

測定の不確かさ評価について

—1. 不確かさとは何か—

城野克広*

はじめに

今回から4回に渡り、測定の不確かさについて解説して参ります。第1回は「不確かさとは何か」、第2回と第3回では「不確かさの算出手順」、第4回で「不確かさの活用」についてお話していきます。初回は、まず「不確かさとは何か」、不確かさとはどこから湧いてきたのか、どういうものなのかについて触れていきましょう。

1.1 範囲・確率・不確かさ

私たちの生活の中にはさまざまな数字であふれています。例えば、私の机の上にあるペットボトルのラベルには「100 ml 当たりエネルギー 38 kcal」とあります。ノートパソコンのアダプタには、「INPUT: 100-240 V, 85-115 VA, 50-60 Hz」とプリントされています。私のデジタル腕時計は、現在、午後6時33分を示しています。これらの数字がどれほど、信頼できるか考えたことがありますでしょうか？

実は、飲料のカロリー表示の誤差の許容範囲は健康増進法に基づく栄養表示基準により、 $-20\sim+20\%$ と定められています。パソコンのアダプタには100-240 Vとありましたが、日本の電圧の値は電気事業法によって、95~107 Vの間に収まっていればよいそうですから、場合によっては、電圧は100 Vを切っているかも知れません。

あらゆる数字というものには、「ずれ」とか「ばらつき」というものが必ずあります。日ごろ、われわれがそれらを気にせずにいられるのは、法律や規制あるいは良識といったものに支えられているからです。これは基本的には良いことです。

その一方で、いつも法律が我々を助けてくれるわけではありません。例えば、私の時計は実は7分ほど早まっていま

す。上の文章を書いた時点では、本当はまだ6時26分だったのです。油断大敵です。

読者の皆様には、実験結果にせよ、数値計算にせよ、仕事上なんらかの数字を扱っている方がほとんどかと思えます。私の時計がどれほどずれようが、世の中に影響を与えることはありませんが、皆様のお仕事で取り扱われる数字にはもっと重要な価値があるでしょう。

ある程度の型どおり試験であれば、試験方法が標準化され、そのばらつきの具合も専門家の中では共有されていることと思えます。しかし、非専門家の方とコミュニケーションする場合にも、それはきちんと共有される形になっているでしょうか。また、先端的な試験や数値計算では、専門家の間ですら共通感覚がないという状況かも知れません。科学データの社会的重要性が叫ばれ、様々な新技術が日々生まれてくる昨今にあって、値の信頼性を定量的に考えてみることは、良い習慣と言えるのではないのでしょうか。

ただ、「どのように？」というのは、厄介な課題です。数字の信頼性は、上のカロリー表示や電圧のように、ある「範囲」が与えられて、ぼやかされることが多いと思えます。しかし、そのようなぼやかしが入ったとしても、なお、「絶対に」とか「間違いなく」という言い方で定量化するのは難しいように思われます。「絶対に次のレースはこの馬かこの馬がきます」ということだけでも分かれば、どんなに素敵なことでしょうか。一方で、「間違いなく、君を幸せにするかあるいは幸せにはしない」とプロポーズして、結婚してくれる人が居るでしょうか。実用的な問題では、ぼやかしを入れたとしても、「100%」の情報というのは詐欺的か、さもなければ無意味と言って良いように思います。

そこで確率の力を借りることになります。明日の降水確率は70%だとか、イチローの打率が3割だとか。こういう言い方にはあいまいさは残ります。けれども、むしろあいまいさが実用性を生んでいると考えるべきでしょう。この範囲

* 国立研究開発法人産業技術総合研究所 物質計測標準研究部門；主任研究員(〒305-8565 つくば市東1-1-1) Things about Measurement Uncertainty—1. What is Uncertainty?—; Katsuhiro Shirono (National Institute of Advanced Science and Technology (AIST), Tsukuba)
Keywords: *uncertainty, guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*
2014年3月5日受理[doi:10.2320/materia.54.286]

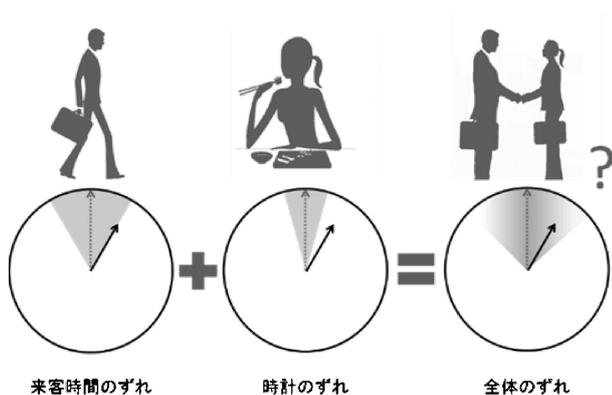


図1・1 測定の信頼性は「範囲」と「確率」で表されてきた。しかし、2つの「範囲」と「確率」を組み合わせるの難しい。

によるぼやかすと、確率によるあいまいさは、むしろ我々にとっての武器になるわけです。

しかし、ぼやかして、あいまいにすれば、なんでもいいというものでもありません。一つの例を考えてみましょう。

弊社にとりまして、重要なお客様である山田様が来社されます。12時50分から13時10分の間に受付にいらっしゃる確率が95%とのこと。お待たせするわけにはいきません。私の時計のずれが、5分以内である確率は95%です。この時計で何時何分になるまでに昼ご飯を食べ終え、受付に行けば、95%以上の確率で山田様をお待たせさせずに済むでしょうか？(図1・1)

上の問題は、答えのある問題に思えるかも知れません。しかし、厳密には計算不可能です。ぼやかしたあいまいな情報が複数あるとき(上の場合は、山田様の到着時刻と時計のずれの二種類)、それらの両方が関係する事象についての情報を導き出すことは実は困難な問題なのです。

なんとか答えを出すためには、何らかの工夫が必要です。実際のところ、上のような問題に対する議論は、古くから様々な局面でされてきました。それらの試みは、実務的な問題解決に役立ってきたと言えましょう。しかし、数学的に厳密な答えのないものに、工夫して答えを与えるということは、その度に違うアプローチを許すということになります。

これが良いことか、悪いことかは、簡単に言うことはできません。山田様をお待たせさせないための精度管理と、最先端の金属の物性測定における精度管理が、同じ方法論に基づく必要性は特段ないからです。

一方、70年代後半に計測科学の専門家たちの間で、数字の信頼性を表すのに、統一的方法があった方がよいというニーズが出てきます。計測科学において、そのようなニーズがあるのは特段驚くには値しませんが、それが一般に広まりつつあるという今の状況は、不思議な気がしないでもありません。

ともあれ、そのニーズに応えようというのが、測定の不確かさです。ここまでお話ししてきたことから分かるように、もしも、測定の不確かさに厳密さを求めている方がいらっしゃ

れば、それは期待過剰です。むしろ測定の不確かさというのは、ある種のお約束だと言ってよいでしょう。そのお約束について、少しずつ噛み砕いて説明していきたいと思います。

1・2 ル・システム・アンテルナショナル・デュニテ(SI)

この雑誌は学会報ですので、SIについて聞いたことがないという方は珍しいかも知れません。SIというのは、フランス語である *Le Systeme International d'Unites*(ル・システム・アンテルナショナル・デュニテ)の略です。英語では *The international system of units*, 日本語では国際単位系となります。SIというのは単位を定めるルールです。

一方、我々の生活の中には、色々な単位が混在しています。これは同じものを表すのに、たくさんの言い方があるということです。例えば、我々は部屋を選ぶときに、部屋が何畳かを確認します。しかし、考えてみると、外国人には不親切な話。部屋が6畳だとか8畳だとか言われても、ピンと来ないでしょう。ちなみに6畳はおよそ9.9 m²です。面積を表すには、他にも坪とか、アールとか、東京ドーム〇個分とか様々な単位が使用されていることは、疑いありません。

重要なのは、基本的にこの混在は、我々の生活を便利にしてくれているということです。「5馬身の差」の方が12 m差というよりも追い込みの足りなさがイメージしやすいですし、料理のレシピでは、オリーブオイル小さじ一杯と書いてある方が、5 mlと言われるよりも適切に思えます。女性には2 gのダイヤモンドよりも、10カラットのダイヤモンドの方が喜ばれる…かどうかは読者の皆様のご判断にお任せします[†]。いずれにせよ、イメージの湧きやすい単位、慣れた単位というものは実際にありますし、適切に定められて、正しく使用される限りは良いことのように思えます。

そこで、悪名高い一つの例をご紹介します。居酒屋で「生ビール中ジョッキで」と言ったとき、中ジョッキは容積の単位な気がします。しかし、中ジョッキ=〇〇ミリリットルという決まりは特にありません。大抵は435ミリリットルらしいですが、昔の中ジョッキはもっと大きかったという話も聞いたことがあります。なんにせよ、中ジョッキという単位は、居酒屋の良識あるいは悪意によって定められているふわふわした単位なのです。このようなことを避けるために、商取引においては同じものを表すのに、同じ単位を使った方がよいというのが、単位系の統一の原点です。

最近では単位の不統一は、商取引よりも、安心・安全に関わる問題として、取り上げられることが多いかも知れません。色々な例がありますが、ギムリー・グライダーと呼ばれる旅客機の燃料切れも有名なもののひとつです。1983年7月23日にモントリオールを出発したエア・カナダ143便が上空約12000 mで燃料切れを起こしました。幸い、カナダ空軍ギムリー基地の滑走路に着陸することができ、着陸後の脱出の過程で数名のけが人が出るにとどまりました。この燃料

[†] それぞれ、1馬身は約2.4 m、小さじ一杯は5 ml、1カラットは0.2 gです。ちなみに、東京ドームの面積は約46755 m²です。

切れが起きた原因のひとつは、給油の際の容積の計算において、「リットル→キログラム」による変換定数を使わなければならないところで、誤って「リットル→ポンド」の変換定数を用いてしまったことです。もちろん、どういう単位系を使おうが、計算間違いは起こりえます。この意味では、計算間違いに気が付かないチェック体制がこの事象の本質です。しかし、もしも世の中の質量の単位にキログラムしかなければ(あるいはポンドしかなければ)、この燃料切れはなかったとも言えるのではないのでしょうか。

SI というのは、例えば「キログラム(kg)を質量の単位として決めてしましましょう」という単位を表すシステムです。質量の他に、時間の秒(s)、長さのメートル(m)、電流のアンペア(A)、温度のケルビン(K)、物質量のモル(mol)、光度のカンデラ(cd)と7つの単位を定めています。この7つをSI基本単位と言います(図1・2)。

では、面積の単位は？ 面積は「長さ」と「長さ」の掛け算ですから、 $m \times m = m^2$ と表すことができます。それでは、圧力の単位は？ 実は圧力の単位パスカル(Pa)は、 $kg \cdot s^{-2} \cdot m^{-1}$ と意味合いとしては同じです。よく見ると、上に挙げた単位の組み合わせで表せていると分かります。ただ、 $kg \cdot s^{-2} \cdot m^{-1}$ と書くのがわずらわしいので、Paという単位も使って良いとなっています。このようにSI基本単位の組み合わせで表される単位をSI組立単位と呼びます。

これと不確かさはどういう関係にあるのでしょうか。SIではこの単位を使いましょうというだけでなく、当然、単位の定義も定めています。例えば、1メートルの定義は、「メートルは、1秒の299792458分の1の時間に光が真空中を伝わる行程の長さである」と与えられています。

とはいえ、自宅に新しい冷蔵庫を買うのに、キッチンを真空にして、光学系を組み立てて、精密なストップウォッチを購入し、冷蔵庫が入る隙間を光路の違いから計算するということをする人はどこにもいないでしょう。メジャーで冷蔵庫を入れる隙間を測れば、それで結構な話です。この程度のごまかしをしたとしても、いくらか余裕をもって小さい冷蔵庫を選べば良いのです。このように、何かを測るときには多少

のごまかしが含まれるものと言えます。

測定の不確かさとは何かと考えたときに、このごまかし、良い言い方をすると「近似」が、どの程度かということを表すものであろうと考える人は多いだろうと思います。それはもちろん正しい理解です。そのように考えますと、測定が何の近似になっているかという起点がないと、不確かさの評価はできないということになります。結局、不確かさ評価は、SIトレーサビリティがある測定についてのみ行うことができるということです。SIトレーサビリティというのは、ある測定の結果が、7つのSI基本単位の定義から始まって、そこから近似を重ねてたどり着いたものであるということを示すことができるということです。

ひとつ、SIのルールを紹介しておきます。それは数字と単位の間には半角のスペースを入れるということです。つまり「1m」ではなく、「1 m」とします。これは研究者にも、意外と普及し切っていないルールかと思えます。論文などを書くときにはご注意ください。

1・3 Guide to the expression of uncertainty in measurement (ガム)

SIを維持し、科学技術の進歩に合わせて改定していくことは重要な仕事であり、これは国際度量衡委員会(CIPM: Comité International des Poids et Mesures)という組織が担っています。同じく測定の不確かさというものを真剣に考えようという提案をしたのも、このCIPMです。時さかのぼること、1979年、各国の計量関連機関に測定の信頼性の表記についてアンケートが配布され、その結果を受けて1980年にはCIPMの承認の下に、ごくシンプルな指針が作られました。(図1・3)

計測科学の専門家たちには、自分達が正しい測定を実施できているということを示し、客観的に証明したいという欲求があります。一つの客観的な方法は、他の研究室と同じものを測定して値を比較することでしょう。実際のところ、比較試験と呼ばれるこの種の試験は、様々な分野で長らく行われてきました。その一方、どれが本当に正しいかというのは、表立

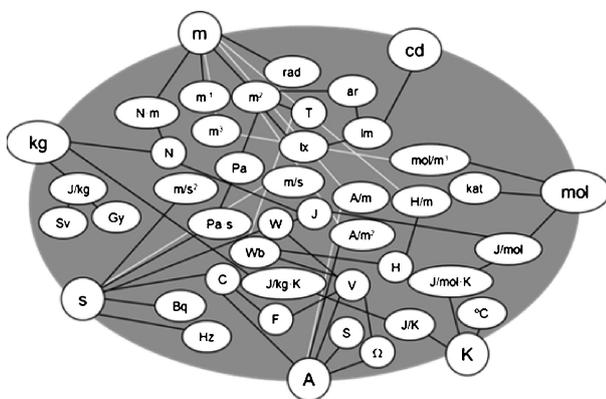


図1・2 SI(国際単位系)の関係性。7つの基本単位(m, kg, s, A, K, mol, cd)と組立単位の例。楕円で囲まれたものが単位で、線で結ばれているもの同士は関連がある。(描画上関連しない単位の楕円を通過してしまうものは白線とした。)

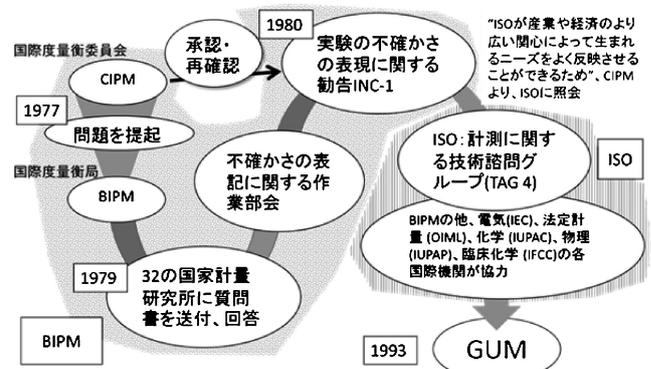


図1・3 どのような経緯でGUMが生まれたか。7つの機関がISOでの作成に関与した。さらにもう一機関もその後加わって、GUMの補足・改訂の作業を進めている。

って行われてきませんでした。

しかし、1980年代、国境を越えていくヒト・モノ・カネが年々増加していく中で、ようやく何を基準にするかという議論が高まってきました。商取引において、一方が自らに都合のよい基準を押し付けるということが、実際の問題として心配されるようになってきたのです。どちらが正しそうかという議論をするためには、測定値の信頼性を定量的に表記することが不可欠です。こうして、測定の不確かさは計測科学の研究者たちの間で導入の機運が高まっていったのです。

ただし、比較試験の統計処理のためだけではなく、様々な製品の認証や、安全性の評価、試験所の力量の証明などに、この不確かさが役に立つと考える人もいました。この声を受けて、80年以降の測定の不確かさの議論の主演はCIPMからISO(International Organization for Standardization; 国際標準化機構)に移ることになります。ISOは様々な工業製品や工業向けの試験の国際的なルールを作っている団体です。

ISOでの議論を経て1993年にGuide to the expression of uncertainty in measurement(測定のための不確かさの表現のガイド)⁽¹⁾が出版されます。この文書は国際的な場でも、略してGUM(ガム)と呼ばれています。英語版についてはCIPMの事務局であるBIPM(Bureau International des Poids et Mesures; 国際度量衡局)のホームページから無料で閲覧することができます。日本語版についてはJIS/TS Z 0033⁽²⁾として2012年に発行され、結構な値段(2014年2月現在11400円(税抜き))ではありますが、日本規格協会から購入することができます。GUMはこれを読んだら不確かさが評価できるというのではなく、専門家の解説が必要なのが残念なところです。この解説がGUMを理解できる手引きになるように頑張っていきたいと思います。

1.4 測定の結果に付随した、合理的に測定対象量に結び付けられ得る値のばらつきを特徴付けるパラメータ

なんだ？ この小見出しは、と思った方もいるでしょう。これはGUMにおける不確かさの定義です。正直、この表現が定義として分かりやすいものとはとても思えません。以下3つのクイズを通して、この説明をしたいと思います。

第1問 鈴木さんは、毎日朝晩体重を測定しております。ある3日間の朝晩の体重の最大値と最小の差が2.0 kgでした。同一の期間に書籍30冊の質量をその体重計で量ると、最大値と最小値の差はわずかに0.1 kg。こんなにもばらつきが違うのでは、信頼性の評価ができないような気がします。この体重計は買い換えた方がよいのでしょうか？

第2問 佐藤さんは、ロシアに旅行に行く際に、友人から、「直径5 cmのマトリョーシカ」を買ってきて欲しいと頼まれました。さて、現地のお土産屋で、マトリョーシカを見ると一番外側の一番膨らんだところの直径が5 cmの小型のものもありますし、一番内側の一番くびれたところの直径

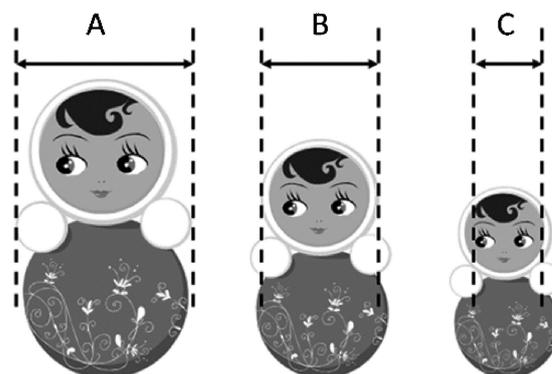


図1-4 マトリョーシカは人形の中に人形が入れ子の構造で何重にも入っているロシアのおもちゃ。上は三重の例。A, B, Cのどれも「マトリョーシカの直径」ではある。この知りたいものの「分からなさ」は不確かさに反映される。

が5 cmという大型のものもあります。真ん中のものの大体の直径が5 cmくらいというようなものもあります(図1-4参照)。さて、どれを買って帰ったら、ご友人に喜ばれるでしょうか？

第3問 山本さんの退社時間は5時が定時です。職場の時計は4時50分を指しています。この時計は、上司が新しいものに交換したばかり。上司が言うには、「この時計は10分ずれているから、気を付けてとのこと。」直せばいいのに…。さて、山本さんはもう帰ってもいいのでしょうか？ もうちょっと働かないといけませんか？

まず、**第1問**。買い換えた方がよいと思った方はいらっしゃいますでしょうか？ 私には、この体重計を買い換えても問題の解決にはならないように思えます。ここで重要なのは、同じ体重計を使っても、ばらつきは異なるということです。

さて、ここでは「測定の結果に付随した」について考えてみましょう。「測定の機器に付随した」とは書いていません。つまり、「この測定器の不確かさは…」という言い回しは厳密には間違いです。その理由は、上の体重計の例から明らかでしょう。不確かさは数字に付くものであり、機械やシステムにつくものではないということがポイントです。

次に、**第2問**。これは少々難しい問題です。難しい問題だと思っていただけたなら、私の思うツボです。マトリョーシカの例は極端ですが、詰まるところ、一定の「分からなさ」は実用的な測定対象の定義には残ってしまうのです。

不確かさには、その「分からなさ」を反映して良いことになっています。逆に言えば、唯一つの正解があるように測定対象の量を定義する必要はなく、実用上十分な定義をすればよいのです†。

† ただし、測定対象の量はなるべく正確に決めるべきと申しておきたいです。ある特定の金属片の持つ熱膨張特性を調べることと、ある金属固有の性質として熱膨張特性を知ろうとするには、かなりの差があります。何を知らたいのかをなるべく詳しく定め、どうしても残る「分からなさ」のみ不確かさに入れるのが、筋のよい手順と言えます。

ただ一方で、さきほどは不確かさが近似の度合いを示す指標であると述べました。考えるほどに、「定義が不明瞭であること」と「測定が不完全であること」は質の違う問題に思えます。

どうしたものかというところですが、不確かさの世界では、思い切ってこれらを区別しないことにしたのです。これは、不確かさの最も重要なお約束です。すなわち、「合理的に測定対象量に結び付けられ得る値の」にはその2つの意味が込められているのです。

最後に第3問。これは「ばらつきを特徴付けるパラメータ」と関係しています。山本さんは時計が早まっているのか、遅れているのか知りません。ということは、現在の時刻は5時であるか、さもなくば4時40分であるわけです。これは時刻が不確かだということになります。山本さんが、確実に定められたお給料をもらいたいと願っているなら、あと20分仕事をした方がよさそうです。このように、ずれの方向が分からない場合、これは不確かさの考慮の範ちゅうになります。一方で、もし時計が10分早まっていることを知っているならば、当然、時刻は4時40分で、不確かさはゼロです。つまり不確かさを考えるに及ばないわけです。

バカバカしいことのようにも思えますが、意外にも、測定器がずれているのは知っているし、ずれの程度も分かっているけれども、それを修正はしないという事例は多くありま

す。残念ながら、現在の不確かさの枠組みでは、そういう場合の精度の表記はできません。どちらにずれているか分かっているような要素はすべて修正し、最後に残ったばらつきだけ議論しましょうというのが不確かさのルールなのです。

今回は不確かさの概念のお話だけでしたが、次回から不確かさの算出手順について具体的に解説して参ります。

(つづく)

文 献

- (1) ISO/IEC Guide98-3: 2008, Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM: 1995).
- (2) JIS TS Z 0033: 2012, 測定における不確かさの表現のガイド。



城野克広

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
2007年 東京大学大学院新領域創成科学研究科博士
課程修了
2008年4月 産業技術総合研究所計測標準研究部門
研究員
2013年3月 同 主任研究員
2015年4月 現職
専門分野：不確かさの評価の技術開発・比較試験の統
計処理
◎活動内容などは下記 Web サイトをご覧ください。
(<https://staff.aist.go.jp/k.shirono/>)
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★