LIGA ニッケル薄膜の異方性を考慮した弾塑性特性評価*

石塚 丈 洋^{*1}, 八 戸 敦 司^{*2}, 神 長 桂 二^{*2}

Evaluation of Elastoplastic Properties of Anisotropic LIGA Nickel Films

Takehiro ISHIZUKA^{*3}, Atsushi HACHINOHE and Keiji KAMINAGA^{*3} 1st Research Center, Technical Research and Development Institute, Japan Defense Agency,
2-2-1 Nakameguro, Meguro-ku, Tokyo, 153-8630 Japan

Most current MEMS are using LIGA nickel films as their structural material. In order to design and produce MEMS devices accurately, it is very important to know the mechanical properties of LIGA films. However, the mechanical property evaluation for LIGA films is difficult, because LIGA films have anisotropic mechanical properties due to their microstructures and the specimens to be used in the mechanical property evaluation testing are too small to handle easily. Consequently, the evaluation methods for LIGA films have not been standardized. In this study, the Young's modulus and yield stress of LIGA nickel films are evaluated by a series of spherical indentation testing and elastoplastic analysis. Then, the effect of non-equilibrium microstructures of LIGA films on anisotropic mechanical properties is discussed.

Key Words: Anisotropy, Plasticity, Elasticity, LIGA, Nickel

1. 結 論

マイクロセンサやマイクロアクチュエータなどの異なる構成要素を集積化した微小な可動構造物である MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) は、情報通信、自動車、家電、医療機器など様々な分野で実用化を目指して研究が進められている。MEMS 構造材料の製造方法として半導体加工技術によるシリコンプロセス、放射光を用いた LIGA (Lithographic Galvanoforming Abformung) プロセスが用いられるが、微細な 3 次元構造加工時の加工精度や再現性の観点から LIGA プロセスが優れているとされる^{(1), (2)}。LIGA プロセスにより製造した MEMS 材料の材料特性は、バルク材のそれとはしばしば異なることが報告されている。このため、MEMS の設計においては、MEMS 材料の機械的特性を精度良く評価しておく必要がある。一般に、バルク材の材料特性は、JIS 等に定められた規格に基づき評価され、これが設計・製造

の基準となっている。一方、MEMS 材料の場合、①微小な試験片を取り扱うこと、②微小な荷重・変位を与えこれを精密に計測すること、③薄膜構造に起因して材料特性に異方性があること等の理由から、バルク材に比べてその材料特性を評価することは容易ではないが、近年、多くの研究者が、曲げ試験⁽³⁾、⁽⁴⁾、引張試験^{(5) ~ (9)}、押込み試験^{(10) ~ (13)}等により MEMS 材料の機械的特性を明らかにするための研究を行っている。

曲げ試験は、試験が比較的簡単である利点を有するが、結果の解釈が引張試験のように簡単でないことが欠点として挙げられる。また、引張試験は、ヤング率や強度を直接的に測定できる利点があるが、試験片の固定法が難しく、静電力により試験片を固定するなどの新しい固定法が検討されている。一方、押込み試験は、曲げ試験や引張試験に比べて、試験実施が容易であることに特徴があるが、機械的特性を直接求めることはできず、試験法の規格化はまだなされていない。

そこで本研究では、MEMS 材料の異方性を考慮した材料特性評価方法の確立を目的として、比較的容易に実施できる押込み試験とともに弾塑性解析を行うことにより、LIGA プロセスにより製造した Ni 薄膜のヤング率と降伏応力を評価した結果について報告する。

* 原稿受付 2005 年 1 月 19 日 改定原稿受付日 2005 年 7 月 4 日。

^{*1} 正員、防衛庁技術研究本部第 1 研究所 (〒153-8630 東京都目黒区中目黒 2-2-1)。

^{*2} 防衛庁技術研究本部第 1 研究所。
E-mail: ishi@jda-trdi.go.jp

2 方 法

2.1 LIGA プロセス 本研究の試験片作製に用いた LIGA プロセス⁽²⁾は、「X 線リソグラフィ」、 「電気メッキ」及び「モールドイング」からなる超微細加工技術のことで、1980 年代にドイツのカールスルーエ研究所にて開発された。LIGA プロセスの特徴として、アスペクト比の高い機械構造体を製作できること、高精度にマスクのパターンを転写可能でサブミクロン精度の機械構造体が製作できることなどがあげられる。

本プロセスの基本工程は以下のとおりである。PMMA (Polymethylmethacrylat) などの感光性樹脂 (フォトレジスト) を Si 基板上に形成する。これに製品形状を刻んだマスクを載せ、SR (Synchrotron Radiation) 光の X 線を照射しマスクの形状を感光性樹脂に転写する。これを現像し X 線を照射した部分の感光性樹脂を除去する。次に、電気メッキを行い感光性樹脂の隙間に金属を堆積させ、金属の構造体を形成する。続いて残りの感光性樹脂と Si 基板を除去すれば金属構造体が完成する。これを完成品として使用することもできるし、これからプラスチックの型枠を作り別の金属による電気メッキを行うこともできる。なお、LIGA プロセスに使用できるのは、電気メッキが可能なニッケル、ニッケル合金、銅、鉛など様々な金属があるが^{(2), (5), (10)}、本研究では特性が良く知られている純ニッケルを対象とした。

2.2 試験片 LIGA プロセスにより作製した試験片の形状と寸法を図 1 に示す。試験片は、組成を 100%Ni とし、厚さを 100 μ m とした。試験片の表面及び断面の組織写真を図 2(a)及び(b)に示す。図 2(b)の上下方向が試験片の板厚方向に一致する。また、試験片表面の X 線回折結果を、Ni 粉末の X 線回折データベース (JCPDS・ICDD) と比較して、図 2(c)に示す。まず、組織写真から、試験片は、板厚方向に成長した柱状組織を有し、それと垂直な表面では細い結晶粒が均一に分布していることがわかる。また、X 線回折結果から、Ni 粉末の標準データに比べて、試験片表面では、(200)面が強い強度で測定されている。このことから、本試験片の Ni 結晶の<001>方向は、基板に対して垂直方向に概ね一致していることがわかる。

図 3 に、Ni 薄膜の結晶構造モデルと、試験片の Si 基板に平行な面を「面内 (Inplane) : 1・2 面」、基板に垂直な面を「面外 (Outofplane) : 1・3 面」と定義した座標系を示す。図に示すように、LIGA プロセスによる Ni 薄膜は FCC 結晶構造を有し、基板と垂直

方向 (Ni 結晶の<001>方向と一致する) に結晶が成長した柱状組織となる。このため、面内 (Ni 結晶の{001}面と一致する) では等方性を示すが、面外では異方性を示すことが想定される。

なお、面内または面外押込み試験は、面内 (1・2 面) または面外 (1・3 面) に球圧子を面に垂直に押込んで実施するものである。また、引張試験では、試験片の厚さ方向を 3 方向に一致させ、荷重を 1・2 面に平行に負荷している。

Fig.1 Specimen configuration

Fig. 2 Optical micrographs of (a) the upper surface and (b) the cross-section and (c) X-ray diffraction result of the upper surface of specimen

Fig. 3 Microstructure of LIGA Ni films with a coordinate system

2.3 試験装置 超微小硬度計 (株式会社島津製作所: DUH-201S) を用いて押し込み試験と引張試験を行った。本硬度計は、ダイヤモンド製の圧子を超低荷重で試料表面に押し込み、得られた荷重-押し込み深さ曲線から試料の機械的特性 (ヤング率、硬さ、変形抵抗等) を評価する装置である。試験機の負荷能力は 0.1 ~ 1961mN, 押し込み深さの測定能力は 0 ~ 10 μ m, また測定精度は荷重 0.2 μ N, 押し込み深さ 0.001 μ m である。なお、本硬度計は極めて微小な荷重と変位を計測するため室内の埃や空気の流れが計測結果に大きな影響を及ぼす可能性がある。このため、硬度計はクリーンブース内に設置した。さらに、振動の影響を取り除くため硬度計は防振台上に設置した。

本研究では、押し込み試験及び引張試験を行うに当たり、専用の球圧子及び平滑圧子を作製した。球圧子は押し込み試験用で先端が半径 5.0 μ m の半球、平滑圧子は引張試験用で先端が直径 2.0mm の平面である。何れも圧子本体は SUS316 製で、圧子先端はダイヤモンド製である。

2.4 試験方法

2.4.1 押し込み試験 試製した Ni 薄膜試験片の面内及び面外に対してダイヤモンド球圧子による押し込み試験を行い、それぞれの押し込み荷重と押し込み深さの関係を求めた。試験は、荷重 50, 100, 150 及び 200mN までの負荷除荷を 4 回繰り返して行った。また、試験は荷重制御で行い、負荷除荷速度は 70.6mN/s の一定である。なお、各試験位置は先につけたくぼみの影響を受けないように 100 μ m 以上離れた。

押し込み荷重-押し込み深さ曲線の除荷部分からヤング率を評価する方法として Oliver-Pharr モデル^{(11), (12), (14)}がある。本モデルによるヤング率の評価方法を以下に述べる。図に示す押し込み荷重-押し込み深さ曲

線 (概念図) において、除荷曲線の勾配 (接触剛性) S は試料の複合ヤング率 E^* と圧子の接触投影面積 A を用いて次式で表される。

$$S = \frac{2}{\sqrt{\pi}} E^* \sqrt{A} \quad (1)$$

ここで E^* は、試料のヤング率 E_s とポアソン比 ν_s , ダイヤモンド圧子のヤング率 $E_i = 1140\text{GPa}$ とポアソン比 $\nu_i = 0.07$ を用いて次式で表される。

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_s^2)}{E_s} + \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} \quad (2)$$

また、 A は接触深さ h_A を用いて次式で表される⁽¹¹⁾。

$$A = \pi(2h_A R - h_A^2) \quad (3)$$

ここで、 R は球圧子の半径、 h_A は最大押し込み深さ h_{max} 及び h_s (除荷曲線の勾配 S と押し込み深さ軸との交点) を用いて、

$$h_A = h_{max} - \varepsilon(h_{max} - h_s) \quad (4)$$

と表すことができる。ここで、 ε は圧子形状に依存する定数で、球圧子では $\varepsilon = 0.75$ となる⁽¹¹⁾。上記の関係より試料のヤング率 E_s を求めるには、まず得られた押し込み荷重-押し込み深さ曲線から、 S , h_{max} 及び h_s を求める。 h_{max} と h_s を式(4)に代入して h_A を求め、これを式(3)に代入して A を求める。求めた A と S を式(1)に代入し E^* を求め、これを式(2)に代入すれば試料のヤング率 E_s を求めることができる。

Fig. 4 Schematic of load vs. penetration depth curve in indentation testing

なお、押込み試験で測定される押込み深さには、試料の変形量だけではなく試験機フレームの変形量もわずかながら含まれるので、押込み試験により求めたヤング率は、荷重の増加に伴い低下する傾向（荷重依存性）を示すのが一般的である。このため、押込み試験によりヤング率を精度よく評価するためには、荷重依存性の影響を排除することが重要である⁽¹²⁾。この荷重依存性の大小は、試験機フレームの剛性により決まり、試験機フレームの剛性は、荷重の増加量に対する試験機フレームの変形量の比の値として定義されるフレームコンプライアンス G を用いて表される。この G を試験データから補正することにより、ヤング率の測定データに含まれる荷重依存性を取り除くことができる。 G を評価するため、除荷曲線の傾き S の逆数すなわちコンプライアンス $C (= 1/S)$ と接触投影面積の平方根の逆数 $(= 1/\sqrt{A})$ をプロットする。このデータは、試験等において誤差がなければ式(1)を変形して得られる次式を満足し、原点を通る直線となる。

$$\frac{1}{S} = \frac{\sqrt{\pi}}{2E^* \sqrt{A}} \quad (5)$$

しかし補正前の測定データでは、フレームコンプライアンスの影響により原点を通らず縦軸と交差することになる。この交点の座標がフレームコンプライアンス G である。したがって、Oliver-Pharr モデルにおいて G を補正するためには、除荷曲線の傾き S を次式により再評価すればよい。

$$S = \frac{1}{C - C_f} \quad (6)$$

2.4.2 引張試験 専用の平滑圧子を用いてNi薄膜引張試験片の引張試験を行い、面内の降伏応力（図3に示すように、試験片の厚さ方向を3方向に一致させ、荷重を1・2面に平行に負荷したときの0.2%耐力）を評価した。試験は、負荷速度70.6mNsで試験片が破断するまで実施した。

引張試験の概要を図5に示す。試験片の下部は、ホルダ1により保持した。両者の接合部は、瞬間接着剤により固定した。試験片の上部は、ホルダ2により保持した。両者の図中Aで示す位置を一致させ、両者の接合部は、瞬間接着剤により固定した。荷重は、図中の矢印方向に、平滑圧子、プッシャ、ホルダ1、試験片の順に伝達される。

Fig. 5 Schematic drawing of tensile testing

3. 押込み試験を模擬した弾塑性解析

押込み試験の荷重－押込み深さ曲線に基づき降伏応力を評価する方法が Knapp 等によって提案されている⁽¹³⁾。この方法は、①押込み試験を模擬した弾塑性解析を行い降伏応力をパラメータとして荷重－押込み深さ曲線を求め、②解析結果と試験結果における荷重－押込み深さ曲線の差異を定量的に評価し、降伏応力の関数としてプロットし、③差異が最も小さくなるときの降伏応力を試料の降伏応力として求めるという方法である。しかしながら、Knapp らによる方法では、材料を等方性として解析しているため、Ni 薄膜のような異方性材料に対しては厳密に適用することはできない。本研究では大変形解析に適した有限差分解析プログラム「AUTODYN」を用い、Ni の異方性を考慮して押込み試験を模擬した弾塑性解析を実施した。解析において、ダイヤモンド球圧子は、ヤング率：1140GPa、ポアソン比：0.07 の等方性弾性体とし、Ni 薄膜は、後述する Ni 単結晶の弾性定数に基づいて、ヤング率： $E_1=E_2=174\text{GPa}$ 及び $E_3=136\text{GPa}$ 、ポアソン比：0.3 の異方性弾完全塑性体とした。また、Ni 薄膜の降伏応力は、可変パラメータとして解析を実施している。

4. 結果及び考察

4.1 ヤング率

4.1.1 ヤング率の評価 図6及び図7に、面内及び面外押込み試験で得られた荷重－押込み深さ曲線の例を示す。荷重－押込み深さ曲線から、押込み荷重の増加とともに押込み深さが深くなり、完全除荷で大きな永久変形が認められ、荷重レベルによらず除荷曲線

の傾きが負荷曲線のそれよりも大きくなることがわかる。

Fig. 6 Load vs. penetration depth curve measured in inplane indentation testing

Fig. 7 Load vs. penetration depth curve measured in outofplane indentation testing

Oliver-Pharr モデルによるヤング率の評価において必要となる最大押し込み深さ h_{max} と除荷曲線の傾き S を荷重-押し込み深さ曲線より評価した。図 8 と図 9 にそれぞれ最大押し込み深さ h_{max} と荷重の関係、除荷曲線の傾き S と荷重の関係を示す。これらの図中の○印が面内押し込み試験、△印が面外押し込み試験の結果を表す。なお、傾き S は除荷曲線の上部 30 % を直線近似することによって求めた。図 8 の最大押し込み深さ h_{max} では、面内と面外の値は荷重レベルによらずほぼ一致しており大きな差は認められない。一方、除荷曲線の傾き S では、両者の値に差が認められる。すなわち面内の傾きがすべての荷重レベルにおいて面外の傾きよりも約 1.5 倍大きくなる。

次に、測定した最大押し込み深さ h_{max} と除荷曲線の傾き S を用いて Oliver-Pharr モデルに基づいて、面内と面外のヤング率を評価した結果を、図 10 と図 11 に示す。図中の白抜き印 (○及び△) がフレームコン

プライアンス C_f を補正する前の結果、黒塗り印 (●及び▲) が補正後の結果を表す。面内と面外のいずれも C_f 補正後のヤング率は、補正前に比べて若干大きくなる。面内及び面外のヤング率の平均値は、それぞれ $E_{inplane} = 196 \text{ GPa}$ 及び $E_{outplane} = 142 \text{ GPa}$ であり、 $E_{inplane}$ は $E_{outplane}$ より 30 % 程大きい値となる。この結果から、試製した Ni 薄膜は面内と面外でヤング率の異なる異方性体であることがわかる。なお、本研究で求めたヤング率は Buchheit⁽¹⁰⁾ らが押し込み試験で求めた Ni のヤング率 146~184 GPa と一致している。

Fig. 8 Relationship between the max. penetration depth which is derived from indentation $P-h$ curves and load

Fig. 9 Relationship between the elastic contact stiffness which is derived from indentation $P-h$ curves and load

Fig. 10 Measured inplane Young's modulus, $E_{inplane}$ Fig. 11 Measured outofplane Young's modulus, $E_{outplane}$

4.1.2 単結晶 Ni の弾性定数に基づくヤング率の評価 本研究で得られた Ni 薄膜のヤング率の異方性に関して、単結晶 Ni のヤング率に基づいて考察する。単結晶 Ni の(001)面におけるヤング率は次式により求められる⁽⁵⁾。

$$E(\theta) = \{S_{11}(\cos^4 \theta + \sin^4 \theta) + (2S_{12} + S_{44})\cos^2 \theta \sin^2 \theta\}^{-1} \quad (7)$$

ここで、 $S_{11}=0.00734 \text{ GPa}^{-1}$ 、 $S_{12}=0.00274 \text{ GPa}^{-1}$ 、 $S_{44}=0.00802 \text{ GPa}^{-1}$ で、角度 θ は(001)面における[100]方向からの角度を表す。図 12 に、(001)面におけるヤング率 $E(\theta)$ の方向依存性を示す。

図から単結晶 Ni のヤング率は方位により大きく異なることが分かる。この結果に基づき、LIGA Ni 薄膜の弾性主軸である 1, 2 及び 3 方向におけるヤング率 E_1 、 E_2 及び E_3 を評価する。まず、1 方向と 2 方向の特性は同一であるので $E_1 = E_2$ となる。また 1-2 面(面内)では結晶がランダムに配向していることから、ヤング率 $E_1 (=E_2)$ は古典的な平均化手法である Voigt モデル(ひずみ一定)及び Reuss モデル(応力一定)により求めることができる。Voigt モデルと Reuss モデルにより求めたヤング率は、それぞれ 177GPa と 171GPa となり、これらの平均値から $E_1 = E_2 = 174 \text{ GPa}$ となる。また、3 方向は、Ni 薄膜の厚さ方向、すなわち単結晶 Ni の<001>方向と一致する。したがって、 $E_3 = 136 \text{ GPa}$ となる。

Fig. 12 Young's modulus of single crystalline Ni for the various directions in the (001) plane

続いて、ヤング率 $E_1 (=E_2)$ 及び E_3 と、押込み試験により求めたヤング率 $E_{inplane}$ 及び $E_{outplane}$ の関係について検討する。式(1)に示すように、押込み試験によるヤング率の測定法は、試料が等方性の弾性定数を有するものとしており、本来、異方性材料に対して導き出されたものではない。しかしながら、押込み試験は簡便な試験法であり、異方性材料のヤング率評価にも一般に適用されている。そのため、ここでは、押込み試験により測定した異方性材料のヤング率の妥当性について検証することを目的とする。

押込み試験で測定されるヤング率は、荷重-深さ($P-h$) 曲線の除荷時の勾配に基づいて求めるものであり、この勾配は試料の弾性定数及び応力場(応力の大きさと応力の生じる領域の大きさ)に依存して決まると考えられる。押込んだ圧子周りの試料では、塑性

ひずみと弾性ひずみが生じるが、圧子荷重を除荷していくと、試料及び圧子の弾性ひずみは変化する。この弾性ひずみ変化により試料の圧子周りが膨張し、この体積変化量に依存して押し込み深さ h が変化すると考えられる。

直交異方性体試料内部の任意位置での体積ひずみ e は、弾性ひずみの和 ($e = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$) として与えられ、ポアソン比を一定とすると式(8)で表され、試料全体での体積変化量 ΔV は、式(9)で表される。

$$e = (1 - 2\nu) \left(\frac{\sigma_1}{E_1} + \frac{\sigma_2}{E_2} + \frac{\sigma_3}{E_3} \right) \quad (8)$$

$$\Delta V = \iiint e \, dx \, dy \, dz \quad (9)$$

式(8)及び式(9)に示すように、除荷時における試料の体積変化は、応力の大きさ、応力の生じる領域の大きさ及び弾性定数によって決まるものである。したがって、除荷時の P - h 曲線の勾配は、試料の弾性定数とともに、応力場に依存すると考えられるので、試料の圧子周りの応力場を明らかにするための解析を行った。

図13に、面内押し込み試験を模擬して弾塑性解析(AUTODYN)により求めた応力(荷重)ー押し込み深さ曲線を示す。図から、圧子直下の Point1 における応力がそれよりも $3 \mu\text{m}$ 離れた Point2 における値よりも大きいことがわかる。

図14に図13と同様の弾塑性解析により求めた除荷時の3方向と1方向の応力分布を示す。図から1方向の応力が3方向の応力よりも大きく、1方向の応力が生じる領域が3方向よりも大きいことがわかる。

以上の解析結果より、除荷時における試料の圧子周りの応力場は、 σ_1 が σ_3 よりも大きさが大きく、 σ_1 が生じる領域の体積が σ_3 よりも大きいので、除荷時の試料の体積ひずみは、 σ_1 の影響を σ_3 よりも強く受ける。すなわち、圧子の押し込み深さ h が試料の体積ひずみに依存すると考えると、 P - h 曲線の勾配は σ_1 の影響を σ_3 よりも強く受け、同時に、ヤング率 E_1 の影響を E_3 よりも強く受けることになる。

したがって、面内押し込み試験により評価した面内のヤング率 E_{inplane} は E_1 と E_2 の影響を強く受け、面外のヤング率 E_{outplane} は E_1 と E_3 の影響を強く受けると考えられる。 E_{inplane} と E_{outplane} に及ぼす E_1 , E_2 及び E_3 それぞれの影響の程度は明確ではないが、面内におけるヤング率の平均値 $(E_1 + E_2)/2 = 174 \text{ GPa}$ 及び面外におけるヤング率の平均値 $(E_1 + E_3)/2 = 155 \text{ GPa}$ は、それぞれ、押し込み試

験で得られた面内ヤング率 $E_{\text{inplane}} = 196 \text{ GPa}$ 及び面外ヤング率 $E_{\text{outplane}} = 142 \text{ GPa}$ に近い値となる。

Fig. 13 Simulated load and stress vs. penetration depth curves on the indentation test specimen

Fig. 14 Simulated stress contour on the indentation test specimen

4.2 降伏応力 降伏応力を求めるため、押し込み試験を模擬した弾塑性解析を行った。

図15に、押し込み試験で測定した荷重ー押し込み深さ曲線と比較して、降伏応力 YS をパラメータとして AUTODYN を用いて弾塑性解析により求めた荷重ー押し込み深さ曲線を示す。図中の細線が解析結果、太線が実験結果を表す。また、実線と点線はそれぞれ面内と面外の結果に対応する。図から、降伏応力を変化させることにより荷重ー押し込み深さ曲線が大きく変化的ことが分かる。すなわち、降伏応力が高くなるほど変形量は小さくなる。また、実験結果の荷重ー押し込み深さ曲線は、降伏応力を $650 \sim 800 \text{ MPa}$ の間の値としたときに解析結果と一致することがわかる。

続いて、解析結果と実験結果の差を定量的に比較して Ni 薄膜の降伏応力を求める。ここでは両者を比較する Error パラメータとして、

$$Error = \left| \frac{h_{mea} - h_{sim}}{h_{mea}} \right|_{\max P} + \left| \frac{h_{mea} - h_{sim}}{h_{mea}} \right|_{\min P} \quad (10)$$

を用いた。\$h\$は押し込み深さを表し、添え字の \$mea\$ と \$sim\$ はそれぞれ実験値と解析値を意味する。したがって、\$Error\$ パラメータは最大荷重と除荷時の最小荷重における押し込み深さの解析値と実験値の差異を表すものである。

Fig. 15 Effect of yield stresses on the \$P\$-\$h\$ curves

Fig. 16 Error parameter which shows the difference between simulated and measured \$P\$-\$h\$ curves

図 16 に、\$Error\$ パラメータと降伏応力の関係を示す。図中の実線が面内、点線が面外の結果を表す。\$Error\$ パラメータが最も小さくなる時の降伏応力が \$Ni\$ 薄膜の降伏応力となる。比較のため、引張試験により測定した降伏応力 (532, 661, 699, 702, 797MPa) を図中に示す。引張試験による降伏応力の

平均値は、679MPa となる。面内の場合、降伏応力 730MPa において \$Error\$ パラメータが最小となる。この値は、引張試験で求めた降伏応力 679MPa と概ね近い値である。このことから、押し込み試験とともに、これを模擬した弾塑性解析を行うことで試料の降伏応力を比較的精度良く評価できることがわかる。

5. 結 論

- (1) 押し込み試験により評価した LIGA \$Ni\$ 薄膜の面内及び面外におけるヤング率は、それぞれ 196GPa 及び 142GPa であり、弾性定数に異方性を有している。
- (2) 面内押し込み試験により測定されるヤング率 196GPa は、\$Ni\$ 単結晶 \$\{001\}\$ 面における全方向のヤング率の Voigt・Reuss モデルに基づく平均値 174GPa に近い値である。また、面外押し込み試験により測定されるヤング率 142GPa は、\$Ni\$ 単結晶 \$\langle 001 \rangle\$ 方向のヤング率 136GPa と \$\{001\}\$ 面におけるヤング率 174GPa の平均値 155GPa に近い値である。
- (3) 押し込み試験とそれを模擬した弾塑性解析により、\$Ni\$ 薄膜の降伏応力を求めることができる。

6. 文 献

- (1) 服部正, 日本機械学会 機械材料・材料加工部門ニューズレター, 26(2003), 2-3.
- (2) 羽賀剛ほか, MES2001 (第 11 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム), (2001), 291-294.
- (3) S. Sundararajan et al, *Sensors and Actuators A*101(2002), 338.
- (4) X. Li et al, *Surf. Coat. Tech.* 163-164(2003), 521.
- (5) K. J. Hemker et al, *Materials Science & Engineering*, A319-321(2001), 882-886.
- (6) 土屋智由, 豊田中央研究所 R&D レビュー, 34-1(1999), 25-30.
- (7) T. Tsuchiya et al, *J. Microelectromech. Syst.*, 7(1998), 106.
- (8) M. Haque al, *J. Microelectromech. Syst.*, 10(2001), 146.
- (9) W. Sharpe et al, *J. Microelectromech. Syst.*, 10(2001), 317.
- (10) M. Gad-El-Hak, *The MEMS Handbook*, (2002), 3.18 - 3.20, CRC PRESS.
- (11) E. G. Herbert et al, *Thin Solid Films*, 398-399(2001), 331-335.
- (12) 澤健司ほか, IDEMA Japan News, 40(2001), 13-17.
- (13) J. A. Knapp et al, *Surface and Coatings Technology*, 103-104(1998), 268-275.
- (14) 中上昭光ほか, Kobe Steel Engineering Reports, 52-2 (2002), 74-77.