セラミックス薄膜・基板接合体における薄膜の破壊強度†

高 松 徹* 市 川 昌 弘*
松 村 隆* 河 崎 達 也**

Fracture Strength of a Thin Film in a Ceramics Film-Substrate System

by

Tohru TAKAMATSU*, Masahiro ICHIKAWA*, Takashi MATSUMURA*
and Tatsuya KAWASAKI**

Indenter tests on a Al_2O_3 film - WC-Co substrate system using a Al_2O_3 sphere indenter were carried out to evaluate the fracture strength of the thin film coated on a substrate. Film thickness of the specimen was varied as 2.0, 4.0, 6.0 μm , and two kinds of substrate with different hardness and sphere indenter with a diameter of 16, 19, 25 mm were used. The micro fracture strength was evaluated from the load at which a ring crack initiated. Initiation of a ring crack was detected using AE. The fracture strength of the film was evaluated using the micro fracture strength, the residual stress of the film, and the concept of effective area based on the Weibull distribution. Residual stress was measured by the X-ray diffraction method. It was shown that estimated fracture strength of the film a little increased with decreasing the indenter size, and the effect of the film thickness and the substrate hardness on the fracture strength of the film was hardly shown.

Key words: Thin film, Ceramics, Sphere indenter, Ring crack, Weibull distribution, X-ray stress measurement, Residual stress

1 緒 言

材料表面の耐熱性、耐食性、耐摩耗性などの特性を向上させる方法の一つとして、比強度、比剛性が大きく、耐摩耗性、耐食性、そして耐熱性に優れた特性を有する、数 μm オーダのセラミックス薄膜を金属などの表面にコーティングする技術が注目され、種々の分野で積極的に利用されている。その信頼性向上のためには機能面だけでなく強度特性の評価が重要な問題である。これまで単体または薄膜・基板接合体状態における薄膜のヤング率、ポアソン比等の機械的特性の評価に関しては、比較的多くの研究が報告されている。^{1)~5)}一方薄膜の破壊強度に関する研究は少なく、特に薄膜・基板接合体における薄膜の破壊強度に関する研究は非常に少ない。⁶⁾

そこで、これに関する基礎研究として、筆者らは Fig. 1 に示すような球圧子押し込み試験をぜい性薄膜・基板接合体に対して行って、薄膜の破壊強度評価法について検討した。それに関する研究では、 SiO_2 薄膜⁷⁾(膜厚 2 μm , SUS440C基板)、および TiN薄膜⁸⁾(膜厚 2 μm , WC-Co基板)について検討した。また SiO_2 薄膜単体(膜厚 2 μm)で作成した十字型試験片を用いた破壊試験を行って、薄膜の破壊強度を求めて、球圧子押し込み試験より得られた破壊強度との比較検討を行った。⁹⁾さらに筆者らは Si_3N_4 パルク材に対しても同様に球圧子押し込み試験を適用して、セラミックスパルク材における表面層の破壊強度評価法に関して検討した。¹⁰⁾以上の薄膜の破壊強度に関する

る筆者らの研究で得られた主な結果を以下に示す。(1) 薄膜のリングクラック発生強度の分布特性はワイブル分布に従う(SiO_2 薄膜, TiN薄膜)。(2) 薄膜のリングクラック発生強度は球圧子径依存性を示す(TiN 薄膜)。(3) 有効面積の概念に基づいて、リングクラック発生強度から推定した一様応力状態における薄膜の破壊強度はパルク材の曲げ強度より大きい、球圧子径が大きくなるに従って近づく傾向を示す(TiN薄膜)。(4) 十字型試験片より求めた薄膜単体の破壊強度は、薄膜のリングクラック

Fig. 1. Spherical indentation testing method.

† 原稿受理 平成9年11月17日 Received Nov. 17, 1997

* 正 会 員 電気通信大学機械制御工学科 〒182-8585 調布市調布ヶ丘, Dept. of Mech. and Control Eng., Univ. of the Electro-Communications, Chofugaoka, Chofu, 182-8585

** 電気通信大学大学院 〒182-8585 調布市調布ヶ丘, Graduate Student, Univ. of the Electro-Communications, Chofugaoka, Chofu, 182-8585

ク発生強度から推定した薄膜の破壊強度とほぼ一致する (SiO_2 薄膜)。

球圧子押し込み試験の特徴は以下の通りである, (1) 押し込み領域が微小であり, 同一試験片を用いて多数の押し込み試験ができるので, 少数の試験片でも信頼性のある破壊強度の分布特性を得ることができる, (2) 破壊強度は応力をパラメータとして求めるので, 有効面積の概念などの統計的手法を使って, 通常求められている曲げ強度との直接比較ができる, (3) 薄膜・基板接合体状態の薄膜やバルク材の極表面層の破壊強度が評価できる。

一般に薄膜・基板接合体における薄膜には残留応力が生じている。したがって, 薄膜の破壊強度評価においては, 残留応力を考慮することが必要である。しかしこれまで, 薄膜の残留応力測定に基づく破壊強度評価に関する研究は行われていない。なお前報⁸⁾の筆者らの TiN 薄膜に関する研究では, 残留応力は TiN 薄膜の残留応力測定に関する研究¹¹⁾を参考にして仮定し, 有効面積の概念に基づいて破壊強度の評価を行った。

本研究は, これまでの筆者らの研究結果^{7), 8)}をもとにして, 薄膜・基板接合体における薄膜の破壊強度評価法としての球圧子押し込み試験の有効性を検討することを目的として, 膜厚および基板の硬さを変えた Al_2O_3 薄膜・WC-Co 基板接合体に対して球圧子押し込み試験を行った。さらに本研究では, X線回折法により薄膜の残留応力測定を行って, 残留応力を考慮した破壊強度の評価を行った。

2 薄膜の破壊強度

Fig. 1 のように, ぜい性薄膜・基板接合体に球圧子を押し込み荷重を増加させると, 薄膜にはある荷重でリングクラックが発生する。リングクラックは表面の接触円外側に生じる半径方向の引張応力により発生すると考えられる。筆者らは,¹²⁾ 薄膜, 基板いずれも弾性変形を示し, 薄膜のヤング率が基板のものより小さく, 膜厚が接触円半径に比べて十分に小さい場合, 薄膜・基板接合体の薄膜に生じる半径方向の引張応力 σ_r^f は, ヘルツの弾性接触理論に基づく次式で与えられることを示した。

$$\sigma_r^f = \frac{E_f(1+\nu_s)}{E_s(1+\nu_f)} \cdot \frac{(1-2\nu_s)P}{2\pi r^2} \quad (a_H \leq r < \infty) \quad (1)$$

また接触円半径 a_H についても検討した結果, 次式のように薄膜がない場合の式で与えられることを示した。¹³⁾

$$a_H^3 = \frac{3}{4} R \left(\frac{1-\nu_b^2}{E_b} + \frac{1-\nu_s^2}{E_s} \right) P \quad (2)$$

ここで, Fig. 1 に示したように P は押し込み荷重, R は球圧子半径, E , ν はヤング率およびポアソン比で, 添字 f , s , b は薄膜, 基板, および球圧子を表す。上式からわかるように σ_r^f は, 接触円境界 ($r = a_H$) で最大となり, 接触中心からの距離 r が大きくなるに従って, r^{-2} の割合で減少する。

筆者らの球圧子押し込み試験では, $r = a_H$ における σ_r^f をパラメータとして, 薄膜のリングクラック発生荷重, $P = P_C$, に対する値を微小破壊強度 $\sigma_{r,c}^f$ と定義して求めた。

3 実験方法

試験片は膜厚と基板成分を変えた Al_2O_3 薄膜・WC-Co 基板接合体 (東芝タンガロイ (株)) を用いた。球圧子は直径 $\phi 16, 19, 25\text{mm}$ の常圧焼結アルミナ球 (品川白煉瓦 (株)) を用いた。なお, 予備実験において球圧子径がさらに小さな場合についても検討したが, リングクラックは発生しなかったため採用しなかった。

Table I に試験片および球圧子の機械的性質を示す。Fig. 2 に試験片の形状および寸法を示す。Table II に試験片の膜厚と基板成分を示す。基板成分を変えたのは, 基板の塑性変形の影響を検討するためである。基板のビッカース硬さは WC94%-Co6% では 1550~1650, WC84%-Co16% では 1150~1250 となっており, Co の少ない方が硬い。

試験にはインストロン 4505 型試験機を使用した。リングクラック発生強度の分布特性を検討するデータを得るために, 各試験片ごとに押し込み位置を変えて多数の試験を行った。その場合隣り合う押し込み領域の中心距離は, 接触円半径の 10 倍以上としたが, これはそれだけ離れた位置では σ_r^f が実質的にゼロとなるためである。リングクラック発生荷重は前報⁸⁾と同様に, AE 解析装置 LOCAN-AT (日本フィジカルアコースティック (株)) により決定した。本研究では, リングクラックの発生による AE を検出した荷重で直ちに負荷を中断して高速で除荷した。その後光学顕微鏡により押し込み位置を観察し, ほぼ完全な円形となったリングクラックが 1 個だけ確認できた場合のみ有効データとした。負荷時のクロスヘッド速

Table I. Mechanical properties of the material tested.

	Indenter	Substrate	Film
Material	Al_2O_3	WC-Co	Al_2O_3
Young's modulus, GPa	365	696	359
Poisson's ratio	0.25	0.30	0.22

Fig. 2. Geometry of the specimen.

Table II. Specimen conditions.

Specimen	Al_2O_3 Film	Substrate	
	Thickness, μm	WC, %	Co, %
2T-6Co	2	94	6
4T-6Co	4	94	6
6T-6Co	6	94	6
2T-16Co	2	84	16

度は0.070~0.085mm/minとした。クロスヘッド速度をその値にしたのは、後述の4・4節において薄膜の破壊強度とバルク材の曲げ強度を比較するためであるが、JIS規格の曲げ試験片における応力速度と、球圧子押し込み試験のリングクラック発生荷重におけるリングクラック発生位置の σ_r^f の応力速度が等しくなるようにした。

4 実験結果および考察

4・1 残留応力測定

本研究では球圧子押し込み試験の前に、各試験片における薄膜の残留応力測定を行った。測定にはX線回折装置RINT2500(理学電機㈱)を用いた。測定条件をTable IIIに示す。ピーク位置(2θ)は半価幅中点法を用いて決定し、各 ϕ 角のピーク位置の値から $2\theta - \sin^2\phi$ 線図を作成し、残留応力を求めた。各試験片につき3回の測定を行い、その平均値を求めた。Fig. 3に膜厚が6 μm の試験片(6T-6Co)について得られた $2\theta - \sin^2\phi$ 線図の例を示す。

Table IVに各試験片の残留応力の平均値を示す。表より、いずれも残留応力は圧縮となっていることが分かる。その値は、膜厚が厚くなるほど大きく、硬さの小さい基板の方(2T-16Co)が大きい。浅見ら¹¹⁾はTiN薄膜・

Table III. X-ray measuring conditions.

Measuring method	Parallel beam method
Characteristic X-ray	Cr-K α
Filter	V
Tube voltage, kV	40
Tube current, mA	70
Collimator, mm	$\phi 2$
Diffraction plane	(1.0.10)
Diffraction angle, deg	135.19
Stress constant, MPa/deg	-635.0

Fig. 3. $2\theta - \sin^2\phi$ diagram (6T-6Co).

Table IV. Residual stress.

Specimen	Residual Stress, MPa
2T-6Co	-19.8
4T-6Co	-46.1
6T-6Co	-61.6
2T-16Co	-140.7

WC-Co基板接合体に対する残留応力測定を行い、膜厚が厚くなるほど圧縮の残留応力が大きくなる結果を示しているが、その傾向は本研究の結果と一致している。

4・2 リングクラックの測定

Fig. 4に膜厚が2 μm の試験片(2T-6Co)に $\phi 19\text{mm}$ 球圧子を押込んだ場合に薄膜に生じたリングクラックの例を示す。光学顕微鏡による観察より、有効データが得られた場合は図のようなリングクラックが発生しており、さらに基板には塑性変形による圧痕が形成されていることがわかった。これはTiN薄膜試験片³⁾の場合も同様であった。

Fig. 5に膜厚が4 μm の試験片(4T-6Co)について得られた、リングクラック半径 r_f と接触円半径 a_H の比 r_f/a_H とリングクラック発生荷重 P_C の関係を示す。 r_f は光学顕微鏡により測定したものである。 a_H は式(2)から求めたものである。図より、 r_f は球圧子径によらず a_H より10~24%大きいことが分かる。これは他の試験片の場合も同様であった。さらにこの結果は、SiO₂薄膜に対する結果⁷⁾(10~18%)、TiN薄膜に対する結果⁸⁾(5~15%)、およびSi₃N₄バルク材の結果¹⁰⁾(20%)ともほぼ一致している。

筆者らはSi₃N₄バルク材に対する球圧子押し込み試験結果¹⁰⁾を使って、応力拡大係数 K_I をパラメータとして、 r_f と a_H の関係について検討した。¹⁴⁾以下にその要約を示す。まず、表面には一様に様々な長さの表面き裂が分布していると仮定して、荷重増加に伴う K_I の変化特性を求めた。その結果、リングクラック発生荷重において、 $K_I = K_{th}$ (K_{th} : き裂進展抵抗の下限値)の条件を満たすのは、接触円境界のき裂ではなく、リングクラック半径と

Fig. 4. Ring crack ($\phi 19\text{mm}$, 2T-6Co).

Fig. 5. $P_C - r_f/a_H$ relation (4T-6Co).

ほぼ一致した位置にある結晶粒径程度のき裂であることがわかった。したがって、 r_f と a_H の関係は、破壊力学により説明できることになる。なお、 Si_3N_4 パルク材試験片では圧痕は生じない。

また、筆者らの行った Si_2O_3 薄膜・SUS440C基板接合体に対する球圧子押し込み試験⁷⁾においても、基板に圧痕を生じた。その研究では、塑性変形の程度は測定しなかったが、TIN基板に比べて大きいことが十分考えられる。そこで筆者らは、弾塑性有限要素解析¹⁵⁾を行い、接触円半径について検討した。有限要素解析の結果、リングクラックが発生する程度の荷重における接触円半径は a_H より約18%大きいことがわかった。前述のように Si_2O_3 薄膜の r_f は a_H より10~18%大きいので、その場合のリングクラックはほぼ接触円境界で発生することになる。

前述のように、リングクラック発生荷重では、本試験片の基板には圧痕を生じている。しかし、4・4節で述べるように本試験片における塑性変形の影響は比較的小さいと考えられるので、本試験片の r_f と a_H の関係はパルク材と同様に破壊力学に基づいて説明できる可能性が大きい。

4・3 微小破壊強度

Fig. 6 は膜厚が $4\mu\text{m}$ の試験片 (4T-6Co) を用いて得られた微小破壊強度 $\sigma_{r,c}^f$ のワイブルプロットの結果であ

Fig. 6. Weibull plots of the ring crack initiation strength (4T-6Co).

Fig. 7. Weibull plots of the ring crack initiation strength (TiN, $t=2\mu\text{m}$).

Fig. 8. Weibull plots of the ring crack initiation strength ($\phi=19\text{mm}$).

Fig. 9. Relation between the ring crack initiation strength and the indenter size.

る。累積確率 F はメジアンランク法より求めた。この結果より $\sigma_{r,c}^f$ は各球圧子径ともほぼ2母数ワイブル分布に従っていることがわかる。各球圧子径に対する形状母数、尺度母数は、 $\phi 16\text{mm}$ 球: 46.8, 1002MPa, $\phi 19\text{mm}$ 球: 62.9, 915MPa, $\phi 25\text{mm}$ 球: 55.2, 849MPaである。すなわち、 $\sigma_{r,c}^f$ は球圧子径が小さいほど大きくなる球圧子径依存性を示すことがわかる。この結果は他の試験片の場合も同様であった。

Fig. 7は前報⁸⁾で示したTiN薄膜の $\sigma_{r,c}^f$ のワイブルプロットの結果である。球圧子押し込み試験は $\phi 2.4, 4.0, 7.9, 11.9\text{mm}$ の球圧子を用いて行った。すなわち、TiN薄膜の場合は Al_2O_3 薄膜の場合より小さい球径でリングクラックが発生することがわかる。図より $\sigma_{r,c}^f$ は Al_2O_3 薄膜と同様の球圧子径依存性を示していることがわかる。なお球圧子径依存性は Si_3N_4 パルク材¹⁰⁾の場合も同様である。

Fig. 8は膜厚が異なる試験片を用いた、 $\phi 19\text{mm}$ 球圧子押し込み試験よりえられた $\sigma_{r,c}^f$ のワイブルプロットの結果である。図中の○は膜厚が $2\mu\text{m}$ で硬さが小さい基板試験片 (2T-16Co) の結果であるが、他と比べて有効データが少なかった。この結果より各膜厚に対する形状母数、尺度母数を求めると、 $2\mu\text{m}$: 79.5, 862MPa, $4\mu\text{m}$: 62.9, 915MPa, $6\mu\text{m}$: 58.5, 962MPa, 2T-16Co: 48.7, 790MPaである。すなわち、 $\sigma_{r,c}^f$ は膜厚の増加に伴って

大きく、また基板の硬さが小さいほうが大きいことがわかる。

Fig. 9 に、 σ_{rc}^f の形状母数と尺度母数より求めた平均値と球圧子径の関係を示す。図より、 σ_{rc}^f は膜厚、基板の硬さによらず同様の球圧子径依存性を示すこと、膜厚が厚くなるほど大きく、また基板の硬さが小さい方が大きいことがわかる。

4・4 破壊強度の推定

σ_{rc}^f の球圧子径依存性は、定性的にはぜい性材料の寸法効果として説明できる可能性がある。すなわち球圧子径によって破壊を生じる可能性のある領域の大きさが異なる。また、リングクラックの発生を引き起こす半径方向の応力 σ_r^f は式 (1) に示したように、不均一分布している。そこで本研究では、 σ_{rc}^f の分布特性（形状母数、尺度母数）および Table IV で示した残留応力を使って、有効面積の概念¹⁰⁾に基づいて、一様応力状態における薄膜の破壊強度の平均値を推定し、バルク材の曲げ強度との比較を行った。有効面積の概念を用いたのは、リングクラックは表面欠陥を起点して発生すると考えられるからである。その場合の基準面積は標準曲げ試験片において引張応力が作用する面積 ($4 \times 30 = 120 \text{ mm}^2$) とした。

Fig. 10 (a), (b) に推定値と球圧子径の関係を示す。(a) は残留応力を考慮した場合、(b) は残留応力を考慮しない場合である。図中の斜線領域は Al_2O_3 バルク材の曲げ強度の文献値¹⁷⁾である。したがって、以下で述べる

(a) In the case of considering residual stress

(b) In the case of neglecting residual stress

Fig. 10. Relation between the fracture strength of the thin film and the indenter size.

Fig. 11. Relation between the fracture strength of the thin film and the indenter size (TiN).

Fig. 12. Relation between the indentation depth and the indenter size.

薄膜の破壊強度との比較は文献の材料の場合に限る。図 (a) より、残留応力を考慮した推定値は球径が小さくなると大きくなる傾向を示し、球径に対して一定とはいえないが、Fig. 9 で示した微小破壊強度 σ_{rc}^f よりは球圧子径に対する変化が小さくなっており、膜厚、基板の硬さの違いによる差も小さいといえる。また、図 (a), (b) より残留応力を考慮した方が膜厚および基板の硬さの違いによる差は若干小さいといえる。さらに、推定値はバルク材の強度¹⁷⁾より大きくなっており、残留応力を考慮した方が近い値を示している。

Fig. 11 に前報⁸⁾で得られた TiN 薄膜についての同様の結果を示す。前報では薄膜の残留応力は測定しなかったため、本研究で X 線応力測定を行った。その結果 550 MPa 程度の圧縮の残留応力が生じていることがわかったので、その値と Fig. 7 で示した σ_{rc}^f の分布特性を使って、有効面積の概念に基づいて破壊強度を推定した。図より TiN 薄膜の場合も破壊強度と球圧子径の関係は、 Al_2O_3 薄膜と同様の傾向を示し、バルク材の曲げ強度¹⁷⁾より大きいことがわかる。

4・2 節で述べたように、いずれの試験片もリングクラック発生荷重における基板には圧痕を生じているので、塑性変形の影響が考えられる。そこで本研究では塑性変形の程度を検討するために圧痕深さの測定を行った。Fig. 12 に、基板の硬さが異なる膜厚 $2 \mu\text{m}$ の試験片 (2T-

6Co, 2T-16Co) について得られた, リングクラック発生荷重に対するヘルツ理論の弾性押込み変位 Δ_H と圧痕深さの測定値 Δ の比 Δ/Δ_H と球圧子径の関係を示す. 図より, 弾性変形に対する塑性変形の比率は数%と小さいが, 塑性変形の程度は硬い基板の方が小さく, 球圧子径が小さい方が大きい傾向を示すことがわかった. すなわち, 基板の硬さが小さく, 球圧子径が小さい方が塑性変形の影響が大きいことが予想される. 弾塑性変形状態における σ_r^f は弾性変形の場合より低下することが予想される. したがって, 弾塑性解析より得られる σ_r^f をパラメータとすれば, 破壊強度の球圧子径に対する傾向は変化し, 球圧子径依存性は小さくなることが予想される. これを確認するためには, 今後弾塑性有限要素解析などによる検討が必要である.

5 結 言

ぜい性薄膜・基板接合体における薄膜の破壊強度評価法の確立をめざした研究の一環として, 膜厚, 基板の成分を変えた Al_2O_3 薄膜・WC-Co基板接合体を試験片とした球圧子押込み試験, およびX線回折法による薄膜の残留応力測定を行って, 薄膜の破壊強度について検討した結果以下のことがわかった.

(1) X線応力測定より求めた薄膜の残留応力は圧縮となっており, その値は膜厚が厚い方が大きく, 硬い基板の方が小さい.

(2) 薄膜に発生したリングクラックの半径は球圧子径, 膜厚, 基板の硬さによらず接触円半径より10~24%大きい.

(3) 接触円境界における薄膜の半径方向応力をパラメータとして, リングクラック発生荷重に対して求めた微小破壊強度はほぼ2母数ワイブル分布に従い, 球圧子径依存性を示す. この結果は筆者らが行ったTiN薄膜の研究結果および Si_3N_4 バルク材の研究結果と一致した.

(4) 微小破壊強度の平均値は膜厚が厚い方が大きく, 硬い基板の方が小さい.

(5) 微小破壊強度の分布特性(形状母数, 尺度母数)と残留応力を使って有効面積の概念に基づいて推定した一様応力状態の破壊強度の平均値は, 微小破壊強度の場合と比べて膜厚や基板の硬さの影響が小さい. しかし推定した破壊強度は球圧子径に対して一定とはならず, 膜厚, 基板の硬さによらず, 球圧子径が小さい場合は若干大きくなる傾向を示す. これはTiN薄膜の結果と一致する.

本研究は平成7年度文部省科学研究費補助金(一般研究(B), 代表市川昌弘)の助成を受けたことを記し, 謝意を表す. また試験片の作成にあたって, 東芝タンガロイ(株)から多大のご便宜をはかっていたいただいた. ここに謝意を表す.

参 考 文 献

- 1) K. Yoshii, H. Takagi, M. Ueno and H. Kawabe, Metall. Trans. A, **15**, 1273 (1984).
- 2) K. E. Petersen and C. R. Guarnieri, J. Appl. Phys., **50**, 6761 (1979).
- 3) S. Johansson, J. Schweitz, L. Tenerz and J. Tiren, J. Appl. Phys., **63**, 4799 (1988).
- 4) T. P. Weihs, S. Hong, J. C. Bravman and W. D. Nix, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 130, 87 (1989).
- 5) C. T. Rosenmayer, F. R. Brotzen and J. Gale, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 130, 77 (1989).
- 6) 城野政弘, 菅田 淳, 竹中久善, 材料, **38**, 644 (1989).
- 7) 香川博之, 市川昌弘, 高松 徹, 桑野博喜, 日本機械学会論文集, A-60, 396 (1994).
- 8) 市川昌弘, 高松 徹, 松村 隆, 柿沼智之, 河崎達也, 日本機械学会73期通常総会講演会論文集Ⅱ, 318 (1996).
- 9) 市川昌弘, 高松 徹, 松村 隆, 柿沼智之, 桑野博喜, 日本機械学会平成7年度材料力学部門講演会講演論文集, B, 473 (1995).
- 10) 市川昌弘, 大串浩司, 高松 徹, 日本機械学会論文集, A-60, 1538 (1994).
- 11) 浅見克敏, 佐藤仁志, 日本機化学会第10回新材料部品開発への信頼性工学の適用に関する調査研究分科会 (1994).
- 12) 香川博之, 市川昌弘, 高松 徹, 桑野博喜, 日本機械学会論文集, A-60, 416 (1994).
- 13) 香川博之, 市川昌弘, 高松 徹, 桑野博喜, 日本機械学会論文集, A-58, 223 (1992).
- 14) 大串浩司, 市川昌弘, 日本機械学会論文集, A-61, 935 (1995).
- 15) 香川博之, 市川昌弘, 高松 徹, 桑野博喜, 日本機械学会論文集, A-60, 409 (1994).
- 16) 市川昌弘, “構造信頼性工学”(1988) 海文堂.
- 17) 日本セラミックス協会編, “セラミックス工学ハンドブック”(1989) 技報堂.