

JAB NOTE 3 不確かさの求め方 (電気試験／高電圧試験分野)

JAB RL503:202015

第32版：202015年09月30日
第1版：2010年04月05日

公益財団法人日本適合性認定協会

JAB NOTE 3

不確かさの求め方(電気試験／高電圧試験分野)

目 次

1.はじめに	4
2.適用範囲	4
3.引用文書及び参考文書	4
4.用語	5
5.高電圧測定システムに要求される事項	7
5.1 高電圧測定システムにおける計量トレーサビリティ	7
5.2 測定システムに要求される不確かさ	9
6.高電圧測定システムにおける不確かさ評価のための指針	9
6.1 測定不確かさの各種要因	9
6.2 個々の寄与成分に対する取扱い	10
7.高電圧測定システムの不確かさの算出と評価の例	15
7.1 雷インパルス電圧(全波、波尾裁断波)及び開閉インパルス電圧の波高値	15
7.1.1 全波雷インパルス電圧による比較校正	15
7.1.2 全波雷インパルス電圧 波高値測定の不確かさ	17
7.2 波頭裁断雷インパルス電圧の波高値	20
7.2.1 波頭裁断雷インパルス電圧試験による比較校正	20
7.2.2 波頭裁断波雷インパルス電圧 波高値測定の不確かさ	21
7.3 直流・交流電圧	24
7.3.1 交流電圧試験による比較校正	24
7.3.2 交流電圧測定の不確かさ	26
7.4 インパルス電圧の波頭長及び裁断までの時間	29
7.4.1 全波雷インパルス電圧による比較校正	29
7.4.2 全波雷インパルス電圧 波頭長測定の不確かさ	30
7.5 スケールファクタ	33
7.5.1 スケールファクタの比較校正	33
7.5.2 スケールファクタの測定不確かさ	33

8. おわりに	34
附属書 不確かさの評価に関する一般原理	35
A.1 不確かさの概念	35
A.2 不確かさの評価方法	35
A.3 タイプ A の不確かさの評価	36
A.4 タイプ B の不確かさの評価	37
A.5 合成標準不確かさの算出	38
A.6 拡張不確かさの算出と丸め方	39
A.7 結果の表示	40

1. はじめに

試験所・校正機関(以下、試験所という)がISO/IEC 17025の要求事項を満たしている試験所を構築するためには、「測定の不確かさ」(以下、不確かさという)を正しく評価推定することが最大の技術課題である。「不確かさ」は、わが国では近年の試験所認定制度の普及に伴い、一般に広がり始めた概念である。

高電圧試験所において、高電圧測定システムを用いて電圧及び時間パラメータを測定する場合、又はスケールファクタを評価推定する場合、規格が許容する不確かさの値を示すことがIEC 60060-2に規定されている。この一般的説明として、IEC 60060-2の付属書Bに「高電圧測定における不確かさの計算例」が示されている。これにより、IEC 60060-1で規定された「高電圧認可測定システム」の不確かさを評価推定するための具体的な事例及び評価手順を明示すれば、試験所間において不確かさの評価推定の標準化が図られる。

実際に「高電圧認可測定システム」における不確かさを計算するためには、「高電圧基準測定システム」をベースにした性能試験、受入試験結果や計測器メーカの仕様値及び経験値等に基づいて、不確かさを形成する複数の要因を分析し、それらを総合的に評価した値として不確かさを求める必要がある。

本文書は上記を踏まえ、高電圧分野での不確かさの評価推定を、具体例を用いながら分かりやすく整理したものである。

2. 適用範囲

本文書は、高電圧認定試験所又は高電圧認定申請試験所における高電圧測定システム及び測定結果に対する不確かさの推定及びその評価に適用する。

3. 引用文書及び参考文書

- (1) ISO/IEC 17025:201705, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories
- (2) JIS Q 17025:201805, 試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項
- (3) ISO 9000:201500, Quality management systems—Fundamentals and vocabulary
- (4) JIS Q 9000:201500, 品質マネジメントシステム—基本及び用語
- (5) ISO/IEC Guide 99:2007, International Vocabulary of Metrology -Basic and general concepts and associated terms (VIM)
- (6) ISO 3534-1:2006, Statistics -- Vocabulary and symbols -- Part 1: General statistical terms and terms used in probability
- (67) JIS Z8101-1:20151999, 統計—用語と記号—第1部:確率及び一般統計用語
- (78) Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), 1995
- (89) 計測における不確かさの表現ガイド(2003)－(財)日本規格協会

- (910) 計測の信頼性評価－トレーサビリティと不確かさ解析(2001)－(財)日本規格協会
 (110) IEC 60060-1:2010, High-voltage test techniques Part 1: General definitions and test requirements
 (124) IEC 60060-2:2010, High-voltage test techniques Part 2: Measuring systems
 (132) IEC 61083-2:2013, Instruments and software used for measurement in high-voltage and high-current tests Part 2: Requirements for software for tests with impulse voltages and currents
 (143) JAB RL351「認定の基準についての指針」－電気試験／高電圧試験－

4. 用語

- (1) 校正(calibration) (VIM 2.39)
 計器又は測定システムによって指示される量の値、若しくは、実量器又は標準物質によって表される値と、標準によって実現される対応する値との間の関係を、特定の条件下で確定する一連の作業。
- (2) 試験(test) (旧 ISO/IEC Guide 2)
 所定の製品、方法又はサービスについての一つ又はそれ以上の特性を決定する技術的な作業であって、規定された手順に従って行われるもの。
- (3) 計量トレーサビリティ(metrological traceability) (VIM 2.41)
 不確かさがすべて表記された、切れ目のない比較の連鎖を通じて、通常は国家計量標準又は国際標準である決められた標準に関連づけられ得る測定結果又は標準の値の性質。
 (注) この概念はしばしばトレーサブルという形容詞で表現される。
- (4) 国家計量標準(national measurement standard) (VIM 5.3)
 国家的な決定によって認められた標準であって、当該量の他の標準に値付けするための基礎として国内で用いられるもの。
- (5) 参照標準(reference measurement standard) (VIM 5.6)
 一般に、ある場所又はある組織内で利用できる最高の測定性能をもち、そこで行われる測定の基になる標準。
- (6) 測定システム(measuring system) (VIM 3.2)
 特定の測定を行うために組み立てられた、計器と他の装置との組合せ。
- (7) 基準測定システム(reference measuring system : RMS) (IEC 60060-2 3.1.4)
 特定の波形の種別及び電圧及び電流の範囲での同時の比較測定の実施によって、他のシステムの認証に使うための十分な精度及び安定度をもつ測定システム。
- (8) 認可測定システム(approved measuring system : AMS) (IEC 60060-2 3.1.3)
 基準測定システムとの比較校正試験を含む性能試験により、本規格(IEC 60060-2)の要求事項に合致していることが示された測定システム。
- (9) 入力量(input quantity(ies))
 出力量を求めるために、直接測定される量、及び引用、推定等によって決定される量。通常、複数あり、これらから関数関係によって出力量が決定される。
- (10) 出力量(output quantity)

測定量の、それを導出する過程における呼称。多くの場合、測定量は直接には測定されず、他の複数個の量から関数関係によって決定されるので、その関数によるプロセスの出力という意味で出力量とよばれる。

(11) 測定量(measurand)(VIM 2.3)

測定の対象となる特定の量。

(12) 分解能(resolution)(VIM 4.14)

有意に識別され得る表示装置の指示の間の最小の差異。(注)デジタル表示装置については、これは最小の有効数字が1ステップ変化するときの指示の変化である。

(13) 測定の不確かさ(uncertainty of measurement)(VIM 2.26)

測定結果に付随した、合理的に測定量に結び付けられ得る値のばらつきを特徴づけるパラメータ。

(14) 正規分布、ガウス分布(normal distribution, Laplace-Gauss distribution)(JIS Z8101-1 1.25)

統計学上の確率密度関数が次式

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right], \quad -\infty < x < \infty$$

で与えられる連続変数の分布。ここにおいて σ^2 :分散、 μ :平均値、 x :変数。

(15) 一様分布(uniform distribution, rectangular distribution)(JIS Z8101-1 1.24)

確率密度関数が有限区間[a, b]で一定の値、区間外で0となる分布。

(16) 相関(correlation)(JIS Z8101-1 1.9)

2つ以上の確率変数をもつ分布の範囲での、2個又は数個の確率変数の間の関係。

(17) 標準偏差(standard deviation)(JIS Z8101-1 1.14)

分散の正の平方根。

(18) 実験標準偏差(experimental standard deviation)

実験分散の正の平方根であり、次式で表される。

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

x_i = 測定値
 \bar{x} = その平均値
 n = 測定回数

(19) 信頼の水準(level of confidence)

結果に対する信頼度を表現する数値(例、95%)。

(20) 標準不確かさ(standard uncertainty)(GUM 2.3.1)

標準偏差で表される、測定の結果の不確かさ。

(21) rss法(Root Sum Square Method)

測定結果の不確かさに寄与する成分を合成して合成標準不確かさを求めるための計算方法。不確かさの伝播則により、各成分の二乗和の平方根(root sum square)の計算になるので、このように呼ばれる。

例: $\sqrt{3^2+4^2+5^2}=7.07\dots$

(22) 合成標準不確かさ(combined standard uncertainty) (GUM 2.3.4)

測定の結果が幾つかの他の量の値から求められるときの、測定の結果の標準不確かさ。これは、各量の変化に応じて測定結果がどれだけ変わるかによって重み付けした、分散又は他の量との共分散の和の正の平方根に等しい。

(23) 包含係数(coverage factor) (GUM 2.3.6)

測定の拡張不確かさを求めるために、測定の標準不確かさの乗数として使われる数値係数。

(24) 拡張不確かさ(expanded uncertainty) (GUM 2.3.5)

測定量に合理的に結び付けることができる値の分布の大部分を含むと期待される測定結果について一定の区間を定義する量。

(25) スケールファクタ(scale factor) (IEC 60060-2 3.3)

高電圧認可測定システムによって測定された値(電圧、時間)に乗じるべき補正係数。

5. 高電圧測定システムに要求される事項

5.1 高電圧測定システムにおける計量トレーサビリティ

一般の高電圧試験所で使用される高電圧測定システム(以下、測定システムという)は、大別すると次の二つの測定システムがある。

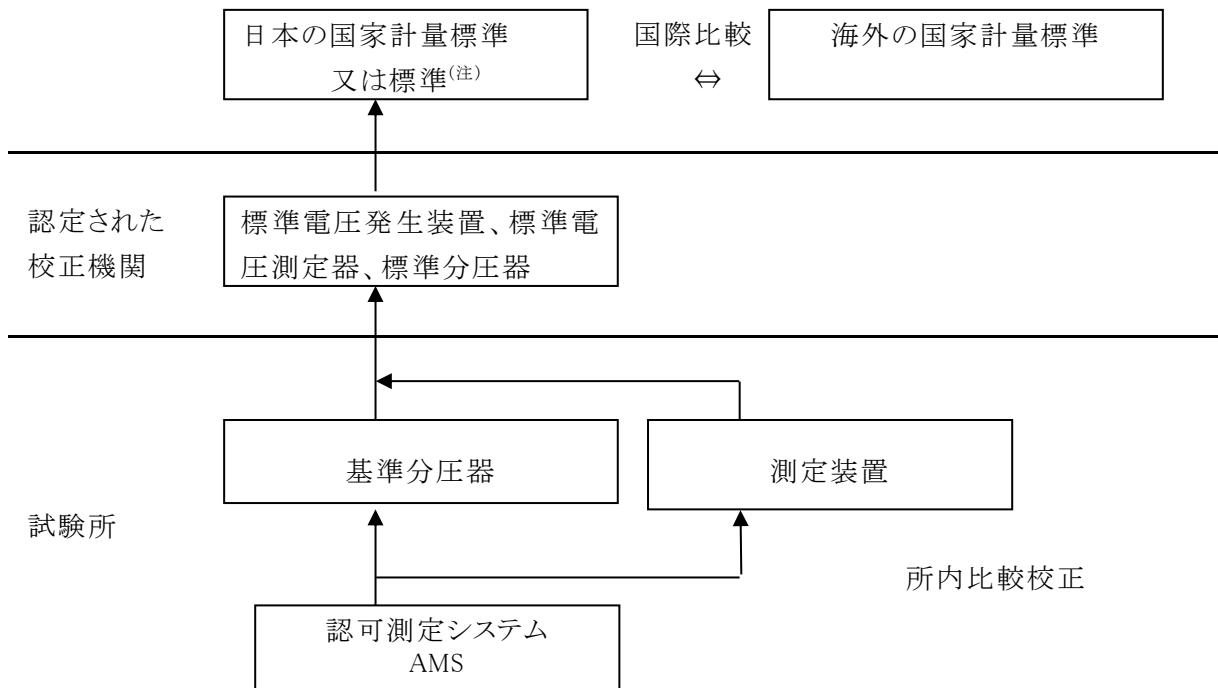
- (1) 国家計量標準にトレーサブルな基準測定システム(RMS)及びJAB RL351で規定する基準測定システム(RMS)
- (2) 直接的又は間接的に、電圧値や時間(波頭長、波尾長、裁断までの時間)を、RMSを使用して比較校正した認可測定システム(AMS)

参考 国家計量標準は、海外の国家計量標準との国際比較が行われている。

一般に、AMS は分圧器や測定器等からなるため、校正方法によって計量トレーサビリティをとる方法が異なる。ここでは代表的な二例を紹介する。

(1) 分圧器単体の校正の場合

RMS のうち分圧器だけが参照標準として単体で校正された場合(図 5.1a 参照)、測定システムとしての計量トレーサビリティをとるために測定器についても認定された校正機関などによる校正が必要である。この場合、AMS として構成した場合の不確かさを計算する必要があり、(2)の場合と比較すると不確かさの計算が煩雑になる。



(注)標準とは、JAB RL351 5.6.3 で規定したものを示す

図 5.1a 高電圧測定システムの計量トレーサビリティ

(2) RMS 一括校正の場合

分圧器及び測定器からなる RMS 全体が一括して校正された場合(図 5.1b 参照)、通常、校正証明書の不確かさの値をそのまま使用することができる。

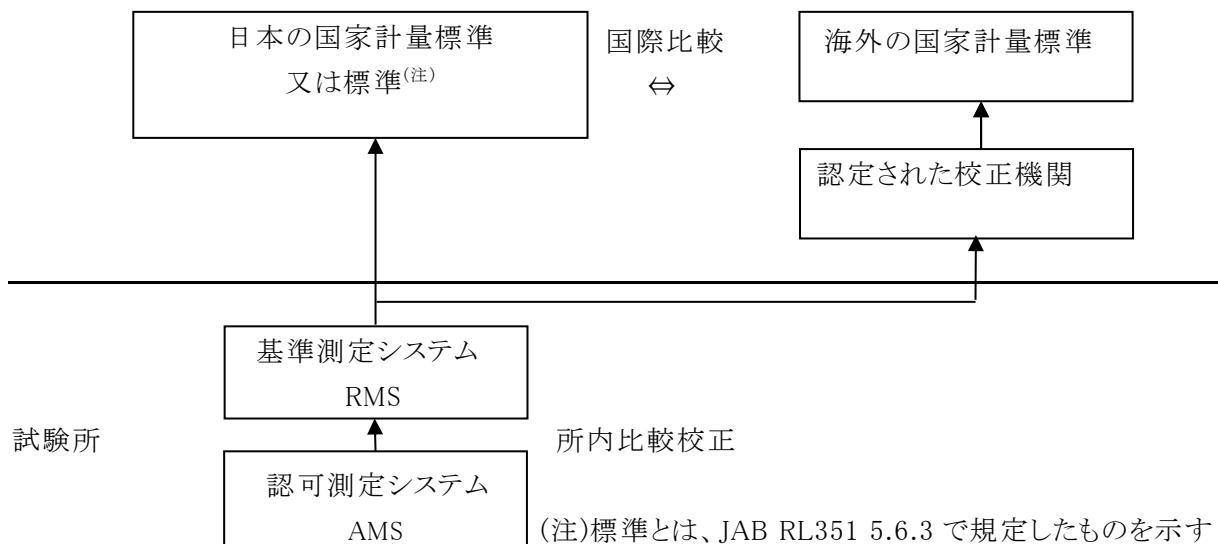


図 5.1b 高電圧測定システムの計量トレーサビリティ

5.2 測定システムに要求される不確かさ

図5.1の計量トレーサビリティにおいて、RMS及びAMSに要求される相対拡張不確かさを、表5.1に示す。

表5.1 測定システムに要求される相対拡張不確かさ

測定対象	要求される相対拡張不確かさ <i>U</i> (%)	
	RMS	AMS
全波雷インパルス電圧	波高値	1 3
波尾裁断雷インパルス電圧	時間パラメータ	5 10
波頭裁断雷インパルス電圧 ($0.5 \mu s \leq T_c < 2 \mu s$)	波高値	3 5
	時間パラメータ	5 10
開閉インパルス電圧	波高値	1 3
	時間パラメータ	5 10
直 流 電 圧	平均値	1 3
	脈動率	3 10
交 流 電 圧	波高値	1 3

(注)時間パラメータとは、波頭長、波尾長、並びに裁断までの時間(T_c)をいう。

6. 高電圧測定システムにおける不確かさ評価推定のための指針

AMSをRMSと比較校正した場合の不確かさを定量化するための具体的指針を示す。

6.1 測定不確かさの各種要因

測定システムの不確かさを算定(評価推定)するためには、各種の寄与成分から成る不確かさを予め評価推定する必要がある。表6.1に、高電圧測定時において、通常、考慮される各種の寄与成分の一覧表を示す。

(1)の寄与成分のみがタイプAであり、その他はすべてタイプBである。また、寄与成分を分布形で分けると、(1)～(3)が正規分布形で、(4)以降が一様分布形である。

最終的に求める測定システムの拡張不確かさは、寄与成分毎の標準不確かさ(標準偏差)のrss法による合成値に包含係数を乗じて求める(附属書参照)。

一様分布で表されるタイプBの寄与成分は、電圧波高値の測定において考慮されるもので、通常、時間パラメータの測定については無視できる。ただし、ソフトウェアの影響については考慮する必要がある。

表6.1 AMSの不確かさ算定時の主要な寄与成分

No.	寄与成分	タイプ	分布形	相対標準不確かさ (%)	重要度	
					電圧	時間
(1)	統計解析	u_r	A	$u_r = s_r / \sqrt{n}$	◎	
(2)	RMSの不確かさ	u_{s1}		$u_{s1} = U_{s1} / 2$	◎	
(3)	AMSの測定器の 不確かさ	u_{s2}		$u_{s2} = U_{s2} / 2$	◎	
(4)	非直線性	u_{B1}		$u_{B1} = a_1 / \sqrt{3}$	◎	×
(5)	温度効果	u_{B2}	B	$u_{B2} = a_2 / \sqrt{3}$	◎	×
(6)	短期安定性	u_{B3}		$u_{B3} = a_3 / \sqrt{3}$	○	×
(7)	波頭長幅の変動	u_{B4}		$u_{B4} = a_4 / \sqrt{3}$	○	×
(8)	ソフトウェアの 計算アルゴリズム	u_{B5}		$u_{B5} = a_5 / \sqrt{3}$	△	△
(9)	干渉妨害電圧	u_{B6}		$u_{B6} = a_6 / \sqrt{3}$	△	×
(10)	近接効果	u_{B7}		$u_{B7} = a_7 / \sqrt{3}$	△	×
(11)	長期安定性	u_{B8}		$u_{B8} = a_8 / \sqrt{3}$	×	×

(注1) $a_1 \sim a_8$ は、一様分布における幅の半分を表す。

(注2) (3)以下はAMSに対するものである。

(注3) 「(2)RMSの不確かさ」が、全ての寄与成分中、最大となる場合が多い。

◎: 不確かさの算定に、考慮すべき寄与成分。

○: 正当な理由があるとき、不確かさの算定に、省略されることがある寄与成分。

△: 必要と認められる場合に考慮される寄与成分。

×: 通常、不確かさの算定に考慮されない。

6.2 個々の寄与成分に対する取扱い

(1) 繰り返し測定に起因する不確かさ u_r (タイプA、正規分布、 u_r)

唯一のタイプAの寄与成分であり、一連の繰り返し測定結果から、不確かさ u_r として算出される。通常は、RMSとAMSの2つの測定システムを用いた高電圧比較校正によって得られる測定値が対象となる。

この場合、タイプAの不確かさには、使用する測定器(デジタルレコーダ等)の分解能や測定レンジの影響も含まれるものと考えられる。

比較校正は通常複数の電圧で実施するため、各電圧での繰り返し測定結果から算出される実験標準偏差の最大値を用いて評価する。さらに、インパルス電圧や直流電圧では、極性別又は最大値から評価する必要がある。

(2) RMSの拡張不確かさ(タイプB、正規分布、 U_{s1})

通常、RMSの校正証明書に記載された拡張不確かさを U_{s1} とする。寄与成分の中では通常、最も大きい値である。

参考 高電圧試験所では、実際の試験に使用するAMSをいくつか設置していることが多い。このような場合の比較校正は、校正機関のRMSと試験所内で最も基準となる測定システム(参照標準という)とで一旦実施し、さらにその参照標準を上位系として各AMSを比較校正することが行われる。

(3) 測定器・記録計の校正の拡張不確かさ(タイプB、正規分布、 U_{s2})

比較校正試験に使用されるデジタルレコーダ等の測定器に対する校正の拡張不確かさであり、一様分布で表されることもある。この寄与成分に対しては、測定器・記録計のカタログ値を参考にしてもよいが、十分に信頼される標準信号発生器により、予め校正しておくことが推奨される。

参考 通常、電圧測定(垂直軸)に対して、 $U_{s2} = 0.1 \sim 1.0\%$ 、時間パラメータ(水平軸)に対して、 $U_{s2} = 1 \sim 2\%$ 程度の値となる。

一様分布で表される表6.1中の各寄与成分については、それぞれの最大値 x_{max} と x_{min} 、分布の幅の半分($a_1 \sim a_8$)、標準不確かさ($u_1 \sim u_8$)の間に付属属書の(6)式及び(7)式の関係がある。以下、寄与成分ごとに述べる。

(4) 測定システムの非直線性に起因する不確かさ(タイプB、一様分布、幅の半分 a_1)

非直線性に対する幅の半分 a_1 は、印加電圧の変化(定格電圧又は最高試験電圧を最大電圧とし、最小試験電圧までの、例えば5段階の電圧)に対応するスケールファクタの変化幅から評価し、 $|x_i - x_m|$ の最大値から求める。ここに、 x_i は個々の試験電圧におけるスケールファクタ、 x_m は x_i の平均値を表す。

参考 直線性試験として、例えばインパルス電圧発生装置(I.G.)の充電電圧や試験用変圧器の一次電圧を、測定システムの読み取り値と関係付けるような場合、両者の比はスケールファクタとはならないが、スケールファクタと同じ取扱いができる。

(5) 温度効果に起因する不確かさ(タイプB、一様分布、幅の半分 a_2)

温度効果に起因する幅の半分 a_2 は、AMSが実際に使用される気温範囲に対するスケールファクタの変化幅から求める。

参考 一般に、分圧器等の変換装置に対する温度係数が知られている場合、次式より a_2 を計

算で求めることができる。

$$a_2 = \frac{\Delta t}{2} |C_h - C_l|$$

ただし、 C_h ：変換装置の高電圧部の温度係数
 C_l ：変換装置の低電圧部の温度係数
 Δt ：使用温度幅（＝使用最高気温－使用最低気温）

高電圧印加時において、自己加熱により温度上昇が大きい場合においても、上式のような取り扱いをすることが望まれる。

通常使用される主要な変換装置の温度係数 C は、概略、次のような値である。

表6.2 主要な変換装置の温度係数

変換装置名	温度係数 C (%/K)
金属被膜抵抗、巻線抵抗	≤ 0.01
ガスコンデンサ	-0.02～0
油浸紙コンデンサ	0.02～0.06
オールフィルムコンデンサ	-0.06～-0.04

(6) 短期安定性に起因する不確かさ(タイプB、一様分布、幅の半分 a_3)

短期安定性は、測定システムに定格電圧が印加された直後のスケールファクタが、印加前の値とどの程度変化するかを表すものである。

短期安定性に対する幅の半分 a_3 は、一連の高電圧比較校正の試験前と試験後(10分以内)のスケールファクタのうち、大きい方を x_{max} 、小さい方を x_{min} として求める。

直線性試験を含む高電圧比較校正を実施する場合においては、スケールファクタの短期安定性に起因する不確かさが、タイプAの不確かさの中に自動的に含まれるので、省略できる。また、スケールファクタの短期安定性は、2つの測定システム間の測定値比の変化で評価が可能である。

一般に、この寄与成分に対する不確かさは、通常の抵抗分圧器を使用した測定システムでは無視しても差し支えない程度の大きさである。

(7) インパルス波頭長の変動に起因する不確かさ(タイプB、一様分布、幅の半分 a_4)

高電圧試験に使用されるインパルス電圧(電流)の波頭長は、試験回路や供試物などにより変化するので、裕度が許容されている。この範囲内において、試験所内で実際に使用される波頭長幅の変動に対する幅の半分 a_4 は、最短波頭長又は最長波頭長にそれぞれ対応するスケールファクタの最大値を x_{max} 、最小値を x_{min} として求める。

参考1 例えば、雷インパルス電圧試験では、標準の波頭長は $1.2 \mu s$ であるが、 $\pm 30\%$ ($0.84 \mu s$ ～ $1.56 \mu s$)の裕度が許容されている。AMSには公称測定時間幅が定められており、この範囲内の波頭長を規定の不確かさで測定できることが要求される。公称測定時間幅が $0.84 \mu s$ ～ $1.56 \mu s$ の場合には、 $0.84 \mu s$ 及び $1.56 \mu s$ の波頭長に対応する指定スケールファクタのうち、大きい値を x_{max} 、小さい値を x_{min} とする。

参考2 高電圧比較校正試験においては、2組の測定システムが並列接続されるため、AMSのみを使用する通常の高電圧試験時とは、インパルス電圧の波頭長が異なる。また、印加電圧の極性や、供試物のもつ容量や抵抗分によっても、波頭長が若干変化することが考えられるので、この変化幅を考慮した不確かさを求める必要がある。ただし、試験所内で使用するインパルス電圧が、常にほぼ一定の波頭長であるか、又は一定になるよう調整される場合には、この寄与成分に起因する不確かさは無視できる。

(8) ソフトウェアの計算アルゴリズムに起因する不確かさ(タイプB、一様分布、幅の半分 a_5)

測定結果の算出にソフトウェアを使用している場合は、ソフトウェアの計算アルゴリズムの影響を評価する必要がある。インパルス電圧試験において、IEC60060-1に基づいて記録された波形(Recorded curve)を基本波形(Base curve)と残差波形(Residual curve)に分離し、残差波形のみをK(f)の特性を持つフィルタを通してFiltered residualに変換した後に基本波形に加算する計算をソフトウェアによって行う場合には、IEC61083-2にしたがって不確かさを評価する。

IEC61083-2に付属するIEC-TDGソフトウェアが出力するインパルス波形データを波形計算ソフトウェアで計算させ、出力される試験電圧値や時間パラメータの値が、IEC61083-2で規定された裕度範囲内にあることによって、計算の妥当性を評価する。さらに、IEC61083-2にしたがって、その裕度あるいは得られた値と基準値との偏差に基準値の標準不確かさを合成して不確かさを評価する。

なお、校正試験の場合は、ソフトウェアの影響を小さくするために波頭部に重畠する高周波振動をできるだけ小さくするように波形調整を行うことが望ましい。

(9) 干渉妨害電圧に起因する不確かさ(タイプB、一様分布、幅の半分 a_6)

干渉妨害試験は、雷インパルス電圧に対して、波頭又は波尾裁断時の最大ノイズが、電圧波高値の1%以内であることを確認するために行われる。

ただし、実際に考慮すべき干渉妨害電圧に対する幅の半分 a_6 は、その際のノイズ比ではなく、裁断点の電圧波高値や時間パラメータが、ノイズの影響を受けているかどうかで評価される。すなわち、ノイズの影響のあることが分かるような試験波形の場合に対して、その最大値を x_{max} 、最小値を x_{min} とし、ノイズを差し引いた平均曲線上の波高値 x_m から x_{min} を求め、幅の半分 a_6 を求めれば良い。

通常の高電圧試験においては、ノイズの大きさが1%以内ならば、ノイズは電圧波高値の測定に

ほとんど影響せず、無視して良い。また、高電圧比較校正結果から評価推定されるタイプAの不確かさの中に、干渉妨害電圧の影響の一部が含まれているものと考えられる。

参考 通常、供試物間が絶縁破壊する際は、放電電流が急増すると同時に電圧波高値が裁断される波形となる。従って、最大ノイズは、裁断開始点の電圧発生以降に遅れて発生するため、通常の場合、ノイズが波高値の測定に関与することはほとんどない。ただし、分圧器の応答特性が悪い場合やノイズの受けやすい測定システムなどでは、測定波形の波高値付近にもノイズが現れることがあるので、注意を要する。なお、大きなノイズが波高値付近に重畠した電圧波形^{注1}や、電圧裁断直後に電圧の最大値が生じる場合でも、電圧裁断直前の波高値が読み取れれば、干渉妨害電圧は測定に影響しないといえる。

注1 現実には、波高値近くでノイズを出さないシステムにすることが必要である。

(10)近接効果に起因する不確かさ(タイプB、一様分布、幅の半分 a_7)

高電圧試験時には、測定システムと近接物体(接地壁、課電物体等)との離隔距離は、測定システムの高さの2倍程度以上とすることが望まれる。

近接効果に対する幅の半分 a_7 は、測定システム～近接物体間の離隔距離が十分な場合(又は、スケールファクタを決定した標準的な離隔距離の場合)のスケールファクタを x_m 、予想される両者間の離隔距離が最も近い場合に対するスケールファクタを x_{max} として求める。

参考 近接物体までの離隔距離が測定システムの高さと同等以上の場合、次の変換装置では、近接効果を無視できる。

- ・全波雷インパルス電圧用抵抗分圧器
- ・直流電圧用抵抗分圧器
- ・静電遮へい形容量分圧器(雷・開閉インパルス電圧用、交流電圧用)
- ・高電圧側容量の大きい容量分圧器($\geq 2000\text{pF}$)

(11)長期安定性に起因する不確かさ(タイプB、一様分布、幅の半分 a_8)

高電圧試験が長期にわたり継続的に行われる場合、測定システムのスケールファクタは長期間、安定したものであることが期待される。

測定システム構成要素の性能点検でスケールファクタの変化が1%を超過した場合には性能試験を実施して新しいスケールファクタを決定する必要があるが、適宜、新しいスケールファクタに更新することにより、不確かさの算定時には長期安定性に対しては考慮しないで良い。ただし、長期的にみて、スケールファクタの変化が大きいと判断される場合には、測定システムの点検・補修・更

新を考慮すべきである。

7. 高電圧測定システムの不確かさの算出と評価の例

実際の高電圧比較校正によって得られる測定結果を基に、不確かさを評価する場合の算出例を示す。

参考 個々の寄与成分に対するタイプBの標準不確かさの求め方については付属書に述べたので、参照されたい。

7.1 雷インパルス電圧(全波、波尾裁断波)及び開閉インパルス電圧の波高値

7.1.1 全波雷インパルス電圧による比較校正

認可測定電圧範囲を40～200kVとする全波雷インパルス電圧認可測定システムを、基準測定システムによって比較校正した結果のとりまとめ例を、表7.1及び表7.2に示す。波尾裁断波雷インパルス電圧測定システム及び開閉インパルス電圧測定システムに対しても、同様である。通常、波頭長や裁断までの時間等の時間パラメータについても同時に評価する必要がある(7.4参照)。

表7.1は200kVにおける比較校正の記録を示している。また、表7.1と同様の比較測定を、測定回数10回にて40kV、80kV、120kV、160kV、200kVの試験電圧5点で実施し、それらの電圧比の平均値と平均値からの偏差、電圧比の実験標準偏差をまとめた結果を表7.2に示す。

表7.1 全波雷インパルス電圧による波高値の比較校正結果例
(200kVにおける測定結果)

測定回数 <i>n</i>	波高値 RMS <i>V₁</i> (kV)	波高値 AMS <i>V₂</i> (kV)	電圧比 <i>V₂</i> <i>V₁</i>
1	199.9	199.2	0.9965
2	199.4	198.9	0.9975
3	199.4	198.6	0.9960
4	199.4	199.0	0.9980
5	199.2	199.4	1.0010
6	198.9	198.5	0.9980
7	199.1	198.7	0.9980
8	200.2	199.4	0.9960
9	199.1	199.7	1.0030
10	199.1	199.0	0.9995
平均値	199.4	199.0	0.9984
実験標準偏差 <i>s_r</i> (%)			0.23

表7.2 全波雷インパルス電圧による波高値の比較校正結果例
(40~200kVの試験電圧5点での測定結果まとめ)

No.	試験電圧 (kV)	電圧比 $\frac{V_2}{V_1}$	電圧比 5点の平均値との 差異 (%)	電圧比の 実験標準偏差 s_r (%)
1	40	1.0038	+0.14	0.15
2	80	1.0058	+0.34	0.20
3	120	0.9998	-0.26	0.18
4	160	1.0041	+0.17	0.28
5	200	0.9984	-0.40	0.23
平均値		1.0024		

7.1.2 全波雷インパルス電圧 波高値測定の不確かさ

7.1.1で比較校正された測定システムの波高値測定の不確かさ寄与成分のとりまとめ例を、表7.3に示す。なお、この例では、表6.1に示した主要な寄与成分のうち、 $u_{B6} \sim u_{B8}$ の影響は無視したが、影響が無視できない場合は評価に組み入れる必要がある。

表7.3 全波雷インパルス電圧 波高値測定の相対標準不確かさの算出例

量	No	不確かさへの寄与成分		評価推定根拠	校正証明書の値、実測値等(%)	確率分布	相対標準不確かさの算定式	除数	感度係数	相対標準不確かさ(%)	自由度(n-1)
波高値	(1)	統計解析	u_r	繰り返し測定	0.089	正規	附属書(4), (5)	1	1	0.089	9
	(2)	RMSの不確かさ	u_{s1}	校正証明書に記載された相対拡張不確かさ	0.5	正規	附属書(11)	2	1	0.25	200 (注1)
	(3)	AMSの測定器の不確かさ	u_{s2}	校正証明書に記載された相対拡張不確かさ	0.6	正規	附属書(11)	2	1	0.3	200 (注1)
	(4)	非直線性	u_{B1}	実験値	0.40	一様	附属書(6)	$\sqrt{3}$	1	0.231	200 (注1)
	(5)	温度効果	u_{B2}	カタログ値	0.2	一様	附属書(6)	$\sqrt{3}$	1	0.115	200 (注1)
	(6)	短期安定性	u_{B3}	実験値	0.1	一様	附属書(6)	$\sqrt{3}$	1	0.058	200 (注1)
	(7)	波頭長幅の変動	u_{B4}	実験値	0.5	一様	附属書(6)	$\sqrt{3}$	1	0.289	200 (注1)
	(8)	ソフトウェア	u_{B5}	IEC61083-2 規定値 (注2)	0.1 (0.5) (1.0) (注2)	一様	附属書(6)	$\sqrt{3}$	1	0.058 (0.29) (0.58) (注2)	200 (注1)
	相対合成標準不確かさ u_c						附属書(9), (12)	-	-	0.56	
相対拡張不確かさ U						附属書(11), 表A.1	包含係数 $k=2$	1.2	-		

(注1) 標準不確かさの標準不確かさを5%と仮定すると、自由度 $=1/(2 \times 0.05^2)=200$

(注2) 上段は全波雷インパルス電圧の波高値、中段は開閉インパルス電圧の波高値、下段は波頭/波尾裁断雷インパルス電圧の波高値の場合

(1) タイプAの相対標準不確かさ

表7.2から実験標準偏差 s_r の最大値を用いて、タイプAの相対標準不確かさ u_r を求める。

$$\begin{aligned} u_r &= \frac{s_r}{\sqrt{n}} \\ &= \frac{0.28}{\sqrt{10}} \\ &= 0.089 \quad (\%) \end{aligned}$$

(2) タイプAとタイプBの相対合成標準不確かさ

(1)で得た u_r と、表7.3の(2)～(8)の寄与成分からなるタイプBの相対標準不確かさを合成して相対合成標準不確かさ u_c を求める。

$$\begin{aligned} u_c &= \sqrt{u_r^2 + u_{s1}^2 + u_{s2}^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + u_{B5}^2} \\ &= \sqrt{0.089^2 + \left(\frac{0.5}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.6}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.40}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.2}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{\sqrt{3}}\right)^2} \\ &= 0.56 \quad (\%) \end{aligned}$$

(3) 相対拡張不確かさ

包含係数を求めるために有効自由度 ν_{eff} を求めると、

$$\begin{aligned} \nu_{eff} &= \frac{u_c^4}{\frac{u_r^4}{\nu_r} + \frac{u_{s1}^4}{\nu_{s1}} + \frac{u_{s2}^4}{\nu_{s2}} + \frac{u_{B1}^4}{\nu_{B1}} + \frac{u_{B2}^4}{\nu_{B2}} + \frac{u_{B3}^4}{\nu_{B3}} + \frac{u_{B4}^4}{\nu_{B4}} + \frac{u_{B5}^4}{\nu_{B5}}} \\ &= \frac{0.56^4}{\frac{0.089^4}{9} + \frac{0.25^4}{200} + \frac{0.3^4}{200} + \frac{0.231^4}{200} + \frac{0.115^4}{200} + \frac{0.058^4}{200} + \frac{0.289^4}{200} + \frac{0.058^4}{200}} \\ &= 840 \end{aligned}$$

となる。附属書表A.1において自由度 ν が100を超えた値となり、包含係数 k は2として扱うことができる。したがって、相対拡張不確かさ U は、次式で表される。

$$\begin{aligned} U &= 2u_c \\ &= 1.12 \quad (\%) \end{aligned}$$

↓ 丸めて

$$U = 1.2 \quad (\%) \quad < \quad 3 \quad (\%) \text{ (規格要求値) (表 5.1 参照)}$$

以上の結果から、AMSの比較校正において、全波雷インパルス電圧試験における波高値の相対拡張不確かさは、IEC 60060-2に適合していることが分かる。

AMSのスケールファクタ(SF)は、RMSとの比較校正によって得られる電圧比(平均値)の電圧5点における平均値の逆数として求められる。

$$[\text{指定スケールファクタ}] = \text{SF} / 1.0024 = 0.9976 \times \text{SF}$$

7.2 波頭裁断雷インパルス電圧の波高値

7.2.1 波頭裁断雷インパルス電圧試験による比較校正

認可測定電圧範囲を100～500kVとする波頭裁断波雷インパルス電圧認可測定システムを、基準測定システムによって比較校正した結果のとりまとめ例を、表7.4及び表7.5に示す。基本的なまとめ方は、表7.1及び表7.2と同じである。表7.4は500kVにおける比較校正の記録を示している。また、表7.4と同様の比較測定を100kV、200kV、300kV、400kV、500kVの試験電圧5点で実施し、それらの電圧比の平均値と平均値からの偏差、電圧比の実験標準偏差をまとめた結果を表7.5に示す。

表7.4 波頭裁断波雷インパルス電圧による波高値の比較校正結果例
(500kVにおける測定結果)

測定回数 <i>n</i>	波高値	波高値	電圧比
	RMS V_1 (kV)	AMS V_2 (kV)	$\frac{V_2}{V_1}$
1	497.4	490.2	0.9855
2	499.5	497.9	0.9968
3	500.3	489.5	0.9784
4	499.7	495.6	0.9918
5	500.2	492.8	0.9852
6	500.0	486.5	0.9730
7	501.2	492.2	0.9820
8	499.7	489.1	0.9788
9	501.8	492.8	0.9821
10	501.4	498.2	0.9936
平均値	500.1	492.5	0.9847
実験標準偏差 s_r (%)			0.76

表7.5 波頭裁断波雷インパルス電圧試験による波高値の比較校正結果例
(100～500kVの試験電圧5点での測定結果まとめ)

No.	試験電圧 (kV)	電圧比 $\frac{V_2}{V_1}$	電圧比 5点の平均値との 差異 (%)	電圧比の 実験標準偏差 s_r (%)
1	100	0.9907	+0.22	0.57
2	200	0.9911	+0.26	0.45
3	300	0.9896	+0.11	0.83
4	400	0.9864	-0.21	0.68
5	500	0.9847	-0.38	0.76
平均値		0.9885		

7.2.2 波頭裁断波雷インパルス電圧 波高値測定の不確かさ

7.2.1で比較校正された測定システムの波高値測定の不確かさ寄与成分のとりまとめ例を、表7.6に示す。なお、この例では、表6.1に示した主要な寄与成分のうち、 $u_{B6} \sim u_{B8}$ の影響は無視したが、影響が無視できない場合は評価に組み入れる必要がある。

表7.6 波頭裁断波雷インパルス電圧 波高値測定の相対標準不確かさの算出例

量	No	不確かさへの寄与成分		推定評価根拠	校正証明書の値、実測値等(%)	確率分布	相対標準不確かさの算定式	除数	感度係数	相対標準不確かさ(%)	自由度(n-1)
波高値	(1)	統計解析	u_r	繰り返し測定	0.26	正規	附属書(4), (5)	1	1	0.26	9
	(2)	RMSの不確かさ	u_{s1}	校正証明書に記載された相対拡張不確かさ	1.5	正規	附属書(11)	2	1	0.75	200 (注1)
	(3)	AMSの測定器の不確かさ	u_{s2}	校正証明書に記載された相対拡張不確かさ	0.8	正規	附属書(11)	2	1	0.4	200 (注1)
	(4)	非直線性	u_{B1}	実験値	0.38	一様	附属書(6)	$\sqrt{3}$	1	0.219	200 (注1)
	(5)	温度効果	u_{B2}	カタログ値	0.2	一様	附属書(6)	$\sqrt{3}$	1	0.115	200 (注1)
	(6)	短期安定性	u_{B3}	実験値	0.1	一様	附属書(6)	$\sqrt{3}$	1	0.058	200 (注1)
	(7)	波頭長幅の変動	u_{B4}	実験値	0.9	一様	附属書(6)	$\sqrt{3}$	1	0.520	200 (注1)
	(8)	ソフトウェア	u_{B5}	IEC61083-2 規定値	(0.1) (0.5) 1.0 (注2)	一様	附属書(6)	$\sqrt{3}$	1	(0.058) (0.29) 0.58 (注2)	200 (注1)
相対合成標準不確かさ u_c							附属書(9), (12)	-	-	1.21	
相対拡張不確かさ U							附属書(11), 表A.1	包含係数 $k=2$	2.5	-	

(注1) 標準不確かさの標準不確かさを5%と仮定すると、自由度 $=1/(2 \times 0.05^2)=200$

(注2) 上段は全波雷インパルス電圧の波高値、中段は開閉インパルス電圧の波高値、下段は波頭/波尾裁断雷インパルス電圧の波高値の場合

(1) タイプAの相対標準不確かさ

表7.5から実験標準偏差 s_r の最大値を用いて、タイプAの相対標準不確かさ u_r を求める。

$$\begin{aligned} u_r &= \frac{s_r}{\sqrt{n}} \\ &= \frac{0.83}{\sqrt{10}} \\ &= 0.26 \quad (\%) \end{aligned}$$

(2) タイプAとタイプBの相対合成標準不確かさ

(1)で得た u_r と、表7.6の(2)～(8)の寄与成分からなるタイプBの相対標準不確かさを合成して相対合成標準不確かさ u_c を求める。

$$\begin{aligned} u_c &= \sqrt{u_r^2 + u_{s1}^2 + u_{s2}^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + u_{B5}^2} \\ &= \sqrt{0.26^2 + \left(\frac{1.5}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.8}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.38}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.2}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.9}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{1.0}{\sqrt{3}}\right)^2} \\ &= 1.21 \quad (\%) \end{aligned}$$

(3) 相対拡張不確かさ

包含係数を求めるために有効自由度 ν_{eff} を求めると、

$$\begin{aligned} \nu_{eff} &= \frac{u_c^4}{\frac{u_r^4}{\nu_r} + \frac{u_{s1}^4}{\nu_{s1}} + \frac{u_{s2}^4}{\nu_{s2}} + \frac{u_{B1}^4}{\nu_{B1}} + \frac{u_{B2}^4}{\nu_{B2}} + \frac{u_{B3}^4}{\nu_{B3}} + \frac{u_{B4}^4}{\nu_{B4}} + \frac{u_{B5}^4}{\nu_{B5}}} \\ &= \frac{1.21^4}{\frac{0.26^4}{9} + \frac{0.75^4}{200} + \frac{0.4^4}{200} + \frac{0.219^4}{200} + \frac{0.115^4}{200} + \frac{0.058^4}{200} + \frac{0.520^4}{200} + \frac{0.58^4}{200}} \\ &= 678 \end{aligned}$$

となる。附属書表A.1において自由度 ν が100を超えた値となり、包含係数 k は2として扱うことができる。したがって、相対拡張不確かさ U は、次式で表される。

$$\begin{aligned} U &= 2u_c \\ &= 2.42 \quad (\%) \end{aligned}$$

↓ 丸めて

$$U = 2.5 \quad (\%) \quad < \quad 5 \quad (\%) \text{ (規格要求値) (表 5.1 参照)}$$

以上の結果から、AMSの比較校正において、波頭裁断波雷インパルス電圧試験における波高値の相対拡張不確かさは、IEC 60060-2に適合していることが分かる。

AMSのスケールファクタ(SF)は、RMSとの比較校正によって得られる電圧比(平均値)の電圧5点における平均値の逆数として求められる。

$$[\text{指定スケールファクタ}] = \text{SF} / 0.9885 = 1.0116 \times \text{SF}$$

7.3 直流・交流電圧

7.3.1 交流電圧試験による比較校正

認可測定電圧範囲を100～500kVとする交流電圧認可測定システムを、基準測定システムによって比較校正した結果のとりまとめ例を、表7.7、表7.8、表7.9及び表7.10に示す。

この例では、100～200kVを基準測定システムとの直接比較による比較校正、200～500kVを試験用変圧器の低圧側電圧を基準測定システムで測定、高圧側電圧を供試認可測定システムで測定し、その電圧比を確認する直線性試験の二段階で評価している。

表7.7は200kVにおける比較校正の記録を示している。また、表7.7と同様の比較測定を100kV、200kVの試験電圧2点で実施し、それらの電圧比の平均値と平均値からの偏差、電圧比の実験標準偏差をまとめた結果を表7.8に示す。表7.9は500kVにおける直線性試験の記録を示している。また、表7.9と同様の比較測定を200kV、300kV、400kV、500kVの試験電圧4点で実施し、それらの電圧比の平均値と平均値からの偏差、電圧比の実験標準偏差をまとめた結果を表7.10に示す。

この例では交流電圧測定システムを対象としたが、直流電圧測定システムにおいても同様の手順で評価することができる。

表7.7 交流電圧による比較校正結果例
(200kVにおける測定結果)

測定回数 <i>n</i>	RMS <i>V</i> ₁ (kV)	AMS <i>V</i> ₂ (kV)	電圧比 $\frac{V_2}{V_1}$
1	199.1	198.2	0.9955
2	198.9	198.5	0.9980
3	197.7	197.1	0.9970
4	198.2	197.6	0.9970
5	198.7	197.9	0.9960
6	198.4	197.5	0.9955
7	198.7	198.0	0.9965
8	198.8	197.8	0.9950
9	198.8	197.7	0.9945
10	198.1	197.3	0.9960
平均値	198.5	197.8	0.9961
実験標準偏差 <i>s</i> _r (%)			0.105

表7.8 交流電圧による比較校正結果例
(100～200kVの試験電圧2点での測定結果まとめ)

No.	試験電圧 (kV)	電圧比 $\frac{V_2}{V_1}$	電圧比 2点の平均値との 差異 (%)	電圧比の 実験標準偏差 s_r (%)
1	100	0.9950	-0.06	0.095
2	200	0.9961	+0.05	0.105
平均値		0.9956		

表7.9 交流電圧による直線性試験結果例
(500kVにおける測定結果)

測定回数 <i>n</i>	試験用変圧器 低圧側電圧 RMS V_1 (kV)	試験用変圧器 高圧側電圧 AMS V_2 (kV)	電圧比 $\frac{V_2}{V_1}$
1	10.12	500.2	49.43
2	10.13	501.1	49.47
3	10.11	500.7	49.53
4	10.12	500.5	49.46
5	10.15	502.1	49.47
6	10.15	501.4	49.40
7	10.12	500.9	49.50
8	10.12	500.5	49.46
9	10.13	501.3	49.49
10	10.11	500.2	49.48
平均値	10.13	500.9	49.47
実験標準偏差 s_r (%)			0.073

表7.10 交流電圧による直線性試験結果例
(200～500kVの試験電圧4点での測定結果まとめ)

No.	試験電圧 (kV)	電圧比 $\frac{V_2}{V_1}$	電圧比 4点の平均値との 差異 (%)	電圧比の 実験標準偏差 s_r (%)
1	200	49.71	+0.10	0.056
2	300	49.79	+0.26	0.047
3	400	49.66	±0	0.038
4	500	49.47	-0.36	0.073
平均値		49.66		

7.3.2 交流電圧測定の不確かさ

7.3.1で比較校正及び直線性を評価された測定システムの交流電圧測定の不確かさ寄与成分のとりまとめ例を、表7.11に示す。なお、この例では、表6.1に示した主要な寄与成分のうち、 $u_{B3} \sim u_{B8}$ の影響は無視したが、影響が無視できない場合は評価に組み入れる必要がある。

表7.11 交流電圧測定の相対標準不確かさの算出例

量	No	不確かさへの寄与成分		推定評価根拠	校正証明書の値、実測値等(%)	確率分布	相対標準不確かさの算定式	除数	感度係数	相対標準不確かさ(%)	自由度(n-1)
電 圧 値	(1)	統計解析	u_r	繰り返し測定	0.033	正規	附属書(4), (5)	1	1	0.033	9
	(2)	RMSの不確かさ	u_{s1}	校正証明書に記載された相対拡張不確かさ	0.6	正規	附属書(11)	2	1	0.3	200 (注)
	(3)	AMSの測定器の不確かさ	u_{s2}	校正証明書に記載された相対拡張不確かさ	0.2	正規	附属書(11)	2	1	0.1	200 (注)
	(4)	非直線性	u_{B1}	実験値	0.36	一様	附属書(6)	$\sqrt{3}$	1	0.208	200 (注)
	(5)	温度効果	u_{B2}	カタログ値	0.1	一様	附属書(6)	$\sqrt{3}$	1	0.058	200 (注)
	相対合成標準不確かさ u_c						附属書(9), (12)	-	-	0.38	
相対拡張不確かさ U						附属書(11), 表A.1	包含係数 $k=2$	0.8	-		

(注) 標準不確かさの標準不確かさを5%と仮定すると、自由度 $\approx 1/(2 \times 0.05^2) = 200$

(1) タイプAの相対標準不確かさ

表7.8から実験標準偏差 s_r の最大値を用いて、タイプAの相対標準不確かさ u_r を求める。

$$\begin{aligned} u_r &= \frac{s_r}{\sqrt{n}} \\ &= \frac{0.105}{\sqrt{10}} \\ &= 0.033 \quad (\%) \end{aligned}$$

(2) タイプAとタイプBの相対合成標準不確かさ

(1)で得た u_r と、表7.11の(2)～(5)の寄与成分からなるタイプBの相対標準不確かさを合成して相対合成標準不確かさ u_c を求める。

$$\begin{aligned} u_c &= \sqrt{u_r^2 + u_{s1}^2 + u_{s2}^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2} \\ &= \sqrt{0.033^2 + \left(\frac{0.6}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.2}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.36}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{\sqrt{3}}\right)^2} \\ &= 0.38 \quad (\%) \end{aligned}$$

(3) 相対拡張不確かさ

包含係数を求めるために有効自由度 ν_{eff} を求めると、

$$\begin{aligned} \nu_{eff} &= \frac{\frac{u_c^4}{u_r^4} + \frac{u_{s1}^4}{\nu_{s1}} + \frac{u_{s2}^4}{\nu_{s2}} + \frac{u_{B1}^4}{\nu_{B1}} + \frac{u_{B2}^4}{\nu_{B2}}}{\frac{u_r^4}{\nu_r} + \frac{u_{s1}^4}{\nu_{s1}} + \frac{u_{s2}^4}{\nu_{s2}} + \frac{u_{B1}^4}{\nu_{B1}} + \frac{u_{B2}^4}{\nu_{B2}}} \\ &= \frac{0.38^4}{\frac{0.033^4}{9} + \frac{0.3^4}{200} + \frac{0.1^4}{200} + \frac{0.208^4}{200} + \frac{0.058^4}{200}} \\ &= 413 \end{aligned}$$

となる。附属書表A.1において自由度 ν が100を超えた値となり、包含係数 k は2として扱うことができる。したがって、相対拡張不確かさ U は、次式で表される。

$$\begin{aligned} U &= 2u_c \\ &= 0.76 \quad (\%) \end{aligned}$$

↓ 丸めて

$$U = 0.8 \quad (\%) \quad < \quad 3 \quad (\%) \text{ (規格要求値) (表 5.1 参照)}$$

以上の結果から、AMSの比較校正において、交流電圧測定の相対拡張不確かさは、IEC 60060-2に適合していることが分かる。なお、ここに述べられている数値はインパルス電圧よりもはるかに良い値を示しているが、一般的に直流・交流電圧測定の不確かさはインパルス電圧に比べて小さい。

AMSのスケールファクタ(SF)は、RMSとの比較校正によって得られる電圧比(平均値)の電圧2点における平均値の逆数として求められる。

$$[\text{指定スケールファクタ}] = \text{SF} / 0.9956 = 1.0044 \times \text{SF}$$

7.4 インパルス電圧の波頭長及び裁断までの時間

7.4.1 全波雷インパルス電圧による比較校正

全波雷インパルス電圧認可測定システムによる波頭長測定について、基準測定システムによって比較校正した結果のとりまとめ例を、表7.12に示す。波頭裁断波雷インパルス電圧測定システム及び開閉インパルス電圧測定システムに対しても、同様である。

表7.12 全波雷インパルス電圧試験による波頭長の比較校正結果例

測定回数 <i>n</i>	波頭長 RMS <i>T_{lr}</i> (μ s)	波頭長 AMS <i>T_{la}</i> (μ s)	時間比 $\frac{T_{la}}{T_{lr}}$	相対偏差 δ $\frac{T_{la} - T_{lr}}{T_{lr}} \times 100$ (%)
1	1.214	1.282	1.0560	5.60
2	1.235	1.297	1.0502	5.02
3	1.237	1.300	1.0509	5.09
4	1.207	1.314	1.0886	8.86
5	1.220	1.293	1.0598	5.98
6	1.206	1.310	1.0862	8.62
7	1.210	1.317	1.0884	8.84
8	1.238	1.298	1.0485	4.85
9	1.226	1.307	1.0661	6.61
10	1.207	1.313	1.0878	8.78
平均値	1.220	1.303	1.0683	6.83
実験標準偏差 <i>s_r</i>				1.75

参考 AMS側の波頭長は、RMS側のそれに比べて一般に多少長くなる傾向がある。この傾向はRMSの時間応答特性がAMSより良いことに起因している。

7.4.2 全波雷インパルス電圧 波頭長測定の不確かさ

7.4.1で比較校正された測定システムの波頭長測定の不確かさ寄与成分のとりまとめ例を、表7.13に示す。

表7.13 全波雷インパルス電圧 波頭長測定の相対標準不確かさの算出例

量	No	不確かさへの寄与成分		推定評価根拠	校正証明書の値、実測値等(%)	確率分布	相対標準不確かさの算定式	除数	感度係数	相対標準不確かさ(%)	自由度(n-1)
波頭長	(1)	統計解析	u_r	繰り返し測定	0.553	正規	附属書(4), (5)	1	1	0.553	9
	(2)	RMSの不確かさ	u_{s1}	校正証明書に記載された相対拡張不確かさ	2.0	正規	附属書(11)	2	1	1.0	200 (注1)
	(3)	AMSの測定器の不確かさ	u_{s2}	校正証明書に記載された相対拡張不確かさ	1.5	正規	附属書(11)	2	1	0.75	200 (注1)
	(4)	ソフトウェア	u_{B5}	IEC61083-2規定値	(1) 2 (5) (注2)	一様	附属書(6)	$\sqrt{3}$	1	(0.58) 1.15 (2.89) (注2)	200 (注1)
	相対合成標準不確かさ u_c						附属書(9), (12)	-	-	1.79	
	相対拡張不確かさ U						附属書(11), 表A.1	包含係数 $k=2$		3.6	-

(注1) 標準不確かさの標準不確かさを5%と仮定すると、自由度 $=1/(2 \times 0.05^2)=200$

(注2) 上段は雷インパルス電圧の波尾長、中段は雷インパルス電圧の波頭長、裁断までの時間及び開閉インパルス電圧の波尾長、下段は開閉インパルス電圧の波頭長の場合

(1) タイプAの相対標準不確かさ

表7.2から実験標準偏差 s_r の最大値を用いて、タイプAの相対標準不確かさ u_r を求める。

$$\begin{aligned} u_r &= \frac{s_r}{\sqrt{n}} \\ &= \frac{1.75}{\sqrt{10}} \\ &= 0.553 \quad (\%) \end{aligned}$$

(2) タイプAとタイプBの相対合成標準不確かさ

(1)で得た u_r と、表7.13の(2)～(4)の寄与成分からなるタイプBの相対標準不確かさを合成して相対合成標準不確かさ u_c を求める。

$$\begin{aligned} u_c &= \sqrt{u_r^2 + u_{s1}^2 + u_{s2}^2 + u_{B5}^2} \\ &= \sqrt{0.553^2 + \left(\frac{2.0}{2}\right)^2 + \left(\frac{1.5}{2}\right)^2 + \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^2} \\ &= 1.79 \quad (\%) \end{aligned}$$

(3) 相対拡張不確かさ

包含係数を求めるために有効自由度 ν_{eff} を求める

$$\begin{aligned} \nu_{eff} &= \frac{\frac{u_c^4}{u_r^4} + \frac{u_{s1}^4}{\nu_{s1}} + \frac{u_{s2}^4}{\nu_{s2}} + \frac{u_{B5}^4}{\nu_{B5}}}{\frac{1.79^4}{9} + \frac{1.0^4}{200} + \frac{0.75^4}{200} + \frac{1.15^4}{200}} \\ &= 399 \end{aligned}$$

となる。附属書表A.1において自由度 ν が100を超えた値となり、包含係数 k は2として扱うことができる。したがって、相対拡張不確かさ U は、次式で表される。

$$\begin{aligned} U &= 2u_c \\ &= 3.58 \quad (\%) \end{aligned}$$

\downarrow 丸めて

$$U = 3.6 \quad (\%) \quad < 10 \quad (\%) \text{ (規格要求値) (表 5.1 参照)}$$

以上の結果から、AMSの比較校正において、全波雷インパルス電圧試験における波頭長測定の相対拡張不確かさは、IEC 60060-2に適合していることが分かる。

AMSによる波頭長は、読み取り値から、指定スケールファクタを求めることができる。

$$[\text{指定スケールファクタ}] = (\text{読み取り値}) / 1.0683 = 0.9361 \times (\text{読み取り値})$$

参考 時間パラメータの読み取り値の有効数字が、 $1.22 \mu s$ のように3桁の場合、拡張不確かさは最終的に、小数点以下を切り上げた百分率で表示する。例えば、上記の場合、4%と表示する。電圧波高値を測定する場合に比較して、波頭長や裁断までの時間の測定不確かさはやや大きいのが通例である。

7.5 スケールファクタ

7.5.1 スケールファクタの比較校正

容量分圧器などを使用した測定システムでは、回路構成要素や直流低電圧の入出力電圧比から、スケールファクタを求めておくことは困難である。このような場合、RMSで測定した印加電圧と、AMS側の出力電圧（測定器の入力電圧）との比から、AMSのスケールファクタを求めることができる。

表7.14に、高電圧比較校正によりスケールファクタを求める場合のとりまとめ例を示す。

表7.14 スケールファクタ算出時の比較校正結果例

測定回数 <i>n</i>	RMS <i>V₁</i> (kV)	AMS <i>V₂</i> (V)	電圧比(スケールファクタ) $\frac{V_1 \times 1000}{V_2}$
1	210.1	10.63	19 765
2	209.4	10.53	19 886
3	210.7	10.73	19 637
4	210.0	10.63	19 755
5	209.4	10.54	19 867
6	209.7	10.58	19 820
7	210.0	10.63	19 755
8	210.1	10.61	19 802
9	209.7	10.60	19 783
10	210.7	10.70	19 692
平均値	210.0	10.62	19 776
実験標準偏差 <i>s_r</i> (%)			0.378

7.5.2 スケールファクタの測定不確かさ

(1) タイプAの相対標準不確かさ

表7.14から実験標準偏差 *s_r* を用いて、タイプAの相対標準不確かさ *u_r* を求める。

$$\begin{aligned} u_r &= \frac{0.378}{\sqrt{10}} \\ &= 0.12 \quad (\%) \end{aligned}$$

(2) 相対合成標準不確かさ

相対合成標準不確かさ *u_c* は、別途、タイプBの不確かさを加味して求める。

(3) 相対拡張不確かさ

相対拡張不確かさ *U* は、7.1、7.2、7.3及び7.4に示した方法と同様に求めることができる。

8. おわりに

本文書は、高電圧試験所が ISO/IEC 17025 に適した試験所を構築するために必要な不確かさの評価推定の具体例を高電圧技術分科会で検討し、まとめたものである。

本文書は、必ずしも完全なものとは言えないが、今後各界のご批判を仰ぐこと及び審査の経験を積み重ねていくことにより、継続して改善していく必要があろう。

附属書 不確かさの評価推定に関する一般原理

A.1 不確かさの概念

ある測定を行う場合に、同じ測定を何回か繰り返して行うと、まったく同じ条件で行ったつもりでも、結果として得られる値はばらつきを持つ。測定者、測定装置、測定手法など、測定条件を変えて測定した場合にも、条件を変えたことによって測定の結果はばらつく。そのようなばらつきの幅が測定不確かさである。

測定条件には制御できるものと制御できないものがある。測定を行う際には、前者(制御可能な条件)の全部又は一部が一定に保たれる。一定に保たれなかった条件(通常、制御の限界を超える部分)が測定結果に不確かさをもたらす。

「測定不確かさ」を取り扱う中で、標準不確かさ u 、合成標準不確かさ u_c 、拡張不確かさ U の三つの概念が登場する。測定結果の報告に表記されるものは、通常、“拡張不確かさ”である。測定を多数回行なったとして、ほとんどすべての場合に、測定結果が値 y を中心として $y - U$ から $y + U$ までの間にいると期待されるとき、この U 値が拡張不確かさである。「ほとんどすべての場合」をどの程度とするかは任意であるが、多くの場合、95%の信頼の水準が採用される。95%の信頼の水準とは、同じ測定を20回行うとすればそのうちの19回はこの範囲を外れないと期待されるということの表現である。

A.2 不確かさの評価方法

不確かさの求め方の手順を図 A.1 に示す。

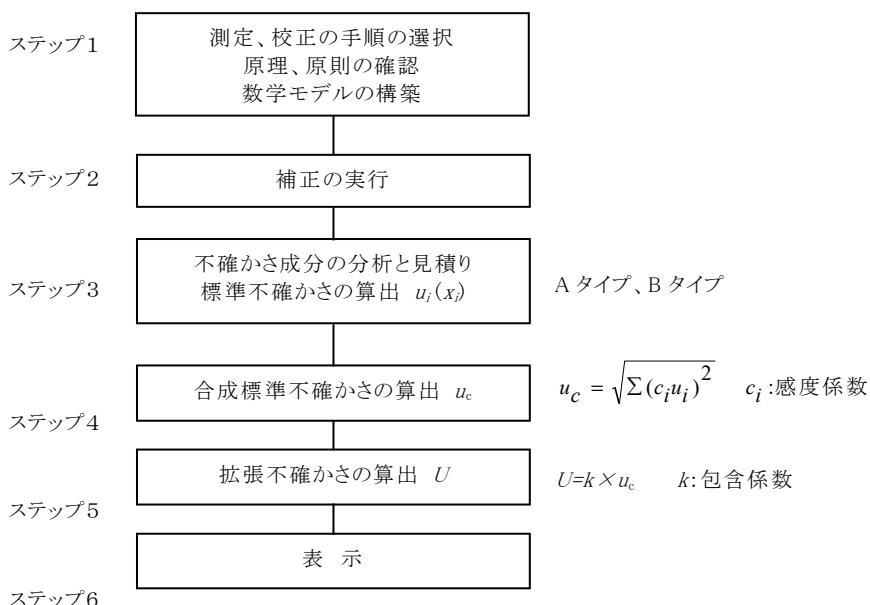


図 A.1 不確かさの求め方の手順

多くの場合、測定量 Y は直接には測定されず、他の N 個の入力量 X_1, X_2, \dots, X_N から決定される。この関数関係を数学モデルとよび、GUM にならって、次式で表現することとする。

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1)$$

ここで、 Y を出力量、 X_1, X_2, \dots, X_N を入力量とよぶ。

不確かさの評価方法には、次に示すA、B、2つのタイプがある。

タイプA：一連の繰り返し測定結果の統計解析による評価。統計解析によって得られた標準偏差をもって標準不確かさとする。通常、正規分布(ガウス分布)を仮定する。

タイプB：統計解析以外の方法による評価。分布の形(一様分布であるか、正規分布であるか、など)に注意を払う必要がある。

A.3 タイプ A の不確かさの評価

多くの場合、測定は同一条件のもとで実験を何回か繰り返して行う。すなわち、測定量 Q の推定値 q を求めるために、実験を n 回繰り返して行い、各実験で得られる観測値 q_i ($i = 1, 2, \dots, n$) の平均値 \bar{q} を求め、 \bar{q} を推定値 q とする。

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i \quad (2)$$

q の確率分布の分散 σ^2 を推定するためには、観測値の実験分散 $s^2(q_k)$ を用いる。

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2 \quad (3)$$

この実験分散の正の平方根 $s(q_k)$ が実験標準偏差である。この場合、実験標準偏差の自由度は $n-1$ である。

平均値 \bar{q} の分散は $\sigma^2(\bar{q}) = \frac{\sigma^2}{n}$ で与えられる。従って、その推定値として次式を用いる。

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (4)$$

$s^2(\bar{q})$ を平均値の実験分散とよび、その正の平方根 $s(\bar{q})$ を平均値の実験標準偏差とよぶ。

以上の実験及び統計解析により、測定量 Q の推定値 q を平均値 \bar{q} として求め、その標準不確かさ $u(\bar{q})$ は平均値の実験標準偏差 $s(\bar{q})$ に等しいとして求める。

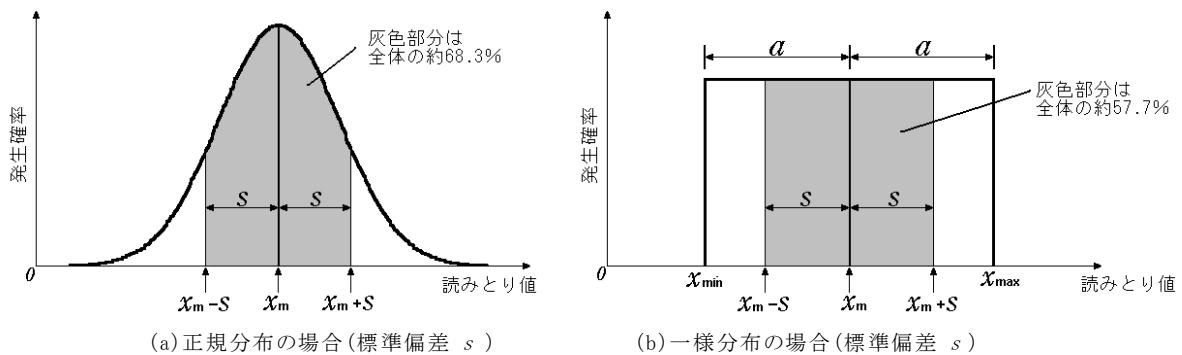
$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) \quad (5)$$

注1) 繰返し実験の回数 n が少ないからといって、上のようにして求めた標準不確かさに t 値を乗じて信頼の水準95%に相当する拡張不確かさとし、これを2で除して改めて標準不確かさとするようなことをしてはならない。

A.4 タイプBの不確かさの評価

繰返し観測から求めたものではない入力量の推定値については、それに付随する標準不確かさを、入手できるすべての情報に基づく科学的判断によって評価する。評価して決定すべきものは、確率分布の形、標準不確かさ、及び(もし必要なら)自由度である。

確率分布には、正規分布、一様分布、三角分布、台形分布、U字分布などがある。これらの中で最も多く使われる正規分布及び一様分布を図A.2に示す。



図A.2 正規分布(a)と一様分布(b)の標準偏差 s

入力量の推定値が下限 x_{\min} と上限 x_{\max} の間にあり、その間のどの値をも平等に取り得ると評価されるのであれば、それは図A.2(b)に示す一様分布であり、標準不確かさは(6)式で表される。

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

ここで、

$$a = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2} \quad (7)$$

である。本書では、 a を(一様分布の)半幅と呼ぶこととする。

タイプBの評価した不確かさの自由度 v は、もし不確かさが校正証明書等に記載されたものであって、そこに包含係数及び信頼の水準への言及があれば、それらの情報から推定評価することができる。その様な言及がない場合には、推定評価した不確かさがどの程度信頼できるかを判断し、

次式を使って求める。

$$\nu \doteq \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\Delta u(x)}{u(x)} \right)^2} \quad (8)$$

ここで Δu は標準不確かさ u の標準不確かさである。

すなわち、例えば推定評価した不確かさに25%程度の不確かさがあると判断されるのであれば、これは $\frac{\Delta u(x)}{u(x)} = \frac{1}{4}$ ということであるから、 $\nu = 8$ と求められる。

A.5 合成標準不確かさの算出

出力量の標準不確かさは、各入力量の標準不確かさを不確かさの伝播則に基づく方法、すなわち感度係数を乗じて二乗し、それらの和の平方根をとる方法(rss法)、によって合成して求める。

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2} \quad (9)$$

ここで、 $u(x_i)$ は i 番目の入力量 X_i の標準不確かさ、 c_i は Y の X_i に対する感度係数である。

感度係数は、(1)式の数学モデルから、偏導関数 $\frac{\partial f}{\partial X_i}$ の $X_i = x_i$ における値として求めることができ。関数の形が明確でないときなどは、 $X_i = x_i$ の近傍で x_i を微小量 Δx_i だけ変化させ、その時の Y の値の変化 Δy から

$$c_i = \frac{\Delta y}{\Delta x_i} \quad (10)$$

として求めることができる。

参考1 (9)式は入力量の間に相関がない場合の式である。相関がある場合の扱いについては、GUM等を参照していただきたい。

参考2 (9)式は不確かさの値(相対差ではない。)に関する式である。数学モデルの関数が入力量の積(商、べき乗を含む。)であるときは、(9)式をそのまま使うと感度係数に多くの因子が入ってきて計算が複雑になる。この場合には、感度係数に含まれる因子に注意を払って(9)式を変形すれば、相対不確かさに関して単純なrss法の式となる。

参考3 合成標準不確かさの算出は何段階かに分割して行ってもよい。特に、ある入力量の推定

値の不確かさに寄与する成分が複数あるとき、それらの成分の標準不確かさを合成して当該入力量の標準不確かさとして求めておくことは、不確かさの評価を整理する上から望ましい。

A.6 拡張不確かさの算出と丸め方

拡張不確かさ U は、(9)式で求めた合成標準不確かさ $u_c(y)$ に包含係数 k を乗じて算出する。

$$U = k u_c(y) \quad (11)$$

包含係数 k は、測定の自由度 ν 及び信頼の水準 p に応じて決定される。多くの場合、 $k=2$ を採用し、信頼の水準 $p=95\%$ であるとされる。 $k=2$ で $p=95\%$ を主張できるのは測定の自由度 ν が 20程度以上の場合である。

なお、包含係数は、スチューデントの分布 (t 分布) から求める方法もあるが、できるだけ本書による方法を採用することを推奨する。

測定の自由度 ν としては、合成標準不確かさに合成された各不確かさの自由度 ν_i を用いて、(12)式によって計算される有効自由度 ν_{eff} を用いる。

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (12)$$

ここで、

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad (13)$$

である。

不確かさとして決定された数値自体も不確かさを持つ。不確かさの評価は、通常、その不確かさの持つ不確かさが 5%程度に収まるように配慮して行う。多くの測定において $k=2$ としてよいという根拠は、多くの測定において $\nu \geq 20$ は達成されているがゆえに $k=2$ で $p=95\%$ を主張できるというところにある。

算出された拡張不確かさ U の値の表示は、その拡張不確かさの不確かさに見合ったものとする。通常、不確かさの不確かさは 5%程度あると考えられるので、有効数字の桁数は 2桁にとどめ、3桁以上にしない。

参考4 有効数字2桁に丸める場合、3桁目を四捨五入すればよい。このケースで不確かさの過小評価が最大となる1.04…の場合でも、3桁目を四捨五入したことによる不確かさの過小評価は5%未満だからである。しかし、有効数字1桁に丸める場合で切捨てによる過小評価が5%以上になる場合には、切上げる。(例:8.4→9)

表A.1 スチュードントの t 分布
(自由度 V の関数として、特定の信頼の水準 p (%) に対する t の値)

$V \backslash p$	68.3 (%)	95.0 (%)	99.7 (%)
1	1.84	12.71	235.80
2	1.32	4.30	19.21
3	1.20	3.18	9.22
4	1.14	2.78	6.62
5	1.11	2.57	5.51
6	1.09	2.45	4.90
7	1.08	2.36	4.53
8	1.07	2.31	4.28
9	1.06	2.26	4.09
10	1.05	2.23	3.96
•	•	•	•
•	•	•	•
20	1.03	2.09	3.42
•	•	•	•
30	1.02	2.04	3.27
•	•	•	•
50	1.01	2.01	3.16
100	1.005	1.984	3.077
∞	1.00	1.96	3.000

A.7 結果の表示

不確かさを付与した測定結果は、(14)式のように表される。

$$y \text{ (kV)} \pm U \text{ (kV)} \quad (14)$$

ここで、 y kV は測定結果、 U kV は拡張不確かさである。

高電圧測定の場合、不確かさを百分率 $\frac{U}{y} \times 100$ (%) で表示することが多い。この場合、測定結果を不確かさ Δ (%) をも含めて数式によって表示しようとするなら、(15)式のようになる。

$$y(1 \pm \Delta \times 10^{-2}) \text{ (kV)} \quad (15)$$

注2) $y(\text{kV}) \pm \Delta (\%)$ のような表示は避けなければならない。

参考5 拡張不確かさ U の最下位の有効桁は測定結果の値 y の最下位の有効桁に揃える。

参考6 包含係数 k を、本文書では一般的であるという理由で常に2としているが、GUMでは特定の数値にすることとせず、要求される信頼の水準を基に選択することとし、一般に2と3の間にあるとしている。いずれにせよ、 k にどのような値を用いたかは不確かさの値と共に表記する。更に、もし可能であれば、自由度及び信頼の水準も表記する。

例

$$\circ \text{ (kV)} \pm \Delta \text{ (kV)}$$

ここで、記号 \pm に続く数は拡張不確かさであり、自由度 $v=50$ に対する t 分布に基づく包含係数 $k=2$ を用いて決定されたもので、95パーセントの信頼の水準をもつと推定される区間を定める。参考のため表A.1に自由度 v と特定の信頼水準 $p\%$ に対応する t の値を示す。

【JAB RL503:2015 作成メンバー(敬称略、五十音順)】

JAB 試験所技術委員会/高電圧技術分科会

主査	日野 悅弘	三菱電機株式会社
委員	相原 良典	元 財団法人電力中央研究所
"	石井 勝	東京大学
"	井上 博史	一般社団法人日本電機工業会
"	鎌田 讓	元 株式会社日立製作所
"	木田 順三	株式会社日立製作所
"	西村 誠介	日本工業大学
"	野中 重夫	システム科学研究所
"	脇本 隆之	千葉工業大学
"	和田 治寿	株式会社東芝
事務局	佐々波 浩一	公益財団法人日本適合性認定協会

様式番号 JAB NF18 REV.0

改 定 履 歷(公開文書用)

公益財団法人 日本適合性認定協会

〒108-0014 東京都港区芝4丁目2-3 品川区東五反田1丁目22-1
NMF 芝ビル 2F 五反田ANビル3F
Tel.03-6823-5700 Fax.03-5439-95865475-2780

本協会に無断で記載内容を引用、転載及び複製することを固くお断りします。