



JCSS
不確かさの見積もりに関するガイド
硬さ／ロックウェル硬さ
第5版

改正：平成25年12月24日

独立行政法人製品評価技術基盤機構
認定センター

この指針に関する全ての著作権は、独立行政法人製品評価技術基盤機構に属します。この指針の全部又は一部転用は、電子的・機械的（転写）な方法を含め独立行政法人製品評価技術基盤機構の許可なしに利用することは出来ません。

発行所 独立行政法人製品評価技術基盤機構
認定センター
住所 〒151-0066 東京都渋谷区西原2丁目49-10
TEL 03-3481-1921（代）
FAX 03-3481-1937
E-mail jcss@nite.go.jp
Home page <http://www.iajapan.nite.go.jp/jcss/>

目次

1. はじめに.....	4
2. 硬さ試験機の校正の不確かさ.....	4
3. 硬さ標準片の校正の不確かさ.....	14
4. 最高測定能力の表示.....	18
5. 標準圧子の不確かさ.....	20
参考文献.....	23
付録.....	24
A.1 試験機校正事業者が校正器物に付与する不確かさの例.....	24
A.2 試験機校正事業者の最高測定能力見積もりの例.....	32
A.3 標準片校正事業者が校正器物に付与する不確かさの例.....	32
A.4 標準片校正事業者の最高測定能力見積もりの例.....	36
A.5 標準圧子の不確かさ見積もりの例.....	36

不確かさ見積もりに関するガイド

登録に係る区分：硬さ

校正手法の区分の呼称：ロックウェル硬さ試験機等

1. はじめに

このガイドは、登録事業者が行うロックウェル硬さ試験機および標準片の校正の不確かさを求めるための指針を示したものである。あわせて標準圧子の校正の不確かさについても解説した。

1.1 第5版改定の要点

本ガイドの第4版までは、ロックウェル硬さのJCSS技術的要求事項適用指針^{1,2)}が最初に制定されたのとはほぼ同時期に作成され、その後、版を重ねても、その内容は見直されていなかったが、その間にJCSS制度におけるロックウェル硬さのトレーサビリティ体系は大きく変化した。最も大きな変化は、特定二次標準器にロックウェル硬さ標準片が加わったことにより、当初とは異なるトレーサビリティ体系が認められるようになったことである。第5版では、ロックウェル硬さの校正業務の実情に合うよう、内容を全面的に見直した。

また、認定制度上の問題として、海外認定機関との整合性等の要求により、JCSSにおいても信頼の水準約95%の不確かさを適切に推定することが求められるようになった^{3,4)}。そこで、第5版では不確かさの有効自由度と、そこから求められる包含係数の計算方法を解説している。

併せて、従来のガイドでは明確になっていなかった最高測定能力の表示についても記述した。

2. 硬さ試験機の校正の不確かさ

2.1 記号

a	深さ測定装置の分解能 (mm)
C_F	全試験力 F に関する感度係数 (HRC/N)
C_{F_0}	初試験力 F_0 に関する感度係数 (HRC/N)
$C_t = \{T_{pm}, V_{fis}, T_{df}, \dots\}$	試験サイクル (初試験力保持時間 T_{pm} , 追加試験力付加時の押込み速度 V_{fis} , 全試験力保持時間 T_{df} , など)
F	全試験力 (N)
F_0	初試験力 (N)
F_1	追加試験力 (N)
$F_{0,ij}$	圧子軸位置 j における i 回目の初試験力の測定値 (N)
F_{ij}	圧子軸位置 j における i 回目の全試験力の測定値 (N)
h	永久くぼみ深さ (mm)
h_{ij}	圧子軸位置 j における i 回目の押込み深さの測定値 (mm)
h_j	圧子軸位置 j において検証装置で設定した押込み深さ (mm)
H	ロックウェル硬さ (HRC)

H_{corr}	標準圧子の補正值 (HRC)
$H_{\text{CRM},ij}$	硬さ標準片 j の校正における層別 i の測定値 (HRC)
$H_{\text{CRM},j}$	硬さ標準片 j の校正值 (HRC)
H_{HTM}	校正器物である硬さ試験機が表示する硬さ値 (HRC)
H_{ij}	硬さ標準片 j に対する層別 i での硬さ測定値 (HRC)
H_{int}	硬さ標準片本来の硬さ値 (HRC)
H_{obs}	硬さ試験機に表示された硬さ値 (HRC)
k	包含係数
n_b	間接検証に用いる硬さ標準片の数
n_{cal}	力計を校正した回数
n_i	硬さ標準片1個あたりの硬さ測定回数
n_{pos}	試験力および深さ測定装置の直接検証を行う際の圧子軸の位置の総数
n_{read}	試験力および深さ測定装置の直接検証を行う際のひとつの圧子軸位置における測定の繰返し数
$t(\nu, p)$	自由度 ν における両側確率 p に相当するスチューデントの t
$u(\mathbf{C}_t)$	\mathbf{C}_t の標準不確かさ
$u(F)$	F の標準不確かさ (N)
$u(F_0)$	F_0 の標準不確かさ (N)
$u(F_{0,\text{HTM}})$	初試験力 F_0 の直接検証により求められる標準不確かさ (N)
$u(F_{\text{HTM}})$	全試験力 F の直接検証により求められる標準不確かさ (N)
$u(h)$	h の標準不確かさ (mm)
$u(h_{\text{HTM}})$	h の直接検証により求められる標準不確かさ (mm)
$u(H_{\text{HTM}})$	H_{HTM} の標準不確かさ (HRC)
$U(H_{\text{HTM}})$	H_{HTM} の拡張不確かさ (HRC)
u_{corr}	H_{corr} の標準不確かさ (HRC) (5章を参照)
u_{comp}	間接検証により求められる標準不確かさ (HRC)
u_{CRM}	硬さ標準片の校正值の不確かさの平均値 (HRC)
$u_{\text{CRM},j}$	硬さ標準片 j の校正值の不確かさ (HRC)
u_{FRS}	全試験力用力計の標準不確かさ (N)
$u_{F_0\text{RS}}$	初試験力用力計の標準不確かさ (N)
$u_{F,\text{STB}}$	全試験力用力計の長期安定性に関する標準不確かさ (N)
$u_{F_0,\text{STB}}$	初試験力用力計の長期安定性に関する標準不確かさ (N)
u_{LRS}	深さ測定装置の検証装置の標準不確かさ (mm)
u_{ms}	深さ測定装置の分解能に関する標準不確かさ (mm)
u_p	圧子に関する標準不確かさ (HRC)
u_{PPS}	参照標準圧子の標準不確かさ (HRC) (5章を参照)
$u_{\Delta\text{H}}$	標準圧子の間接検証により求められる標準不確かさ (HRC) (5章を参照)
$u_{\Delta\text{H}}$	校正器物である硬さ試験機が指示する硬さのばらつき (HRC)
$X_{F,i}$	i 回目の全試験力用力計の校正值 (mV/Vなど)
$X_{F_0,i}$	i 回目の初試験力用力計の校正值 (mV/Vなど)
\bar{X}_F	全試験力用力計の校正值の平均値 (mV/Vなど)
\bar{X}_{F_0}	初試験力用力計の校正值の平均値 (mV/Vなど)

v_{comp}	u_{comp} の有効自由度
v_{CRM}	u_{CRM} の有効自由度
$v_{\text{CRM},j}$	$u_{\text{CRM},j}$ の自由度
v_{F}	$u(F)$ の有効自由度
v_{F_0}	$u(F_0)$ の有効自由度
$v_{\text{F}_0,\text{HTM}}$	$u(F_{0,\text{HTM}})$ の自由度
$v_{\text{F},\text{HTM}}$	$u(F_{\text{HTM}})$ の自由度
v_{FRS}	u_{FRS} の自由度
$v_{\text{F}_0\text{RS}}$	$u_{\text{F}_0\text{RS}}$ の自由度
$v_{\text{F}_0,\text{STB}}$	$u_{\text{F}_0,\text{STB}}$ の自由度
$v_{\text{F},\text{STB}}$	$u_{\text{F},\text{STB}}$ の自由度
v_{h}	$u(h)$ の有効自由度
$v_{\text{h},\text{HTM}}$	$u(h_{\text{HTM}})$ の自由度
v_{HTM}	$u(H_{\text{HTM}})$ の有効自由度
v_{LRS}	u_{LRS} の自由度
v_{ms}	u_{ms} の自由度
v_{p}	u_{p} の自由度 (5章を参照)
$v_{\Delta\text{H}}$	$u_{\Delta\text{H}}$ の自由度 (5章を参照)
$v_{\Delta\text{H}}$	$u_{\Delta\text{H}}$ の自由度

2.2 概要

ロックウェルCスケール硬さ H は以下の式で定義されている⁵⁾。

$$H = 100 - \frac{h}{0.002} \quad (2.1)$$

ここで、 h は、始めに初試験力 F_0 をかけた時の圧子の位置を基準にし、その後、追加試験力 F_1 を負荷および除去して、初試験力に戻したときの永久くぼみ深さ (単位mm) である。 h は、材料本来の硬さ H_{int} によって決まることは言うまでもないが、初試験力 F_0 や全試験力 F とそれらの不確かさ、および、試験力の時間的推移である試験サイクルや圧子形状と、それらの不確かさによって決定される。試験サイクルは多数のパラメータで表現される⁶⁾が、ここでは集合的に $\mathbf{C}_t = \{T_{\text{pm}}, V_{\text{fis}}, T_{\text{df}}, \dots\}$ で表すことにする。また、 h はダイヤルゲージのような深さ測定装置によって測定されるため、 h の測定の不確かさ $u(h)$ も直接的に測定値に影響する。ロックウェル硬さ試験機の不確かさの要因効果を図2.1に示す。

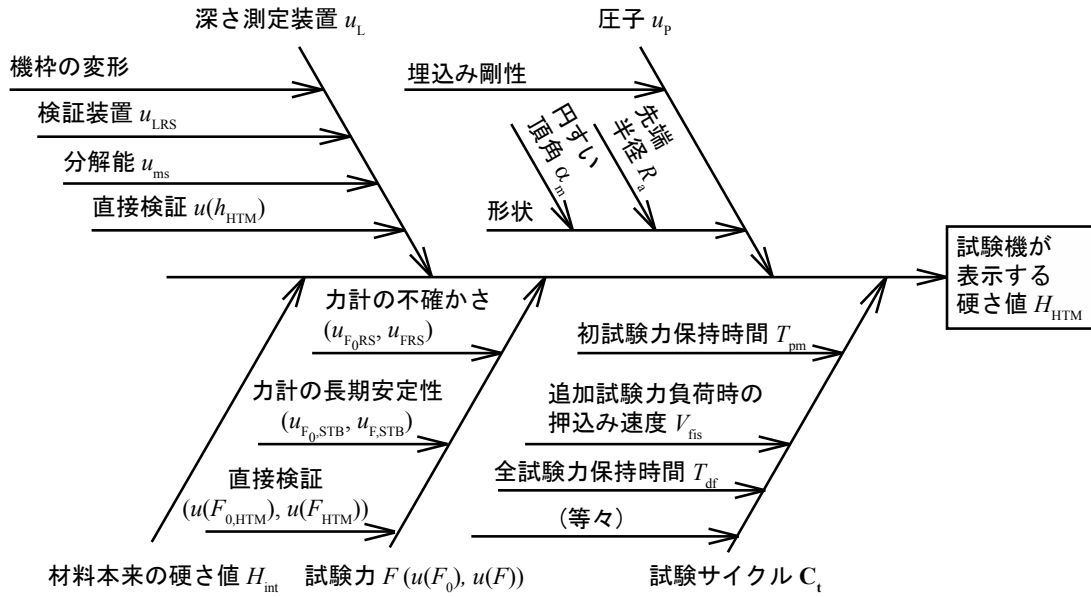


図2.1 硬さ試験の要因効果図

これらの要因を考慮すると、永久くぼみ深さ h は以下の式で表すことができる。

$$h = h(H_{\text{int}}, F_0, F, u_p, u(h), C_t) \quad (2.2)$$

すべての不確かさ要因が互いに独立であると仮定すると、(2.1) および (2.2) 式より、校正器物である硬さ試験機によって測定されるロックウェルCスケール硬さ H_{HTM} の不確かさ $u(H_{\text{HTM}})$ は一般に以下のように表すことができる。

$$H_{\text{HTM}} = H_{\text{int}} \pm u(H_{\text{HTM}}) \\ = H_{\text{int}} \pm \frac{1}{0.002} \left[\left(\frac{\partial h}{\partial F_0} \right)^2 u^2(F_0) + \left(\frac{\partial h}{\partial F} \right)^2 u^2(F) + u_p^2 + u^2(h) + \left(\frac{\partial h}{\partial C_t} \right)^2 u^2(C_t) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

ここで、 $u(H_{\text{HTM}})$, $u(F_0)$, $u(F)$, u_p , $u(h)$, $u(C_t)$ はそれぞれの標準不確かさである。

硬さ試験機の校正ではJIS B 7726⁷⁾ (およびJIS B 7730⁸⁾) に沿って、試験力 (F_0 および F)、圧子、深さ測定装置、および試験サイクルの直接検証が行われるが、圧子および試験サイクルに関しては (特に現場では) 部分的な評価しか行えないのが現状であり、これを補う意味でも、硬さ基準片を用いた間接検証が行われる。これは、硬さ値が既知の硬さ基準片を、校正器物である硬さ試験機で測定することにより、硬さ値の偏りとばらつきを評価するものであり、圧子および試験サイクルの影響は、この中に含まれていると考えられる。間接検証から求められる不確かさを u_{comp} とすると、硬さ測定の標準不確かさ $u(H_{\text{HTM}})$ は以下の式で代用することが可能である。

$$u(H_{\text{HTM}}) = \left[\frac{1}{0.002^2} \left\{ \left(\frac{\partial h}{\partial F_0} \right)^2 u^2(F_0) + \left(\frac{\partial h}{\partial F} \right)^2 u^2(F) + u^2(h) \right\} + u_p^2 + u_{\text{comp}}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.4) \\ = \left[C_{F_0}^2 \cdot u^2(F_0) + C_F^2 \cdot u^2(F) + \frac{1}{0.002^2} u^2(h) + u_p^2 + u_{\text{comp}}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

ここで、 C_{F_0} , C_F は初試験力および全試験力に関する感度係数であり、それぞれ以下の式で表される。

$$C_{F_0} = \frac{1}{0.002} \frac{\partial h}{\partial F_0} = \frac{\partial H}{\partial F_0} \quad (2.5)$$

$$C_F = \frac{1}{0.002} \frac{\partial h}{\partial F} = \frac{\partial H}{\partial F} \quad (2.6)$$

これらの感度係数は試験機に依存すると考えられるため、校正事業者は使用する校正用硬さ試験機に関して実験を行い、自ら感度係数を決定することが理想的であるが、海外の認定機関の事情等も考慮し、文献値を引用しても構わないこととする。これまでに知られている感度係数の例^{9,10,11)}を付録に示す。

2.3 初試験力の不確かさ

初試験力 F_0 の校正は、JIS B 7726 (およびJIS B 7730) に従って行う。すなわち、JIS B 7728 の1級^aを満足する力計等を用い、可能な限り、試験時の圧子軸動作範囲内の3か所以上で行う(その位置はJIS B 7726に例示されており、基準位置及びそこから約5 HRC離れた位置の3か所である)。特に初試験力をばねで負荷するタイプの硬さ試験機では、圧子軸の位置により初試験力の値が変化しやすいので、測定位置を変えながら校正を行うことは重要である。各位置では3回以上の繰返し測定を行う。

標準不確かさ $u_{F_0,RS}$ の力計を用いて、 $n_{pos} (\geq 3)$ 箇所において $n_{read} (\geq 3)$ 回の測定を行った時、校正器物である硬さ試験機の初試験力のばらつきを以下の式で表す^b。ここで F_0 は初試験力の規定値98.0667 N^c、 $F_{0,ij}$ は圧子軸の位置 j における i 回目の測定値である。

$$u(F_{0,HTM}) = \left[\frac{1}{n_{pos} \cdot n_{read}} \sum_{j=1}^{n_{pos}} \sum_{i=1}^{n_{read}} (F_{0,ij} - F_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

ここで、(2.7)式の自由度は

$$v_{F_0,HTM} = n_{pos} \cdot n_{read} \quad (2.8)$$

である。

一般に、力計は校正周期内で不確かさが変動する可能性がある。そこで、力計の長期不安定性に関する不確かさを以下のように見積もる。

過去 n_{cal} 回の初試験力(または、その近傍)での校正値が $X_{F_0,i}$ ($i=1,2,\dots,n_{cal}$)であったとすると、力計の不安定性に関する不確かさ $u_{F_0,STB}$ を以下の式で表す。

$$u_{F_0,STB} = \left[\frac{1}{n_{cal} - 1} \sum_{i=1}^{n_{cal}} \left(\frac{X_{F_0,i} - \bar{X}_{F_0}}{\bar{X}_{F_0}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot 98.0665 \text{ N} \quad (2.9)$$

ここで、 \bar{X}_{F_0} は n_{cal} 回の校正における平均値

$$\bar{X}_{F_0} = \frac{1}{n_{cal}} \sum_{i=1}^{n_{cal}} X_{F_0,i} \quad (2.10)$$

である(A.1.1節参照)。なお、(2.9)式は過去の校正実績が十分にあり $n_{cal} \geq 3$ を満たす場合に適用する。校正実績が少ない力計については、力計の製造者の提示する仕様を参考にするか、暫定的に0.02%程度と評価する^d。 $u_{F_0,STB}$ が(2.9)式で求められる場合、その自由度は

a ISO 6508-3: 2005¹²⁾では0.5級となっている。

b 基準となる値 X_0 に対して測定値が X_1, X_2, \dots, X_n のとき

$$u = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

をもって標準不確かさとする。これを用いることにより、測定のばらつき(偶然誤差)と偏り(系統誤差)が混在する場合の不確かさをひとつの数値で表すことができる。初試験力以外にも、器差を補正できない不確かさ要因については同様の扱いとする。

c JIS Z 2245に規定された初試験力は98.07 Nであるが、JIS B 7730で要求されている初試験力の許容差は±0.2%であることを考慮すると、校正用硬さ試験機の校正においては4桁の有効数字では丸め誤差が無視できない大きさになると考え、このガイドでは試験力に関しては有効数字を6桁とした。

d この考え方は一軸試験機に対する不確かさ見積もりに関する指針¹³⁾を参考にしたものである。

$$v_{F_0,STB} = n_{cal} - 1 \quad (2.11)$$

である。それ以外に先験的知見から不確かさを見積もった場合、GUM¹⁴⁾では $v_{F_0,STB} \rightarrow \infty$ としても「非現実なことではない」としている。

初試験力の標準不確かさ $u(F_0)$ は、上式に力計の不確かさ $u_{F_0,RS}$ 、および、その不安定性に関する不確かさ $u_{F_0,STB}$ を合成して以下のように表す。

$$u(F_0) = \left[u_{F_0,RS}^2 + u_{F_0,STB}^2 + u^2(F_{0,HTM}) \right]^{1/2} \quad (2.12)$$

$u(F_0)$ の有効自由度 v_{F_0} はWelch-Satterthwaiteの式¹⁴⁾を用いて以下のように求められる。

$$v_{F_0} = \frac{u^4(F_0)}{\frac{u_{F_0,RS}^4}{v_{F_0,RS}} + \frac{u_{F_0,STB}^4}{v_{F_0,STB}} + \frac{u^4(F_{0,HTM})}{v_{F_0,HTM}}} \quad (2.13)$$

ここで $v_{F_0,RS}$ は力計の不確かさ $u_{F_0,RS}$ の自由度である。力計の校正証明書に $v_{F_0,RS}$ が記載されていない場合には、 $v_{F_0,RS} \rightarrow \infty$ としてもよい。

2.4 全試験力の不確かさ

全試験力 F の校正も、初試験力と同様にJIS B 7726（およびJIS B 7730）に従って行う。すなわち、JIS B 7728の1級^aを満足する力計等を用い、可能な限り、試験時の圧子軸動作範囲内の3か所以上で行う（その位置はJIS B 7726に例示されており、基準位置及から約-30 HR、-50HR、70HRの位置）。また、各位置では3回以上の繰返し測定を行う。

標準不確かさ u_{FRS} の力計を用いて、 $n_{pos} (\geq 3)$ 箇所において $n_{read} (\geq 3)$ 回の測定を行った時、校正器物である硬さ試験機の全試験力のばらつきを以下の式で表す。ここで F は全試験力の規定値1471.00 N^e、 F_{ij} は圧子軸の位置 j における i 回目の測定値である。

$$u(F_{HTM}) = \left[\frac{1}{n_{pos} \cdot n_{read}} \sum_{j=1}^{n_{pos}} \sum_{i=1}^{n_{read}} (F_{ij} - F)^2 \right]^{1/2} \quad (2.14)$$

ここで、(2.14)式の自由度は

$$v_{F,HTM} = n_{pos} \cdot n_{read} \quad (2.15)$$

である。

初試験力の場合と同様、力計の長期不安定性に関する不確かさを以下のように見積もる。

過去 n_{cal} 回の全試験力（または、その近傍）での校正値が $X_{F,i}$ ($i=1,2,\dots,n_{cal}$)であったとすると、力計の不安定性に関する不確かさ $u_{F,STB}$ を以下の式で表す。

$$u_{F,STB} = \left[\frac{1}{n_{cal} - 1} \sum_{i=1}^{n_{cal}} \left(\frac{X_{F,i} - \bar{X}_F}{\bar{X}_F} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot 1471.00 \text{ N} \quad (2.16)$$

ここで、 \bar{X}_F は n_{cal} 回の校正における平均値

$$\bar{X}_F = \frac{1}{n_{cal}} \sum_{i=1}^{n_{cal}} X_{F,i} \quad (2.17)$$

である（A.1.2節参照）。初試験力の場合と同様、(2.16)式は過去の校正実績が十分にあり $n_{cal} \geq 3$ を満たす場合に適用する。また、校正実績が少ない力計については、力計の製造者の提示する仕様を参考にするか、暫定的に0.02%程度と評価する。 $u_{F,STB}$ が(2.16)式で求められる場合、その自由度は

e 2.2節の脚注参照。JIS B 7730における全試験力の許容差は初試験力のそれより厳しい（±0.1%）ことに留意されたい。

$$v_{F,STB} = n_{cal} - 1 \quad (2.18)$$

である。それ以外に先験的知見から不確かさを見積もった場合、 $v_{F,STB} \rightarrow \infty$ としてよい。

全試験力の標準不確かさ $u(F)$ は、上式に力計の不確かさを u_{FRS} 、および、その不安定性に関する不確かさ $u_{F,STB}$ を合成して以下のように表す。

$$u(F) = \left[u_{FRS}^2 + u_{F,STB}^2 + u^2(F_{HTM}) \right]^{1/2} \quad (2.19)$$

$u(F)$ の有効自由度 v_F はWelch-Satterthwaiteの式を用いて以下のように求められる。

$$v_F = \frac{u^4(F)}{\frac{u_{FRS}^4}{v_{FRS}} + \frac{u_{F,STB}^4}{v_{F,STB}} + \frac{u^4(F_{HTM})}{v_{F,HTM}}} \quad (2.20)$$

ここで v_{FRS} は力計の不確かさ u_{FRS} の自由度である。

2.5 圧子に関する不確かさ

2.5.1 一般の硬さ試験機の場合

校正器物がエンドユーザーの硬さ試験機の場合、圧子に関する不確かさは間接検証に含まれるとみなし、ここでの不確かさには合成しない。すなわち $u_p = 0$ とする。

2.5.2 校正用硬さ試験機の場合

校正器物が校正用硬さ試験機の場合、校正された標準圧子の補正值 H_{corr} を用いて硬さの指示値 H_{obs} を補正する(標準圧子のトレーサビリティについては5章で述べる)。

$$H = H_{obs} + H_{corr} \quad (2.21)$$

この演算を行うことより H_{corr} の不確かさ u_{corr} を考慮する必要性が生じる。この不確かさの値は圧子の校正事業者によって与えられるが、その内訳は5章で後述する通り、参照標準圧子の不確かさ u_{PPS} と圧子を校正する際の測定のはらつき $u_{\delta H}$ を合成したものとなる(各記号の意味は5章を参照いただきたい)。しかし、 u_{PPS} は特定二次標準器(標準片)の不確かさにも含まれているので、重複を避けるため、校正事業者レベルでは合成しないことが合理的である。すなわち、(5.5)式および(5.7)式より

$$u_p = u_{\delta H} \quad (2.22)$$

$$v_p = v_{\delta H} \quad (2.23)$$

とするのが妥当である。

2.5.3 標準圧子の互換性

硬さ標準片の校正事業者は、技術的要求事項適用指針に沿って複数の標準圧子を保有することにより、圧子が破損した場合等でも継続的に校正事業が行えるよう備えている。ただし、標準圧子を交換して校正用硬さ試験機を使用する場合には不確かさの再検討が必要になる。すなわち、校正用硬さ試験機の不確かさバジェットにある圧子不確かさ u_p およびその自由度 v_p を、新たに付替えた標準圧子のものに置き換え、試験機の合成標準不確かさおよび拡張不確かさを再計算をしてみる。このとき、新たに求められた拡張不確かさ(HRC)と従来の拡張不確かさ(HRC)の間に有意な差がないことを確認する必要がある。有意な差がある場合は、最高測定能力を見直す必要がある。

標準圧子の再校正により不確かさが変化した場合も同様の扱いとする。

2.6 深さ測定装置の不確かさ

深さ測定装置の校正は、JIS B 7726 (およびJIS B 7730) に従って行う。すなわち、精度 0.0002 mm (JIS B 7730では0.0001 mm) の検証装置を用い、硬さ値が高くなる方向に圧子を動かしながら、Cスケールで使用する高硬度及び低硬度に相当する区間を含む3区間以上について校正する。また、各位置での校正には繰返し測定を行うことが望ましい。

標準不確かさ u_{LRS} の検証装置を用いて、 $n_{\text{pos}} (\geq 3)$ 箇所において n_{read} 回の測定を行った時、校正器物である硬さ試験機の深さ測定の際のばらつきを以下の式で表す。ここで h_j は圧子軸の位置 j において校正機器で設定した変位、 h_{ij} は圧子軸の位置 j における i 回目の測定値である。

$$u(h_{\text{HTM}}) = \left[\frac{1}{n_{\text{pos}} \cdot n_{\text{read}}} \sum_{j=1}^{n_{\text{pos}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{read}}} (h_{ij} - h_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.24)$$

また、その自由度は

$$\nu_{h, \text{HTM}} = n_{\text{pos}} \cdot n_{\text{read}} \quad (2.25)$$

である。

深さ測定装置の標準不確かさ $u(h)$ は、(2.24) 式に検証機器の不確かさ u_{LRS} と深さ測定装置の分解能に関する不確かさ

$$u_{\text{ms}} = \frac{a}{2\sqrt{3}} \quad (2.26)$$

を合成して以下のように表す。

$$u(h) = \left[u_{\text{LRS}}^2 + u_{\text{ms}}^2 + u^2(h_{\text{HTM}}) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.27)$$

ここで a は深さ測定装置の最小目盛りの幅 (単位: HRC) である。深さ測定装置のみ分解能を考慮するのは、一般の硬さ試験機の場合、硬さの最小目盛りの幅が不確かさに対して無視できない大きさになるからである。

$u(h)$ の有効自由度 ν_h は Welch-Satterthwaite の式を用いて以下のように求められる。

$$\nu_h = \frac{u^4(h)}{\frac{u_{\text{LRS}}^4}{\nu_{\text{LRS}}} + \frac{u_{\text{ms}}^4}{\nu_{\text{ms}}} + \frac{u^4(h_{\text{HTM}})}{\nu_{h, \text{HTM}}}} \quad (2.28)$$

ここで ν_{LRS} は検証機器の不確かさ u_{LRS} の自由度であり、 ν_{ms} は u_{ms} の自由度である。 ν_{ms} は明らかに B タイプ不確かさであり、

$$\nu_{\text{ms}} \rightarrow \infty \quad (2.29)$$

としても良い。

2.7 間接検証から得られる不確かさ

硬さ試験機の間接検証を行う際、硬さ基準片上の測定位置について JIS 規格では具体的に規定していないが、計量研究所 (現産業技術総合研究所) では基準片の測定面上に硬さの分布があることを仮定し、校正用硬さ試験機と校正器物である硬さ試験機の双方とで近接した位置に硬さ測定を行うことにより、面内の不均一性に影響されない不確かさの小さな間接検証を行えることを示した¹⁵⁾。この手法は、通称「4d法」と呼ばれており、国内の校正事業者の間に浸透している。また、同様の考え方は ASTM 規格¹⁶⁾の中にも示されている。しかし、校正用硬さ試験機で測定した点に最も近い点は幾何学的に6点しかないので、ひとつの硬さ基準片で行える間接検証は6回が限度であり経済的でない。

そのため、多くの試験機校正事業者では校正用硬さ試験機で測定した位置とは無関係に測定位置を選び、測定された硬さ値の平均値を、硬さ基準片の校正值 (平均値) と比較する方法をとることにより、硬さ基準片の有効利用している。この方法を、ここでは「平均値法」と呼ぶことにする。

以下、平均値法および4d法による間接検証の不確かさ見積もりを示す。

2.7.1 平均値法による間接検証

校正値 $H_{\text{CRM},j}$ 、標準不確かさ $u_{\text{CRM},j}$ （自由度 $\nu_{\text{CRM},j}$ ）である硬さ標準片 n_b 個を用いて間接検証を行う場合を考える。ただし、標準片は呼び硬さは同じものであり、それぞれの標準片を測定する回数は同一で n_i であるとする。一般に、硬さ標準片が異なれば、その校正値（標準） $H_{\text{CRM},j}$ は標準片毎に異なる値となるが、呼び硬さが同じであればその差はわずかであるため、数式上は同一標準による繰返し測定とみなし、比例項の分散は考慮しないことにすると、硬さ試験機が指示する硬さのばらつき $u_{\Delta H}$ とその自由度 $\nu_{\Delta H}$ は以下の式で表される。

$$u_{\Delta H} = \left[\frac{1}{n_b \cdot n_i} \sum_{j=1}^{n_b} \sum_{i=1}^{n_i} (H_{ij} - H_{\text{CRM},j})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.30)$$

$$\nu_{\Delta H} = n_b \cdot n_i \quad (2.31)$$

ここで、 H_{ij} は標準片 j を校正器物で測定したときの個々の測定値である。校正器物が校正用硬さ試験機の場合は、(2.21)式により補正を行った値とする。

硬さ標準片の不確かさ $u_{\text{CRM},j}$ は標準片毎に異なる可能性があるが、以下に示す合成標準不確かさへの寄与は、誤差分散の期待値から以下のように見積もることができる。

$$u_{\text{CRM}} = \left[\frac{1}{n_b} \sum_{j=1}^{n_b} u_{\text{CRM},j}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.32)$$

また、その自由度はWelch-Satterthwaiteの式より以下の通りとなる。

$$\nu_{\text{CRM}} = \frac{u_{\text{CRM}}^4}{\sum_{j=1}^{n_b} \frac{u_{\text{CRM},j}^4}{\nu_{\text{CRM},j}}} \quad (2.33)$$

間接検証から得られる不確かさ u_{comp} は、(2.30)式に(2.32)式を合成して以下のように求められる。

$$u_{\text{comp}} = \left[u_{\text{CRM}}^2 + u_{\Delta H}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.34)$$

また、 u_{comp} の自由度 ν_{comp} はWelch-Satterthwaiteの式を用いて以下のように求められる。

$$\nu_{\text{comp}} = \frac{u_{\text{comp}}^4}{\frac{u_{\text{CRM}}^4}{\nu_{\text{CRM}}} + \frac{u_{\Delta H}^4}{\nu_{\Delta H}}} \quad (2.35)$$

2.7.2 4d法による間接検証

参照標準である硬さ標準片については、2.7.1節と同じものを仮定する。ただし、標準片を校正した際の測定位置と、個々の測定値 $H_{\text{CRM},ij}$ が既知であることが前提となる。

4d法では標準片校正時の測定値 $H_{\text{CRM},ij}$ と、その近傍に硬さ試験機で試験を行った時の測定値 H_{ij} （校正器物が校正用硬さ試験機の場合は、補正後の値）を用いて、硬さ試験機が指示する硬さのばらつき $u_{\Delta H}$ とその自由度 $\nu_{\Delta H}$ は以下の式で表される。

$$u_{\Delta H} = \left[\frac{1}{n_b \cdot n_i} \sum_{j=1}^{n_b} \sum_{i=1}^{n_i} (H_{ij} - H_{\text{CRM},ij})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.36)$$

$$\nu_{\Delta H} = n_b \cdot n_i \quad (2.37)$$

平均値法の場合と同様、間接検証から得られる不確かさ u_{comp} とその自由度 ν_{comp} は、(2.34)式および(2.35)式により求められる。これらの数式は平均値法の場合とまったく同様であるが、(2.36)式において硬さ基準片の面内不均一性が除かれることにより $u_{\Delta H}$ が小さくなるので、結果として平均値法よりも u_{comp} が小さくなると期待される。

2.8 不確かさの合成

2.3～2.4節で求めた不確かさ成分を (2.4) 式によって合成し、硬さの合成標準不確かさ $u(H_{\text{HTM}})$ とする。

また、 $u(H_{\text{HTM}})$ の有効自由度 ν_{HTM} を Welch-Satterthwaite の式

$$\nu_{\text{HTM}} = \frac{u^4(H_{\text{HTM}})}{\frac{u^4(F_0)}{\nu_{F_0}} + \frac{u^4(F)}{\nu_F} + \frac{u^4(h)}{\nu_h} + \frac{u_p^4}{\nu_p} + \frac{u_{\text{comp}}^4}{\nu_{\text{comp}}}} \quad (2.38)$$

により計算する。その結果得られた ν_{HTM} の値を用いて、両側確率 5 % に相当する学生分布の t を t 表 (または同等のソフトウェア等) から求め、信頼の水準約 95 % の包含係数 k とする。すなわち、

$$k = t(\nu_{\text{HTM}}, 0.05) \quad (2.39)$$

信頼の水準約 95 % に相当する拡張不確かさは、合成標準不確かさ $u(H_{\text{HTM}})$ に (2.39) 式の包含係数を乗ずることによって求める。

$$U(H_{\text{HTM}}) = k \cdot u(H_{\text{HTM}}) \quad (2.40)$$

2.9 不確かさの内挿

JIS B 7726 によると、硬さ試験機の間接検証は 3 段階の硬さレベルで行うとされている。また、海外においても、国家標準の頒布が 3 レベルであったり (例えば、NIST SRM など)、国家計量標準機関の間の機関比較が 3 レベルで行われていること等を見ると、硬さ試験機の校正は 3 レベルで行えば十分であることが、一般的に受け入れられていると見て良い。

一方、硬さ試験機の不確かさは、硬さレベルが高いほど小さく、低いほど大きいことが一般的である。これは、試験機の間接検証に用いる標準片の一般的な特性として、硬さレベルが高いほど均一性が高いことによる。

これらの事実を勘案すると、硬さ試験機の校正は 3 レベルの硬さで行えば良く、その中間の硬さレベルに対しては、隣接するより低い硬さレベルでの不確かさを適用すれば、安全な不確かさ見積もりとなる。これを図示したのが、図 2.2 である (一般に ± 5 HRC 程度の範囲では不確かさは変わらないと見なせるので、この範囲を同一硬さレベルとして扱ってよいことを考慮した)。

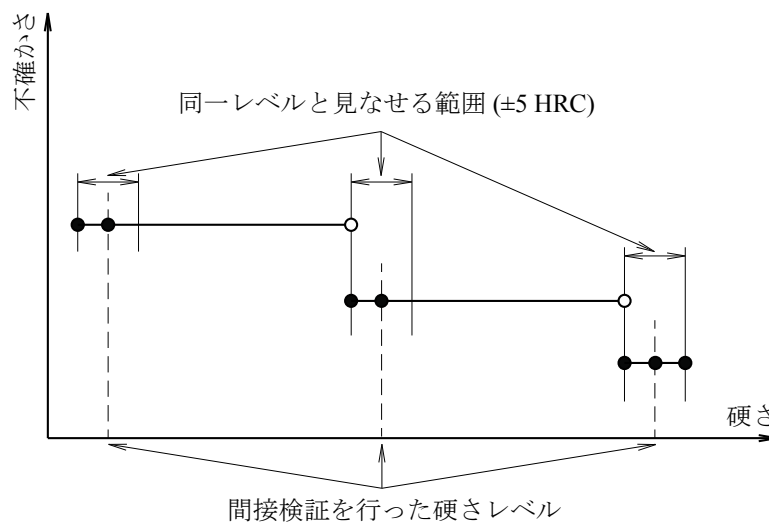


図 2.2 一般的な不確かさ内挿の例

なお、希に図2.3や図2.4のような校正結果を得ることもあるが、その場合にも隣接する硬さレベルに対する不確かさのうち、大きい方をとることにより、安全側の不確かさ内挿を行ったとみなせる。

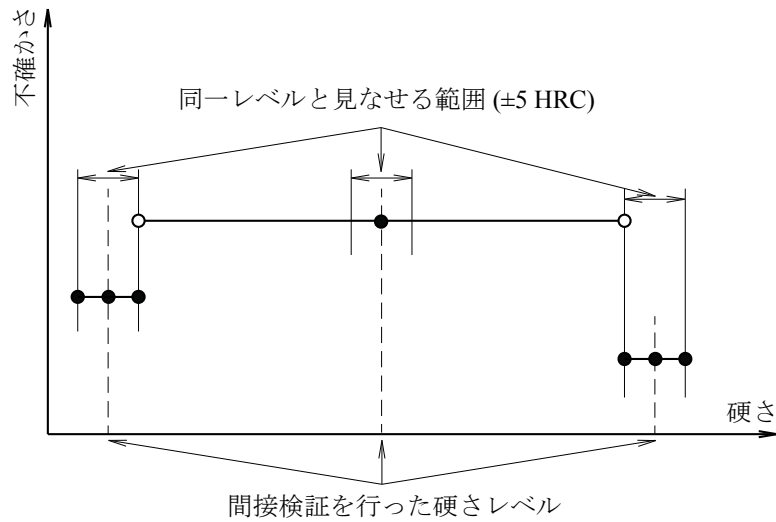


図2.3 特殊な不確かさ内挿の例 (1)

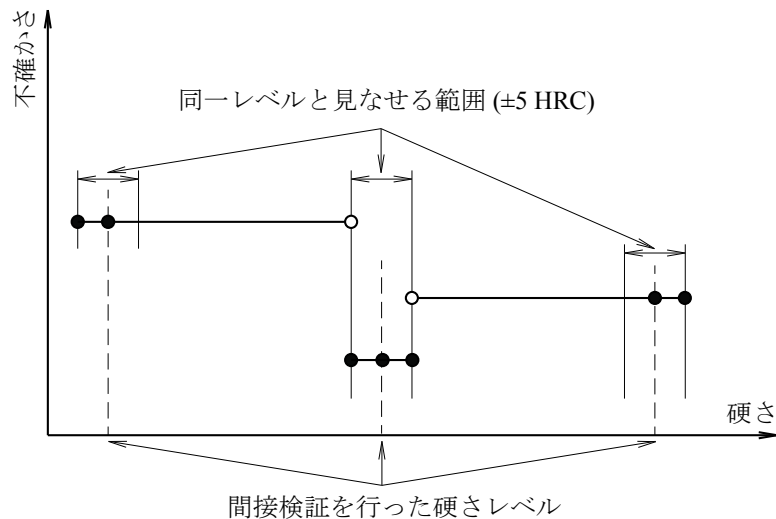


図2.4 特殊な不確かさ内挿の例 (2)

なお、3レベルより多くの硬さレベルで間接検証を行えば、不確かさのトレンドをより正確に把握することが可能である。

3. 硬さ標準片の校正の不確かさ

3.1 記号

- f_A 一元配置の分散分析における S_A の自由度
- f_E 一元配置の分散分析における S_E の自由度
- f_T 一元配置の分散分析における S_T の自由度
- \bar{H} ひとつの硬さ標準片を複数回測定したときの硬さの平均値 (HRC)
- $\overline{\bar{H}}$ 硬さ標準片1ロットを測定したときの硬さの総平均 (HRC)

H_{CRM}	硬さ標準片の校正值 (HRC)
H_i	ひとつの硬さ標準片の層別 <i>i</i> 番目における硬さ測定値 (HRC)
H_{ij}	硬さ標準片 <i>j</i> に対する <i>i</i> 番目の硬さ測定値 (HRC)
H_{int}	硬さ標準片本来の硬さ値 (HRC)
\bar{H}_j	硬さ標準片 <i>j</i> を n_{str} 複数回測定したときの硬さの平均値 (HRC)
k	包含係数
n_A	1ロットの硬さ標準変の数
n_{str}	硬さ標準片1個あたりの硬さ測定回数 (層別数)
S_A	一元配置の分散分析における標準片間の変動 (HRC ²)
S_E	一元配置の分散分析における標準片内の変動 (HRC ²)
S_T	一元配置の分散分析における全変動 (HRC ²)
$t(\nu, p)$	自由度 ν における両側確率 p に相当するスチューデントの t
$u(H_{\text{CRM}})$	硬さ標準片の校正の標準不確かさ (HRC)
$U(H_{\text{CRM}})$	硬さ標準片の校正の拡張不確かさ (HRC)
$u_{\text{B-D}}$	硬さ標準片の長期安定性 (HRC)
$u_{\text{B-G}}$	硬さ標準片の形状・表面粗さにもなう不確かさ (HRC)
u_{H}	硬さ標準片内の不均一性 (HRC)
u_{WS}	校正用硬さ試験機 (ワーキングスタンダード) の標準不確かさ (圧子を含む, HRC)
V_A	一元配置の分散分析における標準片間の分散 (HRC ²)
V_E	一元配置の分散分析における標準片内の分散 (HRC ²)
$\nu_{\text{B-D}}$	$u_{\text{B-D}}$ の自由度
$\nu_{\text{B-G}}$	$u_{\text{B-G}}$ の自由度
ν_{CRM}	$u(H_{\text{CRM}})$ の有効自由度
ν_{H}	u_{H} の自由度
ν_{WS}	u_{WS} の自由度

3.2 概要

硬さ標準片は特定標準器 (ロックウェル硬さ標準機) からトレーサビリティを繋げる標準器であり、通常ロット単位での生産管理が行われるため、標準物質的に取り上げられることもあるが、標準片ひとつひとつがすべて校正されるため、JCSS技術的要求事項適用指針^{1, 2)}の中では仲介標準として扱われている。また、国際的にも、硬さ試験の分野では積極的にISO Guide 33¹⁷⁾やGuide 35¹⁸⁾などを適用する動きはない。ロックウェル硬さ標準片の不確かさの要因効果を図2.1に示す。

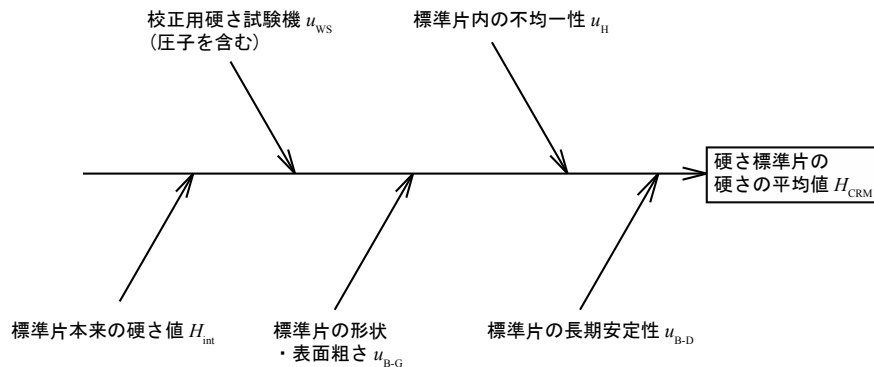


図3.1 硬さ標準片校正の要因効果図

硬さ試験機の場合と同様、これらの要因が互いに独立であると仮定すると、ロックウェル硬さ標準片の硬さ値 H_{CRM} は以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} H_{CRM} &= H_{int} \pm u(H_{CRM}) \\ &= H_{int} \pm \left[u_{WS}^2 + u_H^2 + u_{B-G}^2 + u_{B-D}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (3.1)$$

すなわち、硬さ標準片の校正の不確かさ $u(H_{CRM})$ は以下の式で表される。

$$u(H_{CRM}) = \left[u_{WS}^2 + u_H^2 + u_{B-G}^2 + u_{B-D}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

ここで、 $u(H_{CRM})$ 、 u_{WS} 、 u_H 、 u_{B-G} 、 u_{B-D} はそれぞれの標準不確かさである。

3.3 校正用硬さ試験機の不確かさ

校正用硬さ試験機の不確かさ u_{WS} は JCSS 校正証明書（または同等の内部校正）により、その詳細は2章の硬さ試験機の不確かさ $u(H_{HTM})$ ((2.4) 式) に相当する。

3.4 硬さ標準片の不均一性

硬さ標準片は1個ずつ校正されるため、その不均一性も1個ずつ行うことが可能である。JIS B 7730の附属書にも、標準片1個ずつの不確かさの求め方が示されている。

一方、硬さ標準片はロット単位で特性が変わることも予想されるため、ロット全体の校正データを用いて標準片の不均一性を評価した方が、統計的自由度も大きくなり、より信頼性の高い評価が可能になるとも考えられる。

ここでは、不均一性評価のための基本的な考え方として、これらふたつの方法で硬さ標準片の不均一性を評価する方法について述べるが、実際の校正事業においては、より多くの経験的知見から、標準片の不均一性をBタイプ不確かさとして設定する場面があることも付記しておく。

3.4.1 硬さ標準片1個ずつの不均一性を評価する場合

硬さ標準片の測定面の硬さは、製造上の問題から何らかの分布を持つと考えられる。そのため、測定面をいくつかの区画に層別し、各区画での硬さ測定値の平均値を硬さ標準片の校正值とする。また、その際の標準偏差を硬さ標準片の不均一性 u_H とする。

測定面を n_{str} の区画に層別し、各区画で1回ずつの硬さ測定を行った場合、硬さの平均値（校正值） \bar{H} または H_{CRM} 、不均一性にともなう測定のばらつき u_H 、およびその自由度 ν_H は以下のように表される。

$$\bar{H} \text{ または } H_{CRM} = \frac{1}{n_{str}} \sum_{i=1}^{n_{str}} H_i \quad (3.3)$$

$$u_H = \left[\frac{1}{n_{str} - 1} \sum_{i=1}^{n_{str}} (H_i - \bar{H})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

$$\nu_H = n_{str} - 1 \quad (3.5)$$

3.4.2 硬さ標準片の不均一性をロット単位で評価する場合

1ロットが n_A 個の標準片で構成されており、1個あたり n_{str} 区画で硬さ測定を行う場合について考える。

全測定値のばらつきには、標準片内の不均一性と標準片間の硬さの違いが含まれているので、これを分離するため一元配置の分散分析を行う（個々の標準片の硬さ分布はランダムであるとみなし、ここでは誤差のモデルとして母数模型を仮定する）。標準片 i の

層別 j における硬さ測定値を H_{ij} とすると、全変動 S_T は

$$S_T = \sum_{j=1}^{n_{str}} \sum_{i=1}^{n_A} (H_{ij} - \bar{H})^2 \quad (3.6)$$

と表される。ここで \bar{H} は全測定値の平均である。また、標準片間の変動 S_A は

$$S_A = \sum_{j=1}^{n_A} (\bar{H}_j - \bar{H})^2 \quad (3.7)$$

と表される。ここで \bar{H}_j は標準片 j における測定の平均値である。標準片内の変動 S_E は

$$S_E = S_T - S_A \quad (3.8)$$

となる。各変動成分の自由度は、それぞれ

$$f_T = n_A \cdot n_{str} - 1 \quad (3.9)$$

$$f_A = n_A - 1 \quad (3.10)$$

$$f_E = f_T - f_A \quad (3.11)$$

であり、従って標準片間の分散 V_A と標準片内の分散 V_E はそれぞれ次のように表される。

$$V_A = \frac{S_A}{f_A} \quad (3.12)$$

$$V_E = \frac{S_E}{f_E} \quad (3.13)$$

以上より、以下のような分散分析表が得られる。

表3.1 分散分析表

要因	変動	自由度	分散
標準片間 A	S_A	f_A	V_A
標準片内 E	S_E	f_E	V_E
全変動	S_T	f_T	

ここで求めたいのは、ひとつの標準片内における不均一性なので、一般には標準片内の分散 V_E を用いて

$$u_H = \sqrt{V_E} \quad (3.14)$$

$$v_H = f_E \quad (3.15)$$

であるが、標準片間の分散 V_A が V_E に対して小さく、統計的に有意でないと思われる場合には、 S_A を S_E にプールして不均一性 u_H を求めるのが妥当である（これについてはA.3.2.2節で改めて述べる）。

3.5 硬さ標準片の形状・表面粗さ等

JIS B 7730に規定されている寸法および形状の要求事項を満足する標準片の場合、 u_{B-G} はゼロとみなすことができる。

3.6 硬さ標準片の長期安定性

通常、硬さ標準片の組織は安定であり経時による変化は無視できる。標準片の硬さ変化は、使用回数によるところが大きく、そのために、JCSS技術的要求事項適用指針¹⁾には使用限度の指針が示されている。したがって、この使用限度の範囲内で使用する限り、 u_{B-D} はゼロとみなすことができる。

3.7 不確かさの合成

3.3～3.6節で求めた不確かさ成分を(3.2)式によって合成し、硬さの合成標準不確かさ

$u(H_{\text{CRM}})$ とする。ただし、3.4節および3.5節で述べた通り、通常の硬さ標準片を通常の使い方をする限り、 $u_{\text{B-G}}$ および $u_{\text{B-D}}$ はゼロと見なせるので(3.2)式は以下のように簡略化できる。

$$u(H_{\text{CRM}}) = \left[u_{\text{WS}}^2 + u_{\text{H}}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.16)$$

また、 $u(H_{\text{CRM}})$ の有効自由度 ν_{CRM} はWelch-Satterthwaiteの式

$$\nu_{\text{CRM}} = \frac{u^4(H_{\text{CRM}})}{\frac{u_{\text{WS}}^4}{\nu_{\text{WS}}} + \frac{u_{\text{H}}^4}{\nu_{\text{H}}} + \frac{u_{\text{B-G}}^4}{\nu_{\text{B-G}}} + \frac{u_{\text{B-D}}^4}{\nu_{\text{B-D}}}} \quad (3.17)$$

により計算する。ここでも、 $u_{\text{B-G}}$ および $u_{\text{B-D}}$ はゼロとみなすことにより、以下のように簡略化できる。

$$\nu_{\text{CRM}} = \frac{u^4(H_{\text{CRM}})}{\frac{u_{\text{WS}}^4}{\nu_{\text{WS}}} + \frac{u_{\text{H}}^4}{\nu_{\text{H}}}} \quad (3.18)$$

その結果得られた ν_{CRM} の値を用いて、両側確率5%に相当するスチューデントの t 表(または同等のソフトウェア等)から求め、信頼の水準約95%の包含係数 k とする。すなわち、

$$k = t(\nu_{\text{CRM}}, 0.05) \quad (3.19)$$

信頼の水準約95%に相当する拡張不確かさ $U(H_{\text{CRM}})$ は、合成標準不確かさ $u(H_{\text{CRM}})$ に(3.19)式の包含係数を乗ずることによって求める。

$$U(H_{\text{CRM}}) = k \cdot u(H_{\text{CRM}}) \quad (3.20)$$

4 最高測定能力の表示

ILACでは、校正・測定能力(最高測定能力と同義)には現存する最高の機器を校正器物と想定して、その不確かさ寄与についての合意値を含めるとしている¹⁹⁾。

しかし、ロックウェル硬さ試験の分野では、硬さ試験機校正の最高測定能力に校正器物の不確かさを含めない方針でJCSSの登録が行われてきた経緯がある。すなわち、上記の合意値はゼロとしてきた。それは、以下の理由による。

- 1) ロックウェル硬さ試験機の場合、個体によって器差を持つことが知られているので、校正事業者が参考にした一台の試験機の校正結果によって最高測定能力を評価することが必ずしも妥当ではない。
- 2) ロックウェル硬さのトレーサビリティ体系は2006年頃から、校正用硬さ試験機を特定二次標準器とするスキームから、硬さ標準片を特定二次標準器とするスキームへ順次移行した。その際、スキームの変更に伴って最高測定能力が大きく変わることをないよう配慮した。

なお、このようにして求めた最高測定能力の妥当性はJCSS技能試験で確認する。

一方、硬さ標準片校正の場合は、標準片の製造者と校正事業者が同じ事業者であったり、緊密な関係を持っていることが多いという事業実態を考慮し、実際に校正する器物(標準片)の不確かさを含めた形で最高測定能力を表すものとしてきた。

以下、硬さ試験機および硬さ標準片校正における最高測定能力の求め方を示す。

4.1 記号

$u(F)$	全試験力の標準不確かさ (N)
$u(F_0)$	初試験力の標準不確かさ (N)
$u(F_{0,\text{HTM}})$	初試験力の直接検証により求められる標準不確かさ (N)
$u(F_{\text{HTM}})$	全試験力の直接検証により求められる標準不確かさ (N)
$u(h)$	永久変形深さの標準不確かさ (mm)

$u(h_{\text{HTM}})$	深さ測定装置の直接検証から得られる標準不確かさ (HRC)
u_{comp}	間接検証により求められる標準不確かさ (HRC)
u_{CRM}	硬さ標準片の校正値の不確かさの平均値 (HRC)
u_{FRS}	全試験力用力計の標準不確かさ (N)
$u_{F_0,RS}$	初試験力用力計の標準不確かさ (N)
$u_{F,STB}$	全試験力用力計の長期安定性に関する標準不確かさ (N)
$u_{F_0,STB}$	初試験力用力計の長期安定性に関する標準不確かさ (N)
u_{LRS}	深さ測定装置の検証装置の標準不確かさ (mm)
u_{ms}	深さ測定装置の分解能に関する標準不確かさ (mm)
u_{p}	圧子に関する標準不確かさ (HRC)
u_{AH}	校正器物である硬さ試験機が指示する硬さのばらつき (HRC)
ν_{comp}	u_{comp} の有効自由度
ν_{CRM}	u_{CRM} の有効自由度
ν_{F}	$u(F)$ の有効自由度
ν_{F_0}	$u(F_0)$ の有効自由度
ν_{FRS}	u_{FRS} の自由度
$\nu_{F_0,RS}$	$u_{F_0,RS}$ の自由度
$\nu_{F,STB}$	$u_{F,STB}$ の自由度
$\nu_{F_0,STB}$	$u_{F_0,STB}$ の自由度
ν_{h}	$u(h)$ の有効自由度
ν_{LRS}	u_{LRS} の自由度

4.2 硬さ試験機校正の最高測定能力

初試験力の不確かさは、(2.12) 式において $u(F_{0,\text{HTM}})$ をゼロとして見積もる。すなわち、

$$u(F_0) = \left[u_{F_0,RS}^2 + u_{F_0,STB}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.1)$$

また、その自由度は (2.13) 式より

$$\nu_{F_0} = \frac{u^4(F_0)}{\frac{u_{F_0,RS}^4}{\nu_{F_0,RS}} + \frac{u_{F_0,STB}^4}{\nu_{F_0,STB}}} \quad (4.2)$$

である。

全試験力の不確かさは、(2.19) 式において $u(F_{\text{HTM}})$ をゼロとして見積もる。すなわち、

$$u(F) = \left[u_{\text{FRS}}^2 + u_{F,STB}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.3)$$

また、その自由度は (2.20) 式より

$$\nu_{\text{F}} = \frac{u^4(F)}{\frac{u_{\text{FRS}}^4}{\nu_{\text{FRS}}} + \frac{u_{F,STB}^4}{\nu_{F,STB}}} \quad (4.4)$$

である。

圧子に関する不確かさについては、2.4節において校正器物を一般の硬さ試験機とする場合と、校正用硬さ試験機とする場合で異なる扱いを述べたが、最高測定能力の表示においては、どちらの校正事業者も同じ基準で比較されることが望ましいため、圧子の不確かさは一律で合成不確かさに含めないこととする。すなわち $u_{\text{p}} = 0$ とする。

深さ測定装置の不確かさは、(2.27) 式において u_{ms} および $u(h_{\text{HTM}})$ をゼロとして見積も

る。すなわち、

$$u(h) = u_{\text{LRS}} \quad (4.5)$$

また、その自由度は (2.28) 式より

$$\nu_h = \nu_{\text{LRS}} \quad (4.6)$$

である。

間接検証から得られる不確かさは、(2.34) 式において $u_{\Delta H}$ をゼロとして見積もる。すなわち、

$$u_{\text{comp}} = u_{\text{CRM}} \quad (4.7)$$

また、その自由度は (2.35) 式より

$$\nu_{\text{comp}} = \nu_{\text{CRM}} \quad (4.8)$$

である。

合成標準不確かさ、および拡張不確かさは2.8節に述べたのと同様である。

4.3 硬さ標準片校正の最高測定能力

先に述べた通り、硬さ標準片校正の最高測定能力には校正器物である標準片の不確かさを含めるので、最高測定能力は3章で求めた不確かさと同一になる。

5. 標準圧子の不確かさ

5.1 記号

H_{corr}	標準圧子の補正值 (HRC)
$H_{\text{PPS},ij}$	参照標準圧子 <i>i</i> による硬さ標準片の層別 <i>j</i> におけるの硬さ測定結果 (HRC)
$H_{\text{PSS},j}$	検査圧子による硬さ標準片の層別 <i>j</i> におけるの硬さ測定結果 (HRC)
k	包含係数
n_{PPS}	間接検証に使用する参照標準圧子の数
n_{str}	硬さ標準片の測定回数
$t(\nu, p)$	自由度 ν における両側確率 p に相当するスチューデントの t
$u_{\delta H}$	δH の標準不確かさ (HRC)
u_{corr}	H_{corr} の標準不確かさ (HRC)
u_{PPS}	参照標準圧子の標準不確かさ (HRC)
$u_{\text{PPS},i}$	参照標準圧子 <i>i</i> の標準不確かさ (= u_{PPS} , HRC)
U_{corr}	H_{corr} の拡張不確かさ (HRC)
δH	検査圧子の偏差の平均値 (HRC)
ν_{corr}	u_{corr} の有効自由度
$\nu_{\delta H}$	$u_{\delta H}$ の自由度

5.2 標準圧子の校正方法

形状が JIS 7730 に規定された公差を満足する圧子に対して、既に校正された標準圧子と硬さの比較を行うことにより、硬さ補正值 H_{corr} とその不確かさ u_{corr} を付与することができる^f。

また、そのようにして校正された圧子を「標準圧子」と呼ぶことができる。標準圧子

^f トレーサビリティの証明された機器を用いて形状が評価され、その形状が JIS B 7726 または B 7730 の公差内にあることが示されたダイヤモンド圧子に対してのみ、標準圧子との比較により補正值を設定することが可能である。

の校正には、特定二次標準器により校正された校正用硬さ標準機（ワーキングスタンダード）、既に校正された標準圧子（参照標準圧子^g、複数でも良い）、および硬さ基準片を用いる。同一の硬さ基準片（複数でも良い）に対し、校正用硬さ試験機に標準圧子を取り付けた時の硬さ測定値と、検査圧子（校正器物）を取り付けた時の硬さ測定値を比較し、その差を補正值とするとともに、差を求めたときの不確かさを補正值の不確かさとする。硬さ試験機の不安定性や硬さ基準片の不均一性等による不確かさ増大を避けるため、硬さの比較は短期間のうちに4d法で行うことが望ましい。

5.3 標準圧子の不確かさの求め方

標準圧子（の補正值 H_{corr} ）の不確かさ u_{corr} は、参照標準圧子の不確かさ u_{PPS} 、および、それらと硬さ比較を行った時の硬さ値の差 δH のばらつき $u_{\delta H}$ を合成して求める。

n_{PPS} 個の参照標準圧子を用いて、検査圧子との硬さ値比較を4d法で行う場合、検査圧子の偏差の平均値 δH とその標準不確かさ $u_{\delta H}$ は以下の式で表される。

$$\delta H = \frac{1}{n_{\text{PPS}} \cdot n_{\text{str}}} \sum_{j=1}^{n_{\text{str}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{PPS}}} (H_{\text{PSS},j} - H_{\text{PPS},ij}) \quad (5.1)$$

$$u_{\delta H} = \left[\frac{1}{n_{\text{PPS}} \cdot n_{\text{str}} - 1} \sum_{j=1}^{n_{\text{str}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{PPS}}} (H_{\text{PSS},j} - H_{\text{PPS},ij} - \delta H)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.2)$$

ここでは、硬さ基準片の表面は n_{str} 区画に層別されており、各区画に各圧子で1点ずつの硬さ測定を行うものとする。また、 $H_{\text{PPS},ij}$ および $H_{\text{PSS},j}$ は、それぞれ参照標準圧子および検査圧子を用いて硬さ基準片の層別 j で測定された硬さ値である（ $H_{\text{PPS},ij}$ には、既に補正值が適用されているものとする）。また、 $u_{\delta H}$ の自由度は以下の通りである。

$$\nu_{\delta H} = n_{\text{PPS}} \cdot n_{\text{str}} - 1 \quad (5.3)$$

補正值

$$H_{\text{corr}} = -\delta H \quad (5.4)$$

の標準不確かさ u_{corr} は、上記の $u_{\delta H}$ に、参照標準圧子の不確かさを合成することにより求められる。すなわち、

$$u_{\text{corr}} = \left[u_{\text{PPS}}^2 + u_{\delta H}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.5)$$

ここで、参照標準圧子 i の不確かさ $u_{\text{PPS},i}$ は校正証明書に示された不確かさを標準不確かさに換算して用いる（現状、圧子の校正機関が用いている参照標準圧子の不確かさ $u_{\text{PPS},i}$ は、どの圧子についても同一である）。

また、参照標準圧子と検査圧子の比較は、同一の校正用硬さ試験機を用いて短期間に比較を行うとともに、硬さ基準片についても4d法を用いることにより、その不均一性を除いているので、これらの要因の合成標準不確かさ u_{corr} への寄与はゼロとみなしている。

u_{corr} の有効自由度 ν_{corr} は Welch-Satterthwaite の式

$$\nu_{\text{corr}} = \frac{u_{\text{corr}}^4}{\frac{u_{\text{PPS}}^4}{\nu_{\text{PPS}}} + \frac{u_{\delta H}^4}{\nu_{\delta H}}} \quad (5.6)$$

により計算する。その結果得られた ν_{corr} の値を用いて、両側確率5%に相当する学生ンダントの t を求め、信頼の水準約95%の包含係数 k とする。すなわち、

$$k = t(\nu_{\text{corr}}, 0.05) \quad (5.7)$$

g 最上位の参照標準圧子は（独）産業技術総合研究所が（一財）日本軸受検査協会等との共同研究によって設定した標準圧子群であり、通常、硬さ標準片の校正事業者が使用する標準圧子は、この参照標準圧子に関連して校正された二次標準圧子である。

信頼の水準約95%に相当する拡張不確かさ U_{corr} は、合成標準不確かさ u_{corr} に(5.7)式の包含係数を乗じることによって求める。

$$U_{\text{corr}} = k \cdot u_{\text{corr}} \quad (5.8)$$

参照文献

- 1) JCT21801, JCSS技術的要求事項適用指針(ロックウェル硬さ(硬さ試験機))
- 2) JCT21802, JCSS技術的要求事項適用指針(ロックウェル硬さ(硬さ標準片))
- 3) 菊池正浩, JCSS校正証明書における信頼の水準約95 %表記への移行について, JCSS校正証明書における信頼の水準約95 %表記への移行に係る説明会資料(2010年9月)
- 4) 石毛浩美, 信頼の水準約95 %表記への対応に伴う補足情報, JCSS校正証明書における信頼の水準約95 %表記への移行に係る説明会資料 (2010年9月)
- 5) JIS Z 2245: 2005, ロックウェル硬さ試験－試験方法
- 6) A. Germak and S. Low, Report of The Working Group on Hardness (WGH) Activities (2005), BIPM
- 7) JIS B 7726: 2010, ロックウェル硬さ試験－試験機の検証及び校正
- 8) JIS B 7730: 2010, ロックウェル硬さ試験－基準片の校正
- 9) 川内春夫, 花木一臣, ロックウェル硬さ試験の力の変化と硬さ値, 力学量標準トレサビリティ・ワークショップ [V] テキスト (日本試験機工業会) 2003, 21-33.
- 10) 井上克彦, 品質工学, **20**, 5 (2012) 188 – 192.
- 11) EA-10/16, EA Guidelines on the Estimation of Uncertainty in Hardness Measurements, October 2001.
- 12) ISO 6508-3: 2005, Metallic materials – Rockwell hardness test – Part 2: Calibration of reference blocks (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)
- 13) 不確かさの見積もりに関するガイド(力/一軸試験機), JCG204S21 (2006年6月)
- 14) ISO/IEC Guide 98-3: 2008, “Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)”.
- 15) M. Koike and H. Ishida: “The Role of Hardness Block in Rockwell Hardness Calibration System”, XIV IMEKO World Congress, Volume III (1997) 270-275.
- 16) ASTM E18 - 08b: Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials
- 17) ISO Guide 33: 2000, “Uses of certified reference materials”
- 18) ISO Guide 35: 2006, “Reference materials – General and statistical principles for certification”
- 19) ILAC Policy for Uncertainty in Calibration, ILAC-P14:01/2013

付録

A.1 試験機校正事業者が校正器物に付与する不確かさの例

不確かさの見積もり方法は、本ガイド2章による。

A.1.1 初試験力の直接検証

98.0665 Nを含む力の範囲における過去の校正結果が表 A.1.1のようなロードセルを用いて初試験力を直接検証する場合を考える。

表 A.1.1 ロードセルの校正結果の例

i	校正時期	100 Nにおける力計の出力値 ^h $X_{cal,i}$ (mV/V)	98.0665 Nを含む力の範囲での最大拡張不確かさ ($k=2$)
1	2007年9月	0.876757	0.035 %
2	2009年9月	0.876801	0.037 %
3	2011年9月 (直近)	0.876783	0.033 %
平均 \bar{X}_{cal}		0.876780	---

直近の校正結果より、力計の標準不確かさは以下のように求められる。

$$u_{F_0RS} = \frac{0.033\% \cdot 98.0665 \text{ N}}{2} = 0.016 \text{ N} \quad (\text{A.1.1})$$

この例では、力計の校正証明書に自由度の記載がなかったものとして、 u_{F_0RS} の自由度は無量大とする。すなわち、

$$\nu_{F_0RS} \rightarrow \infty \quad (\text{A.1.2})$$

また、過去3回の校正結果から (2.9) 式、(2.11) 式を用いて力計の不安定性に関する不確かさ $u_{F_0,STB}$ 、および、その自由度 $\nu_{F_0,STB}$ を求めると以下の通りとなる。

$$u_{F_0,STB} = \left[\frac{1}{3-1} \left\{ \left(\frac{0.876757 - 0.876780}{0.876780} \right)^2 + \dots \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot 98.0665 \text{ N} = 0.002 \text{ N} \quad (\text{A.1.3})$$

$$\nu_{F_0,STB} = 3 - 1 = 2 \quad (\text{A.1.4})$$

いま、直接検証の結果が表A.1.2のようであったとする。

表 A.1.2 初試験力の直接検証の例

圧子軸の位置 j	規定値 F_0 , N	測定値 $F_{0,ij}$, N		
		1回目 ($i=1$)	2回目 ($i=2$)	3回目 ($i=3$)
1 (-5 HRC)	98.0665	96.50	96.49	96.47
2 (基準位置)		98.07	98.06	98.07
3 (+5 HRC)		99.50	99.52	99.52

この場合、初試験力の偏差は以下の通りとなる。

h 100 N は初試験力の規定値 98.0665 N よりも約 2 %大きい、力計の不安定性はこれに比べて高次の微量であるため、100 N の校正値をもって 98.0665 N の校正値の代用としても、実用上差し支えない。

表 A.1.3 補助表 (初試験力の偏差)

圧子軸の位置 j	偏差 $F_{0,j} - F_0, N$		
	1回目 ($i=1$)	2回目 ($i=2$)	3回目 ($i=3$)
1 (-5 HRC)	-1.567	-1.577	-1.597
2 (基準位置)	0.004	-0.007	0.004
3 (+5 HRC)	1.434	1.454	1.454

(2.7) 式および (2.8) 式より、初試験力のばらつき $u(F_{0,HTM})$ およびその自由度 $\nu_{F_{0,HTM}}$ は以下のように求められる。

$$u(F_{0,HTM}) = \left[\frac{(-1.567)^2 + (-1.577)^2 + \dots + 1.454^2}{3 \cdot 3} \right]^{1/2} = 1.237 N \quad (A.1.5)$$

$$\nu_{F_{0,HTM}} = 3 \cdot 3 = 9 \quad (A.1.6)$$

従って、(A.1.1) 式から (A.1.6) 式より、初試験力に関する合成標準不確かさ $u(F_0)$ およびその自由度は ν_{F_0} は表 A.1.4 のように見積もられる。

表 A.1.4 初試験力の不確かさの計算例

不確かさ要因	タイプ	確率分布	自由度	不確かさ, N
力計 $u_{F_{0,RS}}$	B	正規分布	∞	0.016
力計の長期安定性 $u_{F_{0,STB}}$	A	正規分布	2	0.002
測定のばらつき $u(F_{0,HTM})$	A	正規分布	9	1.237
合成標準不確かさ $u(F_0)$			9.00	1.237

有効自由度 ν_{F_0} は、力計の不確かさ $u_{F_{0,RS}}$ が小さいほど小さく、また、測定のばらつき $u(F_{0,HTM})$ が大きいほど小さく見積もられる傾向があるため、実際の校正においては多様な値を取り得る。ここに示した数値はあくまで計算例に過ぎないことに留意すべきである (次節に示す全試験力に関しても同様である)。

A.1.2 全試験力の直接検証

1471.00 N を含む力の範囲における過去の校正結果が表 A.1.5 のようなロードセルを用いて全試験力を直接検証する場合を考える。

表 A.1.5 ロードセルの校正結果の例

i	校正時期	1500 N における力計の出力値 ⁱ $X_{cal,i}$ (mV/V)	1471.00 N を含む力の範囲での最大拡張不確かさ ($k=2$)
1	2007年9月	2.356192	0.031 %
2	2009年9月	2.357016	0.033 %
3	2011年9月 (直近)	2.356663	0.030 %
	平均 \bar{X}_{cal}	2.356624	---

直近の校正結果より、力計の標準不確かさは以下のように求められる。

$$u_{FRS} = \frac{0.030 \% \cdot 1471.00 N}{2} = 0.221 N \quad (A.1.7)$$

前節同様、力計の校正証明書には自由度の記載がなかったものとして、 u_{FRS} の自由度は無限大とする。

i 初試験力の場合と同様、1500 N での校正値をもって 1471.00 N の校正値の代用とする。

$$v_{\text{FRS}} \rightarrow \infty \quad (\text{A.1.8})$$

また、過去3回の校正結果から (2.16) 式、(2.18) 式を用いて力計の不安定性に関する不確かさ $u_{\text{F,STB}}$ 、および、その自由度 $v_{\text{F,STB}}$ を求めると以下の通りとなる。

$$u_{\text{F,STB}} = \left[\frac{1}{3-1} \left\{ \left(\frac{2.356192 - 2.356624}{2.356624} \right)^2 + \dots \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot 1471.00 \text{ N} = 0.258 \text{ N} \quad (\text{A.1.9})$$

$$v_{\text{F,STB}} = 3 - 1 = 2 \quad (\text{A.1.10})$$

いま、直接検証の結果が表A.1.6のようであったとする。

表 A.1.6 全試験力の直接検証の例

圧子軸の位置 j	規定値 F, N	測定値 F_{ij}, N		
		1回目 ($i=1$)	2回目 ($i=2$)	3回目 ($i=3$)
1 (-30 HRC)	1471.00	1480.9	1481.2	1481.4
2 (-50 HRC)		1471.5	1471.9	1471.7
3 (-70 HRC)		1461.1	1460.8	1462.2

この場合、全試験力の偏差は以下の通りとなる。

表 A.1.7 補助表 (全試験力の偏差)

圧子軸の位置 j	偏差 $F_{ij} - F, \text{N}$		
	1回目 ($i=1$)	2回目 ($i=2$)	3回目 ($i=3$)
1 (-30 HRC)	9.90	10.20	10.40
2 (-50 HRC)	0.50	0.90	0.70
3 (-70 HRC)	-9.90	-10.20	-8.80

(2.14) 式および (2.15) 式より、全試験力のばらつき $u(F_{\text{HTM}})$ およびその自由度 $v_{\text{F,HTM}}$ は以下のように求められる。

$$u(F_{\text{HTM}}) = \left[\frac{9.90^2 + 10.20^2 + \dots + (-8.80)^2}{3 \cdot 3} \right]^{\frac{1}{2}} = 8.11 \text{ N} \quad (\text{A.1.11})$$

$$v_{\text{F,HTM}} = 3 \cdot 3 = 9 \quad (\text{A.1.12})$$

従って、(A.1.7) 式から (A.1.12) 式より、全試験力に関する合成標準不確かさ $u(F)$ およびその自由度は v_{F} は表A.1.8のように見積もられる。

表 A.1.8 全試験力の不確かさの計算例

不確かさ要因	タイプ	確率分布	自由度	不確かさ, N
力計 u_{FRS}	B	正規分布	∞	0.221
力計の長期安定性 $u_{\text{F,STB}}$	A	正規分布	2	0.258
測定のばらつき $u(F_{\text{HTM}})$	A	正規分布	9	8.11
合成標準不確かさ $u(F)$			9.03	8.11

A.1.3 深さ測定装置の直接検証

校正結果が表A.1.9のような検証装置で硬さ試験機の深さ測定装置を直接検証する場合を考える。ただし、検証装置の校正の拡張不確かさ ($k=2$, 自由度の記載なし) は $0.2 \mu\text{m}$ であるとする。検証装置の標準不確かさ u_{LRS} と自由度 v_{LRS} は以下のように見積もることができる。

$$u_{\text{LRS}} = \frac{0.2 \mu\text{m}}{2} = 0.1 \mu\text{m} \quad (\text{A.1.13})$$

$$v_{LRS} \rightarrow \infty \quad (\text{A.1.14})$$

表 A.1.9 検証装置の校正結果の例

測定位置 (HRC)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
目盛誤差 (μm)	0.0	0.0	-0.2	-0.4	-0.3	0.0	0.0	+0.3	+0.4	+0.1	-0.1

表 A.1.10 補助表 (検証装置で設定される実変位)

目盛 (HRC)	0	10	20	30	40	50
実変位 (μm)	0.0	20.0	39.8	59.6	79.7	100.0
実変位 (HRC)	0.00	10.00	19.90	29.80	39.85	50.00
目盛 (HRC)	60	70	80	90	100	
実変位 (μm)	120.0	140.3	160.4	180.1	199.9	
実変位 (HRC)	60.00	70.15	80.20	90.05	99.95	

表 A.1.11 深さ測定装置の直接検証の例

圧子軸 の位置 j	検証機器の設定値 h_j	硬さ試験機の指示値 h_{ij} , HRC		
	HRC	1回目 ($i=1$)	2回目 ($i=2$)	3回目 ($i=3$)
1	0.00	0.0	0.0	0.0
2	10.00	10.5	10.6	10.5
3	19.90	20.8	20.9	20.7
4	29.80	30.5	30.5	30.4
5	39.85	40.1	40.2	40.2
6	50.00	49.9	50.0	49.8
7	60.00	59.6	59.6	59.5
8	70.15	69.7	69.8	69.5
9	80.20	79.6	79.5	79.5
10	90.05	89.7	89.8	89.7
11	99.95	99.8	99.9	99.7

この場合、深さ測定装置の偏差は以下の通りとなる。

表 A.1.12 補助表 (深さ測定装置の偏差)

圧子軸 の位置 j	偏差 $h_{ij} - h_j$, HRC		
	1回目 ($i=1$)	2回目 ($i=2$)	3回目 ($i=3$)
1	0.00	0.00	0.00
2	0.50	0.60	0.50
3	0.90	1.00	0.80
4	0.70	0.70	0.60
5	0.25	0.35	0.35
6	-0.10	0.00	-0.20
7	-0.40	-0.40	-0.50
8	-0.45	-0.35	-0.65
9	-0.60	-0.70	-0.70
10	-0.35	-0.25	-0.35
11	-0.15	-0.05	-0.25

この場合、(2.24) 式および (2.25) 式より、深さ測定装置の指示値のばらつき $u(h_{\text{HTM}})$ およびその自由度 $\nu_{h_{\text{HTM}}}$ は以下のように求められる。

$$u(h_{\text{HTM}}) = \left[\frac{0.00^2 + 0.00^2 + \dots + (-0.25)^2}{11 \cdot 3} \right]^{\frac{1}{2}} = 0.49 \text{ HRC} = 0.99 \mu\text{m} \quad (\text{A.1.15})$$

$$\nu_{h_{\text{HTM}}} = 11 \cdot 3 = 33 \quad (\text{A.1.16})$$

また、深さ測定装置の最小目盛りが0.5 HRC (1 μm) であったとすると、分解能に関する不確かさ u_{ms} およびその自由度 ν_{ms} は、幅1 μm の矩形分布を仮定することにより (2.26) 式および (2.29) 式を用いて以下のように見積もられる。

$$u_{\text{ms}} = \frac{1 \mu\text{m}}{2\sqrt{3}} = 0.29 \mu\text{m} \quad (\text{A.1.17})$$

$$\nu_{\text{ms}} \rightarrow \infty \quad (\text{A.1.18})$$

従って、(A.1.13) 式から (A.1.18) 式より、深さ測定装置に関する合成標準不確かさ $u(h)$ は表A.1.13のように見積もられる。

表 A.1.13 深さ測定装置の不確かさの計算例

不確かさ要因	タイプ ^o	確率分布	自由度	不確かさ, μm
検証機器 u_{LRS}	B	正規分布	∞	0.1
分解能 u_{ms}	B	矩形分布	∞	0.29
測定のばらつき $u(h_{\text{HTM}})$	A	正規分布	33	0.99
合成標準不確かさ $u(h)$			40	1.03

ここで、合成標準不確かさ $u(h)$ の有効自由度 ν_h は(2.28)式より求めた。

A.1.4 間接検証

表A.1.14に示す二つの硬さ標準片(呼び硬さ40 HRC)を用いて硬さ試験機の間接検証を行う場合を考える。

表 A.1.14 この計算例に用いる硬さ標準片

硬さ標準片 j	層別 i	各層別における 硬さ値 $H_{\text{CRM},ij}$, HRC	平均値 $H_{\text{CRM},j}$, HRC	平均値の標準不確かさ $u_{\text{CRM},j}$, HRC [*]
1	1	41.1	41.05	0.21
	2	41.0		
	3	41.1		
	4	40.9		
	5	41.0		
	6	41.2		
2	1	40.3	40.27	0.23
	2	40.2		
	3	40.1		
	4	40.3		
	5	40.4		
	6	40.3		

* 自由度は表記されていないものと仮定する

A.1.4.1 平均値法による間接検証

表A.1.14に示す二つの硬さ標準片の測定面を6区画に層別し、校正器物である硬さ試験機で測定した結果が表A.1.15のようであったとする(平均値法では、硬さ標準片を校正した時の測定位置とは無関係に層別を設定して良い。また、区画数は5以上であればJIS規格の要求を満たすので、必ずしも6区画でなくても良い)。

表 A.1.15 平均値法における間接検証の例

硬さ標準片 j	層別 i	各層別における 硬さ値 H_{ij} , HRC
1	1	41.2
	2	41.0

	3	41.2
	4	40.9
	5	41.1
	6	41.2
2	1	40.3
	2	40.3
	3	40.1
	4	40.3
	5	40.4
	6	40.3

平均値法を用いると、硬さ値の偏差は以下の通りとなる。

表 A.1.16 補助表 (硬さ値の偏差)

硬さ標準片 <i>j</i>	層別 <i>i</i>	硬さ値の偏差 $H_{ij} - H_{CRM,j}$, HRC
1	1	0.15
	2	-0.05
	3	0.15
	4	-0.15
	5	0.05
	6	0.15
2	1	0.03
	2	0.03
	3	-0.17
	4	0.03
	5	0.13
	6	0.03

(2.30)式、(2.31)式より

$$u_{\Delta H} = \left[\frac{0.15^2 + (-0.05)^2 + \dots + 0.03^2}{2 \cdot 6} \right]^{\frac{1}{2}} = 0.110 \text{ HRC} \quad (\text{A.1.19})$$

$$\nu_{\Delta H} = 2 \cdot 6 = 12 \quad (\text{A.1.20})$$

また、(2.32)式、(2.33)式より

$$u_{CRM} = \left[\frac{1}{2} (0.21^2 + 0.23^2) \right]^{\frac{1}{2}} = 0.22 \text{ HRC} \quad (\text{A.1.21})$$

$$\nu_{CRM} \rightarrow \infty \quad (\text{A.1.22})$$

従って、平均値法による間接検証に関する不確かさ見積もりは表A.1.17のようになる。

表 A.1.17 間接検証に関する不確かさの計算例 (平均値法)

不確かさ要因	タイプ	確率分布	自由度	不確かさ, HRC
硬さ標準片 u_{CRM}	B	正規分布	∞	0.22
測定のばらつき $u_{\Delta H}$	A	正規分布	12	0.110
合成標準不確かさ u_{comp}			301	0.246

ここで、合成標準不確かさ u_{comp} の有効自由度 ν_{comp} は (2.35) 式により求めた。

A.1.4.2 4d法による間接検証

表A.1.14に示す二つの硬さ標準片について、校正を行った際のくぼみの近傍に校正器物である硬さ試験機によって一つずつ測定を行った結果が表A.1.18のようであったとす

る。

表 A.1.18 4d法における間接検証の例

硬さ標準片 <i>j</i>	層別 <i>i</i>	各層別における 硬さ値 H_{ij} , HRC
1	1	41.2
	2	41.0
	3	41.2
	4	40.9
	5	41.1
	6	41.2
2	1	40.3
	2	40.3
	3	40.1
	4	40.3
	5	40.4
	6	40.3

4d法を用いると、硬さ値の偏差は以下の通りとなる。

表 A.1.19 補助表 (硬さ値の偏差)

硬さ標準片 <i>j</i>	層別 <i>i</i>	硬さ値の偏差 $H_{ij} - H_{CRM,ij}$, HRC
1	1	0.10
	2	0.00
	3	0.10
	4	0.00
	5	0.10
	6	0.00
2	1	0.00
	2	0.10
	3	0.00
	4	0.00
	5	0.00
	6	0.00

(2.36) 式、(2.37) 式より

$$u_{\Delta H} = \left[\frac{0.1^2 + 0.0^2 + \dots + 0.0^2}{2 \cdot 6} \right]^{\frac{1}{2}} = 0.058 \text{ HRC} \quad (\text{A.1.23})$$

$$v_{\Delta H} = 2 \cdot 6 = 12 \quad (\text{A.1.24})$$

また、(2.32) 式、(2.33) 式より

$$u_{\text{CRM}} = \left[\frac{1}{2} (0.21^2 + 0.23^2) \right]^{\frac{1}{2}} = 0.22 \text{ HRC} \quad (\text{A.1.25})$$

$$v_{\text{CRM}} \rightarrow \infty \quad (\text{A.1.26})$$

従って、4d法による間接検証に関する不確かさ見積もりは表A.1.20のようになる。

表 A.1.20 間接検証に関する不確かさの計算例 (4d法)

不確かさ要因	タイプ ^o	確率分布	自由度	不確かさ, HRC
硬さ標準片 u_{CRM}	B	正規分布	∞	0.22
測定のばらつき $u_{\Delta H}$	A	正規分布	12	0.058
合成標準不確かさ u_{comp}			2890	0.227

ここで、合成標準不確かさ u_{comp} の有効自由度 ν_{comp} は (2.35) 式より求めた。

A.1.5 不確かさの合成と拡張不確かさの見積もり

A.1.1節からA.1.4節で求めた各要因の不確かさを2.7節に示す通り合成して合成標準不確かさ $u(H_{\text{HTM}})$ を求める。各要因の不確かさを硬さ値に変換するための感度係数のうち (2.5) および (2.6) 式は、実験により求めるのが望ましいが、信頼できる文献に掲載されている値を用いてもよい。文献値には、例えば以下のようなものがある。

表 A.1.21 文献 9 による感度係数

試験条件 (押し込み速度, 全試験力保持時間)	感度係数, HRC/N			
	初試験力 F_0		全試験力 F	
	10 $\mu\text{m/s}$, 10 s	30 $\mu\text{m/s}$, 3 s	10 $\mu\text{m/s}$, 10 s	30 $\mu\text{m/s}$, 3 s
20 HRC レベル	0.137	0.138	-0.036	-0.034
40 HRC レベル	0.084	0.092	-0.029	-0.027
60 HRC レベル	0.044	0.048	-0.019	-0.020

表 A.1.22 文献 10 による感度係数

硬さレベル, HRC	感度係数, HRC/N	
	初試験力 F_0	全試験力 F
20	9.3×10^{-2}	-3.7×10^{-2}
30	7.0×10^{-2}	-3.3×10^{-2}
40	5.7×10^{-2}	-2.7×10^{-2}
50	4.1×10^{-2}	-2.6×10^{-2}
60	3.3×10^{-2}	-2.0×10^{-2}
65	1.8×10^{-2}	-1.8×10^{-2}

* 押し込み速度 10 ~ 30 $\mu\text{m/s}$, 全試験力保持時間 3 ~ 15 s

表 A.1.23 文献 11 による感度係数

硬さレベル, HRC	感度係数, HRC/N	
	初試験力 F_0	全試験力 F
20 - 25	1.2×10^{-1}	-4.0×10^{-2}
40 - 45	7.0×10^{-2}	-3.0×10^{-2}
60 - 65	5.0×10^{-2}	-2.0×10^{-2}

* 初試験力保持時間 1.5 s, 押し込み速度 25 $\mu\text{m/s}$, 全試験力保持時間 2 s

有効自由度 ν_{HTM} を (2.38) 式に従って求めると、平均値法による間接検証の場合

$$\nu_{\text{HTM}} = 72 \quad (\text{A.1.27})$$

と十分に大きな値となり、包含係数 k は

$$k = t(72, 0.05) = 1.99 \quad (\text{A.1.28})$$

である。

本章の計算例における最終的な不確かさバジェットを、表A.1.24に示す。

表 A.1.24 硬さ試験機校正の不確かさバジェットの計算例 (平均値法)

不確かさ要因	不確かさ	感度係数	自由度	不確かさ寄与, HRC
初試験力 $u(F_0)$	1.24 N	0.084	9	0.104

全試験力 $u(F)$	8.11 N	0.029	9	0.235
深さ測定装置 $u(h)$	1.03 μm	-0.5	40	0.517
間接検証 u_{comp}	0.246 HRC	1	301	0.246
合成標準不確かさ $u(H_{\text{HTM}})$			72	0.628
拡張不確かさ $U(H_{\text{HTM}}) (k=1.99)$ (※)				1.3

(※) 有効自由度が十分大きい値であるため、包含係数を $k=2$ とみなして拡張不確かさを計算してもよい。

一方、4d法による間接検証の場合も

$$v_{\text{HTM}} = 69 \tag{A.1.29}$$

と十分に大きな値となり、包含係数 k は

$$k = t(69, 0.05) = 2.00 \tag{A.1.30}$$

である。

本章の計算例における最終的な不確かさバジェットを、表A.1.25に示す。

表 A.1.25 硬さ試験機校正の不確かさバジェットの計算例 (4d法)

不確かさ要因	不確かさ	感度係数	自由度	不確かさ寄与, HRC
初試験力 $u(F_0)$	1.24 N	0.084	9	0.104
全試験力 $u(F)$	8.11 N	0.029	9	0.235
深さ測定装置 $u(h)$	1.03 μm	-0.5	40	0.517
間接検証 u_{comp}	0.227 HRC	1	2890	0.227
合成標準不確かさ $u(H_{\text{HTM}})$			69	0.621
拡張不確かさ $U(H_{\text{HTM}}) (k=2.00)$				1.3

なお、校正器物が校正用硬さ試験機の場合には、表A.1.24およびA.1.25に不確かさ要因として標準圧子を加える必要がある。

A.2 試験機校正事業者の最高測定能力見積もりの例

最高測定能力の見積もり方法は、本ガイド4.2節による。

A.1節のデータを元に最高測定能力を求めるとすると、初試験力、全試験力、深さ測定装置および間接検証に関して、校正器物の不確かさをゼロとおくことにより、不確かさバジェットは以下のように表される。

表A.2.1 試験機校正事業者の最高測定能力見積もりの例

不確かさ要因	不確かさ	感度係数	自由度	不確かさ寄与, HRC
初試験力 $u(F_0)$	0.02 N	0.084	3870	0.001
全試験力 $u(F)$	0.34 N	0.029	6	0.010
深さ測定装置 $u(h)$	0.10 μm	-0.5	∞	0.050
間接検証 u_{comp}	0.22 HRC	1	∞	0.220
合成標準不確かさ $u(H_{\text{HTM}})$			$1.66 \cdot 10^6$	0.226
拡張不確かさ $U(H_{\text{HTM}}) (k=1.96)$ (※)				0.44

(※) 有効自由度が十分大きい値であるため、包含係数を $k=2$ とみなして拡張不確かさを計算してもよい。

ここで、合成標準不確かさ $u(H_{\text{HTM}})$ の有効自由度は (2.38) 式による。

なお、校正器物が校正用硬さ試験機の場合には、表A.2.1に不確かさ要因として標準圧子を加える必要がある。

A.3 標準片校正事業者が校正器物に付与する不確かさの例

不確かさの見積もり方法は、本ガイド3章による。

A.3.1 校正用硬さ試験機の不確かさ

校正用硬さ試験機の拡張不確かさは、試験機校正事業者によって求められており、その校正証明書から $U_{WS} = 0.40 \text{ HRC}$ ($k = 2$, 自由度の表記なし) であったとする。したがって、標準不確かさ u_{WS} と自由度 ν_{WS} はそれぞれ以下のように見積もられる。

$$u_{WS} = 0.20 \text{ HRC} \quad (\text{A.3.1})$$

$$\nu_{WS} \rightarrow \infty \quad (\text{A.3.2})$$

A.3.2 硬さ標準片の不均一性

A.3.2.1 標準片1個ずつの不均一性を評価する場合

校正用硬さ試験機で1個の標準片を測定した結果が表A.3.1のようであったとする。

表A.3.1 1個の硬さ標準片の校正結果の例

層別	測定結果 HRC
1	41.2
2	41.0
3	41.2
4	40.9
5	41.1
6	41.2

この場合、標準片の硬さの平均値 \bar{H} (すなわち校正値 H_{CRM}) は (3.3) 式より

$$\bar{H} = \frac{41.2 + 41.0 + \dots + 41.2}{6} = 41.10 \text{ HRC} \quad (\text{A.3.3})$$

であり、平均値からの偏差は表A.3.1.2のようになる。

表A.3.2 補助表 $H_i - \bar{H}$

層別	偏差 $H_i - \bar{H}$ HRC
1	0.10
2	-0.10
3	0.10
4	-0.20
5	0.00
6	0.10

したがって、標準片の不均一性とその自由度は (3.4) 式および (3.5) 式より以下のように求められる。

$$u_H = \left[\frac{0.10^2 + (-0.10)^2 + \dots + 0.10^2}{6-1} \right]^{\frac{1}{2}} = 0.127 \text{ HRC} \quad (\text{A.3.4})$$

$$\nu_H = 6-1 = 5 \quad (\text{A.3.5})$$

A.3.2.2 標準片の不均一性をロット単位で評価する場合

校正用硬さ試験機で1ロットの標準片を測定した結果が表A.3.3のようであったとする。

表A.3.3 1ロットの硬さ標準片の校正結果の例

単位: HRC

層別	標準片									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	41.2	41.1	41.0	40.9	40.9	41.2	41.0	41.3	41.0	41.1
2	41.0	41.1	40.7	41.1	41.2	40.9	41.3	41.3	41.2	40.9
3	41.2	41.1	40.8	40.8	41.2	41.2	41.1	41.0	41.2	41.1
4	40.9	40.8	40.9	41.0	41.1	41.2	41.3	41.3	41.1	41.1
5	41.1	41.0	41.0	41.1	41.2	41.1	41.3	41.2	40.9	40.8
6	41.2	40.9	41.0	41.1	41.0	41.0	41.2	41.1	41.2	41.0
平均 \bar{H}_j	41.10	41.00	40.90	41.00	41.10	41.10	41.20	41.20	41.10	41.00

層別	標準片									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	41.2	41.3	41.1	41.3	41.2	41.1	41.1	41.1	41.0	41.2
2	41.0	41.3	41.4	41.2	41.0	40.8	41.2	41.0	41.0	41.3
3	41.2	41.0	41.2	41.0	41.2	41.1	41.0	41.2	40.7	41.0
4	41.1	41.3	41.4	41.3	40.9	41.0	41.3	41.2	40.8	41.3
5	41.2	41.2	41.3	41.3	41.1	41.1	41.3	41.2	41.0	41.3
6	40.9	41.1	41.4	41.1	41.2	40.9	41.3	40.9	40.9	41.1
平均 \bar{H}_j	41.10	41.20	41.30	41.20	41.10	41.00	41.20	41.10	40.90	41.20

このロットの総平均 \bar{H} は

$$\bar{H} = \frac{41.2 + 41.0 + \dots + 41.1}{20.6} = 41.10 \text{ HRC} \tag{A.3.6}$$

なので、各測定値 H_{ij} および各標準片の平均値 \bar{H}_j からの偏差をとると、表A.3.4および表A.3.5のようになる。

表A.3.4 補助表 $H_{ij} - \bar{H}$

単位: HRC

層別	標準片									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.10	0.00	-0.10	-0.20	-0.20	0.10	-0.10	0.20	-0.10	0.00
2	-0.10	0.00	-0.40	0.00	0.10	-0.20	0.20	0.20	0.10	-0.20
3	0.10	0.00	-0.30	-0.30	0.10	0.10	0.00	-0.10	0.10	0.00
4	-0.20	-0.30	-0.20	-0.10	0.00	0.10	0.20	0.20	0.00	0.00
5	0.00	-0.10	-0.10	0.00	0.10	0.00	0.20	0.10	-0.20	-0.30
6	0.10	-0.20	-0.10	0.00	-0.10	-0.10	0.10	0.00	0.10	-0.10

層別	標準片									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0.10	0.20	0.00	0.20	0.10	0.00	0.00	0.00	-0.10	0.10
2	-0.10	0.20	0.30	0.10	-0.10	-0.30	0.10	-0.10	-0.10	0.20
3	0.10	-0.10	0.10	-0.10	0.10	0.00	-0.10	0.10	-0.40	-0.10
4	0.00	0.20	0.30	0.20	-0.20	-0.10	0.20	0.10	-0.30	0.20
5	0.10	0.10	0.20	0.20	0.00	0.00	0.20	0.10	-0.10	0.20
6	-0.20	0.00	0.30	0.00	0.10	-0.20	0.20	-0.20	-0.20	0.00

表A.3.5 補助表 $\bar{H}_j - \bar{H}$

単位: HRC

標準片									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

0.00	-0.10	-0.20	-0.10	0.00	0.00	0.10	0.10	0.00	-0.10
標準片									
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0.00	0.10	0.20	0.10	0.00	-0.10	0.10	0.00	-0.20	0.10

したがって、(3.6) 式から (3.11) 式より各変動およびそれらの自由度は以下の通りとなる。

$$S_T = 0.10^2 + (-0.10)^2 + \dots + 0.00^2 = 2.920 \text{ HRC}^2 \quad (\text{A.3.7})$$

$$S_A = 0.00^2 + (-0.20)^2 + \dots + 0.10^2 = 1.320 \text{ HRC}^2 \quad (\text{A.3.8})$$

$$S_E = 2.920 - 1.320 = 1.600 \text{ HRC}^2 \quad (\text{A.3.9})$$

$$f_T = 20 \cdot 6 - 1 = 119 \quad (\text{A.3.10})$$

$$f_A = 20 - 1 = 19 \quad (\text{A.3.11})$$

$$f_E = 119 - 19 = 100 \quad (\text{A.3.12})$$

また、(3.12) 式および (3.13) 式より

$$V_A = \frac{1.320}{19} = 0.0695 \text{ HRC}^2 \quad (\text{A.3.13})$$

$$V_E = \frac{1.600}{100} = 0.016 \text{ HRC}^2 \quad (\text{A.3.14})$$

したがって、このロットに対する分散分析表は表A.3.6の通りとなる。

表A.3.6 分散分析表

要因	変動 S , HRC ²	自由度 f	分散 V , HRC ²	分散比 F_0
標準片間 A	1.320	19	0.0695	4.342 **
標準片内 E	1.600	100	0.016	
全変動	2.920	119		

ここで、分散比

$$F_0 = \frac{V_A}{V_E} = 4.342 \quad (\text{A.3.15})$$

は有意水準1%におけるF表の値

$$F(19,100; 0.01) = 2.092 \quad (\text{A.3.16})$$

と比較し大きいため、標準片間の変動は標準片内の変動に対して信頼度99%で有意である。したがって、この例では標準片間の変動を標準片内の変動にはプールせずに、標準片の不均一性を見積もる。すなわち、この計算例では (3.14) 式および (3.15) 式より

$$u_E = \sqrt{0.016} = 0.126 \text{ HRC} \quad (\text{A.3.17})$$

$$\nu_H = 100 \quad (\text{A.3.18})$$

となる。

A.3.3 不確かさの合成

3.4節および3.5節で述べた通り、標準片の形状・表面粗さ等の効果 u_{B-G} および長期安定性 u_{B-D} はゼロであるとみなすと、3.6節に示した方法により、合成標準不確かさ $u(H_{CRM})$ および拡張不確かさ $U(H_{CRM})$ は、表A.3.7および表A.3.8の通りとなる。ここで、合成標準不確かさ $u(H_{CRM})$ の自由度は (3.18) 式による。

表 A.3.7 硬さ標準片の不確かさバジレットの例 (標準片1個に対して)

不確かさ要因	不確かさ	感度係数	自由度	不確かさ寄与, HRC
--------	------	------	-----	----------------

校正用硬さ試験機 u_{WS}	0.200 HRC	1	∞	0.20
標準片の不均一性 u_H	0.126 HRC	1	5	0.127
合成標準不確かさ $u(H_{CRM})$			61	0.237
拡張不確かさ $U(H_{CRM}) (k=2.00)$				0.47

表 A.3.8 硬さ標準片の不確かさバジェットの例 (標準片1ロットに対して)

不確かさ要因	不確かさ	感度係数	自由度	不確かさ寄与, HRC
校正用硬さ試験機 u_{WS}	0.200 HRC	1	∞	0.20
標準片の不均一性 u_H	0.126 HRC	1	100	0.126
合成標準不確かさ $u(H_{CRM})$			1,225	0.237
拡張不確かさ $U(H_{CRM}) (k=1.96)$ (※)				0.46

(※) 有効自由度が十分大きい値であるため、包含係数を $k=2$ とみなして拡張不確かさを計算してもよい。

A.4 標準片校正事業者の最高測定能力見積もりの例

4.3節に述べた通り、硬さ標準片校正の最高測定能力には校正器物の不確かさ (標準片の不均一性) を含めるので、その見積もりは表A.3.7または表A.3.8と同一である。

A.5 標準圧子の不確かさ見積もりの例

校正方法ならびに不確かさの見積もり方法は、本ガイド5章による。

ここでは、表A.5.1に示す3本の参照標準圧子を用いて、検査圧子を校正する場合を考える。

表 A.5.1 参照標準圧子の例

参照標準圧子 $p_{PS,i}$	補正值, HRC	標準不確かさ u_{PPS} , HRC
1	0.13	0.13
2	0.05	
3	-0.09	

参照標準圧子の不確かさの自由度は表記されていなかったとすると、その自由度は無有限大と仮定できる。すなわち、

$$v_{PPS} \rightarrow \infty \tag{A.5.1}$$

測定面を6区画に層別した硬さ基準片を用いて、参照標準圧子と検査圧子を4d法で比較した結果が表A.5.2のようであったとする。ここで、参照標準圧子による測定結果には、既に圧子補正值が考慮されているものとする。

表 A.5.2 圧子の比較測定の例

圧子	硬さ測定値, HRC						
	層別1	層別2	層別3	層別4	層別5	層別6	
参照標準圧子	1	60.45	60.35	60.45	60.45	60.25	60.35
	2	60.34	60.34	60.34	60.34	60.24	60.24
	3	60.22	60.22	60.22	60.22	60.12	60.22
検査圧子		60.4	60.4	60.4	60.4	60.3	60.3

表A.5.2より、検査圧子の硬さ値の偏差は表A.5.3の通りとなる。また、(5.1)式により求めた偏差の平均値 δH も併せて示す。

表 A.5.3 補助表 (硬さ値の偏差)

単位: HRC

層別 j	1	2	3	4	5	6
偏差 δH_j	-0.05 0.06 0.18	0.05 0.06 0.18	-0.05 0.06 0.18	-0.05 0.06 0.18	0.05 0.06 0.18	-0.05 0.06 0.08
平均値 δH	0.07					

(5.2) 式および (5.3) 式より、偏差の標準不確かさ $u_{\delta H}$ およびその自由度 $\nu_{\delta H}$ は以下の通りとなる。

$$u_{\delta H} = \left[\frac{(-0.05 - 0.07)^2 + (0.05 - 0.07)^2 + \dots + (0.08 - 0.07)^2}{3 \cdot 6 - 1} \right]^{\frac{1}{2}} = 0.084 \text{ HRC} \quad (\text{A.5.2})$$

$$\nu_{\delta H} = 3 \cdot 6 - 1 = 17 \quad (\text{A.5.3})$$

従って、表5.1、(A.5.1) 式、(A.5.2) 式および (A.5.3) 式を (5.5) 式により合成すると、検査圧子の補正值 H_{corr} に対する不確かさバジェットは表A.5.4の通りとなる。

表 A.5.4 標準圧子の不確かさバジェットの例

不確かさ要因	タイプ	確率分布	自由度	不確かさ, HRC
参照標準圧子 u_{PPS}	B	正規分布	∞	0.13
偏差の標準不確かさ $u_{\delta H}$	A	正規分布	17	0.084
合成標準不確かさ u_{corr}			534	0.199
拡張不確かさ U_{corr} ($k=1.96$) (※)				0.39

(※) 有効自由度が十分大きい値であるため、包含係数を $k=2$ とみなして拡張不確かさを計算してもよい。

ここで、合成標準不確かさの自由度 ν_{corr} は (5.6) 式により求めた。また、ここでの包含係数 k は、(5.7) 式より

$$k = t(534, 0.05) = 1.96 \quad (\text{A.5.4})$$

である。

改正のポイント

（改正理由）

- ・トレーサビリティ体系の統一（特定二次標準器をロックウェル硬さ標準片に統一）
- ・不確かさに有効自由度と包含係数の計算方法追記

内容を全面見直し