

タービン流量計とコリオリ流量計による石油大流量 国家標準設備と国内校正機関との比較実験

嶋田 隆司*, 土井原良次*, 武田 一英*, 寺尾 吉哉*, 高本 正樹*

(平成18年1月12日受理)

Comparison test between the primary standard for hydrocarbon flow and calibration facilities in Japan by using the turbine meter and the Coriolis meter

Takashi SHIMADA, Ryouji DOIHARA, Kazuhide TAKEDA, Yoshiya TERAU, Masaki TAKAMOTO

Abstract

A comparison test between the primary standard for hydrocarbon flow at NMIJ and four calibration facilities of companies in Japan has been carried out by using a turbine meter and a Coriolis mass flowmeter. The calibration liquids were kerosene and light oil at NMIJ, and gasoline, kerosene and light oil at the calibration facilities of companies. The flow rate range was between 30 and 160 m³/h. The flowmeters were calibrated at every comparison by the primary standard in order to confirm the reproducibility of the flowmeters due to transport. As a result, the differences of K factor of the turbine meter caused by the change of liquids were less than 0.04 %, indicating the possibility to expand the flow standard to other liquids by using a turbine meter. However the deviation of K factor at some calibration facilities from those at NMIJ was as large as 0.2 %. Furthermore the deviation of the Coriolis mass flowmeter at the calibration facilities was so large due to large uncertainty of density measurement. These results indicate that investigation for the uncertainty sources against the performance of the flowmeter is needed in order to achieve accurate calibration.

1. はじめに

現在、石油流量のトレサビリティ体系を構築するために、国内の石油会社と石油流量計メーカーが参加する石油流量研究会を開催し、必要な精度で効率的に標準が供給される方法の検討を行っている。前報¹⁾では産業技術総合研究所（産総研）計量標準総合センター（NMIJ）に新設された国家標準である石油大流量校正設備²⁾を基準に校正されたタービン流量計を国内の校正機関が所有する流量計校正設備で校正実験を行い、その校正値と国家標準での値との比較を行うとともに、比較実験における手順及び管理方法の検討を行った。その結果、適切な収納箱の使用により流量計の再現性に対する輸送の影響を十分低減できること、さらに前回の液種（灯油）及び流量範囲（18～60 m³/h）では一部を除いて国内校正機関の校正値は国家標準に対して±0.1 %以内で一致することがわかった。

そこで、今回は、前報に比べ流量が大きい範囲で国内校正機関における質量流量と体積流量の校正の妥当性について検証するために、30～160 m³/hの流量範囲で体積流量計であるタービン流量計と質量流量計であるコリオリ流量計とを同時に校正を行った。さらに、国家標準は灯油及び軽油の二液に限定されることから、この二液以外の液種に流量計によって標準流量を拡大する方法の検証を行うために、国内校正機関ではガソリンによる校正も実施した。

2. 実験方法

比較実験に用いた仲介器はタービン流量計、コリオリ流量計並びに整流管などの付属配管で構成された。仲介器の概要を表1に、また概略図を図1に示す。選択した流量計の性能を評価するために、比較実験実施の前に石油大流量校正設備の灯油及び軽油試験ラインで校正した。石油大流量校正設備における校正条件を表2に示す。校正の不確かさは質量流量基準で0.02 % ($k=2$)、体積流量基準で0.03 % ($k=2$) であった^{2,3)}。今回の比較では、国家

* 計測標準研究部門 流量計測科

表1 伸介器の概要

整流管	接続規格：JIS10K, 内径：78.1mm (80A×Sch40) 全長：960mm, 材質：SUS304
タービン流量計	製造元：株式会社オーバル 名称：EXタービン 型式：TX5080-D11-451 接続規格：JIS10K RF、内径：76mm 全長：254mm、材質：SUS304など 最大流量 (間欠)：160m ³ /h
下流管 (1)	接続規格：JIS10K, 内径：78.1mm (80A×Sch40) 全長：400mm, 材質：SUS304
拡大管	接続規格：JIS10K 上流側内径：78.1mm (80A×Sch40), 下流側内径：102.0mm (100A×Sch40) 全長：450mm, 材質：SUS304
コリオリ流量計	製造元：Micro Motion社 名称：ELITE センサ部型式：CMF300M401NALTJZZZ トランスミッタ部型式：2700R11ALTJZZX 接続規格：JIS10K RF, 内径：100A×Sch40相当 全長：853mm、材質：SUS304など 最大流量：272t/h
下流管 (2)	接続規格：JIS10K, 内径：102.0mm (100A×Sch40) 全長：500mm, 材質：SUS304, 温度計・圧力計測定部付き

*ここでの商品名や型式名の記述は、本報告の内容をより明確にすることを目的としており、産総研が当該商品を推奨することを意味していない。

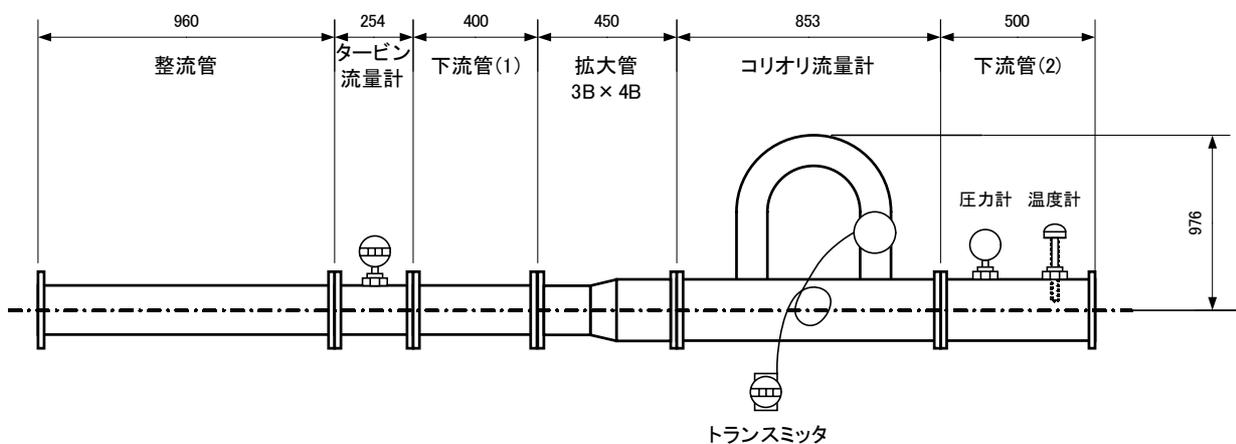


図1 伸介器の概略図

表2 NMIJでの試験条件

測定日	液種	液温度 (°C)	動粘度 ($\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)	密度 (kg/m^3)
2004/10~ 2005/03	軽油 (LO)	20	6.6	836
		35	4.5	826
	灯油 (KE)	20	1.8	790
		35	1.4	779

標準が対応できる液種範囲外での標準流量の拡張方法を検証するために、校正機関での試験液をガソリン、灯油、軽油とした。また、参加校正機関とNMIJとの間で1対1の比較実験を2004年10月から2005年3月の間で行い、流量計の再現性を検討するためにNMIJにおいて毎回灯油で校正を行った。今回調査した校正機関は4機関であり、参照標準として計量タンク、各種ブルーバを保有していた。校正機関とNMIJとの間の輸送には前回¹⁾と同様に専用の収納箱を用いることにより、輸送に伴う流量計の校正値の変化が生じないように十分に注意した。試験流量 Q (m^3/s) として主に0.0083, 0.017, 0.025, 0.033, 0.044 m^3/s (それぞれ30, 60, 90, 120, 160 m^3/h に相当) を、また試験液によって密度が異なるため試験質量流量 Q_m (kg/s) として28 kg/s (100 t/h に相当) を指定した。さらに、(1)式で定義される管レイノルズ数 Re がガソリンの場合には300,000、灯油の場合には100,000及び300,000、軽油の場合には100,000となる流量を指定した。

$$Re = \frac{4Q}{\pi Dv} \quad (1)$$

ここで、 D (m)、 v (m^2/s) はそれぞれ内径の代表値 (=0.0781 m)、試験液の動粘度を意味する。タービン流量計及びコリオリ流量計は図1に示すように直列に接続され同時に校正が行われた。しかしながら、一部の校正機関では試験ライン長が不足したため、それぞれの流量計が単独で校正された。また、管レイノルズ数の指定に間違いがあったため、一部校正機関では異なる管レイノルズ数で校正された。

3. 実験結果及び考察

3.1 タービン流量計の特性評価

タービン流量計の特性を評価するために、石油大流量校正設備によって同時に実流校正を行った。試験液温度 t_m (°C) で校正されたタービン流量計の校正係数である K 値 K_f (Pulse/L) から流量計の熱膨張による温度補正を行うことにより20°C基準の K 値 K_{f20} (Pulse/L) を求めた⁴⁾。

$$K_{f20} = K_f \{1 + (2\beta_H + \beta_R)(t_m - 20)\} \quad (2)$$

ここで、 β_H (K^{-1})、 β_R (K^{-1}) はそれぞれタービン流量計のケーシングの熱膨張係数、回転子の熱膨張係数であり、ともにステンレス鋼の線膨張係数である $1.36 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$ を用いた。

タービン流量計の公称 K 値 $K_{f, \text{nom}}$ (=14.186 Pulse/L) に対する温度補正した相対 K 値を管レイノルズ数に対してプロットしたものを図2に示す。図中の実線は、体積流量に対するタービン流量計の特性が管レイノルズ数に強く依存する^{4)~6)} ことから、管レイノルズ数に対する K 値の関数形を校正値に最小二乗法によりあてはめて得られた近似曲線であり、比較実験を実施する直前に得た K 値より(3)式で表される。

$$K_{f, \text{fit}} = 14.2703 + 4739.4 \text{Re}^{-1} - 42.557 \text{Re}^{-1/2} - 5.2117 \times 10^{-8} \text{Re} \quad (3)$$

NMIJにおいて比較実験の実施直前に灯油20°Cで得られた K 値 $K_{20, B}$ に対する各流量点での相対 K 値の経年変化を図3に示す。図3より160 m^3/h 及び $Re=300,000$ (40 m^3/h) では約0.05%の偏差が生じるが、それ以外の各流量点での変化量は ± 0.02 %以内であることがわかる。このことは、流量計の流量点もしくは管レイノルズ数によって流量計特性の経年変化量が異なることを示唆する。次に、近似曲線式(3)式から得られる K 値に対するNMIJでの校正値の相対 K 値を図4に示す。図4より近似曲線式に対する相対 K 値が-0.05~0.09%であることがわかる。また、近似曲線式に対する残差の標準偏差は0.04%以下であった。そこで、液種の違いによる影響、繰返し性、温度特性、圧力特性、上流側の流れの影響等による不確かさを見積もることが必要であるが、本報では校正機関の校正時にタービン流量計によって生じる測定の不確かさを簡略化した(4)式から見積もった。

$$\sqrt{(4 \times 10^{-4})^2 + \left(\frac{5 \times 10^{-4}}{\sqrt{3}}\right)^2 + (1.5 \times 10^{-4})^2} = 5 \times 10^{-4} \quad (4)$$

ここで、(4)式の左辺の数値はそれぞれ管レイノルズ数の近似曲線式に対する校正値の残差による標準偏差、タービン流量計の再現性、国家標準の不確かさを意味する。したがって、今回の比較実験におけるタービン流量計によって生じる測定の拡張不確かさ ($k=2$) は0.1%であると推定される。

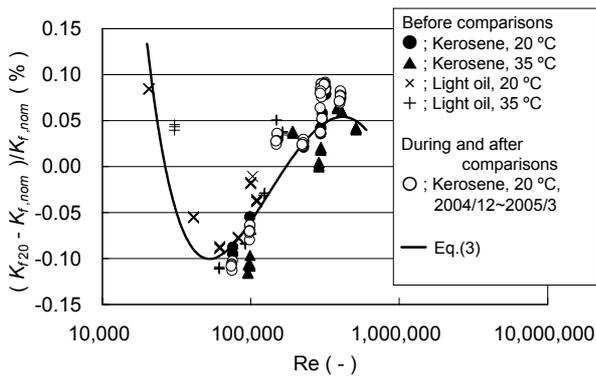


図2 タービン流量計の相対K値

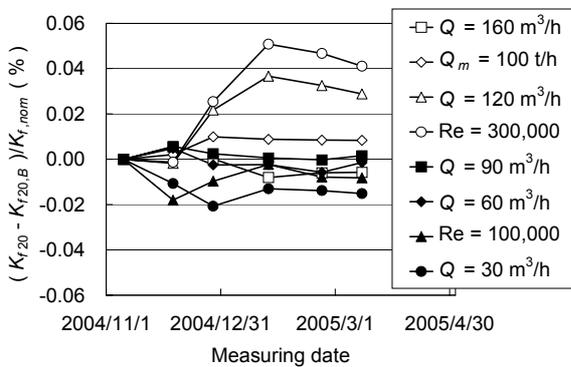


図3 NMIJにおいて灯油20°Cで校正されたタービン流量計の相対K値の経年変化

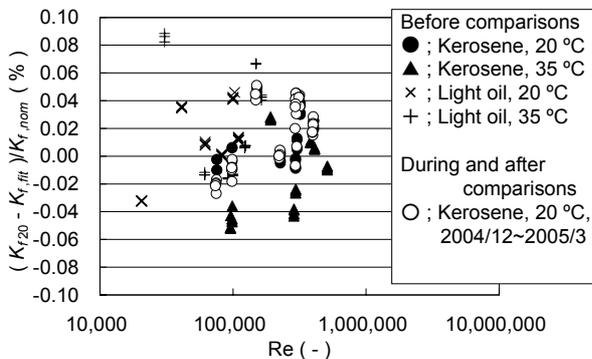


図4 近似曲線式 ((3)式) に対するNMIJで校正されたタービン流量計の相対K値

3.2 コリオリ流量計の特性評価

質量流量計であるコリオリ流量計は、一般に粘度、密度などの流体物性が流量計の特性に与える影響が小さい反面、零点ドリフトが大きく、流体圧力、振動などの設置条件に影響を受けることが言われている^{7,8)}。そこで、圧力補正係数 F (Pa^{-1}) としてメーカーの推奨値 900 Pa^{-1} を用い、校正により得られたK値 K_{fm} (Pulse/kg) を大気圧基

準の値 K_{fm0} (Pulse/kg) に変換した。さらに、校正試験前及び終了後に測定された零流量での指示値の平均値 Q_{m0} (kg/s) を零点の変位量として見なし、流量計内の圧力値 p_{FM} (Pa) 及び零流量値で補正したK値 K_{fm0C} (Pulse/kg) を(5)式から求めた。ここで、 Q_m (kg/s) は試験時の質量流量である。

$$K_{fm0C} = K_{fm}(1 - F \cdot p_{FM}) \left(1 - \frac{Q_{m0}}{Q_m}\right) \quad (5)$$

図5にコリオリ流量計の零流量時の指示値の経年変化を示す。図5からわかるように、流量計の付け替えにより零点は変化する。しかしながら、流量計を設置した状態では校正前と校正後での変化量が $\pm 4.2 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ ($\pm 15 \text{ kg/h}$) 以下であることがNMIJでの試験により確認された。図6にNMIJでの校正値を(5)式を用いて補正した相対補正K値を示す。ここで、コリオリ流量計の公称K値 $K_{fm,nom}$ は 100 Pulse/kg であった。低流量域では、ばらつきが比較的に大きくなるが、校正流量範囲内では $\pm 0.06 \%$ 以内であり、標準偏差は 0.03% 以下であった。タービン流量計と同様に様々な不確かさ要因について検証する必要があるが、本報では、校正機関の校正時にコリオリ流量計によって生じる測定の不確かさを簡略化した(6)式から算出した。

$$\sqrt{(3 \times 10^{-4})^2 + \left(\frac{4.2 \times 10^{-3}}{\sqrt{3} \cdot Q_m}\right)^2 + (1 \times 10^{-4})^2} = 3 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4} \quad (6)$$

ここで、(6)式の左辺はそれぞれ直線性、再現性及び繰り返し性による不確かさ、零点変化による不確かさ及び国家標準の不確かさを意味する。したがって、今回の比較実験におけるコリオリ流量計によって生じる測定の拡張不確かさ ($k=2$) は 0.1% であると推定される。

3.3 比較実験結果

校正機関で得られたタービン流量計の相対K値を管レイノルズ数に対してプロットしたものを図7に、産総研で校正した管レイノルズ数の範囲 ($20,000 \sim 500,000$) における近似曲線式((3)式)に対する相対K値をプロットしたものを図8に示す。ここで、A~Dは校正機関の記号であり、各機関での校正の繰り返し数は2~6回であった。図8からわかるように、B、C、DでのNMIJの校正値に対する相対偏差はタービン流量計の測定の不確かさ 0.1% よりも大きく、特に、Dでの偏差は 0.2% 以上であった。一般にタービン流量計は上流側の流れの影響を受けるために、高い精度を達成するためには十分な上流直管長が必要であると言われている^{9,10)}。そこで、NMIJで流量計の上流側管路によって乱された流れ場におけるタービン

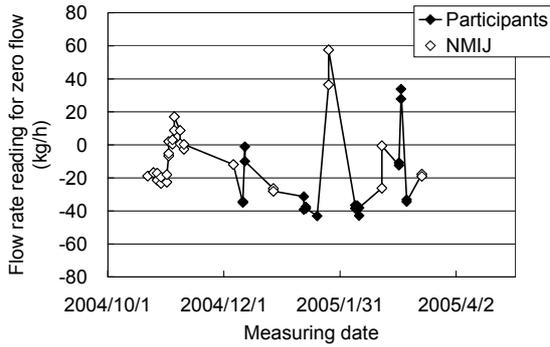


図5 コリオリ流量計の零流量時の指示値の経年変化

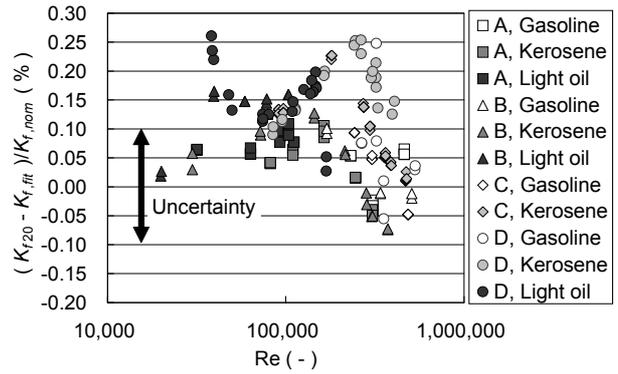


図8 参加校正機関で得られたタービン流量計の近似曲線式(3)式に対する相対K値

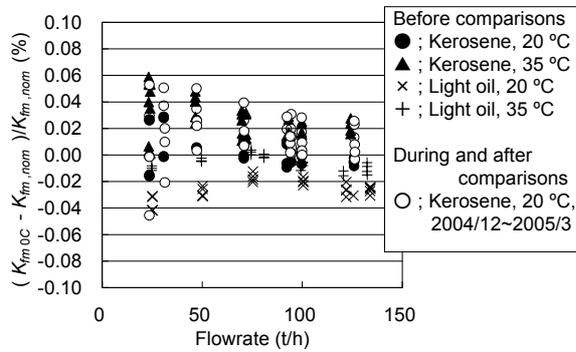


図6 NMIJで得られたコリオリ流量計の相対補正K値

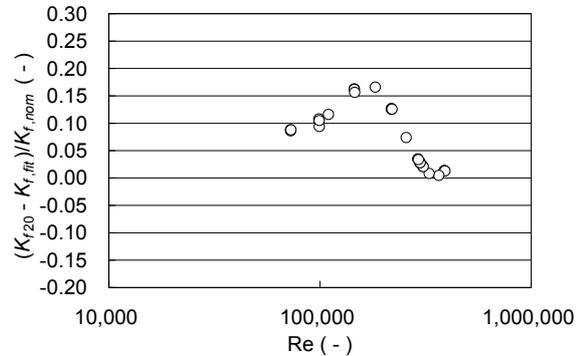


図9 同一平面二重曲がり管におけるタービン流量計の近似曲線式(3)式に対する相対K値

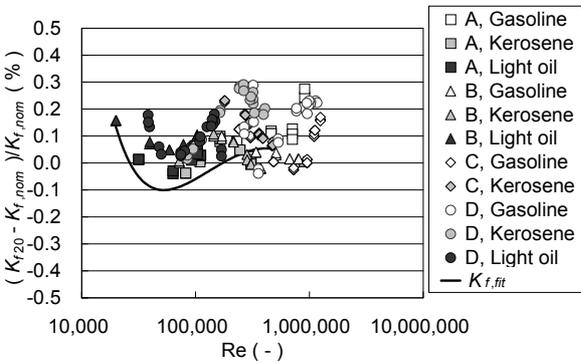


図7 参加校正機関で得られたタービン流量計の相対K値

表3 液種間における同一の管レイノルズ数でのタービン流量計の相対偏差

校正機関	液種	Re (-)	偏差 (%)
A	GA-KE	300,000	0.01
	KE-LO	100,000	-0.02
B	GA-KE	300,000	0.04
	KE-LO	100,000	-0.04
C	GA-KE	300,000	-0.04
D	GA-KE	300,000	-0.02
	KE-LO	100,000	0.01

GA : ガソリン, KE : 灯油, LO : 軽油

流量計の特性変化を調査した。具体的には、同一平面二重曲がり管を流量計上流側から750 mm (約9D) の位置に配置し、タービン流量計を灯油20℃で校正した。その結果を(3)式に対する相対K値をプロットしたものを図9に示す。タービン流量計の上流側には整流器が設置されているにもかかわらず、上流の配管形状により0~+0.17%の偏差が生じることがわかる。これらの結果より、上流側の配管形状がB, C, 特にDのNMIJに対する相対偏差が大きな値を示す要因の一つであると推測される。

一方、同一管レイノルズ数における液種間で生じるK値の相対偏差を表3に示す。参加校正機関の内、1カ所の校正機関では同一の標準器を用いてそれぞれの液種に対して校正されたが、その他の校正機関では液種によって標準器は異なった。表3より同一管レイノルズ数における液種間の相対偏差はすべての校正機関及びすべての液種間で0.04%以下であること、また国家標準での軽油と灯油との液種間の偏差も0.04%以下であることから、タービン流量計の管レイノルズ数に対する特性を利用する

ことにより国家標準の液種範囲外にまで標準流量を拡大できる可能性があると言える。

次に、校正機関で校正されたコリオリ流量計の相対補正K値 $K_{fm,OC}$ を図10に示す。また、補正K値を全流量点で液種ごとに平均し、その平均値に対する相対偏差をプロットしたものを図11に示す。図10より校正機関にお

けるコリオリ流量計の相対補正K値は-0.4~0.2%であるが、図11より校正機関Aでの軽油及び校正機関Bの灯油での値を除いて全流量点での液種ごとの平均値に対する相対偏差が0.1%以下であることがわかる。このことは、参加校正機関では参照標準として体積管もしくは体積タンクを用いたため、流量計内の密度計測の不確かさが系統

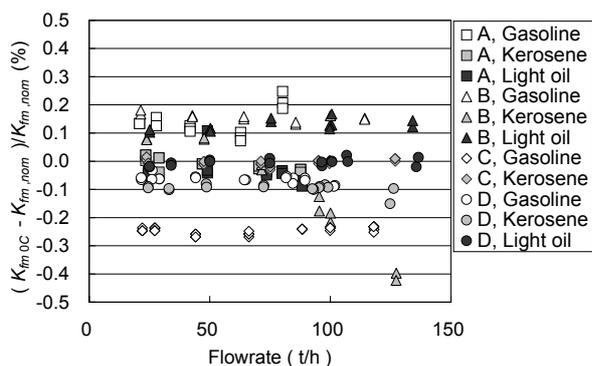


図10 参加校正機関で校正されたコリオリ流量計の相対補正K値

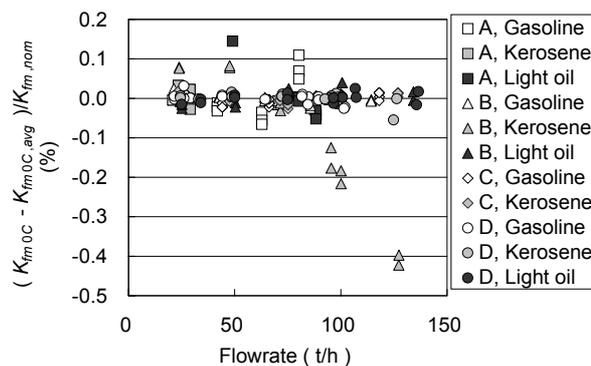


図11 参加校正機関で校正されたコリオリ流量計の平均値に対する相対偏差

表4 K値の平均値及び標準偏差

校正機関	液種	タービン流量計		コリオリ流量計	
		平均値* (%)	標準偏差** (%)	平均値+ (%)	標準偏差** (%)
A	GA	0.03	0.05	0.14	0.05
	KE	0.03	0.05	-0.01	0.02
	LO	0.08	0.02	-0.04	0.04
B	GA	0.02	0.04	0.16	0.01
	KE	0.02	0.08	-0.10	0.18
	LO	0.13	0.05	0.13	0.02
C	GA	0.03	0.06	-0.25	0.01
	KE	0.10	0.06	0.00	0.01
D	GA	0.16	0.11	-0.06	0.01
	KE	0.17	0.05	-0.10	0.02
	LO	0.15	0.06	0.00	0.01
NMIJ, 11/8	KE20	0.01	0.02	0.00	0.01
NMIJ, 11/2	KE35	-0.02	0.03	0.03	0.02
NMIJ, 10/22	LO20	0.01	0.02	-0.03	0.01
NMIJ, 10/29	LO35	0.02	0.04	-0.01	0.01
NMIJ, 12/6	KE20	0.01	0.03	0.02	0.01
NMIJ, 12/27	KE20	0.02	0.02	0.04	0.01
NMIJ, 1/25	KE20	0.02	0.03	0.00	0.02
NMIJ, 2/22	KE20	0.02	0.03	0.01	0.01
NMIJ, 3/15	KE20	0.02	0.03	0.01	0.01

GA : ガソリン, KE : 灯油, LO : 軽油, KE20 : 液種が灯油, 試験液温度が20℃

* 近似曲線式 ((3)式) から得られるK値に対する偏差の平均値

** 校正値の標準偏差

+ 公称K値に対する偏差の平均値

的な誤差として含まれたことを示唆する。一方、校正機関Bの灯油での平均値に対する相対偏差は流量によって大きく変化する。今回使用したコリオリ流量計のダンピング時間（応答時間）が比較的長い0.8秒であり、流量変動の影響を大きく受けることから、流量によって変化する流量変動の違いによって偏差が生じたことが予想される。

タービン流量計において各液種の校正試験で得られた全流量点のK値と近似曲線式（(3)式）から得られるK値との偏差を平均した値、及びその校正值の標準偏差、またコリオリ流量計における公称K値に対する相対補正K値の偏差の平均値、及びその校正值の標準偏差を表4に示す。校正機関Aでのタービン流量計の校正值は国家標準値と不確かさの範囲内で一致するが、同時に校正されたガソリンでのコリオリ流量計の値は、前述の通り密度測定系の系統的な誤差によって偏差が生じたと考えられる。一方、校正機関Dにおけるコリオリ流量計の校正值は国家標準に良好に一致するが、タービン流量計の値は国家標準値から0.15%以上の偏差が生じる。以上の結果より、高い精度を達成するためには、国家標準からトレーサビリティを確保し、密度測定や流量計の上流配管条件など被試験流量計の特性に寄与する不確かさ要因について十分に実証した精度管理が必要であることがわかる。

4. まとめ

タービン流量計及びコリオリ流量計を仲介器として石油流量の国家標準と国内校正機関との比較実験を行った。その結果、タービン流量計の管レイノルズ数に対する特性を利用することにより国家標準の液種範囲外のガソリンで標準流量を拡大できる可能性があることがわかった。また、今回対象とした液種及び流量範囲では、コリオリ流量計では密度計測、またタービン流量計では流量計上流側の流れの影響が測定の不確かさの大きな要因となる可能性を示唆した。今後は石油流量のJCSS制度を立ち上げることを最終目標として、校正機関で他の流量で異なる測定原理を有する流量計による比較実験を行う予定である。

5. 謝辞

本実験は（社）日本計量機器工業連合会との共同研究により実施され、また石油流量研究会の参加企業の協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 嶋田隆司, 土井原良次, 武田一英, 寺尾吉哉, 高本正樹: タービン流量計による石油大流量校正設備と国内校正設備との比較実験, 産総研計量標準報告 4-1(2005) 79-82
- 2) 嶋田隆司, 土井原良次, 寺尾吉哉, 高本正樹: 国家標準として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(2005) 854-861.
- 3) 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(2005), 2956-2963.
- 4) JIS Z 8765-1980タービン流量計による流量測定方法, 日本規格協会(1980).
- 5) S.P. Hutton: The effect of fluid viscosity on turbine meter calibration, Proc. Flow Measurement the Mid-80' (1986) Paper 1.1.
- 6) P. Lau and K. Stolt: Calibration Intercomparison on Flowmeters for Kerosene, SP Report 77 (1995).
- 7) R. Paton and E. Carlyle: Calibration Techniques for Coriolis Mass Flowmeters, NEL Report, 118/97 (1998)
- 8) 土井原良次: コリオリ式流量計の現状調査と高精度化の提案—石油流量計校正用ワーキングスタンダードに関する調査研究—, 産総研計量標準報告 1-2(2002) 443-457.
- 9) B. C. Baker: Flow Measurement Handbook, Cambridge University Press (2000).
- 10) G. E. Mattingly and T. T. Yeh: Effect of Pipe Elbows and Tube Bundles on Selected Types of Flowmeters, Flow Measurement and Instrumentation, 2-1(1991) 4-13.