等 2 軸引張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***

An Analysis of Island-Delamination Type Cracking Pattern in the Brittle Film Coated on Disk under Axisymmetric Tension

by

Keijiro NAKASA*, Soichiro TAKATA** and Hirozo ICHIGO***

In order to characterize the island-delamination type cracking pattern which appears in the brittle film on a ductile substrate under uniform tension, an analysis based on energy consideration was carried out to introduce the relation among the size of island-cracking, the tensile stress at the formation of island-cracking, film and substrate thickness, surface energy of film, interfacial energy between film and substrate, elastic and plastic constants, Poisson's ratio and yield strength of film and substrate. The bulge tests of ceramic and heat-resistant paint films on steel disks show that the size of island-cracking increases and the pressure at the formation of island crack decreases with an increase in film thickness. The film thickness dependency of tensile stress at the formation of island-cracking and the size of island calculated from the analysis agree relatively well with the experimental results.

Key words : Island-delamination cracking, Surface energy of film, Interfacial energy, Film thickness, Substrate thickness, Ceramic film, Heat-resistant paint film

1 緒 言

構造材料に耐熱性、耐摩耗性、耐食性などの機能性を付与するために、セラミック溶射法など種々のコーティング法が採用されているが、部材が応力や熱サイクルを受けると、コーティング皮膜に割れやはく離が生じることがある。著者らは前報³⁾において、コーティングを行った平滑引張試験片に、皮膜に平行な方向の荷重を加えることにより、皮膜のはく離強度を簡便に評価することができることを示したが、压力容器や平板構造物など、部材が二軸引張りを受ける状態で使用される場合も多く、この場合のコーティング皮膜の割れ形態の特徴および割れ形態とはく離強度の関係を明らかにしておくことは、学問的にも工業的にも有用であると思われる。

一般に、等二軸引張りを受けるぜい性コーティング皮膜に発生する割れ形態には、皮膜の強度および皮膜と母材の界面強度の相対的な大小関係に依存して、最低限 3 つのタイプが存在すると思われる。すなわち、「くもの巣型」(界面強度が大きく、しかも母材が変形しやすい場合に生じる。皮膜の一箇所に最初一本のき裂が発生し、その両側から次々と分岐が生じながら外側に向かって放射状にき裂が伝ばするとともに、接線方向にも割れが生じる)、「島状はく離型」(界面強度があまり大きくない場合に生じる。皮膜全面に六角形の島状または網目状の割れが生じて母材とはく離が生じる)、「繰返し分割型」(界面強度が大きく皮膜のはく離しにくいときに生

じる。荷重の増加とともに直線状のき裂が次々と発生する。後から生じるき裂が以前にできたき裂に衝突して停止し、膜は次第に小さな多角形領域に分割され、はく離が生じたときに分割が終わる)がある。これら多様な割れ形態は、一軸引張荷重下では決して現れないものである。著者らは、「くもの巣型」の割れ形態においては、き裂の分岐が著者らの導いたき裂発生および分岐則^{5),6)}にしたがって次々と起こり、き裂の分岐挙動は著者らが定義した分岐次元によって特性づけることができることを報告している。本研究ではこれに引き続き、「島状はく離型」の割れ形態に注目し、島状領域(理想的には六角形)の大きさと膜厚、皮膜および母材の材料特性値、界面強度、はく離応力などの関係を理論的に導くことを試み、実験結果と比較した。

2 実験方法

2・1 試験片およびコーティング方法

二軸引張(バルジ)試験に用いた円板試験片の形状を Fig. 1 に示す。マスクを用いて、中央部直径 70 mm の円形部分にのみコーティングを行った。コーティング方法は前報³⁾と同様であり、以下の二種類の皮膜を有する試験片について実験を行った。

(1) セラミック溶射皮膜: 厚さ 1 mm の冷間圧延鋼板 (SPCC-S) から切り出した円板試験片の表面にショットブラストして凹凸をつけるとともに酸化皮膜を除去したのち、圧搾空気を吹き付けて表面を清浄にした。その

† 原稿受理 平成 7 年 5 月 8 日 Received May 8, 1995

* 正 会 員 広島大学工学部第一類(機械系) 〒739 広島市鏡山, Dept. of Mech. Eng., Hiroshima Univ., Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739

** 広島大学大学院 〒739 広島市鏡山, Graduate Student, Hiroshima Univ., Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739

*** 広島市工業技術センター 〒730 広島市中区千田町, Hiroshima Municipal Indust. Tech. Center, Naka-ku, Hiroshima, 730

Fig. 1. A disk specimen with coating film.

後直ちにアルミナ Al_2O_3 (60 %) + チタニア TiO_2 (40 %) 混合セラミック粉末 (粒子直径: 10~40 μm) をプラズマ溶射した。溶射条件は、電圧: 36 V, 電流: 900 A, アークガスおよびパウダガス: アルゴン (圧力 0.47 MPa), 2次ガス: ヘリウム (圧力 0.40 MPa), 溶射ガン移動速度: 67 cm/s, 溶射距離: 100 mm で、ホップ回転数を変えて溶射量を調整し、膜厚を変化させた。

(2) 耐熱塗料皮膜: 上記のショットブラストした円板試験片をアセトン中で超音波洗浄脱脂後乾燥し、エチルシリケート耐熱塗料 (商品名: セラベスト, 主成分: 珪酸塩, 溶剤: 混合アルコール) を繰返しスプレー塗布し、大気中で乾燥させた。

2・2 二軸引張試験

二軸引張試験は、Fig. 2 に示すような試作のバルジ装置を用いて行った。手動式の油圧ポンプにより容器内の圧力を増加させながら試験片表面を移動顕微鏡 (倍率 40) で観察した。Fig. 3 は、セラミックコーティング皮膜で観察された島状割れ形態の一例である。圧力の増加とともに、まず皮膜のあちこちに細い直線状またはジグザグ状のき裂が現れ、それらが分岐合体して連結し、やがて隙間の広い網目状の割れに発達する。この時点で、皮膜の割れ端部と母材間には隙間があり、少なくとも割れ端部でははく離が起こっているが、島状の領域全体が完全にはく離しているかどうかはそのままでは判断できない。しかしながら、細い針の先端で島状領域を容易に掘り起こして取り除くことができ、実質上は全面にわたってすではく離していると考えてよい。すなわち、溶射前に母材をショットブラストしているので、界面の凹凸によるアンカー効果により、島状割れが発生した後にも皮膜と母材がなお弱く接合されていると思われるが、その接合強度は試験前の接合強度よりはるかに低くなっている。

ところで、いくら圧力で網目が完成しはく離が起こったかを正確に決めるのは困難であるが、本研究では顕微鏡の視野内で目視によりほとんどネットワークが完成された時の圧力を割れ発生・はく離開始圧力 p_i とし

Fig. 2. An apparatus for bulge test of disk specimen.

Fig. 3. Island-delamination type cracking pattern observed for ceramic film (film thickness is 0.4 mm).

た。島状割れ領域の大きさ $2a_0$ は、ライン切断法により測定した。また、円板の中心から半径方向に 5 mm おきにダイヤルゲージでバルジ量 (垂直方向の変位) を測定した。これらの変位量から島状割れ完了時の円板の曲率半径 r_i を最小自乗法により求め、このとき円板に作用する二軸引張応力 σ_i を次式によって求めた。

$$\sigma_i = \frac{r_i p_i}{2B_2} \quad (1)$$

ここで、 B_2 は正確には島状割れ完了時の母材の厚さであるが、バルジ量あまり大きくないので、バルジ前の厚さを用いた。

なお、上記のダイヤルゲージによるバルジ量の測定結果によると、円板の中心部で曲率半径がほぼ等しい直径約 60 mm の領域が存在し、この領域ではほぼ等二軸状態が達成されていることが分かった。

3 解 析

3・1 島状はく離型割れの形成過程およびその特徴

島状はく離型の皮膜割れ過程には、他の割れ形態の場合と比較して次のような特徴がある。

(1) 皮膜の島状割れと界面のはく離は、それぞれ独立に起こるのではなく、皮膜の割れに引き続いて直ちに界面はく離が起こる。もし、皮膜に島状割れが生じたのちにも、なお皮膜と母材が強く接合されているなら、島状に割れた領域はさらに分割されるはずであるが、そのよ

うなことは観察されない。

(2) 前述のように, 実験によると, アンカー効果のため, 皮膜に島状の割れが生じてすぐには全面的なはく離は起こらないが, 皮膜に割れが生じたのちには島状領域を針で掘り起こすことができるから, もし界面が平滑であれば, 一度はく離が起こればはく離は界面全体で自動的に進行すると思われる。理想的な平滑界面を有する試験片において, このことを理論的に証明することは現段階では困難であるが, 前報で解析した部分はく離皮膜を有する試験片の一軸引張りにおいては, はく離の進行は安定でも不安定でもなく荷重一定下で皮膜のはく離が起こる。したがって, 島状割れ皮膜の二軸引張応力下ではく離過程においても, 荷重一定条件下において一度はく離が開始すると, 途中ではく離が停止する(はく離距離の増加に対する自由エネルギーの極小値が存在する)ようなことはなく, はく離は界面全体にわたって直ちに進行するものと類推される。

(3) 島状割れの大きさは, 皮膜の割れのための表面エネルギー, 皮膜と母材の界面エネルギーおよび膜厚に密接に関係している。その理由は, 皮膜に割れが発生するまでに膜と母材が蓄えていたひずみエネルギーは, 皮膜のみの島状割れに必要な表面エネルギーおよび皮膜のはく離のための界面エネルギーの両方に費やされるが, はく離が界面全体にわたって完了した状態を考えると, 界面はく離に費やされるエネルギーは島状割れの大きさにかかわらず一定であるから, かりに皮膜が非常に微細な島状割れを起こそうとしても, それらの皮膜の割れに要する大きな表面エネルギーを, 膜および母材のひずみエネルギーは供給できないことになる。したがって, 皮膜にどのような大きさの割れが生じるかは, 皮膜が割れる直前にはすでに決まっており, 皮膜と母材が蓄えていたひずみエネルギーが, 膜の割れに要する表面エネルギーとはく離のための界面エネルギーとしてどのような割合で配分されるかによって, 島状割れの大きさが決まることになる。

これらのことを考慮して以下に解析を進める。

3・2 皮膜および母材が弾性体である時の割れの大きさと膜厚および材料特性の関係の導出

簡単のため, 理想的な皮膜の島状割れが, Fig. 4(a)に示すように, 皮膜全体を一辺の長さ a の多数の正六角形状の割れに分割する形で起こるとする。さらに(b)に示すように, 六角形の島状はく離割れの一つを半径 a の円板割れで近似し, 母材円板の縁に等二軸引張応力 σ が作用している状態を考える。皮膜の半径方向および接線方向の応力を σ_{r1} および $\sigma_{\theta 1}$, 母材のそれらを σ_{r2} および $\sigma_{\theta 2}$ とすると(厚さ方向の応力 σ_{z1} および σ_{z2} は小さいとする),

$$\begin{aligned}\sigma_{r1} &= \sigma_{\theta 1} = \sigma_1, & \sigma_{z1} &= 0 \\ \sigma_{r2} &= \sigma_{\theta 2} = \sigma_2, & \sigma_{z2} &= 0\end{aligned}\quad (2)$$

である。また, 皮膜および母材の半径方向および接線方向のひずみ ε_{r1} , $\varepsilon_{\theta 1}$ および ε_{r2} , $\varepsilon_{\theta 2}$ は, 皮膜および母材の弾性係数およびポアソン比を, それぞれ E_1 , E_2 および ν_1 , ν_2 とすると,

Fig. 4. Modeling of an actual island-film shape to (a) a hexagonal and (b) a cylindrical film shapes.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{r1} &= (\sigma_{r1} - \nu_1 \sigma_{\theta 1}) / E_1 = (1 - \nu_1) \sigma_1 / E_1 \\ \varepsilon_{\theta 1} &= (\sigma_{\theta 1} - \nu_1 \sigma_{r1}) / E_1 = (1 - \nu_1) \sigma_1 / E_1 \\ \varepsilon_{r2} &= \varepsilon_{\theta 2} = (1 - \nu_2) \sigma_2 / E_2\end{aligned}\quad (3)$$

であるが, はく離が生じるまでは膜と母材のひずみはいずれの場所においても等しいから, $\varepsilon_{r1} (= \varepsilon_{\theta 1}) = \varepsilon_{r2} (= \varepsilon_{\theta 2})$ より,

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{E_1(1 - \nu_2)}{E_2(1 - \nu_1)}\quad (4)$$

である。また, 力のつりあいから

$$B_2 \sigma = B_2 \sigma_2 + B_1 \sigma_1\quad (5)$$

であり, したがって,

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{(1 - \nu_2) E_1}{(1 - \nu_1) E_2} \cdot \sigma \\ &= \frac{B_1}{B_2} \cdot \frac{(1 - \nu_2) E_1}{(1 - \nu_1) E_2} \sigma \\ \sigma_2 &= \frac{\sigma}{1 + \frac{B_1}{B_2} \cdot \frac{(1 - \nu_2) E_1}{(1 - \nu_1) E_2}}\end{aligned}\quad (6)$$

となる。

つぎに, この円板皮膜の半径 a が, 皮膜の単位面積あたりの表面エネルギー γ_c , 皮膜と母材の単位面積あたりの界面エネルギー γ_{12} , 皮膜の厚さ B_1 , 皮膜の弾性係数 E_1 およびポアソン比 ν_1 , 母材のそれら B_2 , E_2 および ν_2 とどのような関係にあるかを, Griffith 流のエネルギー条件から求める。

まず, 一つの円板皮膜の割れによって増加する表面エネルギー W_1 は,

$$W_1 = 2\gamma_c \pi a B_1\quad (7)$$

である。つぎに, この円板皮膜が全面にわたってはく離したときの界面エネルギーの増加分 W_{12} は,

$$W_{12}=2\gamma_{12}\pi a^2 \quad (8)$$

となる。

また、円板皮膜のはく離によって解放した皮膜のひずみエネルギー U_1 は、二軸引張応力 σ を受ける弾性体に蓄えられる単位体積あたりのひずみエネルギー U が $U=(1/2E)(2\sigma^2-2\nu\sigma^2)=(1-\nu)\sigma^2/E$ であることを考慮して、

$$U_1=\frac{(1-\nu_1)}{E_1}\sigma_1^2\pi a^2 B_1 \quad (9)$$

となる。

一方、外応力 σ が一定で円板皮膜のはく離が生じたとすれば、母材で増加したひずみエネルギー U_2 は式 (9) と同様にして次式のようになる。

$$U_2=\frac{(1-\nu_2)}{E_2}(\sigma^2-\sigma_2^2)\pi a^2 B_2 \quad (10)$$

また、外力のなした仕事 L は、母材で生じていたはく離前のひずみが $\varepsilon_{r2}=(1-\nu_2)\sigma_2/E_2$ 、はく離後のひずみが $\varepsilon_r=(1-\nu_2)\sigma/E_2$ であることを考慮して、次式のようになる。

$$L=(2\pi a\sigma B_2)(\varepsilon_r-\varepsilon_{r2})a \\ =\frac{(1-\nu_2)}{E_2}2\pi a^2\sigma(\sigma-\sigma_2)B_2 \quad (11)$$

したがって、自由エネルギーの変化 ΔF は、

$$\Delta F=W_1+W_{12}-U_1+U_2-L \quad (12)$$

であり、 ΔF が極値をとる円板皮膜の直径 $2a_0$ は、

$$\frac{\partial \Delta F}{\partial a}=0 \quad (13)$$

を満足する a からつぎのように計算できる。

$$2a_0=2\gamma_c B_1 / \left\{ \frac{(1-\nu_1)B_1}{E_1}\sigma_1^2 + \frac{(1-\nu_2)B_2}{E_2}(\sigma-\sigma_2)^2 - 2\gamma_{12} \right\} \quad (14)$$

この式によると、皮膜の表面エネルギー γ_c および界面エネルギー γ_{12} が小さいほど、円板皮膜の直径 $2a_0$ が小さいことになる。すなわち、3・1節で述べたように、皮膜および母材に蓄えられていた一定のひずみエネルギーを、皮膜の割れとはく離によって解放しようとするとき、 γ_{12} が一定のときには、皮膜の γ_c が小さいほど多くの表面を形成しなければならないから、 $2a_0$ は小さくなる必要がある。また、 γ_c が一定で、 γ_{12} が小さいときには、界面エネルギーとして解放できるエネルギーには限りがあるから、蓄えられた残りのひずみエネルギーを解放するには、皮膜が細かく割れてそれらの表面エネルギーとして吸収するしかない。式 (14) は、この関係をよく表現している。

なお、 $2a_0 > 0$ となるためには式 (14) の分母が正の値をとる必要がある。もし γ_c が γ_{12} に比べてかなり小さいと、小さい σ (または σ_1 , σ_2) で皮膜に割れが生じるが、この場合には、分母の符号が負となって解は存在せず、「島状はく離型」の割れは起こらない。この場合には、界面はく離の起こらない「くもの巣型」あるいは「繰返し分割型」の割れ形態が現れると考えられる。

3・3 母材が塑性変形するときの割れの大きさと膜厚および材料特性の関係の導出

3・2節に示した解析は弾性論にもとづいたものであったが、本研究で用いた試験片では、膜と母材の界面強度が比較的大きく、バルジ試験において、母材が塑性変形して界面に大きなひずみが発生してはじめてはく離が生じた。そこで、上記の関係を母材が塑性変形する場合にも適用できるように修正するため、母材を直線硬化材で近似し、これをさらに形式上二つの弾性域をもつ材料として取り扱う。皮膜のはく離によって母材の除荷は起こらないので、3・1節で用いた Griffith 流のエネルギー論の適用が可能である。

まず、多軸応力下における塑性変形挙動は、相当応力によって表現されるが、等二軸引張応力下における降伏応力は、Tresca の降伏条件、Mises の降伏条件のいずれの条件においても一軸引張りの場合のそれに等しい。そこでまず、一軸引張りにおける材料の変形が、直線硬化則にしたがうとし、その応力-ひずみ曲線の弾性係数を E_e 、塑性係数 (塑性域での勾配) を E_p とする。

つぎに、母材が塑性変形しているときのひずみ ε_2 は、 $\varepsilon_2=(1-\nu_2)\{\sigma_{ys}/E_e+(\sigma_2-\sigma_{ys})/E_p\}$ であるので (ν_2 は弾性変形および塑性変形によらず一定とする)、界面がはく離を生じない間は、弾性変形している皮膜のひずみ $\varepsilon_1=(1-\nu_1)\sigma_1/E_1$ とすでに塑性変形している母材のひずみが等しいという条件から、

$$(1-\nu_1)\sigma_1/E_1 \\ = (1-\nu_2)\{\sigma_{ys}/E_e+(\sigma_2-\sigma_{ys})/E_p\} \quad (15)$$

となる。力の釣合を表す式 (5) $\sigma B_2=\sigma_2 B_2+\sigma_1 B_1$ は、そのまま成り立ち、これと上式から、 σ_1 および σ_2 を求めると、次のようになる。

$$\sigma_1=\frac{(1-\nu_2)}{(1-\nu_1)} \cdot \frac{E_1}{E_p} \left\{ \sigma - \left(1-\frac{E_p}{E_e}\right) \sigma_{ys} \right\} / \\ \left\{ 1 + \frac{B_1}{B_2} \cdot \frac{(1-\nu_2)}{(1-\nu_1)} \cdot \frac{E_1}{E_p} \right\} \\ \sigma_2=\left\{ \sigma + \frac{(1-\nu_2)}{(1-\nu_1)} \cdot \frac{B_1}{B_2} \cdot \frac{E_1}{E_p} \left(1-\frac{E_p}{E_e}\right) \sigma_{ys} \right\} / \\ \left\{ 1 + \frac{B_1}{B_2} \cdot \frac{(1-\nu_2)}{(1-\nu_1)} \cdot \frac{E_1}{E_p} \right\} \quad (16)$$

この式で、 $E_p=E_e=E_2$ と置くと、膜と母材の両方が弾性変形している場合の式 (6) と一致する。

一方、皮膜は弾性変形のままで母材のみが塑性変形することにより皮膜の割れと界面はく離が起こる場合には、式 (7) から式 (11) の各エネルギーの中で、 W_1 , W_{12} および U_1 はそのままであり、母材で増加したひずみエネルギー U_2 および外力のなした仕事 L は次のように修正される。

$$U_2=\frac{1-\nu_2}{E_p}(\sigma^2-\sigma_2^2)\pi a^2 B_2 \quad (17)$$

$$L=\frac{1-\nu_2}{E_p}\sigma(\sigma-\sigma_2)2\pi a^2 B_2 \quad (18)$$

これらの式は母材が弾性変形するときの弾性係数 E_2 を母材が塑性変形するときの塑性係数 E_p で置き換えた形になっている。したがって、式 (14) と同様にして、安定な島状はく離き裂の大きさ $2a_0$ は次のように求められる。

$$2a_0 = 2\gamma_c B_1 / \left\{ \frac{(1-\nu_1)B_1}{E_1} \sigma_i^2 + \frac{(1-\nu_2)B_2}{E_p} (\sigma - \sigma_i)^2 - 2\gamma_{12} \right\} \quad (19)$$

4 実験結果および考察

Fig. 5 および Fig. 6 は, セラミック溶射皮膜および耐熱塗料皮膜について, バルジ試験により膜厚 B_1 と割れ発生圧力 p_i および割れの大きさ $2a_0$ の関係を調べた結果で, 膜厚が厚いほど小さい圧力で皮膜の島状はく離が起こり, そのときの割れの大きさ $2a_0$ は増加している。

Fig. 7 は, セラミック溶射皮膜について, 前報³⁾の引張試験から求めた種々の膜厚に対する界面エネルギー γ_{12} の値および実測した島状はく離開始圧力 p_i をもとに式 (1) から計算したはく離開始応力 $\sigma = \sigma_i$ を式 (19) に代入して割れの大きさ $2a_0$ を計算し, 実測値と比べた結果である。ただし, これらの計算には, 皮膜の弾性係数として前報で求めた $E_1 = 9.1 \times 10^3$ MPa を, 母材の降伏応力 σ_{ys} , 塑性係数 E_p の値には, 前報³⁾で引張試験を行った各試験片の平均値 $\sigma_{ys} = 2.4 \times 10^2$ MPa, $E_p = 2.9 \times 10^3$ MPa を用いた (母材の弾性係数は, $E_s = 2.05 \times 10^5$ MPa とした)。また, セラミック皮膜の表面エネルギー γ_c は, 別に用意した皮膜のみの切欠き試験片 (2 枚: 厚さ 0.25 mm, 幅 10 mm, 曲率半径 $\rho = 0.25$ mm および厚さ 0.6 mm, 幅 18 mm, $\rho = 0.25$ mm) の三点曲げ試験から求めた破壊じん性値の平均値から換算して $\gamma_c = 21$ J/m² とした。この図によると, 計算した割れの大きさ $2a_0$ が膜厚の増加とともに増加するという傾向は実測値の傾向と同じであるが, その値は実測値の 1/4 以下である。この主な理由は, 式 (19) の分母が応力の二乗の項を含んでおり, σ_i および σ_{ys} の僅かな測定誤差が $2a_0$ の計算値に大きく影響するためである。ちなみに, はく離がもっと小さな圧力で生じるとして, σ_i の値を実測値の 95 % として計算すると $2a_0$ は実測値の数倍となるが, 式 (19) の分母が負になってしまう。逆に, はく離がもっと大きな圧力で生じるとして, σ_i の値を実測値の 110 % として計算すると $2a_0$ は実測値の数十分の一以下になってしまう。すなわち, 式 (19) の特性上, σ_i の測定誤差が $2a_0$ の計算値に大きく影響する。したがって, Fig. 7 の計算値が実測値と大きく異なるからといって, 式 (19) の表現式の信頼性が損なわれるものではない。

つぎに, Fig. 8 は, 同じくセラミック溶射皮膜について, 前報³⁾で求めた種々の膜厚に対する界面エネルギー γ_{12} の値および本研究で実測した割れの大きさ $2a_0$ を用い, 式 (19) により島状はく離開始応力 σ_i を逆に計算し, 実験で求めた値と比較したものである。この図によると, 膜厚の増加とともに σ_i が減少するという傾向は計算によって表現できている。この場合の計算値と実測値の違いは, Fig. 7 の場合に比べるとはるかに小さいが, これも, 式 (19) の特性によるもので, γ_{12} が既知で, $2a_0$ の実測値から皮膜のはく離開始応力または圧力を推定する場合には, 最大でも 15 % 程度の誤差しか生じない。

Fig. 7 および Fig. 8 で, 計算値と実測値が合わない理

Fig. 5. Relation between film thickness and size of island or pressure at island formation.

Fig. 6. Relation between film thickness and size of island or pressure at island formation.

Fig. 7. Comparison of the calculated relation between film thickness and size of island cracking with the experimental relation.

Fig. 8. Comparison of the calculated relation between film thickness and stress at island formation with the experimental relation.

由としては、上述のはく離開始応力の測定誤差の他に、母材の変形特性を直線硬化材で近似していること、島状割れを円形割れで近似していること、皮膜には残留応力が存在しその値は膜厚によって変化するが、計算では皮膜の表面エネルギー γ_c を膜厚によらず一定としていること、などが考えられる。Fig. 7 を詳細に見ると、実験値は上に凸の傾向を示し、計算値は下に凸の傾向を示している。もし実際の皮膜における表面エネルギー γ_c が残留応力の影響を受けて、界面エネルギー γ_{12} と同様板厚の増加につれて一度上昇したのち下降するという傾向をとるなら、 $2\alpha_0$ の計算値の傾向はさらに実測値の傾向に近づく。

なお、耐熱塗料皮膜については、皮膜が非常にもろく γ_c を実験的に求めることが困難であり、また皮膜の弾性係数の測定値がやや不正確であったので計算値と実測値の比較・検討はしていない。

以上、本解析で導いた理論式は、種々の単純化を含んでおり、数値的に高い精度を議論できるほど正確なものではないが、ぜい性皮膜が二軸引張りを受けるときの割

れ形態の一つである島状はく離型の割れ形態の本質、すなわち割れの大きさが皮膜の強度、皮膜の厚さ、界面強度などに依存することを、かなりの程度表現できているものと思われる。

5 結 論

ぜい性皮膜における島状はく離型の割れ形態について、割れの大きさと界面強度などの関係を解析し、その結果をセラミックスおよび耐熱塗料をコーティングした円板試験片のバルジ試験結果と比較した。得られた結果はつぎのとおりである。

(1) いずれの皮膜においても島状はく離型の割れが生じ、皮膜の厚さが厚いほど、島状割れが生じる圧力は小さく、また皮膜の厚さが厚いほど島状割れの大きさは大きい。

(2) Griffith 流のエネルギー論を用いて、島状割れの大きさと、皮膜厚さ、皮膜の表面エネルギーおよび界面エネルギーなどとの関係を導いた。セラミック溶射試験片について、引張試験から求めた界面強度を用いて計算した皮膜厚さと島状割れの大きさおよび島状はく離開始応力の関係は、実験から求めた関係をかなりよく説明している。

(3) 二軸引張りを受けるぜい性皮膜の破壊形態の一つである島状はく離形態の特性は、本研究で導いた理論により半定量的に表現できる。

終わりに、耐熱塗料試験片の作製にお力添えいただいた中国塗料(株)に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 竹田博光編, “セラミックコーティング” (1988) 日刊工業新聞社.
- 2) 原田良夫, 日本金属学会会報, **31**, 413 (1992).
- 3) 中佐啓治郎, 高田宗一郎, 市後博造, 材料, **44**, 321 (1995).
- 4) K. Nakasa and J. Nakatsuka, Eng. Frac. Mech., **47**, 403 (1994).
- 5) 中佐啓治郎, 中塚純一, 材料, **38**, 100 (1989).
- 6) 中佐啓治郎, 中塚純一, 材料, **39**, 687 (1990).
- 7) 中佐啓治郎, 中塚純一, 材料, **40**, 613 (1991).