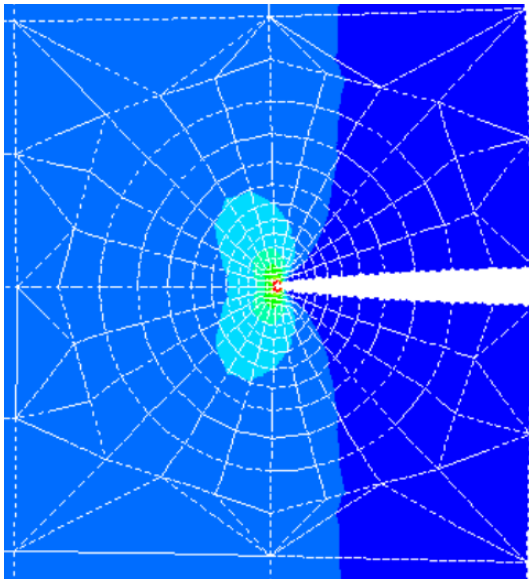


破壊力学



Code_Aster, Salome-Meca course material

GNU FDL licence (<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>)

概要

- ◆ 破壊力学の導入
 - 目的
 - き裂に関する用語
- ◆ 破壊力学における主なクライテリア
- ◆ Code_Asterの中での線形破壊力学
 - 変位外挿法による K値の計算
 - G- θ 法による G値の計算
- ◆ 塑性に対する補足:古典的方法の限界
- ◆ 参考文献

破壊力学:目的と一般事項

- ◆ **破壊力学の目的** : 現存するき裂の進展速度とその形状変化を決定する. 与えられた荷重条件, 境界条件の下でき裂が進展し得るかを評価し, 進展する場合はその速度を求める
- ◆ き裂発生 of 予測は破壊力学では着目しない(この目的では損傷力学の適用が適切となる)
- ◆ 応用先:
 - 設計(疲労寿命の計算)
 - 安全性(き裂の想定)

航空産業におけるき裂進展

- ▶ 胴体シェルの疲労による延性破壊
- ▶ 破壊力学の貢献:
 - 構造物の耐用年数のより優れた評価

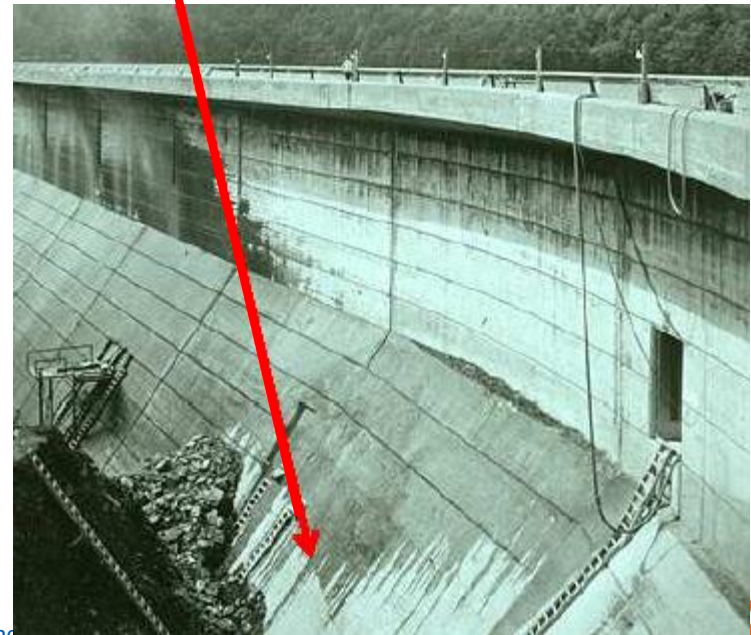
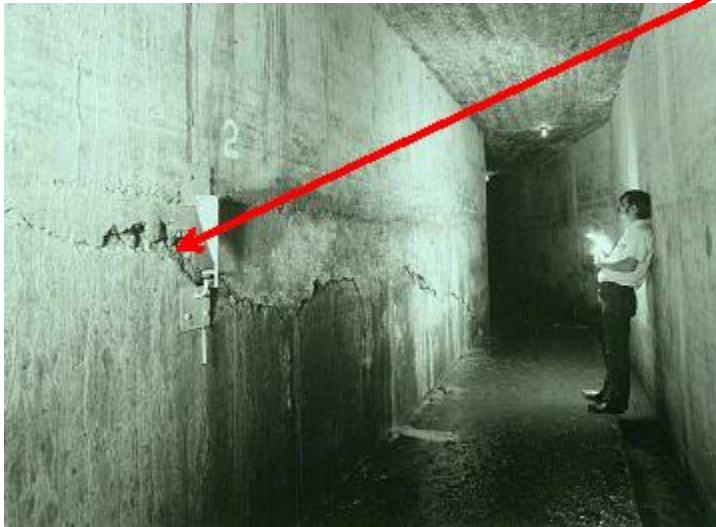


土木工学分野におけるき裂進展

◆ ダムの表面のき裂進展

◆ 破壊力学の貢献:

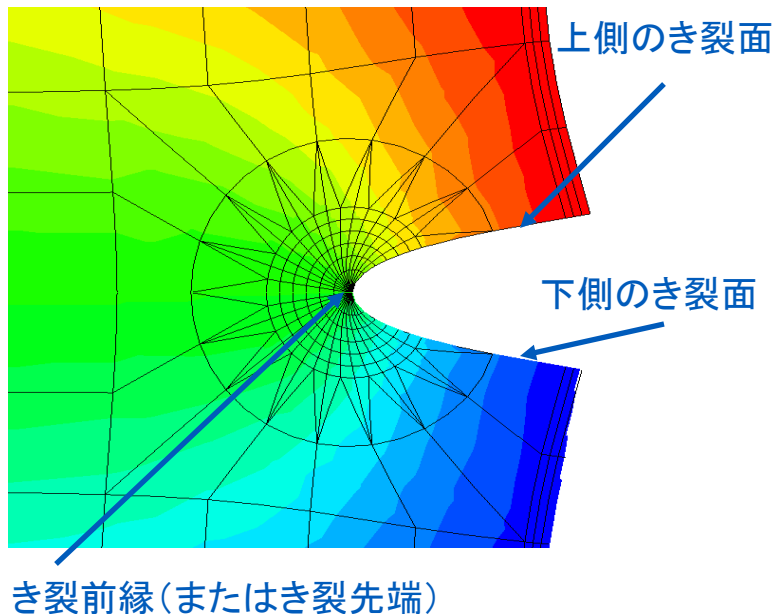
■ き裂の評価と修理



き裂を含む機械的問題のための用語

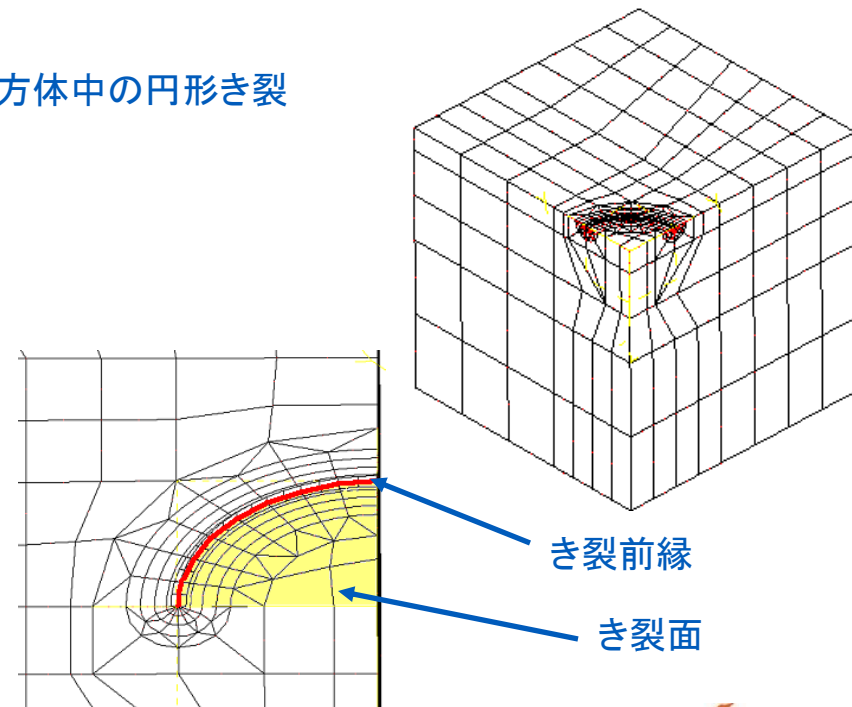
- ◆ き裂：物質の巨視的幾何学的不連続性
- ◆ き裂前縁：物質が連続的に見られる領域（実次元-2次元）
- ◆ き裂面：き裂上で不連続が生じる部分（実次元-1次元）

2次元問題



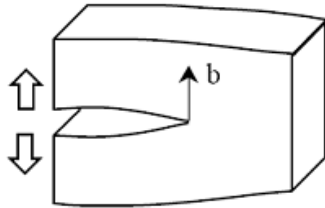
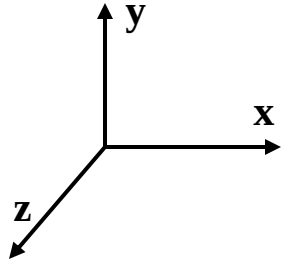
3次元問題

立方体中の円形き裂



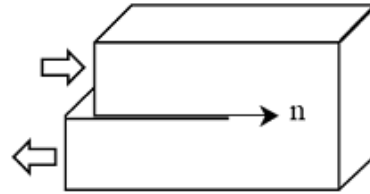
弾性体中のき裂

◆ き裂の3モード



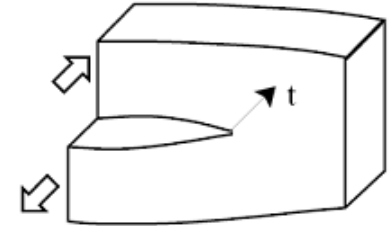
Mode I

$$\begin{cases} \llbracket u_x \rrbracket = 0 \\ \llbracket u_y \rrbracket \neq 0 \\ \llbracket u_z \rrbracket = 0 \end{cases}$$



Mode II

$$\begin{cases} \llbracket u_x \rrbracket \neq 0 \\ \llbracket u_y \rrbracket = 0 \\ \llbracket u_z \rrbracket = 0 \end{cases}$$



Mode III

$$\begin{cases} \llbracket u_x \rrbracket = 0 \\ \llbracket u_y \rrbracket = 0 \\ \llbracket u_z \rrbracket \neq 0 \end{cases}$$

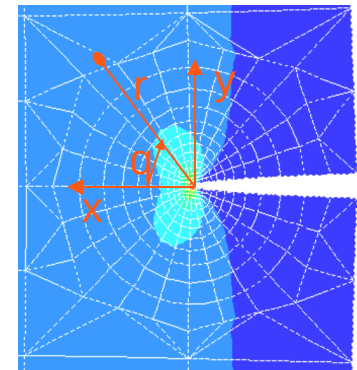
◆ 特異応力 (き裂 = 幾何学的特異点)

$$\begin{cases} \boldsymbol{\sigma} \sim \frac{K_i(\boldsymbol{\sigma}^\infty, a)}{\sqrt{r}} [f(\theta)] \\ \mathbf{u} \sim K_i(\boldsymbol{\sigma}^\infty, a) \sqrt{r} [g(\theta)] \end{cases}_{r \rightarrow 0}$$

r, θ の極座標表示

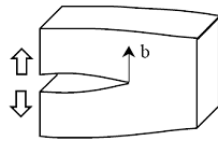
き裂先端近傍

a はき裂寸法



き裂先端近傍でのミーゼス
応力分布

変位場と応力場

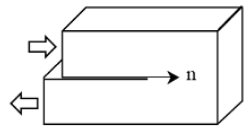


Mode I

Ouverture plane
[[u]].b

変位場:

$$\begin{cases} u_x = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} (3 - 4\nu - \cos \theta) \cos \frac{\theta}{2} + \frac{K_{II}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} (5 - 4\nu + \cos \theta) \sin \frac{\theta}{2} \\ u_y = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} (3 - 4\nu - \cos \theta) \sin \frac{\theta}{2} + \frac{K_{II}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} (-1 + 4\nu - \cos \theta) \cos \frac{\theta}{2} \end{cases}$$

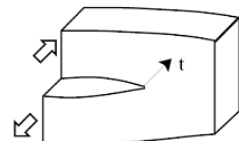


Mode II

Glissement plan
[[v]].n

応力場:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \frac{5 \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2}}{4} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \frac{-5 \sin \frac{\theta}{2} + 3 \sin \frac{3\theta}{2}}{4} \\ \sigma_{\theta\theta} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \frac{3 \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2}}{4} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \frac{-3 \sin \frac{\theta}{2} - 3 \sin \frac{3\theta}{2}}{4} \\ \sigma_{r\theta} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \frac{\sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2}}{4} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \frac{\cos \frac{\theta}{2} + 3 \cos \frac{3\theta}{2}}{4} \end{cases}$$



Mode III

Glissement anti-plan
[[u]].t

変位場:

$$u_z = K_{III} \frac{4(1+\nu)}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \left(\frac{\theta}{2} \right)$$

応力場:

$$\begin{cases} \sigma_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \left(\frac{\theta}{2} \right) \\ \sigma_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \left(\frac{\theta}{2} \right) \end{cases}$$

2D-plane

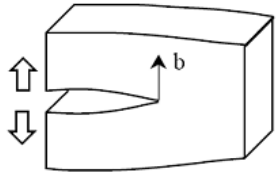
2D-
antiplane
(面外)

LEFM(線形破壊力学)におけるき裂進展クライテリア

- ▶ 応力拡大係数(Westergaard): 局所的クライテリア
- ▶ 経路積分(Rice): 大局的クライテリア
- ▶ エネルギー解放率(Griffith): 大局的クライテリア
- ▶ パラメータ間の関係
- ▶ その他: 疲労(Paris則)

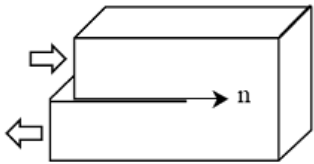
応力拡大係数 K

◆ 応力拡大係数の特徴



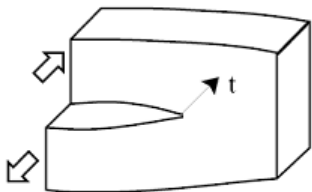
Mode I

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_{yy}(r, 0) \sqrt{2\pi r}) = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{8(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} [[u_2]] \right)$$



Mode II

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_{xy}(r, 0) \sqrt{2\pi r}) = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{8(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} [[u_1]] \right)$$



Mode III

$$K_{III} = \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_{yz}(r, 0) \sqrt{2\pi r}) = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{8(1+\nu)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} [[u_3]] \right)$$

K の次元: MPa√m

応力拡大係数K: 解析解

2つの古典的な例



$$K_I = \sigma^\infty \sqrt{\pi a} \cos^2 \alpha$$

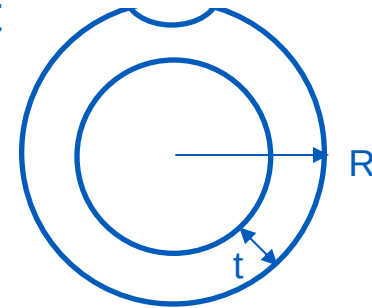
$$K_{II} = \sigma^\infty \sqrt{\pi a} \cos \alpha \sin \alpha$$



$$K_I = \sigma^\infty \sqrt{\pi a} \left(\cos \frac{\pi a}{b} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

K は下記に依存する:

- き裂の形状
- 幾何学構造
- 荷重条件



規格化されたアプローチ: 配管に対するRCC-M および RSE-M

例: R/t比=10の配管, a/b比=0.3の半だ円き裂

$$K_I = \sqrt{\pi a} \left(\sigma_0 i_0 + \sigma_1 i_1 \left(\frac{a}{t} \right) + \sigma_2 i_2 \left(\frac{a}{t} \right)^2 + \sigma_3 i_3 \left(\frac{a}{t} \right)^3 + \sigma_4 i_4 \left(\frac{a}{t} \right)^4 \right) \quad \text{with} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Table of } i_0 \text{ to } i_4 \\ \sigma(x) = \sigma_0 + \sigma_1 \left(\frac{x}{t} \right) + \sigma_2 \left(\frac{x}{t} \right)^2 + \sigma_3 \left(\frac{x}{t} \right)^3 + \sigma_4 \left(\frac{x}{t} \right)^4 \end{array} \right.$$

a/t	i ₀	i ₁	i ₂	i ₃	i ₄
0,00	1,000	0,612	0,471	0,391	0,338
0,25	1,022	0,629	0,489	0,412	0,364
0,50	1,175	0,670	0,507	0,424	0,371
0,80	1,393	0,772	0,568	0,463	0,398

$$\sigma(x) = \sigma_0 + \sigma_1 \left(\frac{x}{t} \right) + \sigma_2 \left(\frac{x}{t} \right)^2 + \sigma_3 \left(\frac{x}{t} \right)^3 + \sigma_4 \left(\frac{x}{t} \right)^4$$

経路積分: Rice

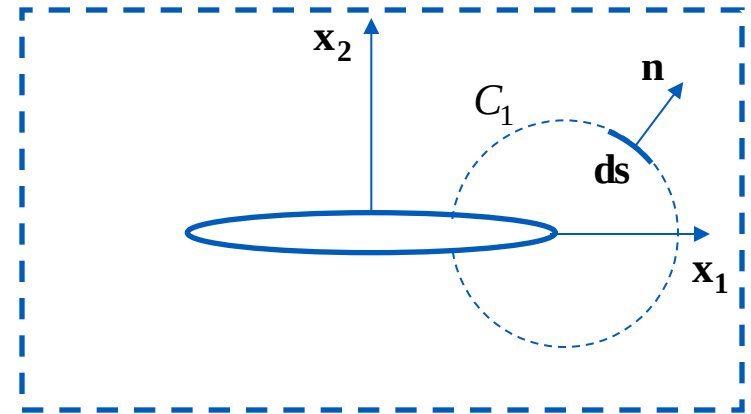
◆ 応力特異性の特徴づけ

- エネルギー保存から導かれる
- 経路独立性

混合モード荷重を受けるき裂入り平板
(modes I および II):

$$J = \int_{C_1} \left(w_e n_1 - \sigma_{ij} n_j \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \right) ds$$

$w_e = \boldsymbol{\sigma} : \boldsymbol{\varepsilon}$: 弾性エネルギー密度



エネルギー解放率: G (Griffith)

◆ グリフィスの仮説

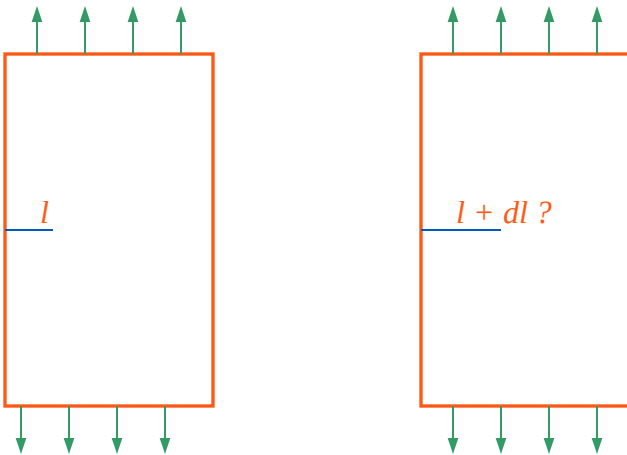
- き裂進展に要するエネルギーは分離された面積や材料特性に比例
- 全体的なエネルギー = ポテンシャルエネルギーとき裂進展エネルギーの和
- エネルギー最小原理

◆ 2次元の例

$$E^{tot}(l) = P(l) + 2\gamma l, \quad E^{tot}(l + dl) = P(l + dl) + 2\gamma(l + dl)$$

エネルギー最小原理:

$$E^{tot}(l + dl) < E^{tot}(l) \Leftrightarrow \frac{P(l + dl) - P(l)}{dl} < 2\gamma$$
$$G = -\frac{\partial P}{\partial l} > 2\gamma$$



◆ Gの定義：仮想的なクラック進展の際のポテンシャルエネルギーの変化

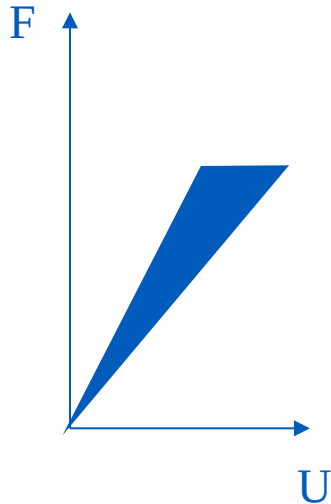
一般化と説明: G (Griffith)

▶ 一般化:

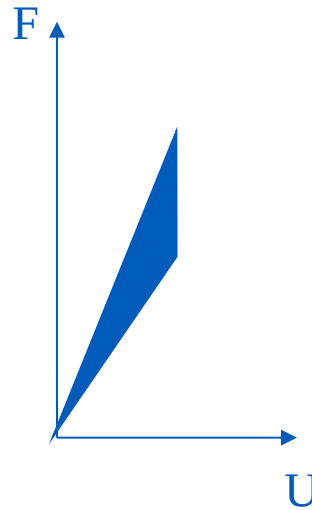
$$G = - \frac{\partial P}{\partial A}$$

ポテンシャルエネルギー
き裂進展面積

▶ 説明:



荷重一定



変位一定

Gの次元: J/m² or N/m

パラメータ間の関係 (Irwin)

◆ 線形弾性

$$G = \frac{1}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^2$$

平面応力

$$G = \frac{1-\nu^2}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^2$$

平面ひずみ, 3D

$$G = J$$

平面弾性 (平面ひずみ + 平面応力)

◆ In Code_Aster

- Kの計算
- Gの計算

◆ 使われる値 (限界基準)

き裂進展条件

$$\begin{cases} K_i \geq K_{Ic} \\ G \geq 2\gamma \end{cases}$$

アルミニウム

$$K_{Ic} \approx 30 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

チタン合金

$$K_{Ic} \approx 100 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

硬化鋼

$$K_{Ic} \approx 3 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

ポリマー

$$K_{Ic} \approx 120 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

木材

$$K_{Ic} \approx 2 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

コンクリート

$$K_{Ic} \approx 1 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

その他: 疲労き裂進展則 (Paris)

▶ 疲労の原理:

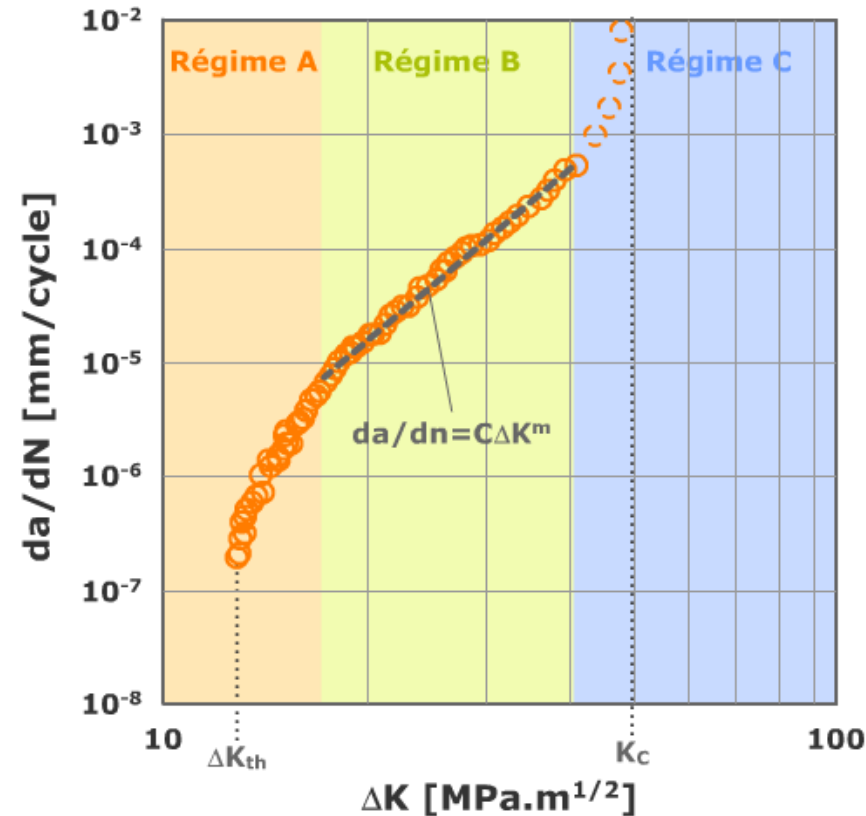
- 低荷重の繰り返しによるき裂進展

▶ Parisの疲労き裂進展則

$$\frac{da}{dN} = c \cdot \Delta K^m$$

(c, m 材料特性)

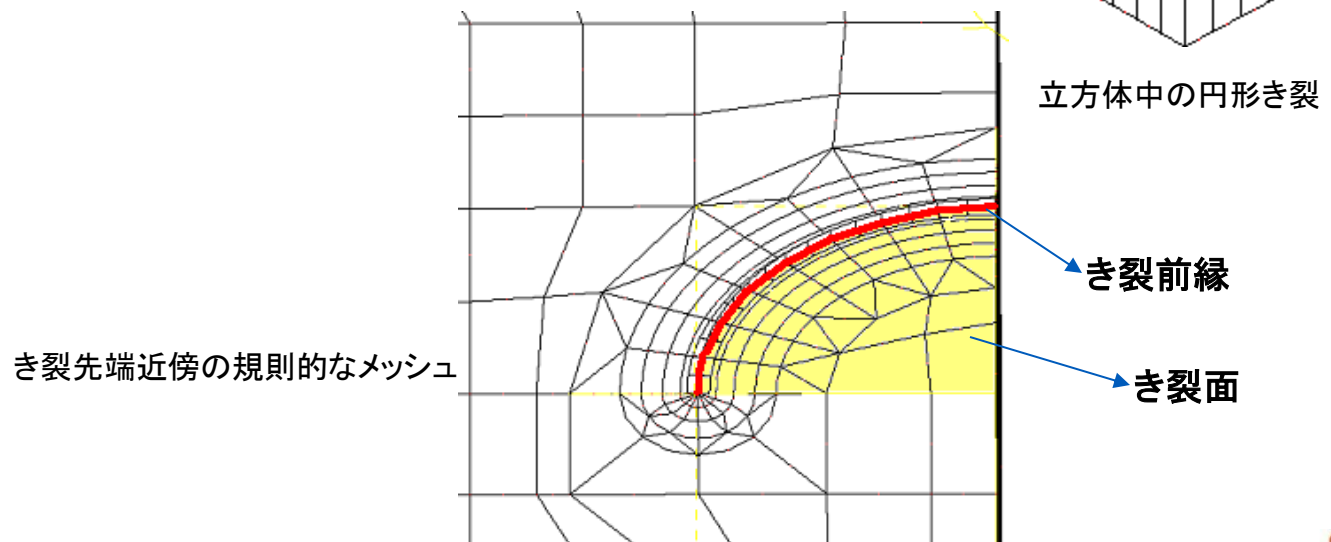
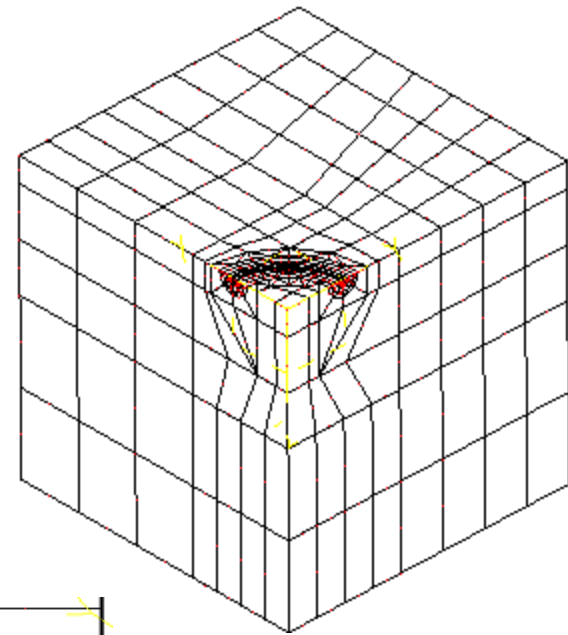
- Stage A : 応力拡大係数範囲 ΔK が低く, ゆっくりとあるいは進展しない
- Stage B : 応力拡大係数範囲 ΔK が中程度で, 安定した速度で進展する
- Stage C : 応力拡大係数範囲 ΔK が大きく, 急速に破断する



Code_Asterの中での破壊力学解析

◆ 疲労の原理:

- Step 1: き裂を含む構造のメッシュ作成
- Step 2: 熱伝導-機械的解析(弾性または弾塑性)
- Step 3: ポスト処理: 破壊力学パラメータの計算



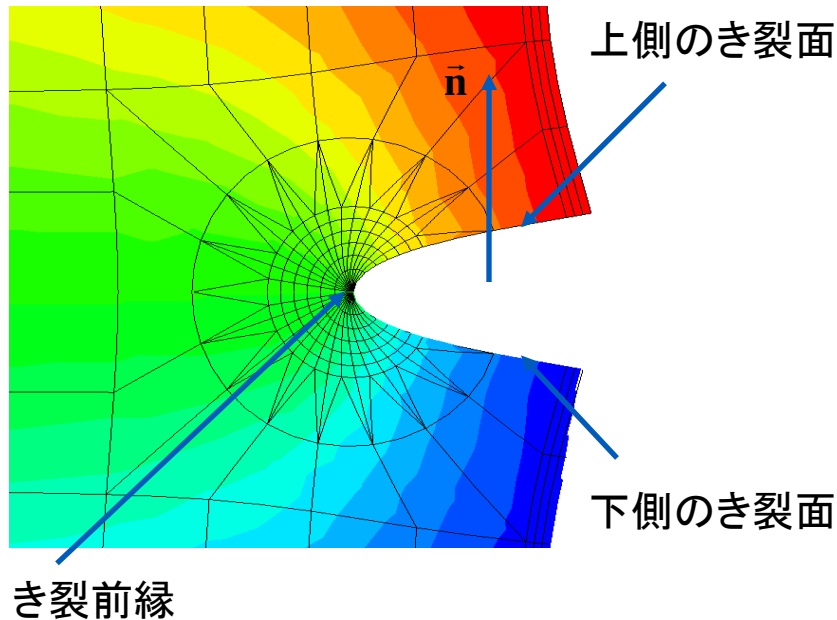
Code_Asterの中でのき裂の定義

一般的な場合：

```
FOND = DEFI_FOND_FISS (  
  MAILLAGE      = MA,  
  FOND_FISS     = _F( GROUP_NO = ... / GROUP_MA =... ) ,  
  / LEVRE_SUP   = _F( GROUP_MA = ... ) ,  
    LEVRE_INF   = _F( GROUP_MA = ... ) ,  
  / NORMALE = (x, y, z) ,  
);
```

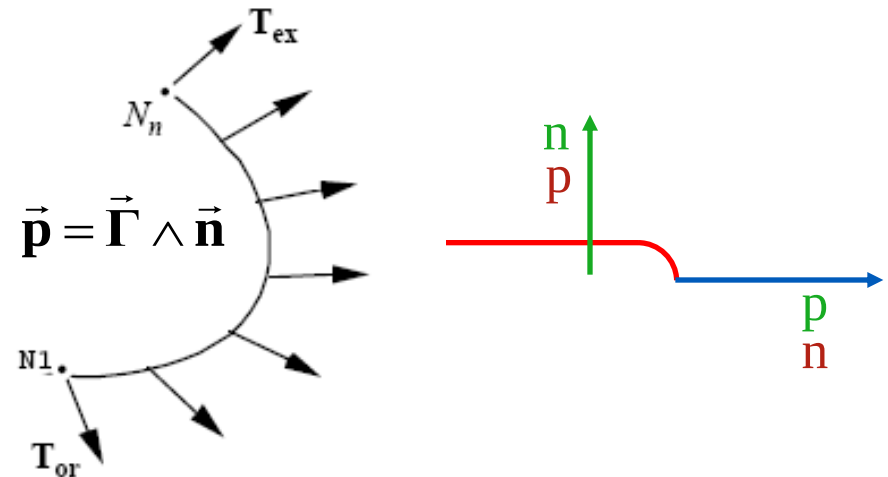
き裂先端の定義

き裂面の定義



注意:

- 3次元き裂の方向
- 切欠き



Code_AsterでのK, Gの計算

▶ Code_Asterでの2つの可能性: KまたはG(弾性)

■ 応力拡大係数 Kの計算: オペレータ `POST_K1_K2_K3`

☺ : 簡単に使用でき, 比較的簡便

☹ : 先端近傍のメッシュの品質にかなり敏感に影響される
準平面のき裂のみ可

■ エネルギー解放率の計算 : オペレータ `CALC_G`

☺ : 理論的には高精度で, メッシュには鈍感

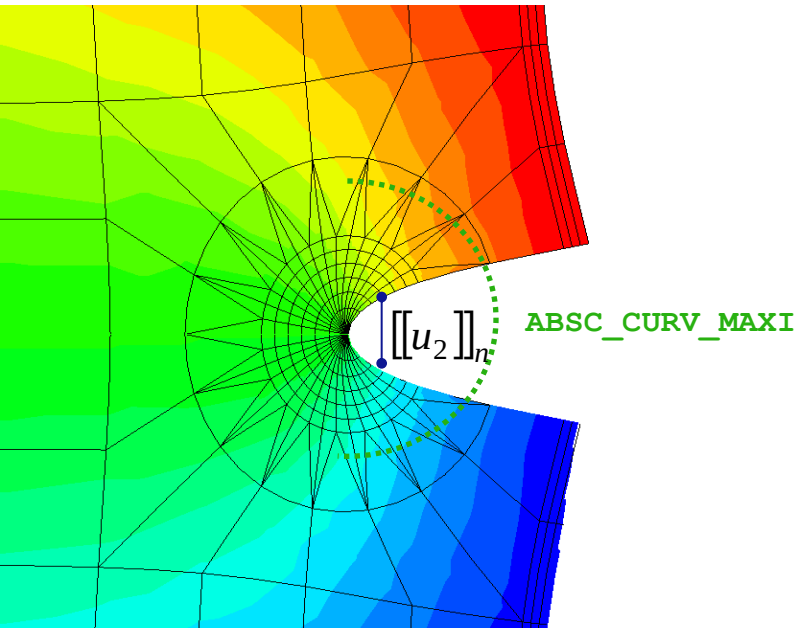
☹ : 3次元の中ではクラック先端に沿って規則的な結果が得られる

オペレータ POST_K1_K2_K3演算子の使用法

```
TABL_K = POST_K1_K2_K3 (
  MODELISTATION = "3D","AXIS","D_PLAN" or "C_PLAN", —————> モデルの定義
  /FOND_FISS = FOND, —————> き裂先端
  /FISSURE =FISS —————> (DEFI_FOND_FISSであらかじめ定義する)
  /FISSURE =FISS —————> X-FEMにおけるき裂
  VECT_K1 = (vx, vy, vz), —————> き裂面に垂直
  MATER = ...,
  RESULTAT ( or TABL_DEPL_SUP / TABL_DEPL_INF) —————> 力学計算の結果

  ABSC_CURV_MAXI= ..., —————> 外挿のためのき裂先端の
) —————> 最大距離
```

変位外挿法 (1)



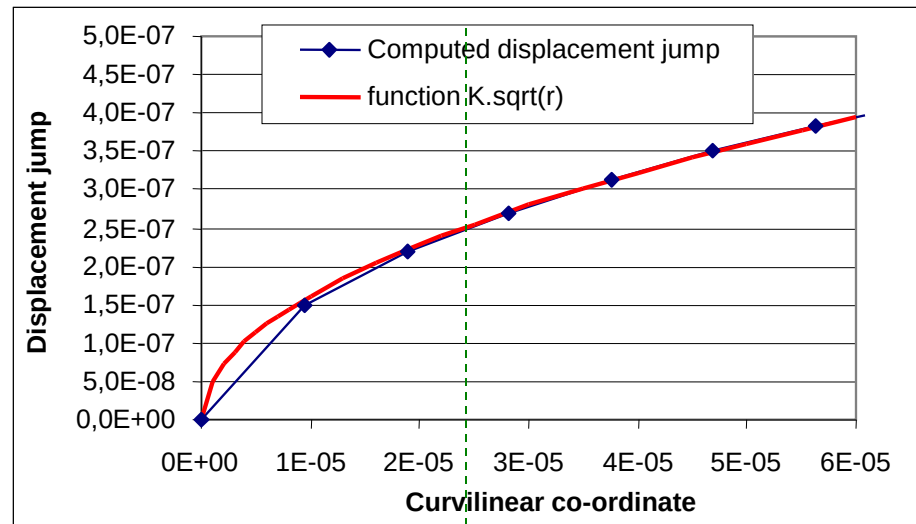
き裂先端近傍のき裂面に沿った節点変位の抽出(法線方向)

オペレータ POST_K1_K2_K3

解析モデル:

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{8(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} [[u_2]] \right)$$

with: $[[u_2]] = (\mathbf{U}_{\text{LEVRE_SUP}} - \mathbf{U}_{\text{LEVRE_INF}}) \cdot \mathbf{VECT_K1}$

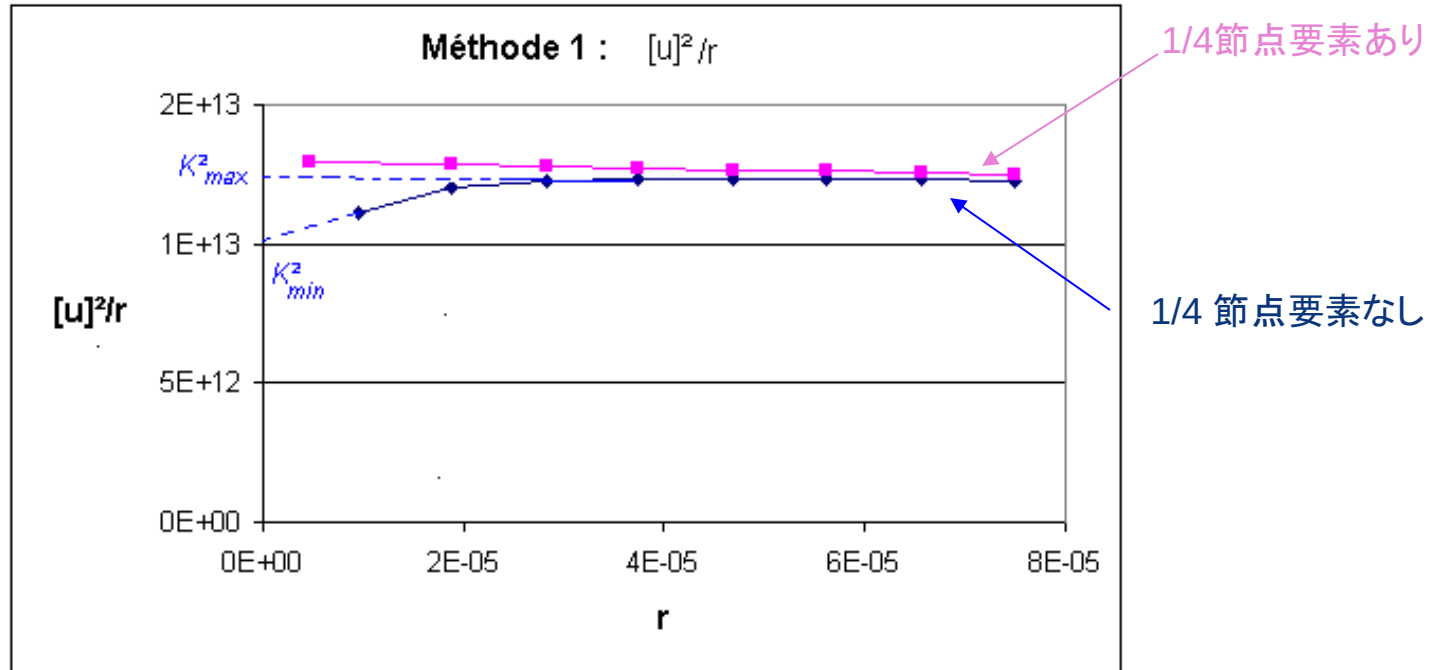


変位外挿法(2)

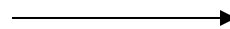
変位を外挿する3つの方法:

Method 1

$$\frac{[[u]]^2}{r}$$



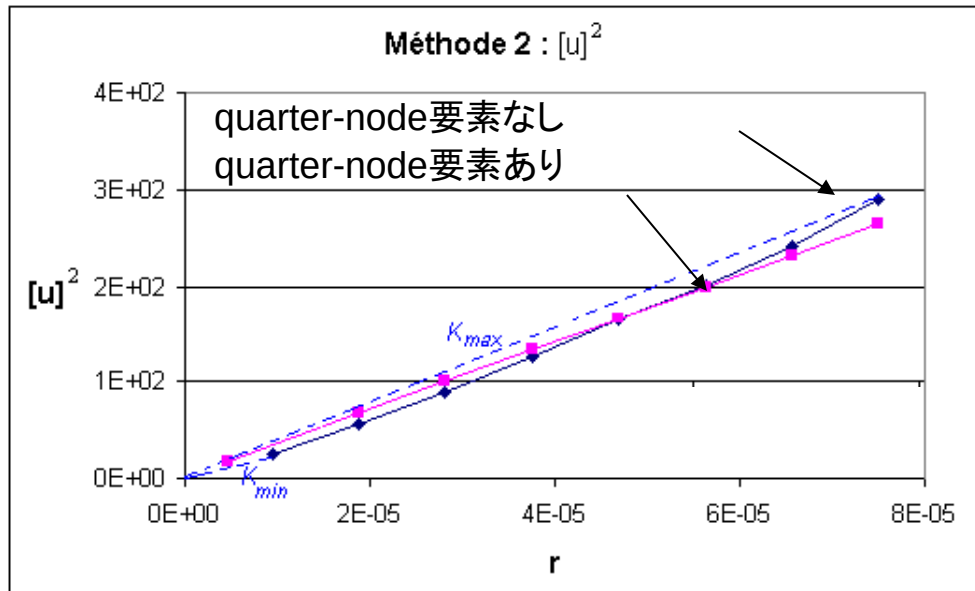
右側部分の傾向を $r = 0$ 点
まで延長



1つの節点対に対して1個の
K値を計算する

変位外挿法(3)

Method 2: $[[u]]^2$



線の傾き

→ 1個のき裂に対して
固有のK値

結果出力:

- (resu file) テーブルの中で: 方法1の最大値のみ,
- (resu file) テーブルの中で: 3つの方法の間の相対誤差の推定,
- (INFO=2 のとき)メッシュファイルの中で: 詳細な計算

Method 3

J(k)の自乗誤差の最小化:

$$J(k) = \frac{1}{2} \int_0^{d_{\max}} ([U(r)] - k\sqrt{r})^2 dr$$

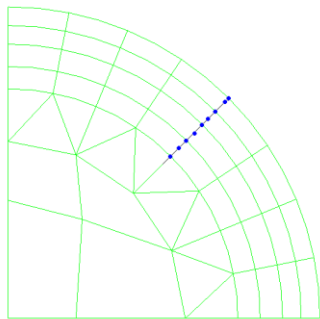


Kの一つの値

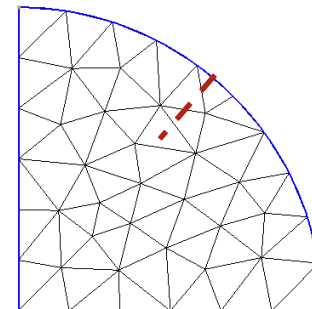
POST_K1_K2_K3の使用に関する補足

◆ 備考と補足:

- オペレータは, 平面または準平面のき裂に限定される(1つの法線のみを定義することができる)
- **ABSC_CURV_MAXIの選択**: 一般的に, 3~4個の要素に対して外挿を行う
- 検証: 相対誤差は十分小さくならない
- 計算の精度: 検証試験の誤差が10%未満;
2次の1/4節点要素を使用することで精度が大幅に向上する
(Barsoum要素, **MODI_MAILLAGE**).
- メッシュタイプ: 自由か拘束かを意識する. 可能な場合は拘束することで外挿が1個回避でき, 精度が向上する



構造化メッシュ上での計算



構造化されていないメッシュ上での計算

Code_Aster 中の K, G の計算

▶ Code_Aster 中の 2 つの可能性: K or G (弾性)

■ 応力拡大係数 K の計算: オペレータ `POST_K1_K2_K3`

☺ : 簡便で比較的高精度

☹ : 準平面状のき裂にのみ有効で, 先端付近のメッシュ品質にかなり敏感

■ エネルギー解放率の計算: オペレータ `CALC_G`

☺ : 理論的には高精度でメッシュに鈍感

☹ : 3次元のき裂沿って規則的な結果

Code_Asterの中での線形破壊力学:G-theta method

◆オペレータ CALC_G

$$G = -\frac{\partial P}{\partial A} \longrightarrow \text{直接計算は困難}$$

◆ G-theta method:

- 系全体のエネルギーに対するラグランジュ法

$$F^\eta : M \rightarrow M + \eta \theta (M) \quad \begin{array}{l} \text{参照形状からの変換} \\ \text{仮想き裂進展を表現} \end{array}$$

◆ 特性:

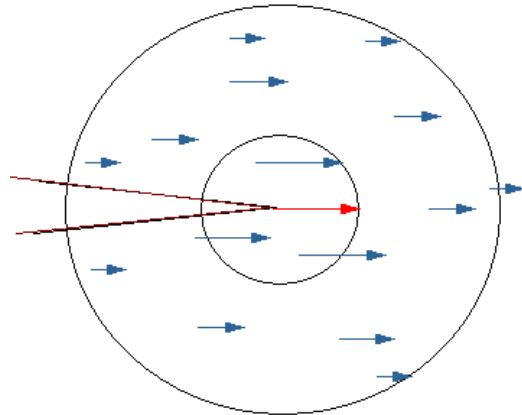
- 局所エネルギー開放率 Gは以下の微分方程式の解

$$\int_{\Gamma_0} G \theta \cdot m ds = \Gamma(\theta) = - \left. \frac{dW(u(\eta))}{d\eta} \right|_{\eta=0} \quad \forall \theta \text{ tangent to } \partial\Omega$$

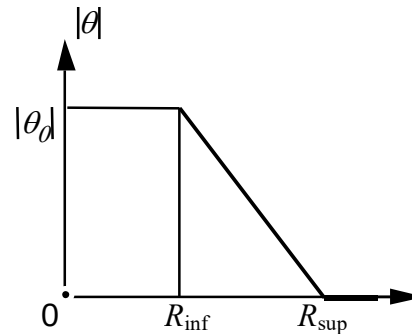
き裂先端 先端と直交方向

G-theta method: θ 場の導入

2次元:

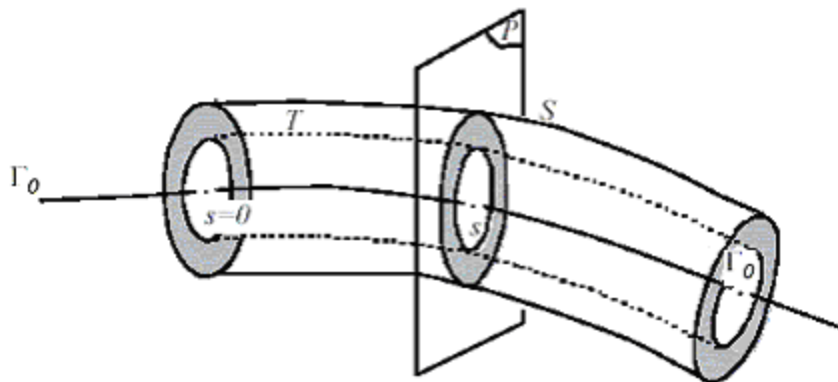


Geometrical definition of theta field



備考: R_{inf} と R_{sup}
との間で計算される

3次元:



θ 場の試験関数の基底

$$\tilde{\Theta} = \{\theta^i \in \Theta, i = 1, \dots, P\}$$

G の空間離散

$$G(s) = \sum_{j=1}^N G_j p_j(s)$$

G-θ法: 3次元の場合

$$\int_{\Gamma_0} G(s) \boldsymbol{\theta}(s) \cdot \mathbf{m}(s) ds = \Gamma(\boldsymbol{\theta}), \forall \boldsymbol{\theta} \in \Theta$$

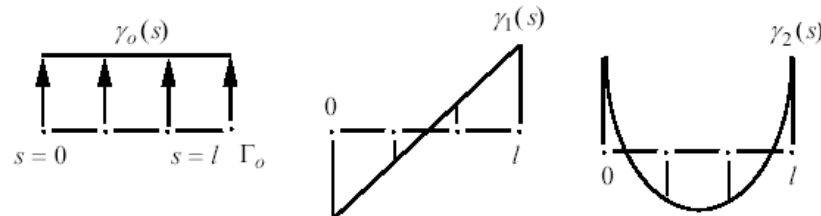
$$\Downarrow$$

$$\int_{\Gamma_0} \left(\sum_{j=1}^N G_j p_j(s) \right) \bar{\boldsymbol{\theta}}^i \cdot \mathbf{m}(s) ds = \Gamma(\boldsymbol{\theta}^i), \forall i \in [1, P]$$

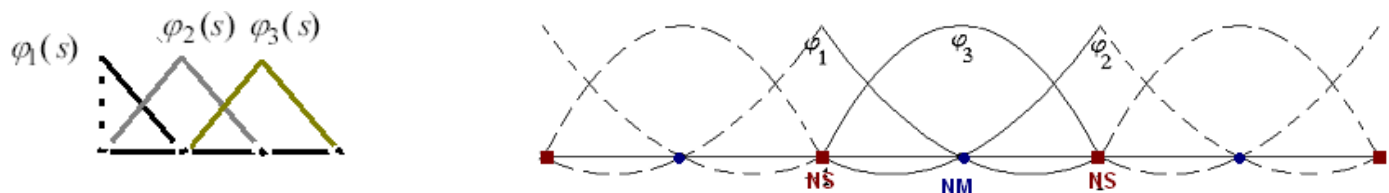
$$\Longrightarrow \begin{cases} \sum_{j=1}^N a_{ij} G_j = b_i \\ \text{avec } a_{ij} = \int_{\Gamma_0} p_j(s) \bar{\boldsymbol{\theta}}^i \cdot \mathbf{m}(s) ds \\ b_i = \Gamma(\boldsymbol{\theta}^i) \end{cases} \quad i \in [1, P]$$

▶ 平滑化の2つの族:

■ 0から7の次数をもつLEGENDRE多項式の利用



■ き裂先端要素の形状関数の利用: 'LAGRANGE'



線形

2次

CALC_G

```
TAB_G = CALC_G (
```

```
  RESULTAT = resu,
```

```
  THETA = _F(    FOND_FISS = FOND,  
                (or FISSURE = ...),  
                R_INF = ri,  
                R_SUP = rs,  
                ),
```

力学計算による結果

θ場の定義

```
  SYME_CHAR = "SYME" or "SANS "
```

```
  EXCIT = _F(    CHARGE = charmeca,  
                FONC_MULT = ff,)
```

荷重がGに影響する可能性
補足: デフォルトではすべての
の負荷が考慮され, このキー
ワードは使わないこと

```
    LISSAGE = _F(  
    LISSAGE_THETA = ...  
    LISSAGE_G = ...  
    DEGRE = 0 → 7
```

3次元での平滑化オプション

オペレータ CALC_G:計算オプション

OPTION =

- / 'CALC_G' → 2D & 3Dの中でのGの計算 (local)
- / 'CALC_G_GLOB' → 3Dの中でのGの計算 (global)
- / 'CALC_K_G' → 2D & 3Dの中でのKの計算 (local)

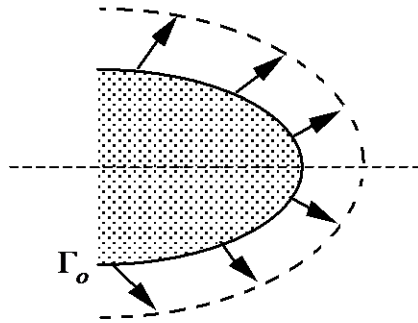
必須キーワード: FOND_FISS / FISSURE



通常
の
選
択

Operator CALC_G: local と global

Global 値: **CALC_G_GLOB** と **G_MAX_GLOB**, の選択



結果出力テーブルに出力されたグローバル $G \Gamma(\theta)$ (J/m) は一様なき裂進展に対応

$$\Gamma(\theta) = \int_{\Gamma_0} G(s) \theta(s) m(s) ds, \forall \theta \in \Theta \quad \theta(s) \cdot m(s) = 1, \quad \forall s \text{ absc. curviligne de } \Gamma_o$$

平均局所値 $\bar{G}$ (J/m²) を得るため、き裂長さ l で割る

$$\bar{G} = \frac{1}{l} \int_{\Gamma_0} G(s) ds = \frac{1}{l} \Gamma(\theta)$$

ローカル値: 選択 **CALC_G**, **CALC_K_G**, **G_MAX**

結果出力テーブルに出力された $G(s)$ の値は局所値 J/m² に対応

特別な場合: 2D軸対称では, 'local' G (option **CALC_G**) は **ラジアン単位のエネルギー** に対応するため, G の局所的な値を得るためには半径 R で割る必要がある

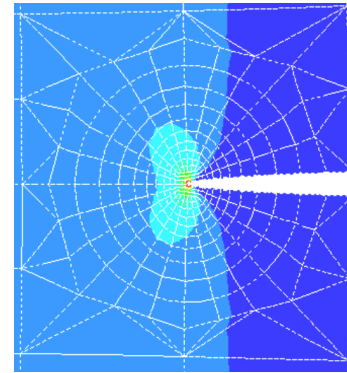
$$\bar{G} = \frac{1}{R} \Gamma(\theta)$$

Operator CALC_G: 補足

◆ 備考及び補足:

■ 理論的には, 結果は θ の経路に非依存. 選択のためのヒント

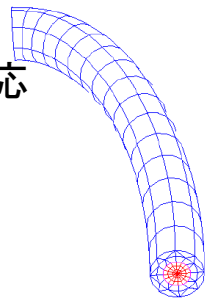
- R_{inf} は 非ゼロ (き裂先端では低精度)
- R_{sup} が大きすぎない (例えば5~6の要素)
- できれば, 異なる経路に対して独立性を確認
- 結果出力テーブルの G と G_{Irwin} を比較



■ 注意: き裂先端近傍で円環を持つメッシュを実際に使っているが,

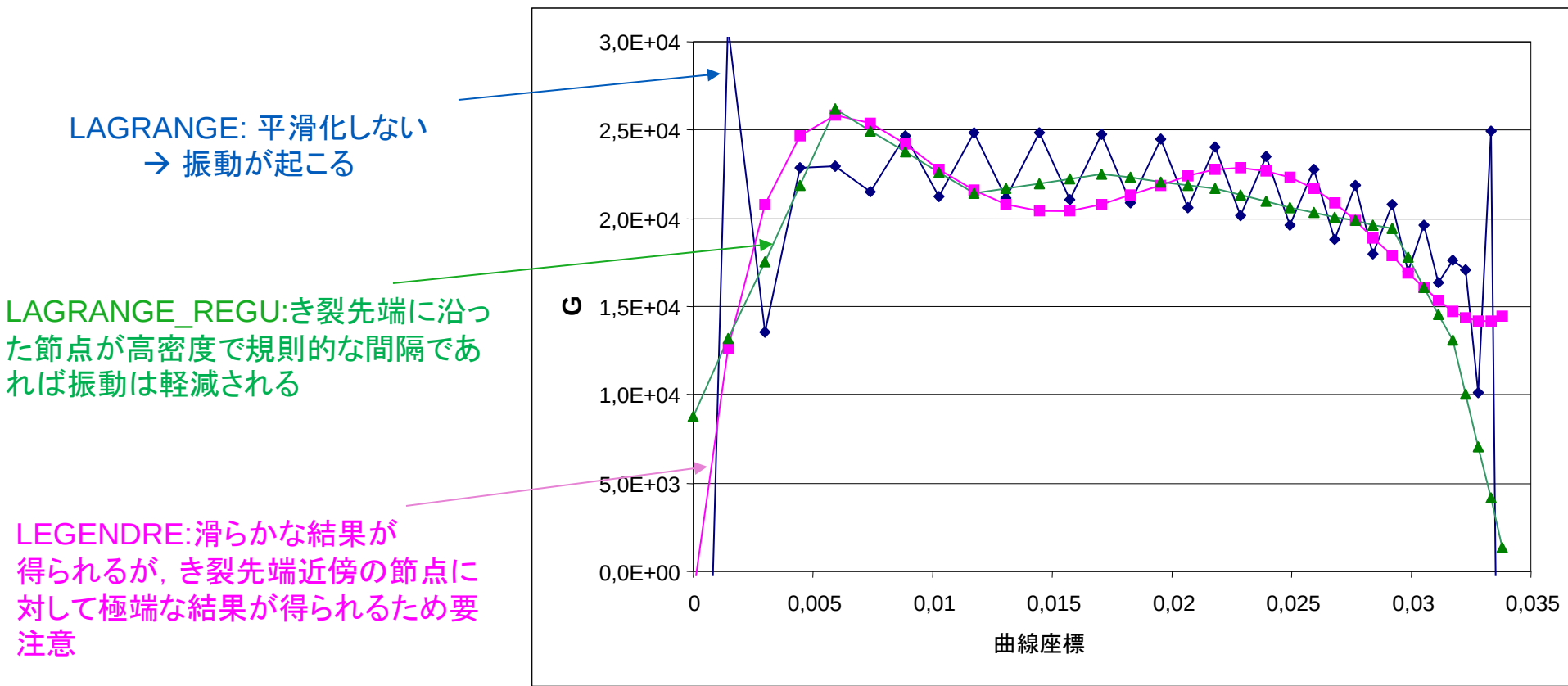
→ き裂先端近傍で円環状のメッシュを使う必要はない

→ き裂先端近傍の形状を円環状メッシュで表現すれば, θ 場の半径が円環の半径に対応してより規則的な結果を与える



Operator CALC_G: 3次元解析のヒント

3Dの平滑化の選択 :異なるスムージング方法を使用し, 得られる結果を比較するとよい



だ円き裂のエネルギー開放率(比較的粗いメッシュ)

G-theta method: 応力拡大係数の計算

定義: $G(u)$ に関連する対称二直線 : $g(u,v)$

$$g(u,v) = \frac{1}{4}(G(u+v) - G(u-v)) \quad (\text{従って } g(u,u) = G(u) \quad)$$

特性: 特異変位は $g(u, v)$ によって定義されるスカラー積の参照により直交

$$g(u_I^S, u_{II}^S) = g(u_I^S, u_{III}^S) = g(u_{II}^S, u_{III}^S) = 0$$

$$g(u^R, u_I^S) = g(u^R, u_{II}^S) = g(u^R, u_{III}^S) = 0$$

証明: ライスの積分 (弾性体では G と等しい) と特異関数の対称性

$$u = u^R + K_I u_I^S + K_{II} u_{II}^S + K_{III} u_{III}^S$$



$$G = g(u, u) = g(u^R + K_I u_I^S + K_{II} u_{II}^S + K_{III} u_{III}^S, u^R + K_I u_I^S + K_{II} u_{II}^S + K_{III} u_{III}^S)$$



$$G = g(u, u) = K_I^2 g(u_I^S, u_I^S) + K_{II}^2 g(u_{II}^S, u_{II}^S) + K_{III}^2 g(u_{III}^S, u_{III}^S)$$

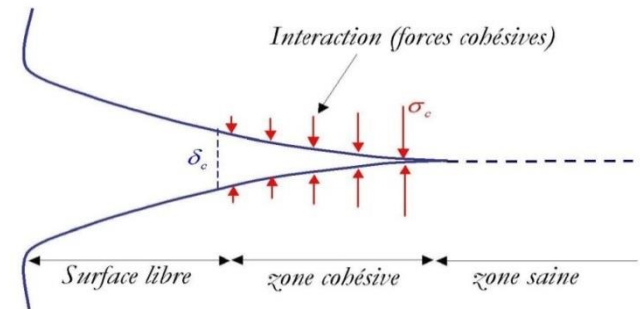


$$\left\{ \begin{array}{l} K_I = \frac{E}{(1-\nu^2)} g(u, u_I^S) \\ K_{II} = \frac{E}{(1-\nu^2)} g(u, u_{II}^S) \\ K_{III} = 2\mu g(u, u_{III}^S) \end{array} \right.$$

結合領域モデル(CZM): 一般性

◆ 付加物理領域:

- 自由表面(き裂)と健全部分との間の相互作用領域



◆ 特徴的な挙動の法則:

- ギャップ変位 $\vec{\delta}$ に依存した表面エネルギー Ψ を仮定する
- 結合法則は $\vec{\delta}$ と分離の力ベクトル(応力)との関係と等価. 応力: $\vec{\sigma} = \frac{\partial \Psi}{\partial \vec{\delta}}$
- 結合法則のパラメータ: 限界表面エネルギー G_c と限界応力 σ_c

◆ 特徴的な有限要素:

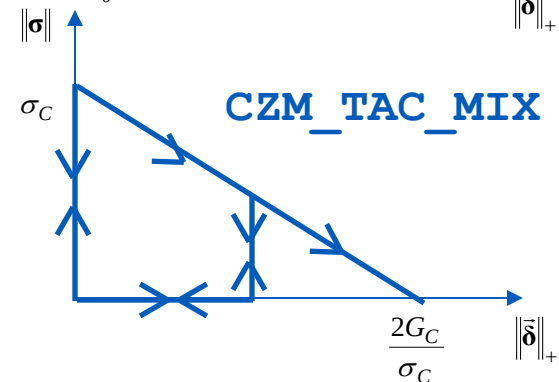
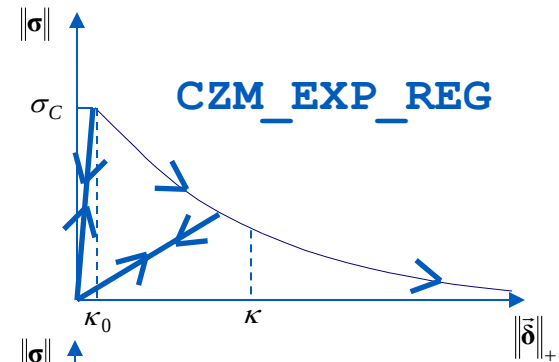
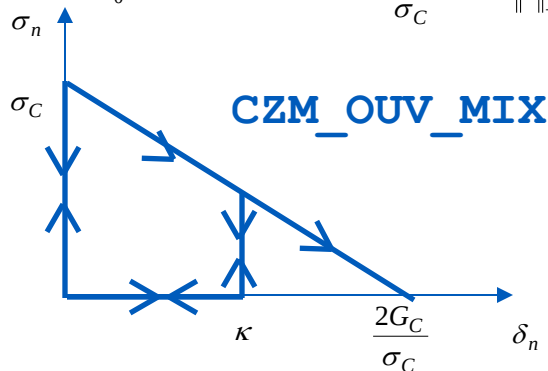
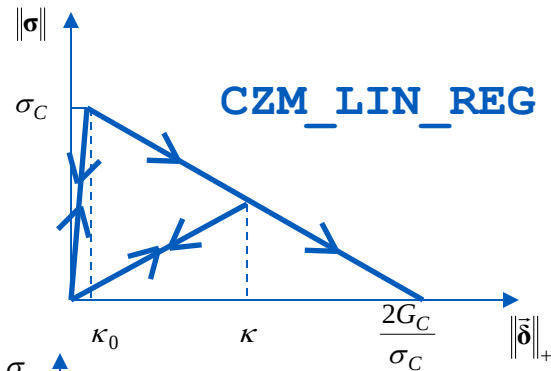
- 古典的なジョイント要素, 正規化線形: **PLAN_JOINT**, **AXIS_JOINT**, **3D_JOINT** ; 付加パラメータ **PENA_ADHERENCE**
- 正則化線形でない不連続要素: **PLAN_ELDI**, **AXIS_ELDI**
- 境界面要素、2次、混合形成: **PLAN_INTERFACE**, **AXIS_INTERFACE**, **3D_INTERFACE** ; (付加パラメータ **PENA_LAGR**)

結合領域モデル (CZM): 使用可能な法則

キーワード `DEFI_MATERIAU` の `RUPT_FRAG` :

```
MAT = DEFI_MATERIAU (  
  RUPT_FRAG = _F( GC=...  
                  SIGM_C =...  
                  PENA_ADHERENCE =...  
                  PENA_LAGR =...  
), ), );
```

} → 主なパラメータ
→ ジョイント要素のため
→ 境界面要素のため



結合領域モデル (CZM): いくつかの規則

脆性的挙動のまとめ:

要素	JOINT	DISCONTINUITE	INTERFACE
タイプ	線形	線形	2次
厚さ	無効あるいは有効	有効	無効あるいは有効
材料	線形あるいは非線形	線形	線形あるいは非線形
可能な法則	CZM_LIN_REG CZM_EXP_REG	CZM_EXP	CZM_OUV_MIX CZM_TAC_MIX
規則化	PENA_ADHERENCE	なし	PENA_LAGR (オプション)

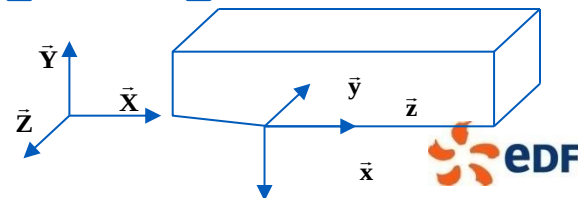
法則の性質:

- CZM_OUV_MIX 純粋なモード I
- CZM_TAC_MIX き裂の両側がメッシュ化する必要がある

方向:

- 結合力の方向: すべての要素 MODI_MALLAGE (ORIE_FISSURE = _F(GROUP_MA=))
- き裂の局所基礎: 境界面要素;

AFFE_CAR_A_ELEM(MASSIF=_F(ANGL_REP=))
STAT_NON_LINE=(CAR_A_ELEM=)



非線形破壊力学

◆ 限定的な塑性に対する塑性寸法補正

- 長さaのき裂を厚さa + r_yの仮想き裂で置き換える. ここで r_yは塑性域寸法 (Irwinのアプローチ)

$$r_y = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_s} \right)^2 \quad K_{cp} = \alpha K_I \sqrt{\frac{a + r_y}{a}}$$

- EdFでは、応力拡大係数は数式 (RCC-Mの方法) によって計算
き裂長さ/配管肉厚に依存する係数αを使用する

◆ 簡便な塑性の考慮

- 荷重が放射状で単調な場合, EdF では非線形弾性挙動に対する Gを計算できる ([ELAS_VMIS_TRAC](#) or [ELAS_VMIS_LINE](#) under [COMP_ELAS](#))

◆ 複雑な条件下での高度なモデル (doc Aster参照): EDF R&Dの研究

- 大規模降伏状態でのGTPアプローチ (Gの計算における塑性成分の追加)
- G_p アプローチ (脆性破壊に対する塑性の影響を考慮する拡張されたエネルギー的アプローチ)
- 脆性破壊とRousselier の延性破壊のための損傷則 [ENDO_FRAGILE](#)
- 延性破壊のための特殊な結合法 [CZM_TRA_MIX](#)

Code_Aster 参考文献

◆ 一般的なユーザー向けドキュメント

- Application domains of operators in fracture mechanics of Code_Aster and advices for users [U2.05.01]
- Notice for utilisation of cohesive zone models [U2.05.07]
- Realisation for a computation of prediction for cleavage fracture [U2.05.08]

◆ オペレータに関するドキュメント

- オペレータ `DEFI_FOND_FISS` [U4.82.01], `DEFI_FISS_XFEM` [U4.82.08], `CALC_G` [U4.82.03] et `POST_K1_K2_K3` [U4.82.05]

◆ 参考ドキュメント

- 変位外挿法による応力拡大係数の計算 [R7.02.08]
- 平面線形熱弾性下での応力拡大係数の計算 [R7.02.05]
- 線形熱弾性下でのエネルギー開放率 [R7.02.01]
- 非線形熱弾性下でのエネルギー開放率 [R7.02.03]
- 非線形熱弾塑性下でのエネルギー開放率: GTP アプローチ [R7.02.07]
- Gpアプローチによる熱弾塑性下でのエネルギー開放率 [R7.02.16]

End of presentation

Is something missing or unclear in this document?
Or feeling happy to have read such a clear tutorial?

Please, we welcome any feedbacks about Code_Aster training materials.
Do not hesitate to share with us your comments on the Code_Aster forum
[dedicated thread](#).