原子間力顕微鏡を基にした超微小硬さ試験機の開発*

宮原 健 介^{*1}, 松岡 三 郎^{*1}
長 島 伸 夫^{*1}, 三 島 周 三^{*2}Development of a Nanoindenter on the Basis
of an Atomic Force MicroscopeKensuke MIYAHARA, Saburo MATSUOKA,
Nobuo NAGASHIMA and Shuzou MISHIMA

A nanoindentation hardness apparatus was developed on the basis of an atomic force microscope to obtain both an indentation curve and an indentation image. Newly devised features were to use a lever which has a three-sided pyramidal diamond tip at the central part of the lever, to measure the vertical displacement at the center of the lever and to add an actuator for controlling the force. The ultra-microhardness values of gold, SUS403 steel and SNCM439 steel measured at the indentation forces between 2.6×10^3 and $3.5 \times 10^3 \mu\text{N}$ using the nanoindentation hardness apparatus agreed with the macrohardness values measured at the force of 4.9 or 9.8 N using the conventional Vickers hardness apparatus. However, the ultra-microhardness increased with decreasing indentation force. This behavior was explained considering the elastic-plastic conditions of the specimens.

Key Words: Hardness, Atomic Force Microscope, Force-Penetration Depth Curve, Gold, SUS403 Steel, SNCM439 Steel

1. 緒言

硬さ測定は簡便で、かつ安定な試験法である。そのため、硬さは降伏応力などに並んで構造材料の基本的な機械的特性の一つとなっており、また経年劣化などによる材質変化を調べる目的でも多く用いられている。また、最近では半導体デバイスや磁気ディスク中の薄膜構造の例のように、測定対象自身が微小化しているため、その物理的性質の評価及びそれを通しての品質管理の方法としては、現時点では硬さ試験が最も有望であると考えられている。このような観点から、 μN , nN の押し込み力を対象とした超微小硬さ試験機の開発が進められており⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾、押し込み力と押し込み深さの関係を導くことによって、硬さのみならずヤング率を測定することが試みられている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

一方、走査型トンネル顕微鏡(STM)と原子間力顕微鏡(AFM)は、原子レベルの分解能を有するだけでなく、種々の微細加工能力を持つことがよく知られている。硬さ試験との関係からは、探針先端を試料表面に押し込むと、 nN から μN の力で微小な圧痕を形成でき、かつその圧痕形状を nm レベルでその場観察できる。後者の観察能力は開発が進められている超微小硬さ試験機にない利点である。そこで、著者らはSTMとAFMを硬さ測定に応用する研究を進めてきた⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しかし、次章で詳しく述べるように、STMでは押し込み力、AFMでは押し込み深さが求められないことから、超微小硬さ測定で重要となる押し込み力-押し込み深さ曲線が得られなかった。また、Burnhamらは独自のAFMを用い、押し込み力-押し込み深さ曲線は測定できたが、圧痕形状は観察できていない⁽⁸⁾。

本研究では、AFMを基に開発した超微小硬さ試験機について述べる。また、開発した試験機ならびに金、SUS403鋼、SNCM439鋼を用いて硬さ試験を行い、押し込み力-押し込み深さ曲線の取得と、除荷後の圧痕形状の観察ができることを実証し、さらにそれらの両方の結果は超微小力のもとでの硬さを評価・解析する際に役立つことを述べる。

2. 超微小硬さ試験機の開発

ここでは、まず超微小硬さ測定の現状と問題点をまとめ、次にAFMを基に開発した超微小硬さ試験機について述べる。

2.1. 超微小硬さ測定の現状と問題点 硬さ試験は、ビッカース、ブリネル、ロックウェルなど数種類が実用化され、JISとして規格化されている。これらの中でビッカース硬さ試験は良く用いられ、また超微小硬さ試験に適用が広がられている。

JIS規格⁽⁹⁾では、ビッカース硬さ H_V は、押し込み力 $F(\text{N})$ 、除荷後の圧痕(またはくぼみ)の表面積 $S_p(\text{mm}^2)$ を用いて次式で定義されている。

$$H_V = 0.102 F / S_p \quad (1)$$

ビッカース試験では図1(a)に示すように対面角 $2\alpha=136^\circ$ 、対稜角 $\theta=85.7^\circ$ の四角錐圧子を用いて圧痕を形成し、その圧痕の対角線長さ l_p またはこれに対応する深さ h_p から面積 S_p は次式で与えられる。

$$S_p = l_p^2 / (2\sin\alpha) \\ = 4h_p^2 \tan(\theta/2) / \{1 - \tan^2(\theta/2)\} \quad (2)$$

* 原稿受付 1995年3月17日。

^{*1} 正員, 金属材料技術研究所 (〒305 つくば市千現 1-2-1)。^{*2} オリンパス光学工業(株) (〒192 八王子市石川町 2951)。

最近では、微小硬さ試験あるいは超微小硬さ試験において、四角錐圧子の加工が困難であることから、図1(b)に示すように対稜角 $\theta=115^\circ$ の三角錐圧子を用いて圧痕が形成されている。この場合、図中の h_p または l_p を用いて、 S_p は次式で与えられる。

$$S_p = l_p^2 / \tan(\theta/2) \\ = 9h_p^2 \tan(\theta/2) / \{3 - \tan^2(\theta/2)\} \quad (3)$$

通常のビッカース試験機またはマイクロビッカース試験機では、光学顕微鏡を用いて四角錐圧痕の対角線長さ l_p を測定することで硬さを求めている。

一方、超微小硬さ試験では、圧痕が小さすぎ、観察が困難であるため、図2に示すような押し込み力-押し込み深さ曲線を測定している。除荷曲線が横軸と交わる点の押し込み深さ $h_{p, final}$ または除荷初期の直線部分を外挿して求める押し

図1 四角錐圧痕と三角錐圧痕

図2 通常の超微小硬さ試験機で得られる押し込み力-押し込み曲線の模式図

込み深さ $h_{p, eff}$ を圧痕深さとし、硬さを求めている。しかし、実際の圧痕が観察されていないので、 $h_{p, final}$ または $h_{p, eff}$ のどちらを採用するか結論は得られていない。

STMとAFMは高分解能と微細加工能力を有するので、超微小硬さ測定への応用が試みられている。図3に示すように、STMではトンネル電圧を0Vにし、強制的に探針を試料表面に押し込むことにより、圧痕を作成する。この場合、押し込み力の測定は不可能であるが、トンネル電圧を0Vに保つ時間を一定にすると、押し込み力は同じになると考えられるので、相対的な硬さの違いは判定できる。前報⁽⁶⁾では、導電性の三角錐ダイヤモンドを先端に有する探針を用い、セメンタイト球状化熱処理したS25C鋼のパフ研磨面の5000x5000nm領域に16x16個の圧痕を形成した後、STM像を取り、硬いセメンタイト部には浅い圧痕、軟らかいフェライト母地には20nm程度の深い圧痕が形成されることを示した。

AFMを用いる場合には、力が測定できるので、STMの場合より定量的な硬さ測定が可能となる。しかし、通常のAFMにおいては、力は片持ちレバーと光でこ方式を組み合わせる測定するので、図4に示すように、レバーがたわむにつれて圧子が回転し、その先端が動くため細長い圧痕が形成される欠点がある。前報⁽⁷⁾では、この欠点を解決するため、力を加えると同時に試料を圧子先端の動きに合わせて移動させる電気回路を追加し、片持ちレバー先端の三角錐ダイヤモンドで形

図3 STMによる硬さ試験

図4 AFMによる硬さ試験

成された三角錐圧痕のAFM像を得ることによって、硬さを求めた。S25CとSNCM439鋼の測定結果によると、AFMによる硬さは力が大きい領域では市販のビッカース試験機による結果と一致したが、力が小さい領域では硬さが高くなる方向にずれた。このような挙動を解析するためには、通常の超微小硬さ試験機で測定される押し込み力-押し込み深さ曲線が必要になると考えられる。しかし、AFMでは、アクチュエータをz方向に伸ばして力を試料に加えるため、その変位量が圧子の試料への押し込み深さに比べて著しく大きくなり、押し込み力-押し込み深さ曲線を得ることが困難になる。

今まで述べてきた超微小硬さ試験機、STM、AFMによる硬さ測定で得られる情報を表1にまとめて示す。押し込み力、押し込み深さ、圧痕深さ、圧痕像につき、得られる情報は○印、得られない情報は×印で示してあるが、どの装置もいずれかの情報が得られない結果となっている。次章では、AFMを改良し、表1のすべての情報が得られる超微小硬さ試験機の開発について述べる。

2.2. AFMを改良した超微小硬さ試験機 今回、AFMを改良し、開発した超微小硬さ試験機の概略図を図5に示す。通常のAFMと大きく異なる点は、(1)ダイヤモンド圧子が中央に付いている両持ちレバーの使用、(2)ダイヤモンド圧子直上の垂直変位の直接測定、(3)力制御用の一軸アクチュエータの追加の3点である。

図4に示したように、ダイヤモンド圧子が先端に付いている片持ちレバーを用いると、圧子の回転が起こり、細長い圧痕が形成される。これに対し、図5に示すように両持ちレバーを用いると、圧子は試料に垂直に押し込まれるので、この欠点は防ぐことができる。しかし、圧子部分は回転が生じないので、光でこ方式で変位を求め、力を算出することができなくなる。このため、両持ちレバーの使用は、圧子直上の垂直変位を直接求める変位計が必要となる。

図5の装置を用いた硬さ試験は次のように行う。最初に、試料移動用の粗動機構を用いて、試料をダイヤモンド先端に接近させ、所定の小さな斥力下のAFM測定モードにする。次に、図の下側の3軸のイメージ用アクチュエータを走査し、試料表面の地形像を取るとともに、硬さ測定的位置を決める。力制御用の1軸のアクチュエータを伸ばし、両持ちレバーを変形させて、ダイヤモンド圧子を試料表面に押し込む。この時、圧子直上の変位は一定になるように制御されているので、圧子が試料に押し込まれた変位量に相当する量だけ、イメー

ジ用アクチュエータはz方向に伸びる。このz方向変位は圧子が試料に押し込まれた深さと等しくなり、また力は一軸アクチュエータの伸び量と両持ちレバーのバネ定数から求まる。したがって、力制御用の1軸アクチュエータを追加することにより、硬さ試験中の負荷と除荷時の押し込み力-押し込み深さ曲線がリアルタイムに得られる。

また、力制御用の1軸アクチュエータはピエゾ製であるため、ヒステリシスが問題となる。実際には、アクチュエータの中央部にひずみゲージを接着し、その出力を力の制御と算出に用いた。アクチュエータの変位 δ (mm)とひずみ値 ε の較正は光学顕微鏡を用いて行い、次式を得た。

$$\delta = 14.4 \times \varepsilon \quad (4)$$

ここで、アクチュエータの寸法は5x5x18mmであり、ひずみゲージの測定部長さは2mmである。

さらに、図6には実際に使用している両持ちレバーを示す。0.5mm幅の貫通している溝が2ヶ所設けてあり、中央部分が力を測定するためのレバーとして用いる。両側のレバーはレバー台に接着するとき生じる余分な張力を防ぐために設けてある。この部分がない両持ちレバーを用いた実験も行ったが、余分な張力のため、正確な硬さ値は得られなかった。

AFM観察と硬さ試験において重要となる図5の主要部の諸元については、イメージ用3軸アクチュエータの最大走査範囲

図5 AFMを改良した超微小硬さ試験の模式図

図6 使用した両持ちレバー

表1 微小硬さ試験機の特徴

Equipment	Force	Penetration Depth	Indentation Depth	Indentation Image
Nanoindentation	○	○	○	×
STM	×	×	○	○
AFM	○	×	○	○

がXとY軸方向については $24.2\text{ }\mu\text{m}/300\text{V}$ 、Z軸方向については $4.4\text{ }\mu\text{m}/300\text{V}$ 、力制御用1軸アクチュエータの最大変位量が $10\text{ }\mu\text{m}/100\text{V}$ 、光学変位計の精度が $300\text{nm}/\text{V}$ である。実際の開発にあたっては、AFMヘッド部はオリンパス製、制御回路部は米国デジタルインスツルメント製を基本とした。さらに、AFM観察と硬さ試験を行うための独自のパーソナルコンピュータシステムを開発した。

3. 実験方法

3.1. 供試材 供試材としては、金(99.99%)、SUS403鋼⁽¹⁰⁾(0.05%C, 0.31%Si, 0.32%Mn, 0.020%P, 0.008%S, 0.08%Ni, 12.56%Cr, 引張強さ:640MPa)、SNCM439鋼⁽¹¹⁾(0.40%C, 0.33%Si, 0.77%Mn, 0.008%P, 0.004%S, 1.88%Ni, 0.88%Cr, 0.26%Mo, 0.02%Cu, 引張強さ:1526MPa)を用いた。いずれの表面もエメリー紙で研磨した後、最終的に平均粒径 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ のアルミナ粉末を用いてバフ研磨を行った。その後、アセトンでよく洗浄し、測定に供した。

3.2. 硬さ試験 今回AFMを基に開発した超微小硬さ試験機を用い、次のような条件のもとで硬さ測定を行った。使用した図6の両持ちレバーの中央の力測定部の寸法は長さ $l=11\text{mm}$ 、幅 $w=1\text{mm}$ 、厚さ $t=50\text{ }\mu\text{m}$ であり、そのバネ定数 $k=16\text{Ewt}^3/1^3$ は 301N/m となる。ここで、 E はヤング率である。圧子は、対稜角 115° のダイヤモンド製三角錐圧子を使用した。その先端形状の走査型電子顕微鏡(SEM)の写真を図7に示す。対稜角 115° は、通常のビッカースまたはマイクロビッカース試験機で用いられている対面角 136° の四角錐圧子と比較し、同じ圧痕深さのときに同じ面積が得られるようにするために採用した。AFM観察時の斥力は $9\text{ }\mu\text{N}$ とし、この力から負荷速度 $43\text{ }\mu\text{N}/\text{sec}$ で押し込みを開始し、最大押し込み力の時点で10秒保持し、その後と同じ速度で除荷した。試験は同一条件下で2回以上行った。また、負荷と除荷の制御ならびに押し込み力-押し込み深さ曲線の集録はパーソナルコンピュータシステムで行った。

上述の超微小硬さ測定と平行して、通常のマイクロビッカース硬さ試験機による硬さ測定も行った。最大押し込み力は、金では 4.9N 、SUS403とSNCM439鋼では 9.8N とし、最大押し込み力の保持時間を 15sec とした。それぞれの試料について3回ずつ測定を行い、その平均硬さは金で76、SUS403鋼で197、SNCM439鋼で527であった。

図7 三角錐ダイヤモンド圧子先端のSEM像

(a) 金

(b) SUS403鋼

(c) SNCM439鋼

図8 押し込み力-押し込み深さ曲線

4. 実験結果

図8に、今回開発した超微小硬さ試験機で得た押し込み力-押し込み深さ曲線を示す。材料によらず、曲線の特徴は互いに似ているが、同じ押し込み力で比較すると、金、SUS403鋼、SNCM439鋼とマイクロビッカース値が大きくなるにしたがって、押し込み深さは小さくなった。

図9には、押し込み力 $3.5 \times 10^3 \mu\text{N}$ で硬さ試験を行った後に形成されていた圧痕のAFM像を示す。圧痕形状を見やすくするため、2次元像と3次元像ともに反転し、また3次元像のZ方向はXとY方向に比べて拡大してある。圧痕は圧子と同じ三角錐形状をしており、その大きさは金、SUS403鋼、SNCM439鋼と硬くなる順序にしたがって小さくなった。黒く見える塑性変形領域は圧痕周囲に均一に形成されておらず、圧子がわずかに傾いて押し込まれたことがわかる。

図10には、押し込み力-押し込み深さ曲線とAFM像から求めた圧痕深さの関係を示す。押し込み力-押し込み深さ曲線からの圧痕深さは図2で示した $h_{p, \text{eff}}$ であるが、実際には図7において除荷過程の最初の1/3のデータを最小二乗近似して決定した。材料によらず、両者の圧痕深さはよく一致した。

図11には、AFM像で決定した圧痕深さを用い、式(1)と(3)から求めた硬さを圧痕深さに対して示す。マイクロビッカース試験機による硬さも合わせて示してある。いずれの場合とも硬さは2回以上測定した結果の平均値である。材料によらず、圧痕深さが大きい領域ではマイクロビッカース試験結果

(黒塗り印)と一致しており、開発した超微小硬さ試験機は有効であることを示している。一方、圧痕が浅くなると、硬さは増加しており、このことについては次章で検討する。

5. 考察

超微小硬さ領域において、図11のように圧痕深さが小さくなるにつれて硬さが大きくなる現象はすでに報告されている(1)。ここでは、このような現象を圧子先端形状と圧痕形成時の材料の弾塑性状態の観点から考察する。

5.1. 圧子先端形状の影響 本研究で用いた三角錐圧子の先端は曲率半径を有しており、その値は100nm以下であることが保証されている。圧子先端が球状になると、材料との接触面積が広くなり、押し込み力が増大するので、硬さは見かけ上大きくなる。この点について、三角錐圧子の場合には球となめらかに接続できないので、円錐圧子に置き換えて考察する(図12参照)。

円錐圧子の場合には、圧痕の面積 S_p と深さ h_p の間には次式の関係がある。

$$S_p = \pi h_p^2 / \tan \alpha \quad (5)$$

ここで、円錐の開き角を 2α とする。本研究で用いた三角錐圧子の対稜角 $\theta=115^\circ$ を式(3)に代入し、式(5)と連立させて解くと、 $\alpha=83.2^\circ$ を得る。すなわち、 $\theta=115^\circ$ の三角錐圧

(a) 金

(b) SUS403鋼

(c) SNCM439鋼

図9 押し込み力 $3.5 \times 10^3 \mu\text{N}$ で形成された圧痕のAFM像。表示は上下を反転してある。

上段:2次元像。下段:3次元像。

図10 押し込み力-押し込み曲線とAFM像から求めた圧痕深さの関係

図11 AFM像の圧痕深さから求めた硬さと圧痕深さの関係

図12 円錐に球を接続した場合の模式図

子と $\alpha=83.2^\circ$ の円錐圧子においては、同じ圧痕深さに対して、同じ圧痕面積、同じ硬さが得られる。

図12には、円錐の先端に半径Rの球を接続した場合の模式図を示す。図中の $h_{p, \text{crit}}$ は次式で与えられる。

$$h_{p, \text{crit}} = R (1 - \sin \alpha) \quad (6)$$

したがって、図12のような圧子の場合の圧痕の面積は、圧痕深さ h_p が $h_{p, \text{crit}}$ 以下の時には、半径Rの球の面積 S_p

$$S_p = 2\pi R h_p \quad (7)$$

で与えられ、 h_p が $h_{p, \text{crit}}$ より大きいときには、式(5)と(6)から求められる。このようにして求めた面積を式(6)の円錐の場合の面積で割り、比を求め、金、SUS403鋼、SNCM439鋼で得たマイクロビッカース硬さに掛けると、圧子の先端形状の影響が評価できる。 $\alpha=83.2^\circ$ 、 $R=100\text{nm}$ として、評価した結果を金の場合につき、点線で図11に示す。図中には示していないが、SUS403とSNCM439の場合にもほぼ平行移動した同様な結果となる。本実験範囲内では、圧子の先端形状の影響はほとんど無いことを示している。

5.2. 弾塑性状態の影響 通常のビッカースやマイクロビッカース硬さ試験においては、圧痕形状より硬さを求めるので、試料の塑性ひずみのみが考慮されていると考えられる。一方、圧痕深さが数百nm以下の超微小硬さ領域では塑性ひずみのみならず、弾性ひずみが圧痕形成に与える影響を考慮する必要がある。

図13は、図8に示す負荷過程の押し込み力-押し込み深さ曲線と圧痕深さを両対数グラフ上に示したものである。図中の破線は、村上らからFEMによる弾性解析で求めた三角錐圧子の押し込み力 $F(\text{mN})$ と押し込み深さ $h(\mu\text{m})$ の関係である⁽¹²⁾。

$$F = 1.70 C h^2 \quad (8)$$

$$C = 2 E \tan \alpha / \{ \pi (1 - \nu^2) \}$$

ここで、 E はヤング率(GPa)、 ν はポアソン比、 α は三角錐圧子の中心軸と側面のなす角である。この破線は材料の弾性変形のみを考慮した押し込み力-押し込み深さ曲線となる。一方、実線は式(3)を式(1)に代入し、それぞれの試料のマイクロビッカース硬さ値を用いて求めた押し込み力と圧痕深さの関係で、材料の塑性ひずみのみを考慮した押し込み力と押し込み深さの関係と見なすことができる。

小さい黒点の押し込み力-押し込み深さ曲線は、破線の弾性押し込み関係から出発し、金の場合のように実線を少し越える挙動を示している。一方、大きい黒丸印の圧痕に関する結果は、押し込み力大きい領域では当然実線の塑性押し込み関係と一致するが、押し込み力が小さくなるにつれて、実線より離れ、SNCM439鋼の場合のように破線の弾性押し込み関係より小さくなるものもある。したがって、超微小硬さ領

域においては、押し込み力の多くの部分は弾性変形をするために費やされ、圧痕は実線より予測されるよりも小さくなる。その結果、図11に示したように、圧痕深さから求めた超微小硬さは大きく見積もられたと結論できる。このことは、超微小硬さは大きな押し込み力の範囲で定義されている通常のビッカース硬さとは異なる新しい基準のもとで定義する必要があることを示している。

5.3. 本装置の特徴と今後の課題 上述したように、本研究でAFMを改良して開発した超微小硬さ試験機は十分に実用に耐えられる装置であることがわかった。ここでは、従来の装置と比較し、本装置の特徴をまとめるとともに、今後の課題を示す。

本装置の大きな特徴としては次の2点が上げられる。

(1) 従来の超微小硬さ試験機は、通常のビッカース硬さ試験機の機構を前提とし、微小荷重が測定できる方向に開発したものである。一方、本装置は、原子間力($\sim 1\text{nN}$)が測定できるAFMを基に、むしろ圧痕形成のため、大荷重が発生できる方向に開発したものである。換言すると、本装置の開発は容易方向を目指したことになり、今後の高度化などに対して十分な余裕があることになる。

(2) 硬さ測定は圧痕形状の測定が前提となっている。そのため、従来の超微小硬さ測定においてもSEMで圧痕形状を測定している⁽¹⁾。本装置においては、AFMの観察能力が初めから備わっており、その分解能はSEMに比べて極めて高い。

本装置に関して、今後早急に取り組む課題としては次の2点が上げられる。

(1) 本研究では図6に示した $50\text{ }\mu\text{m}$ 厚の両持ちレバーを使用した。しかし、図13に示すように、このレバーでは押し込み力が低い領域の押し込み力-押し込み深さ曲線はばらついた。これを解決するためには、バネ定数がより小さい両持ちレバーを作成する必要がある。これに関しては、 10 と $20\text{ }\mu\text{m}$ 厚の片持ちレバーがすでに使用されている現状を考えると、十分に解決できる。バネ定数が低い両持ちレバーの使用は弾性押し込みを行えるので、ヤング率の測定が可能となり、半導体デバイス中の薄膜構造の評価などにおいて有益になると考えられる。

(2) 図9の圧痕のAFM像において、黒い部分の塑性変形域が圧痕まわりに等分に形成されていないことから、圧子が試料表面に垂直に押し込まれていないことを指摘した。この影響のために、図8の押し込み力-押し込み深さ曲線の除荷過程の後半部分が急激に湾曲したとも考えられる。したがって、圧子を試料表面に垂直に押し込むメカニズムを開発することは重要であると考えられる。

6. 結論

AFMを基にして、(1)ダイヤモンド圧子が中央に付いている両持ちレバーの使用、(2)ダイヤモンド圧子直上の垂直変位の直接測定、(3)力制御用の一軸アクチュエータの追加の3点の工夫を加えた超微小硬さ試験機の開発を行うと

(a) 金

(b) SUS403鋼

(c) SNCM439鋼

図13 押し込み力-押し込み深さ曲線の両対数プロット

ともに、金、SUS403鋼、SNCM439鋼を対象に微小硬さ試験を行った。得られた結論は以下の通りである。

(1) 上記3点の工夫により、押し込み力 $4.3 \times 10^2 \sim 3.5 \times 10^3 \mu\text{N}$ の範囲で圧痕のAFM像および押し込み力-押し込み深さ曲線の両方を得ることが可能になった。

(2) AFM像からの圧痕深さは、押し込み力-押し込み深さ曲線から求めた圧痕深さと、試料によらずよく一致した。

(3) 本装置で求めた硬さは、 2.6×10^3 および $3.5 \times 10^3 \mu\text{N}$ の荷重条件においては、4.9Nや9.8Nの荷重条件で求めたマイクロビッカース試験機による硬さ値とよく一致した。しかし、低荷重側では硬さ値は増加する傾向を示した。これは、先端の曲率半径の影響は少なく、試料の弾塑性状態と関連することがわかった。

文献

- (1) J. B. Pethica, R. Hutchings and W. C. Oliver: Phil. Mag. 48(1983), 593.
- (2) 稲村, 鈴木: 生産研究 42(1990), 257.
- (3) Y. Murakami, K. Tanaka, M. Itokazu, and A. Shimamoto: Phil. Mag. 69(1994), 1131.
- (4) 宮奥, 嶋本, 田中: 機講論 No. 940-37A (1994), 232.
- (5) 秋山, 田中: 機講論 No. 940-37A(1994), 230.
- (6) 長島, 松岡, 宮原, 升田: 機論 A59(1993), 211.
- (7) 長島, 松岡, 宮原: 機論 A61(1995), 416.
- (8) N. A. Burnham and R. J. Colton: J. Vac. Sci. Technol. A7(1989), 2906.
- (9) JIS, Z2244-1992, "ビッカース硬さ試験法".
- (10) 竹内, 松岡, 西島: 機論 A53(1987), 2223.
- (11) 松岡, 湯山, 西島: 機論 A52(1986), 1831.
- (12) 村上, 糸数, 田中: 機論 A59(1993), 835.