

圧力計測の信頼性向上と国際相互承認

— 工業用デジタル圧力計の計量標準体系への組み込み —

小島 時彦*、小島 桃子、梶川 宏明

信頼性の高い圧力の計測は社会と産業のあらゆる活動の基盤をなすとともに、国際貿易の中でも各国が高い関心を払っている。最近工業用デジタル圧力計の特性が進歩し、環境変化および輸送に対する安定性だけでなく、短期・長期の安定性が著しく向上した。産総研ではこれらの進歩に着目し、工業用デジタル圧力計の特性を詳細に評価した上で、それらを計量標準体系のいくつかの局面、すなわち圧力の国家標準の整備、国家標準の国際比較、国内標準供給に組み込んだ。これらの結果、産業現場での圧力計測の信頼性確保が効率的に行えるようになり、また、多くの国際比較を実施して圧力計測の国際相互承認の推進に貢献した。

キーワード: 圧力標準、デジタル圧力計、校正、国際比較、計量トレーサビリティ

Improvement of reliability in pressure measurements and international mutual recognition

— Incorporation of industrial digital pressure gauges to the national metrology system —

Tokihiko KOBATA*, Momoko KOJIMA and Hiroaki KAJIKAWA

Reliable pressure measurements provide the basis for all activities in society and industry, and every country shows considerable interest in them in international trade. Recently, characteristics of industrial digital pressure gauges and the short- and long-term stabilities as well as the stability under environmental change and during transportation have been improved remarkably. AIST focused its attention on the technological advancement, and, after evaluating the characteristics of digital pressure gauges in detail, incorporated them to some phases in the metrology system, which are the upgrading of national pressure standards, the international comparisons of the standards and the domestic traceability system. Consequently, the reliability of pressure measurements in industrial fields has been secured through an efficient process, and the international mutual recognition has been promoted by carrying out many international comparisons.

Keywords: Pressure standard, digital pressure gauge, calibration, international comparison, metrological traceability

1 はじめに

国民生活、社会、産業、科学技術の幅広い分野において、圧力の計測は欠かすことのできない計測の一つである。安全・安心に関係する圧力計測では、気象観測における大気圧測定、航空機の高度測定、医療・健康管理における血圧測定、高压ガスの管理のための測定、食品加工や製薬等の製造プロセスにおける圧力測定等が挙げられる。また、省エネルギー対策にとって重要な圧力計測では、建造物の空調管理、自動車の内燃機関やタイヤ空気圧の圧力管理等が挙げられる。さらに、半導体や精密機器製造に必要な高い空気清浄度を確保するためのクリーンルームの管理、各種プロセス現場における圧力の計測・制御、プラント設備の点検等をはじめ、多くの場面でさまざまな圧力の計測が行われている。科学技術の分野でも、圧力の制御と計測を利用したさまざまな研究開発が行われている。

産業現場の圧力計測では、1 Pa 以下の低圧力から 1

GPa 以上の高圧力までの広い圧力範囲で多種多様な圧力計が用いられている。中でも近年、工業用デジタル圧力計の性能が著しく向上してきている。具体的には、測定範囲の拡大、高分解能化、短期・長期の安定性向上、環境変化および輸送に対する安定性の向上等が挙げられる。

産総研では、これらデジタル圧力計の性能向上に着目して、デジタル圧力計の精密な特性評価に率先して取り組んできた。その結果、国家標準の整備や標準供給においてデジタル圧力計が有効に活用できるようになり、産業現場での圧力計測の信頼性が大きく向上した。他方、近年の国際通商において、計測結果の国際相互承認が必要となってきた。産総研は、デジタル圧力計を用いて、多くの国際比較を行う等、国家標準の国際的な相互承認のための技術データの提供に大きく寄与してきた。

この論文では、産業現場での圧力計測の信頼性向上と自由貿易のための国際相互承認への貢献を目標として進め

てきた、デジタル圧力計を活用した研究開発とその成果を、シナリオに基づく構成学的観点から述べる。

2 圧力計測の信頼性への要請

2.1 国内産業界からの要請

産業現場において、圧力計を用いて信頼性の高い圧力測定を行うには、その圧力計の目盛りをあらかじめ、産総研が保有している圧力の国家標準にトレーサブルな形で正しく校正しておく必要がある。一方、これまで産業界が保有する圧力の標準器は重錘形圧力天びん（重錘形圧力計）^{註1)}と呼ばれる最も精密なタイプの装置が主流であった。重錘形圧力天びんは長期安定性に優れるという特徴があるが、他方それ自体重く、またサイズもかなり大きいため、校正サービスを受ける側からすると、校正機関へ輸送するのが容易でないという問題があった。また校正機関での校正は、最長で2ヶ月程度かかる場合もあり、その間、標準器が手元で使えないことから、バックアップのために余分に標準器を用意する等、少なからぬ経費が発生するという問題もあった。このため産業界からは、重錘形圧力天びんを輸送することなく、これまでと同等の精度で効率的に校正が受けられる何らかの方法が要請されていた。

最近、工業用デジタル圧力計の特性が著しく向上し、環境変化および輸送に対する安定性だけでなく、長期の安定性も一定程度確保できる見通しが出てきた。このような状況の中で、工業用デジタル圧力計を標準体系に組み込んで有効利用することを試みた。通常、工業用デジタル圧力計は、校正機関において標準器を用いて校正された後、産業現場に輸送されるが、輸送後のデジタル圧力計の目盛りが十分に安定であれば、産業界は自社の重くて大きい重錘形圧力天びんのような標準器を校正機関に輸送することなしに、これまでと同等の精度で国家標準にトレーサブルな校正値を産業現場で維持することができ、校正業務が著しく効率化される。

標準体系においてデジタル圧力計の利用を促進するためには、工業用デジタル圧力計を日本国内のどこに輸送したとしても校正値の安定性が十分保たれること、そして、次の校正が行われるまでの一定期間内、十分な安定性が保たれることが必須の条件となる。産総研はこのような特性を工業用デジタル圧力計が有するかどうかを明らかにする研究に着手した。

2.2 国際的要請

経済、生産、通商等のグローバル化に伴い、種々の計測器による測定結果が各国間で整合しているかどうかに関心がもたれ始めた^{[1][2]}。例えば、成田空港や羽田空港では日本の航空会社の整備工場が、外国籍の航空機の整備を

請け負うといった国際ビジネスが増えてきている。一方、1990年代に米国で航空機事故が多発したことから、米国民の安全を確保することを目的として米国政府は連邦航空法を改正し、米国籍の航空機を整備する要件として、使用する圧力計等の計測器が米国の国家計量標準機関である国立標準技術研究所（NIST）の国家標準にトレーサブルであることを要求し、米国連邦航空局（FAA）の検査官が定期的に整備工場を現地検査することとなった。この米国政府の要求は米国の航空会社にとどまらず、米国籍の航空機を整備する外国の整備会社にも適用されたため、日本航空と全日空が自社の整備工場のほとんどすべての計測器をNISTトレーサブルにしなければならないという事態になった。もともと日本の航空会社の整備工場では、日本製の計測器が多く使われ、そのほとんどが産総研（当時は旧工業技術院の研究所）にトレーサブルになっていたため、国際問題となった。日本政府はこのとき米国連邦航空局に対して、日本の国家標準は米国のそれと同等であることが実証されているので、日本の国家標準にトレーサブルな計測器を使うことも許容されるべきであると主張し、個別事例として受け入れられた。

この問題は日本だけでなく、世界各国の航空会社にも波及した。このような問題を背景として1999年に、各国の国家計量標準機関が所有する国家標準の同等性を相互に認め合うために、メートル条約のもと国際度量衡委員会の相互承認協定（CIPM-MRA）が発足した^[3]。計量標準における国際相互承認の枠組みを図1に示す。

この枠組みでは国家標準を各国間で実際に比較（国際比較）することを相互承認のための技術的な要件とした。国際比較の結果と参加機関ごとに承認された校正・測定能力は、それぞれ国際相互承認協定の附属書BとCに登録され、それらは国際度量衡局（BIPM）の基幹比較データベース（<http://kcdb.bipm.fr/>）上で誰でも見られるようになっている。これらの技術情報から、各国が保有している国家標準の水準を知ることができる。

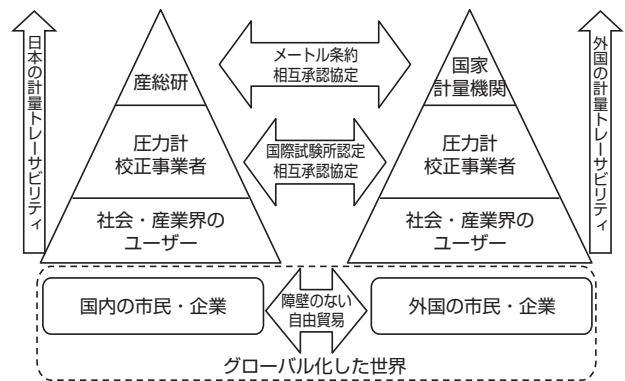


図1 計量標準における国際相互承認の枠組み

産総研は、我が国の国家計量標準機関として、圧力の国家標準の設定と供給、国内の圧力計測のトレーサビリティ体系の整備を担っている。また、国際比較に積極的に参加し、その結果から、日本の圧力の国家標準の国際同等性を上記の基幹比較データベースにおいて示し、さらに、各国から承認された形で校正・測定能力を示すことで我が国の国益を確保する責任がある。

このような背景の中で、私達は国家標準をより高度化して設定し、世界各国との間で国家標準の同等性を示すための活動に携わってきたが、その中で近年性能の向上が著しい工業用デジタル圧力計を活用することにした。

2.3 技術的課題

産総研が整備している圧力の国家標準^{[4][5]}は、気体あるいは液体を媒体とする静水圧性が成り立つ静止流体に対するものである。一般的に圧力標準の媒体には、低圧側では気体を、高圧側では液体を用いる。なお、絶対圧力が小さい圧力は、同じ産総研で真空標準としても整備している^[6]。

2001年の産総研発足当時、複数台の圧力標準器を用いて、5 kPa から 500 MPa の圧力範囲で国家標準を設定し、校正サービスを実施していた。しかし、科学・産業技術の進歩に伴い、2002年に実施した物理標準ニーズ調査では、圧力標準の種類増加、圧力範囲の拡大、不確かさの低減等の高度化が産業の現場から要望された^[7]。具体的には、空調管理、製薬、医療、半導体製造等に必要となる 10 kPa 以下の差圧標準および低圧力標準への要望が多く、また、内燃機関の開発や材料・製造、機械加工等の分野で 500 MPa を超える高圧力標準への要望もあった。

そこで、産総研では新たな技術開発を行って、これらの国家標準を整備してきた^{[8]-[10]}。現在、多く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) までの圧力範囲をカバーしている。これらの国家標準器の発生圧力の整合性を確認するために、標準器同士の比較測定が必要となるが、多数の標準器を管理するため、その効率化、高度化も課題となっていた。

また、圧力計測の現場では、校正対象機器の増加により、効率的でユーザー負担の少ない校正および標準供給の手法も望まれていた。前述したように、近年、国内外企業



図2 各種圧力計の例

による新しい技術開発もあり、各種圧力センサを利用した工業用デジタル圧力計の信頼性が向上し、フルスケールに対して 6 桁以上の高分解能をもち、長期安定性に優れた高精度圧力計も利用可能となってきた。そこで産総研では、工業用デジタル圧力計のうち高精度のものを対象にして、圧力標準器の管理の効率化や高度化に用いることができるか、および、標準器として十分な要件を満たすかどうかに関して、その特性を実験的に調べることにした。

3 種々の圧力計

図 2 に、圧力計測の現場で利用されている各種圧力計の例を示す。

他の計測器による校正をすることなしに、自分だけで物理量を絶対測定することができる計測器を一次計測器とよぶ。圧力に関する一次計測器（一次圧力計）としてはさまざまな装置が考案されてきているが、主なものには、重錘形圧力天びん^[11]と液柱形圧力計がある。図 3 に、重錘形圧力天びんと液柱形圧力計の原理図を示す。一方、自分だけでは物理量を絶対測定できず、その目盛り付けには一次計測器による校正を必要とする計測器を二次計測器とよぶ。圧力に関する二次計測器（二次圧力計）としては、デジタル圧力計^[12]と機械式圧力計（ブルドン管圧力計^[13]）がある。

重錘形圧力天びんは、圧力を高精度に発生可能な計測器である。測定の信頼性が高く、多くの国で圧力の国家標準として用いられている。産業現場においても標準器として広く用いられている。重錘形圧力天びんの基本的な構成要素はピストンとシリンダ、質量が既知のおもり（重錘）である。ピストン外面およびシリンダ内面は、真円度と円筒度が良好に保たれるよう精密に加工されている。通常、重錘形圧力天びんで圧力を発生する時には、ピストンと重錘によって下向きの重力が負荷されたピストンを、上向きの圧力により適正な位置に浮上させた後、ピストンと重錘を回転させる。そうすることにより、ピストンとシリンダ間の機

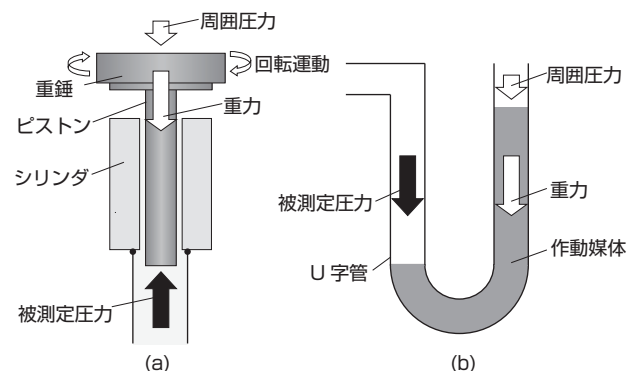


図3 重錘形圧力天びん (a) と液柱形圧力計 (b) の原理図

機械的な接触抵抗が大きく低減され、重錘とピストンにかかる重力が正確に圧力に変換される。

液柱形圧力計は、測定圧力と釣り合うU字管内の液柱の密度とその高さから、圧力を求める計測器である。通常、U字管内の作動媒体としては、密度が正確に知られている水、または水銀を用いることが多い。我が国の圧力の国家標準の根幹としている光波干渉式標準圧力計は、水銀を作動媒体とした液柱形圧力計である^[14]。諸外国の国家計量標準機関においても、同様の圧力計は、大気圧付近の国家標準器として用いられている。

デジタル圧力計とは、圧力センサと、その出力をデジタル表示する装置またはデジタル信号を出力する装置を備えた圧力計のことである^[12]。圧力センサの測定原理はさまざまであるが、ひずみゲージ等の抵抗変化、静電容量型センサの静電容量変化、水晶やシリコン振動子の周波数変化を検出する方法が典型的である。測定結果を連続的に、アナログ信号またはデジタル信号として外部出力できるものが多い。近年、技術の進歩が著しく、表示分解能が高く安定性に優れたデジタル圧力計が利用可能となってきた。

機械式圧力計は、弾性素子の圧力による変形量を機械的に拡大して圧力を測定する計測器である。このうち、扁平な断面をもち、管端を閉じた曲がった管を弾性素子に用いた指示圧力計はブルドン管圧力計と呼ばれ、比較的に低コストのため、社会・産業の現場で広く用いられている^[13]。

表1に、4種類の圧力計の特徴・特性をまとめた。一次圧力計である重錘形圧力天びんと液柱形圧力計は、測定圧力の不確かさが小さく、長期安定性に優れ、信頼性が高い。一方で、これらの圧力計は、一般的にはその取り扱いが複雑で、重量が重く、コストも高い。また、正確に発生圧力を求めるためには、設置場所の重力加速度の値が必要となる。圧力範囲に関しては、重錘形圧力天びん、機械式圧力計、デジタル圧力計は広い圧力範囲で利用可能であるが、液柱形圧力計はこれらの圧力計と比較すると、圧力範囲が限定的である。二次圧力計であるデジタル圧力計と機械式圧力計は、重錘形圧力天びんや液柱形圧力計に比較して信頼性は劣るが、取り扱いは簡単であり、重量も軽く、コストも低い。したがって、複数の計測器をそろえて冗長化することによる信頼性向上も容易である。また、上に記した一次圧力計の発生圧力は重力加速度により変化するのに対して、デジタル圧力計と機械式圧力計の測定値は、直接は重力加速度に影響されない。一般的に、連続測定や測定結果の伝送が容易なデジタル圧力計は測定の自動化・システム化に適しており、操作性や効率性の向上に役立つ。

表1 各種圧力計の特徴

圧力計の種類	計測器の種類	最大圧力	サイズ・重量・操作性	自動化・システム化
重錘形圧力天びん	一次	1 GPa 超	大・重・難	難
液柱形圧力計	一次	300 kPa	大・重・難	難
デジタル圧力計	二次	1 GPa 超	小・軽・易	易
機械式圧力計	二次	1 GPa 超	小・軽・易	難

私達は、デジタル圧力計の長所である小型・軽量の可搬性、簡単な操作性、自動化・システム化への高い適応性を活かせるよう開発を進めてきた。

4 研究開発のシナリオ

当該研究ではデジタル圧力計の活用により、産業現場の圧力計測の信頼性を向上し、国際相互承認に必要な国家標準の同等性を確認することを目標に設定した。

研究シナリオを図4に示す。当該研究の主要な要素技術は、デジタル圧力計の各種特性とその評価技術および校正技術である。デジタル圧力計の各種特性としては、その測定範囲、分解能、重量、サイズ、線形性、環境変化および輸送に対する安定性、短期・長期安定性等が挙げられるが、これらは計測器メーカーに大きく依存する。一方、デジタル圧力計の各種特性の評価や校正値の不確かさ評価は、国家標準器を保有して日常的に種々の圧力計を評価している産総研が得意とする技術である。

研究目標を達成するために、上述した要素技術を統合する。はじめに、デジタル圧力計の特性評価方法および校正方法の開発を行い、デジタル圧力計の標準器としての性能を詳細に評価する。このためには特に、デジタル圧力計の環境変化および輸送に対する安定性や短期・長期安定性の評価技術が必要である。次に、デジタル圧力計の標準

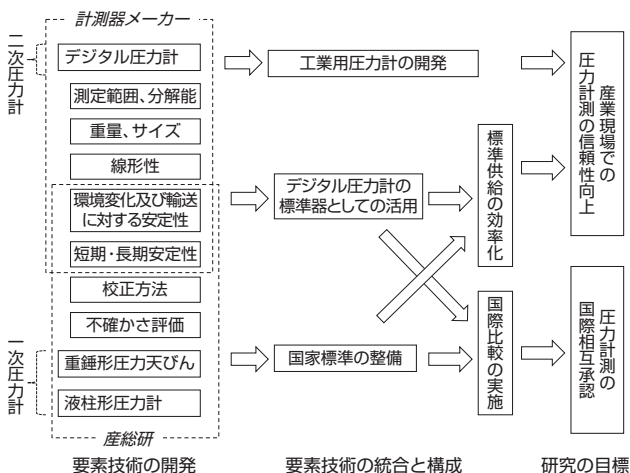


図4 圧力計測の信頼性向上と国際相互承認のための研究シナリオ

器としての活用を進めながら、要素技術をさらに統合させ、計量標準体系のいくつかの局面、すなわち圧力の国家標準の設定・管理、国家標準の国際比較、国内標準供給に組み込む。国家標準に関して、産総研では現在、1 Pa から1 GPa までの国家標準を多数の標準器を用いて設定・管理しているが、操作に手間のかかる標準器の高精度校正を、デジタル圧力計を有効利用して効率的に行えるよう技術開発を進める。国家標準の国際比較に関しては、主要な圧力範囲において、デジタル圧力計を活用して、国際比較を効率良く実施する。国内標準供給に関しては、校正依頼者の負担がより小さい標準供給方法を開発する。また、デジタル圧力計を対象とした産総研の圧力校正サービスの拡充を行う。さらに、圧力標準を社会・産業界の各方面へ効率良く供給するための国内標準供給体制の高度化および各種関連技術基準の整備を目指す。

最終的に、デジタル圧力計を利用した標準供給の効率化は、計測器メーカーで行われている工業用圧力計の開発と相乗的に、研究目標の一つである産業現場での圧力計測の信頼性向上を達成する。また、デジタル圧力計を利用した国際比較の実施は、もう一つの研究目標である圧力計測の国際相互承認に大きく貢献する。このような研究シナリオを設定した。以下、シナリオに沿って実施してきた研究開発の内容と結果について述べる。

5 デジタル圧力計の特性評価

信頼性を維持しながら、合理的で効率的な圧力の標準体系を構築するためには、デジタル圧力計の有効利用が鍵となる。そのため産総研では、圧力標準器を用いた各種デジタル圧力計の特性評価および校正方法の研究開発を行ってきた^{[15][17]}。デジタル圧力計が表示する測定値の不確かさの主な要因としては、以下が挙げられる。

- a) 印加した圧力の不確かさ
- b) 測定値のばらつきによる不確かさ
- c) 履歴効果による不確かさ
- d) 表示分解能または短期安定性による不確かさ
- e) 周囲温度の変動に起因する不確かさ（温度特性）
- f) 設置の姿勢に起因する不確かさ（姿勢特性）
- g) 供給電源電圧変動による不確かさ
- h) 入出力関係の直線性に起因する不確かさ（線形性）
- i) ライン圧力による不確かさ（差圧計の場合）
- j) 長期安定性（経時変化）に起因する不確かさ
- k) 周囲環境変化（相対湿度、大気圧、振動、衝撃等）に起因する不確かさ

デジタル圧力計を標準器として使用する場合には、上述した特性の評価を十分に行い、実際に使用する状況に

応じて校正值への補正や不確かさ評価について考慮が必要である。また、圧力計を輸送する場合には、輸送時に圧力計が被る周囲環境の変化によっても特性が影響を受けるので、これらについても考慮が必要である。

現在、広い圧力範囲において、優れた性能を有するさまざまなデジタル圧力計が利用可能であるが、当該研究において、特に重点的にその特性を評価してきた圧力計は、国内計測器メーカーが製造している感圧部にシリコンレゾナントセンサを用いた差圧計と、海外メーカーが製造している感圧部に水晶振動素子を用いた圧力計の2種類である。詳細な特性評価をした上で適切な補正を行い、定められた校正手法を用いて各デジタル圧力計を定期的に繰り返し校正し、安定性を評価した。その結果、使用方法を工夫することによってデジタル圧力計でも、既存の圧力標準器に匹敵する信頼性が得られることを明らかにした。各デジタル圧力計の安定性の評価データは、後述するデジタル圧力計の標準体系への組み込みにおける事例の中で示す。

6 デジタル圧力計の標準体系への組み込み

この章では、デジタル圧力計を圧力の標準体系に組み込んだ三つの事例を述べる。

6.1 国家標準の設定と管理

圧力の一次標準器として日本で国家標準器に位置づけられているのは、液柱形圧力計と重錘形圧力天びんである。一次標準器として用いるためには、各々の特性値を決定し、管理する必要がある。産総研で使用している圧力標準器の特性値は、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正確に測定され、管理される。産総研において、重錘形圧力天びんおよびそのピストン・シリンダは、圧力範囲ごとに複数台ずつ管理されている。それら多数の標準器を群管理することで、広い圧力範囲で国家標準を維持している。これら標準器の管理では、定期的に各標準器間での比較測定を実施し、相互の整合性を確認している。また、さまざまな組み合わせの比較測定の結果から、各標準器の発生圧力の長期安定性を評価している。圧力範囲にもよるが、一般的に、その長期安定性は相対的に年間 10^{-6} のオーダーである。

ここでは、民間校正機関が自己の標準器として用いる重錘形圧力天びんを、産総研の国家標準器である重錘形圧力天びんで校正するためにデジタル圧力計を利用した例を示す。産総研において重錘形圧力天びんを校正する場合、2台の圧力天びんを連通配管し、発生圧力を比較する。伝統的な校正では、2台の圧力天びんを同時に動作状態におき、両方のピストンの降下速度の変化を観測し、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を負

荷し調整する。しかし、この方法は操作が複雑で、校正結果がシステムの構成や校正作業者の技術力に大きく依存する。そこで、産総研では、デジタル圧力計の高分解能性と連続測定機能を利用した二つの校正方法を選択し、高度化した。結果的にはいずれの方法でも、重錘形圧力天びんと使用するデジタル圧力計の性能が十分に良ければ、相対的に 10^{-6} 以下のオーダーで平衡状態の決定が可能であることを明らかにした。現在、産総研が維持している国家標準器をはじめとする多数の重錘形圧力天びんの校正と管理は、すべてこれらのデジタル圧力計を用いた方法により行っており、これまでより大幅に高度化、効率化された。

第一の校正方法は、2 台の重錘形圧力天びんの発生圧力差を高分解能のデジタル差圧計で直接測定する方法である。この方法においては、差圧計により測定される 2 台の圧力天びんの圧力差がゼロとなるまで負荷する微小分銅を調整する。

第二の校正方法は、デジタル圧力計を比較器として使う置換法である^{[17][18]}。図5に示すように、この校正方法では、2 台の重錘形圧力天びんの発生圧力を定積弁の切り替えにより交互にデジタル圧力計で測定する。2 台の圧力天びんの発生圧力にある程度の差があっても、その差を正確に求めて補正できるという利点がある。さらに、この方法は、3 台以上の圧力天びんに同時に適用することも可能である。第二の校正方法では、デジタル圧力計の高分解能性と連続測定機能に加えて、短期安定性を活用した。

6.2 国家標準の国際比較

通常、圧力の国家標準の国際比較では、仲介器と呼ばれる輸送可能な計測器を各国に順次回送し、その計測器に各国の参加機関が自己の国家標準に基づいて校正値をつける。各国が付けた校正値を相互に比較することにより、各国の圧力の国家標準値の違いを明らかにすることができる。最高精度の測定が必要な国際比較には、伝統的に標準器と同等な性能をもつ重錘形圧力天びんを仲介器として用いることが多かった。

そのような状況の中で産総研は、小型化・軽量化・低コスト化が可能で、取り扱いやすいデジタル圧力計に着目し、

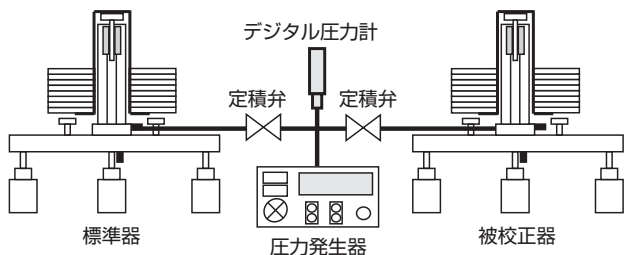


図5 デジタル圧力計を比較器として用いた置換法による校正

世界に先駆けて、高精度タイプの工業用デジタル圧力計を利用した国際比較用の仲介器の開発を進めてきた。そして、開発した仲介器を用いて、実際に、複数の国際比較を主催した^{[19][23]}。仲介器には複数台のデジタル圧力計を同時に用い、冗長化により信頼性を向上させた。通常1年以上にわたる国際比較の実施期間を通して、デジタル圧力計の長期的な特性の変化を詳細に把握し、それを校正値の補正に用いた。この補正により、仲介器の長期安定性の不足を補って、十分な比較精度を確保することができた^{[19][22][24]}。

国際比較におけるデジタル圧力計の利用例として、圧力範囲が 10 MPa から 100 MPa の液体ゲージ圧力の国家標準の国際同等性を確認するために 2002 年から 2004 年に行った国際比較(APMP.M.P-K7^[19])を紹介する。図6に、その国際比較で用いられた仲介器を示す。前述した水晶振動素子有感圧部に用いたフルスケールが 100 MPa で分解能が 0.1 kPa のデジタル圧力計を 2 台組にして仲介器とした。デジタル圧力計の利用により、輸送する仲介器の総重量は 50 kg 以下に抑えることができ、圧力天びんを使用した場合（通常 200 kg 超）よりも大幅に軽量化することができた。さらに同じ仕様の仲介器を 3 組準備し、それぞれ別々の回送ルートで同時に各参加機関に輸送することにより、国際比較に要する全測定期間を大幅に短縮させた。

測定期間中定期的に、仲介器を構成する合計 6 台のデジタル圧力計を幹事所である産総研に戻し、日本の国家標準器を用いて、これらのデジタル圧力計を再校正することで、仲介器としての安定性の評価を行った。図7に各デジタル圧力計の校正値の 1 日当たりの変化量を、測定圧力の関数として評価した結果を示す。同図に示されているように、最大測定圧力 100 MPa での変化量は、圧力計によっては 1 日当たり 50 Pa を超えている。国際比較の全測定期間は約 400 日であったので、最終的には、測定圧力値が最大圧力において 20 kPa 変化すると推定される。これは測定値に対して相対的に 2×10^{-4} の変化に相当する。一方、

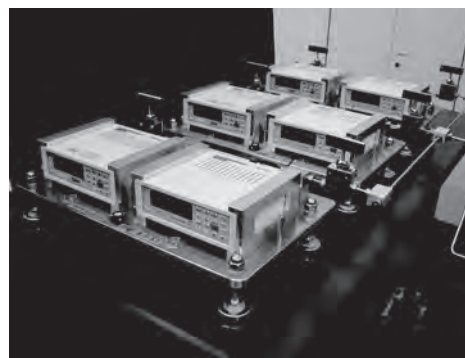


図6 デジタル圧力計を用いた液体圧力の国際比較用仲介器（2 台ずつ、計3組）の写真

この圧力範囲において、これまでの国際比較で使用されていた重錘形圧力天びんを伸介器とする場合、その安定性は相対的に 1×10^{-5} 程度と期待される。したがって、上記のデジタル圧力計の校正値を補正なしに使用する場合、国際比較の実施に必要な安定性を得ることはできない。しかし、詳細な評価により、各圧力における変化は経過日数の一次関数になっていることがわかった。これらを補正し、また伸介器を構成する2台のデジタル圧力計から得られる校正値の平均値を使用することで、最終的には、各伸介器の安定性は測定全期間を通して、 5×10^{-6} 以下にすることができた^[19]。このように、デジタル圧力計の伸介器としての特性を詳細に把握し、適切に補正することにより、国際比較に使えるだけの十分な比較精度を引き出した。

上述の国際比較を含む二つの国際比較（CCM.P-K7^[25]、APMP.M.P-K7^[19]）における各参加機関の100 MPaでの校正値の結果を図8に示す。横軸に参加機関の略称と国名、縦軸に各機関の校正値の国際比較参照値からの相対偏差を示す。参照値は、参加機関の校正値の一種の平均値として計算で得られたものである。各国のデータごとに付いているバーの長さは各参加機関が自ら表明した校正値の不確かさ（信頼の水準約95%）を表している。また、同じ国際比較から得られた結果は、同じ種類のマーカー（黒丸あるいは白丸）で示した。図8から、この圧力における各国の圧力の国家標準の同等性を知ることができる。日本の国家標準は、参照値からの偏差がほとんどゼロで、不確かさも主要国と同程度であった。したがって、現在、当該圧力範囲で設定・維持・供給している日本の圧力の国家標準が、優れた国際同等性を有していることを確認できた。

その他の国際比較においてもデジタル圧力計を伸介器として利用することが進んでいる。気体差圧の国際比較において、シリコンレゾナントセンサを用いたデジタル圧力計を使用し、同様に優れた比較精度を引き出した^[20]。このよう

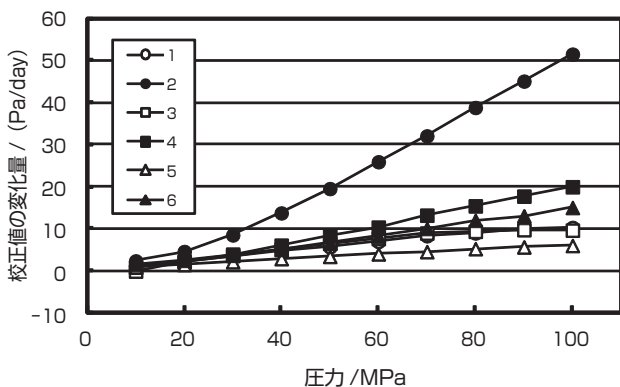


図7 液体圧力の国際比較に使用した6台のデジタル圧力計の校正値の1日当たりの変化量

に、さまざまな圧力範囲の国際比較において、デジタル圧力計の伸介器としての有効性を確認した。

6.3 遠隔校正による標準供給

これまで、産業現場で使われる圧力計の校正では、校正依頼者が圧力計を、使用している場所から校正機関まで持ち込む校正、いわゆる“持ち込み校正”が行われてきた。しかし、より広範な産業分野に圧力標準が使われているためには、より効率的な新たな標準供給の形態も検討していく必要がある。これまでNEDOプロジェクト「計量器校正情報システム(e-trace) 研究開発事業」で、デジタル圧力計とインターネット等の情報通信技術を活用し、圧力標準の供給を速く、安く、正確に行うための圧力遠隔校正技術の開発を行った^{[26][27]}。これは、圧力計を産業現場から遠くにある校正機関に持ち込まずに、産業現場で校正できるようにするための技術開発で、校正依頼者の負担軽減を図る新しい圧力標準の供給形態である。

現在、校正機関が、依頼者からの校正依頼を受けて校正を行う場合、その校正実施形態には大きく分けて、持ち込み校正、出張校正、遠隔校正の三つがある。各校正実施形態の主要な特徴を表2に示す。

伝統的に行われている持ち込み校正では、依頼者が圧力計を校正機関に持ち込んで校正が行われる。この場合標準器には校正機関の標準器を使用し、作業は校正機関の要員が行う。これに対して、依頼者の圧力計の持ち運びが現実的に難しい場合には、その圧力計が据え付けられている現場で校正が行われる。これまでに行われてきた校正機関以外の場所で行われる校正の形態として、出張校正(現地校正)がある。この場合、輸送可能な標準器(伸介器)を校正機関から現場まで輸送する。校正に必要な作業は、持ち込み校正と同様に、校正機関の要員が行う。

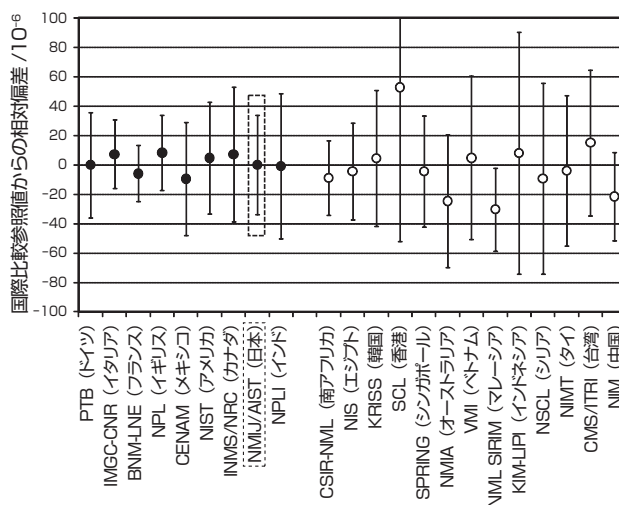


図8 圧力100 MPaにおける二つの国際比較の結果 (●: CCM.P-K7, ○: APMP.M.P-K7)

表2 圧力計の校正の実施形態と特徴

校正形態	持ち込み校正	出張校正 (現地校正)	遠隔校正
校正場所	校正機関	依頼者指定場所	依頼者指定場所
標準器	参照標準	仲介器 (仲介標準器)	仲介器 (仲介標準器)
現場作業	機関要員	機関要員	遠隔操作、 支援要員

遠隔校正では、出張校正と同様に、依頼者の圧力計の使用場所に仲介器を輸送し、校正が行われる。しかし、校正機関要員は現場には行かず、校正機関からインターネット等の通信技術を利用して、測定データ等をやりとりして校正作業を行う点が出張校正とは異なる。依頼者の圧力計（被校正器）の種類としては、デジタル圧力計を想定している。最低限行わなければならないが、校正結果には大きな影響を与えないと考えられる被校正器、仲介器の設置等の作業は、一定の技術講習を受けた依頼者側の支援要員が行うことができる。

図9に圧力の遠隔校正の実施手順を示す。校正機関が行う遠隔校正サービスに対して、依頼者から校正依頼があった場合の手順の一例を示している。この図において、点線で囲まれインターネットと記された部分は、情報ネットワーク技術を使用して実施可能な部分である。

これまでに、産業界からの校正需要が多く、また、過去の国際比較で実績のあるデジタル圧力計が使用できる二つの圧力範囲（気体差圧 10 Pa～10 kPaと液体圧力 10 MPa～100 MPa）において、遠隔校正技術の開発を進めた。気体差圧の開発に関しては横河電機株式会社から、液体圧力に関しては長野計器株式会社から、それぞれ技術協力を得た。開発の主な項目は、

- ① 遠隔校正用の仲介器の開発
- ② 遠隔校正に適した測定手順の開発
- ③ 国内外での実証試験の実施

である。

ここで項目①については、高精度デジタル圧力計と圧力

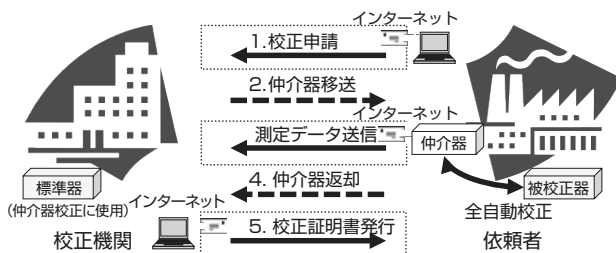


図9 圧力遠隔校正の実施手順

発生器、環境測定器を一体に組み込み、全自動で圧力の発生と測定が可能な可搬型の遠隔校正用仲介器を新たに開発した。仲介器の信頼性を向上させるため、各仲介器には複数の高精度デジタル圧力計を搭載した。気体差圧の仲介器にはシリコンレゾナントセンサを感圧部に持つ圧力計を、液体圧力の仲介器には水晶振動素子を感圧部に持つデジタル圧力計を採用した。なお、搭載したデジタル圧力計の長期安定性の不足を補うため、事前にその環境変化および輸送に対する安定性、短期・長期安定性等の特性を詳細に把握した。

項目②については、自動校正を行うためのプログラム作成、また、遠隔校正を行う際の校正機関の要員と依頼者側の支援要員の手順書を作成した。

項目③については、これまでに、開発した仲介器を用いて国内外で遠隔校正の実証実験を多数行ってきた。図10に気体差圧における実証実験の一例を示す。同図(a)に示すように、産総研を校正機関として、遠隔校正用仲介器を、山梨県甲府市に2回、中国の重慶市に1回輸送し、遠隔校正実験を行った。図10(b)は、フルスケールが10 kPaで、分解能が10 mPaのデジタル圧力計の校正結果であり、通常を持ち込み校正による校正値からの偏差で表している。各測定圧力における偏差の最大値は20 mPa以内であり、相対的に、校正された圧力計のフルスケールの

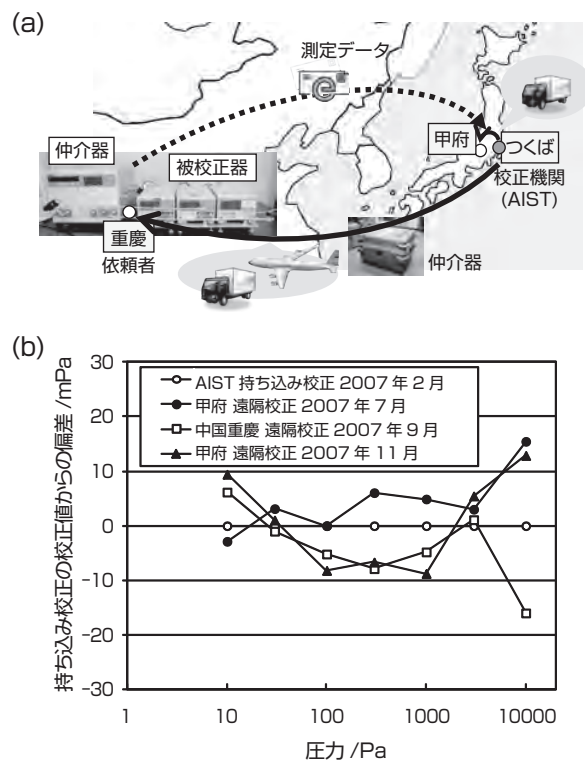


図10 気体差圧の遠隔校正の (a) 実証実験の仲介器回送ルートと (b) その結果（遠隔校正の校正値を持ち込み校正の校正値からの偏差で表した。）

2×10^{-6} 以下と十分に小さかった。この結果から、遠隔校正でも持ち込み校正と同等な結果が得られること、また、伸介器、校正されたデジタル圧力計ともに、環境変化および輸送に対する安定性も含めて、十分な安定性が得られることを示した。

今回開発した圧力の遠隔校正技術は、実証実験の結果からその信頼性が確認され、現在、産総研の校正サービスとして確立されている。その遠隔校正サービスにおける現状の不確かさ（信頼の水準約 95 %）は、気体差圧 10 Pa から 10 kPa の圧力範囲において 100 mPa または 0.01 % 以下、液体圧力 10 MPa から 100 MPa において 0.01 % 以下である。

7 社会・産業界への波及効果と今後の課題

7.1 産業現場での圧力計測の信頼性向上

現在、産総研では、1 Pa から 1 GPa の 9 桁に及ぶ圧力範囲で国家標準を整備し、社会や産業界からのさまざまな校正依頼に応じている。圧力の国家標準となる一群の圧力標準器の整備・高度化には、6.1 節で述べたデジタル圧力計の活用を進めている。現在、デジタル圧力計を用いて複数の重錘形圧力天びんの全自動校正技術を開発中である。これにより、群管理している国家標準器の整備・管理のさらなる高度化や効率化が期待できる。

産総研で現在運用している校正サービスの主要部分については、すでに外国の主要な国立計量標準機関から招いた専門研究者を審査員とした技術審査、および試験・校正機関への一般的要求事項である国際規格 ISO/IEC 17025 の適合審査を終了し、その校正・測定能力は世界各国から承認されている。

産業界の計測現場および国内ユーザーへの圧力の標準供給は、計量法の校正事業者登録制度（Japan Calibration Service System: JCSS）により登録された圧力の校正事業者を中心に行われている。図 11 にその体系の概略を示す。気体圧力と液体圧力の主要な圧力範囲で、産総研が JCSS 校正事業者の重錘形圧力天びんを校正することにより、国家標準の値が供給される。JCSS 校正事業者は産総研の国家標準にトレーサブルな自己の標準器をもつとともに、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。JCSS 校正事業者は自己の標準器に基づいて、種々の産業用圧力計を JCSS 制度のもとで校正する。産総研ではこれら JCSS の圧力分野における技術基準の作成、さらに、登録審査にも技術的側面から協力・支援を行っている。

現在、登録されている校正事業者とその最高測定能力の一覧は、(独) 製品評価技術基盤機構のウェブサイト (<http://www.nite.go.jp/>) の適合性認定分野、JCSS の項に記載されている。2011 年 9 月現在、JCSS の圧力区分に登録されている校正事業者は全部で 13 事業者である。また、全校正事業者の発行する JCSS 校正証明書発行件数は、過去 3 年間増加し続けており、2010 年度においては約 2,300 件であった。今後も発行件数のさらなる増加が見込まれており、国家標準にトレーサブルな圧力計測の必要性が我が国の社会・産業界において増大してきていることがわかる。なお、校正件数の多い圧力計の種類は、デジタル圧力計、機械式圧力計である。前述したとおり、これらの圧力計は測定値が重力加速度に直接影響されないため、その補正の必要がなく、簡便にトレーサビリティを確保できるメリットがある。また、通常、高圧力域において標準器となる重錘形圧力天びんは大がかりなものとなり、その設備の導入や維持は校正事業者やユーザーにとって大きな負担となる。しかし、デジタル圧力計を標準器とすることで、その負担を低減することができる。

この論文では詳しくは述べなかったが、圧力差の標準である差圧標準に関しては近年整備が進み、JCSS 校正された 2 台の重錘形圧力天びんを用いた方法^{[8][15]}により、JCSS 校正事業者が自ら差圧標準を設定することが可能な仕組みとした。しかし、重錘形圧力天びんを用いる方法は高精度ではあるが、日常的な校正業務に使うには、あまり簡便な方法ではない。そこで、差圧標準をより効率的に広く普及させるため、デジタル差圧計を利用した標準供給体系を開発した。2008 年より、JCSS 校正事業者によるデジタル差圧計の校正も開始され、差圧標準を効率良く供給することが可能となった。

研究開発により得られたデジタル圧力計の特性評価および

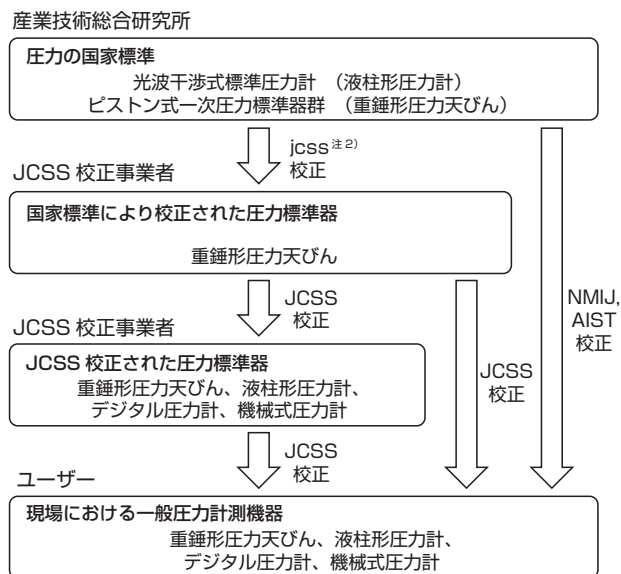


図11 圧力の国内標準供給体系

び校正方法に関する技術や知見を産業界や圧力計のユーザーが広く利用できるように、産総研は各種工業規格^{[11]-[13]}および各種技術基準の整備に技術専門家として協力してきた。特に、管理用のデジタル圧力計の特性試験方法および校正方法についてはJIS B 7547^[12]に規定した。

このように、デジタル圧力計を活用した校正方法および校正技術は、産総研の校正サービス、国内標準体系、各種規格および技術基準を通して、産業現場での圧力計測の信頼性向上に貢献している。この論文で述べた開発では、比較的に高精度なデジタル圧力計の活用が中心であった。今後、圧力計測の信頼性確保をより効率的に低コストで行うためには、一般の工業用デジタル圧力計に対しても、開発した特性評価および校正のための手法を適用し、標準体系へ広く組み込んでいくことが必要であると考えている。

遠隔校正は、依頼者の負担軽減を図り、標準の供給を速く安く正確に行うための技術開発であった。当該研究開発により、圧力遠隔校正に必要とされる基礎技術、すなわち産業現場において信頼性を維持しながら短時間で校正を行うための技術は開発された。しかし、遠隔校正の仲介器の製造コストが十分に抑えられていないため、現状では、その校正コストは持ち込み校正に対して十分に低価格とはなっておらず、利用拡大の障害の一因となっている。また、遠隔校正を行う校正事業者を認定するための枠組みをつくることも課題となっている。将来的には、校正事業者から産業現場の圧力計への校正において、関連技術の利用が進むよう整備を進めたい。

7.2 圧力計測の国際相互承認

産総研は、圧力の国家標準の国際的な同等性を確認するために、国際度量衡委員会（CIPM）の質量関連量諮問委員会（CCM）、および、アジア地域の計量組織であるアジア太平洋計量計画（APMP）の質量関連量技術委員会が行う圧力の国家標準の国際比較に参加してきた^{[19]-[23][25]}。これまでに参加した国際比較を、実施中のものを含め表3に示す。APMPの国際比較の大半において産総研は幹事所として国際比較を主催し、その実施スケジュールの作成、測定手順書の作成、仲介器の準備と特性評価、比較結果のとりまとめ、最終報告書の作成等を行った^{[19]-[22]}。また、産総研が主催した国際比較においては、6.2節で述べたように積極的にデジタル圧力計を仲介器に活用し、効率化を図った。

多くの圧力範囲の国際比較の結果において産総研の国家標準の国際同等性が確認されている^{[19]-[23][25]}。今後実施される国際比較にも積極的に参加し、我が国の国家標準の国際同等性を継続的に確保していく予定である。

産総研が幹事所として主催した国際比較の結果は、2.2

表3 産総研が参加してきた圧力国際比較（2001年以降）

識別記号	種類	圧力範囲	実施年
APMP.M.P-K6	気体ゲージ圧力	20 kPa - 105 kPa	1998-2001
APMP.M.P-K1.c	気体ゲージ圧力	0.4 MPa - 4 MPa	1998-2001
APMP.M.P-K9	気体絶対圧力	10 kPa - 110 kPa	2009-
APMP.M.P-K5*	気体差圧	1 Pa - 5 kPa	2005-2006
CCM.P-K7	液体ゲージ圧力	10 MPa - 100 MPa	2003-2005
APMP.M.P-K7*	液体ゲージ圧力	10 MPa - 100 MPa	2002-2005
APMP.M.P-K7.1*	液体ゲージ圧力	10 MPa - 100 MPa	2007-2009
APMP.M.P-K7.TRI*	液体ゲージ圧力	40 MPa - 200 MPa	2001
CCM.P-K13	液体ゲージ圧力	50 MPa - 500 MPa	2008-2011
APMP.M.P-K13*	液体ゲージ圧力	50 MPa - 500 MPa	2010-
APMP.M.P-S8*	液体ゲージ圧力	100 MPa - 1000 MPa	2007-2010

*産総研が幹事所の国際比較

節で述べたように、CIPMの国際相互承認協定の附属書Bに登録されている。また、参加した国家計量標準機関が国際比較の結果に基づいてそれぞれ表明した校正・測定能力が、国際的に承認されたのち、相互承認協定の附属書Cに登録されている。このように、国際比較に係わる活動に積極的に参加することにより、我が国はもとよりアジア地域を中心とする国々の校正・測定能力のスムーズな登録を支援することができたと考えている。

デジタル圧力計を活用することにより、仲介器の小型化、軽量化が可能となり輸送の障害を低減することができた。また、各仲介器には冗長化のため複数台のデジタル圧力計を用い、それぞれの長期安定性を評価することにより、十分な比較精度を引き出した。さらに、複数の仲介器を準備し、同時に回送することにより、国際比較の短期間での実施が可能となった。このように、デジタル圧力計を活用した仲介器を国際比較に利用することで、国際相互承認に必要な国家標準の国際同等性を効率的に確認することができた。

8 おわりに

デジタル圧力計を活用した産業現場の圧力計測の信頼性確保と国際相互承認のための国家標準の国際同等性の確認を目指し、研究開発を進めてきた。産業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や液柱形圧力計等が用いられてきたが、近年ではデジタル圧力計およびそれを搭載した各種圧力発生器の利用も増えている。この論文で述べてきたデジタル圧力計の特性評価および校正のための技術は、圧力標準体系の中で有効に用いられ、デジタル圧力計を標準器や仲介器として利用した効率的な標準供給体系の実用化が進んだ。さらに、JCSSの普及により、登録された圧力校正事業者を通して、圧力の国家標準にトレーサブルなデジタル圧力計の校正が、広い圧力範囲で、一般ユーザーでも利用可能となり、現場圧力計測の信頼性向上に資している。

高度化・多様化する社会・産業活動において、用途や要求精度に応じた圧力計測の信頼性確保が求められており、今後、デジタル圧力計の操作性や利便性を活かした合理的かつ効率的で、簡便・迅速・安価な圧力校正・標準供給方法の開発がより重要になると考えられる。

さらなる研究開発により、圧力標準供給体系の整備や拡充を進め、社会・産業の現場におけるさまざまな圧力計測の信頼性の確保や向上に寄与できるよう取り組んでいきたい。

謝辞

当該研究開発において、多くの貴重なご助言とご協力をいただいた計測標準研究部門力学計測科の大岩彰科長ならびに圧力真空標準研究室の関係者の皆さまに深く感謝の意を表します。

注1 「重錘形圧力天びん」は、「重錘形圧力計」とも呼ばれている。英名においては、「Pressure balance」、「Piston gauge」、「Deadweight tester」等の表記がある。この論文では、現在、JISをはじめとする各種規格、関連技術文書において一般的に使用されている「重錘形圧力天びん (Pressure balance)」を用いる。

注2 計量法の校正事業者登録制度 (JCSS) において、国家計量標準機関等が発行する校正証明書には小文字の「jcss」の標章、登録された校正事業者が発行する校正証明書には大文字の「JCSS」の標章が付けられる。

参考文献

- [1] 小野晃: グローバル化する計量標準, *産総研TODAY*, 4 (2), 21 (2004).
- [2] 田中充: イノベーションと計量標準, *産総研TODAY*, 10 (12), 2 (2010).
- [3] CIPM, *Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes (MRA)*, (1999).
- [4] 大岩彰: 日本における国家計量標準とその供給体制: 質量及びその関連量-力学量-, *計測と制御*, 48 (4), 313-320 (2009).
- [5] 小島時彦: 圧力標準の開発・維持・供給と信頼性向上, *熱測定*, 38 (2), 57-64 (2011).
- [6] 圧力真空標準研究室: 圧力真空標準の研究開発と校正サービス, *精密工学会誌*, 77 (8), 755-756 (2011).
- [7] 平成14年度物理標準ニーズ調査報告書, 産業技術総合研究所計量標準総合センター (2003).
- [8] M. Kojima, T. Kobata, K. Saitou and M. Hirata: Development of small different pressure standard using double pressure balances, *Metrologia*, 42 (6), S227-S230 (2005).
- [9] T. Kobata and K. Ide: Development of pressure standard up to 1 GPa using a precise pressure multiplier, *Proceedings of SICE-ICASE International Joint Conference 2006*, 3367-3371 (2006).
- [10] H. Kajikawa, T. Kobata and A. Ooiwa: Features of a new controlled-clearance pressure balance and *in situ* mass calibration of its weights, *Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers*, 44 (3), 219-226 (2008).
- [11] JIS B 7610-1, -2, -3, *重錘形圧力天びん* (2000).
- [12] JIS B 7547, *デジタル圧力計の特性試験方法及び校正方法* (2008).
- [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] A. Ooiwa, M. Ueki and R. Kaneda: New mercury interferometric baromanometer as the primary pressure standard of Japan, *Metrologia*, 30 (6), 565-570 (1994).
- [15] M. Kojima, T. Kobata and K. Saitou: Study on calibration procedure for differential pressure transducers, *Proceedings of IMEKO 20th TC3, 3rd TC16 and 1st TC22 International Conference*, ID-044 (2007).
- [16] H. Kajikawa and T. Kobata: Effects of pressurization procedures on calibration results for precise pressure transducers, *Meas. Sci. Technol.*, 21 (6), 065104 (2010).
- [17] T. Kobata and D. A. Olson: Accurate determination of equilibrium state between two pressure balances using a pressure transducer, *Metrologia*, 42 (6), S231-S234 (2005).
- [18] T. Kobata: Improved methods for comparing gas and hydraulic pressure balances, *Metrologia*, 46 (5), 591-598 (2009).
- [19] T. Kobata *et al.*: Final report on key comparison APMP.M.P-K7 in hydraulic pressure from 10 MPa to 100 MPa, *Metrologia*, 42 Tech. Suppl., 07006 (2005).
- [20] T. Kobata *et al.*: Final report on key comparison APMP.M.P-K5 in differential pressure from 1 Pa to 5000 Pa, *Metrologia*, 44 Tech. Suppl., 07001 (2007).
- [21] T. Kobata *et al.*: Final report on key comparison APMP.M.P-K7.1 in hydraulic gauge pressure from 10 MPa to 100 MPa, *Metrologia*, 46 Tech. Suppl., 07008 (2009).
- [22] T. Kobata *et al.*: Final report on supplementary comparison APMP.M.P-S8 in hydraulic gauge pressure from 100 MPa to 1000 MPa, *Metrologia*, 47 Tech. Suppl., 07009 (2009).
- [23] 小島時彦: 圧力標準の国際整合性の確保 10 MPaから100 MPaまでの液体圧力標準の国際比較, *産総研TODAY*, 6 (5), 34-35 (2006).
- [24] T. Kobata: Characterization of quartz Bourdon-type high-pressure transducers, *Metrologia*, 42 (6), S235-S238 (2005).
- [25] W. Sabuga *et al.*: Final report on key comparison CCM.P-K7 in the range 10 MPa to 100 MPa of hydraulic gauge pressure, *Metrologia*, 42 Tech. Suppl., 07005 (2005).
- [26] 小島桃子, 梶川宏明, 小島時彦: デジタル圧力計のための遠隔校正技術の開発, *計測標準と計量管理*, 58 (4), 56-61 (2009).
- [27] 小島時彦: 社会基盤を支える圧力標準における本格研究 圧力標準の整備・普及と新たな校正技術の開発, *産総研TODAY*, 10 (1), 18-19 (2010).

執筆者略歴

小島 時彦 (こばた ときひこ)

1995年筑波大学大学院工学研究科物理工学専攻修了。博士(工学)。同年通商産業省工業技術院計量研究所入所。1999年同所主任研究官。2000年(独)産業技術総合研究所計測標準研究部門力学計測科圧力真空標準研究室主任研究員。2011年同研究室長として現在に至る。2000年～2001年米国国立標準技術研究所(NIST)客員研究員。2008年～2009年



（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構研究開発推進部主任研究員。圧力標準、圧力計測の研究に従事。この論文では、研究統括、圧力全般に関する研究開発・校正業務、原稿執筆を担当した。

小島 桃子（こじま ももこ）

2003年東京工業大学大学院総合理工学研究科創造エネルギー専攻博士課程修了。博士（理学）。同年（独）産業技術総合研究所入所。同所計測標準研究部門力学計測科圧力真空標準研究室研究員として現在に至る。圧力標準、圧力計測の研究に従事。この論文では、主に気体圧力全般に関する研究開発・校正業務を担当した。



梶川 宏明（かじかわ ひろあき）

2006年京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻単位認定退学。同年（独）産業技術総合研究所入所。同所計測標準研究部門力学計測科圧力真空標準研究室研究員として現在に至る。博士（理学）。圧力標準、圧力計測の研究に従事。この論文では、主に液体圧力全般に関する研究開発・校正業務を担当した。



査読者との議論

議論1 全般

コメント（小野 晃：産業技術総合研究所）

この論文は、近年高精度化した工業用デジタル圧力計を国家標準体系にうまく組み込むことにより、産業現場での圧力計測の信頼性を向上させ、また圧力計測に関する国際的な相互承認を促進した優れた研究だと思います。また圧力の標準体系全般を俯瞰的に見た上で、要素技術を特定し、それらを適切に統合して新しい圧力標準体系を構成していった過程が記されており、シンセシオロジー誌の論文としてふさわしいと思います。

議論2 デジタル圧力計の経時変化の原因

質問（小野 晃）

図7に国際比較に用いたデジタル圧力計の校正値の経時変化が出ています。個々の圧力計ごとに経時変化の程度が異なるので難しいかもしれませんが、経時変化の原因が何か、およその推定はできているのでしょうか。

回答（小島 時彦）

圧力計の校正値の経時変化の程度は、圧力計の種類、使用する圧力範囲、使用方法によっても異なります。一般的には、圧力計の校正値の経時変化は高压用の圧力計で大きくなり、低压用の圧力計では小さくなり、はっきりとした経時変化が見られないこともあります。また、図7の例にも示したように、一つの圧力計でもその経時変化の量が印加圧力の関数となる場合があります。

したがって、一概には扱えませんが、校正値が経時変化する一つの要因として挙げられるのは、その受圧部の塑性変形の影響です。受圧部が完全な弾性変形をするのであれば、印加された圧力の大きさに応じて変形し、圧力をゼロに戻せば元の形状に戻ります。しかし、実際の圧力計においては圧力を印加している間に、受圧部がともわずかな量ではあります塑性変形を起こすことがあります。この場合、圧力をゼロに戻しても完全に元の形状には戻りません。圧力ゼロから再度同じ圧力まで加圧する手順を繰り返すと、受圧部は同じ圧力に対しても次第に大きい変形を示すようになります。図7の例においても、6台の圧力計の校正値はすべて、時間と共に、同じ印加圧力に対して受圧部の変形が大きくなる方向に変化しています。

おそらく、これら校正値の経時変化は、上述した塑性変形の影響を含んでいると考えられます。

もっともこれらの変化量は、通常メーカーが主張している仕様精度に比べてとても小さいので、一般的な使用において問題になることは、ほとんどありません。しかし、国際比較では最高レベルの測定精度が必要となるため、その変化の補正が必要となります。

議論3 これまでの方法とこの方法の定量的比較

質問（濱 純：産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門）

高精度デジタル圧力計を伸介器として用いる校正技術は、製品開発、研究開発においてデータの信頼性を担保するよりどころとして、現場での圧力校正の負担軽減に大いに寄与していると思います。

その現場校正の簡便さ、効率化、低コスト化等、これまでの方法との比較で具体的に日数や費用等の校正の軽減の実例があれば、ご教示ください。

回答（小島 時彦）

効率性を示す事例としては、デジタル圧力計を校正対象とした場合、持ち込み校正では、被校正器の移送も含めて通常1～2週間程度の校正期間が必要となりますが、遠隔校正では、国内で実施した各種実証試験において、多くの場合に2日で校正を実施することができました。また、遠隔校正では校正担当者の拘束時間が短縮できますので、必要な人件費も低減できます。しかし、現状、遠隔校正の校正コストは持ち込み校正と比較して、十分に抑えられてはいません。遠隔校正に用いている多機能、高性能な伸介器のコストが主な原因です。今後、遠隔校正を普及させるためには、必要な不確かさに応じて機能を絞り込む等して、伸介器のコストを下げっていく努力が必要であると考えています。

議論4 デジタル圧力計の伸介器を活用できる地域

質問（濱 純）

デジタル圧力計を活用した簡便、迅速、安価な圧力校正・標準供給方法の開発のより具体的な取り組みについて、開示可能範囲でご教示ください。特に、産業現場遠隔校正手法の進展は一つの重要なキーワードと思いますが、そのカバーする地域は国内外どこまでをイメージしていますか。逆に、デジタル圧力計の不確かさの主な要因から、地域が制約されるのかもしれませんが。

回答（小島 時彦）

圧力の遠隔校正については、具体的な開発内容を6.3節に追記しました。今後、整備している国家圧力標準の値を広く、円滑に産業現場に供給することが、より重要になると考えています。将来的には、圧力計測の信頼性を一段と向上させるために、産業現場で使用されている圧力計の表示値の信頼性を、間欠的に行われる校正の結果だけから保証するのではなく、通常の使用時も含め時間的に連続にリアルタイムで保証する必要があると考えています。

また、遠隔校正がカバーする地域についてですが、基本的には伸介器を安全に輸送でき、安定に設置可能で、インターネット等の情報通信網が利用できる場所であれば、国内外問わず特段の制約はないと考えています。ただし、伸介器の輸送に時間を要するような地域では、遠隔校正のメリットである迅速な校正を行うことができません。また、ご指摘のとおり、遠隔校正では伸介器にデジタル圧力計を使用していますので、校正を実施する場所の環境に応じて5章で示した不確かさ要因を考慮しなければなりません。例えば、校正場所の空調の制御が良くない場合には、周囲温度の変化による影響で校正の不確かさも大きくなります。

議論5 デジタル圧力計の活用に関する諸外国の動向

質問（小野 晃）

高精度のデジタル圧力計を伸介器として標準体系に組み込むこと

は、諸外国でも同じような動きがあるのでしょうか、あるいは日本独自の取り組みなのでしょうか。

回答（小島 時彦）

この論文では、圧力の国家標準の設定・管理、国家標準の国際比較、国内標準供給にデジタル圧力計を組み込んだ事例を述べました。それぞれについて、状況を説明します。

はじめに、圧力の国家標準の設定・管理に用いられる、重錘形圧力天びんの比較測定におけるデジタル圧力計の利用についてですが、6.1節で述べた第一の校正方法であるデジタル差圧計を利用した方法は、特に気体圧力の校正において諸外国でも利用が進んでいます。しかし、第二の校正方法である置換法については、産総研が独自に開発してきた要素技術もあり、低圧から1 GPaまでの広い圧力範囲でこの方法を校正に適用しているのは、現在、産総研だけです。産総研で高度化してきたこれら二つの方法は、伝統的な方法による校正結果とも十分に整合することがすでに確認されていて、校正の自動化にも適しています。実際に国内校正事業者でも導入が進んでいて、今後、海外も含めて広く利用されていくと考えられます。

次に、国家標準の国際比較におけるデジタル圧力計の利用についてですが、こちらについても、近年その利用が広がっています。特に、通常、重錘形圧力天びんでは発生できない1 kPa以下の低圧力範囲においては、伸介器に複数の高精度デジタル圧力計を使用することが通例になっております。また、太平洋・アジア、アメリカ、アフリカのような広い地域での輸送が必要な国際比較では、6.2節で述べたように、大型で重量のある重錘形圧力天びん等よりも小型、軽量のデジタル圧力計を伸介器として利用した方が、輸送上大きなメリットがあります。

国内標準供給におけるデジタル圧力計の組み込み事例として示した遠隔校正については、世界において、いくつか類似の技術開発が報告されていますが、現在、圧力計の遠隔校正サービスとして確立されているのは、産総研における校正サービスだけです。この遠隔校正技術に関しては、外国の国家計量標準機関も興味を示しており、7.1節で述べた、校正コストの低減および校正事業者の認定のための枠組み構築のような課題が解決すれば、国内だけでなく諸外国においてもその利用の拡大が期待できます。

議論6 圧力以外の量における遠隔校正の開発状況

質問（小野 晃）

この研究で述べられたことは、伸介器の性能向上が、標準体系全体に大きな影響を与えた例と思います。圧力以外の量においてもこのような事例はあるのでしょうか。

また6.3節で述べられた遠隔校正に関するNEDOプロジェクトでは、圧力以外の他の量はどのようなアプローチをとったのか、簡単に紹介していただければありがたいです。

回答（小島 時彦）

近年、さまざまな量に対して、伸介器（伸介標準器）の性能向上のための取り組みが進められており、それぞれの標準体系において、伸介器の与える影響が増大しています。圧力以外の量において、伸介器の性能向上が、その標準体系に大きな影響を与えた一例として、このシンセシオロジーのバックナンバーの論文 [Vol.3 No.1 pp.1-15 (Mar. 2010)] に掲載されている温度の計測における例が挙げられます。その論文において、新井らは、高温の標準体系を構築し、その計測の信頼性を確保するために、新たに開発した熱電対を伸介器として有効に利用しています。

NEDOのe-traceプロジェクトでは、各種計量標準の供給を効率的に行うため遠隔校正技術の開発を行いました。e-traceプロジェクトにおいて研究対象とした各種計量標準は、その形態により大きく二つに分類されます。一つはGPS（全地球測位システム）や光ファイバ網を利用して遠隔校正を行う標準、もう一つは輸送可能な伸介器を利用する標準です。前者に分類されるのは時間（周波数）標準、長さ標準（波長、光ファイバ応用）、電気標準（直流電圧）等、後者に分類されるのは、電気標準（交流電圧、低周波インピーダンス）、放射能標準、三次元測定機標準、振動・加速度標準、圧力標準、温度標準等となります。前者の典型的な例となる時間（周波数）標準では、GPS衛星を伸介とする方式により周波数の遠隔校正技術を開発しています。また、後者では、基本的には、6.3節で述べた圧力標準の場合と同様に、伸介器を依頼者の指定場所に輸送しインターネット等を活用して遠隔校正を行う技術を開発しています。