

軸対称型境界要素法によるコーティング膜の密着強度評価

EVALUATION OF ADHESIVE STRENGTH BETWEEN Ti FILM AND SUBSTRATE USING AXISYMMETRIC BOUNDARY ELEMENT APPROACH

荒井 政大¹⁾, 佐藤 慶宜²⁾, 伊藤 寛明³⁾, 長 秀雄⁴⁾, 西村 正臣⁵⁾, 榊 和彦⁶⁾

Masahiro ARAI, Yoshitaka SATO, Hiroaki ITO, Hideo CHO, Masaomi NISHIMURA and Kazuhiko SAKAKI

- | | | |
|----------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| 1) 信州大学工学部機械システム工学科 | (〒 380-8553 長野市若里 4-17-1, | E-mail: arai@shinshu-u.ac.jp) |
| 2) 信州大学大学院理工学系研究科 | (〒 380-8553 長野市若里 4-17-1, | E-mail: yoshita@str.shinshu-u.ac.jp) |
| 4) 青山学院大学理工学部機械創造工学科 | (〒 252-5258 相模原市中央区淵野辺 5-10-1, | E-mail: ito@me.aoyama.ac.jp) |
| 3) 青山学院大学理工学部機械創造工学科 | (〒 252-5258 相模原市中央区淵野辺 5-10-1, | E-mail: cho@me.aoyama.ac.jp) |
| 5) 信州大学工学部機械システム工学科 | (〒 380-8553 長野市若里 4-17-1, | E-mail: nishimu@shinshu-u.ac.jp) |
| 6) 信州大学工学部機械システム工学科 | (〒 380-8553 長野市若里 4-17-1, | E-mail: ksakaki@shinshu-u.ac.jp) |

In the present paper, the interfacial adhesion strength between Ti coating film and Al-alloy substrate is evaluated by using laser ultrasonic waves and boundary element method. The adhesion strength can be estimated by inverse analyses using transfer function from the history of displacement of the specimen and boundary element analysis for unsteady 3-dimensional vibration. In the present study, an alternative boundary element program has been made for the axisymmetric solid body. Using data processing by Weibull distribution, the interfacial strength between Ti coating film and Al-alloy substrate could be confirmed to be 59.2 MPa from the present investigation.

Key Words: Laser Ultrasonic Waves, Inverse Analysis, Boundary Element Method, Coating Film, Wave Propagation, Interfacial Strength

1. 緒 言

さまざまな機械材料の特性改善, 例えば耐熱性や耐摩耗性, 擦動特性, 耐食性, さらに種々の光学デバイスにおける物理特性の改善を目的として, コーティング膜(薄膜)を有する材料がさまざまな機械構造物や機械部品に用いられている。例えば, 切削工具の表面処理には, 高い硬度, 剛性, 化学的安定性を有するダイヤモンドなどの炭素系皮膜が用いられている。また, 例としてガラスレンズ成形用の金型には摩擦特性や成形品表面の形状精度を改善させるために白金などの金属系膜や炭素系の DLC 膜などが用いられている。コーティング膜の密着強度の評価方法としては, スクラッチ試験法や圧子押し込み試験法などが知られているが, いずれの試験方法も, 膜の強度の絶対的な評価手法としては確立されておらず, 同一の試験法による結果の相対比較のみにしか用いることができないなど, 試験方法の汎用性の面で難点を抱えている。また, ピンを接着してコーティング膜を引き剥がすことにより密着強度を求める方法(引張法)がよく用いられているが, 一般には界面上の応力分布を考慮せずに平均応力で強度を求めている点に問題がある。

著者らのグループは, コーティング膜の密着強度の評価

手法として, レーザースポレーション法と呼ばれるレーザー超音波を用いた計測手法に着目し, 種々の検討を重ねてきた⁽¹⁾⁽²⁾。この手法は, レーザーを照射した薄膜裏面における変位を測定し, その測定したデータを用いて, 基材とコーティング膜の密着強度を逆解析的に算出する計測法であり, 基材とコーティング膜における弾性波動場を高い精度で評価することができれば, 機械的な試験によらず, 試験片にパルスレーザーを照射するのみでコーティング膜の密着強度を求めることが可能となる。本研究グループの評価法では, 従来法のように, 基材とコーティング膜内の波動伝播を一次元波動伝播理論により近似するのではなく, 三次元波動伝播そのものを境界要素法を用いて解析することで, より信頼性の高い密着強度データが得られることを見出している。

既報の評価手法⁽²⁾では, 3次元動弾性問題に対する境界要素法を用いて基材・コーティング膜内部の弾性波動を評価してきた。しかしながら3次元解析プログラムは解くべき連立方程式の未知数が多く, 必ずしも効率的な解析法とはいえない。そこで, 本報では軸対称型の境界要素法プログラムを新たに開発し, 計算の効率化と解析精度の向上を果たす。

レーザースポレーション法で得られた変位履歴の測定データよりチタンコーティング膜・アルミニウム合金基材間の密

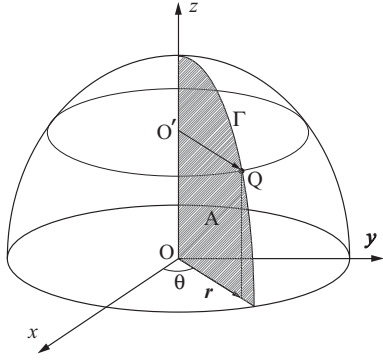


Fig. 1 Definition of coordinates for axisymmetric analyses.

着強度を算出するとともに、比較例としてピン引き抜き法による静的な密着強度測定試験を実施した。両者の比較を通して今回開発した数値解析プログラムの妥当性を確認した。

2. 理 論

2.1. 動弾性問題の境界積分方程式

有限領域の弾性体を考え、解析領域を Ω 、その境界を S とすると、弾性体の変位 u_i は以下のつりあい方程式を満足する。

$$\sigma_{ij,j} = \rho \ddot{u}_i \quad (1)$$

ここで、 u_i は変位、 σ_{ij} は応力テンソル、 ρ は密度であり、 $'_{,j}$ は座標 x_j に関する偏微分、 $\ddot{}$ は時間に関する2階微分を意味する。なお、物体力項は無視した。式 (1) に Laplace 変換を適用すると以下ようになる。

$$\bar{\sigma}_{ij,j} = \rho s^2 \bar{u}_i \quad (2)$$

ここで、 s は Laplace 変換パラメータであり、上付きの添え字 $-$ は物理量の Laplace 変換を意味する。式 (2) に基本解 U_{ij} の Laplace 変換 $\bar{U}_{ij}$ を乗じたのちに考察領域で積分し、Gauss の発散定理、Betti の相反定理を用いて領域積分を境界積分に変換すると、以下の境界積分方程式が得られる。

$$C_{ij} \bar{u}_j(P) = \int_S \{ \bar{U}_{ij}(P, Q) \bar{t}_j(Q) - \bar{T}_{ij}(P, Q) \bar{u}_j(Q) \} dS \quad (3)$$

なお、基本解 U_{ij} は時間に対して単位インパルス状に変化する集中荷重が無限弾性体に作用した場合の変位であり、 T_{ij} は基本解 U_{ij}^* に対応する物体境界上での表面力を表す。 $\bar{U}_{ij}$ 、 $\bar{T}_{ij}$ はそれらの Laplace 変換である。また、 C_{ij} は境界形状によって決まる位置定数であり、 P は単位集中力を加えるソース点、 Q は積分点 (観測点) である。式 (3) を離散化し、適切な境界条件のもとに解けば、弾性体内の応力および変位の Laplace 変換が求められる。Laplace 変換領域で得られた変位、応力の数値解に対し、数値 Laplace 逆変換を適用すれば、物体の変位や応力の実時間解を求めることができる。なお、BEM 定式化の詳細は既論文⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾を参照されたい。

2.2. 軸対称問題に対する境界要素法

Fig.1 に示されるような、 z 軸に関して軸対称な領域に対する境界要素定式化について考える。軸対称問題であるか

ら、実際の解析対称領域は図の領域 A で与えられる対称面のみを扱えばよい。よって実質的には2次元問題として取り扱うことが可能である。

軸対称問題の境界要素定式化では、本来は軸対称状 (リング状) の荷重が弾性体に作用する場合の変位場を考えるのが基本であるが、今回は簡易的に3次元体に対する基本解を用いて軸対称問題に対する境界積分方程式を導出する。

まず、変位 $u_j = (u_x, u_y, u_z)^T$ を以下に示す積分点 Q に対する変換マトリクスを用いて $u_k^* = (u_r, u_\theta, u_z)^T$ に変換する。 u_r 、 u_θ は Fig.1 に示すように、 x - y 平面内で極座標 r 、 θ を考えた際の動径 r の方向および方位角 θ の方向に対する変位成分を表す。 x - y - z 座標系に対する変位成分 u_j と、 r - θ - z 座標系における変位成分 u_k^* の関係は以下になる。

$$u_k^*(Q) = N_{kj}(Q) u_j(Q) \quad (4)$$

ただし、

$$N_{kj}(Q) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、 θ は Fig.1 に示すように対称軸から積分点 Q までのベクトル $\vec{O'Q}$ と x 軸とのなす角である。

また、表面力 $t_j = (t_x, t_y, t_z)^T$ についても同様に式 (5) を用い、 $t_k^* = (t_r, t_\theta, t_z)^T$ に変換する。

$$t_k^*(Q) = N_{kj}(Q) t_j(Q) \quad (6)$$

よって、式 (4)、(5)、(6) を用いることにより、式 (3) を以下のような r - θ - z 座標系に対応した境界積分方程式に書き換えることができる。

$$N_{mi}(P) C_{ij}(P) N_{jk}^{-1}(P) \bar{u}_k^*(P) = \int_S \{ N_{mi}(P) \bar{U}_{ij}(P, Q) N_{jk}^{-1}(Q) \bar{t}_k^*(Q) - N_{mi}(P) \bar{T}_{ij}(P, Q) N_{jk}^{-1}(Q) \bar{u}_k^*(Q) \} dS \quad (7)$$

ただし、マトリクス $N_{mi}(P)$ はソース点 P において定義される座標変換マトリクスであり、その定義は式 (5) と同様である。さらに、上式を書き換えると次式に帰着する。

$$C_{mk}^*(P) \bar{u}_k^*(P) = \int_S \{ \bar{U}_{mk}^*(P, Q) \bar{t}_k^*(Q) - \bar{T}_{mk}^*(P, Q) \bar{u}_k^*(Q) \} dS \quad (8)$$

ただし、

$$C_{mk}^*(P) = N_{mi}(P) C_{ij}(P) N_{jk}^{-1}(P) \quad (9)$$

$$\bar{U}_{mk}^*(P, Q) = N_{mi}(P) \bar{U}_{ij}(P, Q) N_{jk}^{-1}(Q) \quad (10)$$

$$\bar{T}_{mk}^*(P, Q) = N_{mi}(P) \bar{T}_{ij}(P, Q) N_{jk}^{-1}(Q) \quad (11)$$

角度 θ における切断面の境界を Γ とすると、式 (8) の境界 S に関する面積分は以下のような二重積分によって表すことができる。

$$C_{mk}^*(P) \bar{u}_k^*(P) = \int_{\Gamma} \int_0^{2\pi} \{ \bar{U}_{mk}^*(P, Q) \bar{t}_k^*(Q) - \bar{T}_{mk}^*(P, Q) \bar{u}_k^*(Q) \} r(Q) d\theta d\Gamma \quad (12)$$

すなわち、対称面の境界に沿った線積分と、対称軸まわりの周積分 (θ に関する積分) で表される。

もし、境界 S 上で定義される変位および表面力が軸対称条件を満足すれば、式 (8) は対称断面 A のみの離散化だけで済む。その場合、境界 Γ 上の物理量 $\bar{u}_k^*$, $\bar{t}_k^*$ は θ に関する積分に関わらないので、式 (12) 次式のように簡略化できる。

$$C_{mk}^*(P)\bar{u}_k^*(P) = \int_{\Gamma} \{\hat{U}_{mk}^*(P, Q)\bar{t}_k^*(Q) - \hat{T}_{mk}^*(P, Q)\bar{u}_k^*(Q)\} d\Gamma \quad (13)$$

ただし、

$$\hat{U}_{mk}^*(P, Q) = \int_0^{2\pi} \bar{U}_{mk}^*(P, Q)r(Q)d\theta \quad (14)$$

$$\hat{T}_{mk}^*(P, Q) = \int_0^{2\pi} \bar{T}_{mk}^*(P, Q)r(Q)d\theta \quad (15)$$

通常の軸対称問題の定式化に従うならば、境界積分方程式として式 (13) を離散化し、基本解を式 (14), (15) に従って計算すればよい。しかしながら、式 (14), (15) に示されるように、軸対称問題における基本解は一般に周積分が残る形となる。本間らは軸対称問題におけるヘルムホルツ方程式の境界要素定式化について、フーリエ変換とハンケル変換を用いた基本解の導出を試みているが⁽⁷⁾、最終的には無限積分が残存している。また、天谷らはカソード防食問題に対して軸対称性を考慮した定式化を示しているが⁽⁸⁾、天谷らの定式化においても基本解の計算に第一種および第二種完全楕円積分の評価や特異積分の処理に課題が残る。そこで本論文における数値計算では、あえて次節に示すように 2 次元要素を用い、式 (8) を直接離散化することによって計算を行う。

2.3. 軸対称問題の離散化について

本論文の定式化では、先に導出された r - θ - z 座標系に対する境界積分方程式 (8) を離散化する。軸対称問題なので、方位角 θ に対する物理量の分布は考慮しなくてよい。よって、境界上の変位と表面力は対称断面の境界 Γ (軸対称形状の物体の母線) 上のみで定義すればよい。

先に述べたように、境界積分に関しては面要素 (2 次元要素) を基本ユニットとして計算する。面積分に対する離散化要素は Γ 方向の分布のみを考慮すればよく、Fig.2 に示すような 3 節点からなる非適合 2 次要素を用いて計算を行った。なお、要素内の座標の内挿に関しては一般的な 8 節点の 2 次適合要素を用いた。

ソース点はすべて $\theta = 0$ の対称境界上に置かれる。 x - z 面内の対称境界上の節点座標を入力条件として与え、それらを対称軸まわりに回転させることによって 3 次元軸対称物体の要素座標をプログラム内で自動的に生成して物体表面における境界積分を実行した。すなわち、入力情報としてはあくまで軸対称境界に対する情報のみで解析を行っている。なお、本論文では“ねじり無し”の解析を行っているため、実際には方位角方向の成分 u_θ , t_θ をすべて 0 とし、方程式をさらに縮退させることにより計算の効率化を図っている。

次に、剛体変位条件⁽⁶⁾を用いた特異性の処理について考える。静的問題に対する境界積分方程式に対して一様な変位

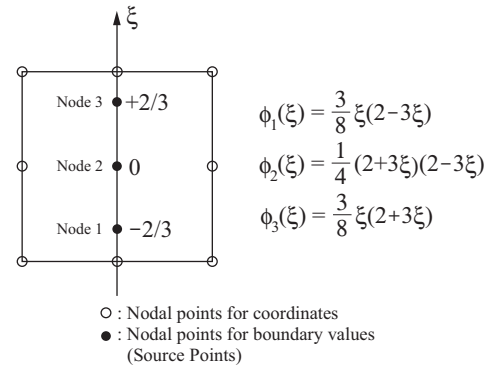


Fig. 2 Non-conforming quadratic element for interpolation function.

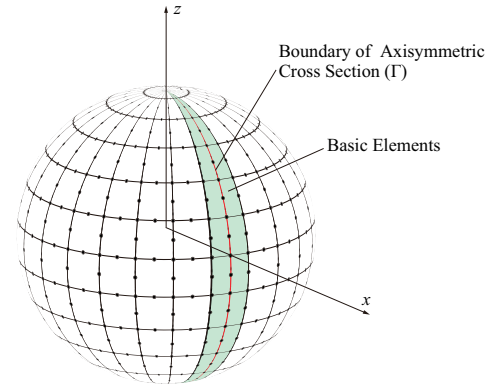


Fig. 3 Boundary element division for axisymmetric solids.

場 $\bar{u}_k^*(P)$ を与えると以下になる。

$$C_{mk}^*(P)\bar{u}_k^*(P) + \int_S N_{mi}(P)T_{ij}(P, Q)N_{jk}^{-1}(P)\bar{u}_k^*(P)dS \quad (16)$$

なお、ここでの一様な変位場 $\bar{u}_k^*(P)$ は x - y - z 座標系に対する一様な変位場であり、一様な軸対称変位場を意味するものではない。また、 $T_{ij}(P, Q)$ は静的問題に対する基本解 (Kelvin の解) に対応する表面力成分である。剛体変位条件による特異性の処理を行うには、式 (8) から式 (16) を差し引けばよく、さらに三角形要素によるサブ要素分割法⁽⁶⁾を採用すれば、通常の 3 次元問題と同様に特異積分の処理が可能となる。

3. レーザースポレーション法による膜剥離試験法

3.1. 実験装置および試験片

本論文では Fig.4 に示すような実験装置を用いて、レーザー超音波を用いた膜剥離試験を行った。半値持続時間幅 5ns, 直径 2mm の YAG レーザーを試験片上面に照射させることにより、試験片内に弾性波動を励起させる。ここで、コーティング膜表面の変位応答をレーザー干渉計により測定した。試験片は、厚さ 5mm のアルミニウム合金基板に高速フレーム溶射によって厚さ約 30 μ m チタンコーティング膜を形成させた膜剥離試験には 7 枚の試験片 (試験片 No.1~7) を使い、レーザーエネルギーを 32~60mJ の範囲で変化させ試験を行った。代表例として試験片 No.1 においてレーザーエネルギー 32mJ を照射した際に得られたコーティング膜表面の面外変位応答を Fig.5 に示す。

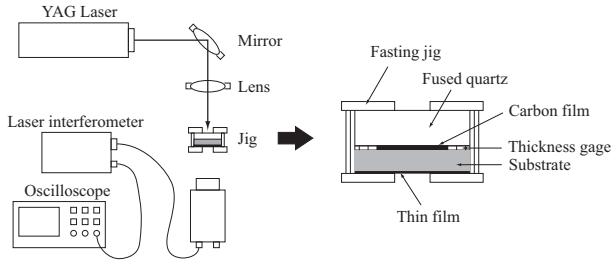


Fig. 4 Experimental equipments.

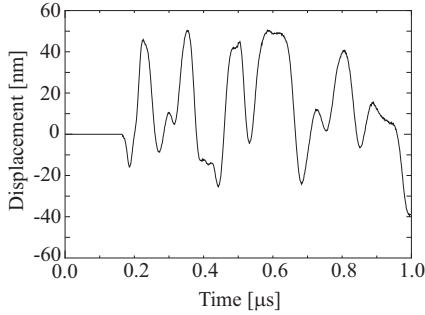


Fig. 5 Displacement history on the surface of the substrate (laser energy = 32mJ).

3.2. 伝達関数法による界面応力の同定⁽⁴⁾⁽⁵⁾

以下、レーザースポレーション試験により得られたコーティング膜裏面の変位応答から逆解析的に基材とコーティング膜の界面における応力応答を同定する方法について述べる。入力荷重を $f(t)$ 、変位応答を $u(t)$ とする線形システムを考えると、両者の関係は、以下のような Duhamel の畳み込み積分で表すことができる。

$$u(t) = \int_0^t G_1(t - \tau) f(\tau) d\tau \quad (17)$$

ただし、 $G_1(t)$ は入出力関係を規定するインパルス応答関数である。上式を Laplace 変換すると、以下の式が得られる。

$$\bar{u}(s) = \bar{G}_1(s) \bar{f}(s) \quad (18)$$

すなわち、出力応答 $\bar{u}(s)$ は、入力の Laplace 変換 $\bar{f}(s)$ と伝達関数 $\bar{G}_1(s)$ の積で表される。同様に入力荷重と界面応力の Laplace 変換 $\bar{f}(s)$ と $\bar{\sigma}(s)$ の関係についても、伝達関数 $\bar{G}_2(s)$ を用いて以下のように表すことができる。

$$\bar{\sigma}(s) = \bar{G}_2(s) \bar{f}(s) \quad (19)$$

なお、式 (18), (19) における $\bar{G}_1(s)$, $\bar{G}_2(s)$ は、先に示した軸対称型境界要素法による 3 次元波動伝播解析により算出した。式 (18) を用いることで、測定した変位応答の Laplace 変換 $\bar{u}(s)$ から Laplace 像空間上における入力荷重 $\bar{f}(s)$ を求められる。また、式 (19) を用いて、得られた入力荷重 $\bar{f}(s)$ から順解析を行うことで Laplace 像空間上における界面応力 $\bar{\sigma}$ を求めることができる。その後、Laplace 像空間上における入力荷重 $\bar{f}(s)$ と界面応力 $\bar{\sigma}(s)$ を数値 Laplace 逆変換することで実時間の入力荷重 $f(t)$ と界面応力 $\sigma(t)$ が得られる。なお、数値解析の詳細および数値解の適切化処理については既論文⁽²⁾を参照頂きたい。

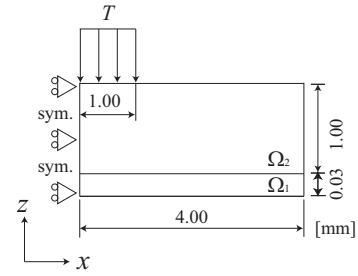


Fig. 6 Axisymmetric BEM model on x - z cross section.

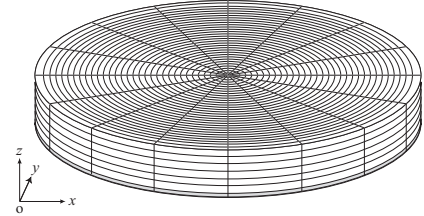


Fig. 7 3-Dimensional boundary element division.

Table 1 Material properties of thin film and substrate.

Material	Ti(Ω_1)	Al(Ω_2)
Young's Modulus[GPa]	110.57	70.30
Density[kg/m ³]	4150	2680
Poisson's Ratio	0.32	0.33

3.3. 数値解析モデル

アルミニウム合金基板とチタンコーティング膜に関する軸対称モデル (Fig.6) を用い、境界要素法による波動伝播解析を実施することで伝達関数の算出を行った。領域 Ω_1 が厚さ 30 μm のチタンコーティング膜、領域 Ω_2 が厚さ 1mm の Al 合金基材であり、対称断面における境界要素数は領域 Ω_1 が 330 要素、領域 Ω_2 が 360 要素である。なお、実際の平板は 50mm $\times$ 50mm であるが、解析においては反射波の影響が及ばない半径 4mm の部分を切り出して解析モデルを作成している。

また、数値積分を実行するための 3 次元要素分割を Fig.7 に示す。対称断面上の要素座標に関する入力データから 3 次元軸対称モデルの要素座標を自動的に生成し、境界積分を行った。今回のモデルにおける円周方向の分割数は 16 である。数値積分には Gauss の数値積分公式を用い、ソース点の位置と距離に応じて積分次数を 4 から 40 に増減することによって積分効率の改善を図っている。解析に用いたチタンとアルミニウム合金の物性値は Table 1 に示すとおりである。

なお、数値積分に要する時間は、境界物理量の分布を 8 節点の 2 次非適合要素で離散化した従来法⁽²⁾の 1/40~1/50 程度の時間で済む。無論、積分効率に関して言えば、円周方向の分割数が多くなればなるほど軸対称性を考慮した本プログラムが有利となる。

4. 結果と考察

4.1. レーザースポレーション試験

境界要素解析で得られた伝達関数と試験片コーティング膜側の変位応答 (Fig.5) を用いて試験片上面に作用する圧力の

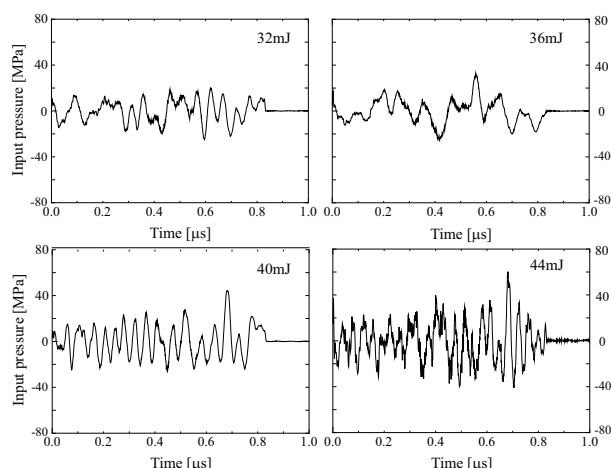


Fig. 8 Applied pressure on the Al substrate obtained BEM inverse analysis.

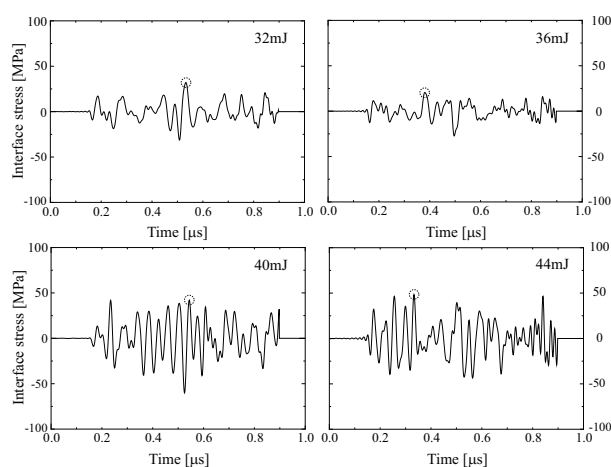


Fig. 9 Interface stress between Ti thin film and Al substrate obtained BEM inverse analysis.

時間変動を求めた結果を Fig.8 に示す. また, 得られた圧力の時間変動を用い, 順解析によって得られたチタンコーティング膜とアルミニウム合金基材の界面における応力応答を Fig.9 に示す. なお, これら結果は7枚の試験片の実験によって得られたうちの試験片 No.1 の結果であり, レーザーエネルギー 32mJ, 36mJ では界面剥離が生じず, 40mJ と 44mJ の試験において剥離が生じた.

今回の試験では剥離が生じた時刻を検知していないため, どの時刻のどの応力で破壊が生じたのかを知ることは難しい. そこで, 本論文における評価では, 簡易的に解析時間範囲における応力の最大値 (Fig.9 の丸印) を臨界応力 (界面密着強度) と判定することとした.

Fig.10 に各試験片ごとの臨界応力と, 剥離の有無の関係をまとめた結果を示す. 明らかに試験片によって剥離が生じる応力値にばらつきが認められる. 試験片 No.4 にみられるように, 界面剥離を生じない臨界応力値が剥離を生じた応力を上回るケースも確認される. この原因として, 同一の試験片であっても, パルスレーザーを照射した位置によってコーティング膜の結晶構造や欠陥・気孔の有無, 皮基材の表面粗さの違いなどによって密着力に違いが生じたものと考えられる.

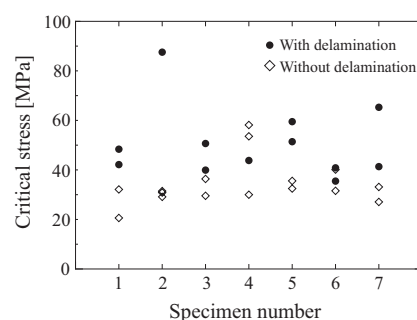


Fig. 10 Critical stress on the Ti/Al interface.

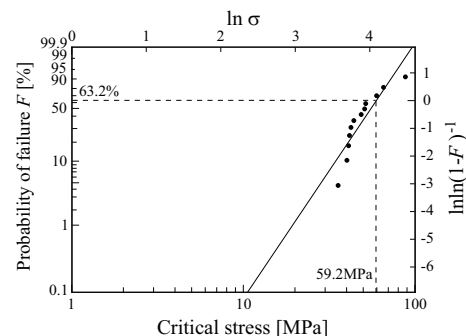


Fig. 11 Weibull distribution of critical stress.

以上の結果を統計的に評価するために, 本研究ではワイブル分布⁽⁹⁾を用い密着強度を評価した. なお, 本論文では破壊したデータのみでなく, 非破壊のデータも含めた評価を行うため, Jhonson の方法⁽¹⁰⁾を適用して計算を行った.

Fig.11 にワイブル分布を用いて密着強度を評価した結果を示す. ワイブル分布を用いた評価では, 累積破壊率が 63.2%となる際の応力値が本研究における密着強度と判断することができる. 結果, レーザースポレーション法によって評価された Ti コーティング膜/Al 合金基材の密着強度は 59.2MPa と見積もられた.

4.2. 引張法による静的密着強度試験

レーザースポレーション法との比較のため, 密着強度測定装置 (Romulus, Quad Group) を用い, 引張法によってチタンコーティング膜の密着強度を評価した. この装置では, Fig.12 に示すように, 試験片のコーティング膜側にスタッドピンを接着した後, スタッドピンに引張荷重を加えてコーティング膜を引き剥がし, その荷重を測定して強度を見積る手法である. なお, この装置では破壊が生じた際の臨界荷重を接着断面積で除して密着強度を求めているが, この方法では界面における応力の不均一分布を考慮できないため, 測定値に誤差が生じる.

そこで本論文ではピン, ピンとコーティング膜の接着層, コーティング膜, 基材の4領域からなる解析モデルを作成し, 静的な境界要素解析によって密着強度を求めた. なお, 先のレーザースポレーション法の場合と同様に, 解析モデルの軸対称性を考慮したプログラムにより以下の計算を行った. アルミニウム合金製スタッドピンのヤング率は 70.3GPa, ポアソン比は 0.33 とし, 接着層 (エポキシ樹脂系接着剤, 厚さ 20μm) のヤング率は 3.45GPa, ポアソン比 0.36 とした. チタ

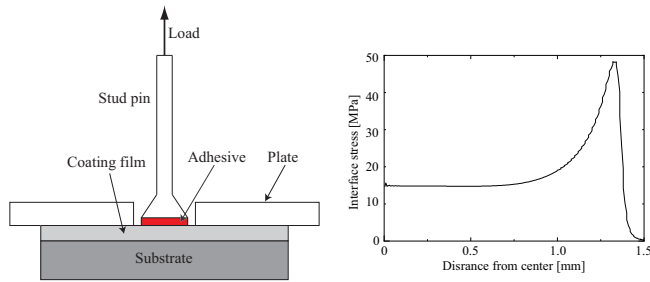


Fig. 12 Schematic of static pull-out test and stress distribution on the Ti/Al interface estimated by BEM analysis.

Table 2 Adhesion strength and critical load of obtained by static pull-out tests.

Sample	Critical load[N]	Adhesion strength[MPa]
No.1	142.6	48.27
No.2	180.0	60.93
No.3	164.9	55.83
No.4	166.7	56.43
No.5	141.4	47.86
No.6	188.8	63.92
No.7	202.2	68.45
No.8	173.2	58.61
No.9	214.1	72.43
No.10	171.9	58.13

ンコーティング膜およびアルミニウム基材の弾性定数は先に Table 1 に示したものを用了。なお、引張試験には 10 枚の試験片を用いた。計測された各試験片の臨界荷重と数値計算により求められた密着強度の値を Table 2 に示す。

Fig.13 にはチタンコーティング膜とアルミニウム合金基材の界面における応力分布の BEM 解析結果を併せて示してある。グラフに示されるようにスタッドピン端部の直下において応力の集中が認められる。BEM 解析によって得られた応力の最大値を剥離が生じた際の臨界応力として判定した。

各試験片の臨界応力の値をワイブル分布の定義に従いプロットした図を Fig.13 に示す。Fig.13 より、累積破壊確率 63.2%における強度を計算すると、ピン引張試験におけるチタンコーティング膜/アルミニウム合金基材の密着強度は 62.5MPa と見積もられた。結果的に、レーザースポレーション法により得られた密着強度 (59.2MPa) はピン引張法により得られた密着強度とほぼ同程度の値となった。動的破壊試験法による結果が静的試験法の結果を若干下回った理由は、階数低下法による適切化処理を行ったことによって動的試験における荷重の推定値が本来の値よりも小さくなったことや、ローパスフィルタによる高周波雑音の除去を行っていること、測定機器の高周波成分に対するリニアリティの低下などが原因として考えられるが、両者の差は 5%程度で非常に小さいことから、レーザースポレーション法により、実用上は十分な精度で密着強度が見積もられていると考えられる。

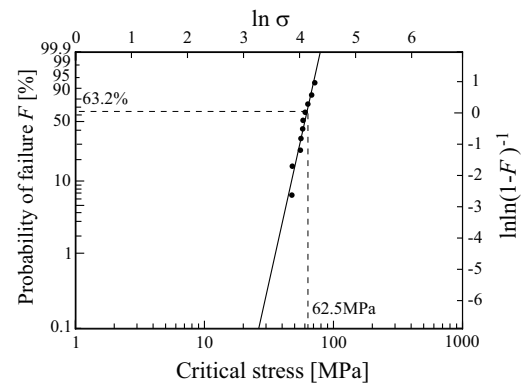


Fig. 13 Summary of critical stress expressed by Weibull distribution for static pull-out test.

5. 結 論

本論文では、コーティング膜の密着強度評価に際してレーザースポレーション法で得られた変位履歴の測定データより逆解析的に密着強度を算出する方法について詳細に検討した。軸対称性を考慮した非定常 3 次元動弾性問題に対する境界要素法プログラムを開発し、伝達関数法を適用してコーティング膜の密着強度を評価した。その結果、従来の 3 次元解析プログラムと比較して数十倍程度の計算効率の改善が果たされた。また、静的なピン引張法に対して境界要素法による数値解析を適用して結果の比較を行った結果、レーザースポレーション法により見積もられた密着強度との差は 5%程度であったことから、レーザースポレーション法によってコーティング膜の密着強度を高い精度で評価できることを確認した。

参考文献

- (1) 荒井政大, 林 久志, 三宅達也, 長 秀雄: レーザー超音波を用いた薄膜-基材界面き裂の破壊靱性値評価, 日本機械学会論文集 (A), Vol.77, No.773, 2011, pp.116-125.
- (2) 荒井政大, 平松尚樹, 佐藤 慶宜, 伊藤寛明, 榊 和彦, 長秀雄: レーザースポレーション法による Ti 薄膜の密着強度評価に関する逆解析, 計算数理工学論文集, Vol.11, 2011, pp.117-122.
- (3) 松本浩之, 足立忠晴, 吉田節男, 宇治橋貞幸: 三次元境界要素法による動的応力集中係数の解析法, 日本機械学会論文集 (A), Vol.55, No.514, 1989, pp.1400-1406.
- (4) Hirotsugu Inoue, Toshikazu Shibuya, Takashi Koizumi and Junichi Fukuchi: Measurement of Impact Force Applied to a Plate by the Deconvolution Method, Transactions of the JSNDI, Vol.2, 1989, pp.74-83.
- (5) 井上裕嗣, 岸本喜久雄, 渋谷寿一, 小泉 堯: 逆解析による衝撃荷重の推定, 日本機械学会論文集 (A), Vol.57, No.543, 1991, pp.2727-2734.
- (6) 結城良治, 木須博行: 境界要素法による弾性解析, 1987, 培風館, pp.130-1320.
- (7) 本間利久, 五十嵐一, 榎本昌則: 軸対称 3 次元問題の境界要素法, 数理解析研究所講究録, Vol.744, 1991, pp.1-9.
- (8) 宮坂松甫, 天谷賢治, 青木 繁: 防食問題解析用軸対称境界要素法の開発と実験による検証, 材料と環境, Vol.44, 1995, pp.293-299.
- (9) 市川昌弘: 信頼性工学, 1990, 裳華房.
- (10) 真壁肇: 信頼性工学入門, 1985, 日本規格協会.