

# 硬質皮膜・溶射皮膜の二軸引張り応力下における き裂の伝ば・分岐形態とそのシミュレーション

(研究回想を含む・中佐啓治郎)

## A 初期の研究

### 1. 研究のきっかけ

二軸応力を受けるぜい性材料のき裂分岐形態について研究を進めるうちに、その延長線上として、表面改質材、コーティング材の表面き裂の伝ば・分岐形態についても研究したいと思った。それは、機械部品には、古くから行われている浸炭、窒化、めっき、を始めとして、CVD、PVD、溶射など、さまざまなコーティング技術が適用されていること、機械部品の高機能化のために、将来も引き続き表面改質の技術開発が行われること、改質層の強度評価、皮膜のはく離強度評価も重要な研究分野である、と考えたからである。

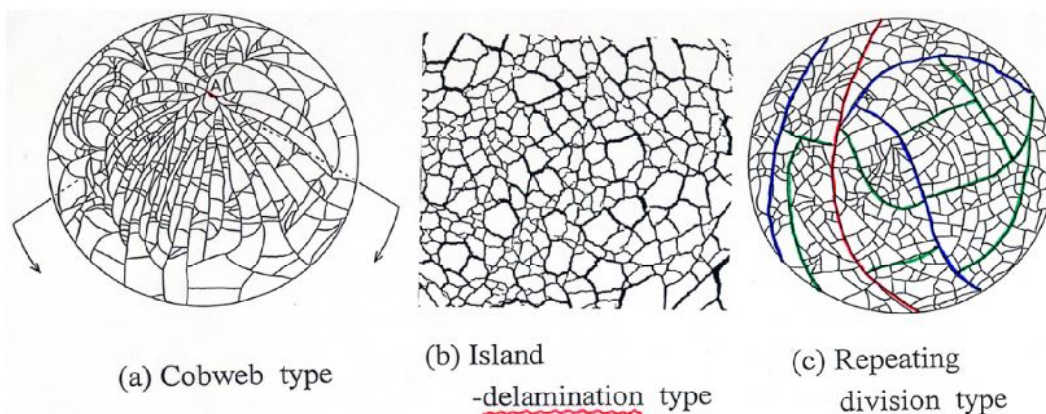
ただし、皮膜の強度評価・はく離強度評価の研究は別として、き裂の分岐形態の研究は、いわば趣味的な研究であり、その結果を実用的に役立つように応用するには、かなりの工夫が必要である。研究室には、きちんとした表面改質装置はないし、企業に頼んでサンプルと作ってもらっても、実的に役に立つテーマではないので、この目的のみでは、頼みにくい。そこで、まずはすぐに手に入るものを用い、学部学生の卒業論文のテーマとして、基礎実験を始めることにした(のちには、溶射皮膜やスパッタ薄膜の強度評価・はく離強度評価と合わせて研究することになるが)。

### 2. コーティング材料

まず、いろいろなコーティング材を、ゴムの円板に塗り、それを自転車用のエアポンプで膨らませてみることにした。そうすれば、面白いき裂分岐パターンが現れるかもしれない。平田森三教授が「松脂」を用いて実験されたということであるが、さすがに「松脂」は使いにくいので、共和電業に依頼して、ひずみ塗料を探してもらった。ひずみ塗料とは、乾燥すると大変もろくなり、応力を加えると引張り応力に垂直な方向に多数のき裂ができるので、その模様と間隔から引張り応力の方向とひずみ(応力)の大きさを測定するものである。もちろん、当時は、すでに、応力測定にはひずみゲージを用いていたが、幸いまだ在庫があった。その他は、金属研磨剤のアルミナ粉末に糊を混ぜてゴム板に塗り乾燥させた。黒いゴムに白いアルミナをコーティングすれば、割れの模様がはっきり分かるはずである。その他、薬品棚を探すと、寒天粉末があったので、これも溶かして塗ってみた。

その後、薄い軟鋼円板に、耐熱塗料(エチルシリケート、商品名セラベスト)を吹きつけ塗装で(中国塗料に依頼)、セラミック皮膜(アルミナ・チタニア)をプラズマ溶射で(広島市工業技術センターに依頼)、サーメット皮膜(WC-Co)を高速フラーム溶射で(広島県西部工業技術センターに依頼)コーティングしてもらい、手動の油圧ポンプを用いて、バルジ試験を行った。

### 3. 割れパターンの分類



この実験で、我々が日常よく見かける 3 種類のパターンが得られた。それらの特徴が分かるように、以下の名前をつけた。

- (a) 蜘蛛の巣型：まず、円板の中心から半径方向に放射状のき裂が枝分かれしながら伝ばし、後から接線方向の割れが入る（ひずみ塗料皮膜）。
- (b) 島状はく離型：基材があるひずみになると、あちらこちらに多数の割れ目が入り、それらが連結して、多数の島ができたような割れができる。それと同時に、割れの縁から皮膜のはく離が始まる（アルミナ粉末皮膜、寒天皮膜、耐熱塗料皮膜、セラミックス溶射皮膜）。島の形成とはく離は、殆ど同時に起こるように見える。つまり、界面強度が小さい皮膜は、はく離を前提として、島の大きさを決めてるように思える。
- (c) 繰返し分割型：表面に最初一本の長いき裂が走り、応力の増加とともに、残りの領域に割れが入り、その領域をつぎつぎと分割するように割れが入って、領域が次第に狭くなる。ある応力で、一部の皮膜ではく離が起こる（ひずみ塗料皮膜、サーメット溶射皮膜）。界面強度が大きいので、割れの繰返しが進行しても、はく離は起こりにくい。

### 4. 解析

(a) 蜘蛛の巣型：

これは、すでに述べた、二軸引張り応力を受けるぜい性材料のき裂分岐形態と類似である。皮膜の中心から最初のき裂が発生して、接線方向のひずみを解放するために半径方向にき裂が分岐しながら伝ばする。半径方向のき裂分岐挙動は、単一ぜい性体と同様、下記のき裂分岐則にしたがうであろう。

$$a_i \approx \frac{2^{2i+1}}{2^{i+1} - 1} \frac{E\gamma}{\pi\sigma_i^2}$$

単一ぜい性体とコーティング材の異なる点は、皮膜が独立して変形できないことである。し

たがって、半径方向に分岐き裂が伝ばしたのちに、半径方向のひずみ  $\epsilon_r$  を開放するために、接線方向（円形）の割れが発生する。割れの条件は、半径方向の応力が皮膜の割れ強度に達したときに起こる、ということである。基材の半径方向のひずみ（応力）は容易に計算できる。

(b) 島状はく離型：

多数の島の境界に相当するき裂ができると、応力が増加しても、その領域がさらに分割されることなく、界面からはく離が起こるのみであるから、皮膜の表面エネルギー  $\gamma_c$ 、皮膜の厚さ  $B_1$ 、界面エネルギー  $\gamma_{12}$  が決まると、発生する島状き裂の寸法  $2a_0$  が決まってしまうと思われる。そこで、

$2a_0$ ：割れ（島）の直径、

$\sigma_1$ ：皮膜の応力

$\sigma_2$ ：基材の応力

$\sigma$ ：公称引張り応力

$\gamma_{12}$ ：界面エネルギー

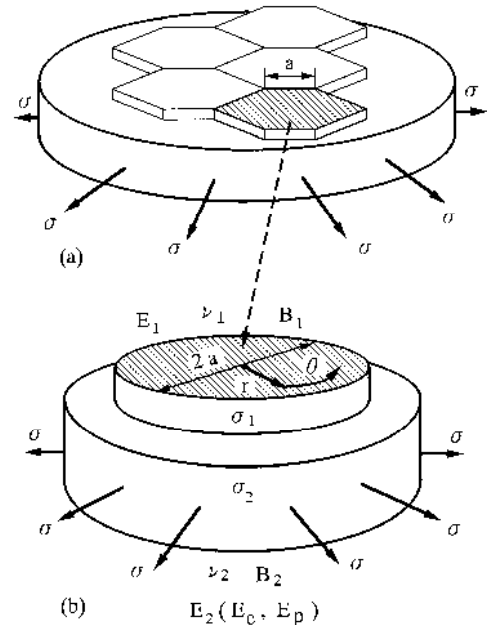
$\gamma_c$ ：皮膜の表面エネルギー

$B_1$ ：膜厚

$B_2$ ：基材の厚さ

$E_1$ ：皮膜の弾性係数

$E_p$ ：基材の塑性係数( 基材の変形特性を、直線硬化材と仮定。基材が弾性体の場合は、 $E_p$  は基材の弾性係数  $E_2$  に等しい)



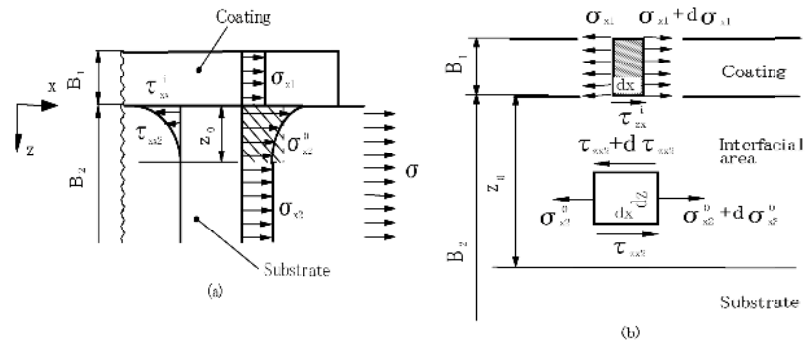
とすると、円形の割れの発生と界面のはく離が同時に起こったことによる自由エネルギーの変化分  $F$  (円形皮膜のひずみエネルギーの減少分、基材のひずみエネルギーの増加分、皮膜の表面エネルギーの増加分、界面エネルギーの増加分の和) が 0 になるような円形割れの直径  $2a_0$  は、次式のように計算される（詳細は文献（5）参照）

$$2a_0 = \frac{2\gamma_c B_1}{\frac{(1-\nu_1)B_1}{E_1} \sigma_1^2 + \frac{(1-\nu_2)B_2}{E_p} (\sigma - \sigma_2)^2 - 2\gamma_{12}}$$

実際には、島状のき裂が発生しても、すぐにすべての界面がはく離することはないので、これは大変粗い取扱ではあるが、これで「島状はく離型」の割れの発生・はく離挙動を説明する式が求まったことになる。材料特性の測定が難しいことも原因と思われるが、計算と実験結果の適合性はあまりよくない。しかし、皮膜厚さが厚くなると、島状割れの直径が増加するという特性は表現できる。

(c) 繰返し分割型：

溶射材の一軸引張り試験をすると、皮膜の割れがづぎづぎと増えて、やがて皮膜がはく離する。この過程は、すでにFEMで解析していたが、弾性論的に解析できないかと考えていたとき、数週間前に出席した韓国での国際会議のProceedingsを見ていると、ソウル大学のProf. Dongil Kwonらが発表した論文が目にとまった (J. Jeong and D. Kwon, Proc. of Asian Pacific Conf. for Frac. and Strength '96, 573 (1996).) (ただし、講演は聴いていなかったようである)。その取扱は、我々でも理解できそうであったので、加藤助手と一緒に、一連の式を基材が塑性変形する場合に拡張して、溶射皮膜がはく離前に繰返し分割される挙動を説明した。



$$\frac{d^2 \sigma_{x1}(x)}{dx^2} - \alpha^2 \sigma_{x1}(x) + \alpha^2 \beta = 0$$

$$\alpha^2 \equiv \frac{2G_{e2}(1-\nu_1^2)}{z_0 B_1 E_{e1}}, \quad \beta \equiv \frac{(1-\nu_1 \nu_2) E_{e1} \varepsilon_{x2}}{(1-\nu_1^2)}$$

### 皮膜内の引張り応力

$$\sigma_{x1}(x) = \beta \left\{ 1 - \frac{\cosh(\alpha x)}{\cosh(\alpha L/2)} \right\}$$

$$\alpha^2 = \frac{2G_{p2}(1-\nu_1^2)}{B_1 z_0 E_{e1}}$$

### 界面のせん断応力

$$\tau_{xz}^i(x) = \frac{\beta B_1 \alpha \sinh(\alpha x)}{\cosh(\alpha L/2)}$$

さて、この取扱を、二軸引張り応力を受けるコーティング材の繰返し分割型のき裂伝ば過程に適用すればよい、と思って、基礎式を作ったが、連立の偏微分方程式になり、すぐには解けそうもない。おりしも、ポーランドで開催される国際会議に講演を申し込んでいたので、Proceedings を出さないといけない。やむなく皮膜の中央線に沿う近似解を求め、お茶を濁した(文献(6))。国際会議終了後、数学的能力とコンピュータプログラミング能力が抜群の高三徳君に、この問題の解決を依頼した。しばらくして、彼は、博士課程進学を希望したので、この方面の研究を学位論文のテーマとすることにした。そうすると、もはや私の道楽ではなくなり、研究に実用的な意味づけを与えることを本気で考えなくてはならない。

## B 後期の研究（高 三徳 博士の学位論文研究）

以下の解説は、高 三徳 博士（現在：いわき明星大学准教授）の学位論文の内容です。

### 1. 研究の目的

1. コーティング材で現れるさまざまな割れパターンが、皮膜の特性、基材の特性、界面の特性によってどのように異なるかを明らかにする。
2. 形状の複雑なコーティング部材で、二軸応力および熱応力が加わるときに、皮膜にどのような割れが現れるかをシミュレーションし、その結果をコーティング材の割れパターンの予測に使えるようにする。

### 2. 実験結果

#### 2.1 割れパターンの種類

バルジ試験（等二軸引張り）によって皮膜に形成される割れパターンにはいろいろなものがあるが、本研究では、その代表として、下記の「島状はく離型」と「繰返し分割型」の2種類を取扱う。

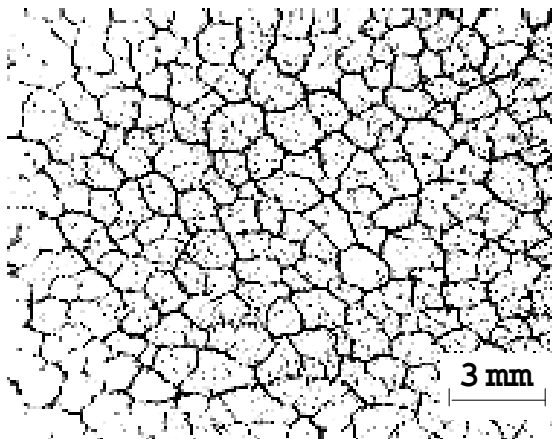


Fig.1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> プラズマ溶射皮膜

#### 島状はく離型

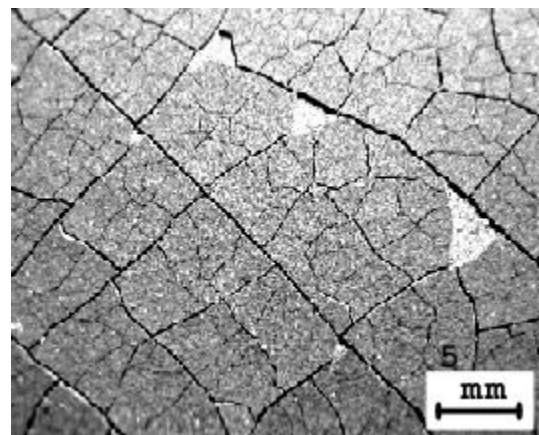


Fig.2 WC-Co 高速フレイム溶射皮膜

#### 繰返し分割型

- ・ 「島状はく離型」の割れ・はく離形態は、皮膜と基材の界面強度が小さい場合に観察され、皮膜が割れると、すぐに皮膜のはく離が起こる。
- ・ 「繰返し分割型」は、皮膜と基材の間の界面強度が大きい場合に観察され、皮膜が多数回繰返し割れたのちに、はく離が起こる。



## 2.2 「解析/有限要素-ひずみ適合法 Analysis / FEM Strain Accommodation Method」の提案とシミュレーションの方針

コーティング材の皮膜の割れ・はく離過程をコンピュータによりシミュレーションする場合、有限要素法を用いて、皮膜に生じた割れ先端の応力解析を繰返ししながら、一定の割れクライテリオンに基づいて、き裂を伝ばさせるという作業は、莫大な時間と費用がかかる。これは、とても我々の手に負えそうにない。そこで、皮膜が割れても皮膜と基材の界面の「ひずみ」は等しいから、近似的ではあるが、き裂のない基材のひずみを FEM により計算し、これに対応する皮膜の割れパターンは、理論解析に基づく別のシミュレーションで表現するという、「解析/有限要素-ひずみ適合法」を考えた。これは、あたかも基材の FEM 解析で求めた「ひずみ」にマッチするように、同じ「ひずみ」に対して解析で求めた割れパターンを、つぎつぎと貼りつける（コーティング）という作業に等しい。このアイデアは、以前から私の頭にあったが、私自身ができるものではない。非常にタイミングよく、高 三徳君がこれを実行してくれることになった。この方法は、つぎのようにして行う。

1. コーティング材に 2 軸応力が加わる場合、皮膜と基材の組合せに応じて、皮膜に「島状はく離型」と「繰返し分割型」のいずれの割れパターンが起こるかを判断する。
2. 与えられた基材形状、与えられた外部負荷あるいは熱応力条件に応じて、有限要素法により、基材表面のひずみ（応力）を FEM により計算する。
3. 基材表面のひずみに対応して、皮膜のき裂伝ば・分岐パターンのモンテカルロシミュレーションを行う。
4. 基材のひずみの増加に応じて、皮膜の割れ・分岐を進行させる。
5. このような操作を繰返し、部材全体にわたる皮膜の割れ・はく離の進行をシミュレーションする。

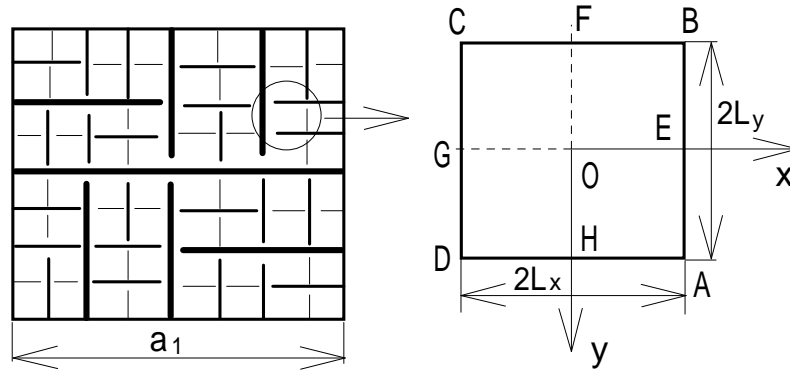
## 2.3 皮膜に加わる応力（理論解析）

(a) 島状はく離型： Fig.1 に示す「島状はく離型」の割れの間隔（直径） $2a_0$  は、上記のように、つぎの式で表される。

$$2a_0 = \frac{2\gamma_c B_1}{\frac{(1-\nu_1)B_1}{E_1} \sigma_1^2 + \frac{(1-\nu_2)B_2}{E_p} (\sigma - \sigma_2)^2 - 2\gamma_{12}}$$

ここで、 $\sigma_1$ ：皮膜の応力， $\sigma_2$ ：基材の応力， $\gamma_{12}$ ：界面エネルギー， $\gamma_c$ ：皮膜の表面エネルギー， $B_1$ ：膜厚， $B_2$ ：基材の厚さ，である。

(b) 繰返し分割型



繰返し分割型の割れが起こる場合、割れの間隔  $L$  と皮膜の応力 および基材のひずみ の関係は次式で表すことができる（詳しくは、文献(7)を参照）。

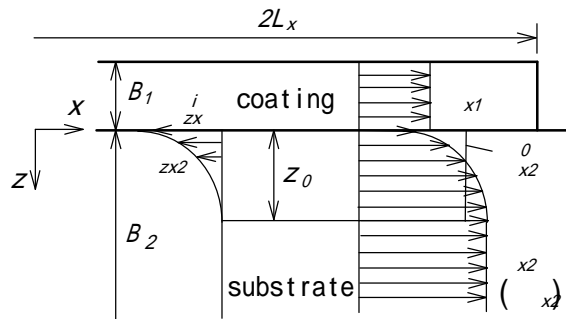
$$\sigma_{x1}(x, y) = \frac{E_1(\varepsilon_{x2} + \nu_1 \varepsilon_{y2})}{1 - \nu_1^2} \left\{ 1 + \frac{\nu_1(\varepsilon_{y2} + \nu_1 \varepsilon_{x2}) \cdot \cosh(k_x \cdot \alpha_p x) \cdot \cosh(k_y \cdot \alpha_p y)}{(\varepsilon_{x2} + \nu_1 \varepsilon_{y2}) \cosh(k_x \cdot \alpha_p L_x) \cdot \cosh(k_y \cdot \alpha_p L_y)} \right. \\ \left. - \frac{\cosh(\sqrt{1 - \nu_1^2} \cdot \alpha_p x)}{\cosh(\sqrt{1 - \nu_1^2} \cdot \alpha_p L_x)} - \frac{\nu_1(\varepsilon_{y2} + \nu_1 \varepsilon_{x2}) \cdot \cosh(\sqrt{1 - \nu_1^2} \cdot \alpha_p y)}{(\varepsilon_{x2} + \nu_1 \varepsilon_{y2}) \cosh(\sqrt{1 - \nu_1^2} \cdot \alpha_p L_y)} \right\}$$

$$\sigma_{y1}(x, y) = \sigma_{x1}(x \rightarrow y, y \rightarrow x)$$

$$\alpha_p \equiv \sqrt{2G_{2p} / (E_1 B_1 z_0)}$$

$$k_x \equiv \sqrt{(1 - \nu_1^2) \varepsilon_{y2} / (\varepsilon_{y2} + \nu_1 \varepsilon_{x2})}$$

$$k_y \equiv k_x(x \rightarrow y, y \rightarrow x)$$



ここで、

$\sigma_{x1}, \sigma_{y1}$  : 二軸引張りを受ける皮膜に作用する x 方向, y 方向の応力

$\varepsilon_{x2}, \varepsilon_{y2}$  : 二軸引張りを受ける基材に作用する x 方向および y 方向のひずみ

$L_x, L_y$  : x 方向および y 方向の割れの間隔, である。

## 2.4 き裂の成長・分岐・連結のクライテリオンとプログラミング

すでに分かっている解析結果

- ・ 最初に発生するき裂の数は2本（直線）
- ・ 島状割れの直径

$$2a_0 = \frac{2\gamma_c B_1}{\frac{(1-\nu_1)B_1}{E_1} \sigma_1^2 + \frac{(1-\nu_2)B_2}{E_p} (\sigma - \sigma_2)^2 - 2\gamma_{12}}$$

- ・ き裂分岐則

$$a_i = \frac{2^{2i+1}}{2^{2i+1} - 1} \cdot \frac{E\gamma}{\pi\sigma_i^2}$$

き裂発生・伝ば・連結の素過程（詳細は省略）

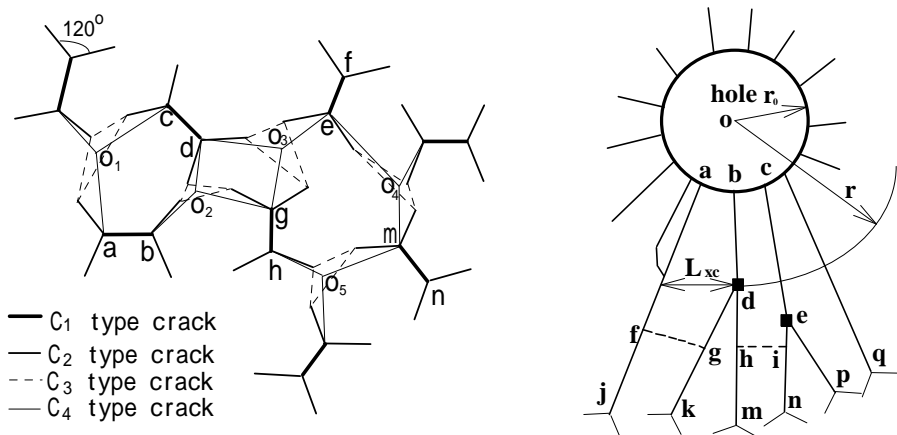
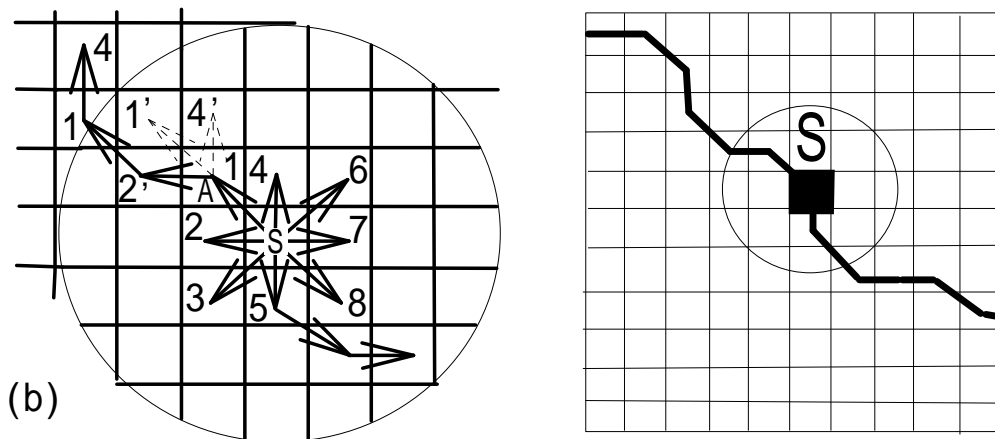


Fig.3 き裂の発生・伝ば過程のモンテカルロシミュレーション



2.5 等2軸引張りを受けるコーティング円板の皮膜の割れとはく離のシミュレーション結果

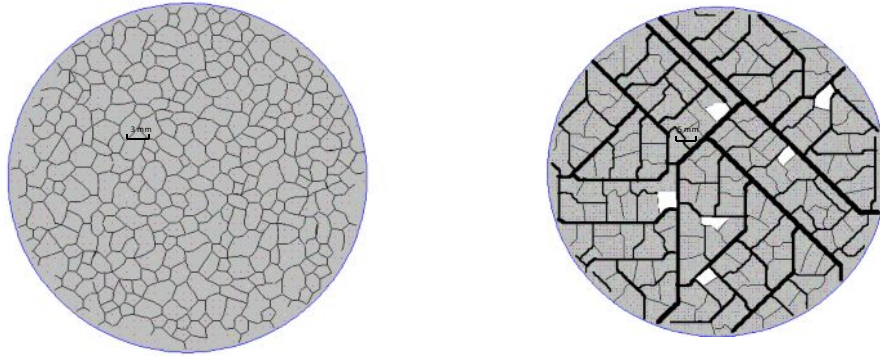
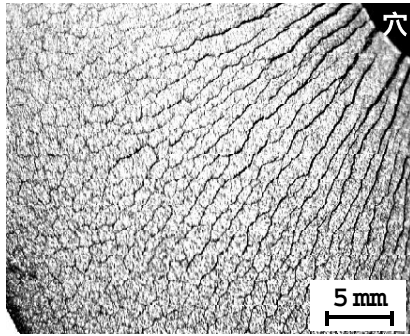
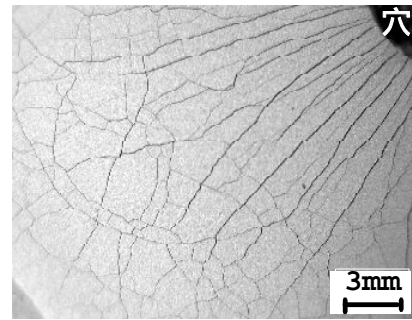


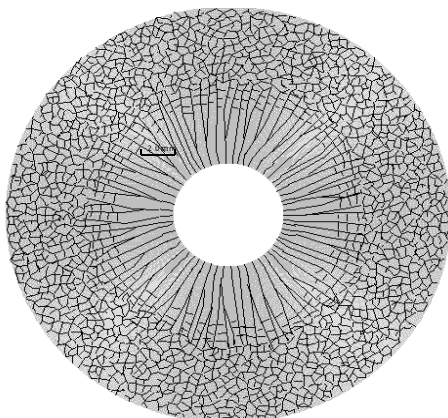
Fig.4 島状はく離型と繰返し分割型の割れ・はく離形態のシミュレーション結果 (Fig.1 の実験に対応)



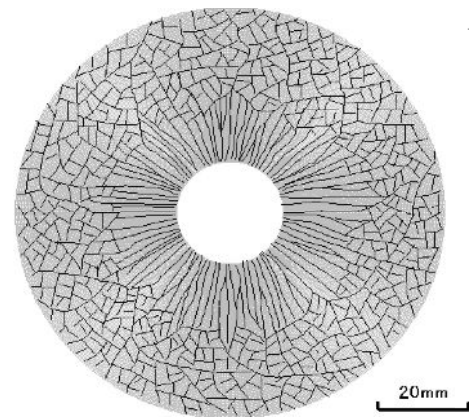
島状はく離型 (実験)



繰返し分割型 (実験)



島状はく離型 (シミュレーション)



繰返し分割型 (シミュレーション)

Fig.5 円孔の縁からのき裂の発生と伝ぱ (実験とシミュレーションの比較). 穴の縁から半径方向にき裂が広がってゆく.

## 2.6 加熱・冷却による皮膜の割れ形態のシミュレーション

### a. 加熱・冷却によって発生する皮膜の熱応力

次式のように導くことができる（詳しくは，文献を参照）。

$$\sigma_{x1}^*(x, y) = \frac{E_1 C_x^*}{1 - \nu_1^2} \left\{ 1 + \frac{C_y^* \nu_1 \cdot \cosh(k_x^* \cdot \alpha x) \cdot \cosh(k_y^* \cdot \alpha y)}{C_x^* \cosh(k_x^* \cdot \alpha L_x) \cdot \cosh(k_y^* \cdot \alpha L_y)} \right. \\ \left. - \frac{\cosh(\sqrt{1 - \nu_1^2} \cdot \alpha x)}{\cosh(\sqrt{1 - \nu_1^2} \cdot \alpha L_x)} - \frac{C_y^* \nu_1 \cdot \cosh(\sqrt{1 - \nu_1^2} \cdot \alpha y)}{C_x^* \cosh(\sqrt{1 - \nu_1^2} \cdot \alpha L_y)} \right\}$$

$$\sigma_{y1}^*(x, y) = \sigma_{x1}^*(x \rightarrow y, y \rightarrow x)$$

$$\alpha \equiv \sqrt{2G_2 / (E_1 B_1 z_0)}$$

$$C_x^* \equiv (\varepsilon_{x2}^* + \nu_1 \varepsilon_{y2}^*) - (1 + \nu_1) \eta_1 T_1 \quad C_y^* \equiv C_x^*(x \rightarrow y, y \rightarrow x)$$

$$k_x^* \equiv \sqrt{(1 - \nu_1^2)(\varepsilon_{y2}^* - \eta_1 T) / C_y^*} \quad k_y^* \equiv k_x^*(x \rightarrow y, y \rightarrow x)$$

ここで， $x_1$  および  $y_1$  は，皮膜の x 方向および y 方向の応力， $x_2$  および  $y_2$  は，基材の x 方向および y 方向のひずみ， $L_x$  および  $L_y$  は，x 方向および y 方向の割れ間隔，である。

### b. FEM による基材の熱応力・ひずみ解析（基材）

複雑な部品形状であっても，加熱・冷却によって生じる基材の応力・ひずみは，FEM により計算できる。下に，軸対称モデルを示す。

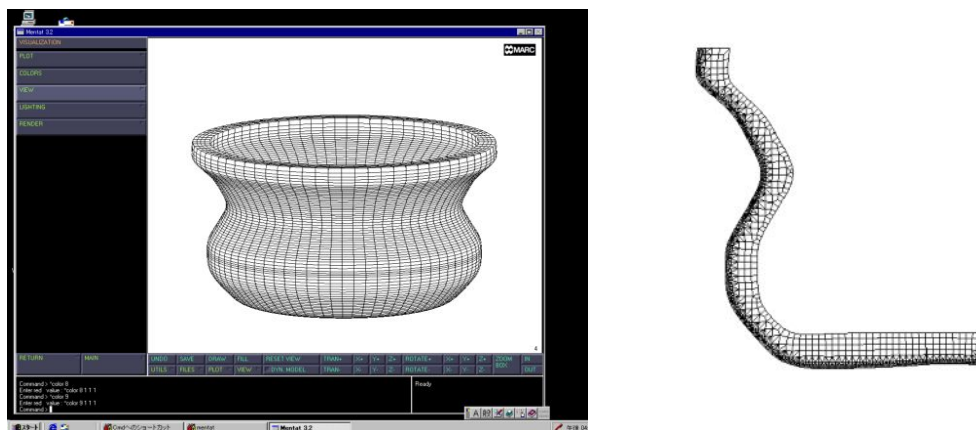


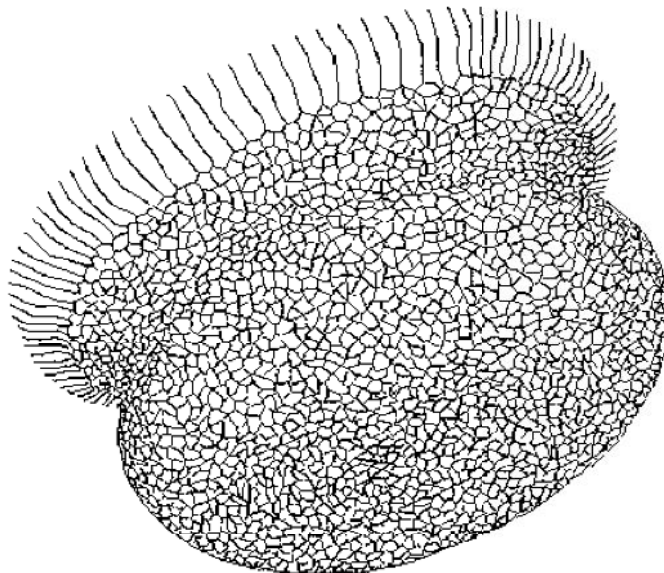
Fig.3 基材のモデル



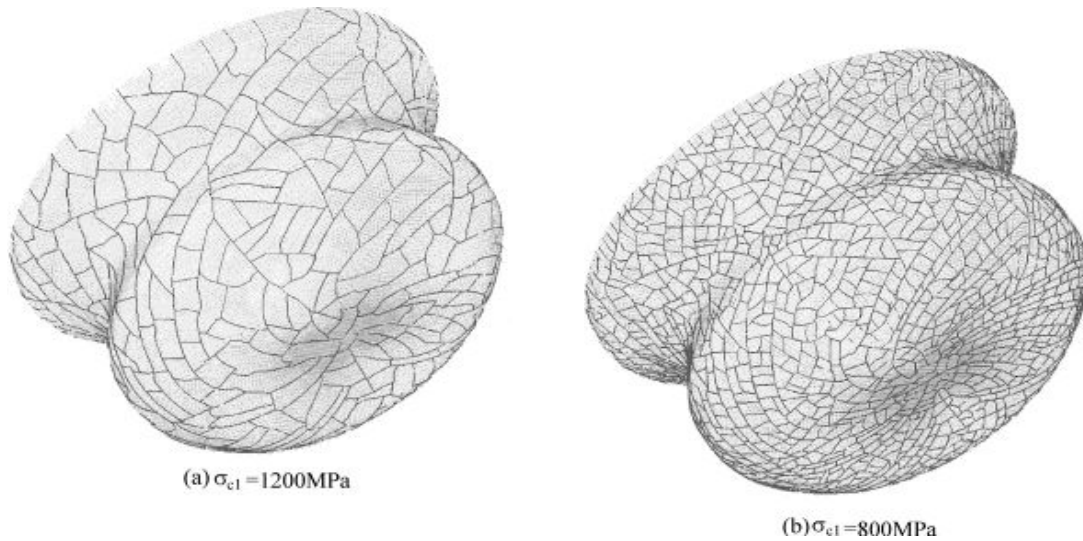
Fig.6 冷却時の接線方向応力（左下）およびひずみ（右上）の断面分布

### c. シミュレーション結果

上記の「[Analysis / FEM Strain Accommodation Method](#)」により、皮膜の割れ形態をシミュレーションすることができる。



島状はく離型



### 繰返し分割型

Fig.7 冷却時の割れパターンのシミュレーション

#### 2.7 シミュレーションの適用分野

- 金型用耐摩耗皮膜，塗装皮膜の割れ・はく離形態，はく離部位の予測
- ガスタービン高温部材遮熱コーティング（TBC）の割れ・はく離形態，はく離部位の予測
- 陶磁器などの表面割れ形態の予測

#### 関連論文

- 1) 軸対称引張り荷重を受けるぜい性材料円板におけるき裂発生形態，中佐啓治郎，中塚純一，材料，**38**，100（1989）。
- 2) 軸対称引張り荷重を受けるぜい性材料円板におけるき裂伝ば形態，中佐啓治郎，中塚純一，材料，**39**，687（1990）。
- 3) Crack Initiation, Propagation and Branching in a Disk of Brittle Material under Axisymmetric Tension, Keijiro Nakasa and Jun-ichi Nakatsuka, Engineering Fracture Mechanics, **39**,661(1991).
- 4) 軸対称引張り荷重を受けるぜい性材料円板におけるき裂伝ば形態の分岐次元による解析，中佐啓治郎，中塚純一，材料，**40**，613（1991）。



- 5) 等 2 軸引張り荷重を受けるぜい性コーティング皮膜における島状はく離型割れ形態の解析 , 中佐啓治郎, 高田宗一郎, 市後博造 : 材料, **45**, 212 (1996).
- 6) Analysis of Cracking Pattern in the Brittle Film Coated on a Ductile Disk under Axisymmetric Tension , Proc. 5th Int. Conf. on Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture , vol.2 , pp.525-542(1997). (Keijiro Nakasa , Masahiuko Kato , Dongkun Zhang and Sande Gao)
- 7) 等二軸引張りを受ける WC-Co 溶射皮膜の繰返し分割およびはく離過程の解析 , 高三徳, 中佐啓治郎, 加藤昌彦, 材料, **47**, 1151 (1998).
- 8) Analysis and Simulation of Cracking Patterns in Brittle Coating under Biaxial Tension , S.Gao , K.Nakasa and M.Kato, Proc. International Workshop on Experimental and Computational Mechanics in Engineering and Materials Behavior , (1999) , pp.243-248.
- 9) Simulation of Cracking Patterns in Sprayed Coating under Equi-Biaxial Tension , Sande Gao , Keijiro Nakasa and Masahiko Kato , Proceedings of the Eighth International Conference on the Mechanical Behavior of Materials(ICM8) , vol.2 (1999), pp.684-689.
- 10) 等二軸引張りを受ける溶射皮膜の割れ形態のシミュレーション , 高三徳, 中佐啓治郎, 加藤昌彦 , 日本機械学会論文集 , **66** , 122 ( 2000 ) .
- 11) 二軸引張り応力を受けるサーメットおよびセラミックス溶射皮膜の割れおよびはく離過程の解析 , 高三徳, 中佐啓治郎, 加藤昌彦 , 材料, **49**, 296(2000).
- 12) Analysis and Simulation of Cracking Patterns in Ceramics Coating under Thermal Stress, Sande Gao and Keijiro Nakasa, Key Engineering Materials, **243-244**, 345(2003).
- 13) Analysis and Simulation of Cracking Patterns in Coating under Biaxial Tensile or Thermal Stress Using Analysis/FEM Strain Accommodation Method, Sande Gao, Keijiro Nakasa and Masahiko Kato, Engineering Fracture Mechanics, **70**, 1573(2003).

## 研究回想

1. 私は、水素ぜい性、溶融金属脆性、応力腐食割れ、脆性材料の割れにおけるき裂の分岐現象を研究しているうちに、各種コーティング材の割れパターンについても研究したいと思うようになった。これは、実用的な見地からも一定の意義があるが、一方では、陶磁器の割れパターンにも興味があったためである。

最初は、皮膜の割れパターンの分類、それを支配する法則の解明を行ったが、その先にあるき裂発生・伝ぱ・分岐のシミュレーションまでは手が届かなかった、というよりも、私の力量不足で、とてもそこまではできないと思っていた。

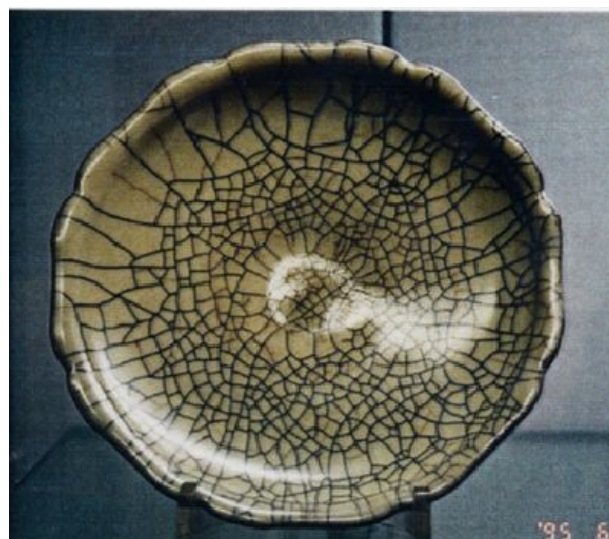
そんな折に、私は短期留学推進制度を利用して留学生を受け入れることにし、武漢に行った際に、陶 徳馨 先生（武漢交通大学）と彭 文生 先生（華中理工大学）にお会いして（いずれも広島大学の寺内・永村研究室の留学生。彭先生には、急なご都合でお会いできなかった）、彭 先生の教え子だった高 三徳君を紹介してもらった。高 君は、来日後、上述の溶射皮膜の割れの応力解析とシミュレーションを行い、1年間の留学期間が終わったのちにも、博士課程に入学して研究を続けた。彼は、大変な能力の持ち主で、我々の研究は大幅に進んだ。彼には、私のやりたかったことを実現してくれたことに、大変感謝している。

2. 右の写真は、1999年にカナダのビクトリアで開催されたICM8に、高 三徳君と一緒に参加した際、街角の陶器店で見かけたコーヒーポットとカップである。東洋風の「貫入」の入った陶器が売ってあるが、これは地元でつくったものだろうか、それとも



輸入品であるか、などと思いながら撮影したことを記憶している。割れパターンは、Fig.7の繰返し分割型のシミュレーション結果とよく似ており、ポットとカップの口の周りには、1軸引張り応力状態が優勢であるため、直線状にき裂が走っている。

右の写真は、1995年に、大英博物館で見かけた、中国の宋時代の皿である。ここにも上記と同じような割れパターンが現れており、高君のシミュレーションは妥当なものであることが分かる。



PDFの転載は、固くお断りします

ホームページに戻る

<http://www006.upp.so-net.ne.jp/nakasa/>



