

不確かさの見積もりに関する留意点

1. 不確かさ要因の特定

不確かさ評価で一番難しいのは、不確かさ要因（不確かさの項目）の特定である。

不確かさ要因はいろいろあるが、抽出されたものすべてについて見積もりに加える必要はない。最終的な不確かさ（合成標準不確かさ）に与える影響が小さく無視できる要因*は切り捨て、影響が大きなものをピックアップすることが重要である。

*切り捨ての目安は、相関がない場合、一番大きな要因の1/10以下のものを選ぶとよい。一番大きな要因の1/10の場合、最終的な不確かさに与える影響は、一番大きな要因の0.5%未満である。不確かさは通常、多くとも2桁で報告すればよいことから、0.5%未満の影響は小さく無視できることになる。このため、要因の大小関係によっては、1/4程度のもので影響しないことがある。

*他方、ある器物の測定では1/10以下となる要因であっても、他の測定器物では1/10より大きくなる要因もあることから、一律に切り捨てるのではなく、常に要因の大小関係（合成標準不確かさへの寄与度）を考慮することが必要である。

全光束測定における主な要因例としては、

- ・標準器（標準電球など）の校正の不確かさ
- ・標準器（標準電球など）の安定性・再現性による不確かさ
- ・標準器（標準電球など）の経年変化による不確かさ
- ・測定装置の安定性・再現性による不確かさ
- ・測定装置とその校正方法による不確かさ（非直線性、波長ずれ等を含む）
- ・繰り返し測定のばらつきによる不確かさ
- ・測定方法や手順に起因する不確かさ
- ・データ処理方法（補正など）による不確かさ
- ・測定対象（被試験ランプ）の短期安定性による不確かさ
(測定対象の長期安定性・再現性は、通常評価しなくてよい)
- ・測定環境（周囲温度など）の影響による不確かさ
- ・測定環境（周囲温度など）の測定器の校正の不確かさ
などが挙げられる。

2. 不確かさ成分の評価（標準不確かさの算出）

2.1 タイプAの評価法

十分な数の N 個のデータを取って、それらのデータの統計解析を行い、ばらつきを算出する方法。これらのデータの実験標準偏差を、繰り返し測定回数 n の平方根で除した値（＝平均値の実験標準偏差）が、タイプAの評価法で求められた標準不確かさとなる。 N 個のデータの実験標準偏差を $s(x)$ 、 i 個目のデータを x_i 、データの平均値を \bar{x} とすると、実験標準偏差 $s(x)$ は下式から求められる。

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

また、個々のデータが n 回測定されたものの平均値であれば、その平均値の実験標準偏差 $s(\bar{x})$ は、下式から求められる。

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}}$$

〔注記〕 通常の試験においては 1 回限りの測定なので、標準不確かさ＝データの実験標準偏差 ($s(x)$) として扱える。ただし、プールされた実験標準偏差や繰り返し測定の結果から、平均値のバラツキを標準不確かさ ($s(\bar{x})$) として見積もる場合は、データの実験標準偏差 ($s(x)$) を \sqrt{n} で除して算出する。

なお、あらかじめ測定するデータの独立した観測数 N は、十分な数とすることが望ましい。少ない観測数から求められたタイプ A 評価の標準不確かさは、信頼性が十分ではなく、適切な評価とはいえない。ISO/IEC Guide 98-3:2008（測定における不確かさの表現のガイド）附属書 G.6.6 によれば、独立した観測数は概ね 10 以上あればよいことが示唆されている。

2.2 タイプ B の評価法

主として未知のかたより（その状態を再現するためには時間・費用・人手があまりにも掛かり過ぎて再現することが難しく、知ることが困難なかたより）を、確率分布を仮定してばらつきとして評価し、標準不確かさに変換する方法。確率分布の限界値（半幅の値）を下表の除数*で割った値が、タイプ B 評価の標準不確かさとなる。

ただし、校正証明書などで拡張不確かさ（包含係数 $k=2$ ）が分かっている時には正規分布を適用し、拡張不確かさを除数（包含係数）“2”で割った値が標準不確かさとなる。

また、モンテカルロシミュレーション（乱数は正規分布に基づいて発生）などにより標準不確かさを求める場合にも、確率分布を考慮することが大切である。モンテカルロシミュレーションにおける除数は、包含区間（包含確率）を踏まえることが必要である。

* 確率分布と除数

確率分布	除数
矩形分布（一様分布）	$\sqrt{3}$
三角分布	$\sqrt{6}$
U字分布	$\sqrt{2}$
正規分布	2（校正証明書の場合）

3. 感度係数

感度係数 (c_i) とは、入力量（単位）の変動量を出力量（単位）の変動量に換算するための係数である。測定のモデル式が一次式で直線性が確保されている場合は実験的に求めることもできるが、一般的に測定のモデル式は複雑なケースが多いことから、入力量の変動量に対する出力量の変動量を近似で求めることになる。この場合、入力量に対する測定のモデル式の「傾き」を求めれば出力量に変換できることから、測定のモデル式を各変数で偏微分することによって、接線の傾き、すなわち「感度係数」を算出することができる。

4. 合成標準不確かさの計算（二乗和の平方根で合成）

合成標準不確かさ u_c を求めるには、各標準不確かさを二乗し、足し合わせ、その正の平方根をとる。測定のモデル式を $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ とし、出力量 Y の推定値つまり測定の結果

を y ，入力量 X_1, X_2, \dots, X_N の推定値をそれぞれ x_1, x_2, \dots, x_N ，これらの推定値の標準不確かさをそれぞれ $u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_N)$ とすると，上記 3. の感度係数を含めて，測定結果 y の合成標準不確かさ $u_c(y)$ を数式で一般化して記述すると，以下のとおりとなる。

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)$$

5. 包含係数 k の決定

包含係数 ($k=2$) (約 95% の信頼水準) が一般的である。モンテカルロシミュレーションの場合，包含係数の代わりに包含区間 (包含確率) を用いるため，包含係数は不要となる。

6. 拡張不確かさ ($k=2$) の計算

合成標準不確かさに包含係数 ($k=2$) を乗じて，約 95% の信頼水準の拡張不確かさを求める。なお，正規分布が仮定できる場合，合成標準不確かさの信頼水準は約 68% である。

拡張不確かさの有効数字は，例えば，全光束測定の場合では，3桁目を切り上げて2桁に丸めることが多く，一般的にも前述のとおり2桁に丸めればよいとされている。

7. 不確かさの報告

不確かさの見積もり表 (Budget sheet: バジェットシート) を作成する。バジェットシートは，測定装置やシステムにより異なるため画一なもの無く，測定者はそれぞれ固有の計測システムに合わせて検討する必要があり，第三者が見ても分かり易いバジェットシートを作成することが大切である。

8. 不確かさの報告の悪い例

- 標準不確かさの算出で用いる除数の間違い

バジェットシートの確率分布の欄において，矩形分布と記載されているにも係わらず，除数の欄が“2”と記載されていた。

事務局から指摘をして“ $\sqrt{3}$ ”に修正してもらった。

- 標準光源のトレーサビリティの不整合

光束が少ない低ワットの LED 光源の不確かさ見積もりにも係わらず，標準光源に 200 W 全光束標準電球を使用していた。低ワットの LED 光源の測定には少ない光束に適した小さな積分球が使用され，一方，参照標準は 200 W あるいは 500 W と大きな光束に適した積分球が使用されているが，これら使い分けられた大小積分球間のトレーサビリティ等が提出されたバジェットからは確認できなかった。

事務局から指摘をして，再評価してもらった。

- 提出書類の不足

申請試験区分とバジェットシートが不一致で，試験能力を確認するためのバジェットシートが提出されておらず，技術能力を有していると確認できなかった。

事務局から指摘をして，対応するようにバジェットシートを提出してもらった。

- ・測定設備の概要が不明

提出されたバジェットシートでは、試験器（使用設備）の概要が分からず、総合判定ができなかった。

事務局から指摘をして、試験規格毎の試験器概要書を作成/提出してもらった。

- ・測色の標準が不適切

提出されたバジェットシートでは、ワーキングスタンダード（分光放射照度標準）を積分球の中で点灯させているのか測定の内容が確認できなかった。積分球の中で点灯させているのであれば、均一性などの補正が確認できなかった。

事務局から指摘をして、バジェットシート上で明確にもらった。

これら以外に想定される悪い例について、以下に紹介する。

- ・不確かさ要因の欠如

前述 1. で示した不確かさ要因の例のうち、要因として無視できないもの（又は無視してはいけないもの）がバジェットシートで見積もられていない場合は、技術能力を有していると確認できない。

例えば、標準器（標準電球など）の校正の不確かさは、試験所の測定に起因する要因ではなく、上位の JCSS 登録事業者による校正の曖昧さに起因する要因であり、その標準器（標準電球など）を試験所が使用する場合は不可避的に見積もらなければならないが、このような要因を見積もっていないと、事務局から指摘をして対応してもらうことになる。

- ・タイプ A 評価の不確かさの除数の誤り

観測数 N 個の 1 回限りの測定データにおける標準不確かさを見積もる場合に、実験標準偏差 ($s(x)$) を、さらに観測数 N の平方根 \sqrt{N} で除した場合は、不確かさの過小評価となる。

また、平均値のバラツキを標準不確かさ ($s(\bar{x})$) として見積もる場合に、実験標準偏差を繰り返し測定回数 n の平方根 \sqrt{n} で除していない場合は、不確かさの過大評価となる。

正しい統計処理をしていないこれらのケースでは、仮に合成標準不確かさの数値的に問題がなかったとしても、事務局から指摘をして対応してもらうことになる。

なお、モンテカルロシミュレーションを行った場合、このような問題は通常発生しない。

9. 不確かさについて参考となる資料

- ・不確かさのバジェットの参考例*1

*1 CIE S 025/E:2015 “Test Method for LED Lamps, LED Luminaires and LED Modules” の附属書に不確かさのバジェットの例が参考として複数添付されている。このうち、参考になると思われるバジェットを別紙 1 に紹介する。

- ・TS Z 0033:2012 “測定における不確かさの表現のガイド” *2

*2 上記の標準仕様書は JISC のホームページで閲覧可能である。

- ・光における不確かさの要因項目として、JCSS の技術的要求事項適用指針 登録に係る区分：光 JCT21400 NITE

- ・不確かさの入門ガイド ASG104 NITE

- CIE 198 Determination of Measurement Uncertainties in Photometry
- CIE 198 SP1 Determination of Measurement Uncertainties in Photometry - Supplement1:
Modules and Examples for the Determination of Measurement Uncertainties

以上

不確かさのバジレットの参考例

CIE S 025/E:2015 “Test Method for LED Lamps, LED Luminaires and LED Modules” の附属書に不確かさのバジレットの例が参考として複数添付されている。このうち、積分球と分光放射計を測定設備とした場合のバジレットが参考になると思われるので、国内の事情を考慮して修正を加えたバジレット参考例を以下に紹介する。

尚、参考例は CIE TC2-71 作業部会において原案作成されたものであり、当会においては内容のご照会に対応しかねます。

積分球による LED ランプの全光束測定における不確かさのバジレット例

要 因 X_i	標準不確かさに対する相対的な寄与 $u_{rel,i}(y)$
全光束標準電球の全光束の不確かさ（校正値の不確かさ）	0.7 %
標準電球の経時変化	0.3 %
標準電球点灯電圧による不確かさ	0.4 %
標準電球の安定性による不確かさ	0.2 %
分光放射計の直線性による不確かさ	0.8 %
分光放射計の波長精度による不確かさ（0.5 nm (k=2)）	0.4 %
分光放射計の迷光による不確かさ（2 700 K ~ 6 500 K）	1.0 %
分光放射計の再現性による不確かさ	0.1 %
自己吸収による不確かさ（補正後）	0.3 % ^b
ランプ近傍の吸収による不確かさ	0.3 %
積分球の不均等性による不確かさ（標準電球との配光特性相違）	0.9 % ^c , (1.8 %) ^d
積分球システムの再現性による不確かさ	0.3 %
積分球システムの安定性による不確かさ（校正間隔）	0.3 %
周囲温度（及び温度計の不確かさ）による不確かさ	0.3 %
試験ランプへの供給電圧（及び電圧計の不確かさ）による不確かさ	0.2 %
試験ランプの再現性（安定性を含む）	0.3 %
相対合成標準不確かさ	2.0 % ^c , (2.5 %) ^d
相対拡張不確かさ (k=2)	4.0 %^c, (5.1 %)^d

b 数値は、一般的に小形 LED ランプ測定に用いられる反射率 95%の 1.5m 積分球の値である。数値は、積分球の条件及び DUT (Device Under the Test) の大きさにより変化することがある。

c 広配光の光源に対する値。

d 狭配光の光源に対する値。無指向性の標準電球を使い補正を施さない場合。