低圧力・低真空標準の校正体系とトレーサビリティ

小島 桃子^{*1}・小島 時彦^{*1}

Calibration System and Traceability of Low Pressure and Vacuum Standards in Japan

Momoko KOJIMA^{*1} and Tokihiko KOBATA^{*1}^{*1}National Metrology Institute of Japan, AIST, AIST Central 3, 1-1-1 Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8563, Japan

(Received July 16, 2016, Accepted October 13, 2016)

The national standards of pressure and vacuum in Japan have been developed, maintained and provided at the National Metrology Institute of Japan (NMIJ). The standards consist of several instruments such as mercury column manometer, pressure balances, static expansion system, and orifice method (continuous expansion method), etc. to cover a wide pressure range from 10^{-9} Pa to 10^9 Pa. These standards are disseminated domestically to the users through the calibration chain. The Japanese traceability chain is maintained by NMIJ, accredited calibration laboratories and the accreditation body so as to guarantee the reliability of the pressure and vacuum measurements for users. In this article, how the vacuum standards are developed from the pressure standard is explained then how they are maintained and disseminated are described.

1. はじめに

真空計を使用して真空計測を行う場合、使用者は測定値の信頼性についてどの程度気にされているだろうか。その測定値はそのまま信用してよいのだろうか。あるいは、真空計が生産される際、メーカにおいては何を正しい値として出力の調整が行われているのだろうか。

著者らは圧力標準、低圧力・低真空標準の整備・供給に多年にわたって従事してきた^{1,2)}。そこで上の問いに対する回答の一端となるよう、本稿では現在の日本の真空計測分野における「標準」とそのトレーサビリティ体系について概説していきたいと思う。

本稿では「圧力」や「真空」、あるいは「低圧力」、「低真空」、「中真空」などの用語を圧力範囲によって使い分けているので、その範囲について先に説明する。まず、「圧力」と「真空」の境は、重なる圧力範囲はあるものの、大まかには数 kPa となる。その重なる部分が「低圧力」や「低真空」と呼ばれる領域になり、数 kPa から 1 Pa 程度の圧力範囲を指すが、用語の使用者が「圧力」と「真空」のどちらに親しいか、あるいは使用する装置によって選択されることがあるため、両方を記載した。また、「中真空」は 1 Pa から 10^{-4} Pa 程度、「高真空」は 10^{-4} Pa 以下の圧力範囲に対して主に使用する。

真空の標準は大気圧付近の圧力の標準から徐々に圧力を下げていくことで確立されている。したがって、まずは圧力標準について少し詳しく述べ、徐々に圧力範囲の領域を下げていくことで真空標準の概説につなげることにする。次に、整備した標準がどのようにユーザの計測器にまでつながり、その信頼性が確保されているのか、あるいは国家標準自体の信頼性はどのように確保されているのかについても概説したいと思う。

2. 圧力標準について

つくば市にある国立研究開発法人産業技術総合研究所（産総研）計量標準総合センター（National Metrology Institute of Japan: NMIJ）³⁾は、日本の国家計量標準機関（NMI）として様々な量の標準を整備・維持・供給している機関である⁴⁾。この中で、著者らが所属する圧力真空標準研究グループが圧力および真空の国家標準の整備から供給を担っている。当研究グループにおける圧力と真空の標準整備状況を **Fig. 1** に示す。このように研究グループ内で高真空から高圧力までの標準を一貫して整備しているため、これらの標準をまとめて「圧力真空標準」と呼ぶことも多い。

現在のわが国の圧力真空標準のトレーサビリティ体系図を **Fig. 2** に示す。体系図の背景に三角形を描いているが、これは、エンドユーザに近づくにつれて計測器数が増大すると共に、計測器に与えられる不確かさの大きさも増大することを表している。わが国においては、圧力の特定標準器（計量法で定めるトレーサビリティ体系の源となる標準器）は「光波干渉式標準圧力計」と呼ばれる液柱形圧力計である。これをもとに特定副標準器である重錘形圧力天びん群が校正され、広い圧力範囲の標準を整備している。

2.1 光波干渉式標準圧力計

圧力の国家標準のもっとも上位に位置するのが「光波干渉式標準圧力計」である^{5,6)}。これは水銀を作動媒体とする液柱形圧力計であり、作動媒体の密度と液面の高さの差（液位差）の測定から圧力を決めることのできる一次標準である。圧力以外の物理量を基に圧力の絶対測定を行えるため、伝統的に日本をはじめ諸外国でも国家標準として用いられてきた。

装置の原理図を **Fig. 3** に実際の装置の写真を **Fig. 4** に示す。図中の式から明らかなように、この装置で圧力を精密に測定するには、水銀密度と液位差の測定が非常に重要となる。産総研において開発された光波干渉式標準圧力計には、そのための様々な工夫がなされている。例えば水銀の液位差測定では、液面検出に白色光のマイケルソン干渉を利用し、水銀液面の位置を参照鏡の位置に移し替えてその位置をレー

^{*1} 国立研究開発法人産業技術総合研究所 計量標準総合センター 工学計測標準研究部門 圧力真空標準研究グループ（〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第 3）

Fig. 1 National standards of pressure and vacuum in Japan.

Fig. 2 Traceability systems of pressure and vacuum standards. JCSS: Japan Calibration Service System. jcss (JCSS in lower case): Calibration service for JCSS from NMIJ.

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho_l - \rho_a)gh$$

Fig. 3 Principle of liquid column manometer.

ザ干涉式測長器で精密に検出するという、独自の手法を採用している。一方、作動媒体となる水銀には再生水銀ではない、産地の判明している水銀を使用し、さらに高純度に精製することで水銀密度⁷⁾に起因する不確かさを低減している。

また水銀は熱膨張係数が約 $1.8 \times 10^{-4}/K$ と極めて大きく⁸⁾、わずかな温度変化も密度値に影響するため、温度の精密測定や均一性確保も重要になる。様々な改良の結果、現在この標準器のもつ合成標準不確かさ ($k=1$) は絶対圧力100 kPaにおいて相対的に約 3×10^{-6} と評価されている。

さて、液柱形圧力計は高い信頼性をもつ一次標準であるが、一般に、測定できる圧力の上限は1~3気圧程度に限られている。密度が約13 g/cm³の水銀を作動媒体としても、100 kPa (約1気圧) を測るためには約760 mmの高さを必要とするし、当然のことながら、例えば高々300 kPa (約3気圧) を測るためには約2.3 mの高さの管を用意する必要がある。その結果、装置が大型化することで温度の不均一性や液位差測定の不確かさ増大など様々な問題が発生する。また、上述の不確かさを達成するためには液位差測定を1 μm程度の不確かさで行う必要があり、それに応じた干渉計や干渉縞の検出機構には、使用の都度、高度な調整技術が要求される。さらに、白色光を光源に使用しているため、水銀面の

Fig. 4 Photograph of Interferometric Mercury Manometer in NMIJ.

わずかな振動によっても干渉縞の検出が阻害されること、水銀密度を小さな不確かさで推定するためには温度の安定性も重要になることから、全ての測定系の安定を待って測定を行うには長い時間がかかる。そのため、産総研においてこの光波干渉式標準圧力計は、最上位の標準器（特定標準器）として数 kPa から 100 kPa 程度までの圧力範囲で参照用の重錘形圧力天びんを校正するのに使用し、通常の標準供給にはこの後に述べる重錘形圧力天びん群（特定副標準器のピストン式一次圧力標準器群）を用いている。

近年、水銀に関する水俣条約の採択により、水銀の使用制限が進んでいることから、水銀を作動媒体とする液柱形圧力計から別の一次標準への置き換えも検討され始めている⁹⁾。水俣条約によると、気圧計や圧力計については、代替製品がない、または高精度計測に使用される製品を除き、2020年からは製造・輸出が禁止されることになっている¹⁰⁾。

2.2 重錘形圧力天びんを用いる圧力標準

現在、圧力の国家標準には主に「重錘形圧力天びん」が用いられている。重錘形圧力天びんの概略図を Fig. 5 に示す。ピストン・シリンダの形状には、図に示した「単純型」の他にも「内包型」や「隙間制御型」と呼ばれるタイプなどもあるが、ここでは最も基本となる単純型を示して説明する¹¹⁾。

重錘形圧力天びんは、単位面積に加わる力という圧力の定義をそのまま実現する圧力発生器で、その信頼性の高さから、単なる圧力の発生器としてだけでなく、標準器として利用されることも多い¹²⁾。重錘形圧力天びんは一般に、一對のピストンとシリンダ、それにピストンの上に乗せられる重錘（おもり）から構成されており、重錘質量を変化させることで発生する圧力を調整することができる。ピストン・シリンダの直径は使用する圧力域によって様々であり、数 kPa から数 100 kPa 用の直径 20 mm 程度から 500 MPa を超える圧力を発生する直径 2 mm 程度までである。高精度の重錘形圧力天びんに使用されるピストン・シリンダは非常に精密に加工されており、市販されている口径が大きい直径約 35 mm のピストン・シリンダでは、ピストンとシリンダの隙間が 1

Fig. 5 Schematic of pressure balance.

μm 以下の場合もある。

ピストンの下端面に発生する圧力は、原理的にはピストン・シリンダの有効断面積（ A ）とピストンと重錘の質量（ M ）、重力加速度（ g ）、ピストン上にかかる参照圧力（ p_0 ）を用いて、

$$p = Mg/A + p_0$$

と計算される。これと釣り合う測定圧力 p をピストン下面に印加すると、ピストンはシリンダ内で浮上する。さらに浮上したピストンを回転させることによって、ピストンがシリンダと機械的に接触しないよう調心作用が働き、またピストン自身を鉛直に保つことにも役立っている。ピストンがシリンダ内で安定して浮上・回転している状態が、精確に圧力を発生・測定できている状態である。この装置は、ピストン上下の力が釣り合うことから、圧力“天びん”（Pressure balance）と呼ばれている。

上述の式は非常に単純な形だが、実際の発生圧力を精度よく計算するにはこれに様々な補正を加える必要があり、その

ための多くの補正項が式に含まれることになる。例えば質量には浮力補正、ピストン・シリンダの有効断面積には温度・圧力による膨張や変形の補正、さらに、表面張力の影響、ヘッド差補正などを考慮することが必要である。産総研においては、実際の測定環境に即してこれらの補正を行っており、環境温度、湿度、大気圧、ピストン温度など様々なパラメータを精密に測定するための計測器も適切に維持・管理している。

重錘形圧力天びんを大気圧下で使用する場合、発生圧力 p は大気圧を基準としたゲージ圧力になるが、圧力天びん本体をベルジャー（チャンバー）で覆い、内部を真空排気することで、（仮想的な）完全真空（ $p_0=0$ ）を基準とする絶対圧力を発生させることができる。ベルジャー内の圧力を精密に測定し補正することで、高精度に絶対圧力の圧力測定を行うことが可能になる¹³⁾。

精度良く作られ、群管理（複数台間の比較校正）によって適切に管理された圧力天びんの発生圧力は、相対的に 10^{-6} オーダーで安定である。産総研の校正・測定能力は5 kPaから175 kPaの圧力範囲において拡張不確かさ（信頼の水準約95%）が $(400 + 13 p \text{ mPa})$ （ p [kPa]は校正圧力）である。これは100 kPaにおいて1.7 Paの拡張不確かさになるが、実際の校正においては校正器物に起因する不確かさや繰り返し性なども考慮されるため、校正証明書に記載される不確かさはこれよりも大きな値になる。校正器物は重錘形圧力天びんや高精度圧力計である。

2.3 2台の重錘形圧力天びんを用いる差圧標準

前節では、1台の重錘形圧力天びんの発生圧力を標準の圧力としたが、本節では、2台の圧力天びんを用いて差圧を発生する方法^{14,15)}について述べる。

Fig. 6に差圧発生システムの概略を、**Fig. 7**に実際の装置の写真を示す。まず、校正器物(Device under test: DUT)である差圧計の両方のポートにそれぞれ圧力天びんを接続し、ほぼ同じ圧力（ライン圧力 $p_{L1} \sim p_{L2}$ ）を発生させる。これが差圧ゼロの状態、次に、一方の圧力天びんの上に分銅を載せることで、ライン圧力に対して分銅の質量分の差圧を発生させることができる。分銅の質量 Δm 、圧力天びんの有効断面積 A_1 および重力加速度 g から、発生した差圧 Δp を次式

$$\Delta p = \Delta m g / A_1$$

で精度に計算することができ、この値によって接続されている差圧計の表示値を校正する。

産総研の差圧発生システムにおいて使用している2台の重錘形圧力天びんは、ともに本体をベルジャーで覆った絶対圧力型の圧力天びんである。周囲圧力を真空排気することによって大気圧の擾乱を受けることがなくなるため、ライン圧力を非常に安定に発生させることが可能となり、ライン圧力の安定性に起因する不確かさを大幅に低減させることができた。大気圧の擾乱の影響は日や天候によって異なるが、例えば、大気圧下でライン圧力のばらつきが標準偏差で約24 mPaであったところ、ベルジャー内を真空排気するとばらつきが約3.5 mPaと7分の1にまで減少したという実測例が

Fig. 6 Schematic layout of differential pressure calibration system using double pressure balance. DUT: Device Under Test.

Fig. 7 Photograph of gas differential pressure standard system using double pressure balance.

ある。また、直径約50 mm（有効断面積が約20 cm²）という大口径のピストン・シリンダ¹⁶⁾を使用することで、より大きい質量の差圧発生用分銅を使用することができ、差圧発生用分銅の質量校正に起因する不確かさを減少させている。

主な校正対象は高精度差圧計である。現在の校正・測定能力は、1 Paから10 kPaの圧力範囲（ライン圧力100 kPa）において拡張不確かさが $(11 + 14 p) \text{ mPa}$ （ p [kPa]は校正圧力）である。これは、例えば1 kPaにおいては25 mPaの拡張不確かさになる。

3. 圧力標準から真空標準への拡張

現在の真空標準は、ここまで概説した圧力標準から拡張して作られている。圧力範囲と校正対象によっていくつかの拡張方法があるが、本稿では産総研で整備している3つの方法を紹介する。すなわち、まず数 kPaから 10^{-4} Pa程度までの低真空から中真空の標準をつくる膨張法、それよりもさらに高真空・超高真領域に使用するオリフィス法、また、数 Paから数 kPa程度の低真空・低圧力に対応する、差圧計を

3.1 膨張法による低真空・中真空標準

膨張法は、ボイル・シャルルの法則を利用し、複数の真空チャンバーを用いて膨張と排気を繰り返すことで圧力を減少させていく方法である^{17,18)}。初期の圧力とチャンバーの容積比を高精度に測定することで、膨張後の圧力を精度よく計算することができる。これを校正圧力として、チャンバーに接続された真空計を校正することが可能となる。

産総研において開発した膨張法装置の概略図を **Fig. 8** に示す．この膨張法装置では初期圧力を変えることで 10^{-4} Pa から 2 kPa までを発生することができる．校正対象は隔膜真空計とスピニングロータ真空計である．

$$p = p_{\text{init}} V_A / (V_A + V_C + V_D)$$

産総研の膨張法による校正の校正・測定能力を拡張不確かさで表すと、校正器物が隔膜真空計の場合は0.18%から2.8%, スピニングロータ真空計の場合は0.32%から0.91%であ

3.2 オリフィス法による高真空標準

オリフィス法の原理図を **Fig. 9(a)** に、産総研の装置の概略図を **Fig. 9(b)** に示す¹⁹⁾．オリフィス法は、分子流が成立する条件下で、コンダクタンス C のオリフィスを備えた真空容器に流量 Q_{IN} の気体を導入した時、真空容器内の圧力 p が、流量とコンダクタンスの比 ($p = Q_{IN}/C$) で表されることを利用して、標準となる圧力を発生させる方法である．コンダクタンス C は、オリフィスの形状から気体分子運動論を用いて計算で求め、気体の流量 Q_{IN} は定圧流量計で測定する．このように発生した標準の圧力を用いて校正器物となる真空計を比較校正する方法である．

3.3 デジタル圧力計を参照標準とする低圧力標準

校正装置の概要を **Fig. 10** に示す．これは **2.3** 節で述べた差圧標準を利用する方法である．すなわち，2 台の圧力天びんを用いて校正した高精度デジタル差圧計（**Fig. 6** 参照）の低圧側ポートを真空排気して，絶対圧力型の参照標準（標準器）として使用する．この参照標準と校正器物をひとつのチャンバー（Calibration chamber）に接続して，チャンバー内に校正圧力 p を発生させ，双方の出力を比較することで校正を行う手法である．

(a)

(b)

$$Q_{IN} = Q_{OUT} = pC$$

$$p = \frac{Q}{C} \left(1 + \frac{1}{S/C} \right)$$

J. Vac. Soc. Jpn.

Fig. 10 Schematic drawing of low pressure calibration system using digital reference standard.

ときのライン圧力は絶対圧力100 kPaである。一方、低圧側ポートを排気することはつまり、ライン圧力を0 Paにすることに相当する。出力がライン圧力に依存する差圧計もあるため、参照差圧計の依存性については事前に精確に評価することが必要である²¹⁾。また同様に事前評価が必要な例として、加圧手順による影響も挙げられる。差圧標準での校正は通常、ゼロ点のドリフトの影響を低減させるために、校正圧力点ごとに差圧と差圧ゼロの測定を交互に繰り返す。一方で低圧力の比較校正においては、通常、校正圧力は低圧力から高圧力へ方向に変化させる。加圧を続けることで出力値がドリフトする圧力計もあるため、加圧時間や加圧手順などの加圧方法の違いは十分に考慮することが重要である。

この方法による校正の不確かさは、基になる差圧標準の不確かさ、またライン圧力依存性に起因する不確かさなどを考慮して評価されている。校正・測定能力は、絶対圧力1 Paから1 kPaの圧力範囲では拡張不確かさ $(120 + 20p)$ mPa (p [kPa] は校正圧力)、1 kPaから10 kPaでは $(150 + 55p)$ mPaである。

3.4 無回転ピストンを用いる圧力天びん

この装置は低圧力を発生可能なユニークな圧力天びんの種類である^{22,23)}。海外の一部の国家計量標準機関においては、低圧力・低真空の標準器として使用されている²⁴⁾。

装置の概略図を Fig. 11に示す。この装置では、ピストンの上下の力をバランスさせる点は従来の圧力天びんと同様であるが、上部の電子質量天びんにピストンが懸架される構造のためピストンの自重を打ち消すことができ、数 Pa 程度の低い圧力から発生・測定を行うことが可能である。また、従来の圧力天びんでは、ピストンがシリンダの内部で回転することでピストンとシリンダの物理的接触を避けるようになっているが、この圧力天びんではピストンは回転しない。ピストンは単純な円筒形であるが、シリンダは中央部分でピストンとの隙間が大きくなるように内面にテーパがついている。このシリンダの隙間の大きい部分に外部から潤滑用のガ

Fig. 11 Schematic of Force Balanced Piston Gauge²³⁾.

ス (lubrication pressure: P_{lub}) を流すことで調心作用をもたせ、ピストンを回転させることなくシリンダの中心に浮かせる工夫がされている。

図において、ピストンの上下にそれぞれ測定圧力 P_{hi} 、参照圧力 P_{ref} を印加すると、これらの圧力差が質量天びんに荷重される。この力をピストンの有効断面積で除することによって圧力差が算出される。その際、 P_{ref} を真空排気すると、絶対圧力の数 Pa から15 kPa 程度が発生可能となる。

この装置を一次標準として用いるためには、ピストンの直径およびピストンとシリンダの隙間の幾何形状から有効断面積を評価する必要がある。また、重錘形圧力天びんと発生圧力を比較することにより、本装置の有効断面積を間接的に評価することも可能である。

4. ユーザの真空計に値をつなげる体系と制度

ここまでは、産総研が維持している圧力真空標準について概説してきた。本章では、その国家標準をユーザが所有する圧力計・真空計につなげていく方法について述べる。

第2章で示した Fig. 2にある通り、国家標準は校正の連鎖を通じてユーザのもつ現場計測器につなげられていく (トレーサビリティ・チェーン)²⁵⁾。この校正の信頼性を担保する制度として、わが国においては、独立行政法人製品評価基盤機構 (NITE) で適合性認定分野を担当している認定センター (International Accreditation Japan: IAJapan) が運営するいくつかの認定プログラムがあり、産総研では計量法に基づく計量トレーサビリティ制度である JCSS (校正事業者登録制度: Japan Calibration Service System)²⁶⁾ を技術的側面から支援している。校正事業者がこの制度に登録する際には、計量法関係法規及び 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) 等を基準に、事業者の品質システムや校正方法、不確かさの見積もり等が要求事項に適合しているかどうかについて審査が行われる。審査を経て

Fig. 12 Symbols of ILAC-MRA and JCSS accreditation.

JCSSに登録された校正事業者は Fig. 12 右側の“JCSS”の標章を付した校正証明書を発行することができ、この標章のある校正証明書は自動的に日本の国家標準にトレーサブルであることが保証される。なお、特定標準器または特定副標準器による校正は小文字で“jcss”と表される (Fig. 2 を参照された)。

IAJapan は校正機関・試験所の国際的な集まりである国際試験所認定協力機構 (ILAC) の相互承認協定 (MRA) に署名している。そのため、国際 MRA に対応した審査を受けて登録された校正事業者は、Fig. 12 全体に示すような ILAC MRA 付き JCSS シンボルの入った校正証明書を発行することができる。この校正証明書は、国際 MRA に加盟した国々では、その国のトレーサビリティ制度において発行された校正証明書と同等に扱われる (Fig. 13)。

2016年8月現在、圧力の区分に登録されている校正事業者は圧力計では18者、真空計では2者で、これらの事業者によって、圧力区分全体で平成27年度には年間約3000件の校正証明書が発行されている。登録事業者は IAJapan のウェブサイト²⁶⁾において検索することができ、ここで事業者の校正可能な計量器の種類や校正範囲、最高測定能力などについても知ることができる。

5. トレーサビリティについて

前章では、計量トレーサビリティ体系の中で、校正の連鎖の信頼性を確保する方法として利用できる制度を紹介したが、本章では改めてトレーサビリティについて記す。

計量トレーサビリティとは、計測器の測定結果やそれを校正する標準が、校正の切れ目のない連鎖によって最終的に国家標準までたどれることを確実にすることである²⁷⁾。これをユーザの計量器において実現するための方法が前章で紹介した制度であり、登録された校正機関による校正を利用することによって、途中の校正の連鎖を意識することなくトレーサビリティを確保することが可能となる。すなわち、エンドユーザの保有する計測器に JCSS などの標章のついた校正証明書が付帯していれば、その計測器は国家標準につながった校正を受けていることになるのである。したがって、JCSS 標章の校正証明書には本来、国家標準までのトレーサビリティを記した用紙を添付する必要はない。

第2, 3章で述べた通り、産総研における圧力と真空の標準器はすべて国家標準にトレーサブルに管理されている。また、標準器を使用して校正を行う際に使用する計測器類もすべて、それぞれの量の国家標準にトレーサブルになるように定期的に校正を受け、維持・管理されている。

Fig. 13 Concept of MRA.

6. 国際比較の現状

第4章で、ILAC MRA 付き JCSS シンボルの入った校正証明書が国際 MRA に加盟している他国においても有効であることを述べた。これは Fig. 13 にも示されている通り、各国のトレーサビリティ・チェーンにおける上位機関同士の同等性が確認されている前提のもとで成り立っている。このため、わが国の国家標準が他国の標準と一致しているかどうかを検証することは非常に重要である。

国際比較には、国際度量衡局 (BIPM) 及び国際度量衡委員会 (CIPM) の運営する国際比較、各地域計量組織において実施される国際比較などがある。それぞれに数多くの分野の国際比較があり、圧力真空の分野においては、広い圧力範囲で様々な国際比較が実施されてきている。特にアジア地域の計量組織であるアジア太平洋計量計画 (APMP) では、数々の国際比較を産総研が幹事機関となって実施してきている。これらの国際比較は BIPM においてデータベース化されており、ウェブサイト²⁸⁾で概要や結果の報告書などを参照することができる。

圧力真空の国際比較においては、通常、詳細に特性評価された圧力計や真空計などを仲介器として巡回させ、参加国の国家計量機関が、その保有する標準を用いて仲介器に対して校正を行う。そして最終的に、幹事機関が各参加機関の校正値を取りまとめ、仲介器の安定性などを考慮しながら参照値と各校正値との整合の度合いを計算することになる。

仲介器の特性は各国を巡回中に変化することがある。そのため、長期間にわたる各種特性の経時変化について詳細な評価が必要となることがある。また、仲介器は巡回中の事故などにより、ときに破損したりすることもあるため、予備の器物の確保やその特性評価などの準備も必要となる。さらに、参加国数の多い国際比較においては、スケジュール調整やそれぞれの国での通関手続きの手配など、運送に係わる各種手続きも多く発生する。最終的な国際比較の報告書の作成を含

Table 1 List of interlaboratory comparisons that NMIJ participated in.

Identifier	Kind	Pressure range	Year
CCM.P-K11	Hydraulic gauge	20 MPa–100 MPa	1981–1989
CCM.P-K10	Gas absolute	10 kPa–140 kPa	1983–1995
CCM.P-K8	Hydraulic gauge	100 MPa–500 MPa	1996–1999
CCM.P-K1.c	Gas gauge	80 kPa–7 MPa	1998–1999
CCM.P-K7	Hydraulic gauge	10 MPa–100 MPa	2003–2005
CCM.P-K13	Hydraulic gauge	50 MPa–500 MPa	2008–2011
CCM.P-K4.2012	Gas absolute	1 Pa–10 kPa	2012–2013
APMP.M.P-K1.c	Gas gauge	0.4 MPa–4 MPa	1998–2001
APMP.M.P-K6	Gas gauge	20 kPa–105 kPa	1998–2001
APMP.M.P-K7.TRI	Hydraulic gauge	40 MPa–200 MPa	2001
APMP.M.P-K7	Hydraulic gauge	10 MPa–100 MPa	2002–2005
APMP.M.P-K5	Gas differential	1 Pa–5 kPa	2005
APMP.M.P-S8	Hydraulic gauge	100 MPa–1000 MPa	2007
APMP.M.P-K7.1	Hydraulic gauge	10 MPa–100 MPa	2007–2008
APMP.M.P-K9	Gas absolute	10 kPa–110 kPa	2009–
APMP.M.P-K13	Hydraulic gauge	50 MPa–500 MPa	2010–2013
APMP.M.P-S6	Gas gauge	10 MPa–100 MPa	2014
CCM.P-K9	Vacuum	0.01 mPa–1 Pa	1981–1987
CCM.P-K14	Vacuum	0.01 mPa–1 Pa	2010–2011
APMP.M.P-K3	Vacuum	3 μ Pa–0.9 mPa	2010
APMP.M.P-K14	Vacuum	0.01 mPa–1 Pa	2013–
CCM.P-P1	Vacuum	3 $\times 10^{-9}$ Pa– 9 $\times 10^{-4}$ Pa	2013–2015

め、国際比較の幹事機関の作業・役割は多岐にわたっている。

Table 1 にこれまで産総研（前身の機関も含む）が参加した圧力真空分野の国際比較の一覧を示す。真空から高圧力まで様々な国際比較が行われており、現在のところ、参加したすべての国際比較において、産総研の圧力・真空標準は、他国の国家計量機関の標準とよく一致していることが示されている。

上に述べた国際比較、さらにはピア・レビューと呼ばれる、他国の国家計量標準機関等の専門家による ISO/IEC 17025 に基づいた技術審査等を経て、国際度量衡委員会 (CIPM) で締結された国際相互承認協定 (CIPM-MRA) における国家計量機関の同等性が確保されることになる²⁹⁾。

7. おわりに

圧力真空の国家標準がどこでどのようにつくられ、どのように管理され、さらに、どのようにユーザの真空計の校正に役立っているかについて解説した。また、校正の連鎖の信頼性を確保するための国内における標準供給制度や、国家間における計量標準の同等性確保に向けた取り組みについても紹

介した。本稿で述べた内容が、JVSJ 読者が真空計測機器の信頼性や校正の重要性について検討される際の参考として役立てば幸いである。

謝辞

このような執筆の機会を与えてくださった広島工業大学名誉教授 中山勝矢先生に心から感謝申し上げます。また、産総研圧力真空標準研究グループ各位には、適宜、内容の確認や適切なアドバイスをいただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

〔文 献〕

- 1) T. Kobata: *Netsu Sokutei*, **38** (2011) 58.
- 2) T. Kobata, M. Kojima and H. Kajikawa: *Synthesiology*, **4** (2011) 209.
- 3) NMIJ, <http://www.nmij.jp/> (Last accessed: 2016-08-15)
- 4) A. Ooiwa: *Journal of SICE*, **48** (2009) 313.
- 5) A. Ooiwa, M. Ueki and R. Kaneda: *Metrologia*, **30** (1994) 565.
- 6) A. Ooiwa, T. Kobata and M. Ueki: *Bulletin of NRLM*, **46** (1997) 8.
- 7) A. H. Cook and N. W. B. Stone: *Phil. Trans. A*, **250** (1957) 279.
- 8) J. A. Beattie, B. E. Blaisdell, J. Kaye, H. T. Gerry and C. A. Johnson: *Proc. Am. Acad. Arts Sci.*, **74** (1941) 371.
- 9) P. F. Egan, J. A. Stone Jr., J. E. Ricker and J. H. Hendricks: *CPEM 2016 Digest*, Ottawa, Canada, 2016.
- 10) UNEP, *Minamata Convention on Mercury (Annex A)*, [http://www.mercuryconvention.org/Portals/11/documents/conventionText/Minamata Convention on Mercury_e.pdf](http://www.mercuryconvention.org/Portals/11/documents/conventionText/Minamata%20Convention%20on%20Mercury_e.pdf) (Last accessed: 2016-08-15)
- 11) S. Lewis and G. N. Peggs: *The Pressure Balance: A Practical Guide to its use*, (National Physical Laboratory, 1979).
- 12) C. Ehrlich: *Metrologia*, **30** (1993/94) 585.
- 13) C. M. Sutton: *Metrologia*, **30** (1993/94) 591.
- 14) C. M. Sutton: *Metrologia*, **23** (1986/87) 187.
- 15) M. Kojima, T. Kobata, K. Saitou and M. Hirata: *Metrologia*, **42** (2005) S227.
- 16) P. Delajoud: *Metrologia*, **36** (1999) 521.
- 17) M. Hirata: *Shinku*, **48** (2005) 599.
- 18) H. Yoshida, E. Komatsu, K. Arai, M. Kojima, H. Akimichi and T. Kobata: *ACTA IMEKO*, **3** (2014) 48.
- 19) K. Arai, H. Akimichi and M. Hirata: *J. Vac. Soc. Jpn.*, **53** (2010) 614.
- 20) M. Kojima and T. Kobata: *Proc. 28th Sensing Forum*, Hiyoshi, 2011.
- 21) M. Kojima and T. Kobata: *Proc. 29th Sensing Forum*, Hitachi, 2012.
- 22) A. Ooiwa: *Metrologia*, **30** (1993/94) 604.
- 23) DH Instruments: *FPG8601/VLPC Operation and Maintenance Manual* (2007).
- 24) J. Tesar, P. Repa, D. Prazak, Z. Krajicek and L. Peksa: *Vacuum*, **76** (2004) 491.
- 25) EURAMET: *Metrology—in short*, ed. NMIJ and IAJapan (2009) 3rd edition, [in Japanese].
- 26) IAJapan, *JCSS*, <http://www.nite.go.jp/iajapan/jcss/index.html> (Last accessed: 2016-08-15)
- 27) BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML: *International vocabulary of metrology (VIM)* 3rd edition, (2008) 29.
- 28) BIPM, *The BIPM key comparison database*, <http://kcdb.bipm.org/> (Last accessed: 2016-08-15)
- 29) I. Fujima: *Measurement Standards and Metrology Management*, **56** (2006) 8.