

# 原子力研究委員会 FQA2小委員会 疲労に関する重要知識



**JWES**  
The Japan Welding Engineering Society

Subcommittee for Organizing Question and Answer of Fatigue Knowledge (Phase 2)

## 疲労に関する重要知識 講演資料集

### 「複合材料の疲労」

東京工業大学名誉教授  
小林 英男

この資料は、(一社)日本溶接協会 原子力研究委員会 FQA2小委員会 における講演資料を掲載したものです。この資料を引用するにあたっては、下記を明記してください。

(一社)日本溶接協会原子力研究委員会FQA2小委員会ナレッジプラットフォーム公開資料(2017年):「複合材料の疲労」東京工業大学 名誉教授 小林 英男

# 複合材料の疲労

東京工業大学 名誉教授  
小林 英男

# 材料の疲労

- 疲労のメカニズムは局所塑性変形
- 材料による違い
  - ・金属材料は弾塑性体で、疲労あり
  - ・無機材料は弾性体で、疲労なし
  - ・有機材料はプラスチック(可塑性体)の名称どおりで、疲労あり

# 無機材料

- 構造材料
  - ・ガラス
  - ・カーボン(炭素)
  - ・セラミックス(ファインセラミックス)
- 使用形態
  - ・バルク
  - ・繊維→複合材料
- 疲労の有無
  - ・ガラスの疲労が典型例

# ガラスの疲労

- 名称の混乱
  - ・疲労、静疲労、ストレスラプチャー、遅れ破壊
- 時間依存型破壊
  - ・繰返し数依存型破壊ではない
- 材料固有の欠陥起点
  - ・き裂発生なし、き裂進展のみ

# ガラスの破壊

- すべての破壊が同じメカニズム
  - 即時破壊、ストレスラプチャー、疲労、クリープ
- メカニズムと寿命予測
  - 材料固有の欠陥起点（初期欠陥寸法）
  - 時間依存型き裂進展
  - 最終破壊（限界欠陥寸法）
- すべての破壊に同一の応力-寿命関係
  - 累積有効保持時間

# 破壊力学による寿命予測

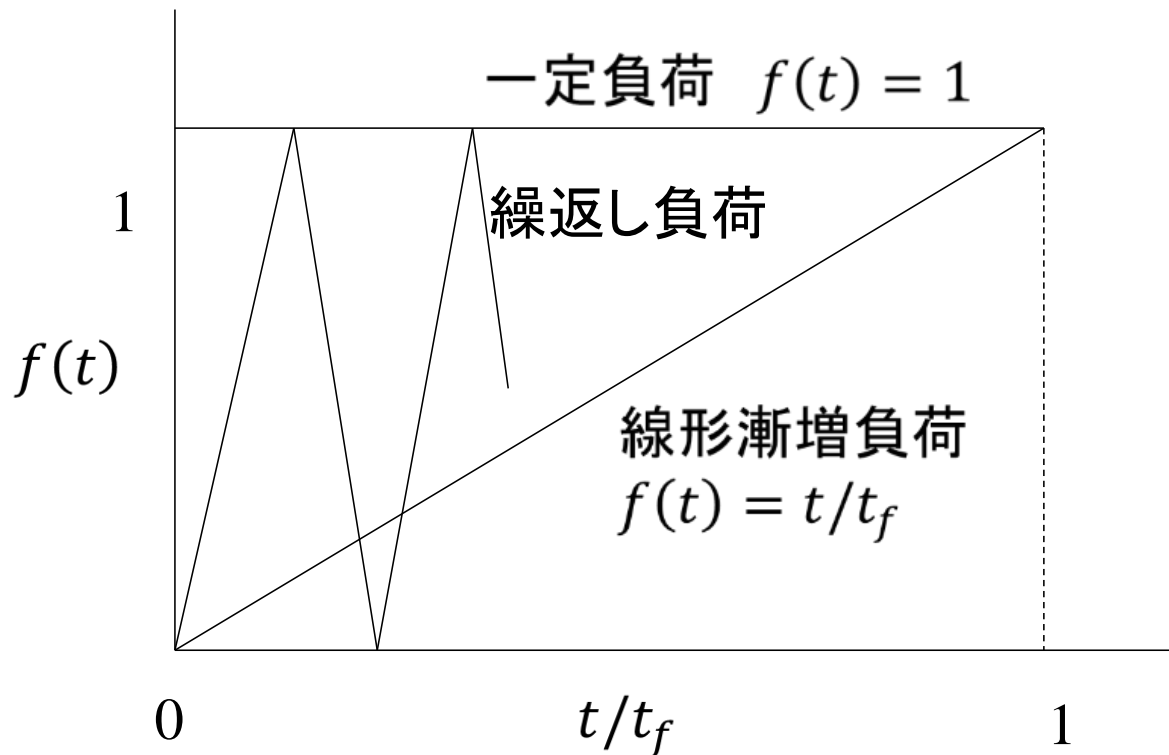
- 解析条件
  - 初期欠陥寸法  $a_0$
  - 応力  $\sigma(t) = \sigma_{max} f(t)$
  - 応力拡大係数  $K(t) = M \sigma(t) \sqrt{\pi a}$
  - 時間依存型き裂進展則  $da / dt = DK(t)^n$
- き裂進展解析
  - 時間  $0 \rightarrow t_f$ , 欠陥寸法  $a_0 \rightarrow a_c$  の積分
- 破壊解析
  - 限界欠陥寸法  $a_c = (1 / \pi M^2) (K_c / \sigma_{max})^2$
- 応力-寿命関係 ( $f(t) = 1$ ,  $a_0 \ll a_c$  の仮定)

$$K_0^n (t_f / a_0) = 2 / (n - 2) D$$

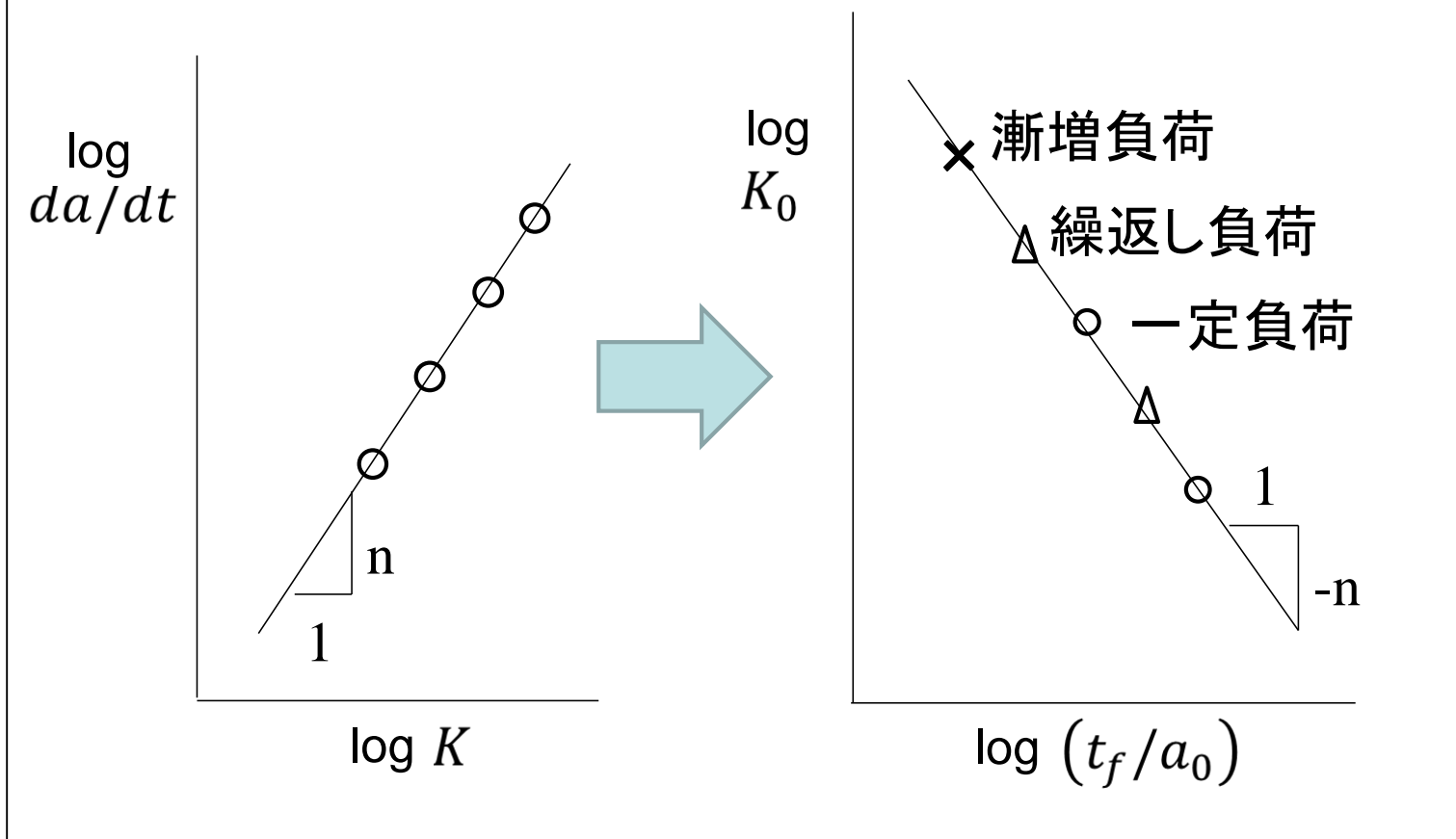
$$K_0 = M \sigma_{max} \sqrt{\pi a_0}$$

# 応力の時間的変動の扱い

$$\sigma(t) = \sigma_{max} f(t)$$



# 応力-寿命関係



# ガラス繊維の疲労

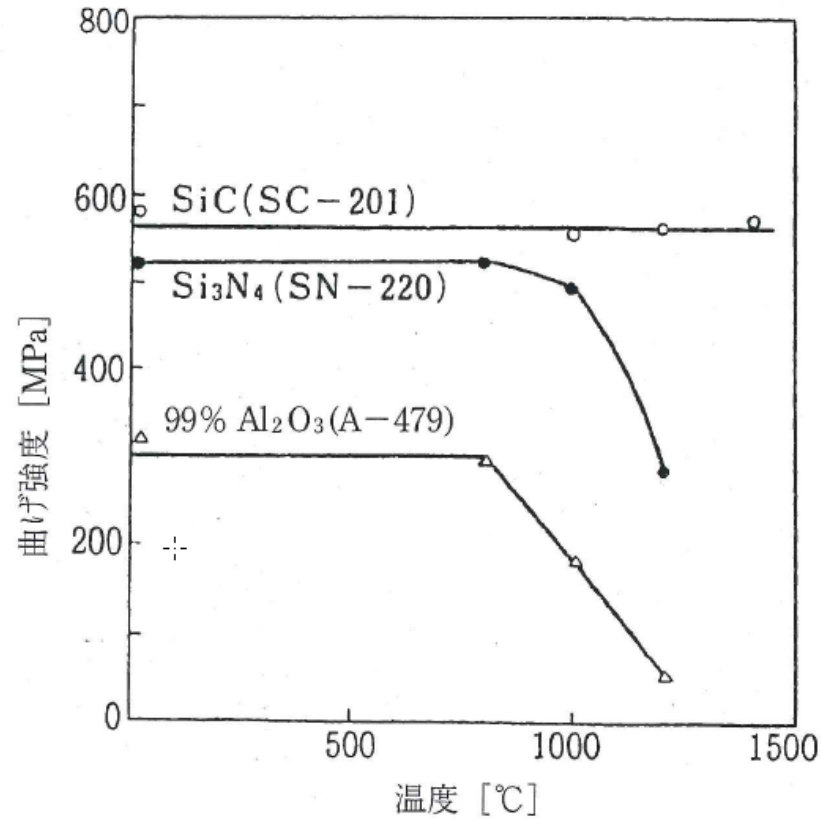
- 一方向繊維／エポキシ複合材料
  - ・ガラス繊維は強度、剛性を負担
  - ・エポキシマトリックスは繊維を保護、気密性を確保
- 疲労のS-N曲線(時間依存型破壊の応力-寿命関係)
  - ・ガラス繊維は疲労あり
  - ・炭素繊維は疲労なし
- 繊維本数の影響
  - ・単一の繊維は疲労なし
  - ・30本の繊維束は疲労あり

## 炭素繊維の疲労

- 一方向繊維／エポキシ複合材料
  - ・ガラス繊維と同じ
  - ・繊維強度が複合材料強度
- 疲労のS-N曲線(時間依存型破壊の応力-寿命関係)
  - ・疲労強度は引張強さの分散帯の下限
- $10^7$ 回疲労強度/引張強さの比
  - ・炭素繊維 0.9
  - ・ガラス繊維 0.5

## セラミックスの高温強度

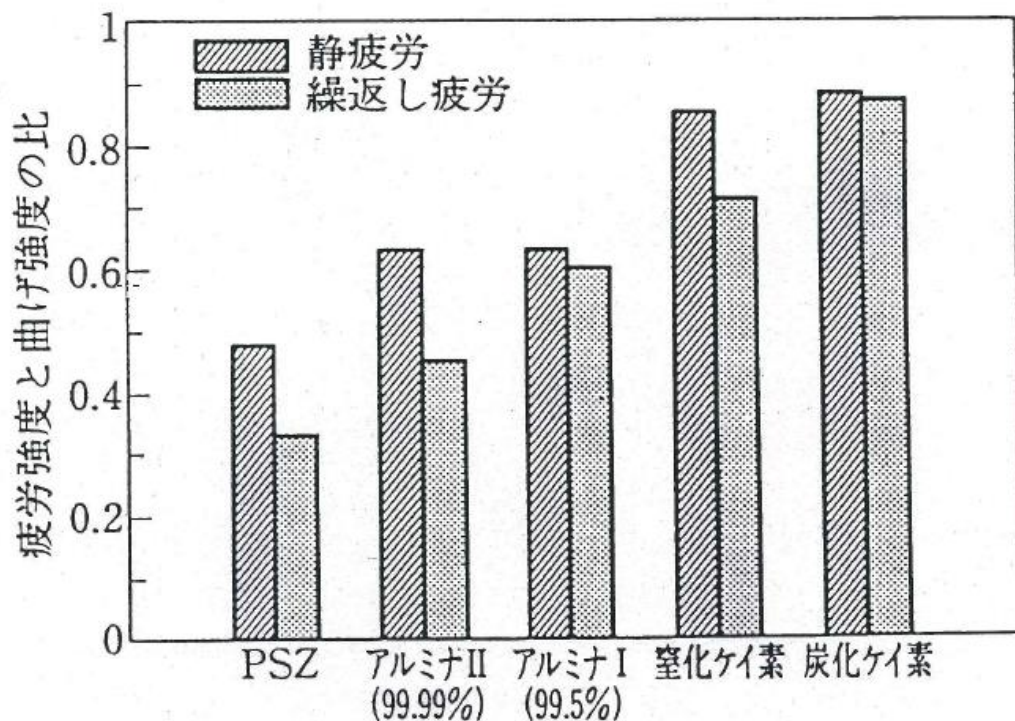
- 高温で強度、破壊メカニズムの変化なし
- 炭化けい素 (SiC、炭化物系)
  - ・1400°Cまで曲げ強度一定
- 窒化けい素 (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、窒化物系)
  - ・1000°Cまで曲げ強度一定
- アルミナ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、酸化物系)
  - ・800°Cまで曲げ強度一定



セラミックスの高温強度

## セラミックスの疲労

- 一定負荷(静疲労)と繰返し負荷(疲労)の比較
- $10^6$ S(100万秒、11.6日)に対応する時間強度
- 時間強度を曲げ強度で基準化(強度比)
- 静疲労が支配的
  - 炭化けい素、窒化けい素は強度比0.9、0.85
- 繰返し負荷が静疲労を加速
  - 窒化けい素、強度比0.85→0.7
  - アルミナ、強度比0.63→0.45



各種セラミックスの曲げ強度で基準化した  
 $10^6$  s 寿命の静および繰返し疲労強度<sup>(23)(24)</sup>

## セラミックスの破壊

- ガラスの破壊と同じ
- すべての破壊が同じメカニズム
  - 即時破壊(引張り、曲げ)、一定負荷(クリープ)、繰返し負荷(疲労)
  - 時間依存型き裂進展 (slow crack growth)
- 炭化けい素の応力-寿命関係
  - 1400°Cの結果
- 窒化けい素の応力-寿命関係
  - 室温と高温の結果の比較

# 有機材料

- 有機材料
  - ・高分子(ポリマー)、プラスチック、樹脂
- 構造材料
  - ・熱可塑性樹脂(エンジニアリングプラスチック)
  - ・熱硬化性樹脂(繊維強化複合材料のマトリックス)
  - ・エラストマー(天然ゴム、合成ゴム)
- 使用形態
  - ・バルク
  - ・マトリックス→複合材料

## ポリマーの局所変形

- 引張変形
  - ・垂直応力による降伏
  - ・クレージング (crazing)
- せん断変形
  - ・せん断応力による降伏
  - ・せん断帯 (shear band)

## ポリマーと金属の疲労特性の違い（室温）

	ポリマー	金属
繰返し変形	繰返し軟化 (構造・特性変化 大)	繰返し硬化・軟化 (構造・特性変化 小)
負荷速度効果	大 (粘弾性, 内部摩擦)	小 (降伏応力)
局所温度上昇 (ヒステリシス発熱)	大 (融点, 熱伝導率 低)	小 (融点, 熱伝導率 高)
破壊様式	力学的疲労 熱的疲労 (劣化) クリープ	力学的疲労

# ポリマーの繰返し軟化

- ひずみ制御両振り疲労試験
  - ・応力-ひずみ関係(ヒステリシスループ)
  - ・繰返し硬化(応力振幅の増大)
  - ・繰返し軟化(応力振幅の減少)
- ポリマーは必ず繰返し軟化
  - ・繰返し軟化
  - ・ヒステリシスループの面積の増大
  - ・仕事→熱エネルギー→温度上昇→熱的劣化

## 温度上昇と熱的劣化

- 疲労試験中の温度上昇
  - ・応力振幅が大きいほど温度上昇は顕著
  - ・応力振幅が小さいほど最終到達温度は高
  - ・温度上昇により寿命が減少
- 疲労寿命に及ぼす温度上昇の影響
  - ・繰返し速度 $10\text{Hz}$ 以上で顕著な寿命の低下
  - ・試験片厚さの増大に伴い寿命は減少

# ポリマーの疲労

- S-N曲線の形状は金属と同じ
  - ・ひずみ制御疲労試験
  - ・荷重制御疲労試験
- 破面様相
  - ・明瞭なストライエーション模様
  - ・ストライエーション間隔がき裂進展速度

## 複合材料の定義

- 複合材料 (composite materials)
- 複数の異種材料を混合し、新しい特性を  
発現した材料
- 異種材料の間に明確な境界が存在  
(固溶せず)
- マトリックス(母材、基材)に粒子、繊維など  
の異材を混合するのが一般的

## 複合材料の分類

- マトリックス
  - ・金属複合材料
  - ・無機複合材料(セラミクス複合材料)
  - ・有機複合材料(高分子複合材料)
- 混合する異材
  - ・粒子強化複合材料
  - ・繊維強化複合材料
- その他
  - ・長繊維複合材料(一方向繊維／エポキシ)
  - ・同材複合材料(炭素繊維／炭素マトリックス)

## 繊維／有機複合材料

- 繊維強化プラスチック、繊維強化複合材料
  - FRP (Fiber Reinforced Plastic)
  - FRC (Fiber Reinforced Composite)
- 短繊維強化複合材料
  - FRP
  - 繊維でマトリックスを強化
- 長繊維複合材料
  - 一方向繊維／エポキシ複合材料  
(unidirectional fiber-epoxy composite)
  - 繊維自身が強度を負担

小林英男著

「破壊力学」

共立出版、1993

1章 固体の破壊

1.1 延性固体と脆性固体

表1.3 繊維材料の引張破壊強度<sup>3)</sup>

参考文献

3) A.H. Cottrell: "The Mechanical Properties of Matter", p.231, John Wiley & Sons (1964)

表1.3 繊維材料の引張破壊強度<sup>3)</sup>

黒鉛ウイスキー	25000(MPa)	銅引抜線	550(MPa)
シリカ繊維	25000	ナイロン糸	550
アルミナウイスキー	16000	綿(セルロース)	410
鉄ウイスキー	13000	アルミニウム引抜線	410
タングステン引抜線	3800	腸線	410
オースフォーム鋼線	3100	合成繊維(ポリエステル)	250
ピアノ線	2500	くもの糸	190
石綿繊維	1500	麻のロープ	110
ガラス繊維	1400	堅い材木	110
亜麻(セルロース)	1100	(木目に沿って)	

## 繊維／有機複合材料の特性

- 繊維は強く、プラスチックは軽い
  - ・高比強度(単位質量当たりの強度が高い)
  - ・高比剛性(単位質量当たりの弾性係数が高い)
- 耐薬品性、耐暴露性
- 低線膨張係数
- 高疲労強度
- 異方性

## 繊維／有機複合材料の適用

- 航空宇宙機器  
航空機、ロケット、人口衛星、ミサイル
- 輸送機器  
鉄道車両、自動車、バイク、船舶
- 圧力設備  
圧力容器、貯槽、配管
- 土木構造物、建築構造物  
橋梁、構造の補強
- 電気電子機器
- スポーツ用品

小林英男、轟 章 共著

「固体の弾塑性力学 - 基礎から複合材料への  
展開-」

機械工学EKK-3, 数理工学社, 2007

## 第6章 異方性材料

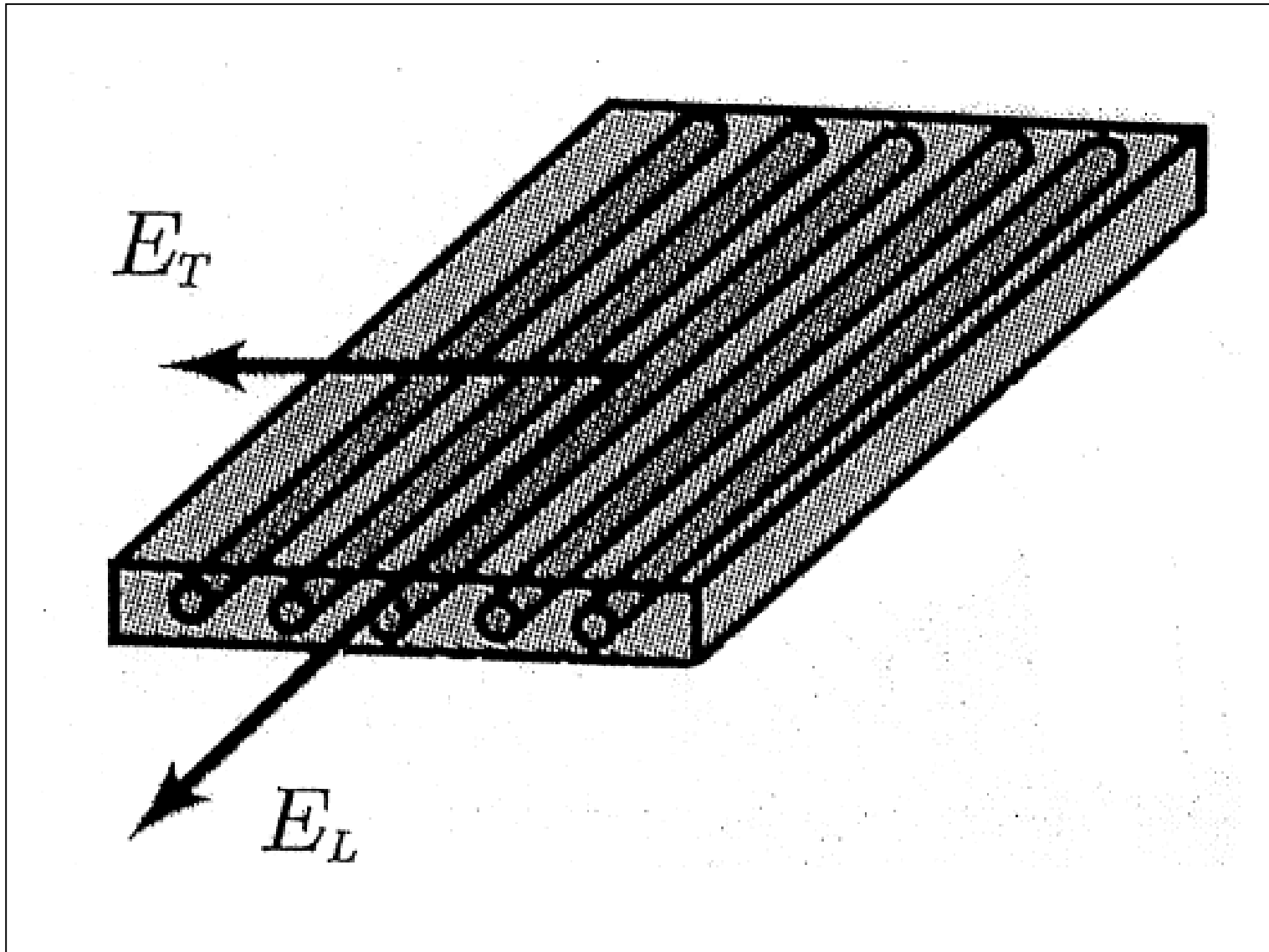
6.1 複合材料

6.2 複合則

6.3 応力 - ひずみ関係

6.4 変換

6.5 積層理論



## 複合則

- 複合則 (rule of mixture)
  - ・モデル化 (一方向繊維／エポキシ複合材料)
  - ・縦弾性係数の異方性
- 繊維方向の縦弾性係数 (一様ひずみ $\varepsilon$ 、並列システム)

$$E_L = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \cong E_f V_f$$

- 繊維直交方向の縦弾性係数 (一様応力 $\sigma$ 、直列システム)

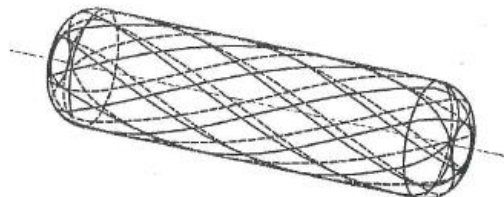
$$\frac{1}{E_T} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{1 - V_f}{E_m} \cong \frac{1 - V_f}{E_m}$$

## 複合則の留意点

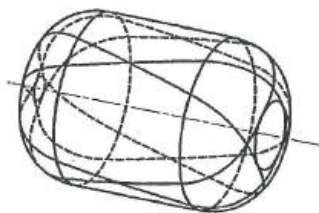
- 対象は変形(縦弾性係数)で、強度(応力)ではない。
- 繊維方向の応力  
$$\sigma = \varepsilon E_L = \varepsilon E_f V_f + \varepsilon E_m (1 - V_f)$$
- 繊維方向の強度
  - ・繊維破断以前は、マトリックスの応力分担が軽減(疲労強度の向上)
  - ・繊維破断の最大応力(強度)は、複合則で予測できない。

## 複合材料の成形

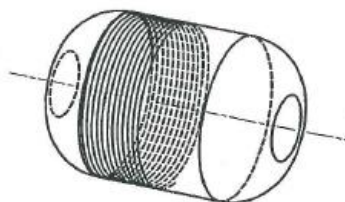
- 製品に近い形状の成形が可能  
→機械加工が少なくてすむ
- 成形方法
  - ・量産品  
射出成型、プレス成型、押出し成型、引き抜き成型
  - ・複雑形状製品  
型内に繊維を設置し、樹脂を注入して成形
  - ・航空機構造  
プリプレグの積層と高温加圧成形
  - ・圧力容器  
フィラメントワインディング成形



ヘリカル巻き



インプレッソ巻き



フープ巻き

## フィラメントワインディング巻き方概要

# 複合材料の材料設計

- 複合化の目的(特性発現)
- 特性発現の最適化
- マトリックス、異材、体積含有率
- 成形方法

# 材料設計と構造設計の融合

- 製品、部品、部材の直接成形
- 構造としての特性発現の最適化
- 積層構造、織物構造の最適化
  - ・形状、寸法
  - ・異方性
  - ・傾斜機能
- 成形方法

# 複合圧力容器の設計

- 複合圧力容器  
ライナー(気密材料)と複合材料(耐圧部材)  
で構成する圧力容器
- 一方向繊維／エポキシ複合材料
- フィラメントワインディング成形
- ライナーの加圧変形処理と残留応力
- 耐圧性能の最適化

# 短繊維強化複合材料の破壊

- 強化のメカニズム
  - ・高弾性係数の繊維による低弾性係数のマトリックスの応力減少(複合則)
  - ・繊維破断なしでマトリックスが破壊(複合材料強度は繊維強度に無関係)
- 破壊靱性向上のメカニズム
  - ・繊維架橋効果(繊維引抜き効果)

# 短繊維強化複合材料の疲労

- 強化のメカニズム
  - ・高弾性係数繊維によるマトリックスの応力減少
  - ・高熱伝導率繊維によるマトリックスの昇温緩和
  - ・き裂進展における繊維回避
- 弱化のメカニズム
  - ・繰返し軟化
  - ・繊維とマトリックスの界面剥離

## S-N曲線の勾配の予測

### □ S-N曲線の形状

- ・両対数表示で直線

$$\Delta\sigma N_f^k = Const.$$

### □ き裂進展則からの予測

- ・き裂進展則

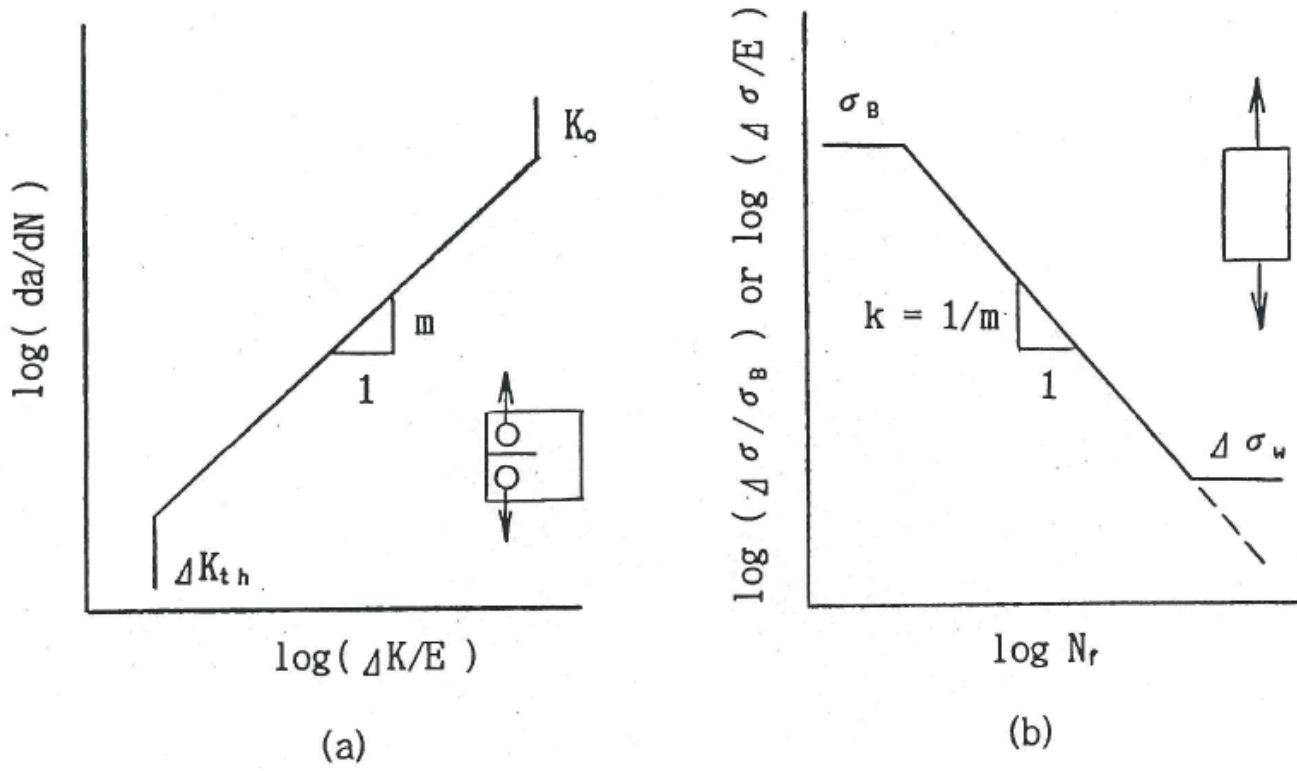
$$da/dN = C\Delta K^m$$

- ・寿命予測

$$\Delta\sigma^m N_f = Const.$$

### □ S-N曲線の勾配の予測

$$1/k = m$$



き裂進展則(a)からのS-N曲線(b)の予測

# S-N曲線の予測

## □ S-N曲線の勾配の予測

$$\Delta\sigma N_f^k = Const.$$

$$1/k = m$$

## □ 縦軸(応力)の基準化

$$\Delta\sigma / \sigma_B \quad \text{または} \quad \Delta\sigma / E$$

## □ S-N曲線の予測

$$(\Delta\sigma / \sigma_B) N_f^k = Const.$$

# 長繊維複合材料の疲労

- 一方向繊維 / エポキシ複合材料  
(シングルプライ)
  - 繊維の疲労が複合材料の疲労
  - 炭素繊維は疲労なし
  - ガラス繊維は疲労あり
- 積層複合材料
  - 界面剥離とマトリックスの疲労
  - 疲労損傷は剛性低下

## スマート材料／構造

- インテリジェント(知的)材料の開発  
科学技術庁の研究プロジェクト、1990年
- 環境条件に対して知的に応答し、機能を発揮できる材料
- インテリジェント材料→スマート材料
- スマート構造
- スマート複合材料

# スマート複合材料

- 目的  
損傷の自己検出、自己診断、自己補修
- 機能の付与  
センサ、(コンピュータ)、アクチュエータ
- 構成材料の有効利用  
センサ、アクチュエータ

# スロートインサートの材料

SRB : グラファイト

(M-Vロケット4号機打上げ失敗)

SRB-A : 3次元炭素／炭素複合材料(3DC/C)

(我国では初めて国産を採用)