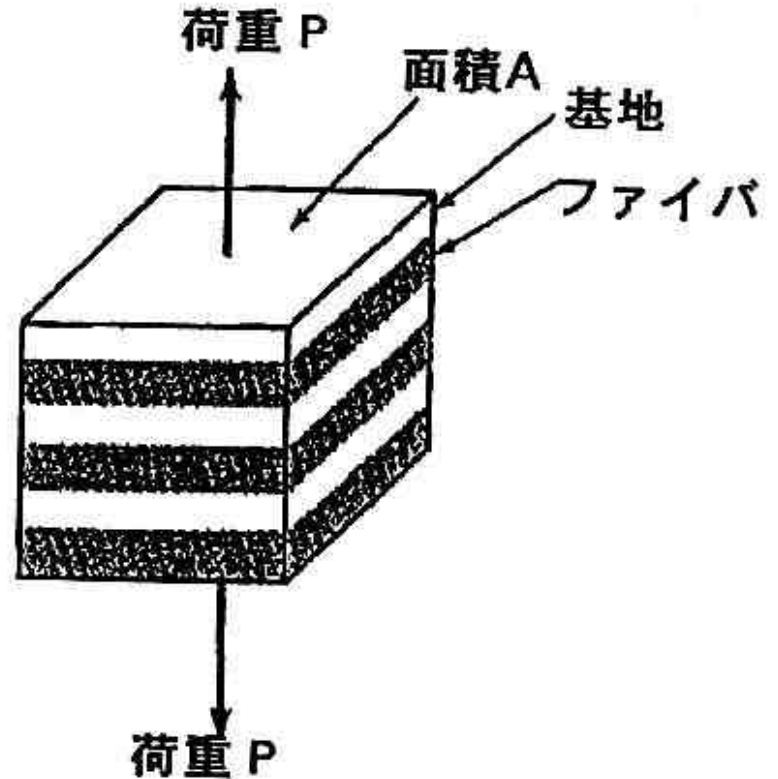
表 12.2 比重量, 比強度, 比弾性率の比較

| 材料 | 材料, 繊維種別 | 比重量 (kN/m^3) | 比強度(\times 10^4m) | 比弾性率(\times 10^6m) |
|-------|--------------|----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 高強度金属 | 高張力鋼 | 76 | 1.82 | 2.76 |
| | ジュラルミン | 26 | 1.96 | 2.80 |
| | Ti-6V-4Al | 43 | 2.32 | 2.60 |
| 繊維 | 高強度ガラス | 24 | 19.0 | 3.61 |
| | 高強度カーボン | 17 | 17.6 | 13.5 |
| | アラミド(Kevlar) | 14 | 20.0 | 9.29 |
| | ボロン | 25 | 12.0 | 16.0 |
| | 炭化ケイ素(SiC) | 25 | 10.0 | 7.2 |

繊維方向と力の方向



(a)ファイバに平行に荷重



(b)ファイバに直角に荷重

図 12.1

例題1

【例題 12.1】 図 12.1 の複合材料のモデルについて繊維に平行に荷重が掛かる場合と、繊維に直角に荷重が掛かる場合の複合材料の弾性率と破壊強度を求めよ。ここで、 P , E , V , σ , ε はそれぞれ荷重、剛性、体積率、強度(引張強さ)、ひずみであり、サフィックスの c , m , f はそれぞれ複合材料、基地、繊維のそれぞれを表す。

【解】 (1) ファイバに平行に荷重がかかる場合

$$P_c = P_f + P_m \text{ または } \sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (12.1)$$

書き直すと、

$$\sigma_c V_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (12.2)$$

ひずみは一様であるため、

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m \quad (12.3)$$

$V_c = 1$ を考慮して、(12.2), (12.3) 式より、

$$\sigma_c / \varepsilon_c = \sigma_f V_f / \varepsilon_f + \sigma_m V_m / \varepsilon_m \quad (12.4)$$

すなわち

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (12.5)$$

破壊強度は (12.2) 式より

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (12.6)$$

例題1 (続き)

(2) ファイバに直角に荷重がかかる場合

応力はどの部位も同じ. $\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m$ (12.7)

複合材料のひずみはファイバのひずみと基地のひずみを加えたものとなる.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m V_m \quad (12.8)$$

したがって

$$\sigma_c / E_c = \sigma_c V_f / E_f + \sigma_c V_m / E_m \quad (12.9)$$

$$1 / E_c = V_f / E_f + V_m / E_m \quad (12.10)$$

α , β を繊維の形態によって決まる係数で, α , β とも一方向強化の場合は1.0, 二直交方向強化の場合 ~ 0.5 , 繊維方向がランダムるときには $\sim 3/8$ であるとすれば (12.5), (12.6) 式でなく, 次式で与えられる.

$$E_c = \alpha E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (12.11)$$

$$\sigma_c = \beta \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \quad (12.12)$$

CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics) の用途と特性

表 12.3 CFRP の用途とその要求特性

| 分野 | 用途 (含む開発品) | 要求特性 |
|-----------|--|-------------------------------------|
| スポーツ・レジャー | (1) ゴルフシャフト, ヘッド (2) 釣竿, 釣り用リール (3) テニス用などのラケット (4) スケートボード, ヨット, ボード | 比強度, 比剛性 軽量化 振動低減 耐食性, 成形性 |
| 航空・宇宙 | (1) 戦闘機, 民間機, ヘリコプタ (2) ロケット部品, 衛星部品 | 比強度, 比剛性 軽量化 |
| 産業・自動車 | (1) フライホイール, ロボット部品 (2) 軸, 板バネ, ホイール, バンパ | 軽量化 比強度, 比剛性 |

釣り竿の例

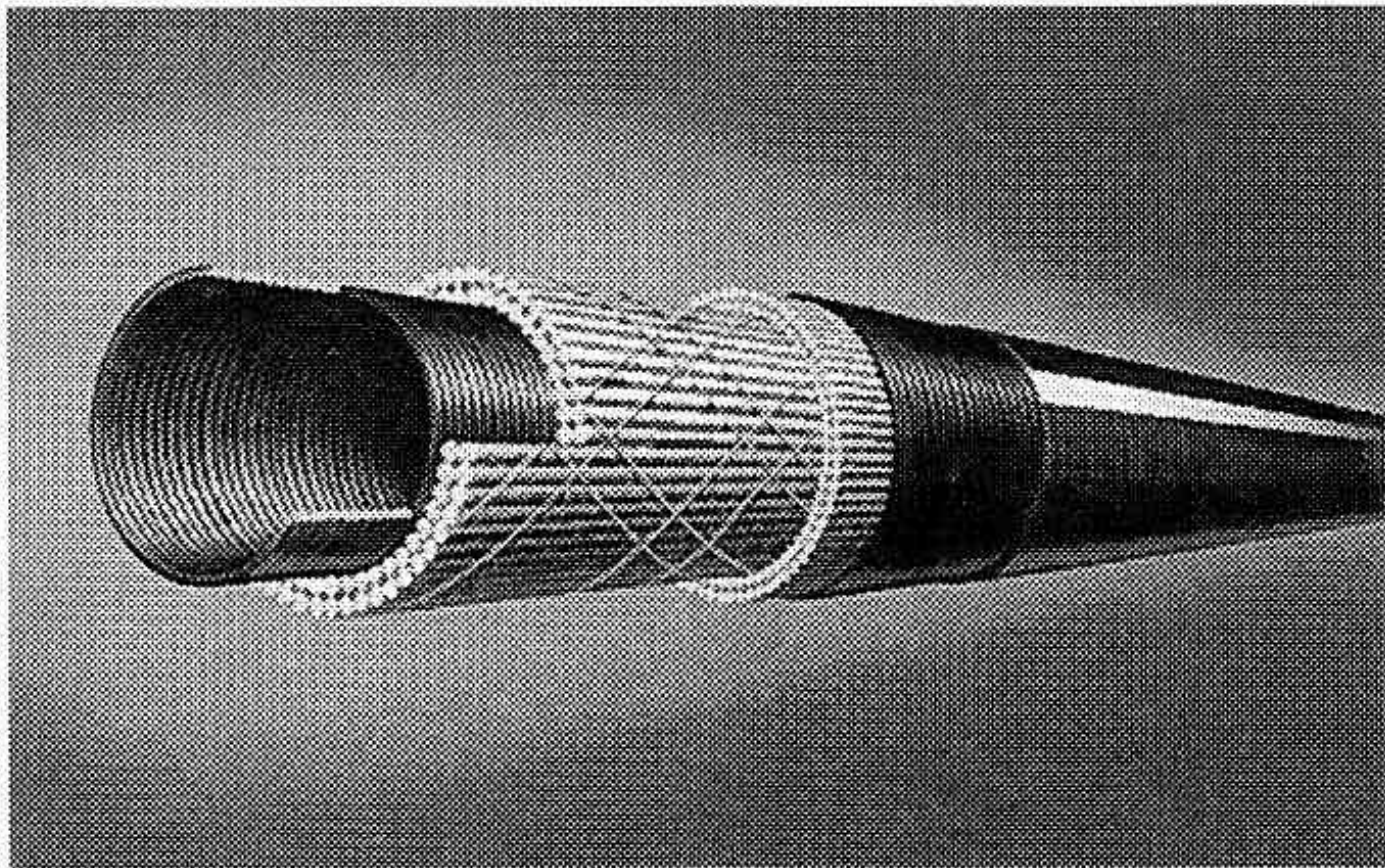


図 12.2 カarbonロッド（釣り竿）の例（東レ(株)提供)

樹脂の特性

表 12.4 代表的樹脂の特性

| 樹脂種別 | 樹脂 | 密度 (g/cm ³) | 引張強さ (MPa) | 弾性率 (GPa) |
|--------|-------------------------|----------------------------|---------------|--------------|
| 熱硬化成樹脂 | ポリエーテルエーテルケトン (PEEK) | 1.30 | 157 | 3.9 |
| | ポリアミドイミド(PAI) | 1.38 | 118 | 3.6 |
| | ポリアミド(PA) | 1.14 | 78 | 2.8 |
| 熱可塑性樹脂 | 不飽和ポリエステル(UP) | 1.14-1.23 | 59-78 | 3.5-4.6 |
| | エポキシ(EP) | 1.15-1.35 | 49-67 | 3.1 |
| | ポリイミド(PI) | 1.40 | 98 | 3.6 |

例題 2

〔例題 12.2〕 次の一方向強化 FRP の弾性率，引張強さを計算せよ。

(a) ガラス繊維 60% 含有のエポキシ樹脂 FRP，(b) アラミド繊維 58% 含有の PEEK 樹脂 FRP，(c) アルミナ繊維 55% 含有のエポキシ樹脂 FRP. ただし，引張強さについては，樹脂の寄与分は無視してもよい。

〔解〕 (12.5)，(12.6) 式より一方向強化複合材料の剛性率 E_c ，引張強さ σ_c を求める。繊維，樹脂のそれぞれの剛性率，引張強さは表 12.1 と表 12.4 より求める。

$$(a) \quad E_c = 71 \times 0.60 + 3.1 \times (1 - 0.60) = 43.84 \text{ GPa},$$

$$\sigma_c = 3.6 \times 0.60 = 2.16 \text{ GPa}$$

$$(b) \quad E_c = 130 \times 0.58 + 3.9 \times (1 - 0.58) = 77.04 \text{ GPa},$$

$$\sigma_c = 3 \times 0.58 = 1.74 \text{ GPa}$$

$$(c) \quad E_c = 250 \times 0.55 + 3.1 \times (1 - 0.55) = 138.90 \text{ GPa},$$

$$\sigma_c = 2.6 \times 0.55 = 1.43 \text{ GPa}$$

金属基 (アルミニウム) 複合材料 の機械的性質

表 12.5 アルミニウム基複合材料の機械的性質

| 分類 | 材料 | 引張強さ (MPa) | 弾性率 (GPa) | 破断伸び (%) |
|----------------|--------------------|---------------|--------------|-------------|
| 長繊維強化 (一方向) | Al2024-T6 [45%B] | 1,458 | 220 | 0.81 |
| | Al6061-T6 [51%B] | 1,417 | 231 | 0.74 |
| 短繊維強化 | Al2124-T6 [20%SiC] | 650 | 127 | 204 |
| | Al6061-T6 [20%SiC] | 480 | 115 | 5 |
| 粒子分散強化 | Al2124 [20%SiC] | 552 | 103 | 7.0 |
| | Al6061 [20%SiC] | 496 | 103 | 5.5 |
| 母材 | Al2124-F | 455 | 71 | 9 |
| | Al6061-F | 310 | 68.9 | 12 |

例題 3の図

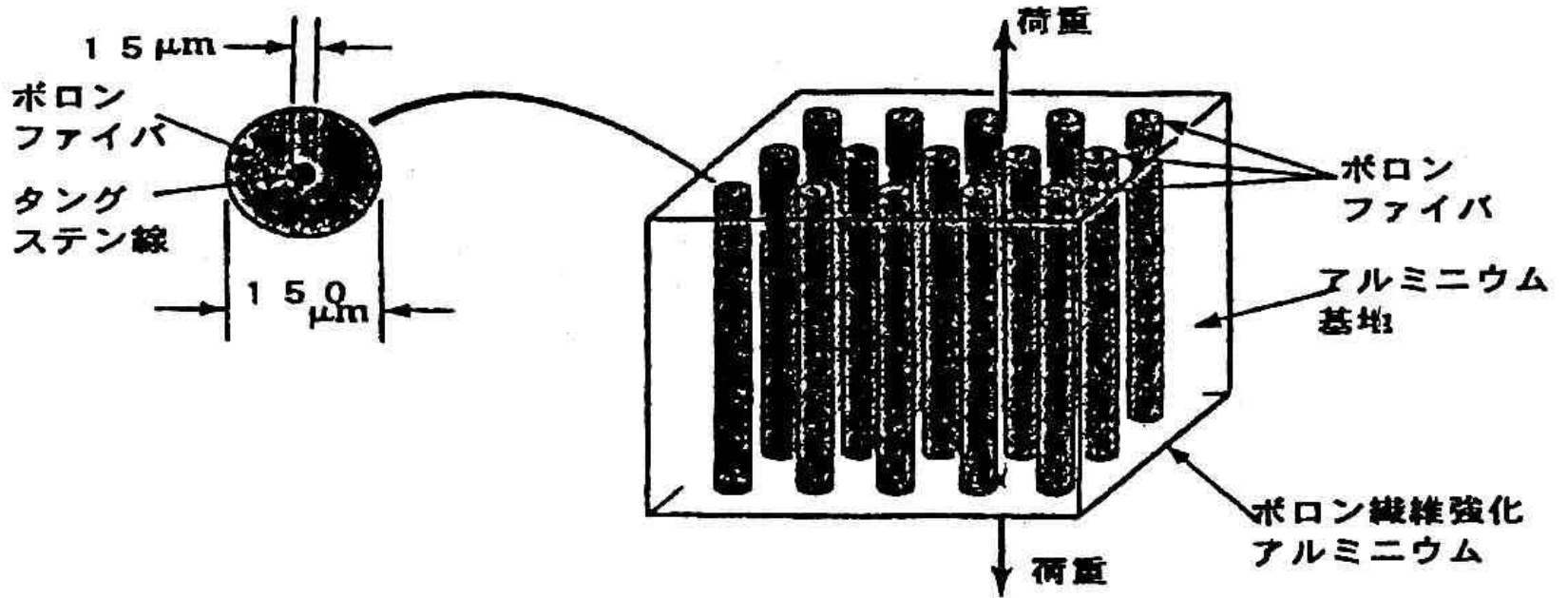


図 12.3

例題 3

〔例題 12.3〕 図 12.3 のボロン繊維強化 6061 アルミニウム材料（繊維体積率は 35%）の弾性率を求めよ。ここで、タングステンの弾性率は 410 GPa とする。

〔解〕 複合則はボロン、タングステン、アルミニウムの 3 つが入っても同じ考え方で対処できる。ここで W, B はそれぞれタングステン, ボロンを表す。ボロンの弾性率は表 12.1 より求める。

$$\begin{aligned} E_c &= V_f E_f + V_m E_m = V_w E_w + V_B E_B + V_m E_m \\ &= (15\mu\text{m}/150\mu\text{m})^2 \times 0.35 \times 410 \text{ GPa} \\ &\quad + \{ (150\mu\text{m})^2 - (15\mu\text{m})^2 \} / (150\mu\text{m})^2 \\ &\quad \times 0.35 \times 400 \text{ GPa} + 0.65 \times 68.9 \text{ GPa} \\ &= 184.8 \text{ GPa} \end{aligned}$$

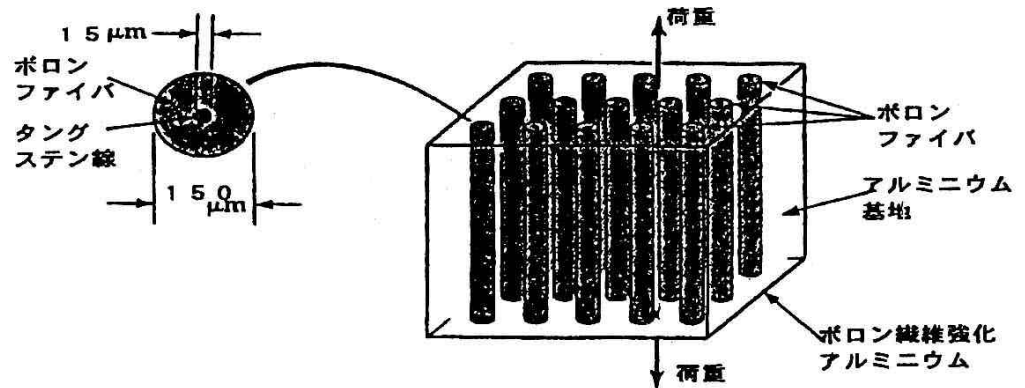


図 12.3

複合材料の製造方法

- 1. プラスチック基複合材料：
ハンドレイアップ法、フィラメントワインディング法、引き抜き法
- 2. 金属基複合材料：
繊維をCVD(Chemical Vapor Deposition) PVD(Physical Vapor Deposition)でコーティング。次はプリフォーム(予備成形)。固相法(ホットプレス、ロール成形、HIPなど)と液相法で成形。
- 3. セラミックス基複合材料：
金属基とほぼ同様
- 4. カーボン基複合材料(C/Cコンポジット)：
CVI(Chemical Vapor Infiltration)など

例題 4

【例題 12.4】 30% 体積率 SiC 長繊維強化のガラスセラミックスに関して、次のき裂がすでに存在すると仮定して、以下のデータを用いてき裂から破壊が生じはじめる応力を求めよ。ただし $K_{Ic} = \sigma\sqrt{\pi a}$ の関係を利用する。

(1) ガラスセラミックス基地の定数： $E_m = 94 \text{ GPa}$, $K_{Ic} = 2.4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

最大のき裂長さは $10 \mu\text{m}$

(2) SiC ファイバの定数： $E_f = 350 \text{ GPa}$, $K_{Ic} = 4.8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

最大の表面き裂の深さは $5 \mu\text{m}$

【解】 まず複合材料の弾性率は $0.30 \times 350 \text{ GPa} + 0.70 \times 94 \text{ GPa} = 170.8 \text{ GPa}$
複合材料、ファイバ、基地に作用するひずみは同じであり、

$$\sigma_c/E_c = \sigma_f/E_f = \sigma_m/E_m$$

したがって、基地からき裂が生じるときは

$$\begin{aligned}\sigma_c &= E_c \sigma_m / E_m = E_c (K_{Ic,m} / \sqrt{\pi a}) (1/E_m) = 170.8 \times (2.4 / \sqrt{\pi \times 5 \times 10^{-6}}) (1/94) \\ &= 1100 \text{ MPa}\end{aligned}$$

ファイバからき裂が生じるとすれば、

$$\begin{aligned}\sigma_c &= E_c E_c \sigma_f / E_f = E_c (K_{Ic,f} / \sqrt{\pi a}) (1/E_f) \\ &= 170.8 \times (4.8 / \sqrt{\pi \times 5 \times 10^{-6}}) (1/350) \\ &= 591 \text{ MPa}\end{aligned}$$

したがって、ファイバのき裂から破壊が生じはじめ、その応力は 591 MPa となる。

複合材料の破壊挙動

① 繊維平行引張：（以下，+は引張，-は圧縮，sはせん断，bは坐屈を表す）
$$\sigma_{c+} \approx \sigma_f + V_f \quad ((12.6) \text{ 式と同じ. 樹脂の寄与を無視したもの.})$$
(12.13)

② 繊維平行繊維圧縮：
$$\sigma_{c-} \approx \sigma_f - V_f \quad (\text{同様に樹脂の寄与は無視したもの})$$
(12.14)

③ 繊維平行剝離：
$$\sigma_{cs} \approx 10\sigma_{fs} + 2.5\sigma_{m+}$$
(12.15)

④ 繊維平行ミクロ坐屈：
$$\sigma_{cb} \approx G_m / \{1 - V_f(1 - G_m/G_{f12})\}$$
(12.16)

⑤ 繊維垂直引張：
$$\sigma_{c+} \approx \{1 - (\sqrt{V_f} - V_f)(1 - E_m/E_{f22})\} \sigma_{m+}$$
(12.17)

⑥ 繊維垂直圧縮：
$$\sigma_{c-} \approx \{(1 - \sqrt{V_f} \cdot V_f)(1 - E_m/E_{f22})\} \sigma_{m-}$$
(12.18)

⑦ ラメラ間せん断：
$$\sigma_{cs} \approx \{(1 - \sqrt{V_f} \cdot V_f)(1 - E_m/E_{f22})\} \sigma_{ms}$$
(12.19)

ここで $G_m = E_m/2(1 + \nu_m)$ ， ν はポアソン比， G_{f12} は繊維の引張せん断方向剛性， E_{f22} は繊維垂直方向の繊維剛性である。

例題 5

〔例題 12.6〕 アラミド (HM) 繊維 (Kevlar 49) を 55% 含有した PEEK 基の複合材料の繊維垂直方向の引張強さを求めよ。繊維の E_{f22} は 4.1GPa とする。

$$\begin{aligned} \text{〔解〕 } \sigma_{c+} &\approx \{ (1 - \sqrt{V_f} - V_f) (1 - E_m / E_{f22}) \} \sigma_{m+} \\ &= \{ (1 - \sqrt{0.55} - 0.55) (1 - 3.9 / 4.1) \} 157 \text{ MPa} = 6.2 \text{ MPa} \end{aligned}$$

二宮忠八と玉虫型模型飛行機



1891年カラス型模型飛行機を30m飛ばす。
1893年玉虫型模型飛行機を設計製作。