材料強度学

Mechanical Properties of Structural Materials

(複合材料シリーズ)

第1回(11/10)：連続繊維強化複合材料－複合則と強化機構－

第2回(11/17)：不連続繊維強化複合材料－シアラグ理論－

◎第3回(11/24)：複合材料に関するトピックス

講義の目標：複合材料の強化理論を理解する.

今回の目標

1. 繊維･母相･界面ー種類と役割
2. 比強度, 比弾性率とは？
3. CMCの高靭性化を概観する.

前回の復習

1. シアラグ理論（Coxのモデル, Kelly-Tysonのモデル）, 臨界繊維長

   →1方向不連続繊維強化複合材料の強度予測

2. マルチプルフラクチャー

   →界面せん断応力の推定

3. 母相の破断ひずみ増大理論（ACK理論）

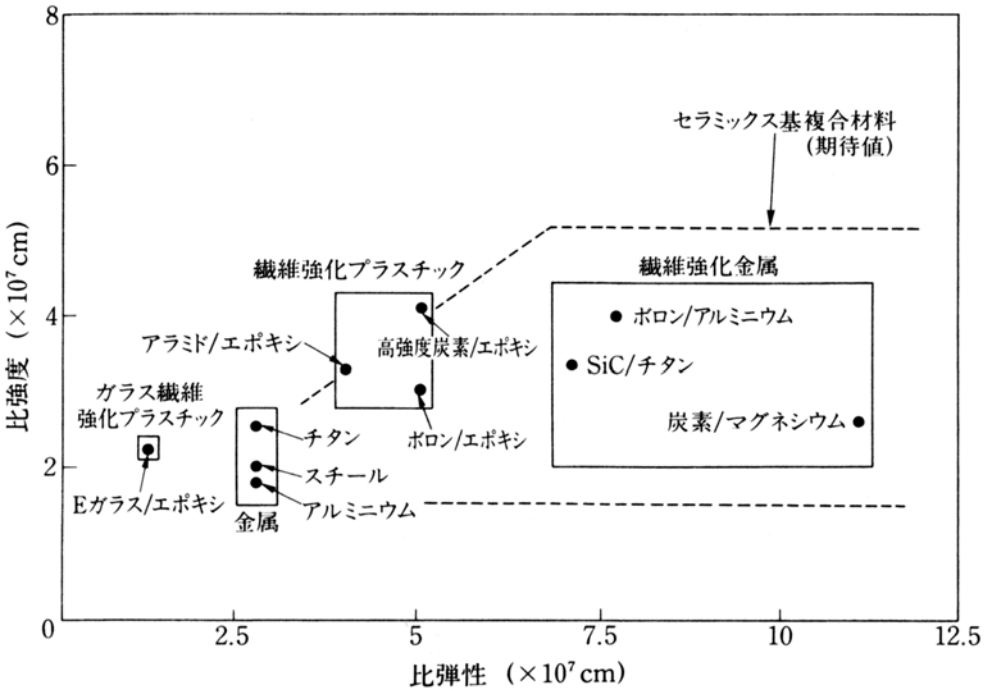
比強度･比弾性率とは？

●比強度 (Specific Strength)

：材料の破壊強度をその材料の比重で除した値

●比弾性率 (Specific Modulus of Elasticity)

：材料の弾性率をその材料の比重で除した値



種々の材料の比強度と比弾性の関係

強化繊維の種類

●ウィスカー(Whisker)：小さな繊維状の単結晶．最も高強度な材料の1つ．高価．

●繊維(Fiber)：高分子やセラミック材料の多結晶体もしくはアモルファスが多い．

●ワイヤ(Wire)：ラジアルタイヤ，ロケットのケーシング，圧力配管などの強化材．

Characteristics of Several Fiber-Reinforcement Materials

Material	*Specific Gravity*	*Tensile Strength [GPa (10^6 psi)]*	*Specific Strength (GPa)*	*Modulus of Elasticity [GPa (10^6 psi)]*	*Specific Modulus (GPa)*
		Whiskers			
Graphite	2.2	20 (3)	9.1	700 (100)	318
Silicon nitride	3.2	5–7 (0.75–1.0)	1.56–2.2	350–380 (50–55)	109–118
Aluminum oxide	4.0	10–20 (1–3)	2.5–5.0	700–1500 (100–220)	175–375
Silicon carbide	3.2	20 (3)	6.25	480 (70)	150
		Fibers			
Aluminum oxide	3.95	1.38 (0.2)	0.35	379 (55)	96
Aramid (Kevlar 49)	1.44	3.6–4.1 (0.525–0.600)	2.5–2.85	131 (19)	91
Carbon[a]	1.78–2.15	1.5–4.8 (0.22–0.70)	0.70–2.70	228–724 (32–100)	106–407
E-Glass	2.58	3.45 (0.5)	1.34	72.5 (10.5)	28.1
Boron	2.57	3.6 (0.52)	1.40	400 (60)	156
Silicon carbide	3.0	3.9 (0.57)	1.30	400 (60)	133
UHMWPE (Spectra 900)	0.97	2.6 (0.38)	2.68	117 (17)	121
		Metallic Wires			
High-strength steel	7.9	2.39 (0.35)	0.30	210 (30)	26.6
Molybdenum	10.2	2.2 (0.32)	0.22	324 (47)	31.8
Tungsten	19.3	2.89 (0.42)	0.15	407 (59)	21.1

[a] The term "carbon" instead of "graphite" is used to denote these fibers, since they are composed of crystalline graphite regions, and also of noncrystalline material and areas of crystal misalignment.

複合材料の母相素材による分類

●PMC：Polymer-Matrix Composite

GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer composite),
CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer composite),
Aramid fiber(Kevlar)-reinforced polymer composite, etc.

Property	*Glass* (*E-glass*)	*Carbon* (*High Strength*)	*Aramid* (*Kevlar 49*)
Specific gravity	2.1	1.6	1.4
Tensile modulus			
Longitudinal [GPa (10^6 psi)]	45 (6.5)	145 (21)	76 (11)
Transverse [GPa (10^6 psi)]	12 (1.8)	10 (1.5)	5.5 (0.8)
Tensile strength			
Longitudinal [MPa (ksi)]	1020 (150)	1240 (180)	1380 (200)
Transverse [MPa (ksi)]	40 (5.8)	41 (6)	30 (4.3)
Ultimate tensile strain			
Longitudinal	2.3	0.9	1.8
Transverse	0.4	0.4	0.5

Source: Adapted from R. F. Floral and S. T. Peters, "Composite Structures and Technologies," tutorial notes, 1989.

複合材料の母相素材による分類 (続き)

●MMC：Metal-Matrix Composite

Fiber	*Matrix*	*Fiber Content (vol%)*	*Density (g/cm^3)*	*Longitudinal Tensile Modulus (GPa)*	*Longitudinal Tensile Strength (MPa)*
Carbon	6061 Al	41	2.44	320	620
Boron	6061 Al	48	—	207	1515
SiC	6061 Al	50	2.93	230	1480
Alumina	380.0 Al	24	—	120	340
Carbon	AZ31 Mg	38	1.83	300	510
Borsic	Ti	45	3.68	220	1270

Source: Adapted from J. W. Weeton, D. M. Peters, and K. L. Thomas, *Engineers' Guide to Composite Materials*, ASM International, Materials Park, OH, 1987.

●CMC：Ceramic-Matrix Composite

C/C composite(Carbon fiber reinforced Carbon matrix composite), etc.

母相の役割，界面の役割

●母相の役割：①繊維を束ねる，
②繊維を表面損傷から守る，
③繊維間隔を保って繊維/繊維間の
脆性亀裂伝播を阻止する．

●界面の役割：弱い母相から強い繊維へ応力を伝達する．

→ 強い界面結合

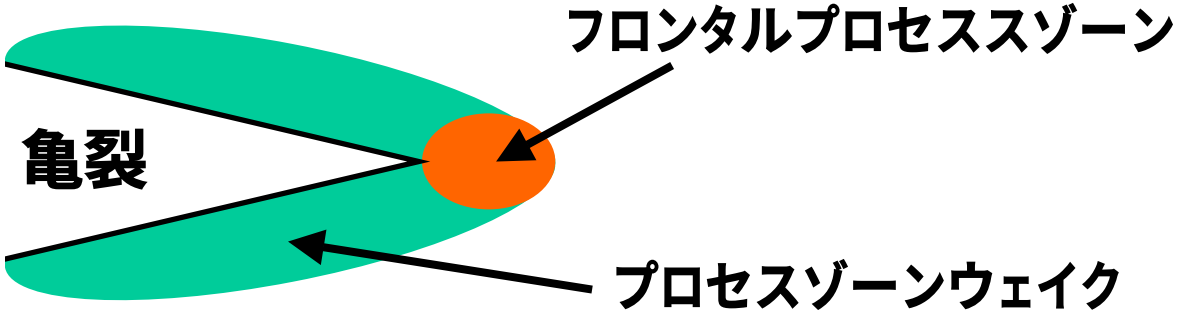
→ 母相がセラミックスの場合は若干事情が異なる．

↓

高靭性化のための複合化

CMCの高靭性化

CMCにおいて破壊靭性向上（高靭性化）に貢献すると提唱されているメカニズムの幾つかを紹介する．これらはいずれも亀裂先端前方領域（フロンタルプロセスゾーン）や亀裂先端よりも後方の領域（プロセスゾーンウェイク）で作用する．CMCにおける高靭性化の基本は，以下に紹介する様々なメカニズムによって亀裂先端での応力（集中）が緩和または遮蔽され，亀裂を進展させるのにより大きな負荷（またはエネルギー）が必要となることである（→シールディング機構）．



応力誘起相変態（Stress-induced Transformation）による高靭性化－1

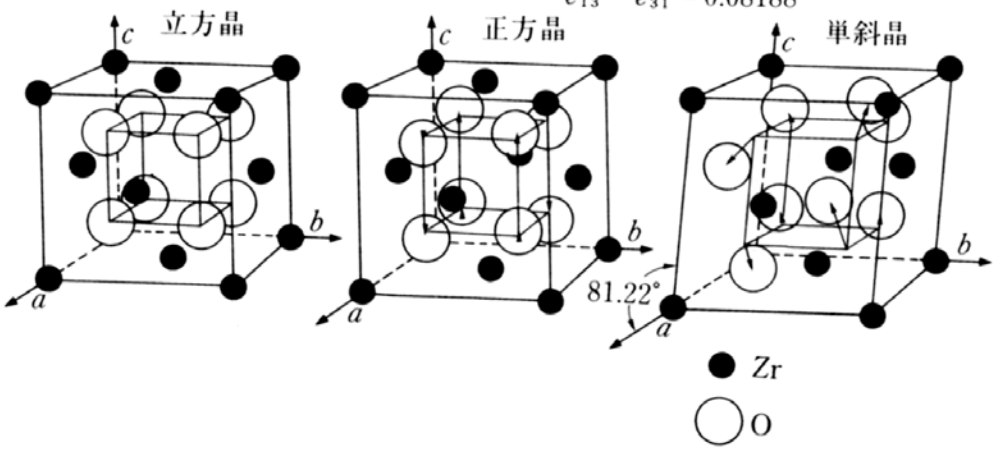
安定化された正方晶ジルコニアが外部応力によって単斜晶へマルテンサイト変態するとき，約4%の体積膨張と約16%のせん断変形が引起される．

$c\text{-}ZrO_2 \rightarrow t\text{-}ZrO_2$

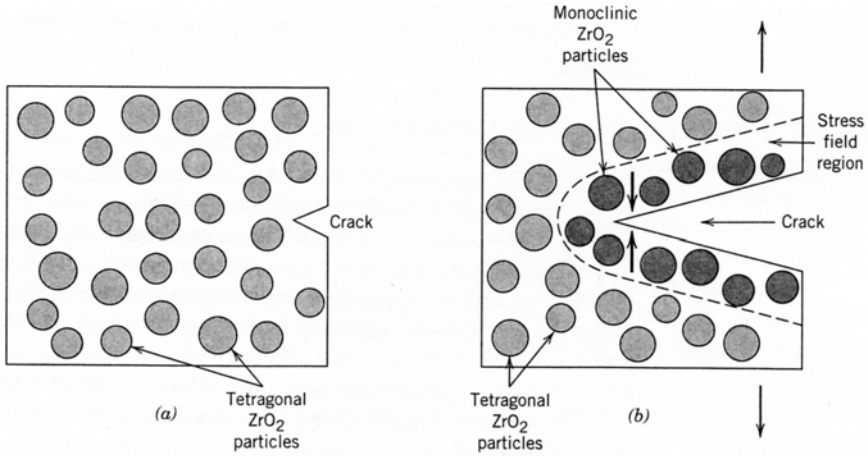
$e_{11} = e_{22} = -0.00878$
$e_{33} = 0.01209$

$t\text{-}ZrO_2 \rightarrow m\text{-}ZrO_2$

$e_{11} = -0.00149$
$e_{22} = 0.02442$
$e_{33} = 0.02386$
$e_{13} = e_{31} = 0.08188$



亀裂先端周囲の正方晶ジルコニアが高い応力集中により単斜晶へ変態し，体積膨張することによって亀裂面を閉じようとする力が発生する．



応力誘起相変態による高靭性化－2

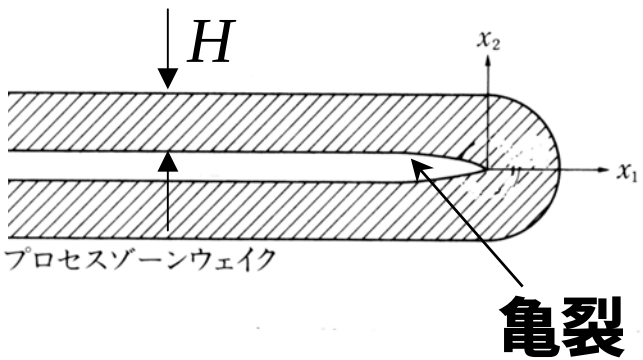
もう少し詳しい解析（Busianskyら，1983）によれば，

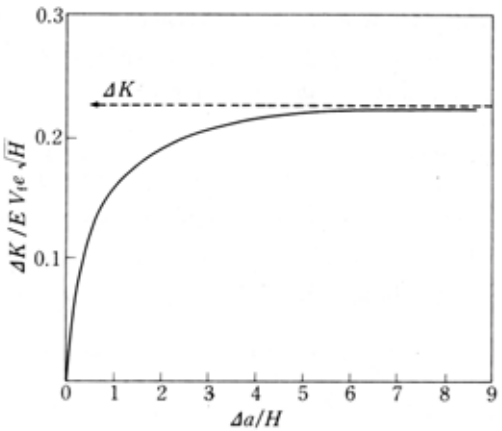
$$\Delta K_{Ic} = \frac{3\sqrt{3}}{8}\alpha K_{Ic} \qquad \alpha = \frac{2(1+\nu)E\,e}{9\pi(1-\nu)\sigma_T} \qquad H = \frac{\sqrt{3}(1+\nu)^2}{12\pi}\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_T}\right)^2$$

ここで，ΔK_{Ic}：破壊靭性の増分，e：相変態による膨張ひずみ，
σ_T：相変態が発生する応力，H：プロセスゾーンウェイク幅

➡ σ_Tを小さくするとHが大きくなり，ΔK_{Ic}は増加する．

※フロンタルプロセスゾーンでの相変態による体積膨張はΔK_{Ic}増加に貢献しない．→プロセスゾーンウェイクによるものが支配的．





➡ 上昇型R曲線挙動

※マイクロクラッキングによる高靭性化も基本的に同じメカニズム．

クラックディフレクション (Crack Deflection) による高靭性化－1

(1)亀裂面積が増加する効果，(2)亀裂先端が混合モード状態になり，亀裂進展条件を満足させるにはより大きな負荷が必要になる効果，により破壊靭性が大きくなる．→(2)の要因はシールディング機構ではない．

もう少し詳しい解析 (Faber&Evans，1983) によれば，クラックディフレクションにはチルト (Tilt) とツイスト (Twist) の2モードがあり…

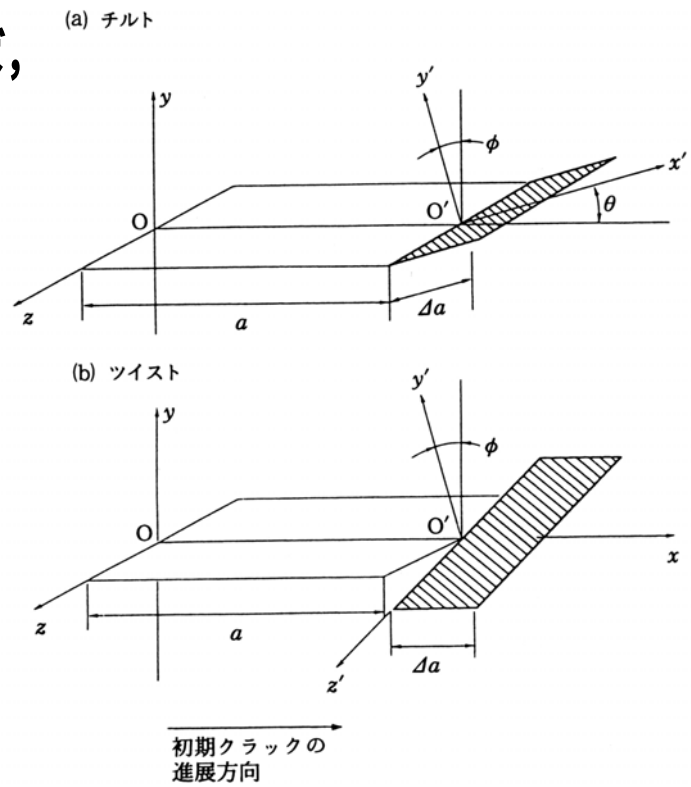
$$g_{\mathrm{I}} = \frac{\left(1-\nu^2\right)K_{\mathrm{I}tip}{}^2 + \left(1-\nu^2\right)K_{\mathrm{II}tip}{}^2 + \left(1+\nu\right)K_{\mathrm{III}tip}{}^2}{E}$$

チルトモード

$$\begin{pmatrix} K_{\mathrm{I}tip} \\ K_{\mathrm{II}tip} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^3\frac{\theta}{2} & -3\sin\frac{\theta}{2}\cos^2\frac{\theta}{2} \\ \sin\frac{\theta}{2}\cos^2\frac{\theta}{2} & \cos\frac{\theta}{2}\left(1-3\sin^2\frac{\theta}{2}\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_{\mathrm{I}} \\ K_{\mathrm{II}} \end{pmatrix}$$

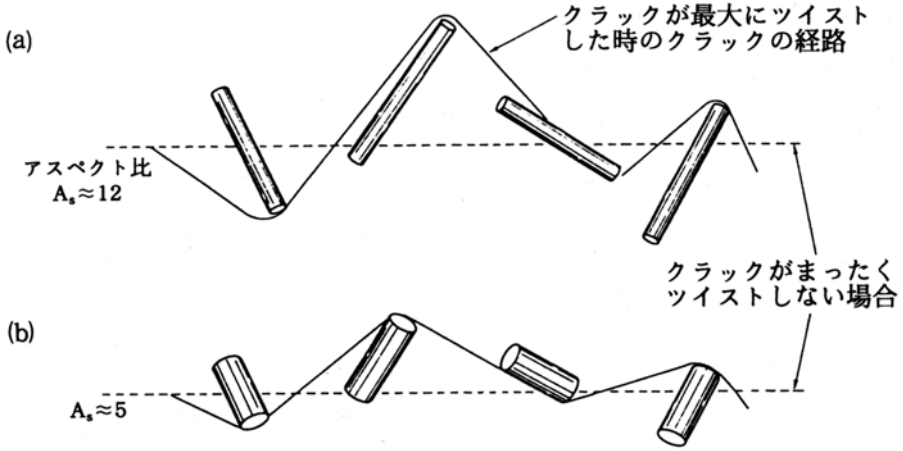
ツイストモード

$$\begin{pmatrix} K_{\mathrm{I}tip} \\ K_{\mathrm{III}tip} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\nu\sin^2\phi + \cos^2\phi & -2\sin\phi\cos\phi \\ (1-2\nu)\sin\phi\cos\phi & \cos^2\phi - \sin^2\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_{\mathrm{I}} \\ K_{\mathrm{III}} \end{pmatrix}$$

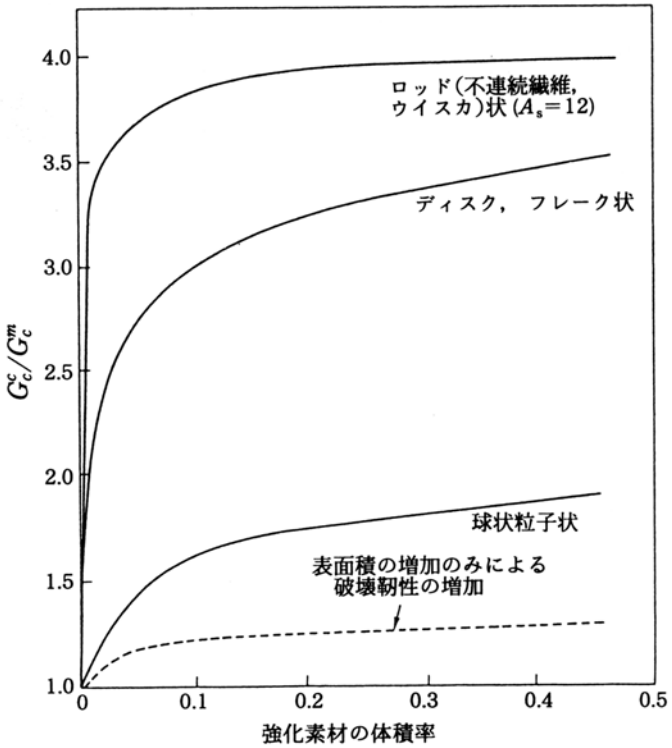


クラックディフレクションによる高靭性化－2

強化相が十分に強く，亀裂はそれらを迂回しながら進展するとすれば…



短繊維によるクラックのツイストの状態の模式図
（繊維の V_f は一定としている）



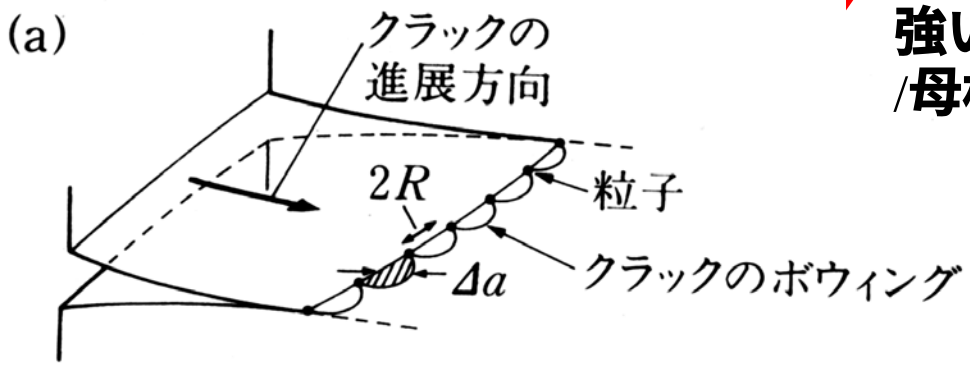
強化材の形状と体積率による破壊靭性の向上（理論値）

強化相の形状と体積含有率のみに依存し，寸法とは無関係．

- **●アスペクト比（長径/短径の比）が大きいほど高靭性化効果が大きい．**
- **●高アスペクト比の強化相の場合，体積含有率は20%程度で十分．**

クラックボウイング (Crack Bowing) による高靭性化

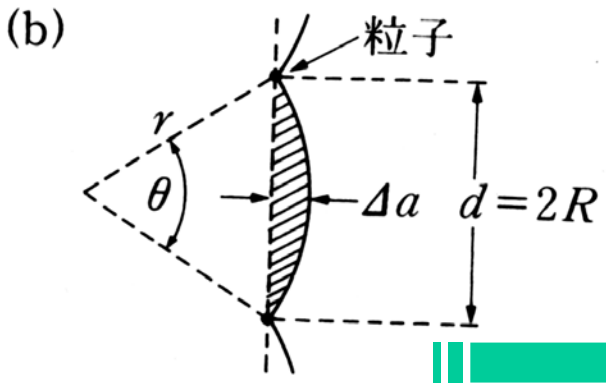
亀裂進展を強化相が阻害 (ピン止め) し，亀裂前縁が湾曲することによって，亀裂進展条件を満足させるにはより大きな負荷が必要になる．→シールディング機構ではない．



亀裂が湾曲し終わるまで破壊しない強い強化相と剥離しない強い強化相/母相界面が前提．

もう少し詳しい解析 (Lange，1970) によれば，

$$g_{Ic} = 2\left(\gamma + \frac{T}{d}\right)$$



ここで，Tは亀裂先端の単位長さ当りの線張力．

また，強化相または界面に作用する応力は…

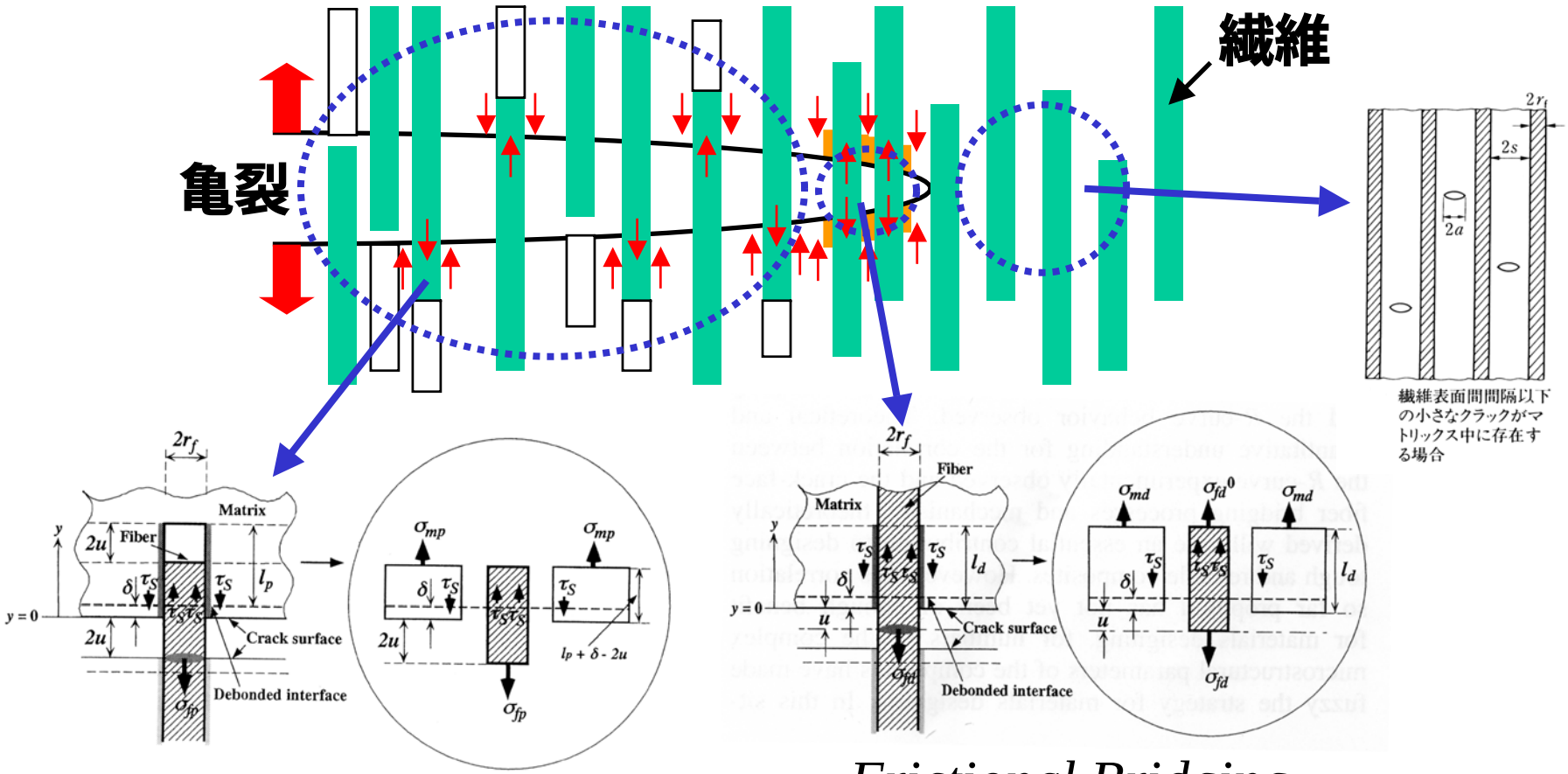
$$\sigma_p \propto \frac{a}{r}\sigma_\infty$$

a：亀裂長さの半分，r：粒子半径または界面の長さ

大きな強化相の方が亀裂をピン止めさせるために必要な強度や界面強度が小さくてよい．

クラックブリッジング (Bridging) による高靭性化－1

繊維が亀裂面を架橋し，亀裂進展の際に亀裂面を閉じるような応力を発生する．



Pull-out Bridging

Frictional Bridging

クラックブリッジングによる高靭性化－2

もう少し詳しい解析によれば，

ブリッジングが生じる以前では（McCarteny，1987）…

$$K_{\mathrm{Ic}} = \left(\frac{V_m E_c}{E_m}\right)^{\frac{1}{2}} K_0 = \left(1 - V_f\right)\left(1 + \frac{1}{\eta}\right)^{\frac{1}{2}} K_0$$

ここで，K_0は母相の破壊靭性

$$\eta = \frac{E_m\left(1 - V_f\right)}{E_f V_f}$$

ブリッジングによる破壊靭性向上は（Akatsuら，1999）…

$$K_{\mathrm{Ic}} = K_0 + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{\Delta a} \frac{\boxed{\sigma_b(x)}}{\sqrt{x}} dx \qquad \boxed{\sigma_b(x)} = \begin{cases} \sigma_{fb} & (0 \le \Delta a \le d) \\ \sigma_{pb} & (d \le \Delta a \le b) \\ 0 & (b \le \Delta a) \end{cases} \qquad \begin{cases} \sigma_{fb} = V_{fb}\sigma_{fd} \\ \sigma_{pb} = V_{pb}\sigma_{fp} \end{cases}$$

ここで，V_{fb}，V_{pb}はそれぞれfrictional，pull-out bridgingに貢献する繊維の体積含有率．σ_{fd}，σ_{fp}はそれぞれのプロセスで繊維が負担する応力．

$$\sigma_{fb} = 2\sqrt{\chi E_f \sigma_f^* \frac{\boxed{u(x)}}{l_f}} \qquad \sigma_{pb} = 2\frac{l_p - 2\boxed{u(x)}}{r_f}\left(1 - \frac{l_p - 2u(x)}{r_f}\frac{\tau_i}{E_f}\right)^{-1} \tau_i$$

クラックブリッジングによる高靭性化－3

$$\chi = \frac{l_f}{r_f}\frac{\tau_i}{\sigma_f^*}\left(1+\frac{1}{\eta}\right)$$

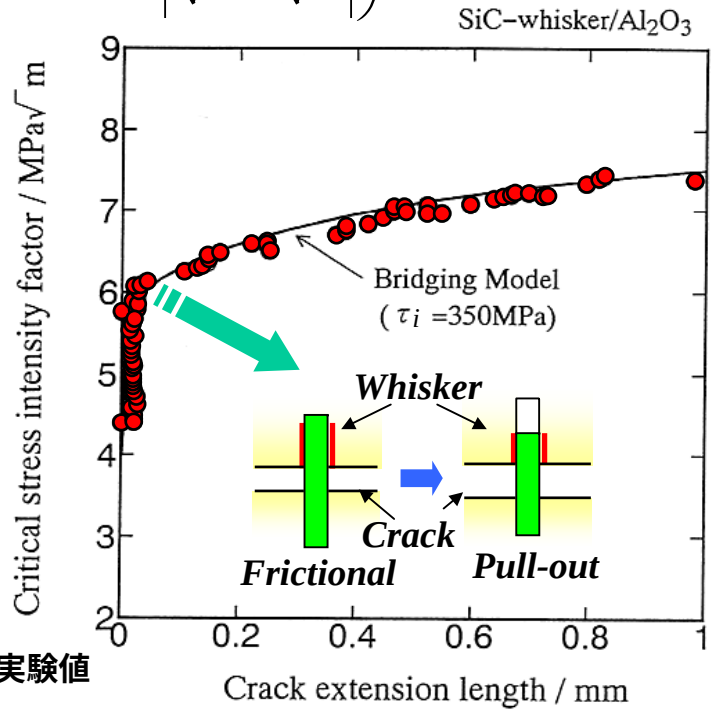
l_p：有効繊維引抜け長，d：Frictional Bridging Zone長，
b：全Bridging Zone長

一方，ブリッジした亀裂面の変位は次式となる．

$$u(x) = \frac{4}{E_c}K_0\sqrt{\frac{x}{2\pi}} + \frac{4}{\pi E_c}\int_0^{\Delta c}\sigma_b(x)\left(\sqrt{\frac{x}{t}} - \frac{1}{2}\ln\left|\frac{\sqrt{t}+\sqrt{x}}{\sqrt{t}-\sqrt{x}}\right|\right)dt$$

$\sigma_b(x)$と$u(x)$が釣合うまでこれらの式を繰返し計算すれば，亀裂進展抵抗が亀裂進展量の関数として与えられる．→R曲線

※シールディング機構による高靭性化は上昇型R曲線挙動を示すのが特徴である．



ウィスカー強化セラミック複合材料のR曲線挙動の実験値（赤点）と亀裂面架橋モデルによる予測値（実線）