

## 3.4.2 超微小硬さと圧子の押し込み深さとの関係

図 3-41から図 3-49に、超微小硬さと圧子の押し込み深さとの関係を示す。図 3-41 から図 3-43 には、算術平均粗さ  $R_a$  が  $0.036 \mu\text{m}$  の場合を、図 3-44 から図 3-46 には、算術平均粗さ  $R_a$  が  $0.103 \mu\text{m}$  の場合を、図 3-47 から図 3-49 には、算術平均粗さ  $R_a$  が  $0.816 \mu\text{m}$  の場合について、各々押し込み荷重が  $100\text{mgf}$ 、 $1\text{gf}$ 、 $10\text{gf}$  の 3 種類を示す。また、図中には圧子先端形状が sharp tip の場合と round tip の場合とを示す。これから、超微小硬さの値は、負荷過程の初期には非常に大きな硬さ値を示すが、その後徐々に硬さ値は低下し、設定押し込み荷重(試験荷重)到達時にはほぼ一定の超微小硬さの値を示すことが分かる。負荷過程の初期に大きな硬さ値を示すのは、荷重負荷時における圧子の押し込み深さが非常に小さな値であり、超微小硬さ値を算出する際には押し込み深さの二乗で除すために、硬さ値が大きな値を示すものと考える。また、試料表面が鏡面の状態 ( $R_a : 0.036 \mu\text{m}$ ) の場合には、超微小硬さ値は sharp tip の場合と round tip の場合においてその差は小さいが、 $R_a$  が大きくなる(例えば  $R_a : 0.103 \mu\text{m}$  や  $0.816 \mu\text{m}$  の場合)に従ってその差は大きくなる。特に、押し込み荷重が小さい場合にその傾向が顕著である。これは、押し込み荷重が小さければ小さい程、表面の凹凸の影響を大きく受けることになるためであると考える。特に、round tip の場合には、同じ押し込み荷重であっても sharp tip の場合と比較して、試料表面に圧子があまり深く押し込まれないために、より表面の凹凸の影響を大きく受けることになるためと考える。

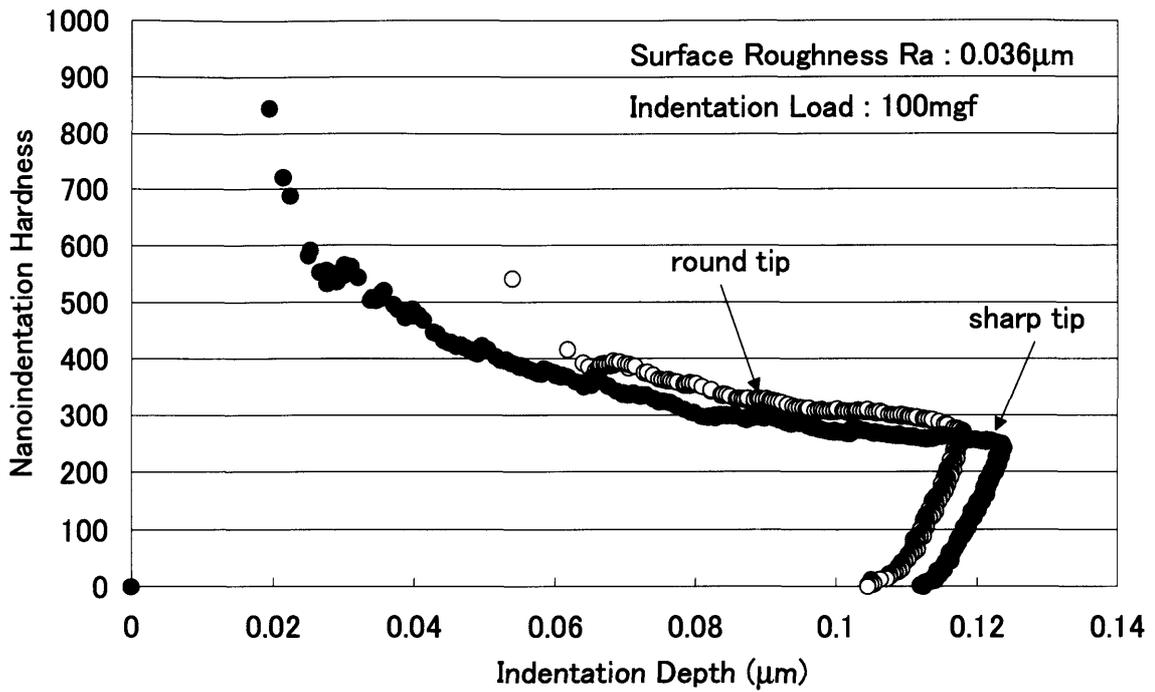


図 3-41 超微小硬さと圧子の押し込み深さとの関係  
(算術平均粗さ Ra : 0.036  $\mu$  m, 押し込み荷重 : 100mgf)

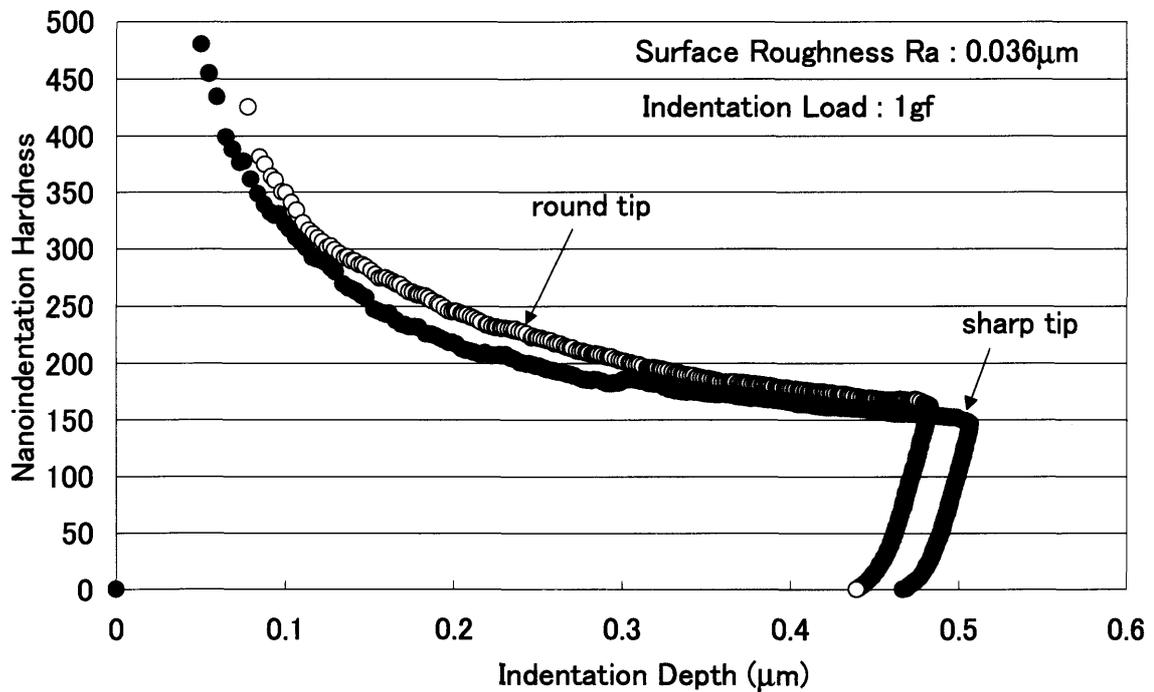


図 3-42 超微小硬さと圧子の押し込み深さとの関係  
(算術平均粗さ Ra : 0.036  $\mu$  m, 押し込み荷重 : 1gf)

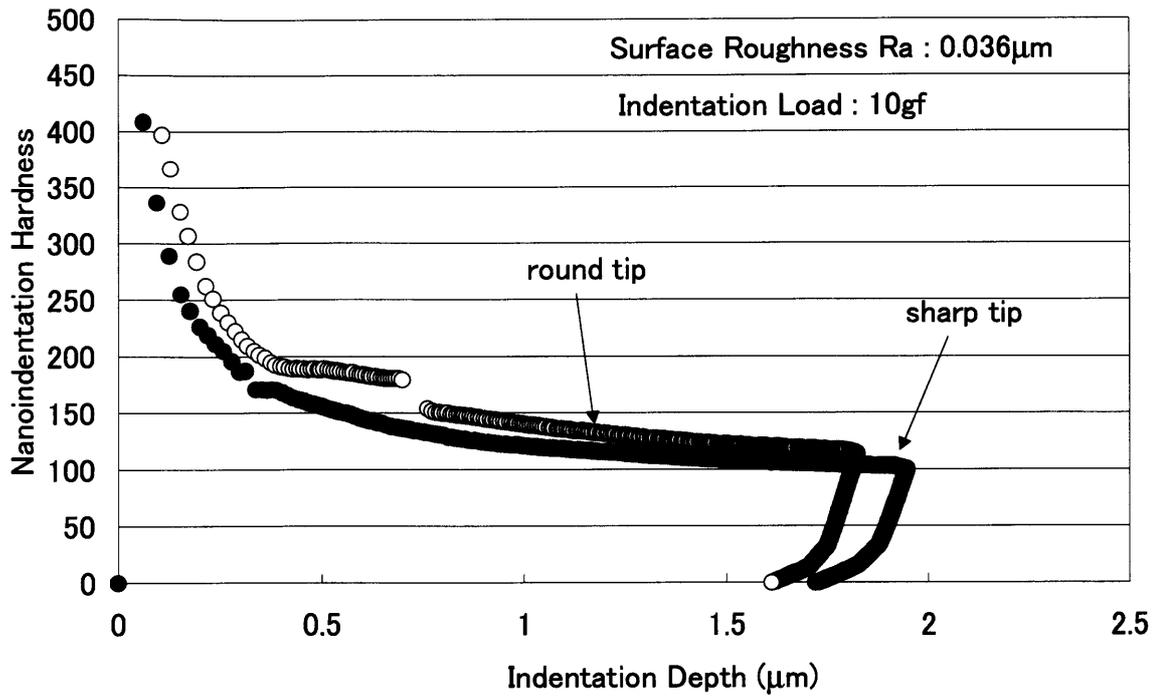


図 3-43 超微小硬さと圧子の押し込み深さとの関係  
(算術平均粗さ Ra : 0.036  $\mu$  m, 押し込み荷重 : 10gf)

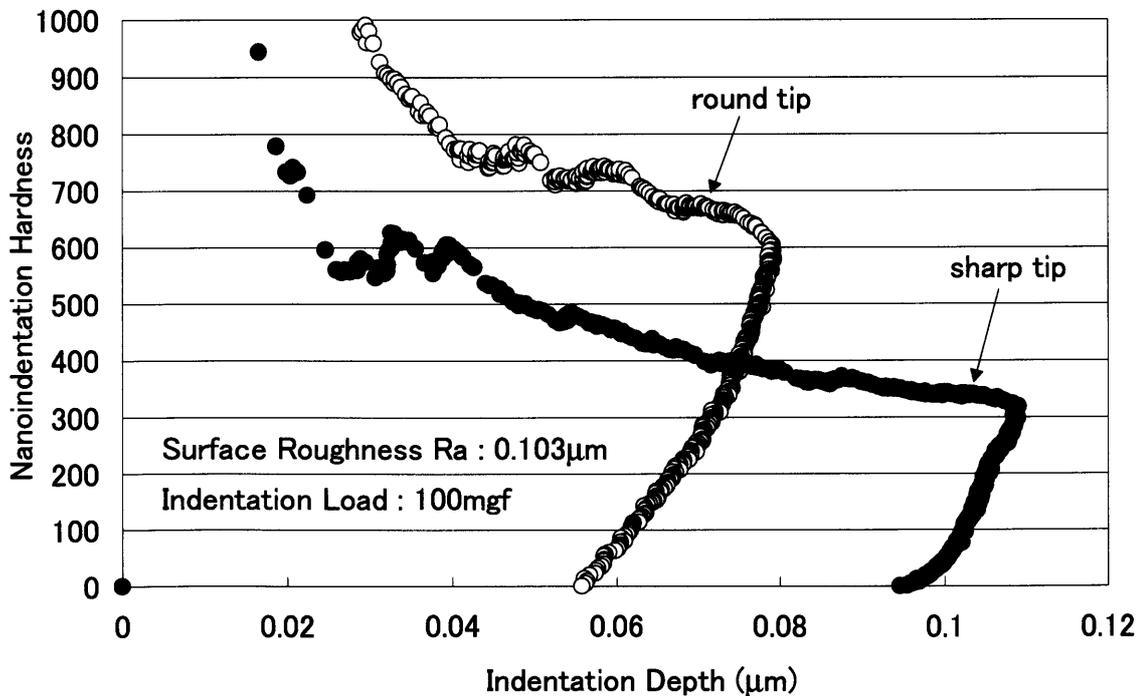


図 3-44 超微小硬さと圧子の押し込み深さとの関係  
(算術平均粗さ Ra : 0.103  $\mu$  m, 押し込み荷重 : 100mgf)

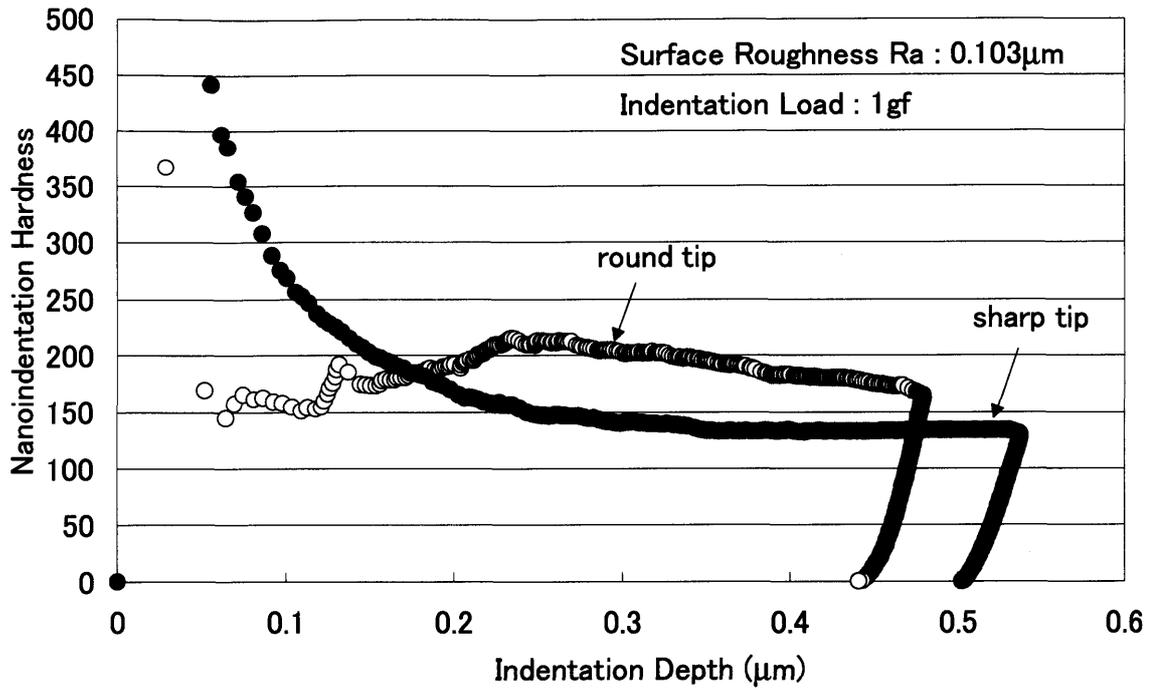


図 3-45 超微小硬さと圧子の押し込み深さとの関係  
 (算術平均粗さ  $R_a$  :  $0.103\mu\text{m}$ , 押し込み荷重 : 1gf)

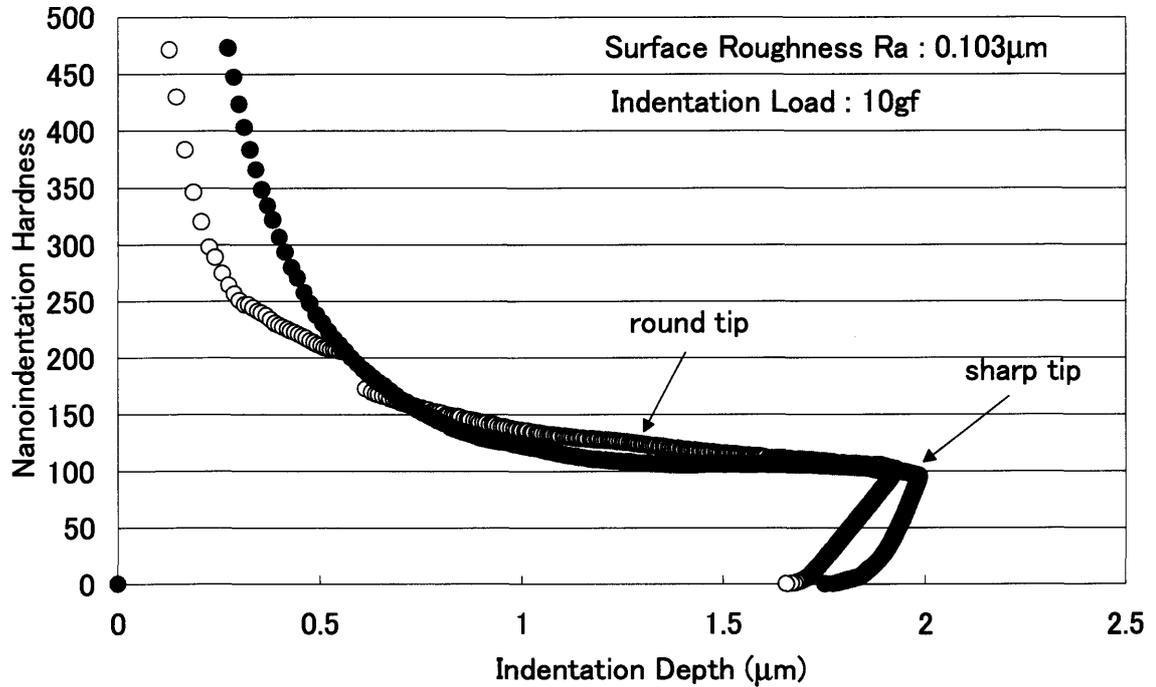


図 3-46 超微小硬さと圧子の押し込み深さとの関係  
 (算術平均粗さ  $R_a$  :  $0.103\mu\text{m}$ , 押し込み荷重 : 10gf)

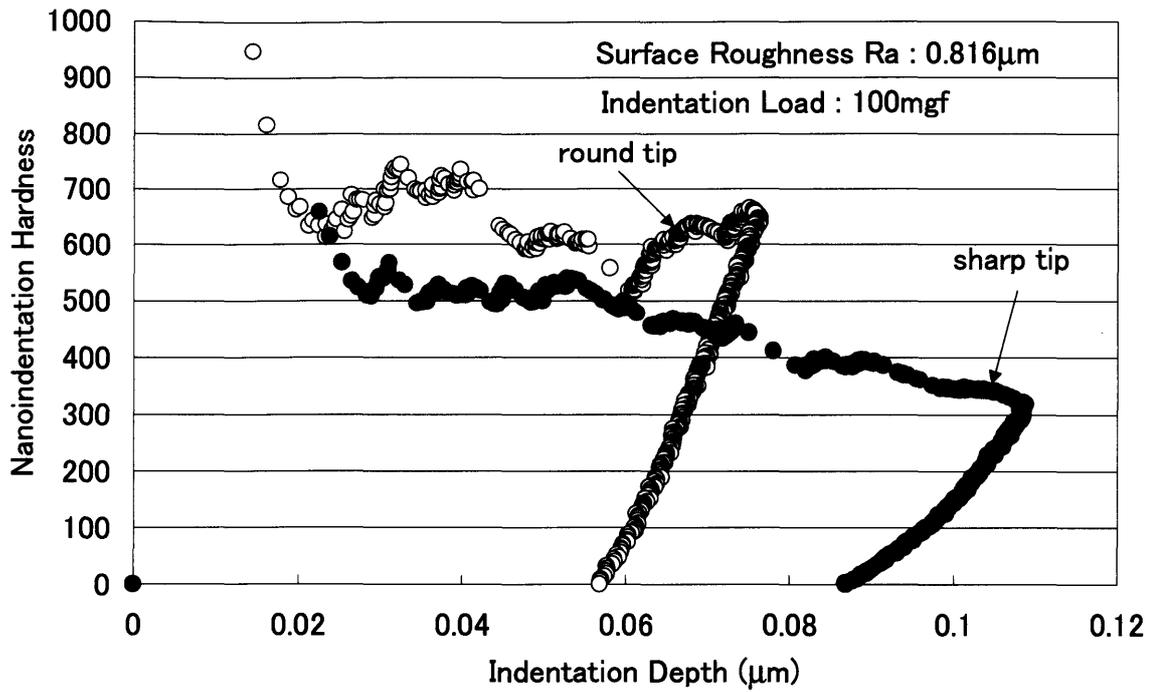


図 3-47 超微小硬さと圧子の押し込み深さとの関係  
(算術平均粗さ Ra : 0.816  $\mu\text{m}$ , 押し込み荷重 : 100mgf)

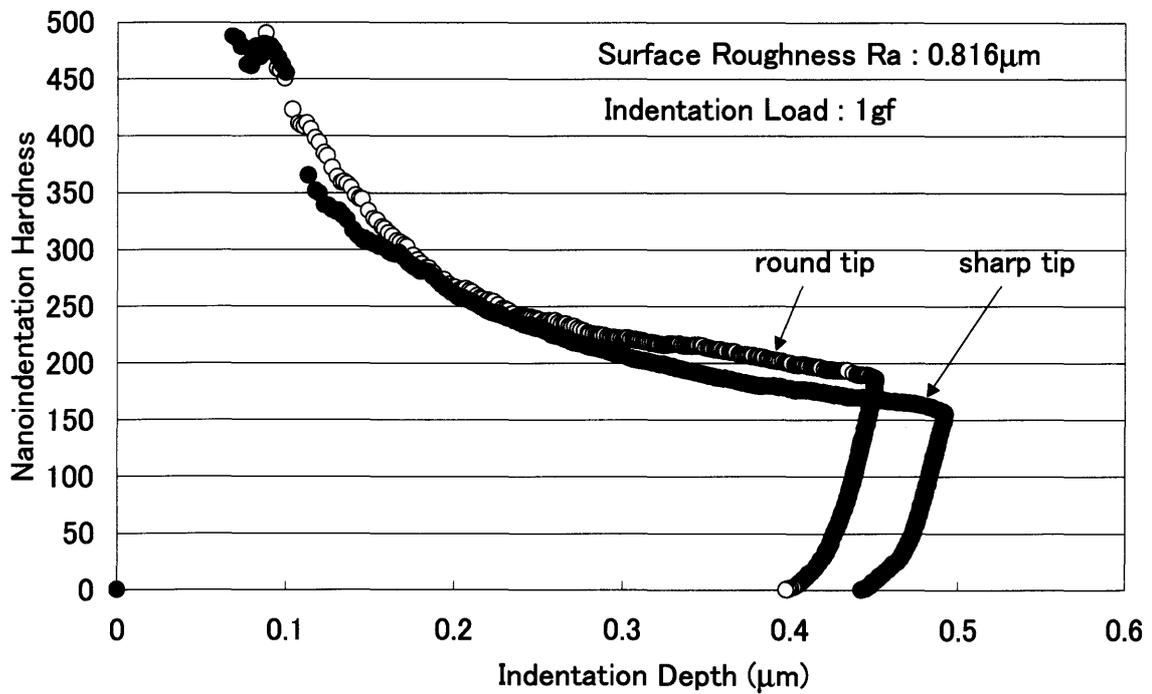


図 3-48 超微小硬さと圧子の押し込み深さとの関係  
(算術平均粗さ Ra : 0.816  $\mu\text{m}$ , 押し込み荷重 : 1gf)

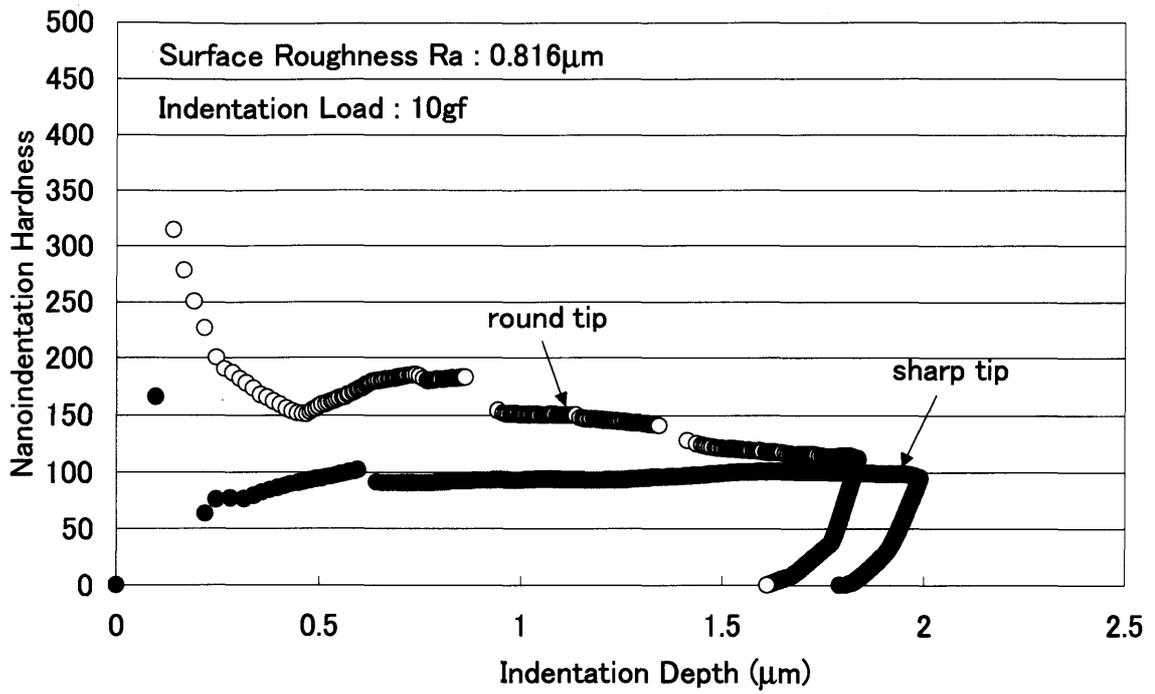


図 3-49 超微小硬さと圧子の押し込み深さとの関係  
 (算術平均粗さ Ra : 0.816  $\mu$  m, 押し込み荷重 : 10gf)

## 3.4.3 超微小硬さに及ぼす表面粗さの影響

図 3-50 から図 3-52 に、超微小硬さと算術平均粗さとの関係を示す。図 3-50 には、圧子の押し込み荷重が 100mgf の場合を、図 3-51 には、圧子の押し込み荷重が 1gf の場合を、図 3-52 には、圧子の押し込み荷重が 10gf の場合を示す。また、図 3-53 には、それらの結果をまとめて示す。各図中には圧子先端形状が sharp の場合と round の場合とを示す。以上の結果から、超微小硬さは圧子の押し込み荷重が大きい(概ね 1gf 以上)場合には、圧子先端形状が sharp の場合、round の場合ともに、算術平均粗さが増加しても超微小硬さの値はほぼ一定の値を示す傾向にある。このことは、超微小硬さの範囲においても圧子の押し込み荷重が概ね 1gf 以上になると、圧子によって試料表面が押し潰され、そのために面圧がほぼ一定の値を示すものと考えられる。これに対して圧子の押し込み荷重が小さい(本実験においては 100mgf) 場合、特に round tip の場合には、超微小硬さの値は大きく変動する傾向を示すことから、圧子の押し込み荷重が 100mgf 以下の場合には、本試験で使用した程度の round tip (理想的な圧子の中心軸方向に約 40nm 摩耗したもの)による測定は避けるべきであると考えられる。しかし、圧子の押し込み荷重が概ね 1gf 以上であれば round tip の場合であっても、それらの差異はほとんど認められないことから、round tip による測定は許容範囲内であり、問題はないものと考えられる。また、圧子の押し込み荷重が大きくなるほど低い超微小硬さの値を示すことも分かる。圧子先端形状については、先端形状が sharp の場合の方が round の場合よりもどの押し込み荷重においても小さな超微小硬さ値を示すが、これは、圧子先端が sharp であれば、圧子はより深く押し込まれ、その結果、低い超微小硬さの値を示すものと考えられる。

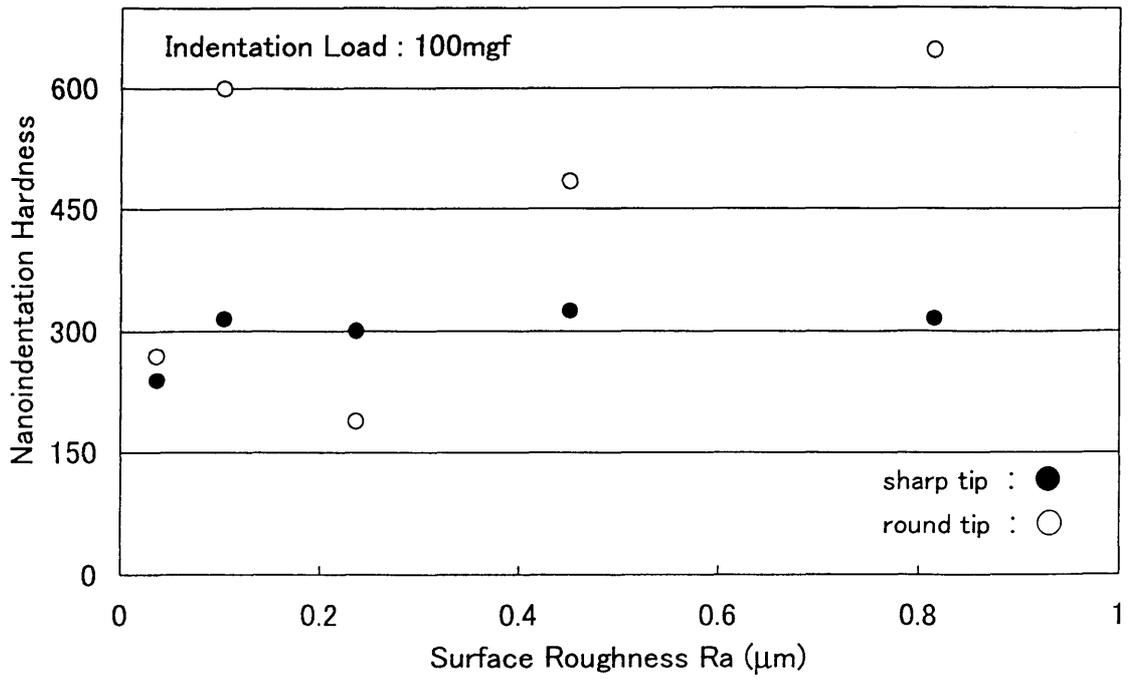


図 3-50 超微小硬さと算術平均粗さとの関係  
(押し込み荷重 : 100mgf)

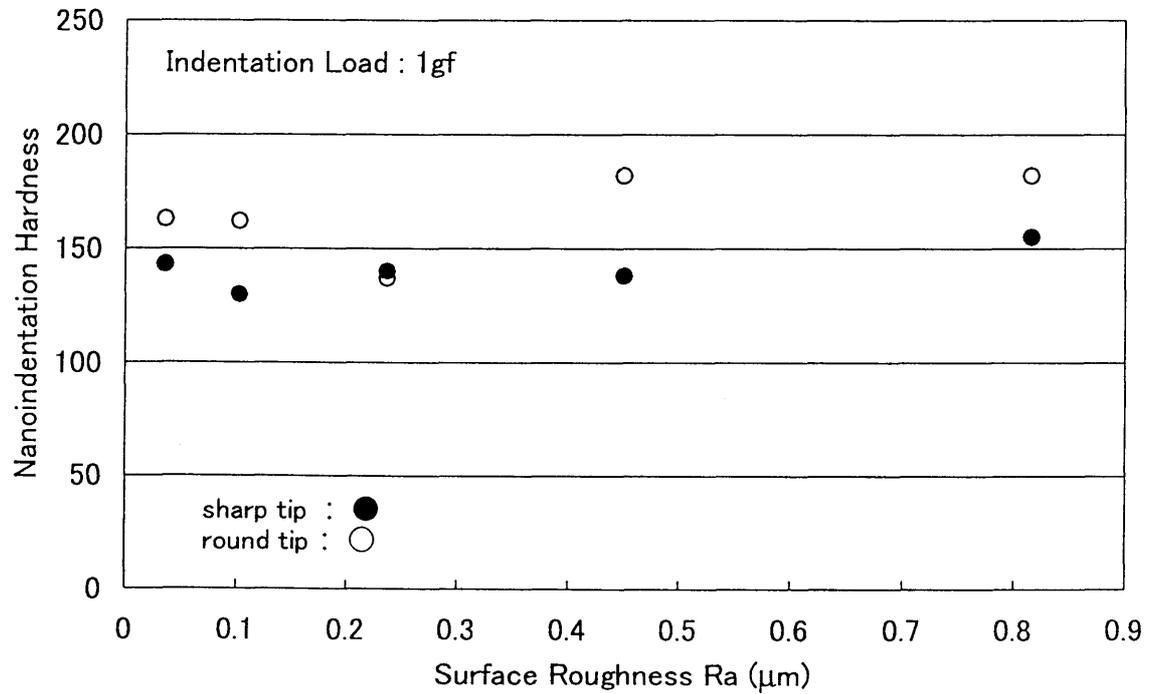


図 3-51 超微小硬さと算術平均粗さとの関係  
(押し込み荷重 : 1gf)

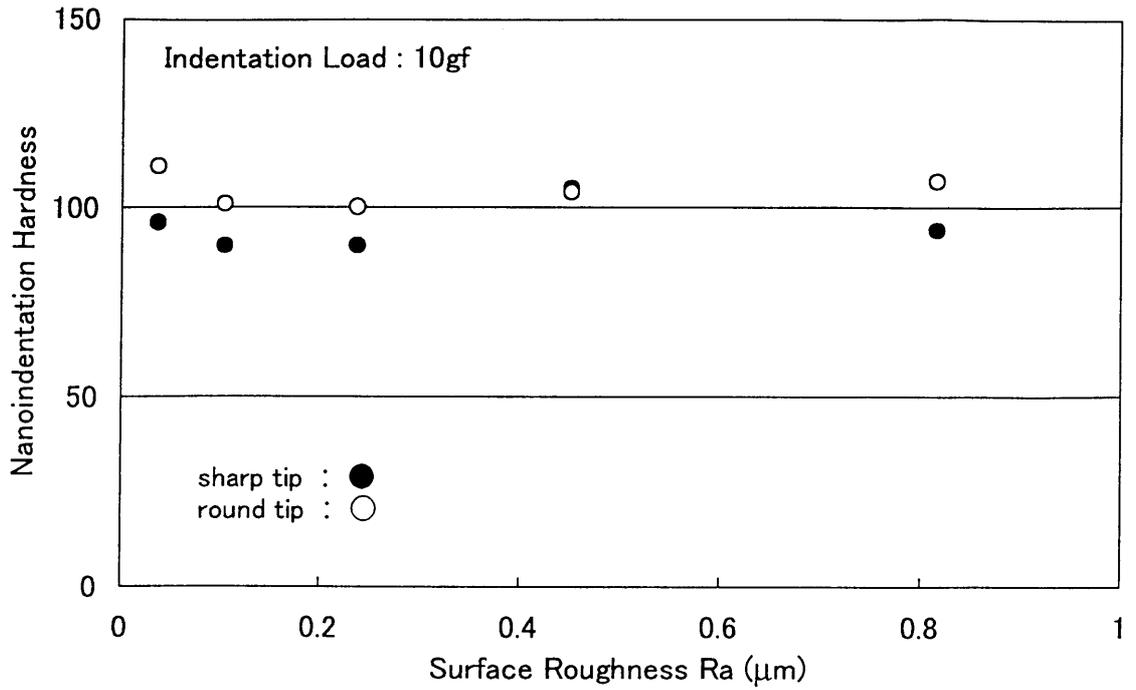


図 3-52 超微小硬さと算術平均粗さとの関係  
(押し込み荷重 : 10gf)

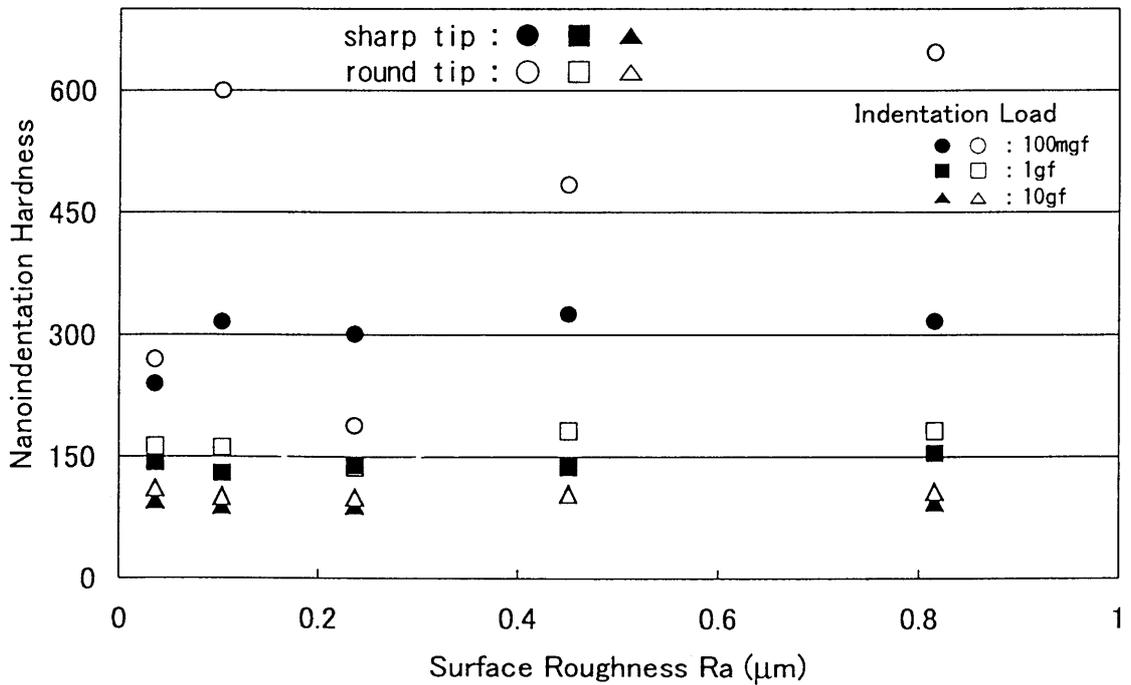


図 3-53 超微小硬さと算術平均粗さとの関係

## 3.5 小結

本章では、表面粗さや圧子先端形状の違いが、超微小硬さの値にどのような影響を及ぼすのかについて、以下のような結論を得た。

- (1) 各押し込み荷重において、表面粗さ（算術平均粗さ）が増加しても超微小硬さの値はほぼ一定の値を示す傾向にある。しかし、表面粗さの増加とともに超微小硬さの値の変動幅が大きくなる傾向がある。この結果を踏まえて、従来の研究の結果と比較検討すると、従来からの比較的高荷重領域においては、試料の表面粗さが硬さの値に影響を及ぼす結果を得ているのに対して、超微小荷重領域においては、ほとんど影響されない結果を得た。以上の点から、硬さ試験には、サイズによる効果が存在するというを確認した。
- (2) 高押し込み荷重と低押し込み荷重の場合とを比較すると、高押し込み荷重の方が低押し込み荷重の場合よりも低い超微小硬さ値を示し、且つ安定した値を示す。
- (3) 圧子先端形状の違いについては、超微小硬さの値に差異が生じることを確認した。一般的には、圧子先端形状が sharp な場合の方が round な場合と比較して、より深く押し込まれることから超微小硬さの値は小さくなる。圧子先端が sharp な場合と round の場合とを比較すると超微小硬さの値は大きく異なる値を示す。本試験結果の範囲内では圧子先端が摩耗している場合の方が理想的な圧子の場合と比較して約1.5倍の超微小硬さ値を示す場合がある。この点から、超微小荷重領域における硬さ測定を行う際には、使用する圧子の先端がどのような形状であるのかを把握してから測定を実施する必要があると考える。

参考文献

- (1) H.M.German: *Trans.of American Society for Steel Treating*, 4(1923) 329.
- (2) 町田周郎: ショア硬さ測定値に及ぼす各種の影響に関する研究(第11報, 試料表面および裏面のあらさが及ぼす影響): 日本機械学会論文集(第1部) 25-151 (1959) 207.
- (3) 町田周郎: 試料表面および裏面のあらさがロックウェルかたさに及ぼす影響: 日本機械学会論文集(第1部) 26-164 (1960) 578.
- (4) 町田周郎: 試料表面および裏面のあらさがビッカースかたさに及ぼす影響: 日本機械学会論文集(第1部) 26-161 (1960) 151.
- (5) 福田勝己, 加藤孝久, 植松卓彦, 富永敏文: ランダムな粗さを有する表面の超微小硬さ: 日本機械学会1999年度年次大会講演論文集Vol. V, 99-1 (1999) 329.
- (6) 超微小押し込み硬さ試験機 ENT-1100: ナノ・インデンテーション・テスター カタログ, 株式会社エリオニクス(1997)
- (7) 福田勝己, 加藤孝久, 植松卓彦, 富永敏文: ランダムな粗さを有する表面の超微小硬さに及ぼす圧子先端形状の影響: 日本機械学会東海支部通常総会講演会講演論文集, No.003-1 (2000) 359.

## 第4章 接触面の表面粗さを考慮した 解析による検討とその妥当性

### 4.1 緒言

超微小硬さ試験においては、押し込み荷重と圧子の押し込み深さとの関係から硬さ評価を行っているが、その硬さ値の算出方法については、いくつかの方法が提案されている。ここでは先ず、超微小硬さについて従来から行われている硬さ値を算出する方法および本研究においてどの硬さ算出方法を採用するかについて述べる。次に、その硬さ値の決定方法を踏まえて、表面粗さを考慮した場合の超微小硬さの解析について述べる。ここでは、モデルとして表面粗さを有する面と剛体面との2面の接触問題として捉え、接触時の表面粗さについては実際のくぼみ内部の表面粗さをSEMにより測定し、その測定値を用いて解析を行い、2面の接触状態を推定する。本章では、第3章の実験結果において超微小硬さの値は試料の表面粗さにあまり影響されず、ほぼ一定の値を示すことが明らかになった点について、その理由を明確にするために解析を試みた。

### 4.2 硬さ値算出に関する従来の研究と硬さ値の決定

本節では、超微小硬さ試験における従来から行われている硬さ値の算出方法と本研究における硬さ値の決定法について述べる。

#### 4.2.1 硬さ値算出に関する従来の研究

超微小硬さの範囲である押し込み荷重が10gf以下の荷重範囲について最初に試験機を開発し、研究を実施したのは M.Nishibori and K.Kinoshita<sup>(1)</sup>で、それを現在のシステムの原形までにしたのは D.Newey, M.A.Wilkins and H.M.Pollock<sup>(2)</sup>である。彼らは、押し込み荷重と押し込み深さとの関係を連続的に測定可能なシステムを構築した。しかし、この段階では安定した押し込み荷重と押し込み深さとを得るまでには至らなかった。その後、比較的安定した硬さ値を得るまでに改良を重ねたのは J.B.Pethica<sup>(3)</sup> である。彼は、押し込み荷重の制御に電磁石を採用することによって安定した圧子の動作 ( $2.5 \mu\text{N}$ ) を得て、また、押し込み深さ (変位) に静電容量型変位計を採用することによって高分解能 (2.5nm) を達成している。

#### 第4章 接触面の表面粗さを考慮した解析による検討とその妥当性

その後、J.B.Pethicaが改良を重ねて開発した試験装置は、後にNanoindenterとして市販されるに至り、現在での分解能は押し込み荷重が $0.5 \mu\text{N}$ 、押し込み深さ（変位）が $0.2\text{nm}$ にまで達成されている。この高分解能でしかも再現性のある非常に安定したデータが得られるような試験機とシステムが確立されてからは、このデータからいかに正確な硬さ値を算出するかの方法についての議論が活発に行われるようになった。

本来、硬さ $H$ の値は便宜的に押し込み荷重 $P$ をくぼみの表面積 $S$ で除することによって次式により定義している。

$$H = P / S \quad (4.1)$$

この点から考えると、硬さという値は、くぼみの表面積を圧子の押し込み深さから算出することによって決定される値であると言える。つまり、硬さの値を算出する場合には圧子の押し込み深さをいかに正確に測定するかが非常に重要であることになる。このことから、負荷-除荷過程における荷重と深さとの関係（荷重-深さ曲線）からいかに正確にくぼみの大きさを決定するかということが重要であると言える。

くぼみの表面積は、理想的には圧子の幾何学的な形状が決定されている（例えば三角すいBerkovich圧子の場合には、その多くが対稜角度が $115^\circ$ である）ために直接  $S=24.5h^2$  の関係を（3.1）式に代入することにより、

$$H_h = P / 24.5h^2 \quad (4.2)$$

の関係が得られる。ここで、 $h$ は、設定荷重（最大押し込み荷重）負荷時における圧子の押し込み深さである。この負荷時の状態を図に表したのが図4-1である。この図は、設定荷重の負荷時に試料がどのような変形をするのかについて軸対称のモデルとして示したものである。

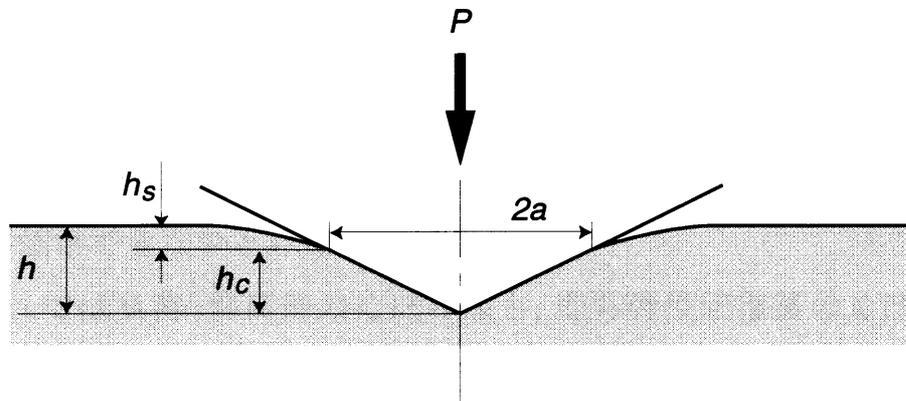


図4-1 荷重負荷時における試料変形状態の模式図

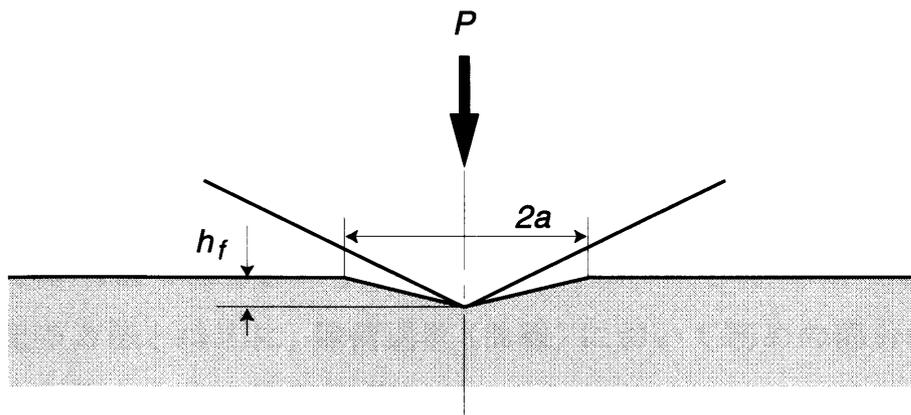


図4-2 荷重除荷時における試料変形状態の模式図

#### 第4章 接触面の表面粗さを考慮した解析による検討とその妥当性

J.B.Pethica, R.Hutchings and W.C.Oliver<sup>(4)</sup>は、走査型電子顕微鏡によってくぼみ深さが数十nmのくぼみを観察し、式(4.1)と式(4.2)とを各種材料を対象として比較検討を加えている。この結果、NiとAuについては式(4.1)と式(4.2)からの結果はほぼ良い一致を示すが、Siについては $H \approx 3H_h$ となることを示している。この原因として彼らは、NiとAuについては、押し込み荷重-押し込み深さ曲線において最大押し込み深さ量と弾性回復量とを比較するとその影響は無視できる程度に小さいが、Siについては、その影響は無視できない程度に大きいことを挙げている。このことから、材料の種類によっては、弾性回復量を考慮しなければ適切な評価ができないということになる。

さて、それでは負荷-除荷後のくぼみ深さ、即ち弾性回復後のくぼみ深さを正確に測定すれば、除荷後のくぼみの大きさを決定することが可能であろうか。図4-1では、最大押し込み荷重時の圧子と試料との状態を示している。これから、最大押し込み深さ $h$ は、圧子と試料とが接触している部分の深さ $h_c$ と圧子の周辺部が弾性変形している部分の深さ $h_s$ との和から求まる。図4-2は、設定荷重を負荷した後に除荷した状態を示している。これから、試料は図4-1の圧子の周辺部が弾性変形している部分の深さ $h_s$ の回復に加えてくぼみの内部も回復するために、この場合のくぼみの深さ $h_f$ は、圧子と試料とが接触している部分の深さ $h_c$ と比較してより浅くなることになる。ここで、負荷過程から除荷過程を経て、即ち図4-1から図4-2の状態を経る過程では、試料と圧子との接触面積は連続的に減少し続ける。N.A.Stilwell and D.Tabor<sup>(5)</sup>によれば、図4-1と図4-2のくぼみの直径 $2a$ を比較した場合、その直径はほとんど変化しないことが報告されている。即ち、このことから、くぼみの表面積は圧子の弾性変形等は無視すれば、幾何学的に求めることが可能であるということが分かる。

また、上記の方法とは別に、除荷過程(曲線)において初めの部分の勾配に注目し、その勾配等から硬さ値を議論している。

J.L.Loubet, J.M.Georges, O.Marchesini and G.Meille<sup>(6)</sup>は、Magnesium Oxideを対象としてI.N.Sneddon<sup>(7)</sup>が提案した「The elastic punch theory」を引用し、除荷過程(曲線)の最大押し込み荷重時における微係数 $S$ は、次式により与えられるとした。

$$S = (dP/dh)_{P-P_{max}} = \alpha \cdot Er \cdot A^{1/2} \quad (4.3)$$

ここで、 $Er$ は試料の等価ヤング率、 $\alpha$ は定数、 $A$ は接触面積である。また、圧子と試料との接触面積 $A$ は、接触している部分の深さ $h_c$ と比例関係にあるので微係数 $S$ は接触している部分の深さ $h_c$ で決定されることになる。以上より、接触している部分の深さ $h_c$ を式(4.2)の $h$ に代入することによって硬さ値を求めることができる。

これに関連して M.F.Doemer and W.D.Nix<sup>(8)</sup> は、圧子と試料とが接触している部分の深さ $h_c$ を実験的に求める方法を提案している。これは、除荷過程において除荷開始から最大押し込み荷重の約2/3までは除荷曲線はほぼ直線であると見なしても差し支えないとするもので、その部分の勾配を微係数 $S$ としても差し支えないとした。

これに対して W.C.Oliver and G.M.Pharr<sup>(9)</sup> は、上述のように除荷曲線の開始直後からの一部分を直線近似することには無理があるとして、次式を提案することによって解析的に微係数 $S$ を求める方法を提案した。

$$P = a (h - h_f)^m \quad (4.4)$$

ここで、 $a, h_f, m$ は、除荷曲線に関数に合致させる際に決定される定数である。彼らの提案は、M.F.Doemer and W.D.Nix<sup>(8)</sup> の提案と比較してより正確な勾配の値を求めることができる。

F.Frohlich, P.Grau and W.Grellmann<sup>(10)</sup> は、押し込み荷重と押し込み深さとの関係において、押し込み深さが $1 \mu\text{m}$ より大きな範囲において次式のような関係があることを示した。

$$P/h = B \cdot h + C \quad (4.5)$$

ここで、 $B, C$ は負荷過程の勾配を表す係数である。

稲村元則と鈴木敬愛<sup>(11)</sup> は、押し込み深さが数十nmの範囲まで、この関係が成立することを示した。また、ビッカース硬さ $HV400$ 以下の範囲においては、

上記の  $B$  と  $HV$  とは比例の関係にあることも示した。彼らは、式 (3.5) の  $P$  を  $h^2$  によって除することによって

$$P / h^2 = B + C / h \quad (4.6)$$

を提案している。

大村孝仁<sup>(12)</sup>は、押し込み荷重—押し込み深さ（変位）特性線と硬さとの関係について検討し、「見かけの硬さ  $H^*$ 」を次式のように定義している。

$$H^* = 0.1 F/S = 0.0038 F/d^2 \quad (4.7)$$

ここで、 $F$  (N) は押し込み荷重、 $S$  (mm<sup>2</sup>) は押し込み荷重負荷時のくぼみの表面積、 $d$  (mm) は、圧子の押し込み深さである。この  $H^*$  は、時系列的に求められるが一定の値にはならず、押し込み深さが浅ければ浅い程、大きな値を示すことになる。このように押し込み深さが浅い場合には、硬さの値が見かけ上大きな値となるとしている。この点について彼らは、「浅い押し込み（押し込み深さが浅い）では、押し込み荷重  $F$  に対する押し込み深さ  $d$  は硬さ  $HV$ （深い押し込みで定義される）から期待される値より浅くなる」に過ぎないのであって、硬さの値が高くなるわけではないとし、「従来から用いられている  $HV$  の定義式は深い押し込みの場合には良いがそのまま  $1 \mu\text{m}$  以下の浅い押し込みの場合に適用して意味のある量ではない」としている。そこで、押し込み荷重（彼らは単に、荷重と称している） $F$  と押し込み深さ（彼らは、侵入深さと称している） $d$  との関係を次式のように表している。

$$F = Ad + Bd^2 \quad \text{又は,} \quad F/d = A + Bd \quad (4.8)$$

ここで、 $A$ 、 $B$  は係数である。この上記の関係が押し込み深さ  $d$  が  $500\text{nm}$  以上で成立することは F.Frohlich, P.Grau and W.Grellmann<sup>(10)</sup> によって確認されているが、大村孝仁<sup>(12)</sup> は、この押し込み深さの範囲が数十  $\text{nm}$  以上まで評価が可能であることを実験的に確認した。

### 4.2.2 硬さ値の決定

以上に述べたように、硬さを決定する方法にはいくつかの提案がなされているが、上記の内容を踏まえて本論文においては、設定押込み荷重時のくぼみの対角線長さと除荷時のくぼみの対角線長さとがほぼ等しいことや荷重除荷時の初期および除荷終了時の圧子と試料との接触状態をも考慮し、総合的な見地から、設定押込み荷重（最大押込み荷重）時の押込み深さから超微小硬さHNを決定する方法を採用する。

### 4.3 表面粗さを考慮した解析

本節では、超微小硬さ値に表面粗さがどのような影響を及ぼすのかについて、解析モデルと解析方法について述べる。

超微小硬さ試験によって硬さ評価を行う場合に、その表面がどのような表面であるのかによって、その硬さ値は大きく異なる。即ち、その表面がどのような表面粗さを有するのかによって、それらの接触状態が異なり、その結果として表面粗さの違いが硬さ値に大きく影響を及ぼすものと考えられる。ここでは、微小なスケールにおいて、表面粗さ、特に算術平均粗さRaや荷重が変化した場合に、2面の接触状態がどのような傾向を示すのかについて詳細に検討を加える。

#### 4.3.1 解析モデルおよび解析方法

摩擦の研究において、真実接触部を形成する突起の変形は、その大部分が塑性域に入っていると仮定されることが多かったが<sup>(13)</sup>、もしも表面の突起の大部分が弾性接触状態にあるのであれば、塑性変形の繰り返しによる突起の疲れ破壊はほとんど生じないことになるが、この弾性接触状態の存在は実験的に確認されている。材料の表面に突起（表面粗さに相当する）を有する2面が接触する解析的研究には、J.A.Greenwood and J.B.P.Williamson<sup>(14)</sup> が提唱した Greenwood and Williamsonモデル（いわゆるGWモデル：以下本文中ではGWモデル）が多く採

第4章 接触面の表面粗さを考慮した解析による検討とその妥当性  
 用されている。本解析においてもGWモデルを基本として解析を行う。このGWモデルは、表面粗さを考慮した場合の接触問題を解析する際に表面粗さをランダムな関数として統計的に取り扱う方法で、面接触を取り扱う巨視的な表面の接触から、点接触を取り扱う微視的な表面の接触まで広範囲に適用が可能である。一般的にGWモデルは、表面の突起の相互作用を考慮していないために、局所的に接触部で発生する面圧が非常に大きくなり、相互の接触部の距離が小さくなった場合の点接触(よりマイクロな領域における接触)には適用しにくいと指摘されている。しかし、点接触において発生する変形(Hertz的な変形)を巨視的な観点から見ると、この変形こそが表面の突起の相互作用によって発生するものであり、GWモデルが微小な個々の突起の接触状態の解析に対して予想外に有効であり、精確な予測が可能であると考えられる。解析としては、より複雑な統計モデルを数学的に解析する方法がいくつかあるが、GWモデルによる解析はそれらの他のモデルによる解析と比較して大きな差がないことが確認されている<sup>(15)</sup>。そこで、本研究における解析においてもGWモデルを採用し、解析を行う。

表面の突起の接触状態を推定するために、GreenwoodとWilliamsonは、次式によって表される塑性指数 $\phi$ を定義した。

$$\phi = \frac{E_3}{H} \sqrt{\frac{\sigma_s}{\beta}} \quad (4-9)$$

ここで、 $E_3$ は2面の等価ヤング率、 $H$ は柔らかい方の材料の押し込み硬さ、 $\sigma_s$ は突起高さの標準偏差、 $\beta$ は突起の曲率半径である。なお、 $E_3$ は次式によって表される。

$$E_3 = \left\{ E_1 / (1 - \nu_1^2) + E_2 / (1 - \nu_2^2) \right\}^{-1} \quad (4-10)$$

ここで、 $E_1$ は弾性体のヤング率、 $E_2$ は剛体のヤング率、 $\nu_1$ は弾性体のポアソン比、 $\nu_2$ は剛体のポアソン比である。GWモデルによれば、塑性指数 $\phi$ が小さいほど弾性接触になりやすく、実用的な範囲の接触圧力においては、 $\phi < 0.6$ では弾性接触を、 $\phi > 1.0$ では塑性接触である。なお、本解析においては、 $E_1 = 21000$  (kgf/mm<sup>2</sup>)、 $\nu_1 = 0.3$ を用いた。

#### 第4章 接触面の表面粗さを考慮した解析による検討とその妥当性

図4-3に、本解析で採用する解析における接触モデルを示す。ここでは、2面の接触状態において、突起の高さは正規分布で近似できるものとする。また、近似した2面の突起の接触状態の模式図も併せて示す。ここでは、粗さを有する弾性体(下の面)とその粗さと比較してほとんど粗さを有しない剛体(上面で例えばダイヤモンド)との接触を考える。

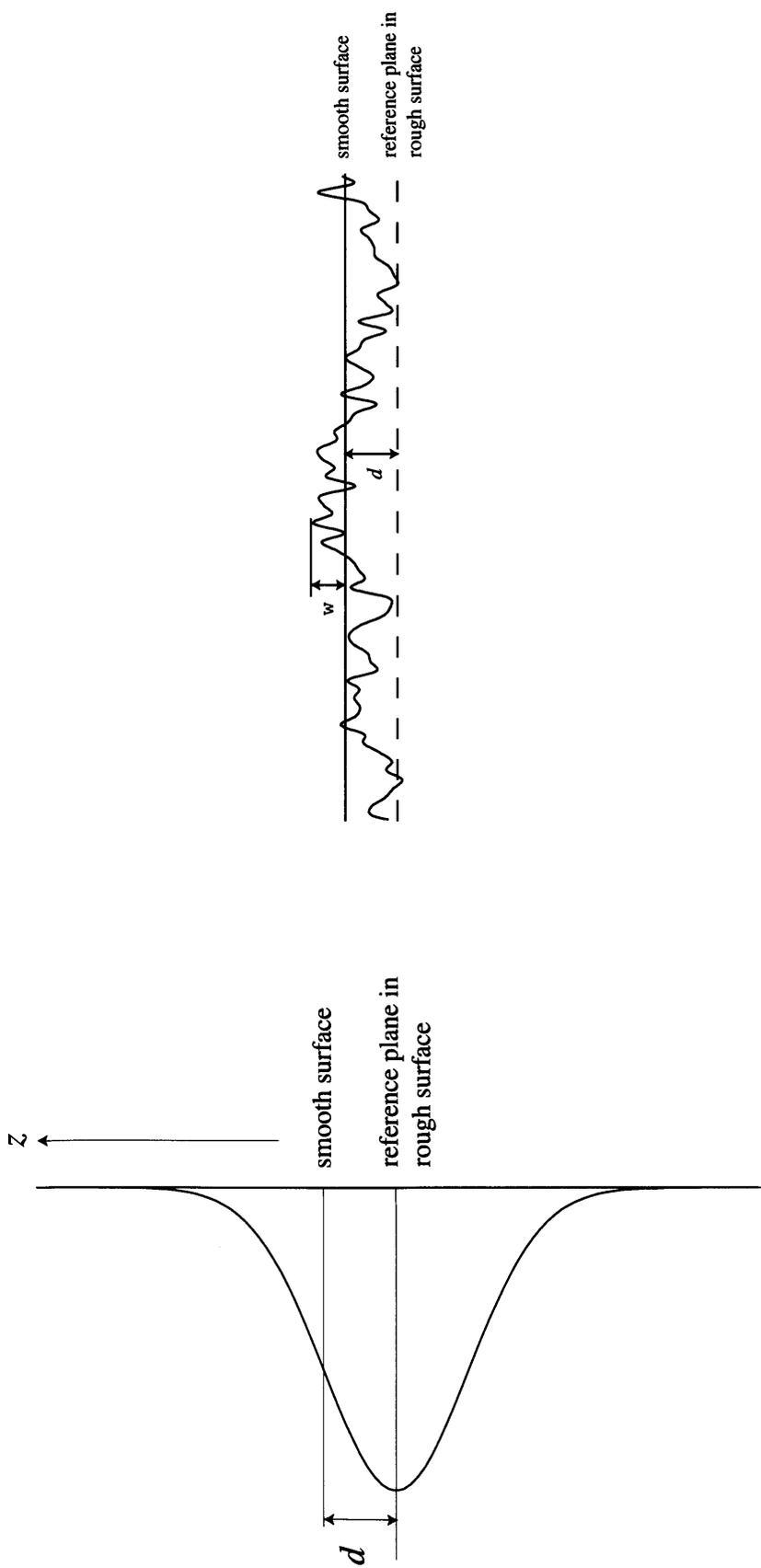


図4-3 解析における接触モデル

#### 第4章 接触面の表面粗さを考慮した解析による検討とその妥当性

図4-3に示した解析モデルについて解析を行う。この2面の接触状態において、弾性体の基準面から剛体の表面までの距離を $d$ 、剛体の表面から最大突起先端までの距離を $w$ とし、突起先端は球面と仮定してすべての突起の突起先端曲率半径が等しいと仮定すると、接触半径 $a$ 、接触面積 $A$ および荷重 $P$ は次式によって表される。

$$a = \sqrt{\beta w} \quad (4-11)$$

$$A = \pi\beta w \quad (4-12)$$

$$P = \frac{4}{3} (E_3 \beta^{1/2} w^{3/2}) \quad (4-13)$$

ここで、 $\beta$ は突起先端の曲率半径、 $w$ は剛体表面から突起先端までの距離、 $E_3$ は式(4-10)で表される等価ヤング率である。

また、突起の面密度を $\eta$ 、見かけの接触面積を $An$ とすると、全突起数 $N$ は次のように表される。

$$N = \eta An \quad (4-14)$$

接触領域における突起の接触数 $n$ は、図4-3において全突起数を $N$ 、突起の分布関数を $\phi(z)$ とすると

$$n = N \int_d^{\infty} \phi(z) dz \quad (4-15)$$

ここで、 $w = z - d$ 、 $A_1 = \pi\beta w$  とすると平均接触面積は

$$\int_d^{\infty} \pi\beta(z-d)\phi(z) dz \quad (4-16)$$

このことから、全接触面積 $A$ は平均接触面積に全突起数 $N$ を乗じることにより次のように与えられる。

$$A = \pi N \beta \int_d^{\infty} (z - d) \phi(z) dz \quad (4-17)$$

同様に、全荷重は次のように与えられる。

$$P = \frac{4}{3} N E_3 \beta^{1/2} \int_d^{\infty} (z - d)^{3/2} \phi(z) dz \quad (4-18)$$

式(4-18)に式(4-14)を代入し、両辺を見かけの接触面積  $A_n$  で除すると見かけの圧力  $P/A_n$  を得る。

$$\frac{P}{A_n} = \frac{4}{3} \eta E_3 \beta^{1/2} \int_d^{\infty} (z - d)^{3/2} \phi(z) dz \quad (4-19)$$

また、真実接触面積  $A_r$  と見かけの接触面積  $A_n$  との比  $A_r/A_n$  は次のように与えられる。

$$\frac{A_r}{A_n} = \pi \eta \beta \int_d^{\infty} (z - d)^{3/2} \phi(z) dz \quad (4-20)$$

式(4-20)により求めた  $A_r/A_n$  を次式に代入することにより、 $W/A_r$  が求まる。

$$H = W / A_n = (W / A_r) (A_r / A_n) \quad (4-21)$$

上記の導出した式によって解析を行う。以下に本解析における方法(手順)を示す。まず、式(4-10)によって等価ヤング率  $E_3$  を求める。次にGWモデルのパラメータとして、突起高さの標準偏差  $\sigma$ 、突起先端の平均曲率半径  $\beta$ 、剛体表面から突起先端までの距離  $w$  から接触面積および荷重を求める(式4-12)(式4-13)。また、突起の面密度を  $\eta$ 、見かけの接触面積を  $A_n$  として全突起数を求める(式4-14)。この全突起数に、 $d$  から  $\infty$  まで突起の分布関数を積分して乗ずると接触領域における突起の接触数  $n$  が求まる(式4-15)。これより平均接触面積を求め(式4-16)、これに全突起数を乗じると全接触面積が求まる(式4-17)。同様に全荷重も(式4-18)のように求まる。(式4-18)(式4-14)から見かけの圧力  $P/A_n$  が求まる(式4-19)。また、真実接触面積  $A_r$  と見かけの接触面積  $A_n$  と

第4章 接触面の表面粗さを考慮した解析による検討とその妥当性の比： $Ar/An$ は式(4-20)として求まる。この $Ar/An$ の値と実験によって求めた $W/An$ を式(4-21)に代入することによって $W/Ar$ が求まる。以上から、次の各値が得られる。

1. 真実接触面積 $Ar$ と見かけの接触面積 $An$ との比： $Ar/An$
2. 荷重 $W$ と真実接触面積 $Ar$ との比(真実接触部の平均圧力)： $W/Ar$

本解析は、弾性接触のモデルとして最も一般的なGWモデル<sup>16)</sup>を採用する。このGWモデルは弾性解析のモデルであるが、本解析においては、接触時の表面粗さを従来の研究では行われていない実際のくぼみ内部の粗さ(除荷後の粗さ)を採用することによって、より実際に近い条件で解析を行った。以上の解析手順によって、 $Ar/An$ と $W/Ar$ (真実接触部の平均圧力)とを求めた。表4-1に、各データ毎の突起高さの標準偏差 $\sigma$ 、突起先端の平均曲率半径 $\beta$ 、突起の面密度 $\eta$ を示す。

表 4-1 突起のデータにおける $\sigma$ 、 $\beta$ および $\eta$

算術平均粗さ $Ra, \mu\text{m}$	押し込み荷重 $W, \text{gf}$	突起高さの標準偏差 $\sigma, \mu\text{m}$	突起先端の平均曲率半径 $\beta, \mu\text{m}$	突起の面密度 $\eta, /\mu\text{m}^2$
0.036	1	0.015791	0.354977	9.743089
	2	0.022143	0.124654	29.346806
	5	0.022328	0.182706	14.739566
	10	0.036970	0.169686	14.948872
0.082	1	0.013181	0.185588	18.91053
	5	0.023784	0.069779	33.19776
0.103	1	0.039175	0.372657	3.861079
	2	0.015653	0.248583	23.370886
	5	0.042822	0.214489	8.581213
	10	0.037240	0.180407	9.433718
0.142	1	0.012725	0.100333	28.77632
	5	0.013086	0.096823	29.45692
	10	0.010348	0.077353	13.9553
0.237	5	0.014482	0.062671	40.06942
	10	0.012372	0.112918	10.02772

## 4.3.2 解析結果の検討と考察

以下に解析結果を示す。本研究では算術平均粗さ  $R_a$  が  $R_a=0.036 \mu\text{m}$ ,  $R_a=0.082 \mu\text{m}$ ,  $R_a=0.103 \mu\text{m}$ ,  $R_a=0.142 \mu\text{m}$ ,  $R_a=0.237 \mu\text{m}$  の場合について解析を行った。

図 4-4, 図 4-5 に, 真実接触面積  $A_r$  と見かけの接触面積  $A_n$  との比:  $A_r/A_n$  と押し込み荷重との関係を示す。図 4-4 は  $R_a=0.036 \mu\text{m}$  の場合, 図 4-5 は  $R_a=0.103 \mu\text{m}$  の場合である。また, 図 4-6 には以上の結果と他の3種類の解析結果とをまとめて示す。この真実接触面積  $A_r$  と見かけの接触面積  $A_n$  との比:  $A_r/A_n$  は, 接触面積において実際にどの程度2面が接触しているのかという割合を表している比である。図 4-4, 図 4-5 から, どちらの  $R_a$  においても,  $A_r/A_n$  は押し込み荷重が小さくなるに従って大きな値を示す傾向にあることが分かる。このことは, 押し込み荷重が小さくなると真実接触面積の割合が増加するというを示している。また, 図 4-6 から, どの  $R_a$  においても,  $A_r/A_n$  と押し込み荷重との関係はほとんど同様な傾向を示すことが分かる。

図 4-7, 図 4-8 に, 荷重  $W$  と真実接触面積  $A_r$  との比:  $W/A_r$  と押し込み荷重との関係を示す。図 4-7 は  $R_a=0.036 \mu\text{m}$  の場合, 図 4-8 は  $R_a=0.103 \mu\text{m}$  の場合である。この荷重  $W$  と真実接触面積  $A_r$  との比:  $W/A_r$  は, ミクロンオーダの接触部分(真実接触部)に作用する平均的な圧力である。図 4-7, 図 4-8 から, どちらの  $R_a$  においても,  $W/A_r$  は押し込み荷重が大きくなるに従って大きな値を示す傾向にあることが分かる。

図 4-4 から図 4-8 の結果から,  $A_r/A_n$  と押し込み荷重との関係はどの算術平均粗さ  $R_a$  においてもほとんど同様の傾向を示す。このことは,  $R_a$  が変化しても2面の接触状態はほとんど変化しないということの意味する。即ち, このことから超微小荷重領域においては, 硬さの値は  $R_a$  によらずほぼ一定の値を示すものと考えられる。また, 押し込み荷重が小さくなるに従って荷重と真実接触面積との比  $W/A_r$  も小さな値を示すが, これに対して真実接触面積と見かけの接触面積との比  $A_r/A_n$  は大きな値を示す。硬さは式(4-21)によって表されるが, 押し込み荷重が小さくなると硬さの値は大きくなる。このことは,  $A_r/A_n$  の比の変化の度合いの方が  $W/A_r$  の比の変化の度合いと比較して, その度合いが大きいことを示しており,

#### 第4章 接触面の表面粗さを考慮した解析による検討とその妥当性

その結果として硬さの値が大きくなるものとする。

本解析では、2面の接触において実際に測定した硬さの値と接触後の粗さ（くぼみ内部の表面粗さ）を用いることによって、実測が非常に困難である真実接触部の圧力と真実接触面積とを解析により求めて、2面の接触状態を推測した。これは、実際の硬さ測定における過程、すなわち、圧子のある押し込み荷重で試験面に押し込む際に、圧子と試験面との真実接触部は徐々に増加し、それと同時に圧力も増大する。その後塑性域になると圧力はほぼ一定になり、この結果、荷重と真実接触面積とは比例関係になるものとする。ここで、圧力がほぼ一定になるということは、塑性域になると圧力は表面粗さには無関係であるということになる。しかし、本解析においては、荷重の増加とともに真実接触面積と見かけの接触面積との比は減少する傾向を示している。これは、仮に硬さの値が同じ場合であっても、式(4-21)からも分かるように、硬さは(真実接触部の圧力： $W/Ar$ )と(見かけの接触面積に対する真実接触面積の割合： $Ar/An$ )とを乗じた値であることから、 $W/Ar$ が大きくなると $Ar/An$ は小さくなり、逆に、 $W/Ar$ が小さくなると $Ar/An$ は大きくなる。同じ硬さの値を示す場合であっても、 $W/Ar$ と $Ar/An$ の割合が異なるのは表面粗さの大小によるものであるとする。

この点を踏まえて、本解析においては表面粗さを考慮して解析を行い、2面の接触状態を推測した。これより、マイクロなスケールの接触状態においては、荷重が小さくなると真実接触面積の割合は多少大きくなるが約2～6%の範囲内にあり、真実接触部における平均圧力も2000～4500 (kgf/mm<sup>2</sup>) の範囲内の値を示し、本解析結果は、表面粗さを考慮した2面の接触状態を比較的良く反映しているものとする。超微小硬さが対象としているような微小な荷重領域ではマイクロな真実接触部が重要な役割を持つことから、この種の解析においては、本解析で求めた真実接触部における圧力(塑性流動圧力)を問題の対象としなければならないものとする。

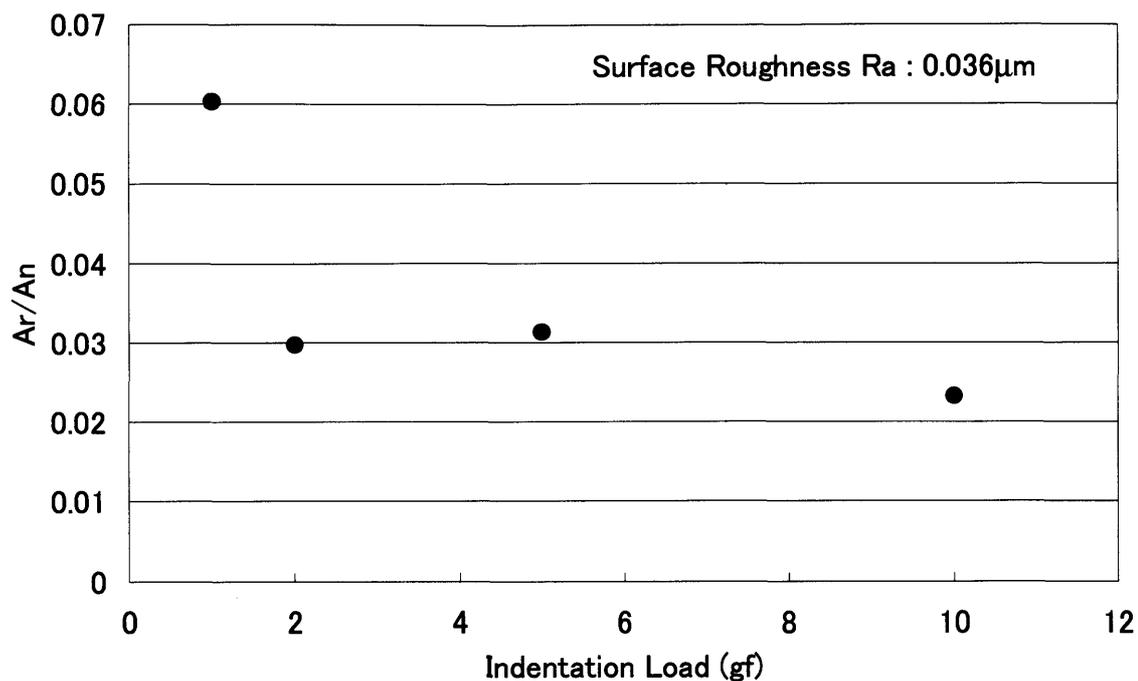


図 4-4  $A_r/A_n$  と押し込み荷重との関係 ( $R_a=0.036 \mu\text{m}$ )

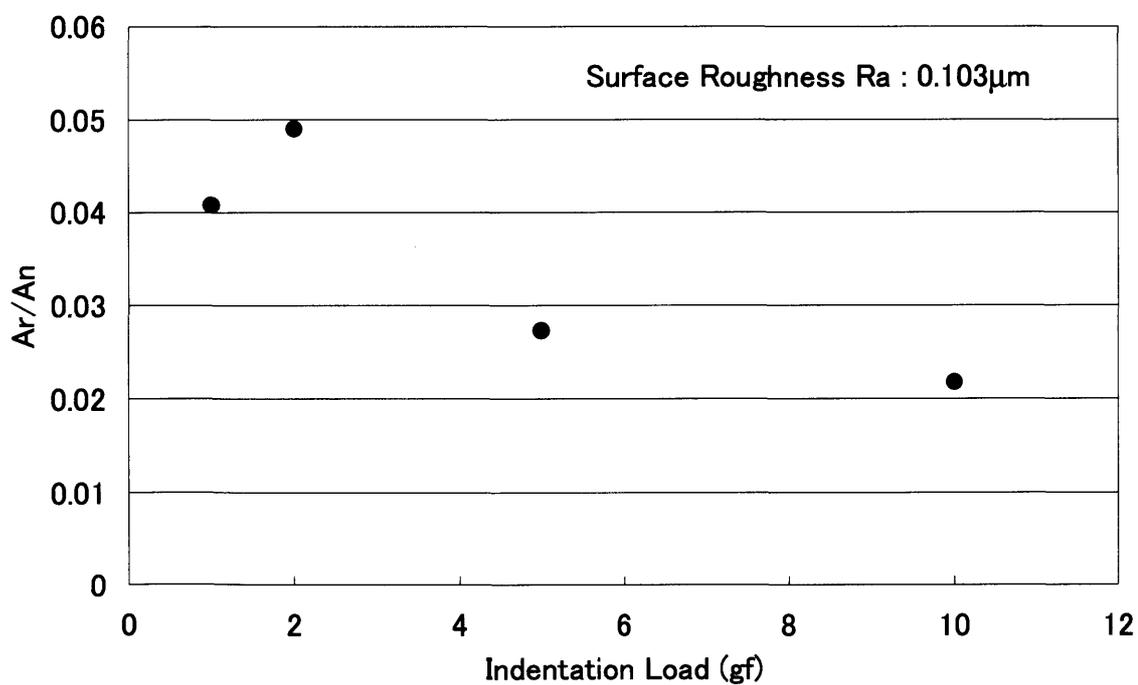


図 4-5  $A_r/A_n$  と押し込み荷重との関係 ( $R_a=0.103 \mu\text{m}$ )

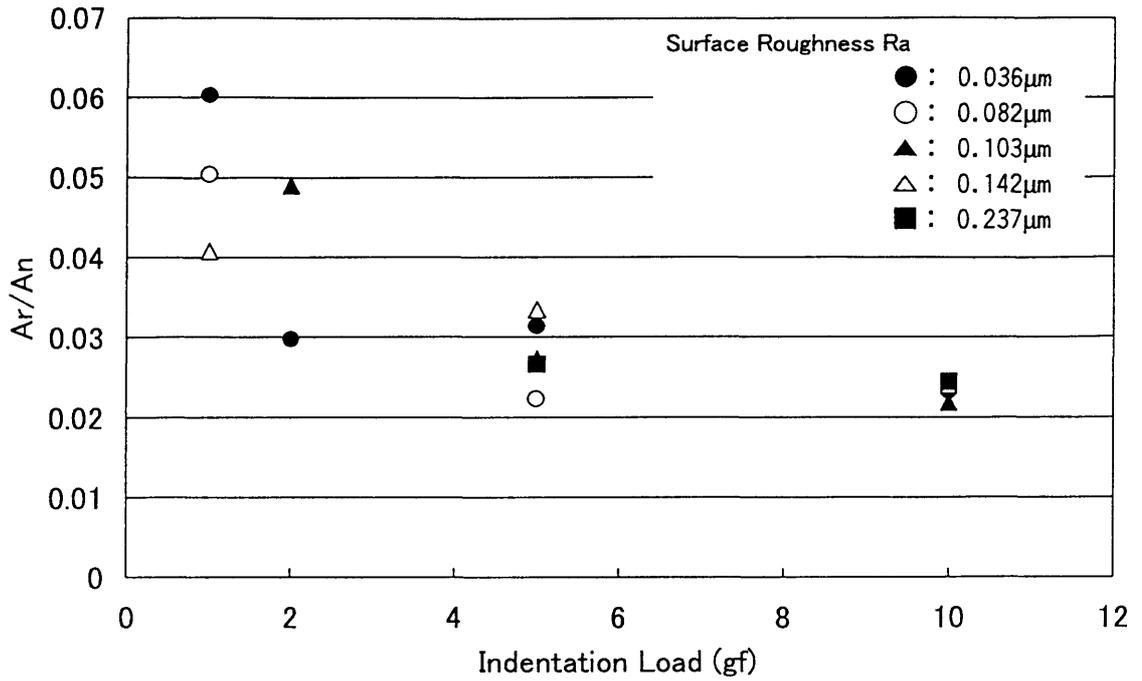


図 4-6  $Ar/An$ と押し込み荷重との関係

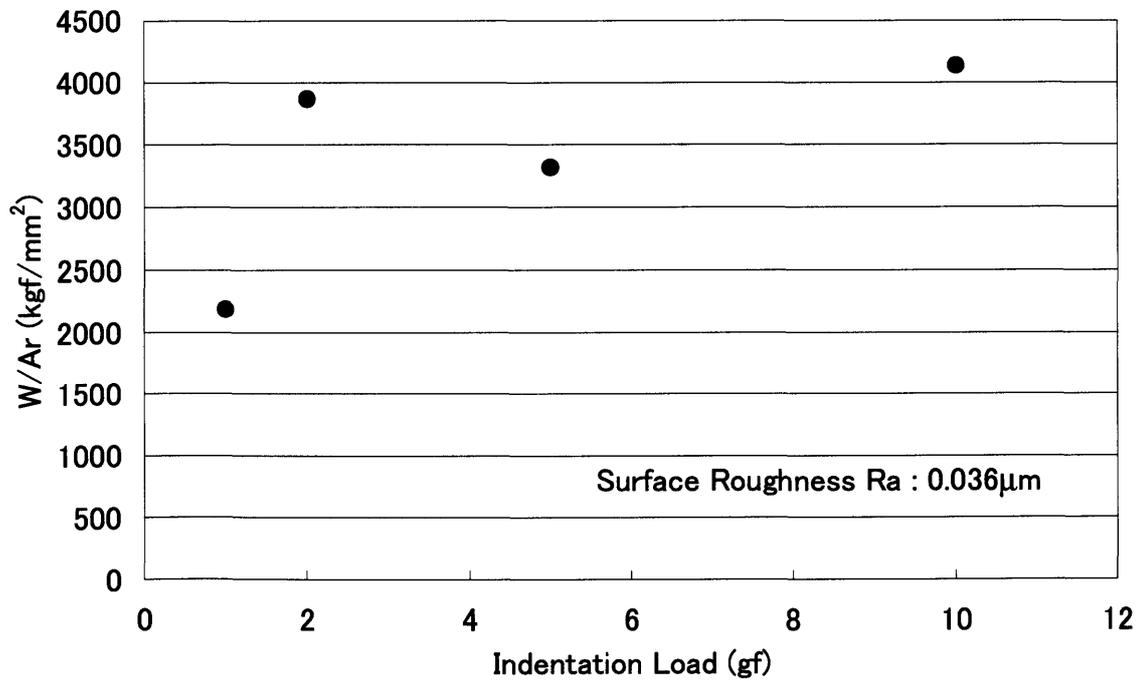


図 4-7  $W/Ar$ と押し込み荷重との関係 ( $Ra=0.036 \mu\text{m}$ )

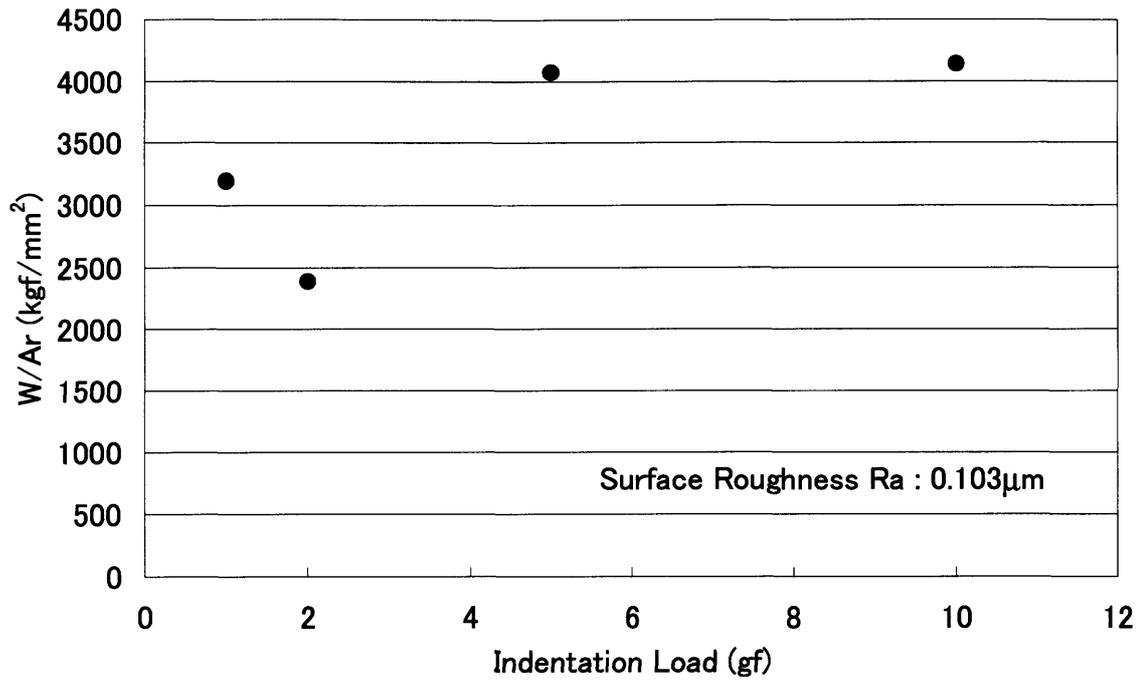


図 4-8  $W/Ar$  と押し込み荷重との関係 ( $Ra=0.103 \mu m$ )

#### 4.4 超微小硬さ試験法への提案

前節では、表面粗さを考慮した解析を行い、その2面の接触状態を推定した。その解析によって、マイクロな接触状態においては、真実接触部における圧力や真実接触面積が表面粗さによって変化することが確認できた。超微小荷重域における硬さ試験においては、その対象とする測定面がどのような性質を有するのか、特にどのような表面粗さを有しているのかが測定結果に大きく影響を及ぼすものと考えられる。

前節で求めた解析結果から、マイクロな突起の接触部においては非常に高い面圧が発生していることが分かった。このことから、突起が実際に支持できる面圧が推測でき、マイクロな接触においてはこのような面圧によって硬さを評価することも今後重要になるものと考えられる。

#### 4.5 小結

本章では、第3章の実験結果、即ち、超微小硬さの値は試料の表面粗さにあまり影響されずに、ほぼ一定の値を示すことを検証するために解析を試みた。ここでは、解析モデルから表面粗さを考慮した解析によって2面の接触状態を推定し、超微小硬さ試験のようなマイクロな接触においては、押し込み荷重が小さくなるに従って、真実接触面積と見かけの接触面積との比は増加する傾向を示すことが明らかになった。また、表面粗さが変わっても、真実接触面積と見かけの接触面積との比はほとんど変わらない傾向を示すことが明らかになった。以上の解析結果から、マイクロな接触においては真実接触面積の割合が本実験の範囲内においては、 $R_a$ が $0.036\ \mu\text{m}$ の場合には2～6%、 $R_a$ が $0.103\ \mu\text{m}$ の場合には2～5%の値を示し、また、真実接触部の平均圧力は約2000～4500 (kgf/mm<sup>2</sup>) の範囲内の高い面圧の値を示すことが明らかになった。

参考文献

- (1) M.Nishibori and K.Kinoshita : *Thin Solid Films*, 48 (1978) 325.
- (2) D. Newey, M. A. Wilkins and H. M. Pollock : *J. Phys. E:Sci. Instrum.* , 15 (1982) 119.
- (3) J. B. Pethica : in *Ion Implantation into Metals*, (ed.by V.Ashworth, W.Grant and R. Proctor) Pergamon Press, Oxford (1982) 147.
- (4) J. B. Pethica, R. Hutchings and W. C. Oliver : *Phil. Mag.*, A48 (1983) 593.
- (5) N. A. Stilwell and D. Tabor : *Proc. Phys. Soc. London*, 78 (1961) 169.
- (6) J. L. Loubet, J. M. Georges, O. Marchesini and G. Meille : *Trans. ASME, J. Tribol.*, 106 (1984) 43.
- (7) I. N. Sneddon : *Int. J. Eng. Sci.*, 3 (1965) 47.
- (8) M. F. Doemer and W. D. Nix : *J. Mater. Res.*, 1 (1986) 601.
- (9) W. C. Oliver and G. M. Pharr : *J. Mater. Res.*, 7 (1992) 1564.
- (10) F. Frohlich, P. Grau and W. Grellmann : *Phys. stat. sol.*, (a), 42 (1977) 79.
- (11) 稲村元則, 鈴木敬愛 : 生産研究, 42 (1990) 257.
- (12) 大村孝仁 : 高温超微小押込試験と Silicon の圧痕形成機構, 東京大学学位論文 (1996)
- (13) バウデン・テイバー : 固体の摩擦と潤滑, 丸善 (1961) 5.
- (14) J. A. Greenwood and J. B. P. Williamson : *Proc. R. Soc. London*, A295, (1966) 300.
- (15) J. I. McCool : *Wear*, 107 (1986) 37.
- (16) K. L. JOHNSON : *Contact mechanics*, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, (1985) 398.
- (17) 野木 高, 加藤孝久 : 弾性接触の限界に及ぼす硬質薄膜の影響 (第2報) : トライボロジスト, 42-3 (1997) 225.

## 第5章 超微小硬さの実用面への応用

本章では、本論文の主題である「超微小硬さ」が、工業的にどのような分野において実用化され応用されているのかについて、具体的な例を2例挙げて検討を加える。

## 5.1 TiN膜の超微小硬さ評価<sup>(1)~(3)</sup>

### 5.1.1 はじめに

近年、各種セラミックス材料は、機械的、電氣的、熱的に優れた特性を示す新たな機能材料として広範囲に渡って実用化されている。特に材料の表面に非常に硬く薄いセラミックコーティング膜を形成させることによって、表面層の機械的特性や材料の強度特性を改善する技術が進み、各種セラミックコーティング膜が開発されている。その中でも硬質膜として多く用いられているものに窒化チタン膜(TiN膜)がある。TiNを成膜する一つの方法としてイオンプレーティング法があるが、これは1960年代初頭に宇宙機器等の真空状態で使用される軸受の摩擦部分に金や銀を成膜することによって耐摩耗性や潤滑性を保持させるために開発された成膜方法である。その後、この方法によって高速度工具鋼の切削工具(ホブ、エンドミル、タップ、ドリル等)の表面にTiNを成膜し、切削工具の強度特性を向上させることを目的に、TiN膜を施した切削工具が実用化されている。この膜の機械的な特性を詳細に把握することは重要な課題であるが、その評価方法については確立されていないのが現状である。特に表面をいかに評価し、把握するのかということに関連して、各種の機械的強度特性との関係から硬さは非常に重要である。実際には、膜の評価方法の一つとして、硬さによる評価方法は比較的簡便<sup>(4)</sup>であるという点から多く採用されているが、評価方法として確立されているとは言い難い。

表面やコーティング膜を評価する上で硬さ特性を把握することは重要であるが、詳細な検討がなされていない。特に超微小硬さによって表面やコーティング膜を評価する場合には、圧子の押込みによって形成されるくぼみが非常に小さくなるために、くぼみの同定が困難になる場合が多い。このために、従来からの方法(くぼみの対角線長さを測定し、硬さ値を算出する)では硬さ測定が困難にな

る場合が多い。そのために、通常ではくぼみのSEM<sup>(5)</sup>(Scanning Electron Microscopy: 走査型電子顕微鏡) 観察や押し込み荷重-圧子の押し込み深さ特性等からその特性を明らかにしている場合が多い。

超微小硬さによって表面やコーティング膜を評価する場合には、試料の弾性回復量や圧子先端の曲率半径、形状の影響等を考慮することが不可欠であり、従来から行われている押し込み荷重除荷後のくぼみの対角線長さの測定による評価だけでは不十分である。これに加えて圧子の押し込み過程(負荷過程)および除荷過程における押し込み荷重と押し込み深さとの関係をも考慮に入れて評価を行う必要があると考える。本項では、硬質コーティング膜として膜厚さの異なる数種類のTiN膜を測定対象として、圧子先端の形状の異なるダイヤモンド三角すい圧子を用いて、微小な押し込み荷重によってくぼみを形成させ、その時の押し込み荷重と押し込み深さとの関係やくぼみのSEM観察による解析等から、TiN膜厚さや圧子先端の形状が超微小硬さに及ぼす影響について明らかにする。

### 5.1.2 試験装置および試験方法

本実験において超微小硬さを測定するために使用した試験機は、第2章で既に述べたものと同じ試験機を使用して測定を行っているために、ここでは試験機の簡単な記述だけに留める。

試験機は、超微小押し込み硬さ試験機(エリオニクス社製: ENT-1100)で、通常、ダイヤモンド三角すい圧子(稜間角度:  $115^\circ$ )を試料の試験面に設定荷重で押し込む。その時の圧子の押し込み深さを変位計(分解能0.3nm)により測定することによって、押し込み荷重と圧子の押し込み深さとの関係を連続的に測定し、試験面の押し込み硬さ特性を評価するものである。使用した圧子は稜間角 $\theta = 115^\circ$ のダイヤモンド三角すい圧子であるが、特に本項では圧子先端形状の違いの影響を解明することを目的の一つとしていることから、1)ほとんど使用していない圧子(理想的な圧子形状から考えると、圧子の中心軸方向に数nm摩耗したもの(図2-3参照)で、以下sharp tipと称す: 図中sharp tipと示してある測定点)と、2)かなりの頻度で使用した圧子(圧子の中心軸方向に約40nm摩耗したもの(図2-4参照)で、以下round tipと称す: 図中round tipと示して

ある測定点)の2種類の圧子を使用した。押し込み荷重は10mgf, 20mgf, 50mgf, 100mgf, 200mgf, 500mgf, 1gf, 2gf, 5gf, 10gfの10段階とした。

### 5.1.3 試験試料

本実験で使用した試料は、炭素鋼(S45C)の硬さ基準片(ビッカース硬さで約150の光沢面)を基材として、その表面上にスパッタリング法によって成膜したTiN膜である。表5-1に基材の化学成分の分析結果を、表5-2にTiN膜の成膜条件を示す。TiN膜の膜厚さは、0.05  $\mu\text{m}$ , 0.1  $\mu\text{m}$ , 0.2  $\mu\text{m}$ , 0.5  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$ の7種類である。なお、硬さ測定の実験はTiN膜の表面をアセトンによって清浄した清浄面で実施した。

表 5-1 基材の化学成分の分析結果

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.45	0.19	0.78	0.018	0.015	0.11	0.05	0.17

表 5-2 TiN膜の成膜条件

成膜装置	マグネトロンスパッタ
導入ガス	Ar (純度 99.9995%)
RF パワー	0.8 kW
成膜レート	0.15 nm/s
動作圧力	$6 \cdot 10^3$ torr
ターゲット	TiN

図 5-1 から図 5-3 に、*TiN* 膜表面の SEM 写真の一例を示す。図 5-1 は *TiN* 膜厚さが  $0.5 \mu\text{m}$  の場合、図 5-2 は *TiN* 膜厚さが  $1 \mu\text{m}$  の場合、図 5-3 は *TiN* 膜厚さが  $5 \mu\text{m}$  の場合である。特に *TiN* 膜厚さが  $5 \mu\text{m}$  の場合には、膜自体が柱状の構造をしているために膜表面に多くの柱状の隆起が観察される。

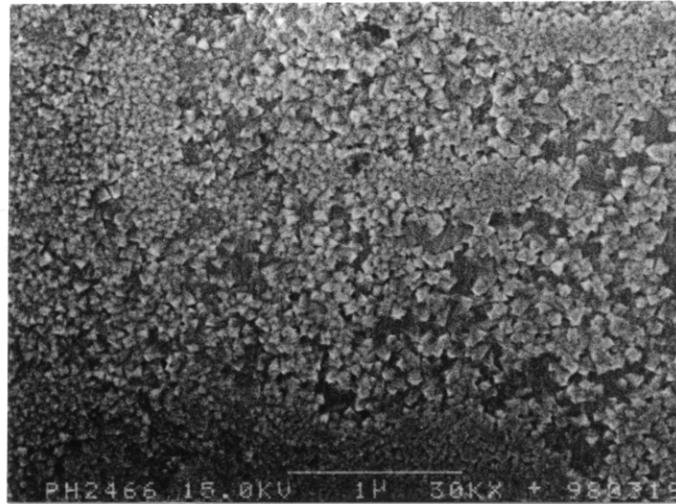


図 5-1 *TiN* 膜表面の SEM 写真 (*TiN* 膜厚さ :  $0.5 \mu\text{m}$ )

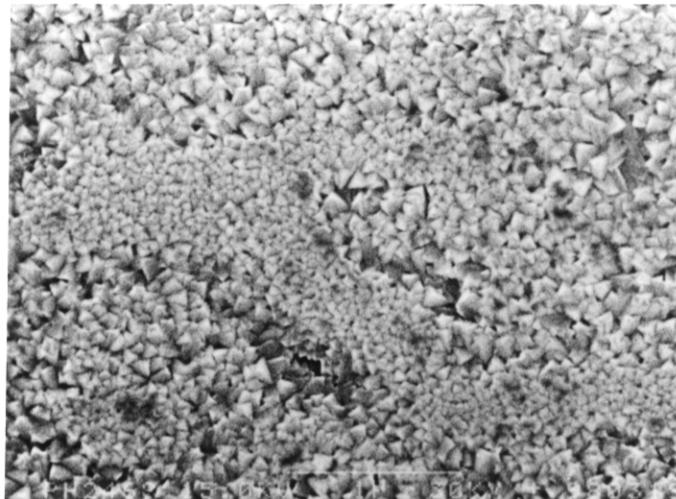


図 5-2 *TiN* 膜表面の SEM 写真 (*TiN* 膜厚さ :  $1 \mu\text{m}$ )



図 5-3 TiN膜表面のSEM写真 (TiN膜厚さ : 5  $\mu\text{m}$ )

#### 5.1.4 TiN膜厚さの影響

図 5-4 から図 5-10 に、押し込み荷重と圧子の押し込み深さとの関係を示す。図 5-4 は TiN 膜厚さが 0.05  $\mu\text{m}$  の場合、図 5-5 は 0.1  $\mu\text{m}$  の場合、図 5-6 は 0.2  $\mu\text{m}$  の場合、図 5-7 は 0.5  $\mu\text{m}$  の場合、図 5-8 は 1  $\mu\text{m}$  の場合、図 5-9 は 2  $\mu\text{m}$  の場合、図 5-10 は 5  $\mu\text{m}$  の場合である。各図中には、各設定押し込み荷重における押し込み荷重と圧子の押し込み深さとの関係が連続的に示してある。これより、押し込み荷重の増加とともに圧子の押し込み深さも増加し、設定荷重の負荷時までの押し込み荷重と押し込み深さとの関係は、押し込み荷重の大小によらずにほぼ同様の特性線を示すことが分かる。また、押し込み深さについては、膜厚さが 1  $\mu\text{m}$  までは押し込み荷重が 10gf の場合に約 1.4  $\mu\text{m}$  であるのに対し、膜厚さが 2  $\mu\text{m}$  以上の場合には押し込み深さが浅くなり、膜厚さが 5  $\mu\text{m}$  の場合には約 1  $\mu\text{m}$  であることが分かる。これは、押し込み荷重が 10gf においては、膜厚さが 1  $\mu\text{m}$  以下の場合には、圧子は膜を貫通し、基材をも含めた硬さの値になっていると考えられるのに対して、膜厚さが 2  $\mu\text{m}$  以上の場合には、圧子は膜を貫通せずに 1  $\mu\text{m}$  の場合よりも基材の影響を多少は受けてはいるものの、ほぼ膜の硬さを表しているものとする。ただし、押し込み荷重が 5gf の場合に、膜厚さが 2  $\mu\text{m}$  と 5  $\mu\text{m}$  とで

は押し込み深さの値がほぼ同じ値を示すことから、膜を評価する場合の膜厚さは少なくとも圧子の押し込み深さの3倍以上必要であると考えられる。このことから押し込み荷重が10gfの場合には、膜厚さが2  $\mu\text{m}$ では基材の影響を含んでいると考えられる。これに対して膜厚さが5  $\mu\text{m}$ では基材の影響はほとんど含まれておらず、膜の硬さを的確に評価しているものと考えられる。

以上の点から、膜を的確に評価するためには、膜厚さは圧子の押し込み深さの少なくとも3倍以上の厚さが必要であることを確認した。

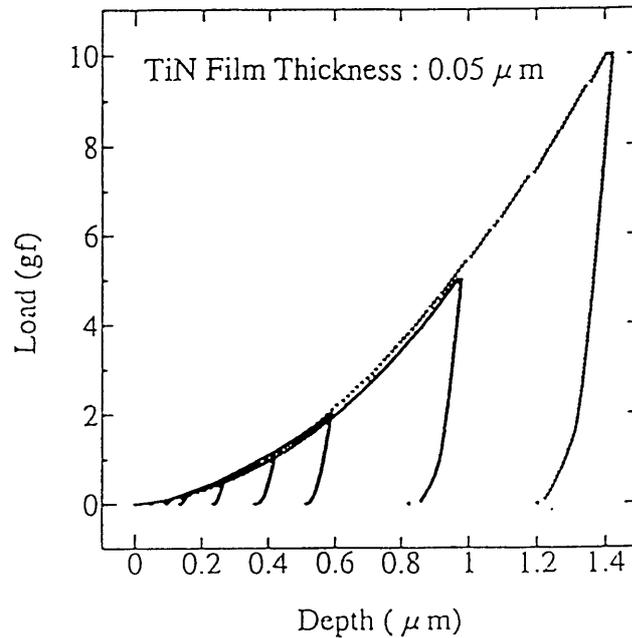


図 5-4 押し込み荷重と圧子の押し込み深さとの関係  
(TiN膜厚さが0.05  $\mu\text{m}$ の場合)

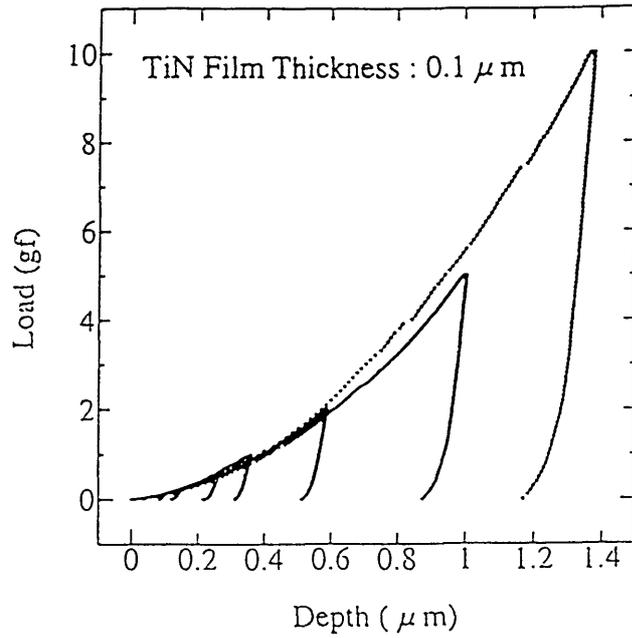


図 5-5 押し込み荷重と圧子の押し込み深さとの関係  
(TiN膜厚さが 0.1  $\mu\text{m}$  の場合)

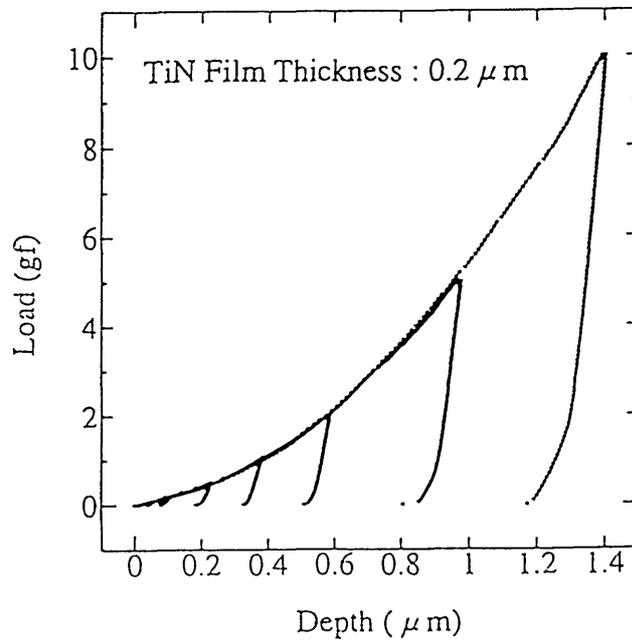


図 5-6 押し込み荷重と圧子の押し込み深さとの関係  
(TiN膜厚さが 0.2  $\mu\text{m}$  の場合)

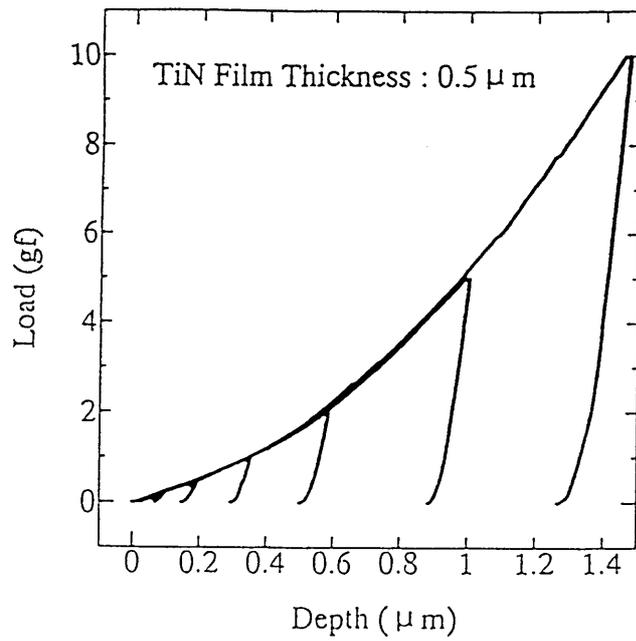


図 5-7 押し込み荷重と圧子の押し込み深さとの関係  
(TiN膜厚さが 0.5  $\mu\text{m}$ の場合)

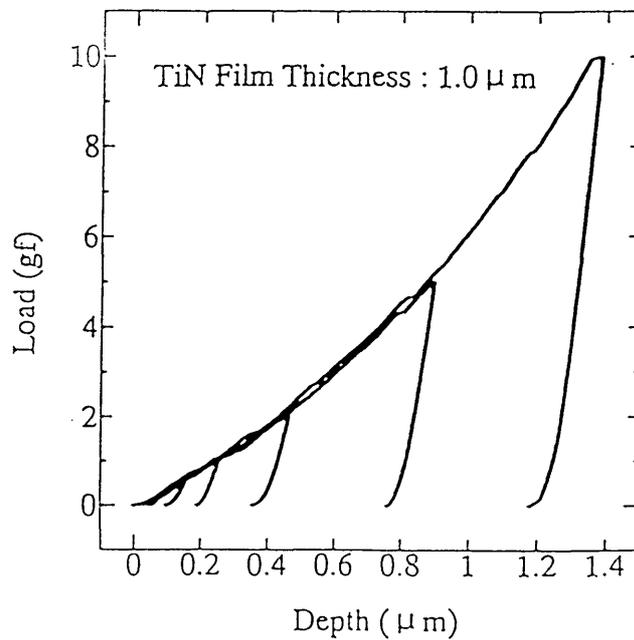


図 5-8 押し込み荷重と圧子の押し込み深さとの関係  
(TiN膜厚さが 1  $\mu\text{m}$ の場合)

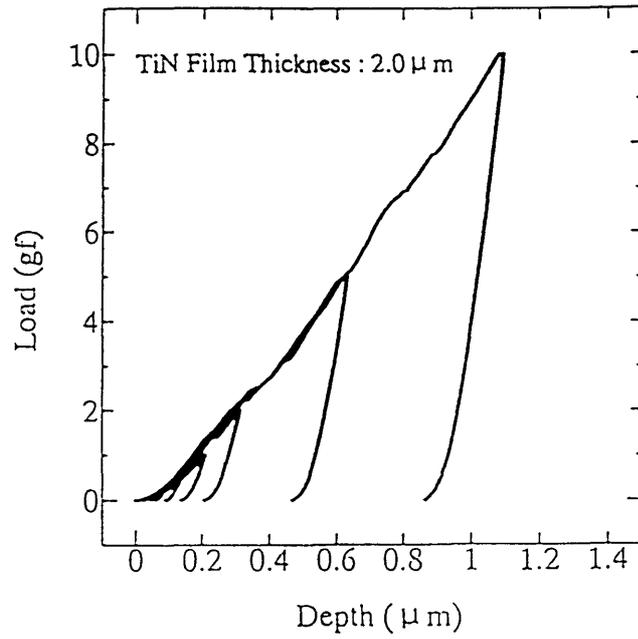


図 5-9 押し込み荷重と圧子の押し込み深さとの関係  
(TiN膜厚さが 2 μm の場合)

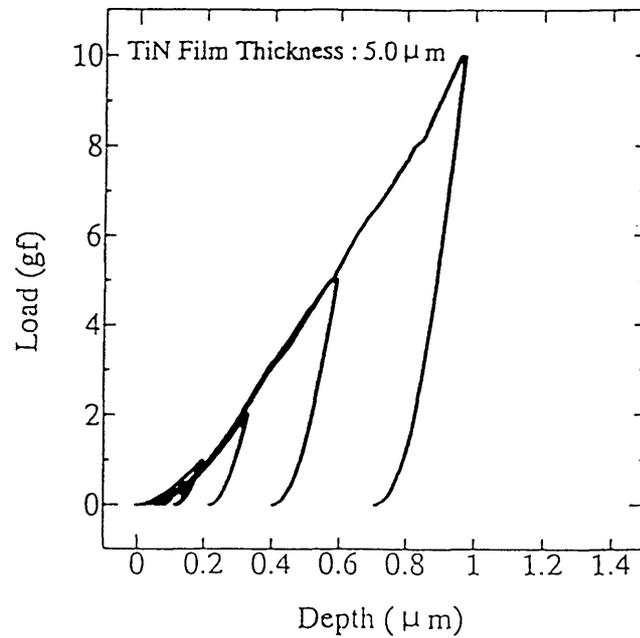


図 5-10 押し込み荷重と圧子の押し込み深さとの関係  
(TiN膜厚さが 5 μm の場合)