ロックウェル・クォータロード硬さ試験 について (第2報)*

—ロックウェル硬さと同クォータロード硬さの比較試験—

真 下 美 佐 男**

On the Rockwell Quarter Load Hardness Test (2nd Report)
—Comparison between Rockwell Hardness and Rockwell Quarter Load Hardness—

Misao MASHIMO

This paper presents the result of comparison of hardness, where the accurate Rockwell and Rockwell superficial hardness testing machines, their quarter load hardness testing machines (1st report) and the standardized hardness blocks of five levels are applied. The first comparison is made between the first two machines and the sub-standard hardness testing machine (National Research Laboratory of Metrology type) to confirm total accuracy of the former ones, the differences are $-0.4-0$ in HRB and $-0.3-0$ in HR 30 T. In the second comparison between HRB•HR 30 T and their quarter load hardness HRBQ•HR 30 TQ, the differences are $-0.2-0$ (HRB 100-50), -0.9 (HRB 30) between HRBQ and HRB, and $-0.1-0.2$ (HR 30 T 80-32) between HR 30 TQ and HR 30 T. These values are small enough to verify the utility of HRBQ and HR 30 TQ. Moreover, the utility of the other quarter load hardness scales is presumed. The errors of geometric similarity of indentations, that is, the differences between $d_{2Q} : d_2$ (the ratios of diameters of HRBQ•HR 30 TQ indentations to those of HRB•HR 30 T indentations, respectively) and $1 : 2$ (the ratio of the sizes of the respective indenters) are lower than 1%. The errors of similarity in hardness, that is, the differences between $h_{bQ} : h_b$ (the ratios of the depths of indentations which are calculated with respective hardness numbers) and $1 : 2$ are lower than 1%.

Key words : hardness comparison, accurate hardness testing machines, sub-standard hardness testing machine, standardized hardness block, total accuracy, HRB, HRBQ, HR 30 T, HR 30 TQ, utility, geometric similarity, similarity in hardness

1. 緒 言

第1報¹⁾において、ロックウェル硬さ試験方法の荷重を1/4にしたロックウェル・クォータロード硬さ試験方法を提唱し、硬さの相似性の理論と、これを実証する硬さ比較試験のために製作した硬さ試験機の精度について報告した。これらの硬さ試験機と硬さ基準片を使用して、鋼球圧子を使用するHRB、HR 30 Tスケール硬さと、そのクォータロード硬さにつき比較試験を行い、ロックウェル・クォータロード硬さ試験方法の実用性が認められるという結果が得られたので報告する。

2. 実験装置および実験条件

新しく製作した硬さ試験機¹⁾を使用し、ロックウェル硬さと同クォータロード硬さの比較試験を行う。

実験は鋼球圧子を使用するロックウェル硬さのうち最も広く使用されているHRBスケール硬さと、そのクォータロード硬さであるHRBQスケール硬さ¹⁾(以下HRB, HRBQという)と、HR 30 Tスケール硬さとそのクォータロード硬さであるHR 30 TQスケール硬さ¹⁾(以下HR 30 T, HR 30 TQという)について行った。それらの圧子、荷重、硬さの算出式を表1に示す。

なお、円すい圧子はダイヤモンド結晶体を成形したもので、その形状を正確に製作することは困難である。日本工業規格²⁾で規定する形状精度(先端球面半径 0.2 ± 0.02 mm, 円すい角度 $120^\circ \pm 30'$)に合格する圧子を使用しても、得られる硬さの誤差は大きい³⁾⁴⁾。ク

* 原稿受付 昭和58年3月31日, 昭和56年度精機学会春季大会学術講演会(昭和56年3月29日)および昭和57年度精機学会春季大会学術講演会(昭和57年3月24日)にて発表

** 正 会 員 相模工業大学工学部(藤沢市辻堂西海岸1-1-25)

Table 1 Hardness scale, indenter, load, calculation formula for hardness

Scale	HRB	HRBQ	HR 30 T	HR 30 TQ
Item				
Dia. of indenter mm	1.587 5	0.793 8	1.587 5	0.793 8
Minor load N {kgf}	98.07 {10}	24.52 {2.5}	29.42 {3}	7.355 {0.75}
Major load N {kgf}	980.7 {100}	245.2 {25}	294.2 {30}	73.55 {7.5}
Calculation formula	130-500 <i>h</i>	130-1 000 <i>h</i>	100-1 000 <i>h</i>	100-2 000 <i>h</i>

h; depth of indentation after removal of major load, mm

オータロード硬さ試験用の円すい圧子（先端球面半径 0.1 mm, 円すい角度 120°）については、その形状精度はさらにきびしく要求されるので製作は困難である。そこでこれを使用するスケールは今回の実験の対象から除外した。

2.1 硬さ試験機

1) ロックウェル硬さ試験機（ARK-A 改または A 改） 明石製作所製のロックウェル硬さ試験機の荷重装置、硬さ指示装置を改造した¹⁾。

2) ロックウェル・クオータロード硬さ試験機（ARK-MQ または MQ） 明石製作所製のミニロックウェルスーパフィシャル硬さ試験機を A 改と同様に改造した¹⁾。

3) ロックウェルスーパフィシャル硬さ試験機（ARK-MS 改または MS 改） ARK-MQ の圧子軸に付加おもりを取り付けて基準荷重を変更、試験荷重は荷重レバーのおもりを変更、硬さ指示計のセット値を 100 に切り換えて¹⁾使用した。

4) ロックウェル・クオータロード・スーパフィシャル硬さ試験機（ARK-MQS または MQS） ARK-MQ とほぼ同じ構造で、硬さ指示計の 1 目盛をくぼみ深さで 0.5 μm とした¹⁾。

5) 鋼球圧子直径精度 東京都立工業技術センターにおける測定の結果、呼び径 1.587 5 mm, 0.793 8 mm の 2 種類の鋼球について、2 個ずつ抜き取り、それぞれ 5 回、10 個の測定値の平均は 1.589 8 mm, 0.787 9 mm であった。測定圧（約 0.6 N）による弾性変形 0.3 μm , 0.5 μm を考慮して 1.590 0 mm, 0.788 5 mm とする。したがって鋼球直径の誤差は 2.5 μm , -5.3 μm となる。なお呼び径 1.587 5 mm 鋼球は明石製作所より分与されたものであり、後述の計量研型校正用硬さ試験機の圧子の鋼球と同じ精度である。

2.2 硬さ試験機の試験条件

日本工業規格⁵⁾では、ロックウェル硬さ基準片の硬さを決定するときの試験機の負荷条件として、試験荷重の負荷速度は圧子の平均押込み速度で約 10 $\mu\text{m/s}$ 、試験荷重の保持時間は 10 s、試験温度は原則として 23 $\pm$ 5°C としている。

2.2.1 負荷速度（押込み速度）

1) ARK-A 改, ARK-MQ では平均の押込み速度が HRB 70 で 10 $\mu\text{m/s}$ になるようダッシュポットを調整した結果、試料が軟らかくなるほど押込み速度が早くなり、実験に使用した硬さ基準片では 8~13 $\mu\text{m/s}$ であった。

2) ARK-MS 改では MQ として使用するときのダッシュポット速度のままとし、ARK-MQS では HR 30 T 72 のとき硬さ指示計目盛で 10/s になるようダッシュポットを調整した結果、実験に使用した硬さ基準片では MS 改で 5~10 $\mu\text{m/s}$, MQS では 4~7 $\mu\text{m/s}$ となった。

HRB, HR 30 T に及ぼす負荷速度の影響は以上の値と 10 $\mu\text{m/s}$ との間では全く認められない⁶⁾⁷⁾。

2.2.2 荷重保持時間

試験荷重の保持時間はすべての試験で 10 s とした。

2.2.3 試験温度

HRB に及ぼす試験温度の影響は大きく⁸⁾、HRB 30 付近では 0.1/°C に近いので、室温を 22 $\pm$ 1°C に 3 h 以上保持した後、硬さ試験を行った。

2.3 硬さ基準片

山本科学工具研究社製の硬さ基準片を使用した。表面は鏡面仕上し、測定面は日本工業規格⁵⁾に従い同心円及び扇状に各 3 分割し、9 区画の面積が等しくなるよう形板を準備した。

3. 実験結果と考察

3.1 ARK-A 改と ARK-MS 改の総合精度

A 改と MS 改の総合精度を確認するために明石製作所設置の計量研型校正用硬さ試験機⁹⁾（以下 SHT-3 と呼ぶ）と硬さ基準片を使用して比較試験を行った。SHT-3 は計量研究所の硬さ校正システムのうち、標準試験機に次ぐ高精度の試験機である。

3.1.1 ARK-A 改と SHT-3 の比較試験

試料受台（以下アンビルという）は直径 20 mm であり、同一のものを、圧子はそれぞれ付属のものを使用した。ただし、圧子用鋼球は同一製作ロットで、同じ精度である。硬さ基準片は 5 個、HRB 100 と 90 は鋼製、他は黄銅製である。9 区画各 1 点、合計 9 点の測定を行った。結果を表 2 に示す。

A 改と SHT-3 の指示値の差は -0.4~0 であり、両試験機の総合誤差¹¹⁾¹⁰⁾から生じ得るものであるが、分散分析の結果 HRB 70 では 1% の水準でその差は有意である。しかし、その値は日本工業規格⁵⁾に示される「ロックウェル硬さ基準片の硬さ決定に使用する試験機で、B 硬さ基準片を 9 点 1 反復で測定したときの、

Table 2 Comparison between ARK-A-improved and SHT-3 ($n=9(\sigma)$)

Specimen Machine	HRB 100	HRB 90	HRB 70	HRB 50	HRB 30
(1) ARK-A-im.	100.0 (0.15)	93.2 (0.07)	70.7 (0.15)	53.5 (0.23)	32.7 (0.51)
(2) SHT-3	100.0 (0.11)	93.2 (0.12)	71.0 (0.16)	53.5 (0.24)	33.1 (0.41)
(1)-(2)	0	0	-0.3**	0	-0.4

** Significant by 1% level

Table 3 Comparison between ARK-MS-improved and SHT-3 ($n=18(\sigma)$)

Specimen Machine	HR 30 T 80	HR 30 T 76	HR 30 T 72	HR 30 T 52	HR 30 T 32
(1) ARK-MS-im.	81.3 (0.10)	76.2 (0.08)	73.8 (0.28)	53.9 (0.11)	32.7 (0.17)
(2) SHT-3	81.4 (0.10)	76.3 (0.11)	74.1 (0.16)	54.0 (0.10)	32.7 (0.14)
(1)-(2)	-0.1**	-0.1*	-0.3**	-0.1*	0

* Significant by 5% level, ** Significant by 1% level

Table 4 Comparison between HRBQ and HRB ($n=18(\sigma)$)

Specimen		HRB 100	HRB 90	HRB 70	HRB 50	HRB 30
Scale						
HRBQ		99.4 (0.17)	91.8 (0.14)	68.0 (0.30)	57.0 (0.20)	26.1 (0.35)
HRB		99.6 (0.12)	92.2 (0.11)	68.6 (0.09)	57.7 (0.16)	27.6 (0.25)
Correc- tion #	(1) HRBQ	99.6	92.0	68.3	57.4	26.6
	(2) HRB	99.6	92.2	68.5	57.6	27.5
	(1) − (2)	0	−0.2**	−0.2*	−0.2**	−0.9**

Hardness numbers are corrected with effect due to errors of indenter-diameters

* Significant by 5% level, ** Significant by 1% level

硬さ基準片の硬さ平均値の信頼率95%の信頼限界、 $\pm(0.8\sim0.9)$ 」の1/2以内に入っており、A改は比較試験用の試験機として十分な総合精度を持つものと考ええる。

3.1.2 ARK-MS改とSHT-3の比較試験

アンビル(直径20mm)、圧子は同一のものを使用した。硬さ基準片は5個、HR 30 T 80と76は鋼製、他は黄銅製である。9区画各1点、合計9点を1回とし、2回反復し、総計18点の測定を行った。結果を表3に示す。

MS改とSHT-3の指示値の差は $-0.3\sim0$ であり、両試験機の総合誤差¹¹⁾¹⁰⁾から生じ得るものであるが、分散分析の結果はHR 30 T 80と72では水準1%、76と52では水準5%でその差は有意である。しかし、それらの値は日本工業規格⁵⁾に示される「ロックウェル硬さ基準片の硬さ決定用使用する試験機でHR 30 T 36以上の硬さ基準片を9点1反復で測定したときの硬さの平均値の信頼率95%の信頼限界、 ± 1.4 」の1/4以下で、MS改は比較試験用の試験機として十分な総合精度を持つものと考ええる。

3.2 HRBQとHRBの比較測定

HRBQ測定にはARK-MQ、HRB測定にはARK-A改、アンビルは異なるが直径はいずれも20mmを使用。硬さ基準片は5個、HRB 100と90は鋼製、他

は黄銅製である。9区画各1点、合計9点を1回とし、2回反復し、総計18点の測定を行った。結果を表4に示す。鋼球圧子直径の誤差による硬さ値の誤差¹¹⁾の補正を行った。

表4の補正後のHRBQとHRBの差は100~50で $-0.2\sim0$ 、30で -0.9 で、HRB 30を除き、ARK-MQとARK-A改の総合誤差¹⁾より生じ得る値であるが、分散分析の結果HRB 90、50、30では水準1%、70では水準5%でその差は有意である。しかし、それらの値は小さく、最も大きいHRB 30の -0.9 でも3.1.1節に述べた硬さ基準片の硬さの平均値の信頼率95%の信頼限界 ± 0.9 と同じ値である。また、一般のロックウェル

硬さ試験機の総合誤差は日本工業規格²⁾では、HRB 30は ± 2.0 であり、その1/2以下であるから、実用上十分な一致と考える。

3.3 HR 30 TQとHR 30 Tの比較測定

MS改とSHT-3の比較試験に使用した硬さ基準片を共用し、HR 30 Tの値はそのときのMS改の測定値を使用した。HR 30 TQ測定にはARK-MQSを使用し、9区画各1点、合計9点を1回とし、2回反復し総計18点の測定を行った。MQSでは基準荷重が小さく試料が安定しないため図1のクランプ金具(アンビル直径16mm)を使用した。結果を表5に示す。鋼球圧子直径の誤差による硬さ値の誤差¹²⁾の補正を行った。

Fig. 1
Clamping device

Table 5 Comparison between HR 30 TQ and HR 30 T ($n=18(\sigma)$)

Scale	Specimen	HR 30 T 80	HR 30 T 76	HR 30 T 72	HR 30 T 52	HR 30 T 32
	HR 30 TQ	81.2 (0.14)	76.0 (0.14)	73.6 (0.36)	53.8 (0.14)	32.5 (0.35)
	HR 30 T	81.3 (0.10)	76.2 (0.08)	73.8 (0.28)	53.9 (0.11)	32.7 (0.17)
Correc- tion #	(1) HR 30 TQ	81.3	76.1	73.7	54.0	32.8
	(2) HR 30 T	81.3	76.2	73.8	53.8	32.6
	(1)-(2)	0	-0.1**	-0.1	0.2**	0.2

Hardness numbers are corrected with effect due to errors of indenter-diameters

* Significant by 5% level, ** Significant by 1% level

表5の補正後のHR 30 TQとHR 30 Tの差は $-0.1 \sim -0.2$ で、ARK-MQSとARK-MS改の総合誤差¹⁾から生じ得る値であるが、分散分析の結果HR 30 T 76と52では水準1%でその差は有意である。しかし、それらの値は小さく3.1.2節に述べた硬さ基準片の硬さの平均値の信頼率95%の信頼限界の1/7である。また、一般のロックウェルスーパーフィシャル硬さ試験機の総合誤差は日本工業規格²⁾ではHR 30 Tは ± 1.5 であり、その1/7以下であるから十分な一致と考える。

3.4 相似性の検討

くぼみ形状の相似性と硬さの相似性を検討するため、硬さ試験によりつくられたくぼみの直径を測定した。また、硬さ基準片の各区画ごとに2点、合計18点の基準荷重くぼみをつくり、それらの直径を測定した。明石製作所製ミニビッカース硬さ試験機の計測顕微鏡を使用した。

3.4.1 試験荷重くぼみの直径測定

対物鏡の倍率はHRBくぼみには6倍、HRBQくぼみには10倍、HR 30 T、HR 30 TQくぼみについては硬さ値52、32のそれには10倍、その他には20倍を使用した。

各対物鏡につき、オリンパス光学工業製の1目盛0.01 mm、全長1 mmの標準尺を使用し、視野の約1/2で測微計の1目盛当たりの実寸法を求めた。それらの倍率の誤差は $\pm 0.2\%$ 以内、くぼみの相似性の検討に必要な相対誤差は $\pm 0.1\%$ 以内である。

1) 対物鏡の開口角とくぼみの像

HRBの大きいくぼみの直径を測定するため対物鏡の倍率を小さくすると、その開口角が小さくなり、落射照明によるくぼみの像は図2(a)のように全体が黒くみえる。

くぼみの垂直断面の真のふちの接線と試料面とのなす角度は、同じ圧子直径に対しくぼみが大きくなるほど大きくなり、対物鏡を通過してくぼみを照射した光の反射光はくぼみのふちでは試料面に対し大きく傾き、開口角の小さい対物鏡に入らなくなるためである。

HR 30 Tのくぼみでも硬さ52以下のくぼみでは、10

倍の対物鏡でHRBくぼみと同じ現象が起きる。

図2(a)の像で顕微鏡の落射照明の明るさを下げてゆくと、その照明以外の光による反射により、図2(b)のように内側にくぼみの真のふちがみえてくる。

2) くぼみ周辺の盛上がり

とくぼみのふちの高さ

黄銅製の硬さ基準片ではくぼみのふちの形状が乱れ、HRB 30では特に著しい。しかもふちの高さが変動しているので、顕微鏡の焦点合わせが困難である。

くぼみのふちの盛上がり高さ、図3の p は相当大きいと考えられがちであるが、試料材質黄銅、直径1.5875 mmの鋼球圧子による直径約0.5 mmのくぼみの表面形状測定機記録¹³⁾より、筆者が p を計算する

Fig. 2 Photograph of HRB indentations

Fig. 3 Piling-up of spherical indentation

と約 $3\mu\text{m}$ である。

本実験の直径約 1.14mm の最大くぼみを6倍の対物鏡、10倍の接眼鏡でみると、くぼみのふちは試料表面に対し平均的には焦点深度に入るので、試験荷重くぼみを測定するときは、焦点合わせを一定にするため、すべてくぼみの近くの試料面に焦点を合わせた後、くぼみを視野の中心に移動してその直径を測定した。

3.4.2 基準荷重くぼみの直径測定

黄銅製の硬さ基準片、特に HRB 70, HR 30 T 72 ではくぼみ輪郭の凹凸は大きい、上下の凹凸は認められない。

HRB, HRBQ のくぼみは沈降形で、そのふちは試料表面より沈み、その量は HRB 30 で約 $10\mu\text{m}$ である。10倍の対物鏡を使用し、くぼみのふちに焦点を合わせた。HR 30 T, HR 30 TQ のくぼみは小さいので20倍の対物鏡を使用したいところであるが、くぼみのふちの像が不明りょうになる。10倍の対物鏡を使用し、すべてくぼみ近くの試料表面に焦点を合わせた。

3.4.3 くぼみ輪郭の凹凸と真円からのゆがみ

黄銅製の基準片の試験荷重くぼみでは輪郭の凹凸が大きく、特に HRB 30 では著しい(図2(c))。また基準荷重くぼみを含めて一定方向に楕円状になっている。鋼製基準片についても同じ傾向があるので、すべての基準片につき、その製造者マークを基準にして一定方向にセットし、上下、左右、斜め $45^\circ 2$ 方向の合計4方向を測定し平均値を求めた。

クォータロード硬さくぼみには添字 Q をつけ、基準荷重くぼみの直径をそれぞれ d_1, d_{1Q} 、試験荷重くぼみの直径をそれぞれ d_2, d_{2Q} とし、測定の結果を表6、表7に示す。

3.4.4 くぼみ形状の相似性

球圧子による押込みくぼみの相似性の理論と、ロックウェル・クォータロード硬さ試験方法の定義¹⁾より、表6、表7の d_{1Q}/d_1 , d_{2Q}/d_2 が $1/2$ になれば、くぼみ形状の相似性が成立したことになる。

- 1) 鋼球圧子直径誤差のくぼみ直径への影響
マイヤー法則より導かれる式¹⁴⁾

$$\frac{W}{D^2} = A \left(\frac{d}{D} \right)^n \quad (1)$$

ここに、 W : 荷重、 D : 球圧子直径、 d : くぼみ直径、 A : 定数、 n : マイヤー指数。

誤差のある球圧子直径を D_e とし、くぼみ直径が d_e になったとすれば、

$$\frac{W}{D_e^2} = A \left(\frac{d_e}{D_e} \right)^n \quad (2)$$

式(1)、(2)より

$$\frac{d_e}{d} = \left(\frac{D_e}{D} \right)^{\frac{n-2}{n}} \quad (3)$$

HRB くぼみでは n は鋼で $2.26 \sim 2.34$ 、黄銅では $2.14 \sim 2.36$ であり¹²⁾、HR 30 T くぼみでは n は鋼、黄銅ともに $2.2 \sim 2.4$ である¹¹⁾。したがって、 $n=2.1 \sim 2.4$ として計算すると、 $(n-2)/n$ は $0.048 \sim 0.167$ となり、 $D_e=0.7885\text{mm}$ のとき $d_e/d=0.9997 \sim 0.9989$ 、 $D_e=1.5900\text{mm}$ のとき $d_e/d=1.0001 \sim 1.0003$ で鋼球圧子直径誤差のくぼみ直径への影響は無視することができる。

2) 相似性の検討

表6、表7より d_{1Q}/d_1 , d_{2Q}/d_2 と $1/2$ との比を求めると、それぞれ表8、表9になる。くぼみ直径測定の誤差はくぼみ形状のひずみ、輪郭の凹凸も考慮に入れると d_{1Q}, d_1 で $0.4 \sim 0.8\%$ 、 d_{2Q}, d_2 で $0.2 \sim 0.3\%$ である。後に述べるように硬さ基準片表面の深さ方向の硬

さの変化が考えられ、基準荷重くぼみについては相似性は大きくくずれているが、試験荷重くぼみについては、HRB, HR 30 T ともに 1% 以内で相似性が成立している。

3.4.5 硬さの相似性

ロックウェル硬さ試験において、図4のように直径 D の圧子に基準荷重 W_1 をかけ、できたくぼみをもとの試料表面で切った直径を d_1' 、深さを h_1' とする。同様に試験荷重 W_2 をかけたときのそれら

Table 6 Diameters of HRBQ, HRB indentations ($n=18(\sigma)$)

Specimen Indentation	Unit: μm				
	HRB 100	HRB 90	HRB 70	HRB 50	HRB 30
HRBQ d_{1Q}	125.8 (0.6)	138.6 (0.5)	171.9 (0.5)	185.7 (0.6)	218.6 (1.0)
HRB d_1	251.2 (0.5)	277.5 (0.6)	346.2 (1.7)	374.4 (0.4)	444.5 (1.5)
HRBQ d_{2Q}	356.4 (0.9)	390.0 (0.7)	483.6 (1.7)	510.7 (1.5)	571.1 (1.7)
HRB d_2	712.0 (1.0)	778.0 (1.8)	965.1 (2.4)	1016.8 (2.4)	1138.3 (2.7)

Table 7 Diameters of HR 30 TQ, HR 30 T indentations ($n=18(\sigma)$)

Specimen Indentation	Unit: μm				
	HR 30 T 80	HR 30 T 76	HR 30 T 72	HR 30 T 52	HR 30 T 32
HR 30 TQ d_{1Q}	73.7 (1.0)	80.3 (0.7)	84.0 (2.3)	109.8 (0.8)	128.8 (1.0)
HR 30 T d_1	148.1 (1.3)	163.1 (1.1)	171.9 (2.6)	220.7 (0.9)	263.3 (3.4)
HR 30 TQ d_2	205.9 (0.5)	227.6 (0.3)	239.6 (1.7)	302.9 (0.8)	350.5 (1.3)
HR 30 T d_{2Q}	411.9 (0.5)	455.0 (0.7)	480.3 (2.3)	607.2 (1.1)	705.0 (1.4)

Table 8 Ratio of d_Q/d (HRB) to 1/2

Specimen Dia. ratio	HRB 100	HRB 90	HRB 70	HRB 50	HRB 30
d_{1Q}/d_1 (HRB)/(1/2)	1.002	0.999	0.993	0.992	0.984
d_{2Q}/d_2 (HRB)/(1/2)	1.001	1.002	1.002	1.005	1.003

Table 9 Ratio of d_Q/d (HR 30 T) to 1/2

Specimen Dia. ratio	HR 30 T 80	HR 30 T 76	HR 30 T 72	HR 30 T 52	HR 30 T 32
d_{1Q}/d_1 (HR 30 T)/(1/2)	0.995	0.985	0.977	0.995	0.978
d_{2Q}/d_2 (HR 30 T)/(1/2)	1.000	1.000	0.998	0.998	0.994

Fig. 4 Indentation produced by Rockwell method (Spherical indenter)

を d_2', t_2' もとの W_1 に戻したときの深さ方向の弾性回復量を t_e 、弾性回復率を ε とし、 $\varepsilon = t_e/(t_2' - t_1')$ と定義し、永久くぼみの深さの増加量を h_b とすると¹⁾、

$$h_b = (1 - \varepsilon)(t_2' - t_1') \quad (4)$$

同様にロックウェル・クォータロード硬さ試験について、添字 Q をつけると、

$$h_{bQ} = (1 - \varepsilon)(t_{2Q}' - t_{1Q}') \quad (4')$$

負荷中の圧子の弾性変形により t_i' の値は正確には図 4 のようにはならないが、圧子の弾性変形も相似に生ずるものとして、これを無視する。

二つの球圧子くぼみが相似ならば、これらを試料表面で切った二つのくぼみも相似である。そこで図 3 のようにくぼみの真の直径を d 、その深さを t とし、基準荷重、試験荷重のくぼみにそれぞれ添字 1, 2 を、クォータロード硬さくぼみには添字 Q をつけると、

$$\frac{t_{2Q}' - t_{1Q}'}{t_2' - t_1'} = \frac{t_{2Q} - t_{1Q}}{t_2 - t_1} \quad (5)$$

t_{1Q}, t_{2Q}, t_1, t_2 はくぼみの直径 d_{1Q}, d_{2Q}, d_1, d_2 より計算で求められる。くぼみ深さより求められる式 (4)、(4') の h_{bQ}, h_b の比を $(h_{bQ}/h_b)_T$ と表示する。

$$\begin{aligned} \left(\frac{h_{bQ}}{h_b} \right)_T &= \frac{(1 - \varepsilon)(t_{2Q}' - t_{1Q}')}{(1 - \varepsilon)(t_2' - t_1')} \\ &= \frac{t_{2Q} - t_{1Q}}{t_2 - t_1} \end{aligned} \quad (6)$$

一方、ロックウェル硬さ及び同クォー

タロード硬さの定義(表 1)により、硬さ値より求められるくぼみ深さの増加量の比を HRB については $(h_{bQ}/h_b)_H$ 、HR 30 T については $(h_{bQ}/h_b)_{HS}$ と表示すると、

$$\left(\frac{h_{bQ}}{h_b} \right)_H = \frac{130 - \text{HRBQ}}{2(130 - \text{HRB})} \quad (7)$$

$$\left(\frac{h_{bQ}}{h_b} \right)_{HS} = \frac{100 - \text{HR 30 TQ}}{2(100 - \text{HR 30 T})} \quad (8)$$

表 6、表 7 より幾何学的に t_{1Q}, t_1, t_{2Q}, t_2 を求め、 $(h_{bQ}/h_b)_T$ を計算する。3.4.4 節 1) に述べたように鋼球圧子直径誤差のくぼみ

直径に与える影響は無視し得るので、鋼球直径は呼び寸法を使用し、これに合わせ $(h_{bQ}/h_b)_H$ 、 $(h_{bQ}/h_b)_{HS}$ の計算は表 4、表 5 の鋼球圧子誤差補正後の硬さ測定値を使用した。これらの値と 1/2 との比を表 10、表 11 に示す。

1) HRB と HRBQ, HR 30 T と HR 30 TQ が一致していれば、 $(h_{bQ}/h_b)_H$ 、 $(h_{bQ}/h_b)_{HS}$ と 1/2 との比は 1 になる。1 との差が硬さの相似性のずれと考えられ、その差はいずれも 1% 以内である。

2) くぼみの相似性から導いた硬さの相似性の理論から言えば¹⁾、くぼみが相似ならば $(h_{bQ}/h_b)_T/(1/2)$ は 1 になる。しかし、表 8、表 9 の d_{1Q}, d_i は相似ではない。

硬さ試験機の荷重誤差¹⁾のくぼみ直径に与える誤差(荷重誤差の 1/2 の %)、くぼみ直径の測定誤差を考慮しても表 8、表 9 の値の 1 より差に大きいものがあり、その原因として硬さ基準片の表面から深さ方向の硬さの変化が予測される。 d_{1Q}, d_i とほぼ同じくぼみ深さになるように荷重を選んだピッカース硬さ試験によっても同じ傾向の硬さの変化が認められた。

Table 10 Comparison between HRB $(h_{bQ}/h_b)_H/(1/2)^*$ and HRB $(h_{bQ}/h_b)_T/(1/2)^{**}$

Specimen Depth ratio	HRB 100	HRB 90	HRB 70	HRB 50	HRB 30
HRB $(h_{bQ}/h_b)_H/(1/2)$	1.000	1.005	1.003	1.003	1.009
HRB $(h_{bQ}/h_b)_T/(1/2)$	1.004	1.006	1.008	1.015	1.015

* Corrected hardness numbers (Table 4) are used.

** Nominal diameters of indenters are used.

Table 11 Comparison between HR 30 T $(h_{bQ}/h_b)_{HS}/(1/2)^*$ and HR 30 T $(h_{bQ}/h_b)_T/(1/2)^{**}$

Specimen Depth ratio	HR 30 T 80	HR 30 T 76	HR 30 T 72	HR 30 T 52	HR 30 T 32
HR 30 T $(h_{bQ}/h_b)_{HS}/(1/2)$	1.000	1.004	1.004	0.996	0.997
HR 30 T $(h_{bQ}/h_b)_T/(1/2)$	1.004	1.010	1.003	0.994	0.994

* Corrected hardness numbers (Table 5) are used.

** Nominal diameters of indenters are used.

硬さ試験機の誤差のうち、機枠のもとし変形量¹⁾は-0.1で同じであるから、硬さ指示計の誤差¹⁾ ± 0.2 を零と仮定すると、 $(h_{bQ}/h_b)_{HHS}/(1/2)$ と $(h_{bQ}/h_b)_T/(1/2)$ が一致すれば、前者の1よりの差が説明できることになる。表4、表5の硬さ値の差のうち1%の水準で有意の差のある5例中、前者の1との差より両者の差が小さくなるのはHRB 90, 30, HR 30 T 52の3例で、くぼみ直径の測定誤差があるにしても、前者の1よりの差を説明するには不十分である。しかし、両者はすべて1に対し大小同じ側にあるので、硬さ値の差は硬さ指示計の誤差とともに、硬さ基準片の表面から深さ方向の硬さの変化が原因の一部と考えられる。

以上の検討の結果、硬さの相似性のずれ、すなわち、HRBQとHRB, HR 30 TQとHR 30 Tの差には1%の水準で有意のものがあるが、その原因を特定することはできなかった。

4. 結 論

新しく製作したロックウェル硬さ試験機、同クォータロード硬さ試験機、ロックウェルスーパーフィシャル硬さ試験機、同クォータロード・スーパーフィシャル硬さ試験機により、硬さ基準片を使用してHRBQとHRB, HR 30 TQとHR 30 Tの比較測定を行い、次の結論を得た。

- (1) 製作したロックウェル硬さ試験機、同スーパーフィシャル硬さ試験機と計量研型校正用硬さ試験機とで、5段階の硬さ基準片について比較試験を行った結果、指示値の差はHRBでは-0.4~0, HR 30 Tでは-0.3~0であり、両試験機の総合精度はロックウェル硬さと同クォータロード硬さの比較測定用として十分なものである。
- (2) HRBQとHRBの差は5段階の硬さ基準片について、HRB 100~50では-0.2~0であり、日本工業規格のロックウェル硬さ試験機の総合誤差の1/5以下、HRB 30の-0.9では1/2以下である。
- (3) HR 30 TQとHR 30 Tの差は5段階の硬さ基準片について-0.1~0.2であり、日本工業規格ロックウェル硬さ試験機の総合誤差の1/7以下である。
- (4) HRBQとHRB, HR 30 TQとHR 30 Tの試験荷重くぼみの直径比はいずれも1%以内で1/2と一致し、くぼみの相似性は1%以内で成立している。
- (5) 硬さより計算したくぼみ深さ増加量と1/2との比、 $(h_{bQ}/h_b)_{HHS}/(1/2)$ をもって硬さの相似性を表すと、1に対しすべて1%以内である。しか

し、その値はくぼみ直径より計算した硬さの相似性を表す指数 $(h_{bQ}/h_b)_T/(1/2)$ とは一致しない。硬さ基準片の表面から深さ方向の硬さの変化も原因の一部とは考えられるが、硬さの相似性のずれ、すなわち硬さ値の差の原因を特定することはできなかった。

- (6) 以上の結果、HRBQとHR 30 TQは実用できる硬さスケールと考える。

なお、鋼球圧子と荷重の組合せを変えた二つの硬さスケールが実用上許される誤差で一致するということは、他の鋼球圧子と荷重を組み合わせたロックウェル・クォータロード硬さスケールについても同様のことが言える。すなわち、その実用性を予測することができる。

また、円すい圧子を使用する硬さスケールについても、その相似性の理論と球圧子による硬さの相似性のずれの大きさから、硬さ基準片を媒介して、クォータロード硬さ試験用の円すい圧子を製作することにより実用し得るものと考えられる。

したがって、ロックウェル・クォータロード硬さ試験方法について、ロックウェル硬さ試験方法に対応するすべての硬さスケールの実用性を予測できるものとする。

終わりに、本実験に協力下された明石製作所の各位に厚く謝意を表します。

文 献

- 1) 真下美佐男：ロックウェル・クォータロード硬さ試験について（第1報）、精密機械、51, 2 (1985) 378.
- 2) JIS B 7726-1980：ロックウェル硬さ試験機。
- 3) 山城貞男：ロックウェルかたさの誤差について（第2報）、日本機械学会論文集、27, 173 (1961) 10.
- 4) 矢野 宏：ロックウェルCかたさにおけるダイヤモンド圧子の形状誤差の影響、精密機械、31, 6 (1965) 492.
- 5) JIS B 7730-1980：ロックウェル硬さ基準片。
- 6) 山城貞男、真下美佐男、石橋 徹：押込みかたさ値におよぼす負荷速度と荷重保持時間の影響、材料試験、8, 68 (1959) 384.
- 7) 真下美佐男、小川重弘、岩崎昌三：ロックウェル・スーパーフィシャル型かたさ試験機のかたさ値に及ぼす負荷速度と荷重保持時間の影響、かたさの研究、42, 438 (1967).
- 8) 吉沢武男編：硬さ試験方法とその応用、裳華房 (1977).
- 9) 石田 一、矢野 宏：ロックウェル硬さ試験を正しく行うために、金属材料、15, 1 (1975) 101.
- 10) 鴨下隆志：ロックウェル硬さ標準はどのようにしてつくられているか、金属材料、14, 2 (1974) 92.
- 11) 山城貞男：ロックウェルかたさの誤差について（第3報）、日本機械学会論文集、27, 173 (1961) 20.
- 12) 山城貞男、植村幸生：スーパーフィシャル・ロックウェル硬さ値に及ぼす各種誤差の影響（第1報）、日本機械学会論文集、35, 280 (1969) 2316.
- 13) 町田周郎、杉山要三：球くぼみおよびくぼみ径について、材料試験技術、24, 3 (1979) 130.
- 14) D. Tabor: The Hardness of Metals, The Clarendon Press, Oxford, (1951).