測定学から見た真空計測の基礎

(2) 真空計測で用いられる計測用語 (つづき)

吉田 肇^{*1}Basics of Vacuum Measurement from Viewpoint of Metrology
(2) Technical Terms used in Vacuum Measurement (Sequel)Hajime YOSHIDA^{*1}

^{*1}National Metrology Institute of Japan (NMIJ), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),
AIST Central 3, 1-1-1 Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8563, Japan

(Received May 15, 2014, Accepted September 18, 2014)

This second lecture of “Basics of Vacuum measurement from viewpoint of Metrology” gives the concise explanation of the technical terms related to the pressure measurement such as a zero point, an offset, a residual current, a linearity, and so on. A calibration result of a hot-cathode ionization gauge is shown as an example. A difference between a calibration and an adjustment is also explained. Benefits of calibration are discussed.

2.3 測定圧力範囲に関する用語

2.3.1 測定圧力範囲

本講座で解説する代表的な真空計の概略図とそれぞれの測定圧力範囲を図1と図2に示した¹⁻³⁾。測定圧力範囲とは、文字通り、測定できる圧力範囲のことを意味するが、“測定できる”というところが曲者であり、注意が必要である。

多くの真空計は、圧力そのものではなく、圧力に依存する別の物理量を測定している。例えば、隔膜真空計であれば隔

膜の変位量、電離真空計であれば生成イオン電流である。真空計が測定している物理量の変化と圧力の関係を図3に概念的に示した⁴⁾。真空計が測定している物理量は、圧力に比例する領域を中心に、圧力に依存しない領域に挟まれており、それらの境界には、どちらも取れない微妙な遷移領域がある。一方で、真空計には精度（又は許容差、不確かさ）^{*1}が付与されており、例えば、測定点Aの精度を読み値の $\pm\alpha\%$ とする。この場合、真空計の測定下限は点B、上限は点Cになる。精度（又は許容差、不確かさ）を大きくすれば測定

図1 代表的な真空計測定子の概略図。

図2 代表的な真空計の測定圧力範囲。

図3 真空計が測定している物理量の変化と圧力の関係の概念図。両対数グラフを想定している。

^{*1} 鈷産業技術総合研究所 計測標準研究部門（〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1 つくば中央第3）

^{*1} 精度，許容差，不確かさの違いについては付録にまとめた。

範囲を広くできるし、小さくすれば測定範囲は限定されることになる。このように測定圧力範囲と精度（又は許容差、不確かさ）には密接な関係があり、これらをどう設定するかは、真空計メーカーの総合的な判断になる。測定圧力範囲の上限や下限付近の測定をする場合には、多かれ少なかれ、微妙な遷移領域での測定となるため注意が必要である。

2.3.2 測定下限に関する計測用語

測定下限圧力の名称が、真空計の種類によって異なるという複雑な事情・慣習があるため、以下でまとめる。

(1) 隔膜真空計、熱伝導真空計、水晶摩擦真空計のゼロ点
隔膜真空計、ピラニー真空計を含む熱伝導真空計、水晶摩擦真空計（クリスタルゲージ）の場合、測定下限圧力をゼロ点と呼ぶ。

静電容量式隔膜真空計（キャパシタンスダイアフラムゲージ、CDG）は、薄い膜（金属製とセラミック製がある）によって隔てられた二つの空間の、両側の圧力差によって生じる隔膜の弾性変位量を、静電容量の変化として測定する真空計である。図1(a)は、絶対圧タイプのCDGで、参照側が真空封止されている¹²。測定側の圧力が低くなると、隔膜の両側の圧力差が0に近づくため、隔膜は変位量0の中立位置に近づく。この時の静電容量を圧力に換算したものが、CDGのゼロ点である。

熱伝導真空計は、真空中で高温に保たれた金属細線が、圧力に依存して熱損失することを利用して圧力を測定する（図1(b)）。例えば、定温度型ピラニー真空計の場合、圧力が高いと多くの気体分子が衝突するため、金属細線は冷えやすく、一定温度に保つためには、多くの電力を投入する必要がある。一方で、圧力が低くなると、気体分子はほとんど衝突しないので、小さい電力でも温度を保つことができる。しかし、どんなに圧力が低くなっても、投入する電力をゼロにすることはできない。なぜなら、金属細線の支持固定部からの熱伝導や輻射による熱損失もあるためである。こうした熱伝導や輻射による熱損失を圧力に換算したものが、熱伝導真空計のゼロ点である。水晶摩擦真空計については詳細を省くが、音叉形の水晶振動子を共振させるのに必要な最小電力がゼロ点になる。

これらの真空計では、製造過程において評価されたゼロ点を測定量から差し引くことで、高真空になると指示値が0 Paを示すように予め調整されてある。しかし、ゼロ点は温度や時間、使用履歴により変化するため、使用しているとマイナスの値を示すことも珍しくない。ゼロ点付近の低い圧力で正確な測定をする際には、測定直前にゼロ点測定・調整を行うことが望ましい。

ゼロ点は、これら真空計が取付けられた真空容器を、ターボ分子ポンプ等で排気して、電離真空計で測定した到達圧力が、これら真空計の測定下限より十分低いことを確認した時に測定することができる。これら真空計には、ゼロ点調整機能が付いていることがほとんどであるが、目的によっては、ゼロ点の経時変化も重要な情報と考えて、ゼロ点調整機能を

あえて使わないという選択肢もある。この場合、測定値からゼロ点を常に引き算して、圧力を計算する。ゼロ点調整機能は、この引き算の手間を省くためのものである。

(2) スピニングローター真空計（SRG）のオフセット

スピニングローター真空計（SRG）の場合、測定下限をオフセット（offset）と呼ぶ。図1(c)にSRGの概略図を示す。SRGは、真空中で磁気浮上したローター球を回転させ、その回転周波数が圧力に依存して減衰することを利用して圧力を測定している。回転周波数の減衰は、気体分子がローター球の表面に衝突し、運動量を持ち去ることによって起こる。圧力が低くなると、気体分子はほとんど衝突しないため、回転周波数の減衰率は小さくなる。しかし、たとえ圧力がゼロとなり気体分子の衝突がなくなっても、渦電流の発生等に起因する制動作用より、わずかな回転の減衰が生じる。この圧力に依存しない、微小な回転周波数の減衰率を圧力値に換算したものがオフセットである。

SRGのオフセットも、真空装置をターボ分子ポンプ等で真空排気して、電離真空計で測定した到達圧力が、SRGの指示値に比べて十分低いことを確認した時に測定することができる。SRGのオフセットの値は、個体差があるが、およそ 10^{-4} Pa～ 10^{-3} Paである^{5,6)}。

(3) 電離真空計の残留電流相当圧力⁷⁾

電離真空計の場合、測定下限を残留電流相当圧力と呼ぶ。熱陰極電離真空計（図1(d)）は、真空容器内の気体分子をイオン化し、生成したイオンをイオンコレクターで収集してイオン電流を測定し、圧力に換算する真空計である。イオンは、熱フィラメント（陰極）から放出された電子がグリッド（陽極）まで飛行する過程で、気体分子と衝突することによって生成される。しかし、真空容器の圧力が例えゼロになっても、イオンコレクターに流れる電流は0にはならず、極微小な電流が計測される。この圧力に依存しない微小な電流を残留電流と呼ぶ¹³。そして、残留電流を、窒素相当圧力に換算した値が残留電流相当圧力である。残留電流は、(i)軟X線効果、(ii)逆X線効果、(iii)電子刺激脱離（Electron stimulated desorption, ESD）イオン、(iv)漏れ電流、及び(v)測定子や配管からの排除しきれないガス放出という五つの要因によって決まる^{7,9)}。これらの内、(i)～(iii)の影響を小さくするための機構を持つ真空計が極高真空計であり、エキストラクター真空計、軸対象透過型電離真空計（ATゲージ）、湾曲ビーム真空計などがある^{1-4,7,8)}。(iv)の問題については、国分らの報告¹⁰⁾がある。(v)の影響を除去するためには、測定子をガス放出の小さい材料で製作し、十分にベーキングとデガス（電子衝撃加熱による脱ガス）を行うといった古典的な方法しかなく、(v)の影響を完全に除去する手法は未だ開発されていない。エキストラクター真空計やATゲージを用いて、 10^{-11} Pa台の残留電流相当圧力が得られたという報告がある¹¹⁻¹⁴⁾。

実際には、真空排気中に電離真空計の指示値が下げ止まった時、真空容器内の圧力が下げ止まったのか、電離真空計の

¹² 参照側にもガス配管が取付けられている、差圧タイプの隔膜真空計もある。

¹³ 残留電流の主要な成分が軟X線効果と特定できる場合、特にX線限界と呼ぶ⁸⁾。

測定下限にきたのか判断が難しい場合も多い。そこで、電離真空計の指示値が下げ止まった原因を詳しく追及せずに、バックグラウンド圧力として報告することもある。表 1 に、ターボ分子ポンプで排気されたステンレス製の真空容器に、種類が異なる 4 台の熱陰極電離真空計を同様に取付けて測定した時の圧力を示す。このように、気体導入前のバックグラウンド圧力は最大で 6 倍異なった。一方で、真空容器に 10^{-3} Pa 台になるまで窒素ガスを導入した時には、その比は 1.4 倍まで小さくなった。 10^{-3} Pa 台では、上記の (i)～(v) の影響は相対的に小さいので、指示値の差は真空計の感度の違いによるものである。しかし、 10^{-6} Pa～ 10^{-7} Pa 以下まで圧力が低くなると、(i)～(v) の影響が相対的に大きくなり、これらがバックグラウンド圧力の違いとして計測されていると考えられる。

2.3.3 測定上限に関連する計測用語

測定上限に関連する計測用語として、**耐圧と保護動作圧力¹⁴⁾**がある。

耐圧とは、その真空計が故障しない圧力である。圧力が高くなりすぎると、測定子に負荷がかかり機械的に破損するため、真空計の仕様書には耐圧が示されていることが多い。また、熱陰極電離真空計など熱フィラメントを使用する真空計

の場合には、熱フィラメントの焼損を防ぐために、圧力が高くなると自動的にフィラメント電流を OFF にする保護機能が備え付けられており、その機能が働く圧力を保護動作圧力と呼ぶ。耐圧や保護動作圧力は、真空計の故障を防ぐための上限圧力であって、必ずしもこの圧力まで信頼性を持って圧力が測定できる訳ではないことに注意する。

2.3.4 直線性¹⁵⁾と内挿・外挿

図 4(a)に、電離真空計の指示値と圧力の関係を示す。一般に、真空計のカタログには、こうした Log-Log プロットによる図が添付されることが多く、圧力に比例して真空計の指示値が上昇する、又は、良い直線性（線形性と呼ぶ場合もある）があるように見える。しかし、不確かさ数%の議論をする場合には、Log-Log プロットは不十分であり、グラフの傾きを計算することが有効である。グラフの傾きを計算する場合には、指示値からゼロ点（又は、オフセット、残留電流相当圧力、バックグラウンド圧力、以下ゼロ点等と呼ぶ）を差し引いた値を用いて、計算することが多い。また、傾きを計算する際には、分母を圧力にする場合と、真空計の指示値にする場合がある。前者を**感度**、後者を**補正係数**と呼び¹⁴⁾、互いに逆数の関係にある。感度や補正係数は、通常、圧力をステップ状に変化させた時の指示値の変化を測定し、(1)式や(2)式を用いて求められる。

$$\text{感度} = \frac{\text{指示値} - \text{ゼロ点等}}{\text{圧力値}} \quad (1)$$

$$\text{補正係数} = \frac{\text{圧力値}}{\text{指示値} - \text{ゼロ点等}} \quad (2)$$

感度を用いる場合には、指示値を感度で割り算することで正しい圧力値が得られ、学術的な分野で主に利用される。一方、補正係数は指示値に補正係数を掛け算すれば、正しい圧力値となる。このため計算が容易で、実用的にはこちらの方が便利かもしれない。指示値からゼロ点等を差し引くのは、

表 1 種類が異なる 4 台の熱陰極電離真空計を、同じような配置でステンレス鋼製の真空容器に取り付け、ターボ分子ポンプで排気したときのそれぞれの指示値の比較。

	A	B	C	D
型式	AT ゲージ	エキストラクタ真空計	BA 真空計 1	BA 真空計 2
バックグラウンド圧力 (Pa)	3.94×10^{-7}	5.08×10^{-7}	6.11×10^{-7}	2.32×10^{-6}
窒素ガス導入後の指示値 (Pa)	1.67×10^{-3}	2.08×10^{-3}	1.93×10^{-3}	2.30×10^{-3}

図 4 電離真空計の指示値と圧力の関係 (a) と、(a) の結果から計算された感度 (b)。(b) には、 10^{-7} Pa から 10^{-3} Pa までの平均値から求めた校正直線①、 10^{-7} Pa から 10^{-2} Pa までの最大値と最小値の中間の値から求めた校正直線②、最小二乗法による直線フィッティングで求めた校正直線③、最小二乗法による累乗関数フィッティングで求めた校正曲線④も示されている。横軸が対数であるため、③が曲線、④が直線に見える。測定データは、産総研が保有する二段式流量分配法装置^{16,17)}で測定された。測定の拡張不確かさは約 3 %である。

¹⁴⁾ この他にも感度の定義は色々ある（表 2 参照）。熱陰極電離真空計の場合には、分子をイオン電流とし、さらに電子電流（エミッション電流）で割り算したものを感度と呼ぶ場合も多い。スピニングローター真空計の場合、感度を実効的な運動エネルギー授受係数や適応係数（Effective accommodation coefficient）と呼ぶ場合もある。指示値と圧力値の差を用いて、特性を評価する場合もある。

一般に、感度よりゼロ点等の方が変化しやすいためであり、測定者が自分でゼロ点等を測定して、その都度差し引けば、再現性の良い測定結果を得ることができる。以下では、感度という用語を用いて解説するが、補正係数でも同様に考えることができる。

図4(a)の元のデータから計算した感度を図4(b)に示す。真空計の指示値が圧力に比例（切片が0）する場合、感度は一定値となるので、感度のばらつきが、どの程度比例関係が成り立っているかを判断する目安になる。図4(b)では、 10^{-7} Pa から 10^{-3} Pa までの感度はほぼ一定値であるが、 10^{-3} Pa 以上では感度が上昇しており、比例関係が崩れてきていることがわかる。この感度上昇は、空間電荷効果^{18,19)}によるものと推定される。

校正圧力点は図4のように離散的であるから、校正結果を利用する際には、校正直線、又は校正曲線¹⁵⁾を作成して、校正圧力点の間の値を補完する必要がある。どのように校正直線/曲線を作成すべきかは、目的によって異なるの

で、特に決まりはない。例として、図4(b)に①～④の四つの方法で作成した校正直線/曲線を示した。以下で、それぞれの考え方を述べる。

①は、 10^{-7} Pa から 10^{-3} Pa までは感度が一定であり、 10^{-3} Pa 以上では感度が一定値から外れてくるという考え方である。感度の値は、 10^{-7} Pa から 10^{-3} Pa までの平均値0.745を採用し、感度の直線性は、各校正点が0.745からどのくらいずれているかから見積もる。即ち、「電離真空計の感度は0.745であり、 10^{-7} Pa から 10^{-3} Pa までの感度の直線性は ± 0.012 以下である。 10^{-3} Pa 以上では感度の直線性が悪くなり、感度は最大で0.042上昇する」という解釈になる。

②は、 10^{-7} Pa から 10^{-2} Pa まで感度が一定であるという考え方である。 10^{-3} Pa 以上の感度上昇は、測定の目的からすると大きな問題ではないという、比較的、大雑把な見方であるが、否定されるものでもない。この場合、感度の値として、最大値と最小値の間を取って0.760を採用し、この値からのずれから感度の直線性を見積もる。即ち、「 10^{-7} Pa か

表2 今回使用した用語の定義と引用 JIS。備考は省略してあるので、正確には JIS を参照してほしい。

用 語	定 義	引用 JIS
(真空計の) 圧力範囲 (pressure range of a vacuum gauge)	真空計を所定の条件で動作させたとき、指示値の誤差がその真空計の最大許容誤差を超えない圧力範囲。	JIS Z 8126-3 ⁸⁾
測定圧力範囲*1	定義された測定の不確かさの限界値を満たす最高圧力と最低圧力との間の範囲である。	JIS Z 8129 ⁷⁾
直線性 (linearity)	入力信号と出力信号との間の直線関係からのずれの小さい程度。	JIS Z 8103 ¹⁵⁾
感度 (sensitivity)	ある計測器が測定量の変化に感じる度合い。すなわち、ある測定量において、指示量の変化の測定量の変化に対する比。	
感度 (sensitivity coefficient, sensitivity)	真空計に指示された読みの変化と相当する圧力変化との比。	JIS Z 8126-3 ⁸⁾
(電離真空計の) 感度係数	与えられた気体に対して、電離真空計の定められた動作条件の下でのイオン電流を、イオン化のための電子電流と圧力との積で除した値。	
感度係数 S (sensitivity, sensitivity coefficient)	次の式(1)によって与えられる量。 $S = \frac{I_c - I_{c0}}{I_e(p - p_0)} \quad (1)$ ここに、 I_e : 電子電流 I_c : 圧力 p におけるイオン電流 I_{c0} : 圧力 p_0 におけるイオン電流 p : 圧力 p_0 : 残留圧力	JIS Z 8129 ⁷⁾
補正係数*2 (correction factor)	考えられる系統誤差を補償するために、補償前の測定結果に乗じる係数	JIS Z 8103 ¹⁵⁾
補正係数 (correction factor)	校正結果を基に補正された圧力値を得る場合に乘ずる係数。	JIS Z 8129 ⁷⁾
残留電流 (residual current)	測定子の通常の動作状況下で、かつ、ゼロ圧力又はその真空計の最低測定限界に対して無視できる程度に低い圧力において得られることができる最小イオン電流。	
残留電流相当圧力 (residual current-equivalent pressure)	残留電流の値を、窒素相当圧力に換算した値。	
窒素相当圧、窒素換算値 (equivalent nitrogen pressure)	窒素に対する感度で補正した圧力値。窒素に対して校正された真空計の場合は、その真空計の読み値。	JIS Z 8126-3 ⁸⁾
X 線限界 (X-ray limit)	熱陰極電離真空計で、集電子電極から放出される軟 X 線によって、主として集イオン電極から放出される光電子による残留電流に対応する窒素相当圧。	
校正曲線 (calibration curve)	標準の値と計測器が指示する値との間の対応関係を表す曲線。	JIS Z 8103 ¹⁵⁾
校正 (calibration)	計器又は測定系の示す値、若しくは実量器又は標準物質の表す値と、標準によって実現される値との間の関係を確定する一連の作業。	
調整 (adjustment)	計器をその状態に適した動作状態にする作業。	

*1 6. 製造業者が提示する熱陰極電離真空計の仕様を表す項目で示されている。

*2 「補正」という用語の備考3で、定義されている。

ら 10^{-2} Pa まで、電離真空計の感度は0.760で、感度の直線性は ± 0.027 以下である」という解釈となる。

③は、感度は圧力に一次関数的に変化するという立場に立ち、感度の各測定点を最小二乗法で線形フィッティングした場合である。この場合、直線性はフィッティング式との残差となる。即ち、「 10^{-7} Pa から 10^{-2} Pa まで、電離真空計の感度は $0.7454 + 6.012p_g$ (p_g はバックグラウンドを差し引いた電離真空計の指示値) で表され、感度の直線性は ± 0.018 以下である」という解釈となる。

④は、感度は圧力に累乗関数的に変化するとみなした場合である。最小二乗法によるフィッティングにより、感度は $0.7848p_g^{0.00435}$ となり、直線性はこの累乗関数との残差となる。即ち、「 10^{-7} Pa から 10^{-2} Pa まで、電離真空計の感度は $0.7848p_g^{0.00435}$ で表され、感度の直線性は ± 0.021 以下である」という解釈となる。

さて、この電離真空計が 1.00×10^{-6} Pa を示したとする。この時の圧力値はいくつであろうか。①と②の解釈の場合、 1.00×10^{-6} Pa をそれぞれの感度で割り算することで、 1.34×10^{-6} Pa、 1.32×10^{-6} Pa とそれぞれ求められる。また、感度の直線性を考慮することで、感度の直線性に起因する圧力値の不確かさを求めることができ、それぞれ $\pm 0.02 \times 10^{-6}$ Pa、 $\pm 0.05 \times 10^{-6}$ Pa となる¹⁵。③と④の解釈の場合は、 p_g に 1.00×10^{-6} Pa を代入して感度を求め、後は同様に、圧力値や直線性に起因する圧力値の不確かさを求められる。それぞれ、 $(1.34 \pm 0.03) \times 10^{-6}$ Pa、 $(1.35 \pm 0.04) \times 10^{-6}$ Pa となる。

このように、どのような校正直線/曲線を用いるかによって、感度やその直線性が変わり、それに対応して、求まる圧力値や直線性に起因する不確かさも変わってくる。一方で、よほど高精度な要求がある場合を除き、ほとんど差が無いともいえる。これは、指示値 1.00×10^{-6} Pa が、上下二つの校正圧力点に挟まれているためであり、こうした方法を内挿と呼ぶ。内挿の場合、直線性の良い真空計であれば、どのような校正直線/曲線を用いても、ほとんど結果に影響しないので、それだけに信頼性が高い。但し、特異点や変曲点があると、大きな誤差要因になるので、少なくとも1回は多くの点で校正することが望ましい。一旦、直線性が確認されれば、校正圧力点を間引くことが可能になる。校正直線/曲線は、結果が同じであれば、どのような式を用いても良いという考え方がある一方で、①と②は生成イオン量が圧力に比例するという熱陰極電離真空計の原理に基づく式であるが、③や④は物理的な裏付けの無い単なるフィッティングであるので、①と②の方が信頼性が高いという考え方もある。

外挿とは、図4の例で言うと、 10^{-7} Pa 以下の感度、又は 10^{-2} Pa 以上の感度を推定することである。外挿の場合には、どのような校正直線/曲線を用いるかによって、値が大きく外れる場合がある。極端に校正圧力範囲から外れた領域まで外挿すると、その圧力範囲では顕著ではなかった物理現象の影響が無視できなくなるなどの問題が起こることもある

¹⁵ これらは、感度の直線性に起因する不確かさだけであり、全体の不確かさは、他の様々な不確かさ要因も加わるため、より大きくなる。詳細は第3回目で解説する。

ので、外挿は内挿に比べて信頼性が低い。

2.4 校正と調整¹⁵⁾

校正事業者(又は真空計メーカー)に校正を依頼した場合、校正後に返却された真空計は正しい圧力値を示していることを期待する人も多いかもしれない。しかし、校正後の真空計の指示値を読んでも、そのままでは正しい圧力値になっていない場合もあるので注意が必要である。

校正とは、ユーザーが依頼した真空計と校正事業者が保有する標準器の値を比較することである。比較してみると、ぴったり一致することはほとんどなく、多かれ少なかれ差が観測される。校正の場合、例えば差がどんなに大きくても、その結果を校正証明書に記載して、作業は終了する。校正には、真空計を調整して差を修正する作業は含まれない。調整とは、真空計が正しい圧力を示すように、内部パラメータ等を変更することである。

校正だけを依頼した場合、ユーザーは測定の都度、校正証明書に示されたデータを用いて、測定値を補正して正しい圧力値を求めなければならない。このような手間を省くためには、調整とその後の校正を依頼する必要がある。

また、ゼロ点等は、校正証明書内の参考情報として示されるのみで、校正結果には含まれない。ゼロ点等は変化しやすく、必要に応じて、調整又は補正するものであり、校正の対象にならない。電離真空計で測定したバックグラウンド圧力も同様で、表1で示したバックグラウンド圧力のどの値がより正しいかは、例えば校正しても、判断することは難しい。

用途によっては、感度やゼロ点を調整するとこれまでの履歴も失われるので、調整を嫌う場合もある。真空計の校正を依頼する場合には、校正事業者にどのような作業を依頼するかを確認することが、トラブルを避けるために重要である。

2.5 校正の効果

真空計の用途の内、到達圧力をモニターし、装置の運転状況が正常であることを確認することが目的なら、高精度の校正は不要である。真空計が故障していないことを確認する程度であれば、簡易的な検査でも十分に目的を達成できるし、真空計を定期校正するよりも測定子を交換した方が、コスト的に有利な場合もある。

一方で、導入するプロセスガスの圧力測定や各種真空特性試験(ガス放出や排気速度の測定など)、真空計の基礎特性評価、ガス分析、漏れ検査など、真空中に導入する気体あるいは真空中で発生する気体の量を正確に知りたい場合には、校正は測定データの信頼性向上のために重要な役割を果たすことができる。この場合、“真空計の定期的な校正を行った結果、感度が安定であることが確かめられた”という履歴や実績が、その計測・分析の信頼性を支えるため、容易に真空計を交換することも、内部パラメータを変更することもできなくなる。

校正には手間やコストがかかるため、校正によって、どのようなデータが得られるのか、それを用いて、どのようなことができるのかを良く検討することが重要である。

2.6 用語の定義について

最後に、今回用いた用語の定義を表2にまとめた。このように、用語の定義は時に曖昧であり、分野やJIS規格によ

って微妙に異なることもある。しかし、基本となる考え方は共通している。用語の定義を抽象的に理解しようとするよりは、出来るだけ身近な具体例に置き換えて理解し、目的や用途に応じて応用できるようになってほしい。

謝辞

独産業技術総合研究所 計測標準研究部門 計量標準基盤研究室 田中秀幸 主任研究員，城野克広 主任研究員，並びに圧力標準研究室の室員の皆様には，本稿を纏めるにあたって貴重な助言を頂いた。

付録 精度，許容差，不確かさ，及び関連用語

先ず，「accuracy」，「trueness」，「precision」という類似した三つの用語を解説する。これら英語の日本語訳は，分野によって異なっており（表 A），混乱の原因になっている²⁰⁾。ここでは，物理計測の用語を用いて解説する。

これらの用語の意味の違いは，的に矢を当てる時の様子などを用いて，良く説明される^{21,22)}。筆者は，ライフル銃の開発を例に説明されたことが最も印象に残っているのので，この例を用いて解説したい。

新型のライフル銃を開発して，的に中心を狙って試射した

とする（図 A）。最初は（a）の位置に当たった。この場合，そのライフル銃は，精密さ（precision）はあるが，正確さ（trueness）はない。次に，ライフル銃を調整して，再び試射したところ，今度は（b）の位置に当たった。今度は，正確さ（trueness）は向上したが，精密さ（precision）が無くなってしまった。再度調整して，試射したところ，（c）の位置に当たった。これで，精密さと正確さを兼ね備えた，高い精度（accuracy）を持つライフル銃に仕上がった。

「precision」は「ばらつきの小さい程度」，「trueness」は「かたより（真の値からの差）の小さい程度」，「accuracy」は，“precision と trueness を含めた，測定量の真の値との一致の度合い”を示す。

しかし，“真の値は，観念的な値で，実際には求められない¹⁶⁾”ので，「正確さ」や「精度」も，実際には求められない観念的な値である。そこで，「不確かさ」という，実際に評価可能な“計測の信頼性を表す指標”が導入されるようになった。「不確かさ」については，第 3 回目や参考文献²³⁾などをご参照頂きたい。

「精度」という用語は，直感的に理解しやすいため，現在でも広く使用されている。しかし，「精度」の定義は，分野によって異なるため，正確な議論を行う場合には，定義の確認が必要である。一方で，「不確かさ」という用語には，定義の曖昧さは少ない。

「許容差¹⁵⁾」という用語は，“基準に取った値と，それに対して許容される限界の値との差”や，“ばらつきが許容される限界の値”と定義され，比較的，使用しやすい用語のように思う。類似した用語として，「公差¹⁵⁾」というものもあり，“規定された最大値と最小値の差”と定義されている。

〔文 献〕

- 1) （一社）日本真空学会：真空夏季大学テキスト
- 2) 真空技術基礎講習会運営委員会 編：わかりやすい真空技術（日刊工業新聞社，東京，1990）。
- 3) 株式会社アルバック 編：新版真空ハンドブック（オーム社，東京，2002）。
- 4) 秋道 齊：真空夏季大学 真空計測 講義資料（2013）。
- 5) F. J. Redgrave and S. P. Downes: Vacuum, **38** (1988) 839.

表 A JIS で定義されている「accuracy」，「trueness」，「precision」に対応する日本語²⁰⁾。

分 野	JIS 規格	accuracy	trueness	precision
物理計測	JIS Z 8103 ¹⁵⁾	精度	正確さ	精密さ 精密度
化学計測	JIS Z 8402-1 ²⁴⁾	精確さ	真度 正確さ	精度
	JIS K 0211 ²⁵⁾	精確さ	真度	精度
統計的品質 管理	JIS Z 8101 ²⁶⁾	精確さ 総合精度	真度 正確さ	精度 精密度 精確さ
認証標準物質の 使い方	JIS Q 0033 ²⁷⁾	精確さ 精度	真度 正確さ	精度 精密さ

図 A 「accuracy」，「trueness」，「precision」という三つの用語を説明するための例。ライフル銃で的に中心を狙ったときの着弾点を示している。（a）精密さ（precision）はあるが，正確さ（trueness）はない，（b）精密さ（precision）はないが，正確さ（trueness）がある，（c）精密さ（precision）も，正確さ（trueness）もある高い精度（accuracy）を持つライフル銃の結果。

¹⁶⁾ 簡単に説明すると，「真の値」は「ある特定の量の定義と合致する値」と定義されるが¹⁵⁾，ここで言う“合致する”とは，小数点以下無限桁に至るまで，数学的に一致することを意味しているので，計測器を使ってそれを証明することは不可能であることによる。

- 6) M. Hirata: Shinku, **36** (1993) 26.
- 7) JIS Z 8129:2014 真空技術-真空計-熱陰極電離真空計の仕様の表記法 (日本規格協会, 東京, 2014).
- 8) JIS Z 8126-3:1999 真空技術-用語-第3部: 真空計及び関連用語 (日本規格協会, 東京, 1999).
- 9) 辻泰, 齊藤芳男: 真空技術 発展の途を探る (アグネ技術センター, 東京, 2008).
- 10) K. Kokubun and M. Hirata: Shinku, **40** (1997) 137.
- 11) K. Kokubun, H. Shimizu, S. Ichimura, H. Kawahara and M. Kondo: Shinku, **34** (1991) 14.
- 12) 尾高憲二, 上田新次郎: プラズマ・核融合学会誌, **71** (1995) 1104.
- 13) S. Ichimura, K. Kokubun, M. Hirata, S. Tsukahara, K. Saito and Y. Ikeda: Vacuum, **53** (1999) 291.
- 14) H. Akimichi and M. Hirata: Metrologia, **42** (2005) S184.
- 15) JIS Z 8103:2000, 計測用語 (日本規格協会, 東京, 2000).
- 16) H. Yoshida, K. Arai, H. Akimichi and M. Hirata: J. Vac. Sci. Technol. A, **26** (2008) 128.
- 17) H. Yoshida, K. Arai, H. Akimichi and M. Hirata: J. Vac. Soc. Jpn., **51** (2008) 109.
- 18) M. Hirata and M. Ono: Vacuum, **41** (1990) 2093.
- 19) K. Jousten: *Handbook of vacuum technology*, (WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, 2008) p. 601.
- 20) 上本道久: ぶんせき, **1** (2006) 15.
- 21) E. M. Mikhail: *Observations and Least Squares*, (Dun Donnelly, New York, 1976) p. 44.
- 22) 中根勝見: 先端測量技術, No. 102 (2010) 37.
- 23) H. Yoshida: J. Vac. Soc. Jpn., **56** (2013) 449.
- 24) JIS Z 8402-1:1999, 測定方法及び測定結果の精確さ (真度及び精度)-第1部: 一般的な原理及び定義 (日本規格協会, 東京, 1999).
- 25) JIS K 0211:2013, 分析化学用語 (基礎部門) (日本規格協会, 東京, 2013).
- 26) JIS Z 8101-2:1999, 統計-用語と記号-第2部: 統計的品質管理用語 (日本規格協会, 東京, 1999).
- 27) JIS Q 0033:2002, 認証標準物質の使い方 (日本規格協会, 東京, 2002).