

2. 特性の計測評価

2-1 力学特性

2-1-5 ビッカース硬さ試験

谷 垣 健 一*

2-1-5-1 はじめに

硬さ試験は材料の微小部分における力学特性を評価する手法として、大学の研究室から産業界は製造の現場まで幅広く用いられています。本稿では数多く存在する硬さ試験法の中でも特にビッカース硬さ試験を中心に、測定のコ考え方から実際の試験における注意点、結果の解釈や利用法などについて解説します。

2-1-5-2 硬さとは⁽¹⁾⁻⁽³⁾

材料の「硬さ」とは、小さな測定子によって材料表面に外力を加えた際に、材料が示す変形抵抗のことを指します。材料の変形は、荷重を除荷した際に回復する弾性変形と、永久的に変形が残ってしまう塑性変形に大別されますが、本稿で中心的に取り上げるビッカース硬さ試験を始め、現在使用される多くの硬さ試験は材料に残った小さな傷のような変形痕をもとに評価を行うため、このような試験では実質的に塑性変形に対する評価を行っていると理解できます。

材料の力学特性を調査する手法として最も基本となるのは引張試験と考えられますが、これは試料中央に設けられた平行部を均一に変形させているため、材料の平均的な力学特性を取得することができます。一方、硬さ試験は材料表面の局所的な変形から力学特性を評価できるという特徴があります。このため、表面近傍の力学特性に着目したい場合、例えば表面焼き入れ硬化の評価手法として広く用いられています。また、硬さ試験では一つの試料に対して複数回の試験を行うことが容易なため、例えば熱や加工などの履歴にともなう材料の力学特性の変化を、単一の試料を用いて個体差を気にすることなく調査することが可能になります。別の例を挙げると、例えば先進の半導体材料は大型の試料の製作が難し

く、制作費が非常に高価になることも多い研究対象です。脆性材料の場合は引張試験ではなく圧縮試験が用いられることが多いですが、やはり力学的評価のために試料を毎回破壊しては試験コストが高くなります。このような場合にも、硬さ試験によって小さな傷で評価できれば合理的に研究を進めることができます。

硬さ試験は他の試験法と比べて試験対象を大きく損壊することなく力学特性を評価できるので、分野によっては非破壊的検査に分類されることもあります。例えばものづくりの現場においては、製品の性能に差し支えない程度の小さな圧痕で評価できることが大きな意味を持ち、硬さ試験は品質検査のための重要な手法の一つとなっています。

ここではいくつかの例を挙げるにとどめますが、硬さ試験にはわずかなダメージだけで材料の表面における力学特性を比較的簡便に評価できるという強みがあります。また他の力学的試験と比較して比較的荷重が小さいことから装置もコンパクトに納まることが多く、導入のハードルが比較的低いことも手伝って産学問わず幅広い場面で用いられています。

一方で、硬さは物理量ではなく工業量であり、今日において統一的な数値的定義が存在しないという点には注意が必要です。このことから、硬さと他の力学的指標との関係は曖昧なままの点が多く残されています。また、これまで多くの研究者が独自に様々な硬さ試験法を提案してきた結果、異なる硬さ指標の間の変換についての理論式が存在することはほとんどなく、基本的には数値表を用いて参照することになります。さらに言えば、同じ硬さ指標の中でも実験条件によって直接比較できないこともあり、得られた結果の扱いには注意を要します。

2-1-5-3 ビッカース硬さ試験の原理⁽⁴⁾

ビッカース硬さ試験法は、Vickers社のSmithとSan-

* 大阪電気通信大学；准教授(〒572-0833 寝屋川市初町18-8)

Experimental Guides for Metallic Materials 2. Measurement and Evaluation of Material Properties 2-1 Mechanical Properties 2-1-5 Vickers Hardness Testing; Kenichi Tanigaki* (*Osaka Electro-Communication University, Neyagawa)

Keywords: Vickers hardness, Brinell hardness, Knoop hardness, Rockwell hardness, Shore hardness, tensile strength, mechanical properties

2023年10月13日受理[doi:10.2320/materia.62.793]

dlandによって1925年に発表されました。この手法はピラミッド状のダイヤモンド製圧子(図1)を材料表面に一定荷重で押しつけ、取り除いた後に表面に残された圧痕の大小により硬さを評価するというものです(図2)。

ビッカース硬さHVの値は、具体的には荷重と圧痕表面積によって次のように定義されます。

$$HV = \frac{1}{g_n} \frac{F}{A} \quad (1)$$

ここで、 g_n [m/s²]は標準重力加速度(Nとkgfの変換係数)であり、 F [N]は押し込み荷重、 A [mm²]は圧痕の表面積です。係数を乗じることによって荷重をNからkgfに変換して計算していますが、これはビッカース硬さの開発がSI単

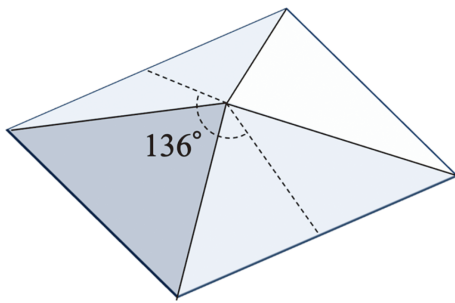


図1 ビッカース圧子の模式図。ビッカース圧子はダイヤモンド製の正四角錐であり、通常は頂点を下に向けて上方より試料表面に押し付けられます。対面角 $\alpha=136^\circ$ は正対する二つの面の開き角であり、峰に沿った開き角ではないことに注意してください。

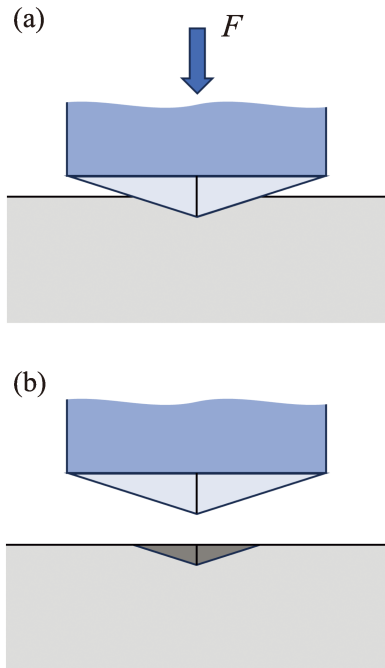


図2 ビッカース硬さ試験の模式図。(a) 圧子を試料表面に荷重 F で押し付け、(b) 一定時間保持後に圧子を取り除くことで試料表面に圧痕(永久くぼみ)が残ります。この圧痕の表面積と荷重からビッカース硬さが算出されます。

位系の成立時期よりも古いために、本来の定義では荷重の単位としてkgfを用いることになっていたことに起因しています。同様に、規定の荷重においてもkgf単位時代に定められているため、N単位ではキリの悪い数字が使われています(例えば、0.1 kgf=0.9807 Nなど)。現在の視点においてはややスマートではないように感じるかもしれませんが、これにより過去の膨大なデータとの一貫性が保持されているとも考えられます。

ビッカース圧子の形状は、対面角 136° の正四角錐と定められています。圧子が材料表面に対して垂直に押し付けられた時、圧痕の形状を圧子と同じ正四角錐と仮定することにより、表面観察による圧痕寸法から表面積を計算できます。ビッカース圧痕の表面における形状は正四角錐の底面に相当するため正方形となります(図3)。その対角線長さ d_1 [mm]および d_2 [mm]を計測することにより、圧痕の平均対角線長さ d [mm]を算出します。

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (2)$$

この時、圧痕の表面積は対面角 α を用いて次のように示されます。

$$A = \frac{d^2}{2 \sin(\alpha/2)} \quad (3)$$

以上より、ビッカース硬さHVは押し込み荷重 F [N]と表面における圧痕の平均対角線 d [mm]から次のように求められます。

$$HV = 0.1891 \frac{F}{d^2} \quad (4)$$

ここで、標準重力加速度 g_n およびビッカース圧子の対面角 α の具体的な数値はそれぞれ、 $g_n = 9.80665$ [m/s²]および $\alpha = 136^\circ$ です。

2-1-5-4 硬さの相似則

四角錐圧子は押し込み荷重に対する圧痕形状が一定となる

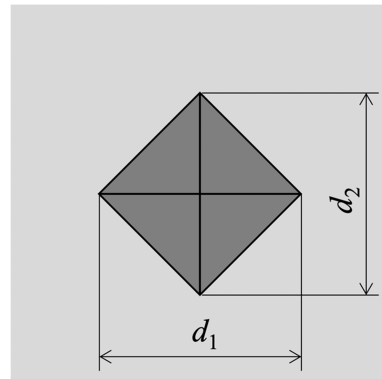


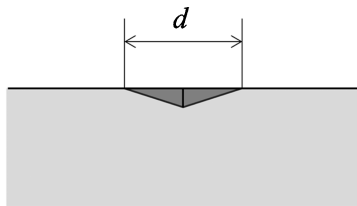
図3 ビッカース圧痕の模式図。ビッカース圧子の形状は正四角錐ですので、試料表面に対して垂直に押し付けた場合の圧痕を真上から観察すると正方形に見えます。圧痕の寸法は二つの対角線長さ d_1 および d_2 から算出される平均対角線長さ $d = (d_1 + d_2) / 2$ となります。

ため、押し込み荷重と圧痕表面積が比例します(図4)。このことから異なる荷重を用いたとしても、同じ硬さを持つ材料に対してビッカース硬さは原理的に同じ値を示します。これは硬さの相似則と呼ばれ、ビッカース硬さ試験以外にも、後述するスnoop硬さ試験などをはじめ、似たような角錐または円錐形状の圧子を用いる試験法に共通する性質です。硬さ試験において圧痕寸法を厳密に制御することは一般的に容易ではないため、この性質は硬さ値を利用する上では大変便利な性質です。

ただし、式(4)の通り、同じ硬さが得られた場合であっても荷重レベルが大きく異なれば圧痕寸法は大きく異なります。特に小さい荷重を用い圧痕寸法が μm オーダーともなると、材料の状態や微細構造などの要因により、仮に同一の材料に対する試験であっても硬さ試験の結果に影響が出る可能性があります。結果を常に比較可能であるということが保証できません。そこで、ビッカース硬さ試験に関するJIS規格⁽⁴⁾では、硬さ記号HVの後ろに荷重(kgf単位)を続けて示すよう定められています。例えば、荷重 $F=294.2\text{ N (30 kgf)}$ で計測されたビッカース硬さが640 HVであった場合は640 HV 30という表記となります。

また、JIS規格⁽⁴⁾においてHV 5以上はビッカース硬さ試験、HV 0.2以上HV 5未満は低試験力ビッカース硬さ試験、HV 0.2未満はマイクロビッカース硬さ試験と分類されます。通常のビッカース硬さ試験はマクロビッカースと呼ばれることもあり、圧痕寸法が比較的大きいことが特徴です。こ

(a)



(b)

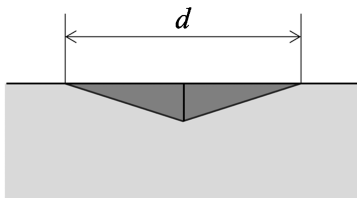


図4 ビッカース硬さ試験における荷重と圧痕形状の関係。(a)低荷重の場合、(b)高荷重の場合。押し込み硬さ試験において荷重が変化すると、荷重にもなって圧痕の深さも変化します。ビッカース圧子のような角錐状の圧子を用いる場合、圧痕の深さが変わってもその圧痕形状が相似形となります。このことから、硬さの測定結果が荷重に依存しないことを硬さの相似則と呼んでいます。

のため試験時に応力場が及ぶ範囲が大きく、圧痕形成において材料中の微細組織が多数関与することから、材料の巨視的な力学特性を得ることが期待できます。一方でマイクロビッカース硬さ試験では材料中の欠陥や空隙、微細な析出物や表面に露出している結晶粒の方位差などの情報を大きく反映させた試験結果を得ることができます。このように、材料の平均的な力学特性(マクロ)から局所的な特性(マイクロ)まで単一の試験機で統一的に評価することが可能な点は、ビッカース硬さ試験の大きな利点の一つとしてあげることができます。

2-1-5-5 ビッカース硬さ以外の代表的な硬さ指標

これまでに多くの硬さ試験法が提案され現在も用いられている理由は、それぞれの手法にそれぞれの良さがあるためです。硬さ試験法はその形式から押し込み硬さ、反発硬さ、引っかかり硬さの大きく三つに分類されていて、ビッカース硬さ試験は材料表面に圧子を押し込み、荷重と圧痕寸法より硬さを評価することから押し込み試験法のカテゴリーに入ります。

• ブリネル硬さ

ブリネル硬さはビッカース硬さに先立ち1890年に開発された押し込み硬さ試験法で、工学分野において現在実用的に用いられている、最も古い硬さ試験法の一つとして知られています。ブリネル硬さ試験では金属球を押し込み圧子として用います(図5)。圧子を材料表面に一定荷重で押し込んだ後に表面に残された圧痕の寸法を二方向から計測し、その平均を圧痕の直径とします(図6)。このとき、ブリネル硬さは押し込み荷重と、圧痕の直径から計算される圧痕表面積によって次式で定義されます。

$$HB = 0.102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (5)$$

ここで、 $F[\text{N}]$ は押し込み荷重、 $D[\text{mm}]$ は圧子の直径、 $d[\text{mm}]$ は圧痕の直径です。硬さを圧子の押し込み荷重と圧痕表面積の比として定義するブリネル硬さの考え方は、ビッカース硬さを始め現在用いられているいくつかの硬さ試験法の基礎となっています。また、ビッカース圧子の対面角は 136° と定められていますが、この角度はブリネル硬さ試験においてよく用いられる条件である $d/D=3.75$ の時の材料表面における圧痕の接線角度より決定されたもので、ここもまた、ビッカース硬さとブリネル硬さとの関連を感じさせる設計となっています(図5(b))。

ブリネル圧子の材質は鉄、鋼、超硬合金が使われ、それぞれの圧子に対して硬さの記号もHB、HBS、HBWと異なり、圧子が違えば別の硬さスケールとして扱わなくてはなりません。これは材質によって圧子の変形の影響が異なるためで、現在のブリネル硬さに関するJIS規格⁽⁵⁾では最も変形の影響が小さくなる超硬合金圧子によるHBWのみが規定されています。

また重要な点として、ブリネル硬さ試験においては圧痕の形状が圧子の直径や押し込み荷重に依存するため、硬さの相

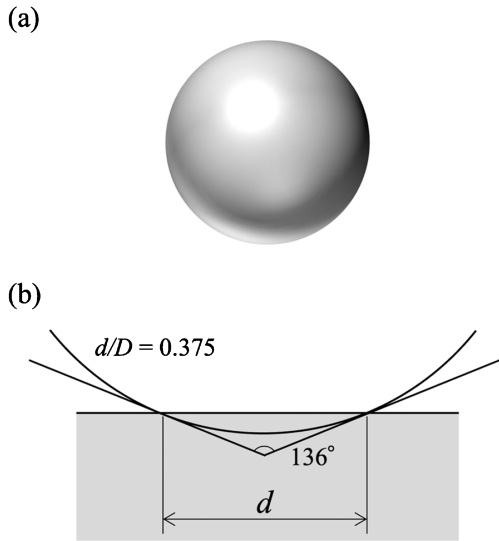


図5 (a)ブリネル圧子の模式図および(b)ビッカース圧子の形状との比較. ブリネル圧子は金属製の球で, ビッカース硬さ試験よりもより大きな圧痕がつくことが特徴です. ビッカース硬さの対面角 136° は, ブリネル硬さ試験でよく用いられる $d/D=0.375$ (d : 圧痕の直径, D : 圧子の直径)の時の表面における接線角度と等しくなるように決定されました.

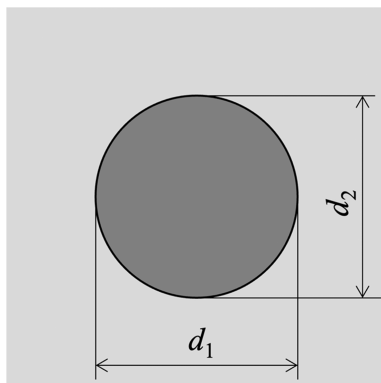


図6 ブリネル圧痕の模式図. ブリネル圧子の形状は球なので, 真上から観察した圧痕の形状は円になります. 計測時には二方向から寸法を計測し, その平均値 $d = (d_1 + d_2)/2$ を圧痕の直径とします.

似則が成立しません(図7). ブリネル圧子の直径は 10 mm, 5 mm, 2.5 mm, および 1 mm から選択し, 荷重は 9.807 N (1 kgf) から 294.2 N (30 kgf) の範囲において段階的に定められた中から, 圧痕と圧子の直径の比 d/D が 0.24~0.6 となるように選択することになっていますが, これらの情報も硬さ値に付属して表記しなければ情報としては不正確になってしまいます. そのため前述の JIS 規格⁽⁵⁾では, 硬さ記号 (HBW) の後ろに続けて圧子の直径と荷重を記載するように指定されています. 例えば $D=1$ mm, $F=294.2$ N (30 kgf) で計測したブリネル硬さが 600 HBW であった場合は, 600 HBW 1/30 という表記となります. このことはブリネル硬さの比較を一見複雑にしますが, 適切な実験条件を選択することにより幅広い材料に対する試験が可能である試験法とも

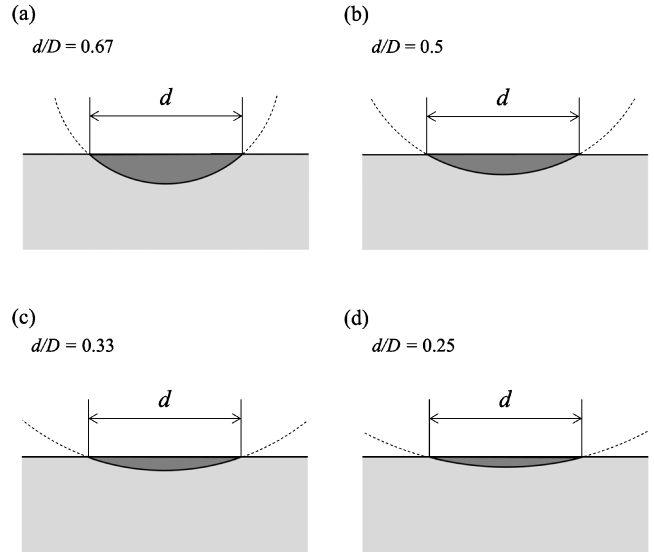


図7 ブリネル硬さ試験における圧痕圧子直径比 d/D と圧痕形状の関係. (a) $d/D=0.67$, (b) $d/D=0.5$, (c) $d/D=0.33$, (d) $d/D=0.25$. ビッカース圧子などと異なり, ブリネル圧子は押し込み深さによって圧痕の垂直断面形状が変化します. 図は d を一定とした時の模式図ですが, D が大きいほど圧痕が浅くなり, 表面積が異なることがわかります.

言えます. またビッカース硬さ試験法と比較すると圧痕が大きいため, 不均一な材料であっても十分に平均化した力学特性が計測できるという利点もあります.

• スープ硬さ

ビッカース硬さ試験を受けて1939年に開発されたスープ硬さ試験では, 非対称のダイヤモンド四角錐を圧子として用います. スープ圧子の形状は対稜角 172.5° および 130° で, 圧痕の形状は細長い菱形になります(図8). スープ硬さ試験はビッカース硬さ試験と比較して同荷重条件での圧痕が小さく浅くなることから, 脆性材料の硬さ評価により適していると

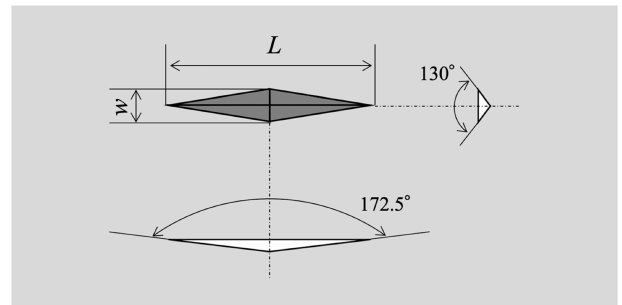


図8 スープ圧痕の模式図. スープ硬さ試験では非対象の四角錐ダイヤモンド圧子を用います. その形状はビッカース圧子とは異なり, 対面角ではなく対稜角として指定されます. 圧痕形状は細長い菱形形状となり, 圧痕の寸法計測には長い方の対角線長さ L のみを用います. また, スープ硬さではビッカース硬さ試験やブリネル硬さ試験と異なり, 圧痕の表面積ではなく投影面積を用いて硬さを算出します.

されています。

スnoop硬さは圧痕の表面積ではなく、投影面積で押し込み荷重を除することで次式により硬さが定義されます。

$$HK = 1.451 \frac{F}{L^2} \quad (6)$$

ここで、 F [N]は押し込み荷重で、 L [mm]は圧痕の長い方の対角線長さです。スnoop硬さでは圧痕の短い方の対角線長さを使用しないため、小さい圧痕に対しても寸法をより正確に計測しやすいという利点があります。

圧子の形状から、スnoop硬さにおいても硬さの相似則が成立しますが、やはりピッカース硬さと同様の理由で JIS 規格⁽⁶⁾では硬記号 HK に続いて荷重(kgf 単位)を示すように定められています。例えば、荷重 $F = 9.8062 \text{ N}$ (0.1 kgf) で計測されたスnoop硬さが 640 HK であった場合は 640 HK 0.1 という表記となります。

・ロックウェル硬さ

1919年に開発されたロックウェル硬さは、圧子を材料表面に押し込むという意味ではこれまでにご紹介してきた押し込み試験法と同様ですが、圧痕寸法を計測するための表面観察が不要である点が異なります。ロックウェル硬さ試験ではまず基準荷重 F_0 で圧子を押し付け、初期深さを計測します。その後荷重 F_1 を追加した全試験荷重 $F = F_0 + F_1$ で材料表面を塑性変形させた後にもう一度荷重を基準荷重に戻すと、塑性変形の影響により初期深さよりも圧子の位置が下がります。この深さ方向の変位 h [mm]により、硬さを評価します(図9)。

ロックウェル硬さの基本式は次式で与えられます。

$$HR = N - \frac{h}{S} \quad (7)$$

ここで、 N および S はともにスケールに依存した係数です。

ロックウェル硬さにおけるスケールとは、圧子の種類と試験荷重の組み合わせによって定められた種別です。ロックウェル硬さに関する JIS 規格⁽⁷⁾では A スケールから K スケールまで 9 種類が定められており、さらに通常のロックウェル硬さよりも低い荷重のロックウェルスーパーフィシャル硬さについても 6 種類のスケールが定められています。

ロックウェル硬さで最もよく使われる C スケールでは、圧子は先端角 120° かつ先端の曲率半径 0.2 mm である円錐状ダイヤモンド圧子であり、全試験荷重 F は 1471 N (150 kgf) とされます。このとき式(7)における係数は $N = 100$ および $S = 0.002$ となり、ロックウェル C スケール硬さ HRC は次式で与えられます。

$$HRC = 100 - 500 h \quad (8)$$

ロックウェル硬さは圧痕の寸法を計測する他の押し込み試験法と比較して、光学顕微鏡を用いた圧痕の観察が求められないことから計測手法がシンプルであること、また実験初期に基準荷重で押し込んだ状態から試験を開始するため試料表面の状況に大きな影響を受けないことなどがメリットとされています。反面、深さの読み取り精度に強く依存するため様

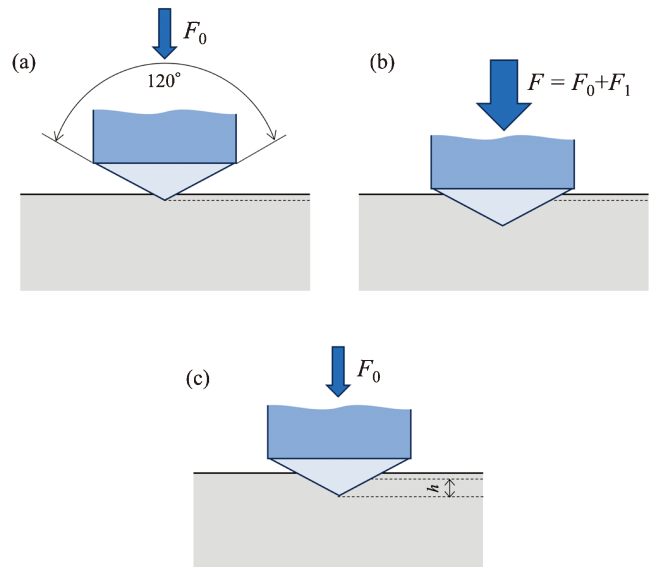


図9 ロックウェル硬さ試験の模式図。ロックウェル硬さ試験では、開き角 120° のダイヤモンド円錐を圧子として用います。(a) まず基準荷重 F_0 で圧子を押し付け、(b) 次に荷重 F_1 を追加した全試験荷重 F でさらに押し込みます。(c) 再び荷重を基準荷重 F_0 に戻した時、圧子の位置は初期状態よりも深いところで止まりますので、その深さ方向変位 h からロックウェル硬さが求められます。

々な理由により精度が悪化することや、異なるスケール間で値を直接比較することができない点については注意を払う必要があります。

・ショア硬さ

ショア硬さは定められた高さからダイヤモンドハンマーを落下させ、跳ね上がった高さによって硬さを求める手法です。ピッカース硬さを始めとする押し込み硬さ試験法が静的な硬さとすれば、ショア硬さのような反発硬さ試験では動的な硬さが計測されます。

ショア硬さは次式で求められます。

$$HS = k \frac{h}{h_0} \quad (9)$$

ここで h [mm] はハンマーの跳ね上がり高さ、 h_0 [mm] はハンマーの初期高さであり、 k は試験機に依存する係数です。ショア硬さの試験方法に関する JIS 規格⁽⁸⁾ではショア硬さ試験機として C 型(目測型)および D 型(指示型)が定められており、それぞれの試験機型に対する k の値はショア硬さの試験機に関する JIS 規格⁽⁹⁾に 10000/65 および 140 と示されています。

ショア硬さはその仕組みや装置が特に簡便であり、電源も不要であることから持ち運びも可能です。また押し込み硬さ試験法と比較してもほとんど傷が目立たないことから、比較的大きな構造物の健全性試験などで広く活用されています。

• モース硬さ

モース硬さは最も一般的な知名度がある硬さの指標といえるかもしれませんが、モース硬さは硬さ試験の分類としては引っかき硬さ試験法に分類されます。これは「滑石(モース硬さ1)からダイヤモンド(モース硬さ10)まで、10種の代表的な鉱物を互いに擦り付けた時にどちらが傷つくか」という視点によって定められたランキングのようなものであって、定量的な硬さの値を与えるものではありません。したがってモース硬さは工学的な硬さの指標としてはほとんど扱われていませんが、この手法を1812年に発表したモースはドイツの鉱物学者であり、当時の鉱物学者が屋外において鉱物を簡易的に鑑定するにはこの手法は大変有用だったのではないかと考えられます。なお、モース硬さで用いられる10種の鉱物のビッカース硬さを計測するとその関係は直線的ではなく、後半になるほど差が大きくなっていく傾向があることが知られています。のちに提案された修正モース硬さでは、モース硬さの10種に加えてジルコニアや炭化ケイ素などの硬質なセラミックスが主に追加され15段階に拡張されています。

2-1-5-6 ビッカース硬さ試験における圧痕

• 圧痕の形状と寸法

ビッカース硬さ試験における圧痕は、圧子の押し込みによって材料表面が塑性変形した結果と言えます。圧痕の形状は圧子の形状(対面角136°の正四角錐)と同じと仮定されているため、表面の観察時には正方形となります。寸法の正確な計測を容易にするため、通常は観察時に正方形の辺が45°傾くように圧子の取り付け角度が調整されます。この場合、圧痕の対角線の長さ d_1 および d_2 はそれぞれ、圧痕の縦および横の幅を計測した値となります(図3)。

• いびつな圧痕

実際の圧痕を観察すると、形状が正方形ではなく縦横の長さが明らかに異なる場合があります(図10)。これは試験箇所およびその周囲の面内における力学特性の異方性を反映している可能性があります。試験対象が多結晶材料であり、また圧痕が十分に大きく平均的な力学特性が反映されていると考えられるのであれば、集合組織のような巨視的な異方性などがその理由として考えられます。圧痕が小さく結晶粒のサイズに近い、またはそれ以下の場合は、圧痕直下の結晶の方位に依存した力学特性の差が現れている可能性があります。もちろん単結晶試料であれば、圧痕の寸法に関係なくこのような現象が発生する可能性があります。

似たようなケースとして、対角線が交差する位置が中心からずれている場合がありますが、こちらは表面と圧子軸が垂直でないことによって発生します(図11)。傾きが大きくなると式(4)における仮定が崩れるため、圧痕表面積の計算誤差がそのまま硬さの値に影響してくることに注意が必要です。これは試料の材料特性による現象ではないため、このような要因による圧痕形状の異常はなるべく解消するべきです。

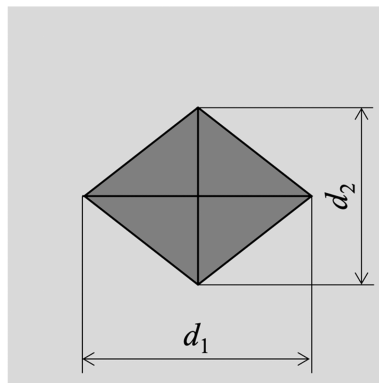


図10 縦横の対角線長さが異なるビッカース圧痕の例。ビッカース圧痕における対角線長さ d_1 および d_2 は理想的には等しくなりますが、材料の異方性などの要因によって異なる場合もあります。

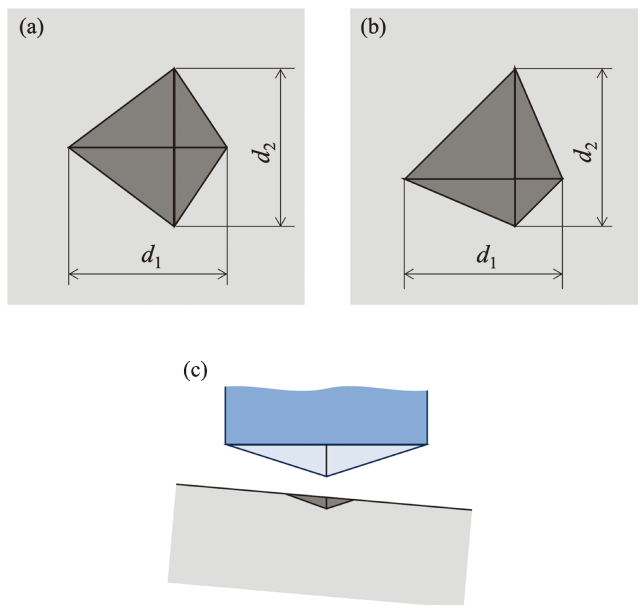


図11 いびつなビッカース圧痕の例。二つの対角線長さに大きな差がない場合でも、圧痕の形状が(a)や(b)のように観察されることがあります。これは、(c)に示すように試料表面と圧子の押し込み軸が垂直でなく傾いている場合に起こります。傾きが大きい場合は表面積の計算結果に影響が出るほか、圧子にも負担がかかるため注意が必要です。

よう。

また、圧痕のそれぞれの辺が直線にならず太鼓型に膨らんだり、逆に糸巻型に痩せていたりすることがあります(図12)。これは圧子の押し込みによって発生する塑性流れに関連すると理解されています。押し込みによって圧子先端の直下に大きな応力が作用するため、先端近傍の材料は早期に降伏し塑性ひずみが発生します。圧子の押し込みと共に塑性ひずみ場は発達しますが、そのさらに外側に広がる弾性変形場によってある程度は周囲に逃がされます。しかし限度を超えた塑性変形の一部は圧子の脇を流れ、表面に盛り上がり形成します。この時、塑性流れはビッカース圧子の面に拘束さ

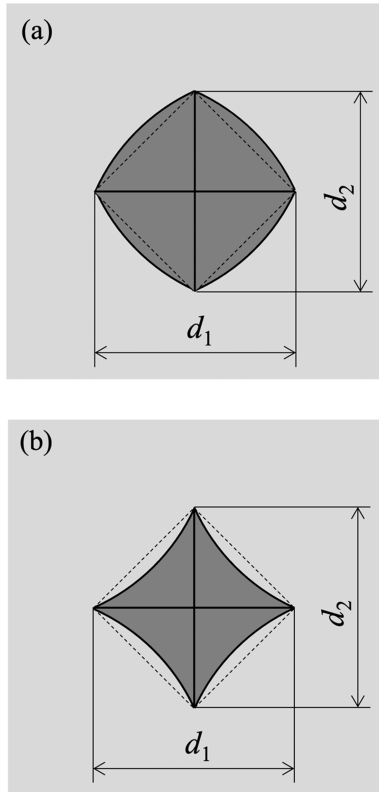


図12 (a) 太鼓型および (b) 糸巻型のビッカース圧痕。材料の塑性変形量や加工効果率などの影響により、圧痕周辺が盛り上がる場合には正方形から各辺が膨らんで太鼓型に、逆に沈み込む場合には瘦せて糸巻型に観察されることがあります。いずれも対角線長さには大きな変化がないため、圧痕形状を正四角錐と仮定した硬さの算出に影響を及ぼします。

れ、圧痕の辺の中央が太鼓型に膨らんで観察されます。また、加工硬化が強く現れる材料では、押し込みにともなって大きな塑性ひずみを受ける圧子近傍の材料強度が向上するため塑性流れが制限され、圧痕の辺の中央部分が沈み込むことで糸巻型に観察されることがあります。太鼓型・糸巻型いずれの場合も対角線方向には大きな影響が出ないため、真の圧痕表面積は式(4)を用いた場合よりも太鼓型の場合は大きく、糸巻型の場合は小さいこととなります。このことは、材料の押し込み抵抗としての硬さと、計測値としてのビッカース硬さの差異を生む原因となります。

その他、明確な法則性や一貫性がなく一見ランダムに感じられる圧痕形状の異常については、材料の不均質性が影響している可能性があります。このような場合には同じ材料の中で場所や圧痕の寸法を変えながら実験を行うことで、原因を探るための情報を得られることがあります。局所的な力学特性が本質的にばらついている材料については、硬さの値がばらつくということ自体が時に有力な実験事実となることもあるため、データの分布の扱いには細心の注意を払う必要があると言えます。

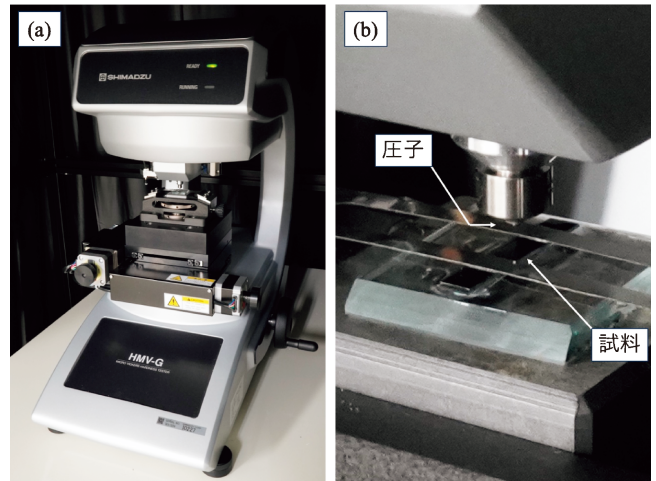


図13 (a) ビッカース硬さ試験機の外観および (b) 試料設置部。本装置(島津製作所 HMV-G31-FA)は試料台に PC 制御による電動 XYZ ステージを備えています。試料はステンレスバンドによって上から試料台に押さえつけられて固定されますが、固定方法は試験機によって異なります。

2-1-5-7 実験上の注意点

• 試験機

ビッカース硬さ試験機(図13)は、試料を固定する台、圧子、荷重負荷用の機構、圧痕観察用の顕微鏡などで基本的に構成されています。観察用の対物レンズは通常の光学顕微鏡のようにレボルバー式となっていることが多く、この場合対物レンズと同じ並びで圧子も固定されます。これにより、レボルバーを回すだけで圧子の押し付けと圧痕の観察を切り替えられ、また倍率を変更しても常に圧痕が視界の中心に位置することから圧痕を探す手間が省けて観察が容易です。近年では接眼レンズ部分をデジタルカメラとし画像を PC に取り込むだけでなく、画像解析ソフトウェアにより圧痕寸法を自動で読み取り硬さ値を算出するもの、さらには電動ステージを備えて大量の試験を全自動でこなし、得られたデータを統計処理するものも販売されています。このように電動化、自動化が進んだ近年では、付属マニュアルを読むことにより未経験者であっても容易に試験を行うことが可能です。一方で、不適切なセッティングに対して機械がエラーを返さず、何も言わずに何らかの値を出してくる可能性は常にありますので、正しい条件設定と結果の確認には実験者が注意を払い続ける必要があると言えるでしょう。

• 試料の表面

試験面となる試料表面は十分に平滑である必要があり、一般的には回転式研磨機を用いたエメリー研磨やバフ研磨によって表面を平面に仕上げ、圧子と表面の関係を理想的なものに近づけます。

特にマイクロビッカース硬さ試験では非常に小さい圧痕を扱うため、圧痕に対する表面粗さや研磨傷の影響が相対的に

増大することから試験面の研磨は特に丁寧に行う必要があります。さらに、機械式研磨においては表面近傍のごく浅い部分に対する塑性加工の影響を免れることができないため、表面直下に転位が導入されることが知られています。圧痕寸法が小さいということは圧痕の深さも浅く、表面の加工硬化の影響が無視できなくなるほど大きくなる可能性があります。この場合は電解研磨などの非機械的研磨を利用することがあります。

また研磨剤の残存を含む異物の付着は試験結果を不正確にするだけでなく、ダイヤモンド圧子の先端を傷つける可能性があるため、注意を払う必要があります。したがって試験前の試料は超音波洗浄を行うことが好ましいと言えます。

もう一つ試験面に求められる条件として、圧子の軸に対して垂直であることが挙げられます。もし圧子の軸と試験面が垂直でない場合、圧痕形状が正方形ではなくなることから式(4)の仮定が崩れ、硬さの算出結果に悪影響が出る可能性があります。通常、圧子の軸は試験機のメンテナンスにより試料台に対して垂直であるように調整されるため、この条件は試料の上下面が並行であると読み替えても多くの場合差し支えありません。

研磨も含め、試料寸法や形状の都合によりこれらの準備が困難な場合には、樹脂埋め込みや貼り付け板に固定するなどの手法を活用することを検討します。また、試料の下に空間があったり柔らかい物体が存在したりすると、試験時の押し込み荷重によって試料自体が沈み込むことにより結果に悪影響が及ぼされる可能性があります。そのため試料の固定には粘着テープなどは用いず、土台となる試料台などに試料裏面が直接接するようにしっかりと固定する必要があります。

• 試験条件

① 荷重

硬さの相似則により、荷重そのものはビッカース硬さの値に直接的に影響を及ぼさないとされているため、試験時の荷重は自由に選んで構わないはずですが、実際にはいくつか考慮すべき点があります。一つ目は圧痕の寸法で、試料の寸法や微細組織に影響を受ける可能性があるため、目的に応じて適切な圧痕の寸法をよく考えて荷重を決定する必要があります。また、圧痕寸法が $20\ \mu\text{m}$ 以下になると通常の光学顕微鏡による観察では正確に読み取ることが困難になってくるため、これ以上小さくならないようにするか、もしくはより分解能が高い顕微鏡を併用するなどの工夫が必要になります。

② 保持時間と負荷速度

圧痕を基準の荷重で押し込み切った後の保持時間の長さは材料のクリープや緩和に関する特性を硬さに影響させるため、標準の保持時間は10~15秒と定められています。標準の保持時間を適用できずこれ以外の設定を用いる場合には、新たに設定した保持時間が硬さにどのような影響を及ぼすかに注意する必要があります。

また、材料の中にはひずみ速度によって力学特性が変化する

材料もあり、このような材料では荷重の負荷速度についても注意を払う必要があります。しかし、圧痕によって発生するひずみ場は一様ではないため、硬さ試験におけるひずみ速度の検討は一般的に容易ではありません。標準の荷重負荷速度は $0.2\ \text{mm/s}$ 以下(ただしマイクロビッカース硬さ試験においては $70\ \mu\text{m/s}$ 以下)とされています。

• 圧痕の間隔

圧痕の周囲には一般的に塑性変形領域が広がっているため、複数の圧痕を試料につける場合には他の圧痕の及ぼした影響を排除するために間隔を空けて実験を行います。また、試料の外周に近い部分では力学的条件が異なることから、こちらも試験対象から除外する必要があります。

JIS規格⁽⁴⁾では圧痕の平均対角線長さ d を基準とし、隣り合う圧痕の中心間距離を鋼、ニッケル合金、チタン合金、銅および銅合金に対しては $3d$ 、チタンを除く軽金属、鉛、すずおよびこれらの合金に対しては $6d$ 以上とし、圧痕の中心と試料の縁の間の距離はそれぞれに対して $2.5d$ および $3d$ 以上とすることように指定されています。

• 圧痕寸法の読み取り

圧痕の平均対角線長さ d の誤差の2倍がビッカース硬さ HV の計算結果の誤差になることから、 d_1 および d_2 の計測は可能な限り正確に行う必要があります。観察は光学顕微鏡を用いたアナログ的な観察であっても、デジタル撮影画像からの読み取りであっても、明るさやフォーカスなどを正しく調整した上で可能な限り高倍率にして丁寧に行うべきです。また、寸法の読み取り時に問題となりやすい事柄の一つが、計測のための標線が圧痕の角を隠していることに気づかずに対角線長さを過小評価することです(図14)。圧痕と標線の間に隙間があることは容易に認識できますが、両者が重なっていると低倍率では判断が困難な場合があるため注意します。

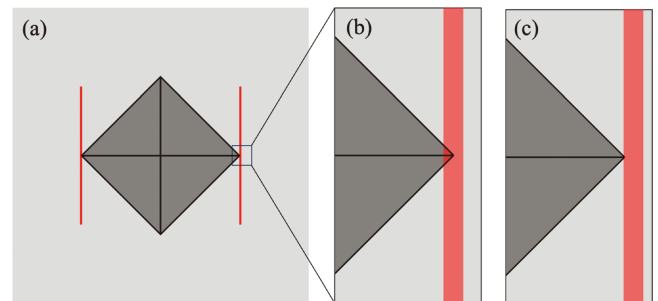


図14 圧痕の寸法計測における標線の食い込み。圧痕の寸法を計測するために圧痕の角に標線を合わせます(a)。隙間が空いていることは比較的認識しやすいですが、標線を狭めすぎて圧痕の角を覆い隠すように重なっている場合(b)は判別しにくいので注意が必要です。圧痕の角と標線が点で接する状態(c)が理想的です。

2-1-5-8 ビッカース硬さ値の利用

• 他の硬さとの比較

ビッカース硬さ試験を行った結果を文献と比較しようとしたところ、他の硬さ試験の結果しか載っていないかという事態はしばしば起こります。しかし、異なる硬さの値を直接比較することは一般的にできません。

このような場合は硬さの換算表を参考にすることができます。たとえば ISO 規格⁽¹⁰⁾には、いくつかの金属種におけるビッカース硬さ、ブリネル硬さおよびロックウェル硬さの複数のスケールをそれぞれ対応づける換算表が示されています。また ASTM 規格⁽¹¹⁾には鋼のロックウェル C 硬さに近似的に対応するビッカース、ブリネル、ヌーブ硬さなどの換算値がまとめられています。これら換算表は硬さの情報を活用する上で大変便利ですが、あくまでも特定の材質の特定の条件における値をまとめたものであることを忘れずに利用することが重要です。

• 引張強さとの関係

引張強さ σ_b は、引張試験における単軸応力状態において材料が破断するまでに発生し得る最大の公称応力を意味します。一方でビッカース硬さ試験をはじめとする押し込み硬さ試験で発生する変形は一様ではなく、圧子直下から 3 次元的に分布するため、その比較は単純ではありません。このような強さと硬さの関係について初期の重要な研究を行った Tabor は、ビッカース硬さ HV は、引張試験で公称ひずみ $\epsilon = 0.08$ における変形応力 $\sigma_{0.08}$ と多くの材料において比例関係にあることを示しました⁽¹²⁾。これが硬さと強さを結びつける基礎的な考えになっています。ただし、 $\sigma_{0.08}$ と σ_b の関係は加工硬化率などによって変化するため、結局引張強さとビッカース硬さの比は材料ごとに異なるのが実情です。

前述の硬さ値の換算表⁽¹⁰⁾には鉄鋼材料の引張強さも合わせて示されていて、引張強さとビッカース硬さの比を実際に計算すると概ね 3.1 から 3.4 の範囲となります。この関係は鋼種や熱処理などに大きく依存せず、ほぼ似たような値となることが知られています⁽²⁾。

一方、アルミニウム合金に関しては調質により大きく性質が異なることから、ビッカース硬さと引張強さの比を一つの値で代表させることが困難であり、数ある合金に対して軟質材、加工硬化材、熱処理材と加工硬化率の大きさに応じた 3 つのグループに分類して考える必要があることが示されています⁽¹³⁾。

2-1-5-9 おわりに

ビッカース硬さ試験法の原理から実験上の注意点、また他の硬さ試験法との違いや値の比較などについて解説してきました。ビッカース硬さ試験は数多くある硬さ試験法の中においても現象が比較的明確であり、シンプルでありながらそれゆえに非常に使い所の多い魅力的なツールであると言えます。その原理は古い時代に完成されたものですが、本稿で引用した規格に示された値などに関しては、今後の改訂によって変更が加えられる可能性があることにはご注意ください。

文 献

硬さ試験全般に関する書籍

- (1) 中村雅勇著：硬さ試験の理論とその利用法，森北出版，(2012)。
- (2) 吉沢武男編：硬さ試験法とその応用，裳華房，(1967)。
- (3) 寺沢正男，岩崎昌三共著：硬さのおはなし 改訂版，日本規格協会，(2001)。

ビッカース、ブリネル、ヌーブ、ロックウェル、ショアの各硬さ試験に関する JIS 規格

- (4) ビッカース硬さ試験—第 1 部：試験方法 (JIS Z 2244-1:2020)。
- (5) ブリネル硬さ試験—第 1 部：試験方法 (JIS Z 2243-1:2018)。
- (6) ヌーブ硬さ試験—第 1 部：試験方法 (JIS Z 2251-1:2020)。
- (7) ロックウェル硬さ試験—試験方法 (JIS Z 2245:2021)。
- (8) ショア硬さ試験—試験方法 (JIS Z 2246:2022)。
- (9) ショア硬さ試験—試験機の検証 (JIS B 7727:2000)。

硬さ値の換算に関する国際規格

- (10) Metallic materials—Conversion of hardness values (ISO 18265:2013)。
- (11) Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness (ASTM E140-12B(2019))。

ビッカース硬さと引張強さに関する文献

- (12) D. Tabor: Proc. Roy. Soc. A, **192**(1948), 247-274。
- (13) 佐藤四郎，遠藤 隆：軽金属，**36**(1986)，29-35。



谷垣健一

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
2011年3月 大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了
2012年4月 大阪大学大学院基礎工学研究科助教
2023年4月 現職
専門分野：材料力学
◎金属粉末焼結体や半導体結晶の力学特性評価のほか、金属の高速変形試験やバイオメテックス技術を中心に活動。
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★