

JAB NOTE 3 不確かさの求め方
(電気試験／高電圧試験分野)

JAB RL503-2010

制定日:2010年04月05日

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)

2010/04/05

(財)日本適合性認定協会 認定センター

目 次

1. はじめに.....	4
2. 適用範囲	4
3. 引用文書及び参考文献	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
5.3 スケールファクタ及び測定時間(動特性)の決定.....	9
6. 高電圧測定システムにおける不確かさ推定のための指針.....	10
6.1 測定不確かさの各種要因.....	10
6.2 個々の寄与成分に対する取扱い	11
7. 高電圧測定システムの不確かさの算出と評価の例	16
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	16
7.1.1 全波雷インパルス電圧試験による比較校正	16
7.1.2 全波雷インパルス電圧試験システムにおける波高値の測定不確かさ	17
7.2 波頭裁断雷インパルス電圧の波高値	21
7.2.1 波頭裁断雷インパルス電圧試験による比較校正	21
7.2.2 波頭裁断雷インパルス電圧試験システムにおける波高値の測定不確かさ.....	21
7.3 直流・交流電圧の波高値	23
7.3.1 直流・交流電圧試験による比較校正	23
7.3.2 直流・交流電圧における電圧値の測定不確かさ	24
7.4 インパルス電圧の波頭長及び裁断までの時間	25
7.4.1 雷インパルス電圧試験による波頭長の比較校正	25
7.4.2 雷インパルス電圧試験における波頭長の測定不確かさ	26
7.5 スケールファクタ	28

7.5.1 スケールファクタの比較校正	28
7.5.2 スケールファクタの測定不確かさ	29
8. おわりに	29
附属書 不確かさの推定に関する一般原理	30
A.1 不確かさの概念	30
A.2 不確かさの評価方法	30
A.3 タイプ A の不確かさの評価	31
A.4 タイプ B の不確かさの評価	32
A.5 合成標準不確かさの算出	33
A.6 拡張不確かさの算出と丸め方	34
A.7 結果の表示	35

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、「測定不確かさ」(以下、不確かさという)を正しく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および時間パラメータを測定する場合、またはスケールファクタを推定する場合、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Hに「高電圧測定における不確かさの推定の手順」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ーの仕様値およ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。

今回の改訂では、「高電圧認可測定システム」における不確かさを推定する手順において、GUM(3. (7)参照)が推奨する方法に則った方法を採用した。

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献

- (1) ISO/IEC 17025:2005, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories
- (2) JIS Q 17025:2005 試験所および校正機関の能力に関する一般要求事項
- (3) ISO 9000:2000, Quality management systems-Fundamentals and vocabulary
- (4) JIS Q 9000:2000 品質マネジメントシステム－基本および用語
- (5) ISO/IEC Guide 99:2007, International Vocabulary of Metrology –Basic and general concepts and associated terms (VIM)
- (6) JIS Z8101-1:1999 統計－用語と記号－第1部:確率及び一般統計用語
- (7) Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM),1995
- (8) 計測における不確かさの表現ガイド(2003)－(財)日本規格協会

- (9) 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
- (10) IEC 60060-1:1989, High-voltage test techniques. Part 1: General definitions and test requirements
- (11) IEC 60060-2:1994, High voltage test techniques. Part 2: Measuring systems
- (12) IEC 60060-2 Annex H: 1996
- (13) BS EN 60060-2:1995, High-voltage test techniques. Part 2: Measuring systems
- (14) CIGRE 33-96 (WG 03):1996, Uncertainty of HV Measurements – the Situation at IEC and CENELEC
- (15) STL GUIDE TO THE INTERPRETATION OF IEC 60060-2, 1999-11
- (16) 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 6.11)

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 (traceability) (VIM 6.10)

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 standard) (VIM 6.2)

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 standard) (VIM 6.6)

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) 国家的計量標準

JAB RL351 第 5.6.1 項に規定するもの。
- (7) 測定システム (measuring system) (VIM 4.5)

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。
- (8) 基準測定システム (reference measuring system : RMS) (IEC 60060-2)

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。
- (9) 認可測定システム (approved measuring system : AMS) (IEC 60060-2)

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。

- (10) 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。
- (11) 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。
- (12) 測定量 (measurand) (VIM 2.6)
測定の対象となる特定の量。
- (13) 分解能 (resolution) (VIM 5.12)
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。
- (14) 測定不確かさ (uncertainty of measurement) (VIM 3.9)
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。
- (15) 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。

- (16) 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。
- (17) 相関 (correlation) (ISO 3534)
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。
- (18) 標準偏差 (standard deviation)
分散の正の平方根。
- (19) 実験標準偏差 (experimental standard deviation) (VIM 3.8)
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

- (20) 信頼の水準 (level of confidence) (引用文書 10)
結果に対する信頼度を表現する数値 (例、95%)。
- (21) 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。
- (22) 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： $\sqrt{3^2+4^2+5^2}=7.07\dots$

(23) 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。

(24) 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。

(25) 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。

(26) スケールファクタ (scale factor)

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 (NS) 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) 直接的または間接的に、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)、計量トレーサビリティをとるためには測定器は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、計量 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。

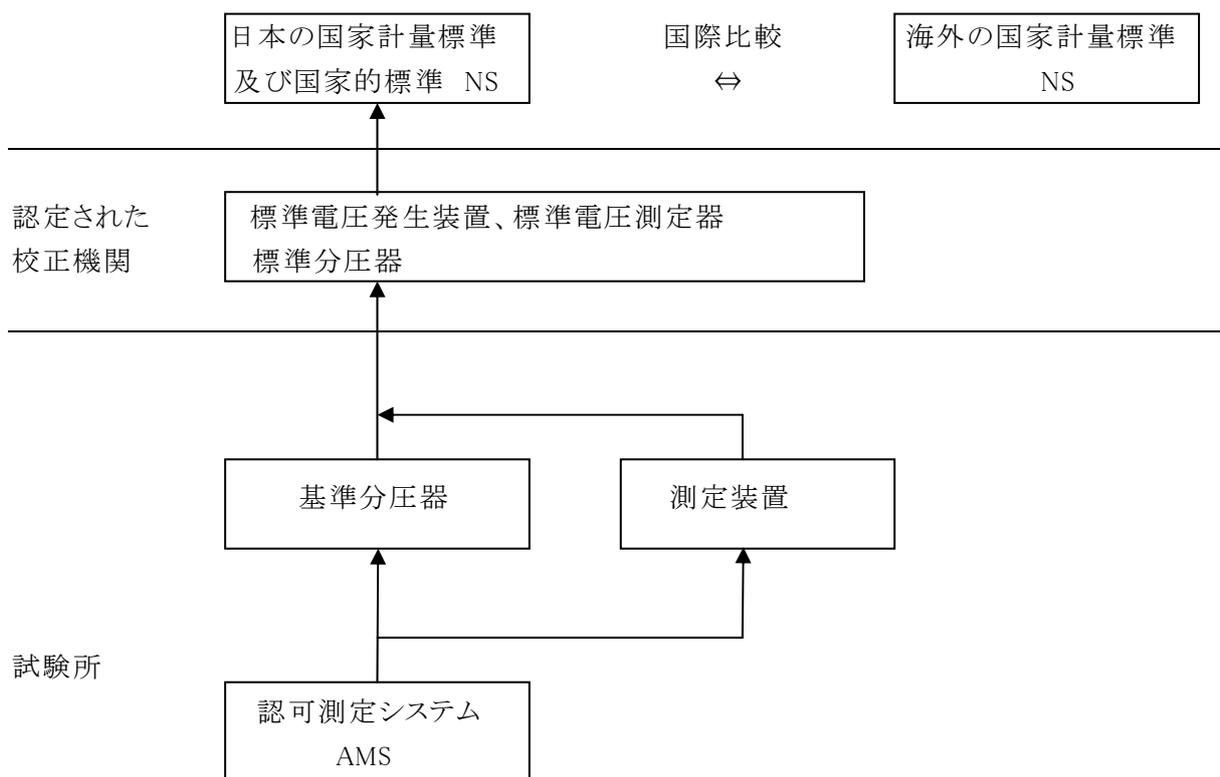


図 5.1a 高電圧測定システムの計量トレーサビリティ

(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。

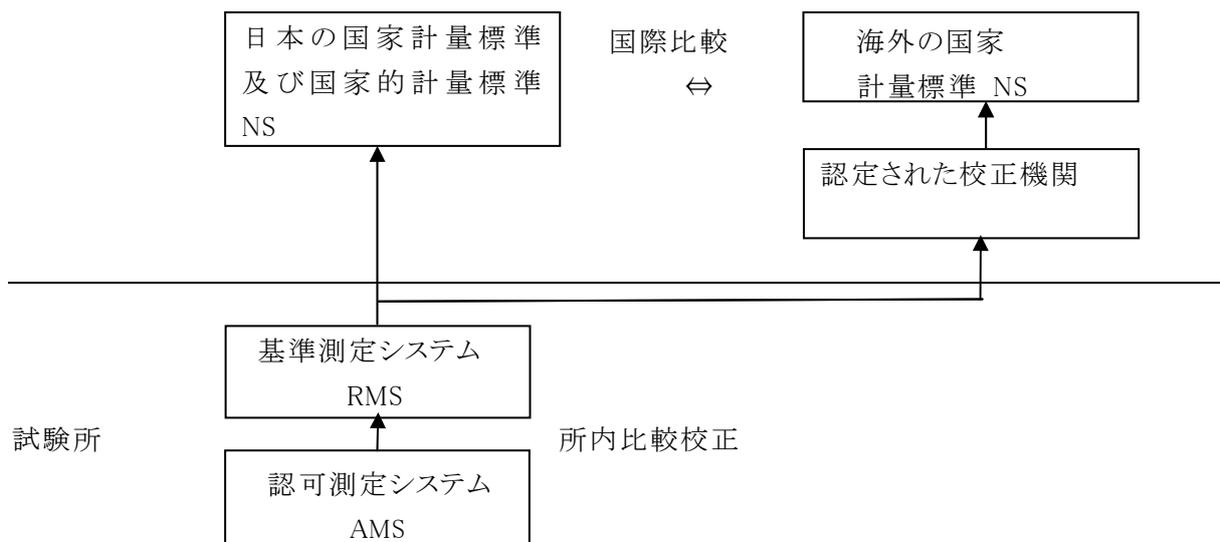


図 5.1b 高電圧測定システムの計量トレーサビリティ

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、各段階の測定システム、すなわち、NS、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 U (%)		
		NS	RMS	AMS
全波雷インパルス電圧	波高値	0.5	1	3
波尾裁断雷インパルス電圧	時間パラメータ	2.5	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	1.5	3	5
	時間パラメータ	2.5	5	10
開閉インパルス電圧	波高値	0.5	1	3
	時間パラメータ	1.5	5	10
直流電圧	平均値	0.3	1	3
	脈動率	1.0	3	10
交流電圧	波高値	0.3	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。

NSに対してはSTLガイド(2001)により、また、RMS及びAMSに対してはIEC 60060-2により、表中の値がそれぞれ推奨されている。なお、雷インパルス電流に対しては、雷インパルス電圧(全波)と同等の不確かさが要求される。

5.3 スケールファクタ及び測定時間(動特性)の決定

AMSをRMSとの比較によって校正する場合、両者の測定値の比又は相対偏差のばらつきを示す実験標準偏差 s_r もまた、小さいことが要求される。すなわち、比の平均値 F_m に対して、その実験標準偏差 s_r が、表5.2の値を満足していれば、測定された相対偏差は、新たな指定スケールファクタ、または公称測定時間幅に採用される。このスケールファクタは、異なる公称測定時間幅毎に対応する値であっても良い。 s_r 値が許容値以上の場合は、AMSとしては受け入れられないので、個々の寄与成分を見直す必要がある。

表5.2 実験標準偏差 s_r の許容値

測定対象	平均値 F_m に対する s_r の許容値 (%)	
	スケールファクタ	時間パラメータ
雷・開閉インパルス電圧	< 1	< 5
波頭裁断波雷インパルス電圧	< 3	< 5
直流電圧、交流電圧	< 1	—

なお、両者の比が、前回測定値(すなわち、比較校正に基づく校正値)よりも大きく変化していない

いことを確認することもまた重要である。もしも、表 5.3 に示す許容値外でスケールファクタまたは時間パラメータの平均値に差異が生じた場合には、その原因を明らかとしておく必要がある。

表 5.3 相対偏差の許容値

測定対象	相対偏差の許容値 (%)	
	スケールファクタ	時間パラメータ
雷・開閉インパルス電圧	≤1	≤10
波頭裁断波雷インパルス電圧	≤3	≤10
直流電圧、交流電圧	≤1	—

6. 高電圧測定システムにおける不確かさ推定のための指針

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(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。

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	A	正規	u_r	◎	
(2)	RMSの不確かさ	B		$U_{s1} / 2$	◎	
(3)	AMSの測定器の不確かさ			$U_{s2} / 2$	◎	
(4)	非直線性		一様	$a_1 / \sqrt{3}$	◎	×
(5)	温度効果			$a_2 / \sqrt{3}$	◎	×
(6)	短期安定性			$a_3 / \sqrt{3}$	○	×
(7)	波頭長幅の変動			$a_4 / \sqrt{3}$	○	×
(8)	波形の振動			$a_5 / \sqrt{3}$	△	△
(9)	干渉妨害電圧			$a_6 / \sqrt{3}$	△	×
(10)	近接効果	$a_7 / \sqrt{3}$		△	×	
(11)	長期安定性	$a_8 / \sqrt{3}$		×	×	

(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(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。

インパルス電圧や直流電圧では、スケールファクタや拡張不確かさが極性によって異なる場合があるので、極性別または両極性の平均値として評価する必要がある。

高電圧比較校正により、RMSとAMSの読み取り比の平均値に対する実験標準偏差 s_r が、表5.2

の許容値内であることを確認する。両者の比の平均値は、スケールファクタまたは時間パラメータを校正するために使用される。なお、比の平均値の差もまた、表5.3の許容値内であることを確認する必要がある。

タイプAの不確かさが、直線性試験を含む高電圧比較校正によって得られるような場合には、例えば、タイプBの短期安定性や干渉妨害電圧等の影響が含まれるものと考えられるので、対象となるタイプBの寄与成分は省略できる。

参考 高電圧比較校正において、測定器のチャンネル間の感度が若干異なる場合があるため、予め十分に校正しておく必要がある。もし、 $n(\geq 10)$ 回の繰り返し測定が行われる場合、 $n/2$ 回毎に測定チャンネルを交換すれば、チャンネル間の若干の感度差は無視できる。

(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1 測定システムの構成要素の中で最も重要な分圧器等の変換装置のみの不確かさを評価するため、測定器に対する不確かさの分を差し引いて表示することがある。高電圧比較校正にこのような上位系の測定システムを使用し、RMSの拡張不確かさを算定する際は、測定器の不確かさを入れた値を、“RMSの拡張不確かさ”として用いることが必要である。

参考2 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。この際の参照標準は、一般にRMSと同等の性能を有するものが使用されるが、その拡張不確かさは、表5.1のRMSに要求される値をわずかに超える程度のものが使用されることもある。

(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($u_1 \sim u_8$)の間に付属書の(6)式および(7)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(定格電圧または最高試験電圧を最大電圧とし、最小試験電圧までの5段階の電圧)に対応するスケールファクタの変化幅 $|x_{max} - x_{min}|$ から求める。この場合、 $(x_{max} - x_m)$ 、または $(x_{min} - x_m)$ の値は $\pm 1\%$ 以内でなければならない。ここに、 x_{max} はスケールファクタの最大値、 x_{min} はスケールファクタの最小値、 x_m は平均曲線上のスケールファクタを表す。

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。この場合、スケールファクタの変化は1%以内でなければならない。

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	$-0.02 \sim 0$
油浸紙コンデンサ	$0.02 \sim 0.06$
オールフィルムコンデンサ	$-0.06 \sim -0.04$

(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。この場合、二つのスケールファクタの差異は1%以内でなければならない。

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、最短波頭長また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、 $\pm 30\%$ ($0.84\mu s \sim 1.56\mu s$)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 $0.84\mu s \sim 1.56\mu s$ 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、また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) 雷インパルス電圧波形の振動に起因する不確かさ(タイプB、一様分布、幅の半分 a_5)

雷インパルス電圧の波高値付近に、振動やオーバシュート(周波数が0.5MHz以上、または周期が $1\mu s$ 以下)があり、波高値を振動の平均曲線から求める場合に考慮される不確かさである。この際の幅の半分 a_5 は、振動周期やオーバシュートの大きさにもよるが、0~1%の間の値を考慮すれ

ば良いと思われる。

一方、雷インパルス電圧の波頭部に振動があると、波頭長や裁断までの時間の測定値の読み取りに影響する。このような場合、平均曲線から得られる波頭長を x_m 、振動波形から推定される最大(または最小)波頭長を x_{max} (または x_{min})として、幅の半分 a_5 を求めれば良い。

校正試験の場合は、このような不確かさが生じないよう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(定格電圧の50%以上の印加電圧)に対して、波頭また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畳した電圧波形^{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(また

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。両者の差は1%以内でなければならない。

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、近接効果が無視できる。

- ・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_g)

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。

測定システムのスケールファクタの変化は、継続的に行われる性能試験の間は、1%以内であることが要求されるが、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、不確かさを推定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試験による比較校正

200 kV級の全波雷インパルス電圧試験における比較校正結果の取りまとめ例を、表7.1に示す。波尾裁断波雷インパルス電圧試験及び開閉インパルス電圧試験に対しても、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 雷インパルス電圧試験による波高値の比較校正結果例

測定回数 n	RMS V_1 (kV)	AMS V_2 (kV)	電圧比 $\frac{V_2}{V_1}$	相対偏差 δ $\frac{V_2 - V_1}{V_1} \times 100$ (%)
1	199.9	199.2	0.9965	-0.35
2	199.4	198.9	0.9975	-0.25
3	199.4	198.6	0.9960	-0.40
4	199.4	199.0	0.9980	-0.20
5	199.2	199.4	1.0010	0.10
6	198.9	198.5	0.9980	-0.20
7	199.1	198.7	0.9980	-0.20
8	200.2	199.4	0.9960	-0.40
9	199.1	199.7	1.0030	0.30
10	199.1	199.0	0.9995	-0.05
平均値	199.37	199.04	0.9984	-0.165
実験標準偏差 s_r				0.23

表7.1から、波高値間の相対偏差 δ に対する平均値が得られる。

$$|\delta| = 0.165 (\%) \leq 1 (\%) \text{ (規格要求値)} \text{ (表5.3参照)}$$

同様に表7.1から、波高値間の相対偏差に対する実験標準偏差 s_r が得られる。

$$s_r = 0.23 (\%) < 1 (\%) \text{ (規格要求値)} \text{ (表5.2参照)}$$

なお、二つの電圧比からでも s_r を求めることができるが、同じ結果になる。

7.1.2 全波雷インパルス電圧試験システムにおける波高値の測定不確かさ

タイプAとタイプBの両方を含む各種寄与成分に対する不確かさの取りまとめ例を、表7.2に示す。なお、表6.1中の寄与成分のうち、一様分布の内の $a_5 \sim a_8$ は無視した。

(1) タイプAの相対標準不確かさ

表7.1に示した実験標準偏差 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。

$$\begin{aligned}
 u_r &= \frac{s_r}{\sqrt{n}} \\
 &= \frac{0.23}{\sqrt{10}} \\
 &= 0.073 \quad (\%)
 \end{aligned}$$

(2) タイプBの相対標準不確かさ

AタイプとBタイプの両方を含む各種寄与成分に対する標準不確かさの取りまとめ例を、表7.2に示す。

表7.2中の確率分布が一様分布の場合の相対標準不確かさをそれぞれ $u_{B1}, u_{B2}, u_{B3}, u_{B4}, u_{B5}$ 及

び u_{B6} と置くと、タイプBの相対標準不確かさ u_s は次式で求められる。

$$\begin{aligned}
 u_s &= \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + u_{B5}^2 + u_{B6}^2} \\
 &= \sqrt{\left(\frac{0.5}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.6}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.4}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.2}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{\sqrt{3}}\right)^2} \\
 &= 0.553 \quad (\%)
 \end{aligned}$$

表7.2 雷インパルス電圧(波高値)試験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 (<i>n</i> -1)	
波 高 値	(1)	繰り返し性	繰り返し測定 $\frac{s_r}{\sqrt{n}}$	0.073	正規	附属書 (4), (5)	1	1	0.073	9	
	(2)	RMSの 分圧器の 不確かさ	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)	
	(3)	AMSの 測定器の 不確かさ	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)	
	(4)	非直線性	実験値	0.4	一様	附属書 (6)	$\sqrt{3}$	1	0.231	200 (注)	
	(5)	温度効果	カタログ値	0.2	一様	附属書 (6)	$\sqrt{3}$	1	0.115	200 (注)	
	(6)	短期安定性	実験値	0.1	一様	附属書 (6)	$\sqrt{3}$	1	0.058	200 (注)	
	(7)	波頭長幅の 変動	実験値	0.5	一様	附属書 (6)	$\sqrt{3}$	1	0.289	200 (注)	
	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) 標準不確かさの標準不確かさを5%と仮定すると、自由度 $\approx 1/(2 \times 0.05^2) = 200$

(3) タイプAとタイプBの相対合成標準不確かさ

表7.2のAからB6までの寄与成分を合成した相対合成標準不確かさ u_c は次式で表される。

$$\begin{aligned}
 u_c &= \sqrt{u_r^2 + u_s^2} \\
 &= \sqrt{0.073^2 + 0.553^2} \\
 &= 0.56 \quad (\%)
 \end{aligned}$$

(4) 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、

$$\begin{aligned}
 V_{eff} &= \frac{u_c^4}{\frac{u_r^4}{V_r} + \frac{u_{B1}^4}{V_{B1}} + \frac{u_{B2}^4}{V_{B2}} + \frac{u_{B3}^4}{V_{B3}} + \frac{u_{B4}^4}{V_{B4}} + \frac{u_{B5}^4}{V_{B5}}} \\
 &= \frac{0.56^4}{\frac{0.073^4}{9} + \frac{0.25^4}{200} + \frac{0.3^4}{200} + \frac{0.231^4}{200} + \frac{0.115^4}{200} + \frac{0.058^4}{200} + \frac{0.289^4}{200}} \\
 &= 869
 \end{aligned}$$

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

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

これを電圧で表すと次のようになる。

$$\begin{aligned}
 U &= 1994.04 \times 0.012 \\
 &= 2.4 \quad (kV)
 \end{aligned}$$

以上の結果から、AMSにおける比較校正において、全波雷インパルス電圧試験における波高値間の相対偏差、実験標準偏差、ならびに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。

したがって、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)の逆数として求められる。

$$[\text{指定スケールファクタ}] = SF/0.9984 = 1.0016 \times SF$$

また、これを相対偏差 δ の値から補正する場合は、

$$[\text{指定スケールファクタ}] = SF/(1 + \delta) = SF/\{1 + (-0.165/100)\} = 1.0016 \times SF$$

として求める。

最後に、全波雷インパルス電圧試験における比較校正結果は、次のように表示される。

199.0 kV ± 2.4 kV (包含係数 $k=2$)
(スケールファクタは1.0016倍して補正した)

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

500kV級の波頭裁断雷インパルス電圧試験における比較校正結果の取りまとめ例を、表7.3に示す。基本的なまとめ方は、表7.1と同じである。

表7.3 波頭裁断雷インパルス電圧試験の比較校正結果例

測定回数 n	RMS V_1 (kV)	AMS V_2 (kV)	電圧比 $\frac{V_2}{V_1}$	相対偏差 δ $\frac{V_2 - V_1}{V_1} \times 100$ (%)
1	497.4	490.2	0.9855	-1.45
2	499.5	497.9	0.9968	-0.32
3	500.3	489.5	0.9784	-2.16
4	499.7	495.6	0.9918	-0.82
5	500.2	492.8	0.9852	-1.48
6	500.0	486.5	0.9730	-2.70
7	501.2	492.2	0.9820	-1.80
8	499.7	489.1	0.9788	-2.12
9	501.8	492.8	0.9821	-1.79
10	501.4	498.2	0.9936	-0.64
平均値	500.12	492.48	0.9847	-1.53
実験標準偏差 s_r				0.75

表7.3から、波高値間の相対偏差 δ に対する平均値が得られる。

$$|\delta| = 1.53 (\%) \leq 3 (\%) \quad (\text{表5.3参照})$$

同表より波高値間の相対偏差 δ に対する実験標準偏差も得られる。

$$s_r = 0.75 (\%) < 3 (\%) (\text{規格要求値}) \quad (\text{表5.2参照})$$

7.2.2 波頭裁断雷インパルス電圧試験システムにおける波高値の測定不確かさ

(1) タイプAの相対標準不確かさ

表7.3の実験標準偏差 s_r を用いて7.1.3 (a)と同様にタイプAの相対標準不確かさ u_r を求める。

$$\begin{aligned}
 u_r &= \frac{s_r}{\sqrt{n}} \\
 &= \frac{0.75}{\sqrt{10}} \\
 &= 0.24 \quad (\%)
 \end{aligned}$$

(2) タイプBの相対標準不確かさ

タイプBの相対標準不確かさ u_s は、確率分布B1からB6の相対標準不確かさ $u_{B1}, u_{B2}, u_{B3}, u_{B4}, u_{B5}$

及び u_{B6} から、表7.2の値を使って7.1.3 (b)と同様に求められる。

$$\begin{aligned}
 u_s &= \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + u_{B5}^2 + u_{B6}^2} \\
 &= 0.553 \quad (\%)
 \end{aligned}$$

(3) タイプAとタイプBの相対合成標準不確かさ

表6.1のAからB6までの寄与成分を合成した相対標準不確かさ u_c は次式で表される。なお、

$$\begin{aligned}
 u_c &= \sqrt{u_r^2 + u_s^2} \\
 &= \sqrt{0.24^2 + 0.55^2} \\
 &= 0.60 \quad (\%)
 \end{aligned}$$

(d) 相対拡張不確かさ U (AからB5まで)

相対拡張不確かさ U は、7.1.3(d)と同様、包含係数 $k=2$ として扱えるため、相対拡張不確かさ U は次式で表される。

$$\begin{aligned}
 U &= 2u_c = 1.20 \quad (\%) \\
 &\quad \downarrow \text{丸めて} \\
 U &= 1.2(\%) < 5 \quad (\%) \quad (\text{表5.1参照})
 \end{aligned}$$

以上の結果から、AMSにおける比較校正において、波頭裁断雷インパルス電圧試験における波高値間の相対偏差、実験標準偏差、ならびに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。

したがって、AMSのスケールファクタ(SF)は、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)の逆数として求められる。

$$[\text{指定スケールファクタ}] = \text{SF}/0.9847=1.0155 \times \text{SF}$$

最後に、波頭裁断雷インパルス電圧試験における比較校正結果は、次のように表示される。

500.1 kV ± 6.0 kV (包含係数 $k=2$)

(AMSで求めた値をRMS基準に戻すため、1.0155倍して補正した。)

7.3 直流・交流電圧の波高値

7.3.1 直流・交流電圧試験による比較校正

200 kV級の直流電圧試験または交流電圧試験における比較校正結果の取りまとめ例を、表7.4に示す。基本的なまとめ方は、表7.1や表7.2と同じである。

表7.4 直流・交流電圧試験の比較校正結果例

測定回数 n	RMS V_1 (kV)	AMS V_2 (kV)	電圧比 $\frac{V_2}{V_1}$	相対偏差 δ $\frac{V_2 - V_1}{V_1} \times 100$ (%)
1	199.1	198.2	0.9955	-0.45
2	198.9	198.5	0.9980	-0.20
3	197.7	197.1	0.9970	-0.30
4	198.2	197.6	0.9970	-0.30
5	198.7	197.9	0.9960	-0.40
6	198.4	197.5	0.9955	-0.45
7	198.7	198.0	0.9965	-0.35
8	198.8	197.8	0.9950	-0.50
9	198.8	197.7	0.9945	-0.55
10	198.1	197.3	0.9960	-0.40
平均値	198.54	197.76	0.9961	-0.39
実験標準偏差 s_r				0.105

表7.4から相対偏差の平均値 δ が得られる。

$$|\delta| = 0.39 (\%) \leq 1 (\%) \text{ (表5.3参照)}$$

同時に表7.4から電圧値間の相対偏差に対する実験標準偏差 s_r も得られる。

$$s_r = 0.105 (\%) < 1 (\%) \text{ (規格要求値)(表5.2参照)}$$

7.3.2 直流・交流電圧における電圧値の測定不確かさ

(1) タイプAの相対標準不確かさ

表7.4の実験標準偏差 s_r を用いて、7.1.2 (b)と同様にタイプAの相対標準不確かさ u_r を求める。

$$u_r = \frac{0.105}{\sqrt{10}} = 0.033 \quad (\%)$$

(2) タイプAとタイプBの相対合成標準不確かさ

各種寄与成分を合成した相対標準不確かさ u_c の取りまとめ例を表7.5に示す。表6.1中の寄与成分(6)～(11)は無視した。

表7.5 直流・交流電圧試験の相対合成標準不確かさの算出例

量	No	不確かさへの寄与成分	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 ($\nu-1$)	
電 圧 値	(1)	繰り返し性	繰り返し測定 $\frac{s_r}{\sqrt{n}}$	0.033	正規	附属書 (5)	1	1	0.033	9	
	(2)	分圧器の 不確かさ	校正証明書に 記載された 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	校正証明書に 記載された 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	実験値	0.35	一様	附属書 (6)	$\sqrt{3}$	1	0.202	200 ^(注)	
	(5)	温度効果	カタログ値	0.1	一様	附属書 (6)	$\sqrt{3}$	1	0.068	200 ^(注)	
	相対合成標準不確かさ u_c						附属書 (9), (12)	-	-	0.38	423
	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 $\approx 1/(2 \times 0.05^2) = 200$

合成相対標準不確かさ u_c は次式で表される。

$$u_c = \sqrt{0.033^2 + \left(\frac{0.6}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.2}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.35}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0.38 \quad (\%)$$

(3) 相対拡張不確かさ U

包含係数を求めるために7.1.2 d)と同様にして有効自由度 ν_{eff} を求めると、次のようになる

$$\nu_{eff} = \frac{0.38^4}{\frac{0.033^4}{9} + \frac{0.3^4}{200} + \frac{0.1^4}{200} + \frac{0.202^4}{200} + \frac{0.068^4}{200}}$$

$$= 421$$

附属書表A.1において自由度 $\nu (=n-1)$ は十分大きな値となり、包含係数 k は2として扱うことができるので、相対拡張不確かさ U は、次式で表される。

$$U = 2u_c = 0.76 \quad (\%)$$

↓丸めて

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

以上の結果から、AMSにおける比較校正において、直流・交流電圧試験における電圧値間の相対偏差、実験標準偏差ならびに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、時間軸で見れば定常値なので、これくらいの不確かさが相場の値として与えられる。

最後に直流・交流電圧試験における比較校正結果は次のように表示される。

198.5 kV ± 1.6 kV (包含係数 $k=2$)

(AMSで求めた値をRMS基準に戻すため、1.0039倍して補正した。)

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 雷インパルス電圧試験による波頭長の比較校正

雷インパルス電圧(全波)試験における比較校正結果の取りまとめ例を、表7.6に示す。波頭裁断雷インパルス電圧試験および開閉インパルス電圧試験に対しても、同様である。

表7.6 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 n	RMS T_1 (μs)	AMS T_2 (μs)	時間比 $\frac{T_2}{T_1}$	相対偏差 δ $\frac{T_2 - T_1}{T_1} \times 100$ (%)
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	1.2200	1.3031	1.0683	6.83
実験標準偏差 s_r				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り、裁断までの時間は短くなる傾向がある。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。

表 7.6 から、波頭長間の相対偏差 δ に対する平均値が得られる。

$$|\delta| = 6.83 (\%) \leq 10 (\%) \text{ (規格要求値)} \text{ (表5.3参照)}$$

同時に波頭長間の相対偏差に対する実験標準偏差 s_r も得られる。

$$s_r = 1.75 (\%) < 5 (\%) \text{ (規格要求値)} \text{ (表5.2参照)}$$

AMSに使用した時間軸感度は、両者の比の平均値を基に補正できる。すなわち、時間パラメータ(波頭長)の読み取り値から、指定スケールファクタを求めることができる。

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

7.4.2 雷インパルス電圧試験における波頭長の測定不確かさ

(1) タイプAの相対標準不確かさ

表7.6の実験標準偏差 s_r を用いて、7.1.2 (a)と同様にタイプAの相対標準不確かさ u_r を求める。

$$u_r = \frac{1.75}{\sqrt{10}}$$

$$= 0.55 \quad (\%)$$

(2) タイプAとタイプBの相対合成標準不確かさ

各種寄与成分を合成した相対標準不確かさ u_c の取りまとめ例を表7.7に示す。表7.1中の寄与成分で、(8) 以外の一様分布は無視した。

$$u_c = \sqrt{0.553^2 + \left(\frac{2.0}{2}\right)^2 + \left(\frac{1.5}{2}\right)^2 + \left(\frac{2.0}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

$$= 1.79 \quad (\%)$$

表7.7 雷インパルス電圧試験における波頭長の拡張不確かさの算出例

量	No	不確かさへの寄与成分	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 ($n-1$)	
時 間 比	(1)	繰り返し 性	繰り返し測定 $\frac{s_r}{\sqrt{n}}$	0.553	正 規	附属書 (5)	1	1	0.553	9	
	(2)	分圧器の 不確かさ	校正証明書に 記載された 拡張不確かさ	2.0	正 規	附属書 (11)	2	1	1.0	200 ^(注)	
	(3)	AMSの 測定器の 不確かさ	校正証明書に 記載された 拡張不確かさ	1.5	正 規	附属書 (11)	2	1	0.75	200 ^(注)	
	(4)	波形の 振動	実験値	2.0	一 様	附属書 (6)	$\sqrt{3}$	1	1.15	200 ^(注)	
	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 $k=2$		3.58	-

(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 $\approx 1/(2 \times 0.05^2) = 200$

(3) 相対拡張不確かさ

$$U = 2u_c = 3.58 \quad (\%)$$

↓丸めて

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

以上の結果から、AMSにおける比較校正において、雷インパルス電圧試験における波頭長間の

相対偏差、実験標準偏差ならびに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。

最後に雷インパルス電圧試験における波頭長の比較校正結果は、次のように表示される。

$$1.220 \mu s \pm 0.045 \mu s \quad (\text{包含係数 } k=2)$$

(AMSで求めた値をRMS基準に戻すため、0.9361倍して補正した。)

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、波頭長やさい断までの時間軸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側の印加電圧と、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7.8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取りまとめ例を示す。

表7.8 スケールファクタ算出時の比較校正結果例

測定回数 n	RMS V_1 (kV)	AMS v_2 (V)	電圧比(スケールファクタ) $\frac{V_1}{v_2}$
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	209.98	10.618	19 776
実験標準偏差 s_r			74.85

表 7.8 から、スケールファクタに対する実験標準偏差 s_r が得られる。

$$s_r = (74.85/19776) \times 100 = 0.38 (\%) < 1 (\%) \text{ (規格要求値) (表5.2参照)}$$

したがって得られたスケールファクタの値19 776は、AMSに使用可能であることが分かる。

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

タイプAの相対標準不確かさ u_r は、つぎのように求められる。

$$\begin{aligned}u_r &= \frac{0.38}{\sqrt{10}} \\ &= 0.12 \quad (\%) \end{aligned}$$

(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および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る。

附属書 不確かさの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くと、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)の全部また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 $y+U$ までの間に入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。

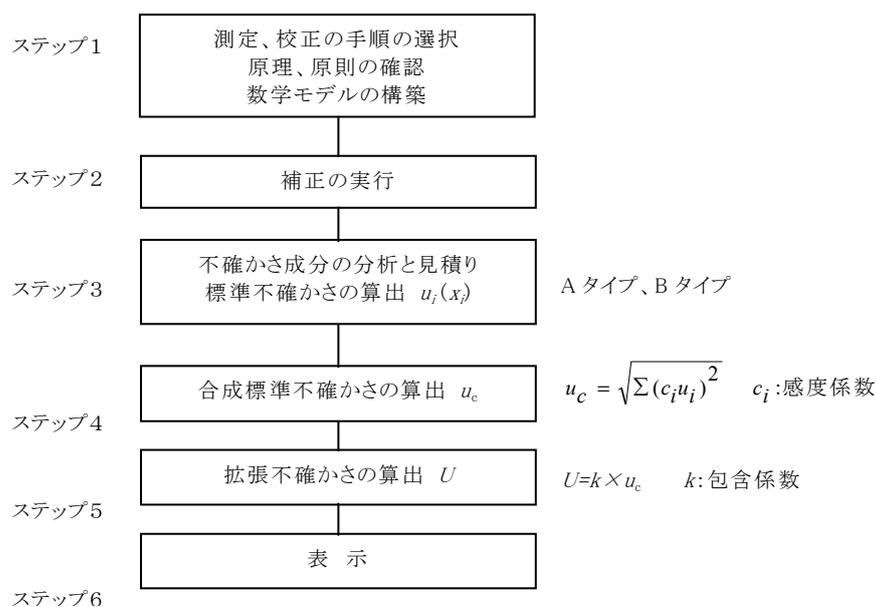


図 A.1 不確かさの求め方の手順

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。

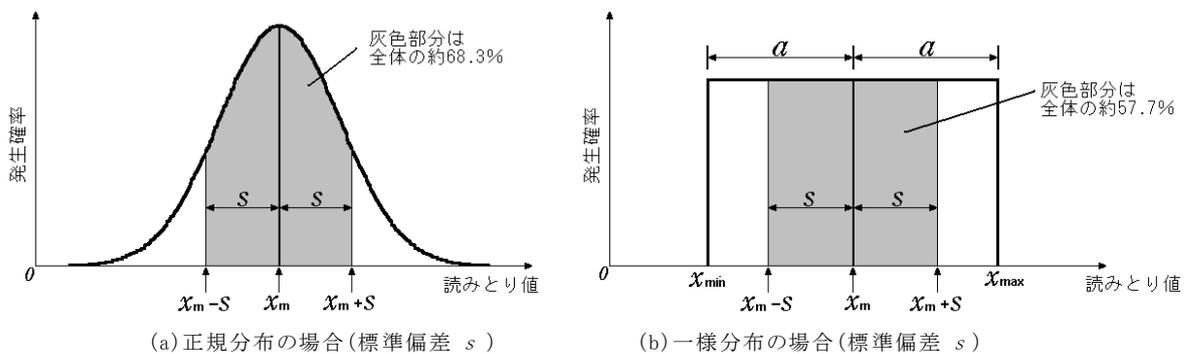
$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) \quad (5)$$

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、および(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)半幅と呼ぶことにする。

タイプBの評価をした不確かさの自由度 ν 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することができる。その様な言及がない場合には、推定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 $\frac{df}{dX_i}$ の $X_i = x_i$ における値として求めることができる。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)式は入力量の間に関係がない場合の式である。関係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 スチューデントの t 分布

(自由度 ν の関数として、特定の信頼の水準 p (%) に対する t の値)

$\nu \backslash p$	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

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

ここで、記号 \pm に続く数は拡張不確かさであり、自由度 $\nu=50$ 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 ν と特定の信頼水準 $p\%$ に対応する t の値を示す。

【JAB NOTE 3 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	谷口安彦	株式会社 東芝 電力システム社
委員	相原良典	元 財団法人 電力中央研究所
〃	青野一朗	三菱電機株式会社 系統変電システム製作所(2009年3月まで)
〃	日野悦弘	三菱電機株式会社 系統変電システム製作所(2009年4月から)
〃	石井 勝	東京大学
〃	鎌田 謙	元 株式会社 日立製作所
〃	戸谷俊二	社団法人 日本電機工業会(2009年3月まで)
〃	井上博史	社団法人 日本電機工業会(2009年4月から)
〃	西村誠介	日本工業大学
〃	野中重夫	元 財団法人 日本適合性認定協会
〃	原田達哉	日本工業大学 名誉教授(2009年3月まで)
〃	水越明男	株式会社 日本 AE パワーシステムズ
事務局	佐々波浩一	財団法人 日本適合性認定協会
技術協力	井波 潔	三菱電機株式会社 系統変電システム製作所
〃	西 師毅	元 財団法人 日本適合性認定協会
〃	高橋千春	財団法人 日本適合性認定協会

財団法人 日本適合性認定協会

〒141-0022 東京都品川区東五反田 1 丁目 22-1

五反田 ANビル 3F

Tel.03-3442-1217 Fax.03-5475-2780

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。