

圧力標準の開発・維持・供給と信頼性向上

小島 時彦

(受取日：2011年1月21日，受理日：2011年2月27日)

Development, Maintenance and Dissemination of Pressure Standard and Improvement of Reliability

Tokihiko Kobata

(Received Jan. 21, 2011; Accepted Feb. 27, 2011)

The National Metrology Institute of Japan (NMIJ) of the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) maintains the pressure standards for Japan, which have been established using the most-advanced technology, and disseminates them to industry and society. NMIJ is also conducting various activities, mainly concerning research and development to improve and upgrade the standards and the calibration techniques that can support advanced industrial technology, the establishment and improvement of a traceability system for the standards in Japan, and the checking of the international equivalence of the standards. In this article, the pressure standards, the calibration principles and methods, NMIJ calibration services, the traceability system in Japan and the activities for improving the reliability of the pressure standards are described.

Keywords; pressure standard, calibration, traceability, comparison, pressure balance

1. はじめに

圧力の計測は，社会や産業活動において欠くことのできない重要な計測のひとつである。具体的には，プロセス計測・制御等をはじめとして，気象観測における大気圧測定，建造物の空調管理，航空機の高度測定，各種環境測定，また自動車の内燃機関やタイヤ空気圧の圧力管理，製造・プラント設備の管理，あるいは医療・健康管理では血圧計など，様々な場面で圧力の計測が行われている。そのような現場の圧力計測には，多種多様な圧力計が用いられている。

圧力は単位面積あたりに働く法線方向の力で定義される量であり，簡単には式 $P = F/A$ で求められる。ここで， P は圧力， A は力が作用する面積， F はその面に働く法線方向の力である。国際単位系 (International System of Units: SI) による圧力の単位としては，Pa 及び N m^{-2} ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N m}^{-2}$) が用いられている。また，特定の分野においてのみ使用が認められている非SI単位としては，bar ($1 \text{ bar} =$

100 kPa)，mmHg ($1 \text{ mmHg} \approx 133.322 \text{ Pa}$) 等がある。他にも多くの異なる表記の圧力単位が科学・産業の圧力計測の現場において実際に用いられている。圧力は通常の計測においては，2つの圧力の差を測定することが多く，片方の圧力の基準をどのようにとるかで，その計測表示の種類が変わる。基準に，完全真空 (又は絶対真空) をとる場合は絶対圧力，大気圧をとる場合はゲージ圧力，これら以外の任意の圧力をとる場合は差圧と分類される。圧力の計測を行う場合には，これらの種類をきちんと区別する必要がある。また，ゲージ圧力の基準となる大気圧は通常，時間及び場所により変化することにも留意すべきである。Fig.1に圧力の計測表示上の種類を示す。

産業技術総合研究所の計量標準総合センター (National Metrology Institute of Japan: NMIJ) では，各種計測の信頼性を確保するため，基準となる計量標準の整備を担っている。^{1,2)} 圧力分野においては，我が国の圧力標準を最先端の技術を用いて設定し，それら標準の維持・管理・供給を

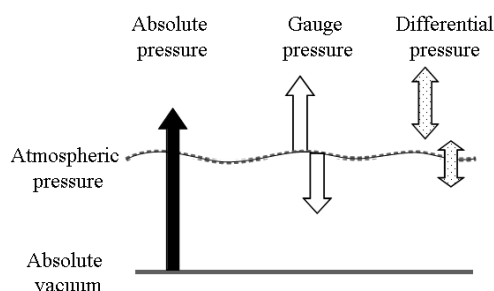


Fig.1 Kinds of pressure measurements – absolute pressure, gauge pressure and differential pressure.

行っている。NMIJで整備している圧力標準は、気体・液体を媒体とする静止流体の圧力標準である。現在、液柱形圧力計及び重錘形圧力天びんを基本とする多数の圧力標準器を用いて、大気圧の約10万分の1の圧力（1 Pa）から約1万倍の圧力（1 GPa）までの国家標準を整備し、産業界をはじめ社会の各方面へ供給している。さらに、産業界からの圧力標準に対する高度化への要望に応えるため、その範囲拡張と信頼性の向上にも取り組んでいる。尚、真空場の圧力に関しては、同じNMIJで真空標準として整備されているが、その詳細については別稿³⁾に譲りたい。

本稿では、圧力標準の概要とその信頼性を確保し、向上させるために取り組んでいる活動の内容について紹介する。はじめに圧力標準器として用いている重錘形圧力天びんの原理とその比較校正方法について述べる。次に、圧力標準器を用いた各種圧力計の校正について簡単に説明する。その後、NMIJの圧力校正サービス内容及び我が国における圧力標準のトレーサビリティを確保するための国内標準供給体制について述べる。さらに、圧力標準の国際同等性を確認するための国際比較、計量標準の国際相互承認の枠組みについて概略を述べる。最後に、圧力標準のトレーサビリティの拡充を目指して開発した圧力遠隔校正の内容を簡単に紹介する。

2. 圧力標準器と比較校正

圧力を正確に発生する標準器として様々な装置が提案されてきているが、主な装置として液柱形圧力計と重錘形圧力天びんを挙げることができる。⁴⁾ 液柱形圧力計は、測定圧力と釣り合う液柱の密度 ρ とその高さ H から、圧力 P を原理式 $P = \rho g H$ により求める装置である。ここで、 g は重力加速度である。我が国の圧力標準の根幹となっている光波干渉式標準圧力計は、液柱形圧力標準器である。以下では、もう一方の形式である重錘形圧力天びんについて詳しく述べる。

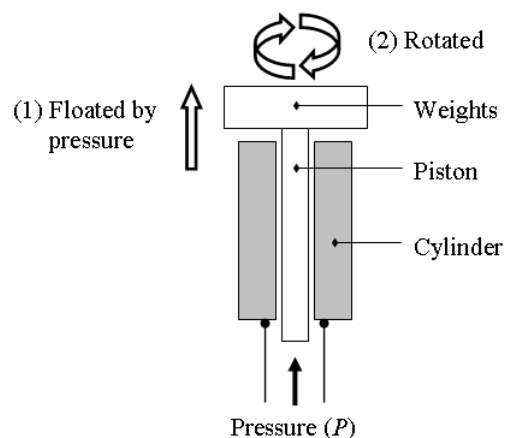


Fig.2 Explanatory drawing of pressure balance

2.1 重錘形圧力天びん

重錘形圧力天びん (Pressure Balance) は、圧力校正の現場で標準器として広く用いられている装置である。重錘形圧力天びんの計量・技術上の要件、試験方法、使用方法及び使用条件については、JIS規格「重錘形圧力天びん」(JIS B 7610)⁵⁾ 及び国際法定計量機関 (International Organization of Legal Metrology: OIML) 規格「Pressure Balance」(OIML R 110)⁶⁾ を参照されたい。重錘形圧力天びんの発生圧力はとても安定であり、良いものでは圧力を相対的に 10^{-6} よりも安定に発生できる。重錘形圧力天びんの基本的な構成要素は、Fig.2に示すピストン・シリンダと重錘である。通常、重錘形圧力天びんの使用時には、ピストンと重錘による重力が負荷されたピストンを圧力により適正な位置に浮上させた後、回転させる。そうすることにより、ピストンとシリンダ間の物理的な接触が低減され、重錘等による重力が効率よく圧力に変換される。

重錘形圧力天びんの圧力基準高さ（通常はピストン底面）における発生圧力 P は次式で表される。

$$P = W / A + P_0 \quad (1)$$

ここで、 W はピストンと重錘による重力が主成分となる力、 A はピストン・シリンダの有効断面積、 P_0 は装置の周囲圧力（参照圧力）である。重錘形圧力天びんの発生圧力を正確に求めるためには、式(1)の W 、 A 、 P_0 を十分に小さい不確かさで測定・評価する必要がある。より正確には、式(1)の W は次式で表される。

$$W = M g (1 - \rho_a / \rho_m) + \gamma C \quad (2)$$

ここで M はピストンと重錘の質量、 ρ_a は空気密度、 ρ_m はピストンと重錘の密度、 γ は圧力媒体の表面張力、 C はピスト

ンの円周長である。式(2)からわかるように、 W はピストンと重錘の体積による空気の浮力補正、圧力媒体の表面張力による力を含んでいる。

重錘形圧力天びんの発生圧力を正確に決定するためには、上記した式(1)における有効断面積 A の決定が特に重要となる。一般的に、 A は圧力と温度の関数であり、その評価方法はピストン・シリンダの構造によって異なる。代表的なピストン・シリンダの構造としては、単純型、内包型、隙間制御型の3つが挙げられる。⁴⁾最も広く使用されている単純型ピストン・シリンダの有効断面積は圧力依存性が線形であることを仮定して次式で表される。

$$A(P, t) = A(0, t_r) \{1 + \lambda P\} \{1 + \alpha_s(t - t_r)\} \quad (3)$$

ここで $A(P, t)$ は圧力 P 、温度 t ℃でのピストン・シリンダの有効断面積、 $A(0, t_r)$ は圧力0 Pa、参照温度 t_r ℃での有効断面積、 λ は有効断面積の圧力変形係数、 α_s はピストンとシリンダの線膨張係数 α_p と α_c の和である。 $A(0, t_r)$ と λ は、通常、上位標準器との比較校正により求めることができる。また、近年、ピストン・シリンダ各々の詳細な形状（直径・真円度・円筒度）とヤング率、ポアソン比等の材料特性データから、有限要素法を用いて、より小さい不確かさで $A(0, t_r)$ と λ を求める手法が先進国の計量標準機関で研究開発されている。NMIJでは、 λ を実験的に正確に求めるために、ピストン・シリンダ間の隙間を能動的に制御可能な隙間制御型の重錘形圧力天びんを用いている。⁷⁾この型の圧力天びんでは、ピストンとシリンダの隙間を制御するための圧力がシリンダ外周面に与えられる。隙間制御型ピストン・シリンダの有効断面積の具体的な評価方法に関しては多数報告されている。^{8,9)}

重錘形圧力天びんを圧力標準器として用いるためには、多くの特性値を校正し、管理する必要がある。NMIJで使用している圧力標準用機器の特性値は、質量、長さ、温度等の国家標準に対してトレーサブルになるように校正・管理されている。校正室の重力加速度値も国家標準にトレーサブルな機器により測定されている。各圧力標準器は定期的に後述の比較校正を実施し、発生圧力の短期・長期安定性を評価している。また、標準器群の管理により、標準器間の整合性を確認している。重錘形圧力天びんの発生圧力の信頼性は、機器の精度、圧力範囲、さらに管理手法により異なるが、世界中の国家計量標準機関（National Metrology Institute: NMI）で主張している重錘形圧力天びんを用いた圧力標準の最良の相対不確かさは、概ね 1×10^{-5} のオーダーである。世界の先端研究では、重錘形圧力天びんの発生圧力を相対標準不確かさ 1×10^{-6} 以下で決定することを目指した開発も行われている。¹⁰⁾

2.2 重錘形圧力天びんの比較校正

重錘形圧力天びんの校正及び特性評価には、比較校正（クロスフロート）と呼ばれる方法が用いられている。比較校正の概略図をFig.3に示す。2台の圧力天びんを連通配管し、発生圧力を比較する。比較校正により、発生圧力が既知の標準器を用いて、被校正器の未知の発生圧力を校正することができる。通常の比較校正では、両圧力天びんの発生圧力が等しくなり平衡状態が得られるまで、どちらかの圧力天びんに微小な分銅が負荷され調整される。両圧力天びんの発生圧力が等しいか否かを判断するために、いくつかの方法が提案されてきているが、代表的な方法として、ピストンの降下速度を観測する方法、発生圧力差を差圧計で観測する方法、高精度圧力計を比較器とした置換比較法¹¹⁾が挙げられる。いずれの方法も、圧力天びんと使用される比較校正システムの性能が十分に良ければ、相対的に 10^{-6} のオーダーで平衡状態の決定が可能である。

第一の方法は、Fig.3に示した装置構成でピストンの降下速度を観測する方法である。降下速度はピストン位置の時間変化から得られる。この方法では、2台の圧力天びんからの配管が接続されたバルブを開いたときに測定される各圧力天びんのピストン降下速度が、そのバルブを閉じたときに測定される各圧力天びん固有の自然降下速度と比較される。もし、降下速度が異なる場合には、いずれかの圧力天びんの微小分銅が調整され、降下速度が一致するまで測定が繰り返される。この方法は、伝統的に用いられている方法であるが、測定結果がシステムの構成、校正作業者の技術力により変化することもあるので注意が必要である。

第二の方法は、2台の圧力天びんの発生圧力差を感度の良い差圧計で観測する方法である。この方法においては、差圧計により測定される両圧力天びんの圧力差が零と測定されるまで微小分銅が調整される。

第三の方法は、高精度圧力計を比較器とした置換比較法である。概略図をFig.4に示す。この方法では、2台の圧力天びんの発生圧力を定容積バルブの切り替えにより交互に高精度圧力計で測定する。各圧力天びんの発生圧力が別々に測定されるので、発生圧力の安定度を個別に評価できる。

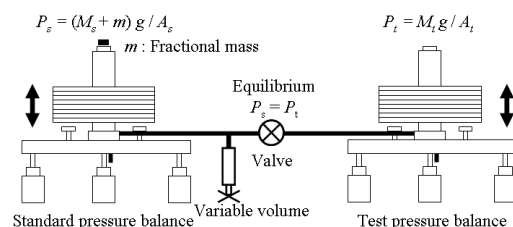


Fig.3 Cross-float measurement by fall-rate method.

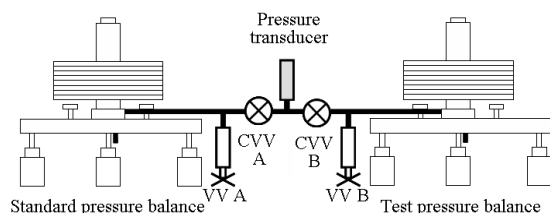


Fig.4 Cross-float system using a pressure transducer and two constant volume valves (CVVs), VV: Variable volume.

また、両圧力天びんの発生圧力がある程度、非平衡であっても、平衡状態に必要な微小分銅が求められるという利点がある。¹¹⁾

3. 圧力計の校正と不確かさ評価

3.1 圧力計の校正

校正とは、「仕様の条件下で、測定標準又は認証標準物質により与えられる不確かさ付きの量の値と、これに対応する試験中の測定器、測定系、又は標準物質による不確かさ付きの指示値との間の関係を確定するための一連の作業」と「国際計量基本用語集」(International Vocabulary of Metrology: VIM)¹²⁾で定義されている。

圧力計の校正は、標準器により被校正器に与えられた印加圧力の値と被校正器の表示値との直接比較により行われる。信頼性の高い校正結果を得るためには、国家標準にトレーサブルな校正済み標準器を使用することが望ましい。標準器又は被校正器となる圧力計測機器の種類は、大きく重錘形圧力天びん、液柱形圧力計、デジタル圧力計、機械式圧力計（ブルドン管圧力計¹³⁾）である。

Fig.5に、重錘形圧力天びんを標準器、デジタル圧力計を被校正器として圧力校正を行う場合の装置構成の一例を示す。デジタル圧力計とは、デジタル表示装置又はデジタル信号出力を備えた圧力計のことである。安定な圧力が標準器の圧力基準高さにおいて発生され、その圧力が配管を通じて被校正器に与えられるとき、被校正器の圧力基準高さにおいて、その印加圧力 P' は次式から求められる。

$$P' = P + (\rho_f - \rho_a) g h \quad (4)$$

ここで、右辺第二項は標準器と被校正器の圧力基準高さの差（ヘッド差） h に起因する圧力補正項である（ h は標準器が高い場合を正）、 ρ_f は圧力媒体の密度、 ρ_a は空気密度、 g は重力加速度である。特に、圧力媒体として液体を使用しているときは ρ_f が大きくなるので、 P の値が比較的小さく、 h の値が大きいか、相対的に圧力補正項の影響が大きくなる。例えば、圧力媒体として水（ $\rho_f \approx 1000 \text{ kg m}^{-3}$ ）を用いて1 MPaを発生しているとき、 h が1 mであれば、補

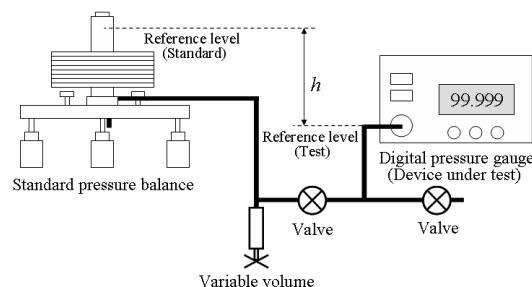


Fig.5 Setup for calibration of digital pressure gauge.

正項の大きさは P の約1%にもなる。

3.2 不確かさ評価

測定した量の信頼性を表すために、精度、誤差等の表現が用いられてきたが、使用する人、状況による定義の相違等、実際の運用においては混乱があった。これらの問題を解決するために、1993年に世界の計量に関する7国際機関により、「計測における不確かさの表現に関するガイド」(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: GUM)が作成され、その後、改訂されてきている。¹⁴⁾ GUMでは測定の信頼性をあらわすために“不確かさ”という指標を採用している。この指標を用いた場合、その値が小さいほど、測定の信頼性が高いということになる。現在、NMIを中心に世界中で、測定量の信頼性は不確かさで表されており、NMIJにおいても、GUMに準拠した不確かさ評価を行うことにより、開発・維持・管理・供給している校正量・測定量の信頼性を評価している。

以下に、圧力計校正の不確かさ評価の概要を述べる。検討すべき不確かさ項目は、標準器・ヘッド差・被校正器に係わる不確かさに分けられる。標準器及び被校正器に係わる不確かさ要因は、用いる機器の種類により異なる。したがって、校正に使用する標準器と被校正器に応じて不確かさ要因を考慮しなければならない。ここでは、圧力計校正の不確かさ評価で考慮すべき主要な項目についてのみ述べる。

3.2.1 標準器とヘッド差に係わる不確かさ

式(4)で求められる印加圧力 P' の不確かさは、標準器及びヘッド差に係わる不確かさの二乗和の平方根から求められる。使用する標準器が事前に校正されている場合、その際に発行された校正証明書等により、標準状態、あるいは一定の環境条件における発生圧力値を不確かさとともに得ることができる。ただし、標準器が、校正証明書に記載された環境条件とは異なる状況で使用される場合、環境条件の違いによる影響を考慮しなければならない。例えば、重錘形圧力天びんの場合、重力加速度、標準器温度、空気密度、参照圧力、設置状況などによる影響が挙げられる。空気密

度は、空気浮力の評価に必要であるが、この量を求めるためには、気温、相対湿度、大気圧などの測定も必要になる。このように、標準器に係わる不確かさを求めるには、校正証明書に記載された発生圧力の不確かさに加えて、以上に述べた校正時と使用時の環境条件の違いによる補正の不確かさも考慮しなければならない。したがって、補正量を不確かさとともに評価していなければ、自らが実施する校正において、入手した校正証明書の不確かさをそのまま用いることはできない。

ヘッド差に起因する圧力補正項の不確かさは、式(4)右辺第二項の各パラメータの不確かさから求められる。

3.2.2 被校正器に係わる不確かさ

ここでは、被校正器として、デジタル圧力計を用いた場合の不確かさ要因について述べる。デジタル圧力計の主な不確かさとしては、測定値のばらつきによる不確かさ、表示分解能及び安定性による不確かさ、温度特性に起因する不確かさ、姿勢特性に起因する不確かさ、出力の直線性に起因する不確かさ、ヒステリシスによる不確かさ、応答性に起因する不確かさなどが挙げられる。温度特性に起因する不確かさは、被校正器の温度特性の不確かさと周囲温度の測定の不確かさから計算される。校正実施環境の温度が不安定な場合、被校正器の温度特性の仕様によっては、大きな不確かさ要因と成り得る。デジタル圧力計の校正方法の詳細については、JIS規格「デジタル圧力計の特性試験方法及び校正方法」(JIS B 7547)¹⁵⁾を参照されたい。

4. 圧力標準供給の概要

4.1 NMIJ圧力校正サービス

現在、5 kPaから20 MPaの気体ゲージ圧力、10 Paから20 MPaの気体絶対圧力、1 Paから10 kPaの気体差圧、1 MPaから1000 MPaまでの液体圧力の標準をNMIJで整備し供給している。NMIJ圧力校正サービスの概要をTable 1に示す。2種類の校正対象機器（重錘形圧力天びん、高精度圧力計〔デジタル圧力計、機械式圧力計等〕）と4種類の圧力校正方法（気体ゲージ圧力、気体絶対圧力、気体差圧、液体圧力）の組み合わせから、全部で7種類の校正サービスを実施している。圧力校正サービスに使用する圧力媒体としては、気体圧力校正においては純窒素（N₂）、液体圧力校正においてはセバシン酸ジオクチル（dioctyl sebacate）を用いている。これらは、後述する圧力の国際比較においても、標準的に使用されている圧力媒体である。

Table 1の①、③、⑥は、重錘形圧力天びんを対象とした校正である。これらは、JIS B 7610⁵⁾及び欧州認定協力機構（European Co-operation for Accreditation: EA）規格「Calibration of Pressure Balance」(EAL-G26)¹⁶⁾に準拠した方法により実施している。①では、差圧計を介

Table 1 Outline of pressure calibration services at NMIJ.

	Calibration item	Kind	Range	Medium
①	Pressure balance	Gas gauge pressure	5 kPa ~ 7000 kPa	Nitrogen
②	Pressure measuring device		5 kPa ~ 20 MPa	
③	Pressure balance	Gas absolute pressure	5 kPa ~ 7000 kPa	
④	Pressure measuring device		10 Pa ~ 20 MPa	
⑤	Pressure measuring device	Gas differential	1 Pa ~ 10 kPa	Diocetyl sebacate
⑥	Pressure balance	Hydraulic pressure	1 MPa ~ 500 MPa	
⑦	Pressure measuring device		1 MPa ~ 1000 MPa	

した比較校正法を用いている。③、⑥では、高精度圧力計を比較器とする置換比較法¹¹⁾を用いている。Table 1の②、④、⑤、⑦は、高精度圧力計を対象とした校正である。これらは、JIS B 7547¹⁵⁾に準じた方法により実施している。②、④の校正圧力範囲7 MPaから20 MPaにおいては、液体潤滑型重錘形圧力天びんを標準器として用いている¹⁷⁾。また、④の校正圧力範囲10 Paから10 kPaにおいては、詳細に特性評価されたデジタル圧力計を標準器として用いている。⑤は、2台の重錘形圧力天びんを用いた差圧標準¹⁸⁾による差圧計の校正サービスである。また、⑦は、液体圧力1 GPaまでの校正サービスである。NMIJ圧力校正サービスの校正結果は、校正証明書によって報告される。

現在、NMIJで行っている圧力標準の校正サービスは、ISO/IEC 17025¹⁹⁾の要求事項に基づく品質システムにより運用されている。校正対象機器毎の校正の方法、校正手順、不確かさの見積り方法等は全て内部校正マニュアルとして文書化されている。採用している圧力校正方法は、世界的に公知の国際規格^{6,16)}、及び国内規格^{5,15)}等に準拠し、その妥当性も確認されている。また、それらの校正方法から得られた結果に問題がないことは後述する国際比較の結果報告においても確認されている。

NMIJで実施している圧力校正サービスの主要部分については、既に外国標準研究機関からの審査員による技術的レビュー、及びISO/IEC 17025の適合審査を終了し、国内認定機関である独立行政法人製品評価技術基盤機構よりASNITE校正事業者²⁰⁾の認定を受けている。校正サービスを通して、ユーザーに提供できる最良の不確かさは校正・測定能力（Calibration and Measurement Capabilities: CMC）で示される。ASNITEで認定されているNMIJ校正サービスの最新の校正・測定能力は製品評価技術基盤機構のウェブサイト²¹⁾の適合性認定分野、ASNITEの項に記載

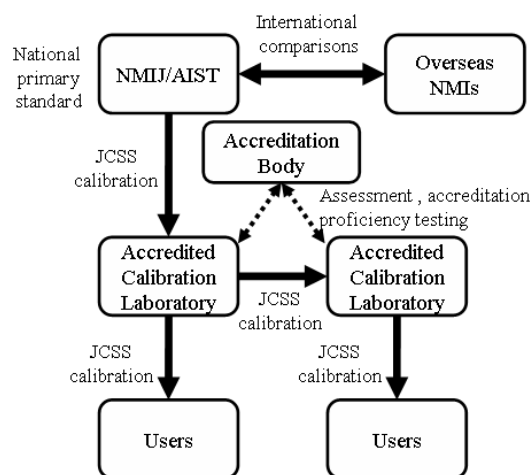


Fig.6 National standard provision scheme under JCSS.

されている。

4.2 圧力標準のトレーサビリティ

トレーサビリティは計量分野において、近年非常に重要なものとなっている。例えば、ISO/IEC 9000 シリーズにおいては測定の実験室のトレーサビリティに対する要求があり、また後述するように国際商取引においては計測機器の校正証明書の実験室のトレーサビリティが必要とされている。「計量トレーサビリティ」とは「測定の持つ特質であり、途切れない校正の連鎖により、測定結果が計量参照まで関係付けられること。それぞれの校正は、測定不確かさをもたらす。」と定義されている。¹²⁾

国内の計量トレーサビリティ制度は、現在施行されている計量法において校正事業者登録制度 (Japan Calibration Service System: JCSS) として1993年から実現されている。Fig.6にその体系の概念図を示す。校正事業者は国家計量標準にトレーサブルな標準を持つとともに、共通の要求事項、適用指針により品質システムを構築し、認定機関から審査を受けることを求められている。²²⁾ NMIJでは、これら登録審査にも技術的側面から協力を行っている。

現在、産業界の現場及び国内ユーザーへの圧力標準供給は、Fig.6に示したように、JCSS制度により登録された圧力校正登録事業者を中心に行われている。それら登録事業者と登録内容の一覧は、前述した製品評価技術基盤機構のウェブサイト²¹⁾の適合性認定分野、JCSSの項に記載されている。

5. 国際同等性の確認と国際相互承認

5.1 国際同等性の確認

国家計量標準が物理的な定義によって確立されたとして

Table 2 Key and supplementary pressure comparisons in which NMIJ participated.

Identifier	Kind	Pressure range	Year
CCM.P-K11	Hydraulic	20 MPa - 100 MPa	1981-1989
CCM.P-K10	Gas absolute	10 kPa - 140 kPa	1983-1995
CCM.P-K8	Hydraulic	100 MPa - 500 MPa	1996-1999
CCM.P-K1.c	Gas gauge	0.08 MPa - 7 MPa	1998-1999
CCM.P-K7	Hydraulic	10 MPa - 100 MPa	2003-2005
CCM.P-K13	Hydraulic	50 MPa - 500 MPa	2008-2011
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	40 MPa - 200 MPa	2001
APMP.M.P-K7	Hydraulic	10 MPa - 100 MPa	2002-2005
APMP.M.P-K5	Gas	1 Pa - 5 kPa	2005-2006
APMP.M.P-S8	Hydraulic	100 MPa - 1000 MPa	2007-2010
APMP.M.P-K7.1	Hydraulic	10 MPa - 100 MPa	2007-2009
APMP.M.P-K9	Gas absolute	10 kPa - 110 kPa	2009-
APMP.M.P-K13	Hydraulic	50 MPa - 500 MPa	2010-

も、諸外国の保有する国家計量標準との同等性を国際比較により確認する必要がある。国際比較により、各国が保有している国家標準の参照値からの偏差と主張している不確かさの関係を知ることができる。国際比較は国家標準の国際的な同等性を確保するために多くの計量標準において実施されており、それらの結果は、国際度量衡局 (International Bureau of Weights and Measures: BIPM) によって発行され、BIPM 基幹比較データベース (Key Comparison Database BIPM: KCDB)²³⁾ の Appendix B の項に登録されている。

通常の圧力の国際比較では、仲介器と呼ばれる運搬可能な装置を各国に順次移送し、その装置に各参加機関が校正値をつけることにより、各国の圧力標準の比較を行う。伝統的に標準器と同等な性能を持つ圧力天びんが仲介器として用いられることが多い。しかしながら、近年、軽量化・低コスト化が可能なデジタル圧力計を複数備えた仲介器が使用される機会も増えている。²⁴⁻²⁷⁾

NMIJでは、圧力標準の国際的な整合性を確認するために、国際度量衡委員会 (International Committee for Weights and Measures: CIPM) の質量関連量諮問委員会 (Consultative Committee for Mass and Related Quantities: CCM)、及び、アジア太平洋計量計画 (Asia Pacific Metrology Programme: APMP) の質量関連量技術委員会 (Technical Committee for Mass and related quantities: TCM) が実施する基幹比較や他国間との国際比較に参加してきた。APMPはアジア地域の地域計量組織 (Regional Metrology Organization: RMO) である。これまでに参加した国際比較を実施中のものを含め、Table 2に示す。幾つかの圧力の国際比較においては、NMIJは単に参加するだけでなく、幹事所として、運営実施に協力している。²⁴⁻²⁷⁾ 国際比較の幹事所は、実施スケジュールの作成、測定手順書の準備、仲介器の準備・特性評価、結果のとりまとめ、

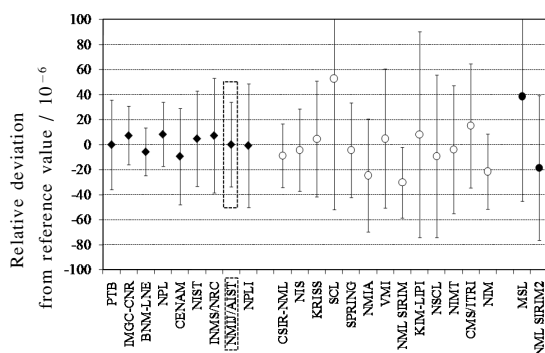


Fig.7 Results of CIPM and two RMO Key comparisons at 100 MPa (◆: CCM.P-K7, ○: APMP.M.P-K7, ●: APMP.M.P-K7.1).

最終報告書の作成など多くの作業を行う必要がある。

圧力国際比較の例として、圧力範囲 10 MPa (約 100 気圧) から 100 MPa (約 1000 気圧) の液体ゲージ圧力標準の国際同等性を確認するために、近年実施された 3 つの国際比較 (CCM.P-K7²⁸⁾, APMP.M.P-K7²⁴⁾, APMP.M.P-K7.1²⁶⁾ の結果の一例を紹介する。3 つの国際比較から得られた各参加機関の 100 MPa における比較結果を、**Fig.7** に示す。横軸に参加機関、縦軸に国際比較参照値からの各機関の相対偏差が示されている。誤差範囲は各機関の報告から計算された拡張不確かさ (包含係数 $k=2$) を表している。同じ国際比較から得られた結果は同じ種類のマーカーで示されている。**Fig.7** から、この圧力における各参加機関の圧力標準の国際同等性を知ることができる。NMIJ の圧力標準は、参照値からの偏差が殆ど無く、不確かさも各機関の値と同等であった。したがって、現在、当該圧力範囲で維持・管理・供給している日本の圧力標準が、優れた国際同等性を有していることを確認できる。

以上のように、参加してきた国際比較の結果から、NMIJ の圧力標準が主張する不確かさのレベルで参照値と同等であることが確認されている。今後予定される種々の国際比較にも積極的に参加し、我が国の圧力標準の国際同等性を定期的に確認していく予定である。

5.2 国際相互承認

各国 NMI の計量標準の同等性を認め、相互に承認するための計量標準の国際相互承認協定 CIPM MRA が 1999 年 10 月に約 40 の NMI により締結された。²⁹⁾ 2011 年 2 月現在、参加機関数は 81 機関である。CIPM MRA において、参加国 NMI の国家計量標準の同等性を NMI 間の国際比較等により確認し、また NMI が発行する校正証明書を相互に承認する枠組みが構築されている。参加機関の承認された校正・測定能力は、前述した BIPM 基幹比較データベース²³⁾ の Appendix C の項に登録され、技術資料として利用されてい

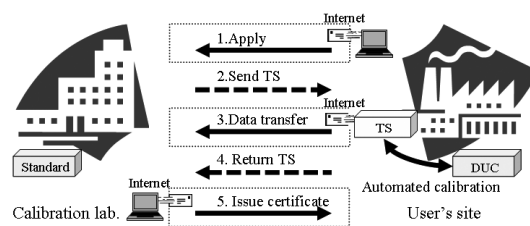


Fig.8 Remote calibration of pressure using both transfer standard and information technology. TS: Transfer standard, DUC: Device under calibration.

る。

6. デジタル圧力計を用いた遠隔校正

NMIJ では、圧力標準器を用いた各種デジタル圧力計の校正や特性評価手法の研究開発を実施してきた。³⁰⁻³¹⁾ 近年、国内外の企業での新しい技術開発もあり、NMIJ で開発した特性評価技術を用いて適切な補正を行うことにより、既存の圧力標準器に匹敵する性能をもつデジタル圧力計も得られるようになった。実際、前述したように、最高精度の比較測定が必要な各国の国家標準の国際比較にもデジタル圧力計が利用されてきている。そこで、操作に手間のかかる圧力標準器を用いて実施していた高精度校正を、デジタル圧力計の特性 (小型、軽量、操作性が良い) を生かして幅広い分野で効率的に行えるよう技術開発を進めてきた。

依頼者の負担軽減を図る新しい圧力標準の供給方法として、圧力計を校正機関に持ち込まずに遠隔から校正するための技術開発を行い、これまでに国内計測器メーカーと協力して高精度デジタル圧力計を用いた可搬型の伸介器を開発した。³²⁾ 遠隔校正では依頼者の校正の対象となる装置 (被校正器) である圧力計の使用場所に伸介器が送付され、インターネットを利用して測定データなどをやりとりして校正する。**Fig.8** に圧力の遠隔校正の実施手順を示す。このような伸介器を用いた圧力遠隔校正は国内外での実証実験を経て信頼性が評価され、校正手法として確立されている。

7. まとめ

本稿で述べてきたように、NMIJ では、現在、1 Pa から 1 GPa までの圧力範囲において、国家圧力標準を整備している。また、国内の標準供給体制の整備、国際比較による国際同等性の確認など、圧力標準及び圧力計測の信頼性を確保し、向上させるための活動に取り組んでいる。

国家標準にトレーサブルな圧力標準は、現在、校正事業者登録制度 (JCSS) により、圧力校正の登録事業者を通して、一般ユーザーにも利用可能である。

現場の圧力標準器としては、伝統的には、長期安定性に

優れた重錘形圧力天びん、液柱形圧力計などが用いられているが、近年では、高精度デジタル圧力計を搭載した圧力コントローラも利用されている。デジタル圧力計の利便性を考えると、将来的には、デジタル圧力計を標準器とした校正による圧力標準トレーサビリティの普及が進んで行くと思われる。

NMIJでは、社会・産業界で行われている様々な圧力計測の信頼性を確保するために、今後とも、我が国の圧力標準と標準供給体系の整備を継続的に進めていく予定である。高度化・多様化する社会・産業活動において、用途、要求精度に応じた圧力計測の信頼性を効率的に確保できるようにさらなる研究開発を進めていきたい。

文 献

- 1) 田中充, 産総研TODAY **10** (12), 2 (2010).
- 2) 大岩彰, 計測と制御 **48**, 313 (2009).
- 3) 秋道斉 他, 電気評論 **94** (7), 62 (2009).
- 4) (社)計量管理協会編, 圧力の計測, コロナ社, (1987).
- 5) JIS B 7610-1, -2, -3, 重錘形圧力天びん, (2000).
- 6) OIML R 110 (E), Pressure Balances, (1990).
- 7) H. Kajikawa *et al.*, *Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers* **44**, 219, (2008).
- 8) T. Kobata *et al.*, *Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers* **39**, 349 (2003).
- 9) H. Kajikawa *et al.*, *Rev Sci Instrum.* **80**, 095101, (2009).
- 10) B. Fellmuth *et al.*, *C. R. Physique* **10**, 828 (2009).
- 11) T. Kobata and D. A. Olson, *Metrologia* **42**, S231 (2005).
- 12) ISO/IEC Guide 99, International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM), (2007).
- 13) JIS B 7505-1, アネロイド型圧力計—第1部:ブルドン管圧力計, (2007).
- 14) ISO/IEC Guide 98-3, Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995), (2008).
- 15) JIS B 7547, デジタル圧力計の特性試験方法及び校正方法, (2008).
- 16) EAL-G26, Calibration of Pressure Balance, (1997).
- 17) T. Kobata, *Metrologia* **46**, 591 (2009).
- 18) M. Kojima *et al.*, *Metrologia* **42**, S227 (2005).
- 19) ISO/IEC 17025, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, (2005).

- 20) (独)製品評価技術基盤機構 認定センター, ASNITE 試験事業者又は校正事業者認定の一般要求事項 (第3版), TCRP21, (2009).
- 21) (独)製品評価技術基盤機構 <http://www.nite.go.jp/>
- 22) (独)製品評価技術基盤機構 認定センター, JCSS 登録の一般要求事項 (第13版), JCRP21, (2010).
- 23) BIPM 基幹比較データベース <http://kcdb.bipm.fr/>
- 24) T. Kobata *et al.*, *Metrologia* **42**, 07006 (2005).
- 25) T. Kobata *et al.*, *Metrologia* **44**, 07001 (2007).
- 26) T. Kobata *et al.*, *Metrologia* **46**, 07008 (2009).
- 27) T. Kobata *et al.*, *Metrologia* **47**, 07009 (2010).
- 28) W. Sabuga *et al.*, *Metrologia* **42**, 07005 (2005).
- 29) CIPM, Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes (MRA), (1999).
- 30) T. Kobata, *Metrologia* **42**, S235 (2005).
- 31) H. Kajikawa and T. Kobata, *Meas. Sci. Technol.* **21**, 065104, (2010).
- 32) 小島桃子 他, 計測標準と計量管理 **58**, 56 (2009).

要 旨

産業技術総合研究所 計量標準総合センターでは、現在、1 Pa から1 GPa までの気体、又は液体を媒体とする静止流体の圧力の国家標準を整備している。これら広い圧力範囲で標準を保持するために、多くの圧力標準器を維持・管理している。また、圧力の標準を社会・産業界に供給するため、圧力校正サービスを実施し、国内の圧力標準供給体制の整備にも協力している。さらに、圧力標準の国際同等性の確認、高度化のための研究開発等、多くの活動に取り組んでいる。本稿では、圧力標準器の原理、圧力計の校正方法、産総研の圧力校正サービスと圧力標準トレーサビリティの現状、圧力標準の国際比較、デジタル圧力計を用いた新たな校正手法の開発について解説する。



小島時彦 Tokihiko Kobata
(独)産業技術総合研究所 計測標準研究
部門, AIST, E-mail: tokihiko.kobata@
aist.go.jp
研究テーマ: 圧力標準, 圧力計測
趣味: 楽器演奏, 読書