

# 石油流量国家標準の確立とわが国の標準供給体制

## — 信頼性のある効率的なトレーサビリティ体系の構築への取り組み —

嶋田 隆司\*、土井原 良次、寺尾 吉哉、高本 正樹

膨大な石油製品の取引や課税の数量の根拠となる石油類の流量測定の計量標準は、通商上、省エネ政策実施の観点、プラントの高度な品質管理の観点から重要である。そこで、標準の信頼性、達成可能な不確かさ、利便性について石油流量の標準供給体制を調査・分析し、わが国に適した国家標準の性能および供給の仕組みを設計した。これに基づいて、校正技術の検討、安全対策と不確かさ低減のための技術開発を行い、中核となる液種と流量範囲で世界最高水準の国家標準を確立するとともに、校正事業者の国家認定制度を利用した標準供給体制の発足を技術的に主導した。さらに、国際比較による国家標準の同等性の検証などを通して本事業の評価を行った。

キーワード：流量、不確かさ、計測、トレーサビリティ、国家標準

### Development of primary standard for hydrocarbon flow and traceability system of measurement in Japan

#### – Approach to construction of an effective and reliable traceability system –

Takashi Shimada\*, Ryouji Doihara, Yoshiya Terao and Masaki Takamoto

It is of importance to establish the hydrocarbon flow standard which acts as the basis for vast dealings and taxation for hydrocarbons, enforcement of the policy on energy savings and high quality management of industries. As a result of investigation into calibration methods, reliability, and effectiveness, the specification of the national primary standard and the traceability system for hydrocarbon flow in Japan was designed. We took the technical initiative in establishing the traceability system using JCSS (Japan Calibration Service System) as basis of the national primary standard in the limited region of flow rates and various kinds of liquids. The national primary standard of high accuracy and safety has been developed. This project was evaluated through verification of international consistency by way of international key comparisons.

Keywords : Flow rate, uncertainty, measurement, traceability, national primary standard

#### 1 はじめに

石油類の流量測定は石油製品の取引や課税の数量の根拠として、また石油化学プラントの生産管理など様々な分野で重要である。流量測定に使用される流量計の精度は流体の物性、流量計の設置条件、流れの状態などに左右されるので、流量計を高い精度で使用するためには、流量計に使用する流体を標準となる流量で流し、標準値と流量計の指示値を比較することによって補正値を求める、もしくは流量計が正確な値を示すように調整する実流校正が必須である。また、使用中の流量計の性能を担保するためには定期的に実流校正する必要がある。

これまで、取引に使われる石油用流量計には法律に基づく規制に従い厳格な品質管理が行われてきたが、測定技術の進歩に伴い、高精度の流量計を利用した高度な品質管理

を自主的に実施できるようにすることが求められている。したがって、多種多様の石油類に対する高精度の流量標準確立への要請を始めとする精度・コスト・校正対象への要請、さらには国際整合化が求められているが、流量分野では、産業技術総合研究所（以下、産総研）に水流量と空気流量の国家標準があるのみで、石油流量の国家標準はなく、これらの産業界のニーズに対応できていなかった。

そこで、産総研では、2001年に新たに石油流量の国家標準施設を建設し、不確かさの評価、品質システムの構築を経て、2005年に計量法における石油流量の特定標準器の指定を受けた。さらに、石油流量の国家標準の範囲が限定されたものであることから、政府支援の研究プロジェクトのもと、石油関連の民間企業の協力も得て、校正事業

産業技術総合研究所 計測標準研究部門 〒305-8563 つくば市梅園 1-1-1 中央第3

National Metrology Institute of Japan, AIST Tsukuba Central 3, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8563, Japan \* E-mail: t-shimada@aist.go.jp

Original manuscript received September 1, 2009, Revisions received February 5, 2010, Accepted February 9, 2010

者の有する二次標準の段階で、液種や流量範囲を拡大する技術を開発した。これにより、国内における計量のトレーサビリティ体系が完成し、民間活力を利用した石油流量の標準供給制度（JCSS：計量法校正事業者登録制度）が発足した。

## 2 石油流量標準を作る社会的な目的

我が国の年間石油取引はおよそ 29 兆円に達し<sup>1)</sup>、流通額はその数倍と言われている。この数量根拠となる取引証明用の石油流量計は日本国内の石油コンビナートなどでは数万台が稼働し、石油流量計による正確な測定が産業界、社会から要請されている。測定する流量の範囲は 1～1000 m<sup>3</sup>/h がほとんどであり、中でもタンクローリーの出荷場で使用される数百 m<sup>3</sup>/h 程度の測定が最も多いと言われている。また、石油の種類は、揮発油（ガソリン）、灯油、軽油、重油、原油など多岐にわたり、流量計の形式としては、容積流量計やタービン流量計が多く使われている。現場で流量計に求められる精度は厳しく、石油流量標準に対して要求される不確かさのレベルは高い。

これまでは、産総研が検査（合格もしくは不合格を判定）した基準器と呼ばれる標準器を用いて多くの石油用流量計が検査されてきた。この基準器は、日本国内の一般消費者に不利益を生じさせない、すなわち公平性を担保する目的で、通商用の計量器である小口径の石油用流量計を都道府県の検定所などが検査する機器である。この基準器を用いた制度では公的機関が適切な方法により定められた性能を検査することから、社会全体の計量器の管理費用を大きく削減することができると言える。

一方、測定技術の進歩に伴って、自主的な高精度の品質管理を実施するために、この制度の範囲外である高精度の流量測定、多様な液種および広い流量範囲の流量測定に対するニーズが最近高まっている。さらに、経済活動や生産活動の国際化に伴い、我が国の石油製品の国際取引が増大してきており、国家間の流量測定値の整合性を保証することが不可欠となっている。そのため、ユーザーに対して国際的に整合性のある標準を提供し、国際的なシステムに準拠した計量トレーサビリティを確保できる選択肢を与えることが求められているが、これまでは石油流量の国家標準として使用できる校正設備がないため、質量、体積、時間、密度、温度、圧力などの物理量を用いて流量を組み立てる作業は流量計のメーカーやユーザーに委ねられていた。また、計量トレーサビリティの定義が不確かさについて科学的に明確化されたので、不確かさが付随しない従来の制度では計量トレーサビリティを確保できなくなった。

さらに、石油製品の国内取引量に対して課税される石油

税も年間約 6 兆円<sup>1)</sup>と巨額であり、その計量は社会的に重要な意味をもっている。このため、石油税の数量測定に使用される税務メータ（石油流量計）には、器差（標準値から偏差）が± 0.2 %以内という高い精度管理<sup>2)</sup>が求められている。この税務メータは、前述のとおり全国の石油コンビナートなどで現在数万台が使用されていると言われ、その精度管理に多大な人的資源やコストを要するため、その合理化が強く求められている。

## 3 石油流量標準を作る技術的な目的

石油流量計は石油類の量（体積もしくは質量）を測定するため、校正装置の一部である体積タンク（体積計）もしくは秤量計（質量計）を高精度に校正すれば、容易に流量計を高精度に校正できると一部では誤解されている。体積もしくは質量の不確かさは校正の不確かさの主要因の一部であるが、温度測定、圧力測定、密度測定、また、校正に用いる接続管路にある分岐管からの試験液の漏れ、管路内の流速分布および流速変動が流量計の特性に及ぼす影響など、校正の不確かさに大きな影響を及ぼす要因が他にも数多くある。むしろ実際には、これらの要因の方が最終的な校正の不確かさに対して支配的である場合が多く、これらの不確かさ要因を評価することが必要である。さらに、実際の流量計を用いた測定では、その流量計が校正された条件と流量計が使用される条件が異なる場合が多く、流量計に及ぼす管路の形状、使用温度、使用圧力、試験液の物性値などが流量計の特性に与える影響を評価し、実際の測定条件における測定の不確かさを推定することが求められる。これらの評価をすべての測定条件に対して行うことは、費用や時間の関係上、困難であることから、不確かさの要求レベルに応じた不確かさ要因を特定し、効率的な不確かさの推定が求められる。

石油類は 1 °C で約 0.1 % の体積膨張が生じるが、石油製品の商取引では、測定環境によっては使用温度に応じて本来必要となる補正を行わずに、測定された体積をそのまま用いられることが多い。一方、エネルギー資源である石油類では質量で取引されることが技術的には妥当であると考えられ、新たな国家流量標準に対しては、体積流量に加えて質量流量でも流量標準を供給することが求められる。

## 4 石油流量標準供給を実現する方法の検討

### 4.1 石油流量標準の供給方法

石油流量を計測する現場では、少ない資源（コスト、時間など）で可能な限り小さな不確かさで流量を測定し、さらにその信頼性が担保されていることが求められる。一方、標準となる流量は質量、体積、時間、密度、温度、圧力

などの他の物理量を用いて組み立てることにより決められるため、国家標準を供給する上で、他の標準から標準流量の組み立てを「どこで、誰が」行うかを明確にする必要がある。これまで我が国では石油流量の国家標準として使用できる校正装置がなかったため、上述した他の物理量から流量を組み立てる作業は流量計のメーカーやユーザーに委ねられており、その信頼性は明らかではなかった。標準流量の供給方法はおおまかに次の三つに分類される。

(1) 国の計量標準機関 (National Metrology Institute) が流量標準を供給する方法

国の計量標準機関によって国家標準として流量標準を組み立てれば、信頼性が高く、理想的な標準供給体系を構築することができる。しかし、石油製品は多種多様であり、また必要とされる流量の範囲が非常に広いため、社会で用いられるすべての液種、流量範囲に対して流量標準を作成し、供給することは現実的ではない。仮に現場で使用される多様な流量計測条件に対応して、国家標準の水準で小さな不確かさをもつ流量標準を供給しても、それに伴って高い供給料金が課せられることになり、結果として、不確かさとコストのバランスを追求するユーザーは(2)で述べる校正事業者を選択することになると予想される。

(2) 他の物理量の標準（体積など）を用いて校正事業者が流量計の校正を行う方法

国家標準として流量標準を採用せず、例えば質量標準と密度標準を使用して校正事業者が流量計の校正を行う方法である。この方法では、校正事業者が質量標準と密度標準を用いても、不適切な組み立てにより流量計を校正した場合には、重大な補正量の見落しや不確かさを過小評価してしまうなどの問題が生じやすい。また、小さな不確かさを達成する技術の確立は個々の校正事業者にとって多大な負担となり、結局は計量管理のための社会的コストが増大することになる。また、信頼性を

担保することが難しく、ユーザーに不利益が生じる可能性が大きい。一方、この方法は拡張性が非常に高いため、校正事業者が必要とする多種多様な液種や流量に対して運用できるという特長がある。

(3) 外国の機関などから供給される流量標準を用いる方法

数多くの国々で採用されているが、他国の標準に依存するため、国内で必要とされる小さな不確かさを達成することは難しい。さらに、校正のために流量計を海外に輸送する必要があるため、その過程で信頼性が低下する。

図1に代表的な石油流量の標準供給体制の概略を示す。ヨーロッパでは基本的に(1)の方法が採用され、流量標準が供給されていない範囲では、(2)の方法により認定機関が流量の組み立ての妥当性を検証する体制がとられている。校正事業者の能力を担保するために、国際基準規格 (ISO17025) では技能試験を要求しているが、これを適正に実施していない例が生じており、問題となりつつある。そのため、最近では、新たに石油大流量（最大流量 5000 m<sup>3</sup>/h）の国家標準相当の校正設備を建設するなど流量標準の供給範囲の拡大が進められている。

アメリカでは、(2)の方法が主に採用されており、市場の競争原理に従い、校正事業者によって流量の組み立てが行われている。認定機関により校正事業者の認定が行われているが、現状では、世界で最も小さな不確かさをもつ国家標準よりもはるかに小さな不確かさを表明するといった技術的に不適切な不確かさで認定されている事業者も散見されている。この問題に対処するために、アメリカでは、法律で石油製品の売り上げの一定割合を米国石油協会 (American Petroleum Institute : API) に集め、この資金を元に流量計の校正の信頼性を保証する技術基準 (API規格) の策定と実施を積極的に行っており、政府に頼らない小さな政府を志向した、民間レベルの標準の信頼性確保に対する努力が払われている。このような仕組みのない日本ではそのまま(2)の方法を導入することは難しいと考

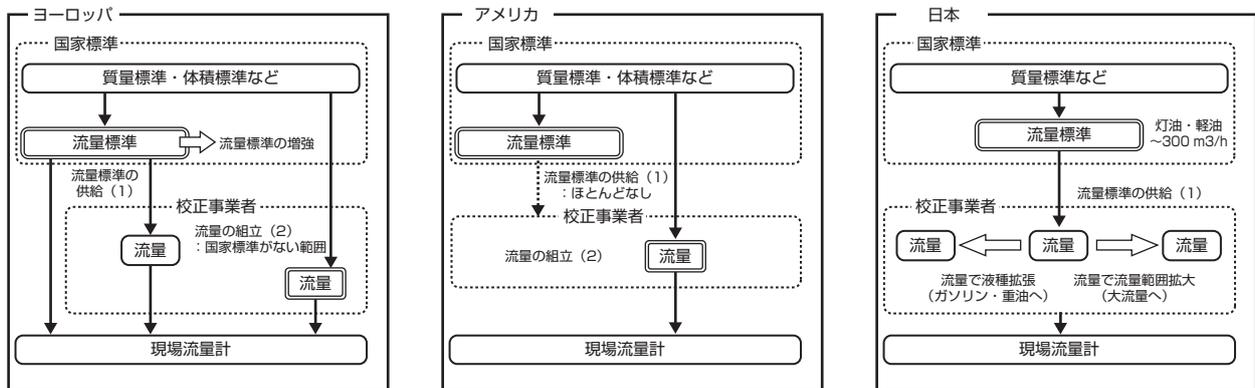


図1 石油流量の標準供給体制の概略

られる。

我が国ではこれまで石油流量の国家標準がなかったため、通商用など特定の計量器を対象とした校正・検査のために法律によって定められた基準器を用いた(2)の方法が用いられてきた。しかし、その方法ではカバーできない高精度の流量測定、多様な液種・流量範囲の流量測定、国際的な受け入れを保証された流量測定のための計量器を校正するニーズの最近の高まりを受けて、国家標準としての流量標準を確立することが必要となった。そこで、信頼性を確保できる(1)と拡張性を重視した(2)を組み合わせた方法、すなわち、中核となる流量範囲および液種で産総研が高精度(小さな不確かさ)の流量標準を供給し、JCSS(校正事業者登録制度)を活用することにより校正事業者が既に保有する校正装置で標準流量の範囲を拡大し、また校正液種を拡張する方法が選択された。図2に液種および流量範囲に関する産総研と校正事業者の分担関係の詳細を示す。台数が多いタンクローリーの出荷用流量計の流量範囲を想定して、この国家標準では流量標準の最大流量として300 m<sup>3</sup>/hを設定し、その液種は、粘度が中間にある灯油と軽油とした。

#### 4.2 国家標準の校正方法と要素技術の調査と比較

校正事業者が校正する液種や流量の範囲を広げる際には、その校正の不確かさは基となる国家標準のもつ不確かさに比べて増大する。不確かさを小さくしようとする校正事業者の負担を小さくするためには、国家標準による校正をできる限り小さな不確かさで行うことが求められる。石油類の課税標準などの数量の測定に使用される流量計には器差(標準値から偏差)を0.2%以内とする管理<sup>[2]</sup>が要求される。そこで、石油流量の国家標準の不確かさの目標値として体積流量基準で0.04%以下を設定した。この値は他国のNMI(計量標準機関)の国家標準と比較して

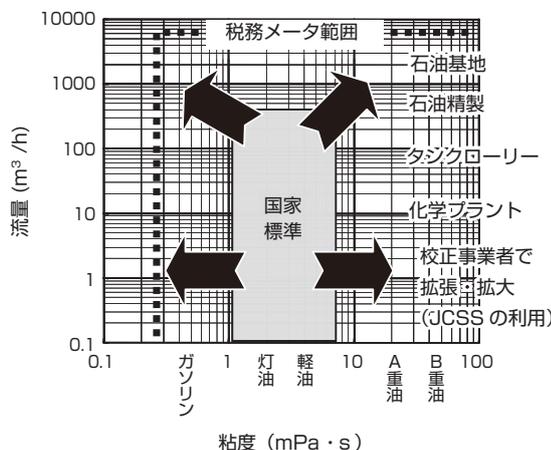


図2 国家標準と校正事業者との液種と流量範囲の分担概略図

も最高水準の目標値であり、多くの技術的な課題が予測されたが、それを乗り越えて国家標準を構築することとした。

流量計の校正は、校正対象の流量計を通過する標準流量と流量計の指示値とを比較することにより行われる。石油用の流量計を校正する代表的な方法<sup>[3][4]</sup>は下記に分類される。ここでは、流量計を用いて流量計を校正する方法(比較法)では標準となる流量計を校正設備で校正する必要性が生じるため、また、流量計を通過する瞬時流量を測定する方法(動的校正法)では不確かさを小さくすることが困難であるため、これらの方法を除いた。

##### (1) 流れの種類による分類

- ・停止法：校正の前後で被校正流量計の流れを停止させる方法。校正設備を比較的安価に構築できるが、停止状態と校正流量との間の流れの過渡状態が流量計に影響を及ぼす可能性がある。
- ・通液法：校正作業の間に被校正流量計の流量を変えない方法。流れの過渡状態による影響はない。

##### (2) 参照する標準器の種類による分類

- ・体積法(体積タンク)：あらかじめ校正した体積目盛りを備えた体積タンクに試験液を流入させ、その体積を測定する方法。一般的な石油設備での実績はあるが、体積タンク内側壁面に残着する試験液の影響を評価することや、試験液の温度体積膨張による影響を小さくするために体積タンク内の試験液の温度を高精度に測定することが必要である。
- ・体積法(体積管)：管路内を移動するピストンが排除する体積をあらかじめ校正し、その管路を用いて流量計を校正する方法。大気開放部分がない(閉ループ)ため、蒸気の影響を考慮する必要がなく、多くの石油設備で実績がある。高精度を達成するためには、移動体の位置を検出する装置の影響、測定区間の温度測定、移動体と測定管路壁面との間の漏れ、移動体の膨張、圧縮の影響を検討する必要がある。
- ・秤量法：秤量タンクに試験液を流入させ、秤量計を用いて流入質量を測定する方法。高精度を達成できるが、高所から試験液を流入させると、秤量計は試験液の衝撃の影響を受ける。また、質量測定時には秤量タンクを外部から荷重をかけない仕組みにする必要がある。

##### (3) 通液法における流れの切り替え方法による分類

- ・高速バルブ法：バルブを高速で回転させることにより、試験流体の試験ラインからの流れを貯蔵タンク側と標準器側へと切り替える方法。転流器法に比べ安価であるが、切り替えを高速に行うと大きな

圧力変動が発生するため、切り替え速度に限界があり、被校正流量計に対する切り替えの影響を無視できない。また、流れの対称性に問題が生じやすく、高精度化に限界がある。

・転流器法：空気中に開放したノズルから噴流状態で流れる試験流体を貯蔵タンク側と標準器側とに切り替える装置。切り替え時の流量変動が小さく、被校正流量計に全く影響を及ぼさない。水流量標準施設で使用された実績があり、高精度化を図れる可能性がある。一方、ノズルから自由噴流で流れるため、噴流流速が大きくなると、ミスト発生に伴う静電気による爆発の危険性がある。さらに、大気中に放出される油蒸気および液滴が不確かさの要因となる。また、試験液を滴のように秤量タンクへ流し込むと気泡が大量に発生し、そのまま気泡を含む試験液を試験ラインに循環させると残存気体として不確かさの要因となる。

表1に石油流量標準に関する各国の計量標準機関の校正能力と校正方法を示す。ここでは、メートル条約の協力の下に実施される国際比較に基づいて決められた不確かさによって、校正能力を定量的に表した。これは、参加機関がそれぞれの不確かさについて示した技術的な根拠を全ての他の機関が承認しているという、最も権威のある国家標準の評価結果と言える。外国の国家標準として石油用流量計の校正では、体積管を用いた通液法や体積タンクを用いた停止法が数多く使用されている。しかし、これらの方法は前述したとおり高い水準の不確かさを達成するためには技術的な課題が多い。また、停止法では流量計の種類によっては流れの過渡状態が不確かさの大きな要因になるなど、被校正流量計の種類が限定される校正方法もある。一方、水用流量計の校正設備で数多く採用されている転流器を用いた通液式秤量法は、静電気による爆発の危険性から危険物である石油類に採用された例はまれであるが、この点を克服できれば、小さな不確かさが達成される可能

表1 各国の石油流量国家標準の不確かさと校正方法

国名	NMI (計量標準機関)	流量 (m³/h)	不確かさ ** (%)	試験液	温度 (°C)	圧力 (MPa)	粘度 (mm²/s)	校正方法	参照
オーストリア	BEV	0.0018 ~ 90	0.07 ~ 0.1	ガソリン、軽油	14 ~ 17	0.05 ~ 0.6		体積法 停止法	体積タンク
台湾	CMS	18 ~ 360	0.05	軽油、スピンドル油	10 ~ 45	< 0.5	2.5 ~ 150	秤量法 停止法	秤量タンク
キューバ	INIMET	3 ~ 300	0.1 ~ 0.2	ガソリン、灯油、軽油、重油	成り行き	< 0.8		体積法	
チェコ	CMI	0.29 ~ 396	0.15 ~ 0.30	灯油、軽油、石油、LPG	0 ~ 85	0.1 ~ 3.5		体積法 通液法	体積管 (ピストン)
デンマーク	FORCE	0.4 ~ 400	0.03	石油類				体積法 通液法	体積管 (ピストン)
ドイツ	PTB	0.6 ~ 250	0.1	揮発油	成り行き	0.35	0.77 mPas	体積法 停止法	体積タンク
イタリア	IMGC	0.0036 ~ 3.6	0.1	灯油、軽油	成り行き	0.15		体積法 通液法	体積管 (ピストン)
日本	NMIJ*	15(3) ~ 300	0.03	灯油、軽油	15 ~ 35	0.1 ~ 0.7	1.4 ~ 1.9, 4.4 ~ 7.8	秤量法 通液法	秤量タンク
韓国	KRISS	1 ~ 14.8	0.11	スピンドル油	15 ~ 30	0.1 ~ 0.3	600 ~ 2200	秤量法 停止法	秤量タンク
メキシコ	CENAM	0.002 ~ 340	0.06 ~ 0.08	石油類	0 ~ 82	0.1 ~ 0.4	0.5 ~ 10	体積法 通液法	体積管 (ピストン)
ポーランド	GUM	0.4 ~ 400	0.1	軽油	成り行き		0.3 ~ 300	体積法 通液法	体積管 (ピストン)
スウェーデン	SP	0.36 ~ 1260	0.1	LPG、軽油など	-20 ~ 120		LPG ~ 300	体積法 通液法	体積管 (ブルーバ)
オランダ	NMI-VSL	0.001 ~ 250	0.04	ガソリン、灯油、軽油		0.4	0.7, 1.8, 5	体積法 停止法	体積タンク
英国	NEL	0.00012 ~ 720	0.03 ~ 0.08	灯油、軽油、重油	5 ~ 50	0 ~ 0.8	2.2 ~ 30	秤量法 停止法	秤量タンク

\*) NMIJ：産業技術総合研究所 計量標準総合センター

\*\*）不確かさ：ここでは簡便のため拡張不確かさ（95%の信頼度）の値を表記

性が高い。そこで、産総研では、世界最高精度の国家標準を実現するために、国家標準設備の校正方法として「転流器による通液式秤量法」を選択し、高精度化に向けた要素技術を開発するとともに、安全性を確保する対策を施すこととした。

## 5 石油流量標準の構築

### 5.1 石油流量校正設備

灯油および軽油を大量に保有・使用する設備となるため、安全性を確保する上で、危険物一般取扱所として消防法に準拠した設計であるとともに、保安管理体制を構築することが前提となり、周囲環境に配慮した試験液の屋外漏洩および流出を防止する方策が求められる。さらに、校正方法として選択した「転流器による通液式秤量法」では前章で述べたとおり危険要因が増えるため、十分な安全対策を施すことが必要である。国内では、危険物である石油類を大量に流す大型設備を屋内に設置した例はこれまでほとんどなかったが、国家標準の重要性と特別の安全対策の結果、消防当局から建設が認められた。図3に安全対策と不確かさに関連する要素技術の関係を示す。

まず、油の漏洩を防ぐために、施設全体を防油堤で囲み、さらに、建屋周囲にピットと油水分離器を設置した二重の対策が施されている。屋根は、万が一の爆発事故時に、上方へ圧力を逃がすための放爆構造とし、軽量スレート板で構成されているが、室内の温度安定の向上を図るために、断熱材をはさんだ構造とした。石油類が循環する試験ラインが設置される危険区域と制御用コンピュータなどが設置される操作室などの非危険区域とを明確に区分した。また、操作室から試験ラインを監視し、非常時に迅速な対応ができるように、耐火ガラスおよび耐火シャッターを設置した。危険区域では漏洩した油の地下浸透を防ぐために防油床とし、2基の43 m<sup>3</sup>貯蔵タンクは地下ピット内に、また地下ピットのある部屋に秤量タンクを設置し、万が一の漏洩時にも外部へ流出しない構造とした。

表2 国家標準における不確かさ要因（灯油試験ライン）

不確かさの要因	相対不確かさ
1) 流量計バルス計数時間	0.0028 %
2) 接続管路内の質量変化量	0.0008 %
3) 流量・密度変動の影響	0.0002 %
4) 試験液の質量計測 (うち 蒸気及び液滴の影響分)	0.0054 ~ 0.0154 % (0.0030 ~ 0.0146 %)
5) 流量計内の試験液密度測定	0.0124 ~ 0.0146 %
6) 秤量タンク内への流入時間	0.0032 ~ 0.0042 %
体積流量基準の校正の不確かさ(相対) : 1) +2) +3) +4) +5) +6)	0.016 ~ 0.022 % (簡略化して0.03 %)
質量流量基準の校正の不確かさ(相対) : 1) +2) +4) +6)	0.008 ~ 0.016 % (簡略化して0.02 %)

注) 相対不確かさ：流量計の表示する流量の不確かさを流量値で割った相対量(校正の不確かさ)の内、それぞれの不確かさの要因が原因となっていると考えられている成分を示す。

石油用流量計の実流校正設備である石油大流量校正設備<sup>[5]</sup>の概略図を図4に、また不確かさ要因を表2<sup>[6][7]</sup>に示す。この校正設備は灯油用および軽油用の2つの試験ラインから構成され、流量範囲はともに3~300 m<sup>3</sup>/hである。灯油用および軽油用の設備は完全に独立しているが、試験液の温度調整用設備を共用するため、両設備の同時運転はできない。

本設備では、転流器を用いた通液式秤量法を採用しており、被校正流量計を通過した試験液(灯油もしくは軽油)を転流器により所定時間の間、秤量計の上に配置された秤量タンクへ転流器ノズルから流入させ、秤量計で計測された流入質量を流入時間で除して標準質量流量を得て、さらに質量流量を試験液の密度値で除することで標準体積流量に換算する。これら標準流量と校正対象の流量計の指示値とを比較することにより校正を行う。

前章で述べたように転流器を用いた校正方法の特長として、バルブの切り替えによる流れの切り換え方法に比べ計測時の流量変動が少ないことが挙げられる。さらに、転流器には、新たに開発した新形式<sup>[8]</sup>を採用した。この転流器は秤量タンク側へ流れを転流させる計測開始時とパイ

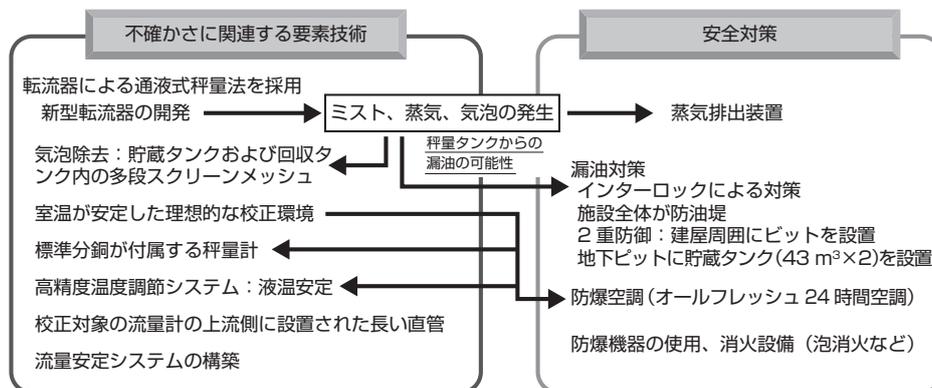


図3 石油大流量標準のために開発された要素技術

パス側へ転流させる計測終了時に転流羽根を自由噴流に対して同一方向に等速度で移動させるものであり、アメリカやフランスの国家標準（水流量）、国内の校正機関（水流量）でも採用され、液体の校正設備では世界標準となりつつある。そのままでは、安全性の観点から石油流量校正設備への適用は困難であったが、転流器内の自由噴流の出口面積を制御することにより、噴流流速の増大に伴う静電気の発生を抑制することに成功し、流量計の校正の不確かさに対する流入時間の不確かさの寄与を著しく低減させることに成功した。

また、自由噴流で発生する試験液の蒸気や液滴が測定室内へ流出することを防ぐために、転流器内が大気圧に対して微負圧になるように制御し、蒸気などを室外へ強制排気させ、油蒸気および液滴は凝縮、廃油として回収する構造とした。この蒸気および液滴の強制排気により灯油ラインでの校正の不確かさは悪化し、灯油ラインにおける一部の流量範囲では支配的な要因となることがわかった。なお、軽油ラインでは灯油ラインと比較すると蒸気および液滴の影響は小さい。さらに、転流器を利用した校正方法の採用により大量に発生する気泡を除去するために、43 m<sup>3</sup>の貯蔵タンクおよび回収タンク内に多段スクリーンメッシュを設置し、気泡が十分に除去できることを確認した。

校正対象とする流量計は、内径が50～150 mmである試験管路に設置される。流量計上流部で理想的な流れを形成させるために、被校正流量計の上流側に内径の100倍（15 m）以上の直管が設置されている。ポンプによる脈動を低減させるために、同一性能である3台の遠心ポンプを並列に運転させ、さらに、秤量タンク取込時の流量変動を低減させる方法<sup>[5]</sup>を開発した。

秤量計が設置されている秤量タンク室では、防爆型の空気調和設備により年間を通じて室温20±5℃以内の温度管理および静電気対策のために湿度30%以上に湿度管理されており、秤量システムの不確かさの低減に寄与している。10 t秤量計には1000 kg校正用分銅を10枚、1 t

秤量計には200 kg校正用分銅を5枚吊り下げ、試験前に秤量計を校正することにより、秤量計の経年変化の影響を最小限にしている<sup>[7]</sup>。また、同じ建屋内にポンプなど多数の振動源を設置することから、極微少な振動と密接に関連する秤量計の不確かさを向上させるために杭基礎工事で十分な防振対策を施した。

試験液の温度膨脹による不確かさを低減させるためには、試験液の温度を安定させることが必要である。防爆型の空気調和設備により室温も安定に保ち、さらに試験液の温度制御を行う熱交換器を通過する流量を一定にし、熱交換器にかかる負荷の時間変動を小さくする工夫の結果、十分な試験液の温度安定性（±0.05℃以下）が得られた。これらの技術開発の結果、表2中の「5）流量計内の試験液密度測定」および「2）接続管路の質量変化量」による不確かさを最小化することができた<sup>[6]</sup>。

実施される校正技術の妥当性を確認する目的で、再現性に優れたサーボ式容積流量計を開発<sup>[9]</sup>し、灯油および軽油用の試験ラインに3台常設した。このサーボ式容積流量計を被校正流量計の校正時にあわせて校正し、過去の校正値との比較を行うことで、校正の妥当性を常に確認することができた。

校正の前提として、管路内に気体残存がないことの確認と分岐管にあるバルブからの試験液の漏れがないことの確認を、日常の校正作業に取り入れている。

以上の安全対策と不確かさ低減のための要素技術を組み入れることにより、体積流量基準の校正の不確かさは目標値とした0.04%よりも優れた0.03%、質量流量基準では世界最高精度である0.02%を達成した<sup>[5]</sup>。

## 5.2 開発された流量標準の妥当性の検証

開発した石油大流量校正設備は計量法において石油流量の特定標準器に指定されており、校正される石油流量の絶対値と値に付随する不確かさの妥当性を検証し、その国際同等性を確認することは、我が国の石油流量計の信頼性を担保する上で非常に重要である。

まず、あらかじめSP（スウェーデン標準研究所）（表1参照）との2国間国際比較を実施した結果、NMIJとSPの校正設備での校正値が双方の不確かさの範囲内で一致した<sup>[5]</sup>。さらに、英国（NEL）が幹事国となり、メートル条約の協力の下で実施される石油流量の国際比較実験<sup>[10]</sup>に参加した。当初の参加国はヨーロッパ5カ国、アジア2カ国（台湾を含む）および北米2カ国の計9カ国であった。再現性および流量特性の優れた国際比較のための流量計が輸送の途中で破損したため、2005年から2007年までの2年間の長きにわたって実施された。参加したすべての国々での流量計の校正値を図5に示す。今回の比較実験

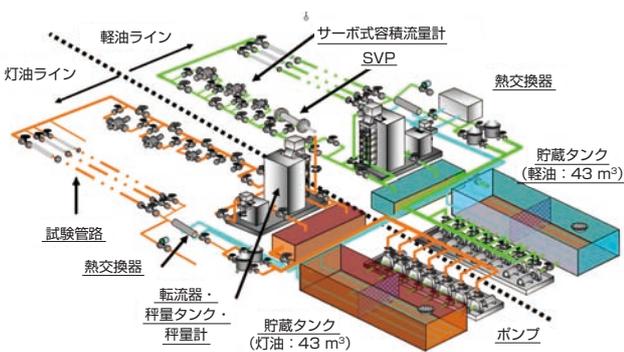


図4 石油大流量校正設備の概略図

からは途中から取り下げられたが、体積管を用いた校正装置 (Small Volume Prover) もしくは体積タンクを外部機関の施設 (例えば、石油会社) に持ち込むことにより校正作業を行った2カ国 (メキシコ、カナダ) の校正値は他の国々での値から大きく乖離していた。このことは、すでに述べたように体積タンクなどの個々の測定機器に対してトレーサビリティを確保することだけでは高精度の流量標準を組み立てることは技術的に難しく、校正環境を含めた校正装置全体の不確かさを低減する必要があることを示唆している。一方、我が国の国家標準値は、図5からもわかるように、全体の校正値結果の中心部分に分布している。さらに統計的な解析から得られた国際的な合意値と不確かさの範囲内で一致していることが確認された<sup>[10]</sup>。

## 6 効率的なトレーサビリティ体系 (JCSS) の構築の取り組み

多種多様な石油類、広い流量範囲で流量計を使用する産業界のニーズに対応するためには、国家標準から、JCSS (校正事業者登録制度) を通じて流量範囲および液種を拡張する必要がある。このために、政府支援の研究プロジェクト<sup>[11]</sup>により、液体の粘度に依存する流量計の特性に高度な解析を加えることによって異なる液種へ容易な拡張を可能とする技術、流量計の並列化で流量範囲を拡大する技術開発を行った<sup>[11][12]</sup>。これらの新校正技術の妥当性を検証するために、国内校正機関 (校正事業者) の校正能力を調査した一例を図6に示す。2005年実施の結果が示すように、従来国家標準値から $-0.05\% \sim +0.10\%$ の偏差があった校正設備は、国家標準で校正された流量計で国内校正機関の校正設備を校正することにより、国家標準と $\pm 0.03\%$ 以内で一致するまで校正能力が著しく向上した

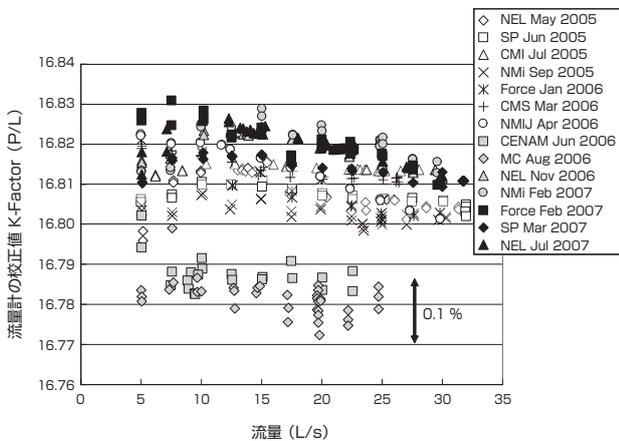


図5 石油流量の国際比較の測定結果

NMIJ: 日本, NEL: 英国, SP: スウェーデン, CMI: チェコ, NMI: オランダ, Force: デンマーク, CMS: 台湾, CENAM: メキシコ, MC: カナダ。国際比較報告書[10]の図2中のデータを読み取り、再プロットした。

ことがわかる。さらに、産総研の国家標準の校正範囲外である重油での値は外国校正機関での値と $\pm 0.03\%$ 以内で一致しており、プロジェクトで開発した液種を拡張する方法が妥当であることを示唆していると言える。

この他、国家標準から供給を受けた校正事業者の能力を担保するためにこれを認定する製品評価技術基盤機構 (NITE) を技術的に支援すべく技術的要求事項適用指針<sup>[13]</sup>の策定を主導した。その結果として、認定登録校正事業者が新たな事業としてその数が拡大しつつある。

また、液種の拡張技術を応用して、流量計のもつ粘度特性を要因とする不確かさの低減や作業効率の向上を図るべく流量計メーカーと共同で高精度流量計の開発を継続的に実施している。

さらに、JCSS 体制下の校正事業者との間で役割分担することで国家標準は限定的な範囲ではあるが、世界最高レベルの高精度な設備となっており、計量器産業の流量計開発プラットフォームとして、重要な役割を果たしつつある。

## 7 まとめ

本報では、石油流量標準における国家標準の位置づけを社会的な合理性を追求する観点から議論するとともに、石油流量の国家標準における校正方法の選択過程および不確かさ削減のための要素技術とそれに伴う安全性の確保について報告した。さらに、国家標準の妥当性とユーザーが利用できるトレーサビリティ体系の構築について報告した。現場で使用される流量計の精度管理の効率化に向けて、現在は、JCSS 登録事業者を希望する校正事業者への技術支援を行っている。環境問題などにより脱石油が推進されているが、近年の原油価格の高騰で見られるように石油製品の高価格化に伴い、さらなる高精度の計量が求

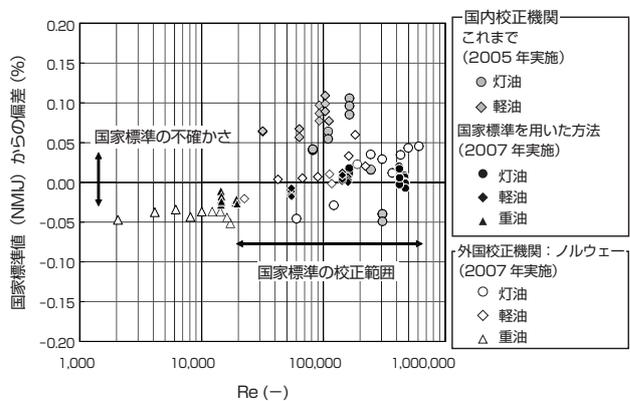


図6 国家標準値 (NMIJ) からの偏差

2005年と2007年で使用された流量計が異なるため、横軸のRe数は一致しない。また、国家標準の校正範囲は参考である。

められることが予想される。今後は、流量標準供給体制が整っていない低温流体であるLPGやLNG、また高粘度流体であるC重油のトレーサビリティ体系を設計する必要がある。さらに、高性能の質量流量計が開発されつつあることから、現在の主流である体積を用いた取引から質量へ移行する可能性がある。今後も社会ニーズにあわせて、新しい技術基準の策定、より適切な規制に向けた技術的な提言、トレーサビリティ体系の改良が必要であると考えられる。

## 謝辞

流量計校正事業、他国の計量標準機関の技術動向などの調査が本研究において重要な役割を果たした。これらは、社団法人日本計量機器工業連合会が主催し石油会社および流量計メーカーが参加した石油流量研究会での研究成果、独立行政法人製品評価技術基盤機構・認定センターの協力、経済産業省知的基盤課の協力、資源エネルギー庁石油精製備蓄課の協力に負うところが大きい。

## 参考文献

- [1] 石油連盟: *今日の石油産業* (2009).
- [2] 国税庁: *揮発油その他の石油類の数量測定に流量計を使用する場合の取扱いについて*, 蔵関第3223号 (2009).
- [3] 社団法人日本計量機器工業連合会: *流量計の実用ナビ* (2005).
- [4] 日本工業規格: *JIS B7552 液体用流量計-器差試験方法*, 日本規格協会 (1993).
- [5] 嶋田隆司, 土井原良次, 寺尾吉哉, 高本正樹: 国家標準のための石油流量計校正設備の開発, *日本機械学会論文集B編*, 71 (703), 854-861 (2005).
- [6] 嶋田隆司, 土井原良次, 武田一英, 寺尾吉哉, 高本正樹: 石油大流量校正設備の不確かさ解析 (第1報 流量計測に対する不確かさ解析), *日本機械学会論文集B編*, 71 (712), 2956-2983 (2005).
- [7] 嶋田隆司, 土井原良次, 武田一英, 寺尾吉哉, 高本正樹: 石油大流量校正設備の不確かさ解析 (第2報 質量計測に対する不確かさ解析), *日本機械学会論文集B編*, 72 (718), 1551-1558 (2006).
- [8] T.Shimada, S.Oda, Y.Terao and M.Takamoto: Development of a new diverter system for liquid flow calibration facilities, *Flow Measurement and Instrumentation*, 14 (3), 89-96 (2003).
- [9] T.Shimada, Y.Terao, M.Takamoto, S. Ono and S. Gomi: Development of a servo PD oil flow meter for a transfer standard, *Proc. 5th Inter. Symp. Fluid Flow Meas.*, (2002).
- [10] BIPM: *International Key Comparison of Liquid Hydrocarbon Flow Facilities CCM-FF-K2 (Final Report)*, (2008).
- [11] 独立行政法人産業技術総合研究所: 石油流通合理化のための流量計品質管理技術に関する研究, *経済産業省委託費平成19年度成果報告書* (2008).
- [12] 寺尾吉哉, 嶋田隆司, 土井原良次, 高本正樹: 石油流量標準と石油流量のJCSS, *計測標準と計量管理*, 59 (1), (2009).
- [13] 独立行政法人製品評価技術基盤機構認定センター: 技術的要求事項適用指針 登録に係る区分: 流量・流速 校

正手法の区分(呼称): *液体流量計(石油用流量計)*(第7版), JCT20830-07 (2009).

## 執筆者略歴

嶋田 隆司 (しまだ たかし)

1999年京都大学大学院工学研究科博士課程修了。博士(工学)。同年、通商産業省工業技術院計量研究所(現産業技術総合研究所)入所。これまで、石油流量の国家標準の開発・維持・供給、石油流量のトレーサビリティ体系の構築に従事。本論文では、資料の収集及び分析、論文骨子の組み立てを担当した。



土井原 良次 (どいはら りょうじ)

2001年九州大学大学院工学研究科博士課程修了。博士(工学)。同年、産業技術総合研究所入所。これまで、石油の流量計測を研究の基軸として、質量流量計の開発、新型転流器の改良、国家標準の下限範囲を引き下げる石油中流量標準設備の開発に従事してきた。本論文では、効率的なトレーサビリティ体系の構築の中で、標準の範囲拡大技術の開発における実証実験を担当した。



寺尾 吉哉 (てらお よしや)

1983年名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了。同年、通商産業省工業技術院計量研究所(現産業技術総合研究所)入所。液体流量及び風速の国家標準の開発・維持・供給、並びにトレーサビリティ体系の構築に従事。1997年、博士(工学)。2001年より計測標準研究部門・流量計測科・流量標準研究室長、2005年より同科・液体流量標準研究室長。本論文では、主としてプロジェクト進行管理を担当した。



高本 正樹 (たかもと まさき)

1975年広島大学工学研究科修士課程修了。同年、通商産業省工業技術院計量研究所(現産業技術総合研究所)入所、流量と流速の標準と計測技術の研究開発に従事、現在に至る。この間、1986年インペリアルカレッジ航空工学PhDコース修了(PhD)、2001年産業技術総合研究所流量計測科長。2004年～現在国際度量衡質量諮問委員会流量分科会議長。1999～2002年石油流量の国家標準建設プロジェクトリーダー、2004～2007年経済産業省委託費による石油流量計の高精度化研究プロジェクトリーダーとして本研究に貢献。



## 査読者との議論

### 議論1 基準器と税務メーターの校正

コメント (田中 充: 産業技術総合研究所研究コーディネーター)

計量標準に関する研究では、行政当局がその体制運営の上で判断をする技術的根拠を示すための方法論がシンセシオロジーに当たると考えられます。一方、現論文の内容では、逆に行政の判断を前提とした意見にまで踏み込んで述べられており、読者が誤解することを恐れます。したがって、精度、コスト、校正対象・校正範囲の多様化、国際競争力などの客観的な属性からのみ技術を評価して、技術を構成した点に記述を絞ってはどうでしょうか？

回答（嶋田 隆司）

ご指摘の「1. はじめに」と「2. 石油流量標準を作る社会的な目的」について、従来の基準器制度では精度、液種、流量範囲の点から対象外となる範囲が新たなニーズとして現れてきたため、新しい石油流量の供給体制を構築したと修正しました。

## 議論2 論文の題名

コメント（田中 充）

原題名の「石油流量標準の確立」では、この論文が技術要素開発から政策的な決定に至るまでのどの点を記述しているのかわかりにくくなっています。シンセシオロジーの意味を汲んだ題名とし、また国内全体の計量標準を対象としているのか、産総研が担っている国家計量標準に限定しているのか、広く国際計量標準を対象としているのかが分かるように改訂してください。

回答（嶋田 隆司）

国内全体の体制と国家計量標準とを対象としているので、その視点からタイトルを見直しました。

## 議論3 既刊の研究論文との重複排除

コメント（長谷川 裕夫：産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門）

この研究の内容に関する詳細な論文が既に別途書かれていることから、またシンセシオロジーとしてのエッセンスを読者に理解してもらうために、既刊の論文と大きく重複する記述はできるだけ避け、簡潔にしてはどうでしょうか？

回答（嶋田 隆司）

図表を加えることにより、技術内容については簡潔な記述とするとともに、シンセシオロジー研究の成果と計量に係わる行政との関係がよく見えるように書き改めました。