

## A.9 不確かさ

### A.9.1 誤差と不確かさ

測定結果の信頼性を表現する伝統的な方法は、測定値と真値の差として定義される「測定誤差」の考え方に基いてきた。測定誤差はしばしば系統誤差(かたより)<sup>a</sup>と偶然誤差(ばらつき)に分類され、それぞれについて評価を行ったうえで、二乗和方式あるいは絶対値和方式で合成し、総合的な誤差が求められる。しかしその概念としてのわかり易さにもかかわらず、「真値」という不可知量が定義に含まれることによる原理的困難、偶然誤差と系統誤差の境界がしばしば判然としないこと(例えばランダムウォークのようにふるまう時間的ドリフトが測定系にある場合など)、系統誤差をどう合成するかについての考え方の混乱(絶対値を加えるか、二乗和の平方根をとるか)など、現実の評価にあたっての幾つかの困難が、測定誤差という指標には存在した。

測定結果の信頼性を表す方法が、技術分野や国によってまちまちであるという問題は、1970年代後半に国際度量衡委員会によって指摘され、これを契機に、統一的な評価・表現方法を定める努力が国際標準化機構(ISO)を中心に開始された。この活動の成果は、国際単位系(SI)を提唱した7国際機関によって最終的に合意され、これをまとめた指針“Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”が1993年に出版された[1], [2]。この指針はしばしばGUMと略称される。

GUMでは、伝統的に用いられてきた測定誤差や精度に替えて、「不確かさ」(uncertainty)という指標が導入された。不確かさは次のように定義されている。

測定の結果に付随した、合理的に測定量に結びつけられ得る値のばらつきを特徴づけるパラメータ (parameter, associated with the result of a measurement, that characterizes the dispersion of the values that could reasonably be attributed to the measurand)

「合理的に測定量に結びつけられ得る値」というのは、「真値の候補と考へても不合理でない値」と解釈できる。定義がこのように必ずしも直裁的とは言えないのは、測定誤差に対する「測定値と真値の差」という素朴な定義が、現実の誤差評価の場で混乱を招いたという反省のもとに、真値や誤差という不可知量を、定義の中で参照することを避けたためである。

現在、不確かさは、基礎物理定数の報告[3]や、計測標準の国際比較[4]などの他、測定結果のトレーサビリティの表明などでは、必須の情報として広く利用されるようになっている。しかし、一般の学術論文や技術文書の中での利用は、まだ部分的である。測定データが国や時間を越えた広い互換性を有するためには、データの信頼性が共通の方法で表現されていることが必要である。SIが広く普及したのと同様に、今後、測定結果の信頼性の報告や信頼区間の表示には、GUMに則った不確かさが広く用いられることが望まれている。

### A.9.2 不確かさの評価

不確かさ評価手順の概要は以下のように整理できる。

1. 測定量  $Y$  を入力量  $X_1, X_2, \dots$  (入力量とは、測定結果を導くために用いる量や、測定結果に影響を与えるその他の量) の関数として表した、以下の測定の数学的モデルを設定する。

$$Y = f(X_1, X_2, \dots)$$

<sup>a</sup>ここでは、補正可能な成分はすべて補正した、測定量に対する最良推定値を測定値と呼ぶ。従って、系統誤差とは補正後になお残る、値を知ることができない成分を意味する。

- それぞれの入力量  $X_i$  に対する推定値  $x_i$  を求め、次により測定結果を決定する（これは測定のステップに他ならない）。

$$y = f(x_1, x_2, \dots)$$

- 入力量の推定値  $x_i$  の標準不確かさ  $u(x_i)$  を、一連の観測値の統計的解析による方法（Aタイプの評価方法）、あるいはそれ以外の方法（Bタイプの評価方法）で求める。標準不確かさとは、標準偏差相当の大きさで表した不確かさを意味する。
- 次の不確かさの伝播則を利用して、測定結果の合成標準不確かさ  $u_c(y)$  を求める。

$$u_c^2(y) = \sum_i \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (\text{入力量間の相関がない場合})$$

入力量間に相関がある場合は、上式に相関係数を含む項が加わる。

- 合成標準不確かさ  $u_c(y)$ 、もしくはこれを定数（包含係数）倍した拡張不確かさにより、不確かさの大きさを表現する。拡張不確かさを用いる際には、信頼の区間が一定の信頼の水準に相当するような包含係数  $k$  を用い、 $k$  の大きさを併記する。

Aタイプの評価、及び不確かさの伝播則は、それぞれ、従来の誤差評価でも行われてきた統計解析と誤差伝播則とほぼ同等である。Bタイプの評価では、しばしば、利用可能な情報にもとづいて、入力量  $X_i$  の可能な範囲を表す確率分布がまず想定され（先験的分布と呼ばれる）、この分布の標準偏差として標準不確かさが計算される。従来の誤差評価において混乱することが多かった系統誤差の扱いが、Bタイプ評価の導入により整理されたといえる。<sup>b</sup>

以上からもわかるように、評価手順という点では、従来の考え方に基づく誤差解析が注意深く行われていれば、それを不確かさ評価に翻訳することは一般に困難ではないと考えられる。ただし、測定結果に曖昧さをもたらす要因は、不確かさ評価ではすべて考慮される点に特に注意しておきたい。目前の測定システムの不完全さに起因する成分だけでなく、測定量の定義自体の曖昧さ、定義が厳密に実現されないことによる効果、校正に利用した計測標準の不確かさなども、不確かさ評価では考慮されることになる。なお、不確かさ評価手順の詳細については、文献 [1], [2] を参照のこと。

## 参考文献

- [1] International Organization for Standardization (Geneva, Switzerland.), “ Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement ” (初版 1993、修正版 1995) .
- [2] 飯塚幸三監修：ISO 国際文書 ”計測における不確かさの表現のガイド” 日本規格協会 (1996) (文献 1 の翻訳) .
- [3] P. J. Mohr and B. N. Taylor, Rev. Mod. Phys. 77, 1 (2005) CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2002.
- [4] The BIPM key comparison database, <http://kcdb.bipm.org/>.

(榎原研正 / 産業技術総合研究所)

<sup>b</sup>ただし、Aタイプ、Bタイプの分類は、評価方法に対するものであって、不確かさの性質に対するものでないことに注意する。偶然的成分がAタイプの方法で、系統的成分がBタイプの方法で評価されるケースは少なくないが、必ずそうであるということではない。