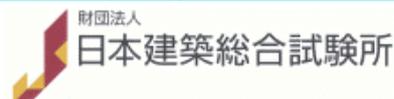


# 測定の不確かさの意味



測定の不確かさは試験結果の信頼性の指標です。

## 測定の不確かさとは？

測定の不確かさは、測定された値のあいまいさの定量的な表現です。そのあいまいさは測定データのばらつきや、測定時に利用したさまざまな情報自体の不確かさから生じます。逆説的ですが、測定された値のあいまいさを示すことで、測定された値の信頼できる範囲が明確になります。同じ試験体について何度か繰り返して測定を行なうと、少しずつ異なった値が表れるでしょう。測定された値はその内の一つのサンプル値です。また測定機器の補正しきれないかたよりも測定の不確かさのひとつの要因です。測定値がどれほど信頼できるかということを示すには、ばらつきの範囲を表す指標、つまり測定の不確かさが必要です。

## 測定の不確かさがなぜ必要か？

測定値を基にして何らかの判断が必要な場合、測定の不確かさの表記が必要になります。例えば人の健康や安全に関係する試験で、その仕様に上限値があって、試験しようとする製品の性能がその上限値を超えてはならない場合を考えます。BSE の検査やアスベストの含有量の測定などをイメージすればよく分かるでしょう。測定結果が上限値ぎりぎりの場合、もう一度測定を試みるということはよく行なわれます。それは、測定値や測定の対象物にばらつきがあることを知っているからです。測定値のばらつきがどの程度であるかが分かれば判断は容易になります。ばらつきの範囲を含めて判断ができるからです。

## 測定のばらつきはなぜ生じるか？

測定結果は元々ばらつきをもっています。ばらつきの原因はいろいろありますが、温度の短時間内の変動や湿度や大気圧のような測定環境の変動、または測定者の技量のような偶然効果が考えられます。他にも測定装置の精度や人が値を読むときのかたよりのような系統効果があります。これらの効果によって測定値にはばらつきが生じます。

ある測定値は何度測っても同じで、ばらつきが出ないということもあります。それは測定の厳密さがそれ程必要とされない測定で、使用した測定器の精度ではばらつきが表れないということに過ぎません。さらに厳密な測定を行なうと、測定の元々もつ性質のために、測定値がばらつくことが分かるでしょう。

## 国際ルール

物品やサービスの自由流通を目的とした WTO/TBT 協定（貿易の技術的障害に関する協定）では、国際的に通用する一連の適合性評価を国際ルールとして採用し、各国もこれに合意しています。ISO9001 は一般企業の品質マネジメントシステムの要求事項ですが、同様に試験所にも試験の品質を管理するための要求が ISO/IEC 17025 として定められています。そこには測定に用いる機器の管理や試験のトレーニングなどの規定があり、測定の不確かさは ISO/IEC 17025 の中で評価し、測定結果に付随して報告書に記載することが要求されます。

### 【関連規格】

- 1) JIS Q 17025:2005 (ISO/IEC 17025) 「試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項」
- 2) GUM: 計測における不確かさの表現のガイド、日本規格協会

# 測定の不確かさ評価の方法

## GUMの方法

測定の不確かさを評価する方法については、ISO(国際標準化機構)からそのためのガイドが出されており、日本語に翻訳されています。そのガイドは GUM と呼ばれ、さまざまな計測の分野で採用されています。GUM による測定の不確かさ評価の手順を以下に示します。

## STEP1 測定量の定義

測定の対象を測定量 measurand と呼びます。測定の不確かさ評価は測定量を数式で表すことから始まります。測定量は一般にいくつかの成分で表されます。つまり、 $y=f(x_1, x_2, \dots, x_i)$ 。ここで、 $y$  は測定量の値、 $x_i$  は成分の値です。測定量の定義の例を次に示します。前者の例では  $F$  は測定量、 $P$  と  $A$  は成分です。

- ・コンクリートの圧縮強度;  $F=P/A$  ( $F$  は圧縮強度  $N/mm^2$ ,  $P$  は力  $N$ ,  $A$  は試験体の断面積  $mm^2$ )
- ・建材の密度;  $\rho=M/V$  ( $\rho$  は密度  $kg/m^3$ ,  $M$  は質量  $kg$ ,  $V$  は体積  $m^3$ )

## STEP2 成分の標準不確かさの推定

測定量の定義に示された個々の成分のばらつきの大きさを推定します。成分もいくつかの要因からなります。例えば、繰返し観察から得られるばらつき、温度の変動の影響によるばらつき、測定機器のもつ誤差のばらつき等です。繰返し観察からばらつきの大きさを評価する方法をタイプ A 評価と呼び、それ以外の方法で評価する方法をタイプ B 評価と呼びます。それぞれの要因のばらつきの大きさは標準偏差または標準偏差に相当する量で表され、それらの自乗和平方根をその成分の標準不確かさと呼びます。

## STEP3 標準不確かさの合成

各成分の標準不確かさを合成して測定量の標準不確かさを求めます。合成する方法は自乗和平方根ですが、成分と測定量とは次元が異なりますので、次の不確かさの伝播式によってこれらを合成します。

$$u_c(y) = \sqrt{\sum \{c_i \cdot u(x_i)\}^2} = \sqrt{\sum \left\{ \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot u(x_i) \right\}^2}$$

ここで、 $u_c(y)$  は合成標準不確かさ、 $c_i$  は成分  $i$  の感度係数と呼ばれます。感度係数はある成分に対する測定量の偏微分で表され、その成分がわずかに変化するときの測定値の変化の割合を意味しています。

## STEP4 拡張不確かさの計算

合成標準不確かさは測定値のばらつきの推定値で、そのばらつきの分布の標準偏差を意味しますが、より高い信頼の水準でばらつきを表すために、合成標準不確かさに包含係数  $k$  を掛けた拡張不確かさ  $U=k \times u_c(y)$  で測定の不確かさを求めます。包含係数の値は信頼の水準に応じて  $k=2 \sim 3$  の範囲で選択されます。

## STEP5 測定の不確かさの表現

測定結果は、測定値と拡張不確かさで表されます。例えば、密度  $\rho = 1.23 kg/m^3 \pm 0.12 kg/m^3 (k=2)$ 。± に続く数字が拡張不確かさです。包含係数  $k=2$  の値は多くの場合、95% 信頼水準に相当します。

## 測定の不確かさ評価の事例

建材(ボード)の密度試験を例に、GUMの方法に従って、測定の不確かさを求める手順を以下に示します。ここでは、単純な例だけを取り上げています。

### STEP1 測定量の定義

ボードの密度は、一般に、 $\rho = M/V$ の式で表されます。ここで、 $\rho$ は密度  $\text{kg/m}^3$ 、 $M$ は質量  $\text{kg}$ 、 $V$ は体積  $\text{m}^3$ です。ただし、試験では体積を直接測定するのではなく、体積はボードの測定された幅、長さ、および厚さの積で表されます。したがって、数式モデルは  $\rho = M/(BLt)$ となります。ここで、 $B$ はボードの幅、 $L$ は長さ、 $t$ は厚さです。またこの場合、厚さ  $t(=25\text{mm})$ は測定値ではなく呼び厚さを用いることになっているので、不確かさの成分は  $M, B, L$ の3つになります。

### STEP2 成分の標準不確かさの推定

測定は5体の試験体について行われ、それぞれ次の平均値と標準偏差が得られたとします。

質量 $M$ ; 平均値 28.7g, 標準偏差 1.0g	$\{u(M) = \sqrt{1.0^2 + (0.5/2)^2} = 1.03 \text{ g}\}$
幅 $B$ ; 平均値 0.60m, 標準偏差 5.3mm	$\{u(B) = \sqrt{5.3^2 + (0.5/\sqrt{3})^2} = 5.31 \text{ mm}\}$
長さ $L$ ; 平均値 0.91m, 標準偏差 7.8mm	$\{u(L) = \sqrt{7.8^2 + (0.5/\sqrt{3})^2} = 7.81 \text{ mm}\}$

これより、ボードの密度の測定結果は  $\rho = 0.0287/(0.60 \times 0.91 \times 0.025) = 2.10$  が得られます。

これらの繰り返し測定によるばらつき他に、質量測定では電子天秤の校正の不確かさ(拡張不確かさ  $0.5\text{g}$ ,  $k=2$ )、ボードの幅と長さの測定では、値の読みの丸めの誤差(最小目盛  $1\text{mm}$ , 一様分布,  $=0.5/\sqrt{3}$ )を考慮して、上の括弧内のように設定します。

### STEP3 標準不確かさの合成

合成標準不確かさは不確かさの伝播式を用いて求められます。伝播式における各成分の感度係数は次で与えられ、測定値をそれぞれに代入して、感度係数の値を求めます。

$$c(M) = \frac{\partial \rho}{\partial M} = \frac{1}{BLt} = 73.3, \quad c(B) = \frac{\partial \rho}{\partial B} = -\frac{M}{B^2Lt} = -3.50, \quad c(L) = \frac{\partial \rho}{\partial L} = -\frac{M}{BL^2t} = -2.31$$

合成標準不確かさの値は、次のように計算されます。

$$u_c(y) = \sqrt{\{c(M) \cdot u(M)\}^2 + \{c(B) \cdot u(B)\}^2 + \{c(L) \cdot u(L)\}^2} = \sqrt{(73.3 \times 0.00103)^2 + (3.5 \times 0.00531)^2 + (2.31 \times 0.00781)^2} = 0.080$$

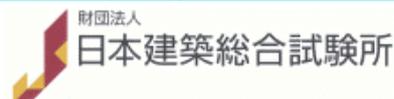
### STEP4 拡張不確かさの計算

包含係数  $k$  は値2を用いることが多いようです(無条件ではありません。繰返し回数が少ない場合は学生t分布の  $t$  分布を仮定して、信頼の水準に対応した包含係数を求めます)。ここでは95%信頼の水準で  $k=2.0$  が得られたとします。拡張不確かさは、 $U = k \times u_c(y) = 2.0 \times 0.080 = 0.16$  が計算されます。

### STEP5 測定の不確かさの表現

「測定結果は、密度  $\rho = 2.10\text{kg/m}^3 \pm 0.16\text{kg/m}^3 (k=2.0)$ 。包含係数  $k=2.0$  は95%信頼の水準で求められた。」

# 測定の不確かさと適合性の評価



## 仕様適合性

試験の結果は何らかの決定を行うときに用いられます。例えば、ある製品がある基準に合格しているかどうかでその製品を受け入れる場合や、大気中の化学物質の濃度を測定して注意報を発令する場合などです。その判断基準を仕様と呼びます。試験は測定結果が仕様に適合するかまたはしないかを決定するために行うのです。測定結果が明らかに仕様に適合している場合と明らかに不適合なときの判断は容易ですが、測定結果が仕様の限界値に近づくと判断が難しくなります。

## 間違っただ判断

測定値が仕様の限界値に近づくと、測定値にはばらつきがあるので、間違っただ判断をしてしまうことがあります。測定結果は仕様に適合しているが、その測定対象の別の製品では不適合になるケースがあるかもしれません。逆に測定結果は不適合であるが、それはたまたまばらつきの極端に大きい(または小さい)方の測定値であったためで、多くは適合しているかもしれません。仕様の限界値に近い試験結果の合格品を受け入れた後に不良品が多く発生する結果に、また逆に、仕様の限界値に近い試験結果の不合格品を排除したためにすべての製品の受け入れが拒否される結果に発展してしまうかもしれません。

## 不確かさを考慮した判断

測定値が仕様の限界値に近づくと、測定の不確かさを考慮して判断を行う必要があります。測定値に測定の不確かさ(つまり測定値のばらつきの範囲)を加えた値が仕様の上限値を超えないときにはその結果は適合と判断できます。測定値から測定の不確かさを引いた値が仕様の上限値を下回らないときにはその結果は不適合と判断できます。

測定値は仕様の限界値に対して適合しているが、不確かさを考慮すると仕様に適合しない場合は、試験結果は仕様に適合しているとは言えません。同様に測定値は仕様の限界値に対して不適合であるが、測定の不確かさを考慮すると適合する領域が生じる場合の試験結果は不適合とは言えません。

## 判断ができないとき

不確かさを考慮すると判断が複雑になり、場合によっては判断ができないという場合もあります。そのため、試験所によっては不確かさを考慮した判断を嫌がる場所もありますが、この判断の考え方は最終ユーザーの利益を守るために必要で、また同時に試験所の責任範囲を明確にするためにも必要です。間違っただ判断をしてしまったために被ったユーザーの損失の補償は試験所にも及ぶことがあるというのが国際的なルールです。

試験所は、測定の不確かさを付記して測定結果を表記し、その結果、判断が不可能になったケースでは判断をせずに試験結果だけで(もちろん測定の不確かさを付記して)、合格とも不合格とも記述しない、ことが可能です。ただし、依頼者との合意の上で、次の方法を採用することができます。その場合でも、合意の内容は報告書に記載しなければなりません。

- ・ 試験体数を増やして測定を行ない、すべての結果の平均値と不確かさをを用いて判断を行う。
- ・ 信頼の水準を下げて(拡張不確かさが小さくなる)判断を行う。信頼の水準を記載する必要がある。