マイクロ構造用材料の機械特性（メカニカルプロパティ） マイクロマシン材料の機械的特性評価

特集解説

正員 佐藤 一雄

吉岡 テツヲ

名古屋大学

キーワード

マイクロマシン，薄膜，機械的特性，試験法

1. はじめに

マイクロマシン(MEMS)デバイスの設計・製作・評価には、従来のマクロな機械のそれとは全く異なる技術的アプローチが必要とされるため、これにともなって解決すべき多くの課題がある。その一つが、マイクロマシン材料の機械的特性に関する知識である。

シリコンやその化合物を応用したマイクロマシンデバイスには、これまで機械的な用途に使われたことのない薄膜材料が構造材料として使用される。薄膜材料の機械的な性質は、バルク材のそれとは異なり、成膜条件に依存して大きく変化する。また、膜厚が非常に薄くなった場合に、結晶粒界の効果、表面の効果が現れるといわれている。薄膜材料の性質の評価はその製造条件を特定した上で、実際に使われる寸法で行う必要がある。そのため、デバイス製作者は自らが使用する材料の機械的特性を自らの手で評価しなければならないのが現状である。しかしながら、薄膜材料を対象とした機械的特性の測定・評価技術は確立されておらず、これがマイクロマシン開発の隘路になっている。

本稿では、薄膜材料を対象とする機械的特性の評価技術をサーベイした結果を述べて従来技術の問題を明らかにし、次いで最近のマイクロマシニング技術を応用した薄膜材料の機械的特性評価の研究を紹介する。最後に、マイクロマシン分野の研究と産業の基盤づくりのために、この種の研究が重要であることを論じる。

2. 薄膜を対象とする機械的特性評価技術

日本機械学会の機械力学計測制御部門に設置されたマイクロ材料・デバイス・計測評価技術研究会(主査：梅田章，計量研究所)では、マイクロデバイスの評価と並行して、材料特性評価技術について調査研究を進めてきた。この活動の中で筆者が中心となって微小領域での機械特性評価技術を調査した。本稿はその調査結果の一部を引用し、さらに最近の学会・学術雑誌の情報を加えて、薄膜の機械的特性試験法を解説する。

Mechanical Properties of Microfabricated Structure Materials.
Characterization of Mechanical Properties of MEMS Materials.

By Kazuo Sato, Member, and Tetsuo Yoshioka, Student Member
(Nagoya University).

微小な材料を対象とする機械的特性試験法を表1にまとめて示した。材料の降伏、破壊等の問題を扱うには引張試験が最も直接的である。しかし、表中にコメントしたように、対象材料が小さくなるにしたがって、引張試験の実施が困難になる。すなわち、(1)ゲージ長が短く伸びひずみの検出が困難、(2)微小な試験片を試験機にアライメントするのが困難、(3)試験機に接着するまでの取扱いで試験片にダメージが加わる、(4)接着の信頼性が不安、等の問題があった。微小材料に対する引張試験の実施がこのように難しいことから、これに代わる以下の様々な方法が考案されてきた。

曲げ試験は、3点曲げと片持ち梁の曲げに分類される。引張試験に比べて試験片のつかみの問題が少ないのが特長である。ウィスカーのように単体で取り扱える微小材料に対しては3点曲げの適用が便利である。一方、基板上に形成した薄膜では、エッチングで片持ち梁とする方が扱いやすい。しかし、片持ち梁の固定端の境界条件の正確な評価は困難であり、さらに、大きくたわむ薄膜の曲率の評価には単純な材料力学計算が使えないという問題がある。

薄膜の梁を異なる周波数で加振して振幅が最大の条件から共振周波数を特定し、この値と梁の寸法とからヤング率を求める方法がある⁽²¹⁾。上記の曲げ試験と同様に、片持ち梁の固定端の境界条件にモデル化を要するのが問題である。

硬さ測定に用いられるようなダイヤモンド圧子の押し込み試験は、最近、極微小押し込み試験機が開発されたことから、薄膜の性質の評価に使えるようになってきた^{(27)・(29)}。降伏応力の大小を比較することはできるが、降伏応力の定量化にはモデル化を必要とする。また、圧子の先端の摩耗に起因する測定の再現性の問題がある。

薄膜を基板から分離したときに生じる座屈を利用して、内部応力を推定する方法がある。薄膜をエッチングして異なる長さの梁を作り、その下部の犠牲層をエッチングして両持ち梁とすると、膜に圧縮の内部応力がある場合、特定の寸法の梁で座屈が発生するので、座屈発生の臨界条件式から内部応力を計算で推定できる⁽³²⁾。これに類似した方法で、梁の座屈プロファイルを測って薄膜の長さの変化から内部応力を計算する方法、薄膜の梁に静電力で座屈を誘起し

表1 微小領域での機械的特性の測定方法

方 法		測定対象	材 料	長 所	短 所, 問 題 点	関連論文番号
単軸引張り試験		応力-ひずみ関係 降伏・破壊応力	バルク材 薄膜	・最も直接的な応力測定方法	・両端のつかみ方が難しい ・微小な試験片の断面寸法の測定 ・試験片の加工プロセス	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
曲げ試験 (3点曲げ, 片持ち梁の曲げ)		ヤング率 降伏応力	梁材 (金属, セラミクス, シリコン他)	・試験片は容易に手に入る ・材料を選ばない ・測定系が比較的簡単	・試験片の断面形状精度の評価 ・大たわみを示す材料では曲率の測定に難 ・片持ち梁の端部固定条件のモデル化が難しい	1, 3, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19
梁の固有振動数の測定		ヤング率 内部応力	梁材 薄膜	・試験部に機械的に触れない ・測定系, 測定原理とも容易	・片持ち梁の端部固定条件のモデル化が難しい ・試験片の加工プロセスと加工精度 ・真空雰囲気中で実験する必要がある	4, 20, 21, 22, 23
圧子の押し込み		硬さ ヤング率 破壊じん性	バルク材 薄膜	・試験片は容易に手に入る ・高温環境でも測定可能 (極微小イン デントは高温には適用できない) ・材料を選ばない ・原理が簡単	・破壊の判定が微妙 ・降伏応力の特定に難 ・硬さ以外の特性値の定量性が不明 ・インデント先端の摩耗に起因する再現性	1, 2, 24, 25, 26, 27, 28, 29
座屈	プロファイルの測定	内部応力	薄膜	・測定系が簡単	・圧縮応力のみが対象 ・薄膜の変位の測定精度に疑問	30
	寸法の異なる部材配列で 座屈発生限界を観察	内部応力	薄膜	・測定系が簡単	・圧縮応力のみが対象	31, 32
	静電力による梁の不安定 誘起	内部応力 ヤング率	薄膜	・応力状態が圧縮・引張りとも可能	・検出の精度が低い	33, 34
基板と分離後の膜の伸縮		内部応力	薄膜	・応力状態が圧縮・引張りとも可能	・長さの変化は一般にごく小さくて測定困難	35, 36, 37
基板のそり, たわみを測定		内部応力	薄膜	・膜を付けたまま測れる ・測定系が簡単		2, 4, 31, 38, 39
膜のバルジ試験		内部応力 ヤング率 基板との付着力 ⁽¹⁾	薄膜	・膜に機械的に触れない	・膜の中央は2軸引張り状態 ・破壊応力がわからない (膜の周辺部で破断) ・試験片の加工プロセス	40, 41, 42, 43, 44, 1
X線・電子線回折		内部応力	結晶 (特に単結晶)	・サンプル形状を問わない ・試験片に機械的に触れない ・深さ方向に応力がはかれる	・多結晶体では回折線が拡がり, 応力の効果と の区別が困難 ・平面内の分解能はない	2, 39, 45
粘着テープ試験		基板との付着力	薄膜	・測定系が簡単	・定量性	2
スクラッチ試験		基板との付着力	薄膜	・やや定量的に付着力がわかる		26, 46, 47, 48, 49
ロッドで引きはがし (引張り, 引き出し, ねじり)		基板との付着力	薄膜	・測定系が簡単	・定量性	47, 50
超音波法		基板との付着力	薄膜	・試験片に機械的に触れない	・延性破壊する材料にのみ適用可能	2, 51
摩擦・摩耗試験		摩擦・摩耗特性	バルク・薄膜	・材料を選ばない	・固有の試験条件で通用, 一般化が困難	26, 46

て内部応力とヤング率を計算する方法などがあるが、何れも実施上の測定誤差が大きいようである。

薄膜を基板から分離して、長さの変化から内部応力を計算する方法も、上記の座屈プロファイルを利用する方法と同じく、よほど内部応力が大きい場合ヤング率が小さい場合を除き、精密な測定は難しい⁽³⁵⁾⁻⁽³⁷⁾。

薄膜を形成した基板のそりから、薄膜の内部応力を推定することは、LSIの製造技術分野で広く行われている。基板形状を円形でなく短冊状とすれば、簡単な解析解をつかって、その大きさから内部応力を計算できる。

薄膜の両面に圧力差を与えたときの薄膜の膨出量(バルジ高さ)と圧力との関係からヤング率と内部応力を算出できる。薄膜からなる隔壁構造は、例えば薄膜を形成した基板を裏側から結晶異方性エッチングで除去することにより作ることができる。隔壁の輪郭を変えることによって、さらにポアソン比も測定した例がある⁽⁴⁴⁾。この方法の唯一の

欠点は、最大応力がメンブレン周囲の応力集中点に存在するので、降伏応力あるいは破壊応力が正確には求められないことである。

結晶材料の薄膜を対象として、X線や電子線の回折を利用して膜の内部応力を測定する方法がある。試験片に直接触れることなく測定できる、また、ビームを収束させることによって、極めて限られた領域の内部応力を測ることができるという長所があるが、その一方で、マクロ的な膜の性質の評価には不向きである。

薄膜と基板との付着力の評価は、特にバルク材料の表面に耐摩耗性・高硬度の薄膜を形成して使うという用途で重要である。付着力の評価には、バルジ試験の他、粘着テープで薄膜を基板から引き剥がす方法、針でスクラッチする方法、ロッドを膜面に接着した後、ロッドに力を加えて膜を引き剥がす方法、超音波で膜の界面を分離する方法、等があるが、評価法が違えば異なる結果が得られる訳であ

り、一般性を持った材料評価技術には至っていない。これと同様に膜の摩擦摩耗試験も、様々な方法が提案され使われているが、一般性を持った物性値を提供する評価技術には至っていない。

以上に述べたように、一口に薄膜の特性評価と言っても膜の用途・目的によって様々な評価方法がある。マイクロマシンデバイスを構成する材料の強度を評価する目的では、薄膜試験片に均一な応力場を加えて、ヤング率、降伏応力、破断ひずみ等を最も直接的に評価できる点で、引張試験に期待するところが大きい。ここ2～3年の間に開催された国内外の学会では、マイクロマシニング技術の援用によって、微小材料を対象とする引張り試験に関する研究が盛んに報告されるようになってきた。それらの事例を次章に紹介する。

3. 引張試験に関する最近の研究

リソグラフィ技術を応用したマイクロマシニング技術は、(1)十分に微細な試験材料を製作する手段として、また、(2)均一な寸法の試験片を一括して大量に製作する手段として、有効である。マイクロマシニング技術の特長を生かした最近の引張り試験に関する研究を以下に紹介する。

(a) 引張試験片の製作

薄膜の引張試験片は一般にエッチング加工で形成される。試験片を試験機に取り付けるまでに機械的ダメージを与えないために、試験片をエッチング加工するさいに試験片両端を含む周囲のシリコン基板を残して加工し、試験機に試験片を接着固定した後、試験片の両端を保持していたシリコン基板を破壊してから引張試験を開始する。エピタキシャル成長した単結晶シリコン膜⁽⁸⁾、CVDによる多結晶シリコン薄膜⁽⁹⁾、スパッタ蒸着した金属薄膜⁽¹⁰⁾などの引張試験に適用されている。

(b) 試験機の改良

小川ら⁽¹¹⁾は引張試験機のクロスヘッドの並進性を高めるために、クロスヘッドに相当する部分にT字型ばね機構を導入した。また、微小な伸び変位を測定するため、試験片表面に形成した標点の動きを顕微鏡で追跡する方式を採用した。一方、Sharpeら⁽¹²⁾は伸び変位を測定する目的で、試験片表面に形成した金属標点にレーザ光を照射し、反射光の干渉を応用して測定している。

Greekら⁽¹³⁾はシリコン基板上に形成した多結晶シリコン薄膜の引張試験を行うにあたり、表面マイクロマシニングをつかって、試験片の一端を基板に固定、試験片中央部ならびに他端を基板表面から分離して形成した。引張機構はSEM内部で操作されるが、試験片の一端に形成された孔にロッドを引っかけて引張る方式に多少の問題がある。これに対し、土屋ら⁽¹⁴⁾は、同様に表面マイクロマシニングをつかって形成した引張試験片で基板から浮上した側の端部を静電的に吸引固定する引張機構を開発した。SEM中での駆

動とはいえ、シリコン基板上に大量に並べて形成された試験片を次々に引張る事ができる。

(c) 引張試験片と負荷機構の一体集積化

筆者ら⁽¹¹⁾は、薄膜試験片をシリコンウェハの表面に形成したまま引張試験を実施する方法を提案し、これを「オンチップ引張試験」と名付けた。このマイクロデバイスには、試験片薄膜とともに単軸引張を薄膜に加える負荷機構が集積化されており、薄膜を基板から分離することなく引張試験が実施される。通常の単軸引張試験のみならず、疲労試験にも適用が可能である。これまでにデバイスの設計と加工プロセスの開発を行い、シリコン単結晶薄膜の異なる結晶方位に関して引張試験を実施した⁽¹²⁾。今後、多結晶シリコン、シリコン酸化膜・窒化膜などの機械的特性を測定し、その製造プロセス依存性、寸法効果等を順次明らかにしていく計画である。

(d) その他

表面マイクロマシニング技術を使って、多結晶シリコンの薄膜構造の一部に静電アクチュエータを形成し、これを平面内で振動させて薄膜の切り欠き部分を疲労破壊させる研究⁽¹⁵⁾、また結晶異方性エッチングで形成した単結晶シリコンの梁に、ピエゾ抵抗素子でひずみゲージを形成し、梁を一定応力(ひずみ)振幅のもとで共振させて疲労強度を評価する研究⁽¹⁶⁾、などが発表されている。静的な特性評価に加えて動的な領域の測定・評価が始まったところである。

4. まとめと今後の課題

微小材料を対象とする機械的特性の評価技術をサーベイした結果を述べて従来技術の問題を明らかにし、これに対して、最近盛んになってきたマイクロマシニング技術を応用した材料の機械的特性評価の研究を紹介した。マイクロマシンの研究基盤ならびに産業基盤を確立するには、このような材料特性評価に関する研究活動が質・量ともに充実して集大成されなければならない。それには、以下に述べる階層的な課題解決が必要と考える。

(1) 薄膜材料の機械的性質を実験的に評価するための手法の確立

現状ではデバイスの研究開発が材料特性評価技術よりもはるかに先行しているが、マイクロマシンの機能、信頼性、市場性を論じるには、まず材料評価手法の確立が緊急の課題である。

(2) 薄膜材料の機械的性質に関する知見のデータベース化

データベースは、各種CADによる設計支援システムの利用と相まって、マイクロマシンデバイスの産業基盤を確立するのに寄与すると考える。デバイスシミュレータ、プロセスシミュレータの試作・製品化例が最近相次いで発表されているが、これらを使って有効な情報を得るには、材料特性に関するデータベースがその背後に存在することが前提条件になる。

(3) マイクロ理工学の確立

材料の機械的特性の寸法効果は、従来、理論的に予測・指摘されてきたが、果たしてマイクロマシン材料は、その寸法の微細化によって、強化されるのかという命題にはまだ十分な回答が得られていない。マイクロ理工学がこのような面から確立される必要がある。

(4) 材料特性の評価法の標準化

この問題はわが国の技術戦略との関わりにおいて重要であり、この点で特に国立研究機関の果たす役割は大きい。

以上の諸課題を見渡すと、研究者が個別に解決できる課題に加えて、大学、産業界、国家機関が連携し協力すべき課題が多いことに気づく。この分野の研究には今後、産官学の連携が特に重要と考える。(平成10年8月31日受付)

文 献

- (1) J.-Å. Schweitz: Mechanical characterization of thin films by micromechanical techniques, MRS bulletin (1992-7) 34-45.
- (2) L. Eckertova 著, 井上泰宣ほか訳: 薄膜物性入門, 内田老鶴圃 (1994).
- (3) 五十嵐伊勢美: Ge の piezo 抵抗効果及びその歪計への応用 (I), 応用物理, 29-2 (1960) 73-78.
- (4) X. Ding, W. H. Ko and J. M. Mansour: Residual Stress and Mechanical Properties of Boron-doped p+-Silicon Films, Sensors and Actuators A21-A23 (1990) 866-871.
- (5) D. T. Read and J. W. Dally: Fatigue of Microlithographically-Patterned Free-Standing Aluminum Thin Film Under Axial Stresses, Trans. ASME, J. of Electronic Packaging, 117-1 (1995) 1-5.
- (6) S. Greek, F. Ericson, S. Johansson and J.-Å. Schweitz: In-situ Tensile Strength Measurement of Thick-Film and Thin-Film Micromachined Structures, Tech. Digests of Transducers'95 (1995. 6 Stockholm) 56-59.
- (7) S. J. Cunningham, W. Suwito and D. T. Read: Tensile Testing of Epitaxial Silicon Films, *ibid.*, 96-99.
- (8) W. N. Sharpe Jr., B. Yuan, R. Vaidyanathan, and R. L. Edwards: New Test Structures and Techniques for Measurement of Mechanical Properties of MEMS Materials, Proc. of the SPIE Symposium on Microlithography and Metrology in Micromachining II (14-15 Oct. 1996, Austin), 78-91.
- (9) H. Ogawa, K. Suzuki, S. Kaneko, Y. Nakano, Y. Ishikawa, and T. Kitahara: Proc. of IEEE MEMS'97 (26-30 Jan. 1997, Nagoya), 430-435.
- (10) T. Tsuchiya, O. Tabata, J. Sakata, and Y. Taga, *ibid.*, 529-534.
- (11) K. Sato, M. Shikida, M. Yamasaki, and T. Yoshioka: Micro tensile-test system fabricated on a single crystal silicon chip, Proc. of IEEE MEMS'96 (11-15 Jan. 1996, San Diego), 360-364.
- (12) K. Sato, Y. Yoshioka, T. Ando, M. Shikida, and T. Kawabata: Tensile-testing of silicon films having different crystallographic orientations carried out on a silicon chip, Sensors and Actuators A: Physical, 70/1-2 (1998), 148-152.
- (13) 中野禪, 山中一司, 甲田壽男: 微小三点曲げ試験によるヤング率測定, 日本機械学会第70期全国大会講演論文集 Vol. B (1992), 519-521.
- (14) K. Teraoka, A. Ito, T. Tateishi, S. Tsutsumi: Mechanical Properties of Synthetic Hydroxyapatite Single Crystals, Proc. of Int. Symp. on Environmental Issues of Ceramics (1994. 10 Sapporo).
- (15) 駒井謙治郎, 箕島弘二, 俵秀男, 井上茂道, 砂子勝好: 微小材料機械的特性評価試験機の試作とシリコン単結晶微小素子の破壊特性評価, 日本機械学会論文集(A編)60-569 1994-1 52-58.
- (16) S. Johansson, J.-Å. Schweitz, L. Tenerz, and J. Tiren: Fracture testing of silicon microelements in situ in a scanning electron microscope, J. Appl. Phys. 63-10 (1988) 4799-4803.
- (17) S. Johansson, F. Ericson, and J.-Å. Schweitz: Influence of surface coating on elasticity, residual stresses, and fracture properties of silicon microelement, J. Appl. Phys. 65-1 (1989) 122-128.
- (18) S. B. Braun, W. Van Arsdel, and C. L. Muhlstein: Materials reliability in MEMS devices, Tech. Dig. of Transducers'97 (16-19 June 1997, Chicago) Vol. 1, 591-593.
- (19) T. Tsuchiya, A. Inoue, J. Sakata, M. Hashimoto, A. Yokoyama, and M. Sugimoto: Fatigue test of single crystal silicon resonator, Tech. Dig. of 16th Sensor Symp. (2-3 June 1998, Kawasaki) 277-280.
- (20) B. S. Berry and W. G.: Internal stress and internal friction in thin layer microelectronic materials, J. Appl. Phys. 67 (8), (April 1990) 3661-3668.
- (21) K. E. Petersen and C. R. Guarnieri: Young's modulus measurements of thin films using micromechanics, J. Appl. Phys. 50 (11), (November 1979) 6761-6766.
- (22) B. Hok and K. Gustafsson: Vibration analysis of micromechanical elements, Sensors and Actuators, 8 (1985) 235-243.
- (23) J. Lagowski, H. C. Gatos, and E. S. Sproles Jr.: Surface stress and the normal mode of vibration of thin crystals: GaAs, Appl. Phys. Lett. 26-9 (1975) 493-495.
- (24) 林國郎, 辻本真司, 岡本泰則, 西川友三: 単結晶 Si の高温破壊じん性, 材料, 41-463 (1992) 488-494.
- (25) 林國郎, 辻本真司, 岡本泰則, 西川友三: 単結晶 Si の破壊じん性, 材料, 40-451 (1991) 405-410.
- (26) 榎本祐嗣, 三宅正二郎: 薄膜トライボロジー, 東京大学出版会 (1994).
- (27) H. Bangert, A. Wagendistel and H. Aschinger: Ultramicrohardness Investigations of Single Crystals in A Scanning Electron Microscope and X-Ray Topography of The deformation Zone, Thin Solid Films, 89 (1982) 131.
- (28) W. C. Oliver: Progress in the Development of a Mechanical Properties Microprobe, MRS Bulletin, (Sept./Oct. 1986) 15-19.
- (29) Y. Tukamoto, H. Yamaguchi and M. Yanagisawa: Mechanical Properties of Thin Films: Measurements of Ultramicroindentation Hardness, Young's Modulus and Internal Stress, Thin Solid Films, 154 (1987) 171-191.
- (30) S. C. H. Lin and I. Pugaesz-Muraszkiewicz: Local Stress Measurement in Thin Thermal SiO₂ Films on Si Substrates, J. Appl. Phys., 43-1 (January 1972) 120-125.
- (31) X. Ding, Wen H. Ko, Yinli Niu, Weihua He: A Study on Silicon-Diaphragm Buckling, Tech. Dig. of IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop (Hilton Head Island, SC, USA, 1990) 128-131.
- (32) H. Guckel, T. Randazzo, and D. W. Burns: A simple technique for the determination of mechanical strain in thin films with applications to polysilicon, J. Appl. Phys. 57 (5), (1985) 1671-1675.
- (33) K. Najafi, and K. Suzuki: A novel technique and structure for the measurement of intrinsic stress and young's modulus of

- thin films, Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems workshop (1989) 96-97.
- (34) K. Najafi and K. Suzuki: Measurement of fracture stress, Young's modulus, and intrinsic stress on heavily boron-doped silicon microstructures, Thin Solid Films 181 (1989) 251-258.
 - (35) M. G. Allen, M. Mehregany, R. T. Howe, and S. D. Senturia: Microfabricated structures for the in situ measurement of residual stress, Young's modulus, and ultimate strain of thin films, Appl. Phys. Lett. 51-427 (July 1987) 241-243.
 - (36) M. Mehregany, R. T. Howe, and S. D. Senturia: Novel microstructures for the in situ measurement of mechanical properties of thin films, J. Appl. Phys. 62 (9) (November 1987) 3579-3584.
 - (37) R. T. Howe and R. S. Muller: Stress in polycrystalline and amorphous silicon thin films, J. Appl. Phys. 54 (8) (1983), 4674-4675.
 - (38) J. A. Thornton, J. Tabock, and D. W. Hoffman: Internal stresses in metallic films deposited by cylindrical magnetron sputtering, Thin Solid Films, 64 (1979) 111-119.
 - (39) G. A. Rozgonyi and T. J. Ciesielka: X-Ray Determination of Stresses in Thin Films and Substrates by Automatic Bragg Angle Control, The Review Of Scientific Instruments, 44-8 (1973) 1053-1057.
 - (40) 杉山進, 田畑修: マイクロメカニズムに用いる薄膜の機械的物性評価, 計測と制御, 28-6 (1989) 485-488.
 - (41) 田畑修, 杉山進, 瀧川光治, 五十嵐伊勢美: イオン注入法による圧力センサ用窒化シリコン薄膜の機械的物性制御, 電気学会論文集 C, 110-C, No.4 (1990) 228-234.
 - (42) E. I. Bromley, J. N. Randall, D. C. Flanders, and R. W. Mountain: A technique for the determination of stress in thin films, J. Vac. Sci. Technol. B1 (4), Oct.-Dec. 1983, 1364-1366.
 - (43) O. Tabata, K. Kawahata, S. Sugiyama, and I. Igarashi: Mechanical Property Measurements of thin films using load-deflection of composite rectangular membrane, Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems workshop (1989) 152-156.
 - (44) O. Tabata and T. Tsuchiya: Poisson's Ratio Evaluation of LPCVD Silicon Nitride Film, 電気学会論文誌, 116-E (1996) 34-35.
 - (45) M. Murakami: Residual Strains of Pb Thin Films Deposited onto Si Substrates, Acta Metallurgica, 26 (1978) 175-183.
 - (46) C. A. Brookes, P. Green, P. H. Harrison and B. Moxley: Some observations on scratch and indentation hardness measurements, J. Phys. D: Appl. Phys., 5 (1972) 1284-1293.
 - (47) A. Kinbara, S. Baba and N. Matuda: Mechanical properties of metal and compound films, Thin Solid Films 141 (1986), 229-236.
 - (48) H. E. Hintermann: The solid films to combat friction, wear, and corrosion, J. Vac. Sci. Technol. B2 (4) (Oct.-Dec. 1984) 816-822.
 - (49) S. Baba, A. Kikuchi, and A. Kinbara: A microtribometer for measurement of friction and adhesion of coatings, J. Vac. Sci. Technol. A4 (6), Nov/Dec 1986, 3015-3018.
 - (50) A. Kikuchi, S. Baba, and A. Kinbara: Measurement of the adhesion of silver films to glass substrates, Thin Solid Films, 124 (1985) 343-349.
 - (51) S. I. Rokhlin and M. Rosen: An Ultrasonic Method for The Evaluation of Interface Elastic Properties, Thin Solid Films, 89 (1982) 143-148.

佐 藤 一 雄

(正員) 1948年1月10日生まれ。1970年横浜国立大学機械工学科卒業。同年(株)日立製作所入社。1994年同社退社。同年名古屋大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻教授となり、現在に至る。主として、シリコンのマイクロマシンとその応用の研究に従事。工学博士。日本機械学会, 精密工学会, IEEE, 日本塑性加工学会会員。

吉 岡 テツヲ

(学生員) 1971年11月10日生まれ。1995年名古屋大学機械工学科卒業。1997年同大学大学院修士課程修了。現在, 同大学大学院マイクロシステム工学専攻博士課程に在籍。主として, マイクロマシン材料の機械的特性評価の研究に従事。日本機械学会会員。