



入門講座

鉄鋼の試験/評価-2

鉄鋼材料の評価に活躍する硬さ試験

—硬さ試験の基礎—

Hardness Tests are Best used to Evaluate Steel Materials

- The Basics of Hardness Tests -

山本正之

Masayuki Yamamoto

(株)山本科学工具研究社
取締役副社長

1 はじめに

硬さは、物の強さの程度を表す尺度の一つである。カタサ研究会（現 日本材料試験技術協会）初代会長の吉沢武男博士は、自身の著書で「ある物体の硬さとは、それが他の物体によって変形を与えようとするとき呈する抵抗の大小を示す尺度である」と定義している¹⁾。硬さはこの定義に従い、「圧子」と呼ばれる硬い測定子を介して試料に「力」を加え、これによって生じた「くぼみ」の深さや大きさを測定することにより得られる、材料の強さを示す「工業量」である。

工業的な硬さ試験方法には、ロックウェル硬さHR、ビッカース硬さHVなど多種あるが、このHRやHVは単なる硬さ試験方法を示す「記号」に過ぎず、「単位」ではない。従って、測定値として有効であると考えられる桁数も、物理量などの精密測定とは異なる。それにもかかわらず、硬さ試験が手軽で便利な材料強度試験として、一般に広く用いられているのは、他の機械的強度との相関性が高く、試料の形状、寸法を問わず幅広く適用できるためである²⁾。

本稿では、第2章で各種工業的硬さ試験の分類と特徴を、第3章で関連規格と硬さの表記方法について解説し、第4章で規

格に基づいた試験方法と試験機の検証方法について述べる。

第5章では試験機の間接検証に用いる硬さ基準片の特徴と、その使用方法について紹介する。

2 硬さ試験の分類と特徴

硬さ試験方法にはロックウェル硬さだけでも54スケールと、多くの種類があり、目的に応じて使い分けられている。硬さ試験方法は、試験力を静的に負荷することによって圧子を試料に押し込む、押し込み（静的）硬さ試験と、反発硬さ等の動的硬さ試験に大別される。また、使用する圧子形状と、硬さ値の定義方法によって、硬さの相似則を満足するか否かでも分類できる。測定対象物や目的に適した試験を行うために、各試験方法のくぼみ寸法測定方式や定義、使用する圧子等により特徴や利点が異なることを理解しておくことが望ましい。

2.1 押し込み（静的）硬さ試験

押し込み硬さ試験は、表1に示したロックウェルのようなくぼみ深さを利用する方法と、表2に示したブリネルやビッカースのようなくぼみの面積を利用する方法とに大別される。

表1 くぼみ深さを利用する硬さ試験の代表例（ロックウェル及びロックウェルスーパーフィシャル）

硬さ試験方法	硬さ記号	くぼみ寸法の測定方法	硬さの定義式 (初試験力 F_0 / 全試験力 F)	発明時の単位系	圧子			概念的な分類	発明年
					材質	圧子形状	くぼみ形状		
比較的硬い金属など	ロックウェル	HRC など	硬さ = $100 - 500 \Delta h$ (10/150など)	重力単位系	ダイヤモンド	先端R 0.2 mm 円錐角 120°	非相似	マクロ	1919
	ロックウェル スーパーフィシャル	HR30N など	硬さ = $100 - 1000 \Delta h$ (3/30など)					マクロ (低試験力)	
比較的軟らかい金属など	ロックウェル	HRB など	硬さ = $130 - 500 \Delta h$ (10/100など)		硬鋼	球		マクロ	
	ロックウェル スーパーフィシャル	HR30T など	硬さ = $100 - 1000 \Delta h$ (3/30など)		超硬			マクロ (低試験力)	

2.1.1 くぼみ深さを利用する硬さ試験

くぼみ深さを利用する代表的な硬さ試験方法がロックウェル硬さ試験である。一定の試験力で圧子を介して試料に押し込み、生じたくぼみの深さ（後述、図1に示す差分深さ Δh ）を測定する。試験力は一定であるから、当然、くぼみが深ければ軟らかい、浅ければ硬い、ということになるが、硬さ定義式には試験力が含まれない。試験力負荷と同時に差分深さを測定してしまうため、試料に生じたくぼみを顕微鏡で測定する必要がなく、試験は短時間で済む。また、測定者間の誤差が他の試験方法と比較して少ないことも長所の一つである。後述のくぼみ面積を用いる試験方法と比較して、試料表面や試料台の状態（傷、さび、ほこり、油などの付着物）の影響を受けやすいため、測定前によく確認する必要がある。

2.1.2 くぼみ面積を利用する硬さ試験

ブリネルとビッカースに代表される試験方法で、圧子を試料に一定の試験力で押し込み、生じたくぼみの面積を利用して硬さを求める。ブリネルとビッカース硬さ試験はくぼみの表面積を、またヌープやマイヤー硬さ試験はくぼみ投影面積を利用し、どちらも試験力をくぼみ面積で除した値を硬さ値と

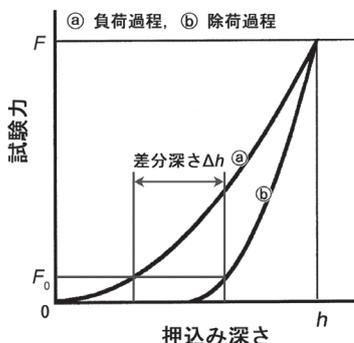


図1 硬さ試験の概念を示す「試験力-押し込み深さ曲線」

している。硬さ値を材料強度の指標とする上では、くぼみ投影面積で硬さを考える必要があるが、ビッカースダイヤモンド圧子のような、いわゆる自己相似形の圧子を用いる場合には、表面積は投影面積に比例するため、表面積を用いていることは問題にはならない^{3,4)}。

くぼみ面積を利用した硬さ試験方法は、試料保持の方法（試料裏面の傷や、試料-試料台間の異物）の影響を受けにくく、圧子先端形状の誤差による硬さ測定値への影響が小さいこと、くぼみ面積（くぼみ直径や対角線長さ）の測定を顕微鏡で行うため、比較的試験に時間を要すること、測定者間誤差の影響を受け易いことが特徴として挙げられる。

2.2 反発硬さ試験

反発硬さ試験は、硬い圧子を試料に衝突させ、その反発の勢いから硬さを求めるもので、試験機は小型軽量でポータブルなものが多く、大きな試料や、製品そのものを加工せずに現場で測定できるという特長がある。しかしながら、試料の質量が小さいと正しい硬さ値が得られない（硬さの質量効果）、圧子先端の形状にも影響を受けやすいことには注意が必要である⁵⁾。

2.3 圧子の特徴と硬さの相似則

ビッカースのような四角錐、計装化押し込み試験に用いられるパーコピッチ三角錐圧子、あるいは円錐状の圧子によるくぼみは、その大きさによらず相似形状となる（図2右側）。このため、理想的に硬さが均一な試料を試験した場合、原理的には試験力の大小にかかわらず同じ硬さ値が得られるという優れた特徴を有しており、これを硬さの相似則という。これに対し、ブリネルのような球圧子によるくぼみは、試験力に応じてくぼみの大きさが変わると、その形状は相似形とはならない（図2左側）。このため、同じ圧子で試験力を変えると得られる硬さ値も変わってしまう（図3上）。ただし、試験力

表2 くぼみ面積を利用する硬さ試験の代表例

硬さ試験方法	硬さ記号	くぼみ寸法の測定方法		硬さの定義 硬さ=力/くぼみ面積			圧子			概念的な分類			発明年			
		深さ測定	顕微鏡的	表面積	投影面積	発明時の単位系	材質	圧子形状	くぼみ形状	マクロ	マイクロ	ナノ				
ブリネル	HB			●		重力単位系	超硬(硬鋼) HB規格は超硬のみ	球	非相似	●			1900			
マイヤー					●											1908
ビッカース	HV		● 除荷後	●						ダイヤ	ビッカース正四角錐 対面角136°	相似	●	●		1922
ヌープ	HK				●	ヌープ四角錐 対稜角172.5°と130°			●					1939		
パーコピッチ					●		●*	パーコピッチ三角錐 圧子軸と面の角65.03°						●		1951
計装化押し込み (ナインデンテーションを含む)	HM HIT	● 負荷 過程 中		●		SI	ナインデンテーション用としてはパーコピッチ、ビッカースなど、その他では球圧子なども用いられる				●	●	●	ISO 14577 - 2002		

*: E. S. Berkovichはくぼみ表面積から求める硬さをH、投影面積から求める硬さをH'とし、双方を定義している²⁾。

F と球圧子の直径 D の関係 F/D^2 が等しくなる場合には、くぼみ直径 d と圧子直径 D の比率も等しくなり、くぼみ形状が相似形となるため、相似則が成立し(図4)、異なる試験力や球による硬さの比較が可能となる⁶⁾。

圧子は硬い試料に対しても永久変形を生じてはならないため、ダイヤモンドのように強い材質の圧子が望まれ、ブリネルでは鋼球を廃し、超硬合金球を用いることが規格に規定された。日本では、ロックウェルBスケールなど、比較的軟らかい金属用のロックウェル硬さ試験では、超硬合金球(後述の硬さ記号:HRBW)と共に鋼球圧子(同:HRBS)も用いられるが、球圧子の材質により試験力負荷時の弾性変形量が異なるため、厳密にはくぼみの大きさが若干変わり、HRBスケールの場合、図5に示すようにHRBWの方が0.5~0.8HR程度低い値となる⁷⁾。

3 硬さ試験に関する規格と表記方法

3.1 硬さ試験に関する規格

硬さは工業量の一つであり、その測定方法を約束することによって初めて定義可能となる。このため、硬さ試験の測定値

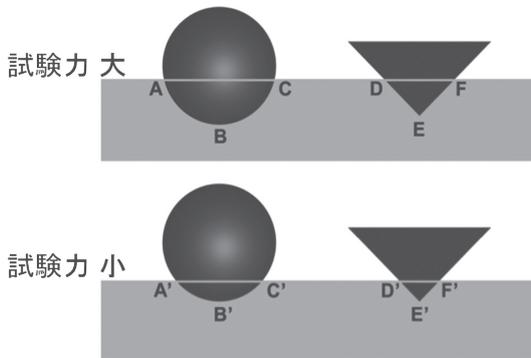


図2 硬さの相似則
球圧子によるくぼみABCとA'B'C'は相似形にならない角錐(円錐)圧子によるくぼみDEFとD'E'F'は相似形状

は共通の約束ごと、すなわち試験方法規格に依存している²⁾。

日本工業規格JISは、他のローカル規格と異なり、国際整合の見地からISOをベースとして改正されているため、技術的に国際的な合意に基づく規格として利用することができる。具体的には、

- (1) 試験方法:硬さ試験の方法を規定しており、硬さ試験ユーザが中心となって改正審議されている。
- (2) 試験機の検証:硬さ試験に使用する試験機の検証方法が規定されている。試験機メーカーおよび試験機校正事業者、基準片メーカーが中心となって審議されている。
- (3) 基準片の校正:硬さ基準片の校正、すなわち値付けの方法が規定されている。試験機メーカーおよび試験機校正事業者、基準片メーカーが中心となって審議されている。この規格を参照すべきは硬さ基準片メーカーのみであって、試験機ユーザが確認、遵守する必要はない。

この3規格で構成され、関係業界団体が主体となって改正審議がなされている。ISOではこれら試験方法、試験機、基準片の3規格をPart1, 2, 及び3として一本の規格にまとめた形をとっている。表3にJIS及びISO硬さ試験関連規格を示すが、

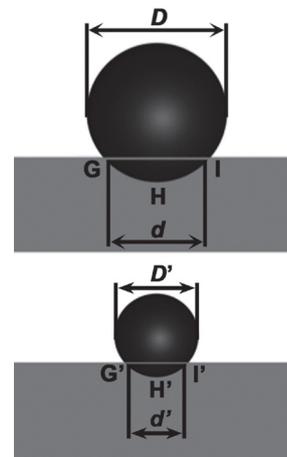


図4 球圧子で硬さの相似則が成立する例外
 $F/D^2 = \text{Const.}$ となるときにのみ $d/D = \text{Const.}$ となり、硬さの相似則が成立する (F : 試験力, d : くぼみ直径)

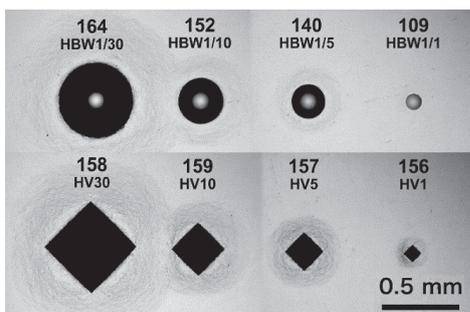


図3 基準片上のブリネルくぼみとピッカースくぼみ
硬さの相似則が成立している場合、くぼみの大小(=試験力の大小)によらず一定の硬さ値が得られる

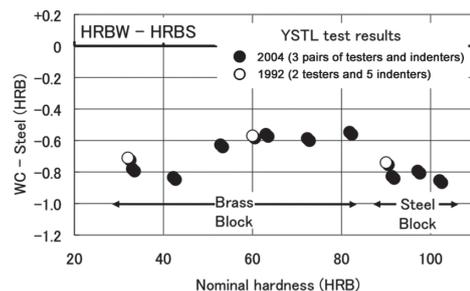


図5 超硬合金球圧子と鋼球圧子によるHRB硬さ測定値の差

表3 現行硬さ関連規格

硬さ種別	試験方法/Part1	試験機の検証及び校正/Part2	基準片の校正/Part3	
ブリネル	JIS	Z2243 2008	B7724 1999	B7736 1999
	ISO	6506:2014		
ピッカース	JIS	Z2244 2009	B7725 2010	B7735 2010
	ISO	6507:2005		
高温ピッカース	JIS	Z2252 1991	—	—
ロックウェル	JIS	Z2245 2016	B7726 2010	B7730 2010
	ISO	6508:2015		
ショア	JIS	Z2246 2000	B7727 2000	B7731 2000
ヌーブ	JIS	Z2251 2009	B7734 1997	B7734 (参考)
	ISO	4545:2005		
超微小負荷硬さ	JIS	Z2255 2003	—	—
計装化押込み	ISO	14577:2015		

JISでは3つの規格の審議団体が異なることもあって、改正のタイミングにズレが生じることもあるため注意が必要である。また、近年の硬さ試験関連のJIS改正審議では、国際化の流れに従い基本的にISO規格に整合する方向で進められている。国際規格の中には誤記や実現不可能な記述も散見されるが、多くの場合はJISの改正で確認・修正が行われているため、見方によっては、国際的に最も信頼できる規格と言えるのではないだろうか。

3.2 硬さ測定値の表記方法

上述の各試験方法規格には、試験方法や試験機の検証の他に硬さ測定値の表記方法についても規定されている。1990年ごろを境に表記方法が変更になったこともあり、古い表記方法や誤った表記方法で硬さ測定値を示している文献も未だに多く見られる。表4に示したとおり、現行JISでは原則として、
 (1) 硬さ測定値、硬さ記号、試験条件の順に表記し、試験条件に括弧等を付さない。また、末尾に余計な単位 (kgf/mm², GPaなど) を付けない。
 (2) 硬さ記号は全て大文字で、下付き文字などは使用しない (計装化押込み試験でのH_{IT}を除く)。
 (3) 試験力の大きさはkgf単位で、その数字のみを表記する。
 (4) ISOに規定されている計装化押込み試験のみ、試験力はN単位で表記する。
 ことになっている。

4 硬さ試験方法の特徴と試験機の精度確認

一般に硬さ試験機は、本体、試料載 (受) 台、試験力負荷機構と制御装置、くぼみ計測装置または硬さ指示装置で構成さ

表4 JISによる硬さ表記方法の例

硬さ種別	硬さ表記の例	説明
ブリネル	515 HBW 10/3000 150 HBW 2.5/62.5 45 HBW 1/5	左から 硬さ値・硬さ記号・球圧子直径(mm)/試験力(kgf)
ピッカース	640 HV 30 120 HV 1 300 HV 0.1	左から 硬さ値・硬さ記号・試験力(kgf)
ロックウェル	60 HRC 32 HRBS 71 HR30TW	左から 硬さ値・硬さ記号
ショア	82 HS (82 HSC, 82 HSD)	左から 硬さ値・硬さ記号 (末尾のC及びDは試験機の形式で省略可)

れている。試験機ユーザは、試験機の精度を確認する検証作業、すなわち直接検証と間接検証を定期的に行うことがJISに定められている。

直接検証とは、試験機の試験力負荷機構やくぼみ寸法測定装置等の、いわゆる直接精度確認をする作業であり、力計 (力検定機) など特殊な機器が必要なことから、試験機ユーザが試験機メーカーやメンテナンス業者等の専門家に依頼して行うことが多い。

間接検証は、直接検証で異常のないことを確認した試験機により硬さ基準片を測り、その基準値と測定値との差、ならびに測定値のばらつきを確認する作業である。これは直接検証とは別の視点から、試験機の状態はもちろん、オペレータの測定作業の適切さまでを確認する、いわゆる総合誤差検査である。これは通常、ユーザ自身が日常管理として実施する。

本章では規格化され、工業的に利用されている硬さ試験方法を中心に解説するが、そのほとんどは国際単位系 (SI) が採択される以前に発明されたものであり、今日の規格も、kgf等の重力単位で考案された試験法を形式上N表記に直しただけのもので、最終的に得られる硬さ値は発明時と何ら変わらない。このため、本稿では誤解を避けるため、基本的に提案された当時のkgf単位で解説する⁸⁾。

4.1 ブリネル硬さ試験

ブリネル硬さ試験は、1900年にスウェーデンの製鋼メーカーの技師J.A.Brinellによって考案された押込み硬さ試験の一種で、硬さ試験はこの試験方法の発明により初めて定量化された。

この試験方法では、直径Dの球圧子を介して試料に試験力Fを加え、試料にくぼみを作成する。このくぼみの表面積Sと試験力Fの関係からブリネル硬さHBが得られる。実際の試験では、くぼみ直径dを測定し、式 (1) によって硬さ値を求める。くぼみ直径測定装置とくぼみ付け試験機が別々となっているものが一般的で、特に工業現場ではくぼみ測定装置には簡易的な携帯型測定顕微鏡を用いることが多い。

$$HBW = \frac{F}{S} = \frac{2F}{\pi D^2 (1 - \sqrt{1 - d^2 / D^2})} \quad (\text{kgf} / \text{mm}^2) \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 F ：試験力 (kgf)
 S ：くぼみ表面積 (mm^2)
 D ：球圧子直径 (mm)
 d ：くぼみ直径 (mm)

現在、試験に供する球圧子は超硬合金球に限定されており、式 (1) 中の“W”は超硬合金球を使用していることを示している。圧子直径 D と試験力 F の組み合わせは原理的には自由ではあるが、JISなどには圧子直径 $D = 1 \sim 10$ mmと試験力 $F = 1 \sim 3000$ kgfの組み合わせで、くぼみ直径 d が $0.24D \sim 0.6D$ の範囲で試験に供すよう規定されている。また、本試験方法では、様々な直径の球圧子、試験力が選択可能であるが、その試験力と球圧子直径との比 F/D^2 が一定でないと、前述の「硬さの相似則」を満たさない。そのため、図3に示すように、同じ圧子で試験力を変えて同じ試料を測っても硬さ値は一定とならないことを忘れてはならない。

本試験方法の試験機の直接検証では、試験力、試験動作（試験力負荷時間、保持時間）、くぼみ測定装置の他、圧子球の形状寸法の検証（抜き取り検査）が規定されている点の特徴である。ブリネル硬さ試験機の直接検証の様子（試験力の検査）を図6に示す。

4.2 ビッカース硬さ試験

ビッカース硬さ試験は1922年、英国ビッカースアームストロング社のR.L.SmithとG.E.Standlandによって提案された硬さ試験方法である。この方法は、ブリネル硬さ試験を基礎にして考案されたものであるが、ダイヤモンド角錐圧子を用い、比較的小さい試験力を採用している。これにより、ブリネルでは測定できなかった、焼入鋼などの硬い試料の硬さ試験も可能となった。

式 (2) からわかるように、原理はブリネルと同様で、試

験力とくぼみ表面積との関係から硬さを求める。図7に示す対角角 136° のダイヤモンド四角錐圧子を介して試料に試験力 F を加え、試料にくぼみを作成し、このくぼみの表面積 S と試験力 F の関係からビッカース硬さHVが得られる。

$$HV = \frac{F}{S} = 1.8544 \frac{F}{d^2} \quad (\text{kgf} / \text{mm}^2) \quad \dots\dots (2)$$

ここで、 HV ：ビッカース硬さ
 F ：試験力 (kgf)
 S ：くぼみ表面積 (mm^2)
 d ：くぼみ対角線長さ (mm)

ビッカース硬さ試験は、硬さの均一な試料に対しては、試験力の大小によらず、一定の硬さ値が得られるという特徴がある。これは角錐形状の圧子を使用することにより、くぼみ形状が試験力によらず相似形となり、硬さの相似則を満足するためである。また、ダイヤモンド製圧子を使用するため、硬い試料から軟らかい試料まで一つの尺度で評価できることがこの試験方法の利点である。

このため、ビッカース硬さ試験では任意の試験力が選択でき、一般には $HV0.01 \sim 50$ ($F = 10$ gf ~ 50 kgf)の範囲で使われている。原理的には試験力によらず一定の硬さ値が得られるため、複数の試験力を採用し、試料の深さ方向への硬さ変化の評価を行うことも可能となる。試験力1 kgf程度以下のビッカース硬さ試験は、一般にマイクロビッカースと呼ばれ、微小領域の硬さ試験に利用されている。

本試験方法の直接検証では、試験力、試験動作、くぼみ対角線長さ測定装置、ダイヤモンド圧子先端形状の検証が規定されている。

4.3 ロックウェル硬さ試験

ロックウェル硬さ試験は1919年に米国のS. P. Rockwellによって考案された押し込み硬さ試験の一種である。ロックウェル硬さ試験では、規定された試験力を図1のように「初試験



図6 専門家によるブリネル硬さ試験機の直接検証

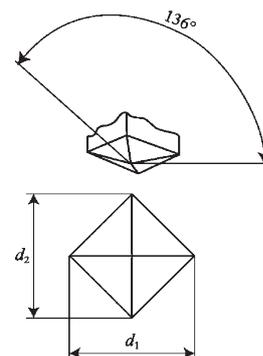


図7 ビッカースダイヤモンド四角錐圧子の形状とくぼみ対象線長さ

力 $F_0 \rightarrow$ 全試験力 $F \rightarrow$ 初試験力 F_0 』と変化させて試料に負荷し、最初の初試験力と最後の初試験力のときのくぼみ深さの差(差分深さ Δh)から硬さを求める。ブリネルやピッカースでは、くぼみを作製し、その大きさを測るという2つの手順を踏まなくてはならないが、ロックウェルはくぼみ作製と同時にその深さを測定する。このような試験の簡便さと、差分深さの再現性の良さから、ロックウェル硬さは現在、工業界で最も普及している硬さ試験方法となっている。

一般にロックウェル硬さ試験での焼入鋼などの測定には、図8に示す先端半径が0.2mmの球状で円錐角120°のダイヤモンド圧子が、また、軟鋼や非鉄金属の測定には焼入鋼球、超硬合金球圧子が用いられている。球圧子の「球」は図9に示すようにホルダーによって保持される。圧子と試験力の組み合わせをスケールといい、試験力が45 kgf以下の試験を特にロックウェルスーパーフィシャルと呼ぶ。表5に示すように、用途に合わせて多種多様なスケールが用いられているが、硬さ未知の試料を測定する場合は、測定試料の硬さによっては

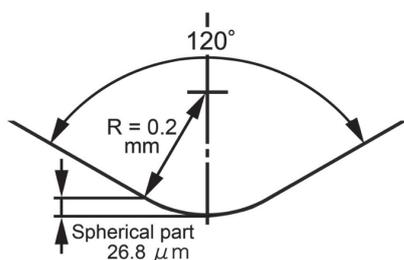


図8 ロックウェルダイヤモンド圧子の形状

球圧子を変形させる恐れがあるため、必ずダイヤモンド圧子を使用するスケールから試してみなければならない。

球圧子を用いる場合、硬さ記号の末尾に鋼球圧子ではSを、超硬合金球ではWをつけるよう規定されている(例: HRBS, HR15TW)。ISOや海外規格では、既に鋼球圧子の使用は禁じられ、超硬合金球圧子を使用することになっており、JISでも超硬合金球圧子への一本化が検討されたが、2015年に行われたJIS Z 2245 ロックウェル試験方法規格の改正では本件に関する変更は見送られた。これは長年の膨大なデータの蓄積や一部の業界からの強い要望があったためと推察されるが、技術的には、硬く、変形しにくい超硬合金球の方が良いのは言うまでもない。また、ロックウェル硬さは圧子や試験力の種類が多いため、試料や試験の目的に応じたスケールを選択できるが、硬さの相似則が成り立たないため、同じ試料を異な

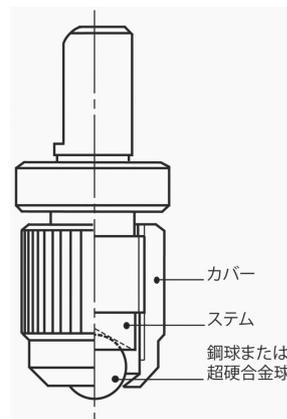


図9 球圧子の構造(1/4インチ球の例)

表5 ロックウェル硬さのスケールと用途の例

スケール	硬さ記号	圧子	初試験力 F_0 (kgf)	全試験力 F (kgf)	硬さの算出 Δh はmm単位	用途例
C	HRC	頂角120°、 先端半径0.2mmの ダイヤモンド円錐圧子	10	150	HR = 100 - 500 Δh	100 HRB 以上の硬い材料で70 HRC 以下のもの、深い肌焼鋼 Cスケールよりやや低試験力を希望 するもの(浅いか中位の肌焼鋼)
D	HRD			100		
A	HRA			60		
G	HRGS (HRGW)	直径1/16インチ: 1.5875 mmの鋼球 (または超硬合金球)	10	150	HR = 130 - 500 Δh	Bスケールを適用するには硬すぎる 材料 焼なました状態の鋼で0~100 HRB の硬さの材料 軸受メタル、焼きなました黄銅、銅、 薄板
B	HRBS (HRBW)			100		
F	HRFS (HRFW)			60		
K	HRKS (HRKW)	直径1/8インチ: 3.175 mmの鋼球 (または超硬合金球)	10	150	HR = 130 - 500 Δh	非常に軟らかい材料(例えば軸受メ タル)や、ごく薄い材料
E	HRES (HREW)			100		
H	HRHS (HRHW)			60		
45N	HR45N	頂角120°、 先端半径0.2mmの ダイヤモンド円錐圧子	3	45	HR = 100 - 1000 Δh	窒化鋼または類似のものや、硬い材 料の薄板
30N	HR30N			30		
15N	HR15N			15		
45T	HR45TS (HR45TW)	直径1/16インチ: 1.5875 mmの鋼球 (または超硬合金球)	3	45	HR = 100 - 1000 Δh	鋼、黄銅、青銅の薄板
30T	HR30TS (HR30TW)			30		
15T	HR15TS (HR15TW)			15		

るスケールで測っても同じ値を得ることはできない。

本試験方法の直接検証では、試験力、試験動作、深さ計測装置、圧子の検証が規定されている。ダイヤモンド圧子の検証については、形状を測定する直接検証と基準片測定による間接検証とが規定されているが、圧子形状が許容範囲内であっても、硬さ測定値にある程度の差が出ることもあるため、注意が必要である。

4.4 ショア硬さ試験

ショア硬さ試験は、1907年米国のA. F. Shoreにより提案された反発硬さ試験の一種である。ハンマと呼ばれる先端にダイヤモンド圧子が埋め込まれた鋼製衝突子を、一定の高さから自由落下させ、その跳ね上がり高さから式(3)により硬さを求める。

$$HS = k \frac{h}{h_0} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、HS：ショア硬さ

k ：係数(C型：153.8, D型：140)

h_0 ：ハンマの落下高さ

h ：ハンマの跳ね上がり高さ

ハンマの形状や跳ね上がり高さ読み取り方式の異なるC型とD型(図10)とがあるが、どちらもポータブルで電源が不要なため、圧延ロールなど大型試料の現場測定に使用される。またマクロな試験としては、くぼみが比較的小さく目立ちにくいいため、製品そのものの出荷前検査にも適している。

一般に反発硬さには試料の質量が大きく影響するため^{5,9)}、質量数キログラム以下の小型軽量試料を単体で測定してはならない。そのため、約380gのショア硬さ基準片を測定する際には、図11に示す質量8kgの試験機機枠を用いることがJISに規定されている。

間接検証に用いるショア硬さ基準片の基準値決定試験で

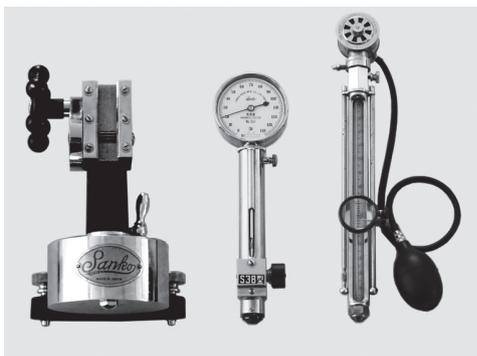


図10 D型(中央) およびC型(右) ショア硬さ試験機とJIS 8 kg 機枠(左)

は、日本独自の基準値決定方法が採用されている。ショア硬さは戦前から使用されているが、当時は反発硬さ試験特有の測定値の不安定さにより、基準片基準値と実際の測定値との差が生じやすく、ショア硬さに対する評価は高くなかった。そのような中、1944年に吉沢武男博士は、この差を軽減する手段として、ショア硬さそのものからではなく、より安定した特性値であるピッカース硬さによるショア硬さ基準値決定方式を提案、発表した。この方式が現在でも、JIS B 7731 ショア硬さ試験—基準片の校正に、ショア硬さ基準片の基準値決定法として規定されている。これは式(4)に示す4次式により、実測HVから換算ショア硬さVHSを求める方法で、多数の試験機による測定データを基にしたものである。ここでは詳細な説明は割愛するが、D. Taborによる理論を利用した、ランダムポリリッシュと呼ばれる、硬さ基準片の基準値にショア硬さ試験機の見盛を合わせる(圧子先端形状を調整する)技術の採用と、このHV—HS換算による基準値決定方式とが成功したため、日本では現在でも広くショア硬さ試験が使用されている。このような比較測定機であるショア硬さ試験機の性格と、直接検証の効果が技術的に少ないことから、間接検証のみがJISに規定されている^{2,10)}。

$$VHS = (1.7435a - 1.1505a^2 + 0.5818a^3 - 0.1609a^4) \times 100 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、VHS：換算ショア硬さ

$$a = \frac{\text{ピッカース硬さ (HV)}}{1000}$$

4.5 リーブ硬さ試験

リーブ硬さ試験はD. Leebにより提案された反発硬さ試験の一種である。インパクトボディと呼ばれる、先端に超硬合

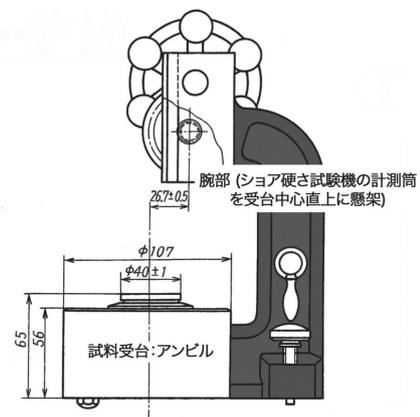


図11 ショア硬さ基準片測定用8 kg 機枠

金球等の圧子が埋め込まれた金属製の棒状衝突子をバネ力により発射、試料に衝突させ、その衝突前後の速度比から、式(5)のようにリープ硬さHLを求める。

$$HL = \frac{V_2}{V_1} \times 1000 \dots \dots \dots (5)$$

HL：リープ硬さ
 V₁：衝突前の圧子速度
 V₂：衝突後の圧子速度

前述のショア硬さ試験同様、試料の質量が試験結果に大きく影響する。ショア硬さでは質量380 kgの基準片を重い機枠上に置いて用いるのに対し、本試験方法では、質量2.7 kgの大型の基準片が使用される。このため、日本では日本材料試験技術協会 ロール硬さ委員会と試験機メーカーによる検討の結果、φ 115×t 33 mm, 質量2.7 kgの共析炭素鋼製が開発され、式(6)および式(7)に示すHV値からHLDおよびHLE硬さへの換算により基準片の値を決定している¹¹⁾。

$$\begin{aligned} VHLHD = & 3.89473HV - 0.0103653HV^2 + 1.60318 \times 10^{-5} HV^3 \\ & - 1.23218 \times 10^{-8} HV^4 + 3.65212 \times 10^{-12} HV^5 \end{aligned} \dots \dots \dots (6)$$

$$\begin{aligned} VHLE = & 3.82045HV - 0.0107606HV^2 + 1.75250 \times 10^{-5} HV^3 \\ & - 1.40442 \times 10^{-8} HV^4 + 4.32223 \times 10^{-12} HV^5 \end{aligned} \dots \dots \dots (7)$$

式(6)のHLDは超硬合金球製インパクトボディ、式(7)のHLEはダイヤモンド製インパクトボディを使用した場合の換算式で、VHLの“V”はHVからの換算値であることを示す。

本試験方法については、JISではJIS Z 2246の附属書(参考)に速度比検出式試験機による試験方法について簡単に触れられているのみとなっている。

4.6 計装化押込み試験(超微小硬さ試験、ナノインデンテーション)

計装化押込み試験は、2002年にISO 14577として規格化された比較的新しい硬さ試験方法である。

試験中の試験力と圧子の試料への侵入深さを連続的に測定する方法で、理論的にはブリネルに匹敵するような大きな試験力でも利用可能だが、10 mN程度以下のごく微小な試験力で使用されることがほとんどである。この微小試験力領域で行われる計装化押込み試験が、超微小硬さ試験、ナノインデンテーションと呼ばれる。

この試験方法が実用化されたことにより、従来法では難し

かった微小領域や硬質被膜等の硬さが評価可能になった。図12には、炭素工具鋼の下部ベイナイト組織に試験力10mNのナノインデンテーション試験を適用した例を示すが、このように微小な試験力、微小なくぼみで試験できるため、金属相ごとに硬さが評価可能である。

今後の発展、普及が期待される本試験方法ではあるが、多くの問題点が残されている発展途上の試験方法であるため、下記の点に十分、注意、理解した上で利用されたい。

- (1) 圧子先端形状の理想形状からのズレや試験機機枠の弾性変形が試料への圧子侵入量の測定値に影響するため、試験前に試験機メーカーが推奨する標準試料(BK7やFused Silica)を用いてエリアファンクションやフレームコンプライアンスなどの補正值算出のための試験を行う必要がある。
- (2) 試験結果として押込み硬さH_{IT}やマルテンス硬さHM、押込み弾性率E_{IT}などが得られるが、これらとビッカース硬さ試験や引張試験など、従来法による試験結果との相関は十分に明らかになっているとは言えないため、データの取扱いには注意を要する。
- (3) 試験結果の評価、例えば繰返し性を評価する際は、従来の硬さ試験方法と同等に扱ってはならない。ロックウェル硬さでは、「硬さのばらつきが10%」というと、かなり大きく感じるが、微小試験力の計装化押込み試験で「硬さのばらつき10%」は、現状では「よく一致している」と言うべきかもしれない。このばらつきの原因については、試料によるものなのか、補正の適否や表面検出、温度ドリフトなどの試験の誤差によるものなのかを分離して検討する必要があるが、その分離は容易ではない^{9,12,13)}。

5 硬さ基準片と間接検証

圧子を含む試験機の正確さは基本的には4章に述べた直接精度に依存している。このため、専門家による試験機の定期的

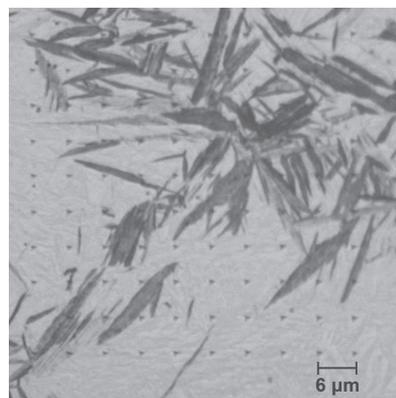


図12 ナノインデンテーション試験の利用例ーベイナイト組織の相別硬さ評価

な点検（直接精度検証）を実施することが望ましい。また、一般に試験機の外見から異常を発見することは難しいため、目的とする試料の試験の前に、図13に示すような硬さ基準片を5点程度測定し、その平均値とばらつきによる日常管理を実施しておく。これがJIS・ISOにおける試験機の間接検証である。

間接検証に用いられる基準片の需要は年間約3万5000個程度で、約140種類がJIS・ISOに準拠して製造されている。図14に示す基準片の需要構成比率は、試験の性質や使用目的が異なるため、試験機のシェアや利用者の多さとは必ずしも一致しないが、ロックウェルが他の試験方法に比較して圧倒的に多いことがわかる。これらの基準片には、硬さが理想的に均一で、材質的に硬さの経時変化がなく、表示される基準値が普遍的で信頼性が高いという3つの特性が求められる。このため材料採取から測定的全工程にわたり、品質の安定をはかるために20個単位のロット生産が行われている。基準値決定試験については、その信頼性を確保するため、原則として2台の試験機、2名の測定者により $n=5 \times 2$ の繰り返し測定を実施し、その結果を図15に示す検査票（Certificate）として基準片に添付している。また、保証期間は検査日から3年間となっており、この間、全基準片の測定データと共に、1ロッ

ト中の先頭番号の基準片1個が保証用に保管されている。

5.1 硬さ均一性

基準片の硬さ均一性は、詳細には試験方法ごとに考える必要があるが、大きくは材料の品質と熱処理組織の均一性によって決まる。基準片用材料には清浄度の高い専用の鋼を中心とする金属材料を用いており、素材の微小な中心偏析を避けるために、鋼材の断面を試験面とすることのないよう、丸棒からではなく平板から材料を採取している。この材料の選定が硬さ均一性に大きく影響するため、日本の硬さ基準片の高い品質は、高品質の日本製鋼材によるものと言っても過言ではない。平板を加工して円盤形状としているのは、熱処理における加熱・冷却の効果を、できるだけ均等にするためである。熱処理については、焼入不良による微細パーライトなどの欠陥組織を生じないように加熱、冷却条件を材料の溶解チャージごとに十分に吟味して決定する。その他、仕上げ加工も研削焼け（強研削による部分的な焼戻組織の混入）や、加工変質層等を生じないように、加工条件の選定、管理が行われている。図16に代表的な硬さ基準片に用いられる、共析鋼の均一で炭化物の析出がごく僅かな焼戻マルテンサイト組織を、また、表6に



図13 硬さ基準片の外観
試験面1から10の数字は2台の試験機による各5点の測定位置、㉑は基準値や製造年、側面㉒は製造番号

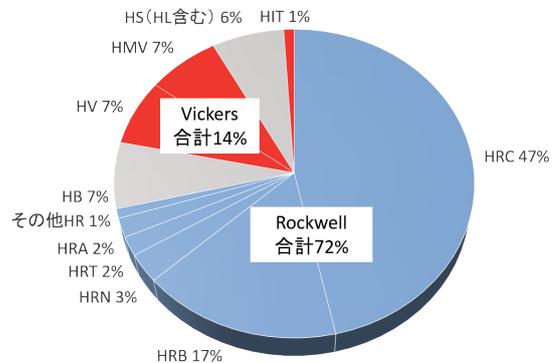


図14 硬さ基準片の需要構成比率

第1回測定 The first measurement		第2回測定 The second measurement				
(n=5)		(n=5)				
1	2	3	4	5	$\bar{x}(1 \sim 5)$	$R(1 \sim 5)$
30.0	30.0	30.1	30.0	30.0	30.02	0.1
6	7	8	9	10	$\bar{x}(6 \sim 10)$	$R(6 \sim 10)$
30.0	30.1	30.1	30.1	30.0	30.06	0.1

硬さ基準片検査票 Hardness Block Certificate	
製品名 Assortment	HRC 30
製造番号 Serial No.	469-618
硬さ Hardness	30.0 HRC
測定者 Operator	Y K
測定年月日 Date	15.06.11

表 (正面) / **裏** (裏面)
 1. 硬さ基準片の製作... 2. 硬さ基準片の使用... 3. 硬さ基準片の測定... 4. 硬さ基準片の保管...

図15 硬さ基準片付属の検査票
a: 測定日 b: 測定結果 c: 平均値とばらつき d: 準拠規格 e: 耐用点数の例

は最も代表的な硬さ基準片の硬さ均一性の実績を示す。

5.2 硬さ安定性

基準片は、その硬さに経時変化がなく、安定でなければならない。このため鋼製基準片では、焼入後には深冷処理を施し、金属組織中の残留オーステナイトを極力減少し、マルテンサイト単相の組織とした上で、目的の硬さに合わせた焼戻し処理を行う。また、非鉄合金製の基準片の表面仕上げについては、特に強加工を避け、さらにひずみ取り焼なましが行われる。これらの配慮により、工業的には基準片自身の材質による硬さの経時変化を生じることはない。

ただし、基準片の使用点数の増加による微小な変形や、隣接するくぼみによる部分的な加工硬化に起因した僅かな測定値の上昇を生じることが避けられない。図17には、ロックウェルCスケール基準片の測定点数による硬さ測定値の変化を示す。このことは、硬さ基準片があくまでも工業上の便宜的な標準に過ぎず、本来の硬さの標準は「力」と「長さ」によるざるを得ないことを示している。

5.3 JIS・ISOに準拠した普遍的な値付け

実際の金属材料の硬さ試験では、圧子による押込みの最中にも加工硬化が進行し、また図18に示すように、試験力を負

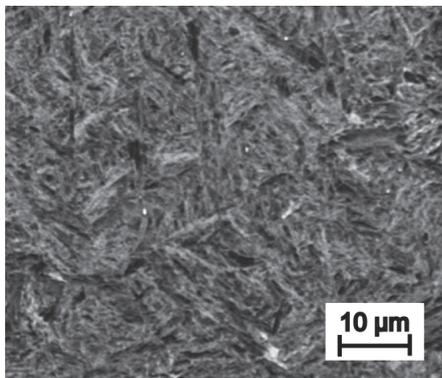


図16 共析炭素鋼製基準片の焼入マルテンサイト組織

表6 硬さ基準片の均一性

基準片の硬さ	試験法	測定点数 n	ばらつき R の平均			σ の推定値 (= R bar / d2)		
			R1	R2	Rtotal	σ1	σ2	σtotal
60HRC (700HV)	HRC	5 × 2	0.068	0.12	0.143	0.029	0.052	0.046
	HV30	5 × 2	2.69	2.83	3.92	1.16	1.22	1.27
	HV1	3 × 2	3.37	3.51	5.03	1.99	2.07	1.99
30HRC (300HV)	HRC	5 × 2	0.11	0.14	0.201	0.047	0.060	0.065
	HV10	5 × 2	1.91	1.87	2.73	0.82	0.80	0.89
	HV1	3 × 2	2.57	2.58	3.88	1.52	1.52	1.53

(注1)HRC: 24ロット(480個)の平均、HV: 12ロット(240個)の実績調査結果(2004)

(注2) R = HRC (またはHV) max - HRC (またはHV) min, R1, R2は別々の試験機による測定結果, Rtotalはその平均

荷する速さ(時間)や保持時間の長さ、すなわち、試験サイクルによってくぼみの大きさが若干変化するため、基準片に絶対的な基準を求めることはできない。このため、JIS・ISO基準片規格では、直接精度の優秀な試験機により、普遍的で共通の試験条件を用い、これを試験機規格より厳しい許容誤差で管理された基準値測定を実施し、基準片の値を工業的に決めることが定められている。

また、ロックウェルCスケールなどでは、くぼみ深さ測定方式であることやダイヤモンド圧子の成形の難しさから、基準片用圧子であっても、図19に示すように圧子間の微差は避けられない。このため、約200本のダイヤモンド圧子群の平均値による基準値管理が行われている。この考え方は基準値決定用ロックウェル硬さ試験機にも適用されていて、信頼性の高い複数の試験機により管理が行われている。

くぼみ面積を利用するブリネルやピッカースなどでは、くぼみ深さ測定方式と比較して圧子間の誤差や機差の問題は非常に小さいが、この場合にも基準片の基準値決定試験では2台の試験機、2名の測定者による比較測定が実施されている。

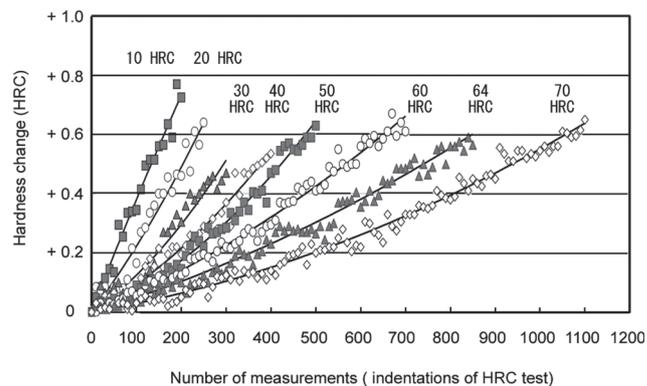


図17 測定点数増加による基準片測定値の変化 (HRC)

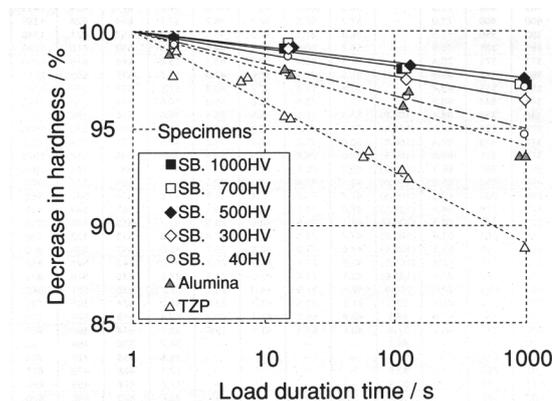


図18 ピッカース硬さにおける試験力保持時間の影響

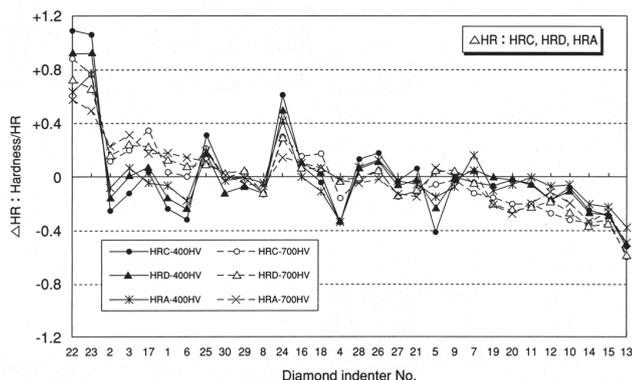


図19 ロックウェルダイヤモンド圧子による硬さ値の差 (縦軸のゼロは全圧子の平均)

5.4 硬さ基準片による比較の有効性

基準片は単に規格上の間接検証に留まらず、図18のように試験条件による硬さの差を確認する場合や、図19のように、圧子や試験機を比較する場合、くぼみ寸法の顕微鏡測定における装置間の差や個人差を把握したい場合にも利用できる。また、表6におけるばらつき R_1 と R_2 の差も、基準片の均一性を利用して、2台の試験機の比較を行った結果と見こともできる。前述のように、基準片は硬さの絶対的な基準とはなりえないが、その均一性を生かして、種々の比較や確認において「硬さの差を示す」ことができる「硬さ試験を総合的に確認する」ための道具として有効に用いられている。

5.5 硬さ基準片使用上の注意点

図13に示したように、基準片の側面には製造番号が、測定面には基準値などが表示されている。間接検証を行う前に、基準片に添付された図15の検査票と照合し、以下の項目を確認する。

- (1) 基準片保証期間の確認。
- (2) 新品の鋼製基準片の場合、全体に防錆油が塗布されている。使用前に清潔な布とアルコールなどを用い、完全に除去する。
- (3) 表裏面に傷、さび、ゴミ等の付着がないことを確認する。
- (4) 測定(くぼみ)点数を確認する。5.2項で述べた通り、測定点数の過多は硬さ値の増大、また、ばらつき上昇の原因となる。JISに規定されているくぼみ間隔に従って測定し、適切なタイミングで基準片を交換する。

6 まとめ

硬さは正しい大きさのくぼみをつけることに始まり、それを正しく測ることにより信頼性が確保される。この意味で、

試験力の負荷が最も重要であり、ついでそのくぼみの大きさをいかに正確に測るかが重要となる。これに付随して、試験力を負荷する速度や時間が問題となる。

一方、どんなに高精度な硬さ試験機であったとしても、使用状況や経年劣化により、異常や故障を起こすことは避けられず、それに気づかずに測定を行うことはトラブルの原因になる。これを未然に防ぐために、均一性が高く、JISに準拠した普遍性の高い基準値の与えられた基準片で試験機の管理を行う必要がある。基準片の測定結果に異常値が認められた場合には、圧子や試験力の設定、ダイヤルゲージや顕微鏡の倍率や照明、あるいは操作上の間違いがないことを確認した上で、試験機メーカーや専門業者に点検修理を依頼する必要がある。最近では、試験機や基準片の状態を確認することよりも、これに付属する証明書の種類を重視し、定期的なメンテナンスや検証を怠っているケースも散見され、これに起因するトラブルも少なくない。日本の硬さ試験機や基準片の品質は、世界最高水準にあると言って過言ではなく、日本のみならず、世界中で広く愛用されている。Made in Japanの国際的な信頼性のためにも、日本の硬さ試験関係者には“トレーサビリティ”や“国際整合化”、“証明書”にとらわれ過ぎずに、「正しい方法で精度よく測る」という本来の目的を全てに優先して、硬さ試験を活用していただきたい。

参考文献

- 1) 吉沢武男編：硬さ試験方法とその応用，裳華房，(1967)
- 2) 関谷三郎，山本正之：工業量としての硬さ試験，「現場の硬さ試験」講習会テキスト，日本材料試験技術協会，(2009)
- 3) 山本卓，小島光司：計測と制御，44 (2005) 10, 722.
- 4) D.Tabor 著，山本卓訳：The Hardness of Metals 日本語版，山本科学工具研究社，(2006)
- 5) 山本卓，宮原健介：検査技術，19 (2014) 1.
- 6) 山本卓：金属，76 (2006) 12, 1310及び77 (2007) 1, 74.
- 7) 山本卓：材料試験技術，50 (2005) 1, 37.
- 8) 山本卓：材料試験技術，58 (2013) 3, 165.
- 9) 山本卓：熱処理，56 (2016) 2, 59.
- 10) 関谷三郎，望月俊男：鉄と鋼，71 (1985) 8, 945.
- 11) 高野太刀雄，山本卓，山本正之：ロール硬さ委員会資料593，日本材料試験技術協会，(2015)
- 12) 宮原健介，山本卓，石橋達弥：材料試験技術，61 (2016) 2, 91.
- 13) 山本卓：材料試験技術，52 (2007) 2, 80.

(2016年5月23日受付)