

# ヴィッカーズ硬さ試験の圧痕形状を考慮した材料特性評価

## Assessment of Material Property due to Indented Form of Vickers Hardness Test

吉原 重貴(東芝)    二ノ宮 賢治(日本電気航空宇宙システム)

正 佐藤 壽芳(中大理工)

Shigetaka YOSHIHARA, Toshiba Corp., 1, Komukai-Toshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki 210-8581

Kenji NINOMIYA, NEC Aerospace Systems, LTD., 4-18, Shinyokohama 2 chome, Yokohama 222-0033

Hisayoshi SATO, Chuo University, 13-27, Kasuga 1 chome, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551

Form of the indentation for Vickers hardness test, which has not been taken into account, is measured by using scanning electron microscope which is possible to evaluate surface profile in terms of back scattered electron signal. Attempt to correlate the evaluation with material property is made. As the parameters related with the form slope angle of the indentation, depth ratio between the depth of actual indentation and that of idealized, width ratio between the width of actual indentation and that of idealized one, swell height around the periphery of the indentation and width of the swell. It was made obvious that these parameters could be correlated with material property through hardness evaluation.

Keywords: Vickers Hardness Test, Form of Indentation, Parameters Related with Form, Material Property, Scanning Electron Microscope

### A1. はじめに

ヴィッカーズ硬さ試験は準比破壊的、簡易な材料特性評価法として用いられてきた。最近では、これをマイクロ領域に展開することも考慮されている。これまでの研究の経緯において、表面観察装置である走査電子顕微鏡(SEM)の反射電子信号の特性を用いると、表面観察と同時に、表面粗さ断面曲線にあたる微細形状を求めることができることを明らかにし、その装置を開発してきた。また、その過程でヴィッカーズ硬さ試験の圧痕を試料とした結果、圧痕の子細な観察によれば、形状に変化のあることが観察された。

本研究では、従来は二次的な特徴として考慮されてこなかった形状の特性を評価し、材料の物性的な特性との関連を明らかにすることを試みた。

### A2. 硬さ試験と形状パラメータによる評価

対象材料として、Al系、SUS系、SS、Cu系、Ti等9種を対象とした。実用に供される材料は延性を主体とするため、これらも延性を基本とするものが多いこととなっている。

試験荷重には、98.1, 245, 490, 981 mNを選択した。使用した各種材料に対して、硬さ値は荷重によらない基本的な特性が示された。各材料に対しては、材種としてJISに規定されている硬さ値、これより与えられる引張り強さに整合する結果が与えられた。

SEMを用いて形状を測定するには、表面に金膜を蒸着し、形状を求める信号に材料による特性の相違がでないようにすることが必要となる。この際、圧痕傾斜面の傾斜角測定を原子間力顕微鏡(AFM)によっても行い、SEMによる測定の結果がこれと同じになる膜厚に達する蒸着時間を明らかにし、試料の作成基準としている。

これに基づき測定し、荷重と傾斜角の関係を先ず明らかにした。傾斜角は何れの材料に対しても圧子のなす傾斜角より小さくなり、弾性的な回復を伴っていることを明らかにした。また、Al系では傾斜角が小さく、SUS、Cu系等では傾斜角がやや大きくであることを明らかにした。傾斜角が小さいことは弾

性的回復が大きいことを意味しており、前者の材料特性を考慮する時、一般的に考えられている特性と合致している。荷重の変化に対しては、これを小さくした時、傾斜角は僅かではあるが小さくなる傾向を示した。

上記の弾性的回復量を圧痕頂点の深さ  $a$  で表示し、圧子の押し込み形状が保たれたときの深さ  $b$  との比  $b/a$  を深さ比として、これと試験荷重との関係を調べた。その結果、Al系等の材料に対してはその値が小さく、SUS、Cu系等材料には大きくなることを明らかにしている。また、荷重を大きくする時に、深さ比は小さくなる傾向を示すことを明らかにしている。この傾向は試験荷重を大きくした時に傾斜角が大きくなる傾向、すなわち弾性回復量が少ないことと同じ特徴と言える。

試料表面の圧痕四角形状は、圧子の形がそのまま残れば正方形となる。しかし、四辺は辺が内側に入る糸巻き型、或いは外側に膨らむ樽型の何れかとなることが観察される。正方形の幅を  $d$ 、変形したときの幅を  $c$  とし、 $c/d$  を幅比として、試験荷重に対する特性についても調査した。その結果、SUS304では、1より小さく糸巻き型となり、SS400、アルミ材の一部では、1より大きく、樽型となることが明らかにされた。試料の表面応力、組織形態等を明らかにしないままの試験であるため、詳細な特性を関連付けることは難しい。しかし、表面状態と関連づけられる特徴であることを確認した。

### A3. まとめ

従来は二次的な効果として評価に考慮されてこなかったヴィッカーズ硬さ試験の圧痕の形状に着目し、材料特性との関連について検討し、圧痕傾斜角、深さ比、幅比等の形状に関するパラメータにより、材料特性と相関が見られることを確認した。

一部、新エネルギー・産業総合技術開発機構(NEDO)による提案公募研究 97S21-005、工作機械技術振興財団の助成を受けたことを記し、感謝する。

## 1.はじめに

機械設計では、材料の使用目的に対する適合性を調査し、安全な荷重限界の決定、材料の変形能等の確認が必要である。このため、種々の材料試験が実施されている。これらの試験はできる限り簡単で、しかもその試験結果が異なる材料間でも相互に比較できることが望ましい。

硬さ試験法は試験片の採取を必ずしも必要とせず、簡便で安定な準非破壊的材料試験法である。また、硬さ試験の結果は引張り強さや疲労限と良い相関を有し、材料の特性を簡潔に特定する指標として用いられることが多い。そのため、工学・工業分野において非常に広く活用されている。

硬さは、「それが他の物体によって変形を与えられんとする時呈する抵抗の大小を示す尺度である。」と定義されており、変形の与える方法により種々の硬さ試験法と表示硬さが存在する。

半導体に代表されるように、素材に高度の特性が求められ、特性の的確な指標による評価が必要となっている。これには加工工程により創成された特性も対象となる。また、現在の動向にはマイクロ化、ナノ化の流れが強く見られ、この動向の中で評価することが求められている。半導体デバイス、磁気ディスク等では集積度、記録密度の飛躍的向上が見られ、硬さの検証も表面の微細部分を対象とすることが必要となっている<sup>1),2)</sup>。

硬さ試験は機械材料の特性を評価する際の伝統的な手法である。しかし、マイクロ化、ナノ化の動向の中でも、押しつけ力を小さくし、微細表層の特性評価につなげる試みが続けられている。すなわち、ヴィッカーズ試験を例にとると、押しつけ力を nN とするマイクロヴィッカーズ試験装置の開発と適用が試みられている<sup>3)</sup>。これによって、材料表面微細領域の特性をよりの確に把握できるようになることが期待されている。

本研究では、ヴィッカーズ硬さ試験法について、従来は評価に考慮されてこなかった圧痕形状に注目し、これを規定するパラメータと材料特性との関連を明らかにすることを試みた。

ヴィッカーズ硬さ試験は圧痕の対角線長さと押し込み試験荷重から硬さの指標を得る試験法である。しかし、その圧痕形状を観察する時、周辺には盛り上がり、だれ等の形状の変化が生じることが容易に推察される。実際、走査型電子顕微鏡 (SEM, Scanning Electron Microscope) による表面形状観察装置開発の過程で、このような形状変化が観察されることが指摘された<sup>4)</sup>。本研究では、従来二次的な効果として無視されてきた形状の変化に注目し、材料評価の指標とすることの可能性について探求した。

ヴィッカーズ硬さ試験では、硬さ値は試験荷重とは関係なく一定値を取ること、これによって、試料の性質に応じた任意の試験荷重を使用できること、圧痕の表面形状が正方形となるため、表面形状の変化は用意に観察できること等を評価に用いるに好ましい基本特性として挙げることも出来る。硬さ決定に必要な諸元は、通常光学顕微鏡によって測定される。しかし、本研究では、微細形状を反射電子信号の処理によって求めることのできる走査型電子顕微鏡を用いて進めた。一方、引張り試験、通常の硬さ評価も行い、形状を考慮した評価によって、延性、脆性の特性を表示することの可能性を健闘した。

## 2.測定法の原理

### 2.1 ヴィッカーズ硬さ試験

ヴィッカーズ硬さ試験は、正四角錐のダイヤモンド圧子を試料に一定の力で押し込むことによって、試料表面につけた圧痕の表面積と試験荷重より硬さ値を算出する硬さ試験である。この試験より求まる硬さ値は試験荷重とは関係なく一定の値を取るため、試料の性質に応じた大小任意の試験荷重を使用することができる<sup>5)</sup>。また、圧痕の表面形状が正方形となるため、形状の変化は容易に観測することが出来る。今回の SEM を用いることによって、材料表面の盛り上がり、四角錐圧痕の傾斜角等の形状を測定することが可能である。

試験荷重を  $F$  [N]、正方形である圧痕表面の対角線長さ  $d$  [mm] から求めた圧痕全体の表面積  $S$  [mm<sup>2</sup>] とすると硬さの算出式は次のようになる。

$$HV = 0.102 \frac{F}{s} = 0.102 \frac{2F \sin(\frac{\theta}{2})}{d^2} = 0.189 \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

ここで硬さは HV の記号で表し、単位はつけない。Fig.1 に本試験法のご概念図を示す。

通常のヴィッカーズ試験では 49.1N ~ 491N の試験荷重が用いられるが、本研究では試験荷重が 9.807N 以下のマイクロヴィッカーズ試験機 (アカシ製 MVK-H0) を使用した。また本研究では、試験荷重時間を 30 秒として試験を行なった。これは圧痕周辺の形状をより特徴的に出すためである。

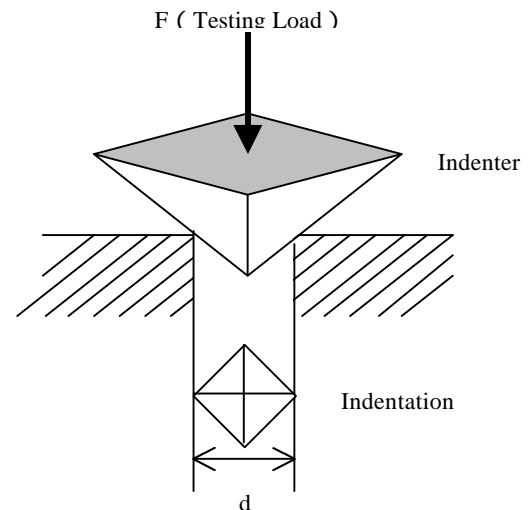


Fig.1 Basic Concept of Vickers Hardness

### 2.2 SEM による形状測定

ヴィッカーズ圧痕形状の観察には走査型電子顕微鏡 (SEM) を使用した。

SEM は光学顕微鏡に比べて焦点深度が深く、大きな倍率の像観察が容易に出来る。基本的には、研究室の基本的な観察手段として多用されている。また、半導体産業等では、その特長を生かし、製造現場でも使用されることが少なくない。通常は電子ビームによって照射された対象表面からは二次電子、反射電子が放出される。これを観察、計測する装置として用いられる。

Fig.2 は SEM の原理を示す図である<sup>6)</sup>。観察室内におかれた観察対象に対し、電子ビームは水平に走査することを垂直に繰り返す、対象から放出される二次電子、反射電子を捕捉、それぞれの信号とする。前者によっては通常の観察画像が得られる。一方対象表面から放出される反射電子の強度は表面の傾斜に比例する性質を有することが指摘され、これを積分すれば、形状を求められることが示されている<sup>7),8)</sup>。

この機能を SEM に付加すれば、表面の観察画像と同時にそれに対応する形状を求められることとなる。反射電子信号を走査線に対応して形状を導出すれば、表面の三次元形状を構成することも可能となる。本研究で使用した SEM は TOPCON 製 Sm-500 であり、形状測定処理には SANYU 電子製 SDM-7501 が装備されている。

Fig.3 は装置の全体写真である。形状のソフトによっては、測定を必要とする箇所の測線沿いの断面形状曲線を求めることが出来る。また、断面形状曲線からは、必要区間の寸法、断面の傾斜角等が求められる。反射電子信号は材料の種類によって変化するため、断面形状曲線を求めるには、表面に金の膜を蒸着することが必要である。本研究ではイオンスパッタリング法によりこれを行っている。

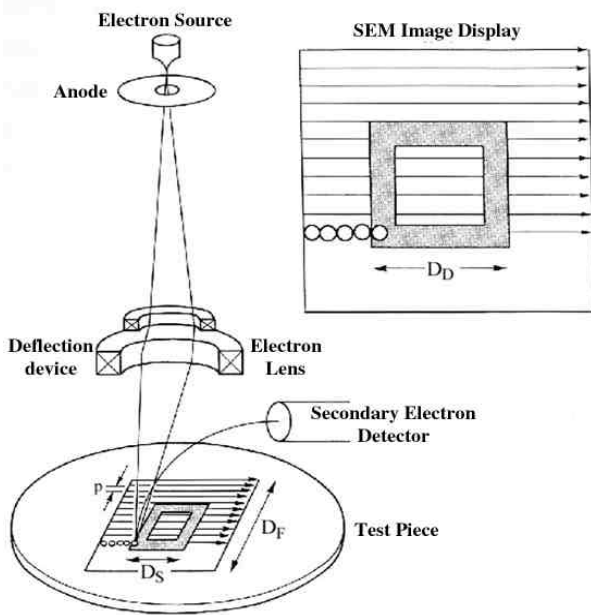


Fig.2 Principle of Scanning Electron Microscope



Fig.3 Overview of Scanning Electron Microscope

### 3. 試験対象試料

今回使用した試験対象試料の機械的性質は JIS 規格により Table.1 のとおりである。これらの試料を選択した理由として

- 1) 一般的によく使用されていること
  - 2) 機械的性質が顕著であることが挙げられる。表面に微小な圧痕を打ちこむため、鏡面加工を行なったものを使用した。これらの試料に試験荷重として 98.1mN, 245mN, 491mN, 981mN の 4 段階を採用した。鏡面加工は専門企業に依頼し、以下のような工程で行なった。
    - (1) 旋盤加工にてある程度の荒削り
    - (2) フェルト等により、旋盤を使用して数回に渡り研磨加工を業者に依頼したのは以下のような理由からである。
      - (1) 試料を目的の厚さに加工するのが困難なため
      - (2) 試料研磨機にて研磨加工する際に試料表面の形状が曲面になるのを防ぐため
- 計測した試料は各種 3 個ずつである。そのうち 1 個は (2) の工程の回数を変えた試料も作製し、を使用し、加工方法の違いによる影響について調べることも行なった。

Table1 Mechanical Property of Test Piece ( JIS )

Test Piece	Tensile Stress (N/mm <sup>2</sup> )	Proof Stress (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
A1050	95 ~ 125	Over 75	Over 4
A5056	Over 215	Over 70	-
A7075	Over 540	Over 480	Over 7
SUS304	Over 520	Over 205	Over 40
SUS630	Over 930	Over 725	Over 16
SS400	400 ~ 510	Over 245	Over 21
C1100	Over 245	-	-
C1720	590 ~ 900	-	-
TB340	340 ~ 510	Over 215	Over 23

また、観察装置である SEM を用いて観察する際、導電性の弱い試料表面に帯電して観察が困難になるチャージアップと呼ばれる現象がおき正常な像を得ることが出来なくなること、また原子番号効果によるデータの信頼性が失われる現象が起こる。各種の材料に対して同等の結果を得るために、材料表面には金膜をイオンスパッタリングにより蒸着する。この方法によっては、

- 1) 真空操作が容易で、短時間に処理できる。
- 2) 材料の消耗が少ない処理ができる。
- 3) 膜形成の粒状性と膜厚の再現性がよい。
- 4) 蒸着粒子の回り込みが良い膜形成ができる。

等の特徴を持った処理が可能である。しかし、角部等、断面曲線の変化の激しいところで形状を変化させないためには、表面に形成される膜は極力薄いことが望まれる。形状測定に必要最低限の膜厚は形状測定結果に変化が見えなくなるスパッタリング時間をもってこれに当てることをしている。本研究で金を蒸着させるのに利用したのは SANYU 電子製 Quick CoaterSC-701 イオンスパッタリング装置である。

Fig.4 は SEM で観察した蒸着時間と傾斜角の変化を示している<sup>9)</sup>。一方、蒸着開始時間と十分な時間を経過した時点で島津製作所製原子間力顕微鏡 (AFM) SPM-9500 により傾斜角を求めた結果を示している。AFM では、探針が形状を直接的に計測するから、蒸着の前後で変化がないことは自然である。SEM による傾斜角の評価は蒸着時間によって左右されることが明らかであり、この結果によれば、300s が安定した結果を得る標準としてよいことがわかる。今回、最適蒸着時間を求める際に使用した測定試料は A7075 である。その表面に荷重 491mN で圧痕をつけ、圧痕より得られる 4 つの傾斜角の平均を取った。

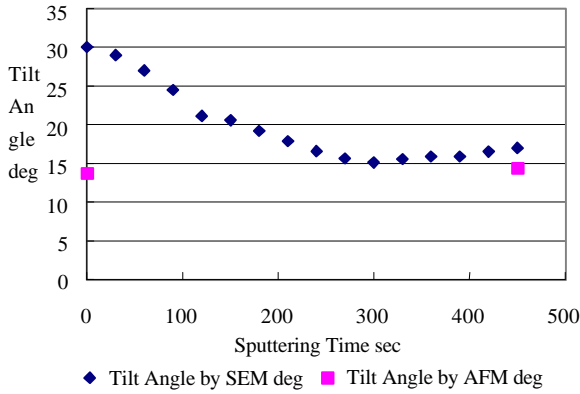


Fig.4 Sputtering Time and Tilt Angle of Indentation

#### 4. 圧痕の形状計測

各試料につけられた圧痕を SEM を利用して観察する。そこから得られた反射電子像を SANYU 電子製解析ソフト SDM-7501 で観察、計測を行った。Fig.5 はヴィッカーズ圧痕の断面形状を見た解析ソフト画面の一例である。

この解析ソフトによっては、圧痕傾斜角、対角線長さ、のちに示す、深さ比、幅比等を求め材料特性との関連を明らかにすることを試みる。Fig.6 は深さ比、幅比を求める際の諸元を示す。

深さ比  $R_d$ 、幅比  $R_w$  は Fig.6(a), (b) に示す諸元により、

$$R_d = b/a \quad (2)$$

$$R_w = c/d \quad (3)$$

として定義する。ここで  $b$  は圧子の対面角  $22^\circ$  から算出した圧痕の深さ、 $a$  は本解析ソフトによる圧痕形状から求められる深さ、 $d$  は試料表面の圧痕形状が正方形とした時の幅等、 $c$  は実際の圧痕形状から求められる幅である。しかし、一度像を取込み、解析することで本研究で必要とする全ての情報（圧痕の傾斜角、対角線長さ）を得ることが出来ないため、対角線長さ計測後、試料を  $45$  度反時計回りに回転させ、再度像を取りこみ、試料の傾斜角を計測することとした。また、圧痕周辺の微細な形状も断面形状解析画面より各試料ごとどのようなようになるかを判断する。Fig.7, Fig.8 に SEM による圧痕の観察・計測より求めた硬さ値と傾斜角の一例を示す。

本研究では、これらの数値と材料の機械的性質等との関連を求めることを試みた。ただし、圧痕の対角線長さは変形前の値を求めることが現状では不可能なため SEM の観察によりもつめた物を対角線長さとして使用した。これらの結果を Fig.9, Fig.10 に示す。Fig.7 は試験結果から求めた硬さ値である。一、二の例を除けば、試験荷重に拘わらず一定である基本的な特性が改めて示されている。

試験結果は、規格値に合致している結果ではあるが、硬さ値がほぼ 3 グループに分かれる。すなわち(1)50 ~ 100, (2)200 前後, (3)約 350 等である。これらはそれぞれ(1)純アルミ材, 純銅材, (2)アルミ化合物材, 銅化合物材, 一般構造用鋼材, (3)ステンレス材のように大別することができる。

Fig.8 は圧痕傾斜面の傾斜角を示している。圧子の対面角は  $136^\circ$  であり、圧子と同じ圧痕が形成されていればその対面角は  $22^\circ$  となる。しかし、実際にはこの図に示されるように、 $14^\circ$  前後のアルミ材と  $16 \sim 18^\circ$  に分布する銅, ステンレス材等の結果となっている。本実験では、試料の表面状態は不明のままに試験を行っているが、アルミ材と銅, ステンレス材の材料の特質を考慮する時、アルミ材の傾斜角が小さくなること

は理解できる結果である。荷重に対しては、僅かではあるが、荷重の増加と共に傾斜角が大きくなる傾向を示している。このような傾向となる背景には表面応力状態と圧痕の大きさが関係していると考えられる。詳細な検討は今後の課題である。

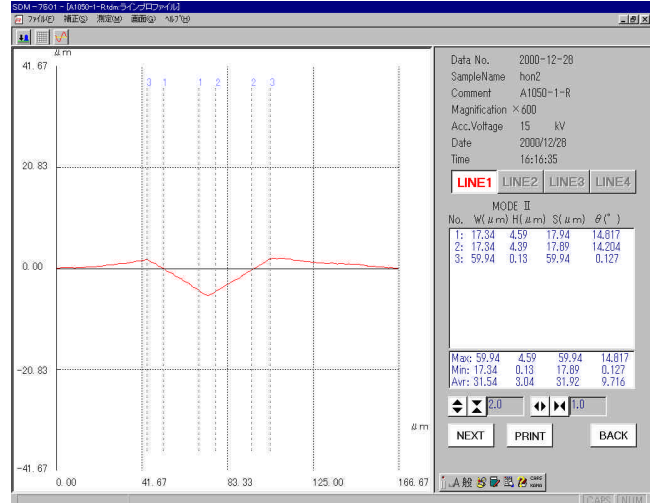
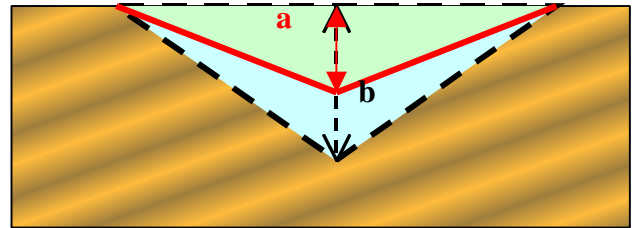
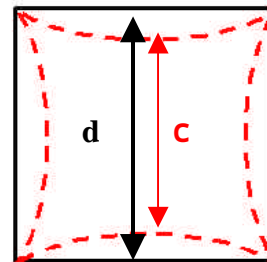


Fig.5 Display of the Software for Surface Profile Evaluation



(a) Depth Raito



(b)Width Raito

Fig.6 Concept for Form Deformation of Pressed Trace

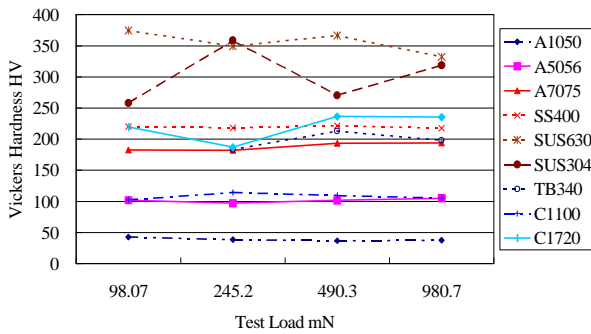


Fig.7 Vickers Hardness for the Test

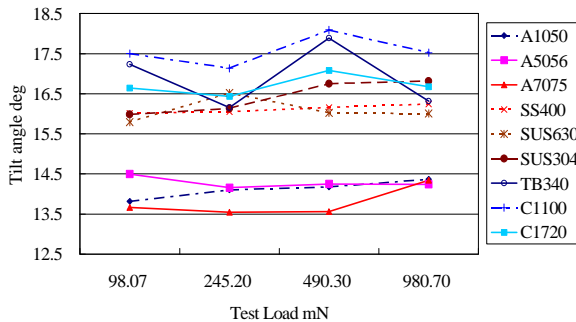


Fig.8 Tilt Angle for the Test

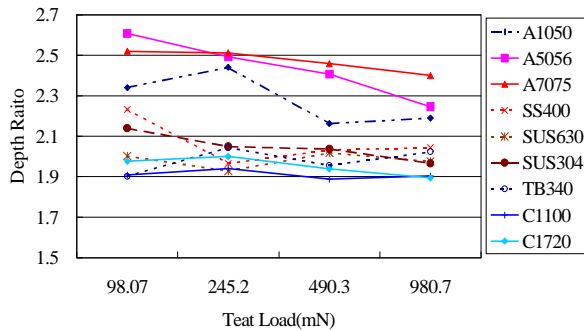


Fig.9 Relation of Test Load with Width Ratio

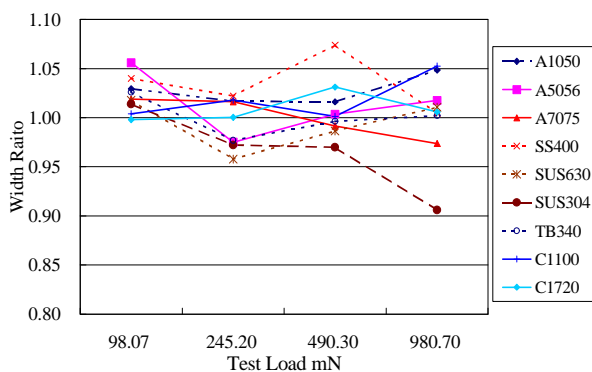


Fig.10 Relation of Test Load with Depth Ratio

Fig.9, Fig.10 は Fig.6 に示した定義による深さ比, 幅比を求めている. Fig.9 はアルミ材と銅, ステンレス材とにグループ分け出来ることが示されている. 深さ比が大きいことは, 弾性回復量が小さいことを意味し, 事実, 深さ比が大きい A5056, A7075 は, Fig.8 の傾斜角が大きいグループの中に入っている. これらについては, 荷重の増加と共に深さ比が小さくなる傾向が僅かではあるが他の材料に比べて目立つ. 試験荷重が大きい時に傾斜角が小さくなる傾向は, 押し込み量が大きくな

った時に回復量が大きくなることを示している. 表面の応力状態は今回の試料では不明であるが, これらの特性は深さ方向の状態分布に依存していると考えられる.

Fig.10 には幅比を求めている. 幅比が 1.0 を中心に集まっていることはその基本的な性質である. しかし, 中に SUS304 に見るように, 荷重の増加と共に目立って減少の傾向を示し, 1 以下になっているものがある. 表面四角形状が Fig.6(b) に示すような辺に糸巻き型の変形が起きていることを意味している. この場合も残留応力状態が不明なこともあり, 正確な論議は残される. しかし, 圧痕内側に辺が張り出すことは基本的には圧縮状態であることが想定され, 表面状態の指標とできる可能性が唆されている. 一方, SS400 では, 最大値が 1.05 を越える値を示しており, これはアルミ材とは異なり, 樽型の変形を示すものである. 材料の特質を考慮するとき, それぞれに特徴的であり, 一つの指標とすることが期待される.

### 5. 材料の機械的性質との関係

硬さ試験の結果と引張試験の結果は以下のような関係を持つことが良く知られている.

$$H = K \times s_B + C \quad (4)$$

ここで, H は硬さ,  $s_B$  は引張強さ, K, C は材料別の実験より得られる定数でそれぞれ GPa の単位を持つ.

一般的な例としてステンレスとアルミニウムの関係式を以下に示す<sup>10)</sup>.

$$HV \approx 3s_B \quad : \text{ステンレス (HV200-700)} \quad (5)$$

$$HV \approx 2.85s_B + 5 \quad : \text{アルミニウム} \quad (6)$$

Fig.11, Fig.12 に本実験で得られたステンレスの硬さ値と引張強さ, との関係を示す. また, 実際に引張試験を行い得た引張強さ及び伸びの値を Table.2 に示す.

Table2 Mechanical Property of Test Piece(Experiment)

Test Piece	Tensile Stress (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
A1050	89	25.17
A5056	312.5	27.00
A7075	639.2	12.00
SUS304	694.9	46.13
SUS630	1075.7	14.30
SS400	446.9	40.67
C1100	289.7	24.80
C1720	736.7	19.30
TB340	457.3	27.80

Table1, Table2 の結果を比較する A1050 以外は JIS 規格値の範囲となる値を得ることが出来た. このことから本研究で行なった引張試験の結果より得られたデータは信頼することができるものと判断し, それらについて相関関係を求めて行くこととする.

Fig.11 において Vickers Hardness 1 は実験より求めた値, Vickers Hardness 2 は引張強さの JIS 規格値より求めたものである.

Fig.11 に示したように, 従来の硬さ値と引張強さの間の直線関係を得ることが出来た. ここで JIS 規格値の引張り強さより求めた硬さ値と実験より求めた硬さ値に誤差が生じている. この要因として本研究において硬さ試験時に荷重保持時間を 30 秒とした影響ではないかと思われる. 他の試験試料につい

ても同様の結果となったことからこのように推定する。

また、Fig.12 に示すように伸びと深さ比についても相関関係を求めることが出来た。今回ステンレス以外にアルミニウム、銅についても相関関係を求めたが同様な結果を得ることが出来た。この結果から伸びと深さ比の間には相関関係が成り立つことが証明されたと考える。しかし、今回引張り試験で使用した試験片と硬さ試験で使用した試験片は同一材料であるが、異なる部材から取り出した試験片である。今後は同一の部材から取り出し加工を行なった試験片で同様な結果を得ることができるかについても行なう必要もあると考える。

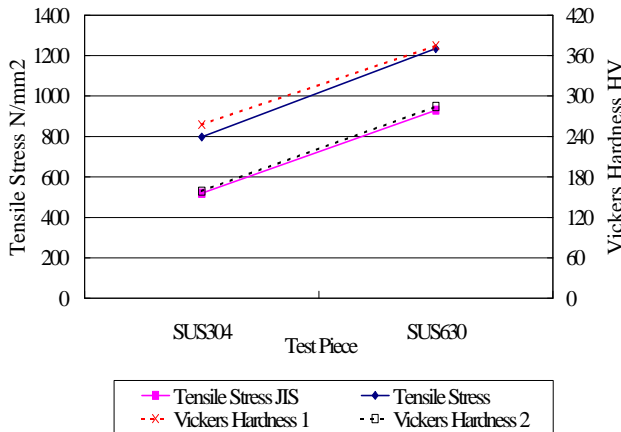


Fig.11 Relation of Tensile Stress and Vickers Hardness (Stainless Steel)

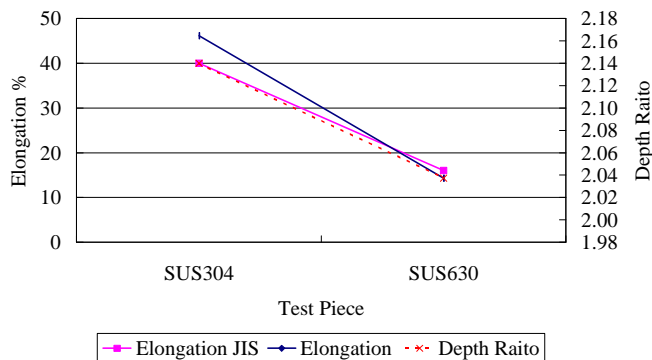


Fig.12 Relation of Elongation and Depth Raito (Stainless Steel)

## 6. 結論と今後の課題

従来のヴィッカーズ硬さ試験では考慮されてこなかった圧痕ならびに周辺の形状を評価して、材料特性との関連を明らかにすることを試み、以下の結果を得た。その際、形状の評価には、観察画像と同時に、反射電子信号を処理して表面形状を求めることができる走査型電子顕微鏡を用いた。

この際、圧痕の形状に関するパラメータとして、圧痕内部傾斜面の傾斜角、圧痕頂点の深さと圧子形状そのままである時の頂点の深さの比、深さ比、圧痕表面の四角形状が正方形の時の幅、実際にできている形状の幅の比、幅比、等を考慮した。

1) 荷重を小さくする時、傾斜角が僅かではあるが小さくなる傾向があることが明らかとした。これは表面に近い状態、その応力状態、材料特性等の影響を受け、弾性的な回復を示す場合があることを示している。

2) 深さ比は...が大きい値を示し、弾性的な回復量が小さいことを明らかとした。また、荷重が大きい時、深さ比は小さくなり、弾性的な回復量が大きくなる傾向を示すことを明らかにした。これは圧痕深さが大きくなるに従い、弾性的な回復量が大きくなる傾向を示すことを意味しておりヴィッカーズ硬さ試験の特性として注目される。

3) 幅比として顕著な傾向は、SUS304に見られる荷重を大きくした時に、1より小さくなり、表面四角形状が糸巻き型になる場合と、SS400に見られる1より大きくなる構型になる傾向を有する場合とがあることを明らかにした。それぞれの材料に特徴とできる。

4) 深さ比と伸びの関係を見ると、相関関係があることを明らかにした。すなわち、伸びの大きな材料では深さが大きく、弾性回復量は小さくすんでいることであり、深さ比により、延性材料の特性を示せることの示唆を得た。

本研究では、試料の表面応力、組織等を明確にしないまま試験を行っており、これらと試験の結果を関連付けて理解することについては今後の課題である。また、脆性材料の試料を得ることに困難があり、この間の関係を十分に明らかにするには至らず、やはり課題を残している。

一部 新エネルギー・産業総合技術開発機構(NEDO)による提案公募研究 97S21-005、工作機械技術振興財団の助成を受けたことを記し、感謝する。

本論分作成に金子哲也君の助力を得た。記して感謝する。

## 参考文献

- 1) 宮原健介, 松岡三郎, 長島伸夫, 三島周三, 原子間力顕微鏡を基にした超微小硬さ試験機の開発, 日本機械学会論文集(A編)(1995) pp.213-220
- 2) 松岡三郎, 宮原健介, 長島伸夫, 大村孝仁, AFM超微小硬さ試験機, 日本機械学会 1999年度年次大会講演論文集( ) pp.53-54
- 3) K.Hews-Taylor, Ultra-micro Indentation System(UMIS), CSIRO, Telecommunication & Industrial Physics, PO BOX218, Lindfield, NSW 2070, Australia
- 4) 大堀真敬, 佐藤壽芳, 走査電子顕微鏡(SEM)による表面形状測定の研究(法線検出法による), 機論 C, Vol.52, No.483, 昭 61年 11月, pp.2974-2980
- 5) 中沢一他, 金属材料試験マニュアル, 日本規格協会, 東京(1992), pp.110-111
- 6) 日本電子顕微鏡学会関東支部編, 共立出版, 東京(2000), pp.2-46
- 7) 佐藤壽芳, 大堀真敬, 走査電子顕微鏡(SEM)による表面粗さ測定の研究, 機論 C, Vol.49, No.438, 昭 58年 2月, pp.227-234
- 8) 佐藤壽芳, 大堀真敬, 走査電子顕微鏡(SEM)による表面粗さ測定の研究(デジタル方式による), 機論 C, Vol.51, No.469, 昭 61年 9月, pp.2381-2388
- 9) ニノ宮賢治, ヴィッカーズ硬さ試験の圧痕形状を考慮した材料特性の評価について, 修士論文, 中央大学, 1998
- 10) 吉沢武男編, 硬さ試験法とその応用, 裳書房, 東京(1977), p.286