

超音波流量計と容積流量計による石油大流量国家標準設備と 国内校正設備との比較実験

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10月17日受理)

Comparison test between the primary standard for hydrocarbon flow and calibration facilities in Japan by using the ultrasonic flowmeters and positive displacement flowmeter

Takashi SHIMADA, Ryouji DOIHARA, Kazuhide TAKEDA, Toshiya TERAQ, Masaki TAKAMOTO

Abstract

A comparison test between the primary standard for hydrocarbon flow at NMIJ and three calibration facilities operated by private companies in Japan has been carried out by using two ultrasonic flowmeters and a positive displacement (PD) flowmeter as transfer standards. 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 60 and 300 m³/h.

As a result, the differences of K factor of the PD flowmeter caused by the change of liquids were less than 0.1 %, indicating the possibility to expand the flow standard to other liquids by using a PD flowmeter. 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 ultrasonic flowmeters at the calibration facilities was unexpectedly large, which is supposed to be due to upstream piping effect. These results indicate that investigation for the effect of upstream piping on the performance of the ultrasonic flowmeters is needed in order to achieve accurate flow measurement using the ultrasonic flowmeter.

1. はじめに

現在、石油流量のJCSS制度を立ち上げることを目的として、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石油流量の標準を供給する仕組みを検討している。前報^{1),2)}ではタービン流量計単体もしくはタービン流量計及びコリオリ流量計を仲介器として、産業技術総合研究所(産総研)計量標準総合センター(NMIJ)が所有する国家標準である石油大流量校正設備³⁾⁻⁵⁾と国内の校正機関が所有する流量計校正設備との間で比較校正実験を行った。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仲介器を用い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。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、また、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に対して標準流量を拡大できる可能性があることを示した。さらに、前回の液種及び流量範囲(30~160 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±0.2%以内で一致することがわかった。

そこで、今回は、前報²⁾に比べ大きな流量範囲で国内校正機関における体積流量の校正の妥当性について検証するために、60~300 m³/hの流量範囲において体積流量計である超音波流量計と容積流量計を用いた比較校正実験を行った。超音波流量計は上流に設置される管形状の影響を受ける⁶⁾ことから、上流側に直管のみを設置した超音波流量計に加え、流れを整える整流器を上流側に設置した超音波流量計を用意し、2台の超音波流量計を仲介器として使用した。さらに、これらの超音波流量計の下流に上流側配管による影響が小さい容積流量計を直列に接続し、計3台の流量計を仲介器として同時に校正した。この方法により、各校正機関における標準流量を比

* 計測標準研究部門 流量計測科

較するとともに、流量計の設置場所における上流配管の影響を調べた。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、前回と同様にこの二液以外の液種に仲介器を用い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超音波流量計2台、容積流量計並びに接続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。上流側にある超音波流量計(1)の上流側には直管を、また下流側にある超音波流量計(2)の上流側には整流管を固定させた。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。校正の不確かさは体積流量基準で0.03% ($k=2$)であった³⁾⁻⁵⁾。今回の比較では、国家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2005年5月から2005年8月の期間で行い、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3機関であり、参照標準として体積タンクもしくはポールプ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), 2)}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0.017, 0.033, 0.050, 0.067及び0.083 m^3/s (それぞれ60, 120, 180, 240及び300 m^3/h に相当)を指定した。また、NMIJで校正した管レイノルズ数 Re の範囲は15,000~700,000であった。ここで、管レイノルズ数 Re は流量計内径の代表値 D ($=0.102$ m)、試験液の動粘度 (m^2/s)、体積流量 Q (m^3/s)から(1)式で定義される。

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

超音波流量計及び容積流量計は図1に示すように直列に接続され、3台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、超音波流量計1台と容積流量計との同時校正をそれぞれの超音波流量計に対して行い、試験流量点も一部範囲に限定された。

表1 仲介器の概要

上流短管	接続規格: ANSI 150 lb 内径: 102.3 mm (100A × Sch40) 全長: 1200 mm, 材質: SUS304
整流管	接続規格: ANSI 150 lb 内径: 102.3 mm (100A × Sch40) 全長: 1200 mm, 材質: SUS304
超音波流量計 (1),(2)	製造元: 東京計装株式会社 名称: SONICMAX 型式: UL3030K-EE 接続規格: ANSI 150 lb RF 内径: 102.3 mm (100A × Sch40相当) 全長: 350 mm 測定方式: 伝搬時間差法, 測線数: 3 材質: 測定管; SUS316, フランジ; 炭素鋼, など 最大流量 (間欠): 300 m^3/h
拡大管	接続規格: ANSI 150 lb 上流側内径: 102.3 mm (100A × Sch40) 下流側内径: 151.0 mm (150A × Sch40) 全長: 550 mm 材質: SUS304 フランジに圧力測定孔付き
ストレーナ	接続規格: ANSI 150 lb 内径: 151.0 mm (150A × Sch40) メッシュサイズ: 10 全長: 180 mm 材質: SUS304
容積流量計	製造元: KRAL社 名称: KRAL volumeter 型式: OMG140.6052947 接続規格: ANSI 150 lb RF 内径: 154.2 mm 全長: 610 mm 材質: 鋳鉄など 最大流量 (常用): 300 m^3/h
下流管	接続規格: ANSI 150 lb及びJIS10K 内径: 151.0 mm (150A × Sch40) 全長: 500 mm 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。

表2 NMIJでの試験条件

測定日	液種	液温度 (°C)	動粘度 ($\times 10^{-6} m^2/s$)	密度 (kg/m^3)
2005/03 ~ 2005/09	軽油 (LO)	20	6.7	836
		35	4.5	826
	灯油 (KE)	20	1.9	791
		35	1.5	780

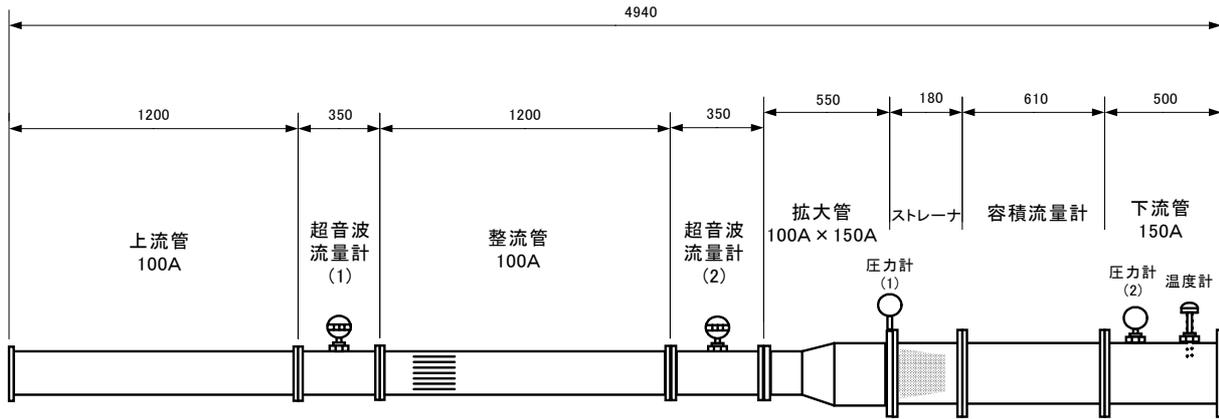


図1 仲介器の概略図

3. 実験結果及び考察

3.1 超音波流量計の特性評価

超音波流量計の流量に対する特性を評価するために、石油大流量校正設備によって実流校正を行った。試験液温度 t_m () で校正された超音波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 基準のK値 K_{f20} (Pulse/L) を求めた。

$$K_{f20} = K_f \{1 + 3\alpha_{SUS}(t_m - 20)\} \quad (2)$$

ここで、 α_{SUS} (K^{-1}) は超音波流量計のケーシングの熱膨張係数であり、ステンレス鋼の線膨張係数である $1.36 \times 10^{-5} K^{-1}$ を用いた。

上流側の超音波流量計(1)の公称K値 $K_{fUL,nom}$ (=12 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、下流側の超音波流量計(2)の相対K値を図3に示す。図中の実線は、体積流量に対する超音波流量計の特性が管レイノルズ数に強く依存することから、管レイノルズ数に対するK値の関数形に得られた校正値を最小二乗法によりあてはめて得られた近似曲線式である。比較実験実施前の事前校正(2005/3~4)で得られたK値より超音波流量計(1)の近似曲線式 $K_{f1,fit1}$ は(3)式で、超音波流量計(2)の近似式 $K_{f2,fit1}$ は(4)式で表される。

$$K_{f1,fit1} = 11.9677 + 864.36Re^{-1} + 12.6573Re^{-1/2} + 9.61964 \times 10^{-8} Re \quad (3)$$

$$K_{f2,fit1} = 11.9028 + 199.906Re^{-1} + 10.2563Re^{-1/2} + 8.52109 \times 10^{-8} Re \quad (4)$$

一方、図中(図2、図3)の点線は、比較実験実施後の確認校正(2005/8~9)で得られたK値を用いて得られた近似曲線式であり、超音波流量計(1)の近似曲線式 $K_{f1,fit2}$ は(5)式で、超音波流量計(2) $K_{f2,fit2}$ は(6)式で表される。

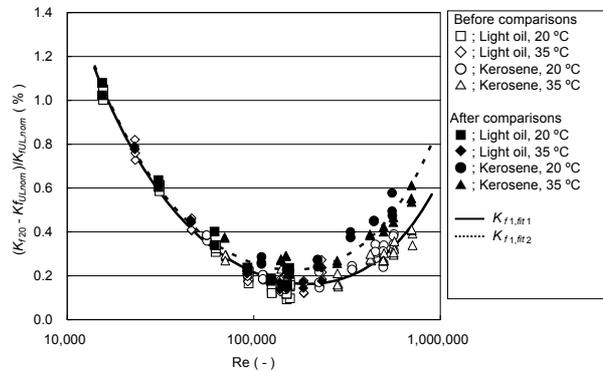


図2 NMIJで校正された超音波流量計(1)の相対K値

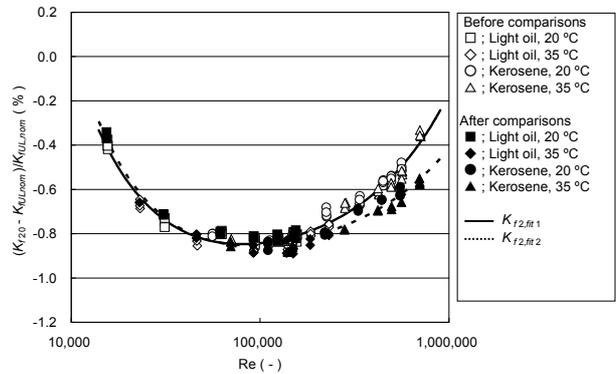


図3 NMIJで校正された超音波流量計(2)の相対K値

$$K_{f1,fit2} = 11.9748 + 1013.9Re^{-1} + 10.6744Re^{-1/2} + 1.21338 \times 10^{-7} Re \quad (5)$$

$$K_{f2,fit2} = 11.9094 + 2222.45Re^{-1} - 12.307Re^{-1/2} + 5.09609 \times 10^{-8} Re \quad (6)$$

図4に超音波流量計(1)の(3)式に対する相対K値を、また図5に超音波流量計(2)の(4)式に対する相対K値を示す。図中の点線は事前校正値に基づく近似曲線式(5)式もしくは(6)式)に対する、確認実験での校正値から得られた

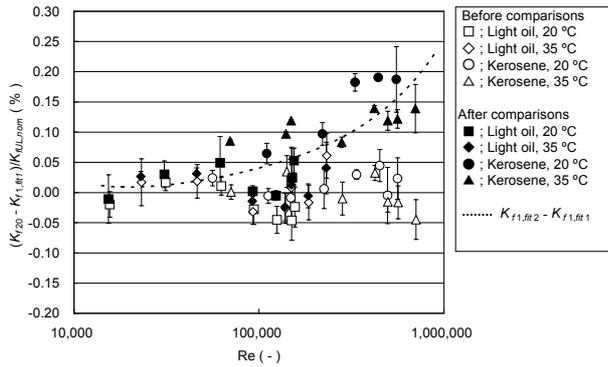


図4 NMIJで校正された超音波流量計(1)の近似曲線式(3式)に対する相対K値

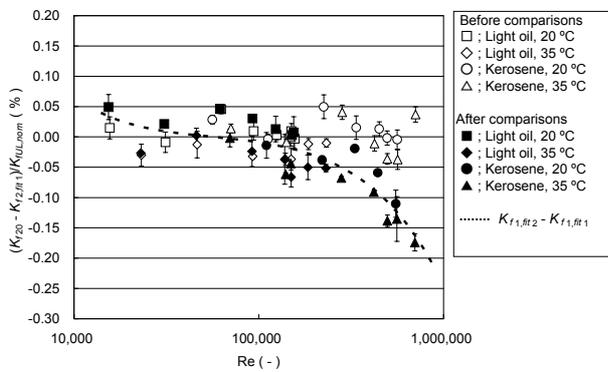


図5 NMIJで校正された超音波流量計(2)の近似曲線式(4式)に対する相対K値

近似曲線式(3式もしくは4式)の偏差を表し, またエラーは校正値の標準偏差である. またNMIJで実施した事前校正(2005/3)で得られた灯油20におけるK値 $K_{f,20,B}$ に対する各流量点での相対K値の経年変化を図6及び図7に示す.

図6より超音波流量計(1)の校正値は60 m³/hでは3ヶ月間で0.07%の変化が生じたが, 流量が大きくなるにつれ変化量も大きくなり, 300 m³/hでは0.15%の変化量が生じた. さらに, 図7より超音波流量計(2)も同様に流量が大きくなるにしたがって変化が大きくなる傾向を示し, 300 m³/hでは試験期間中に-0.1%の変化量が生じたことがわかる. このことは, 図4及び図5からもわかるように, 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.

また, 近似曲線式に対する残差の標準偏差は0.05%以下であり, 図4及び図5にそれぞれ示されるとおり超音波流量計(1)の再現性は0.2%以下, 超音波流量計(2)の再現性は0.17%以下であった. そこで, 本報では校正機関の校正時に超音波流量計(1)によって生じる測定の相対合成標準不確かさ $u_c(K_f) / |K_f|$ を簡略化した(7)式から見積もった.

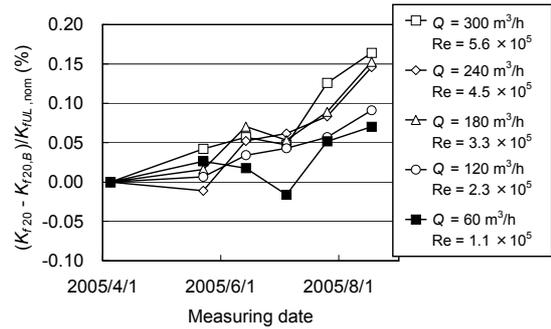


図6 NMIJで校正された超音波流量計(1)の相対K値の経年変化(灯油20)

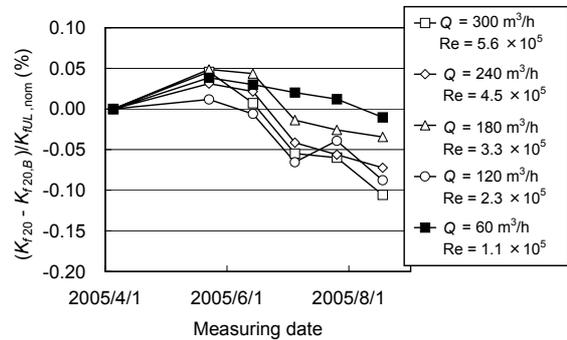


図7 NMIJで校正された超音波流量計(2)の相対K値の経年変化(灯油20)

$$\begin{aligned} \frac{u_c(K_f)}{|K_f|} &= \sqrt{\left\{ \frac{u(\Delta K_{RES})}{K_f} \right\}^2 + \left\{ \frac{u(\Delta K_{LONG})}{K_f} \right\}^2 + \left\{ \frac{u(\Delta K_{JS})}{K_f} \right\}^2} \\ &= \sqrt{(5 \times 10^{-4})^2 + \left(\frac{20 \times 10^{-4}}{\sqrt{3}} \right)^2 + (1.5 \times 10^{-4})^2} \\ &= 1.3 \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで, (7)式中の $u(\Delta K_{RES})$, $u(\Delta K_{LONG})$ 及び $u(\Delta K_{JS})$ 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不確かさ, 超音波流量計の再現性による標準不確かさ, 国家標準の標準不確かさを意味する. また, (7)式と同様の算出法により超音波流量計(2)によって生じる測定の不確かさは0.11%と見積もられた. したがって, 今回の比較実験における超音波流量計(1)及び(2)によって生じる測定の拡張不確かさ ($k=2$) はそれぞれ0.26, 0.22%であると推定される.

3.2 容積流量計の特性評価

容積流量計の校正係数(K値)は流量計の線膨張係数 α (鋳鉄; $1.1 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) を用いて(8)式より20 基準のK値 $K_{f,20}$ (Pulse/L)に温度補正した⁶⁾.

$$K_{f20} = K_f \{1 + 3\alpha(t_m - 20)\} \quad (8)$$

NMIJで校正された容積流量計のK値を(8)式で補正した相対補正K値を図8に、また管レイノルズ数Reに対して相対補正K値をプロットしたものを図9に示す。ここで、容積流量計の公称K値 $K_{fPD,nom}$ は8.837 Pulse/Lである。得られたK値より容積流量計の管レイノルズ数に対する近似曲線式は(9)式で表され、近似曲線式に対する残差の標準偏差は0.02%以下であった。

$$K_{fPD,fit} = 8.8501 + 2.0885 Re^{-1} - 0.78182 Re^{-0.5} - 1.7009 \times 10^{-8} Re \quad (9)$$

図10にNMIJでの事前校正(2004/3)における灯油20のK値に対するK値の経年変化を示す。図10より今回の比較実験期間における各流量点の変化量は±0.015%以内であることから、容積流量計は高い再現性を示したことがわかる。

そこで、本報では校正機関の校正時に容積流量計によって生じる測定の相対合成標準不確かさ $u_c(K_f)/|K_f|$ を、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不確かさ $u(\Delta K_{fRES})$ 、容積流量計の再現性による標準不確かさ $u(\Delta K_{fLONG})$ 、国家標準の不確かさ $u(\Delta K_{fS})$ から簡略化した(10)式として見積もった。

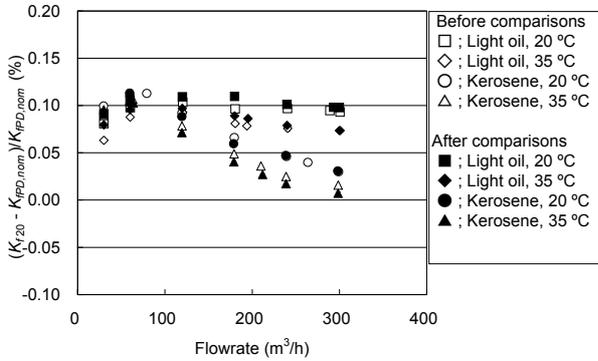


図8 NMIJで校正された容積流量計の相対K値

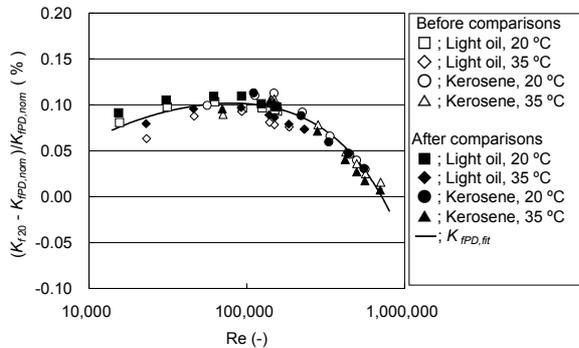


図9 NMIJで校正された容積流量計の相対K値

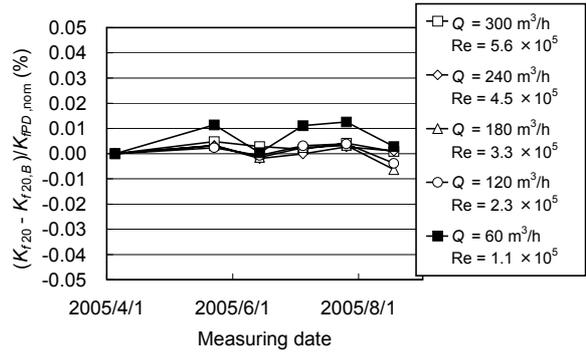


図10 NMIJで校正された容積流量計の相対K値の経年変化(灯油20)

$$\begin{aligned} \frac{u_c(K_f)}{|K_f|} &= \sqrt{\left\{ \frac{u(\Delta K_{fRES})}{K_f} \right\}^2 + \left\{ \frac{u(\Delta K_{fLONG})}{K_f} \right\}^2 + \left\{ \frac{u(\Delta K_{fS})}{K_f} \right\}^2} \\ &= \sqrt{\left(2 \times 10^{-4}\right)^2 + \left(\frac{1.5 \times 10^{-4}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(1.5 \times 10^{-4}\right)^2} \\ &= 3 \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (10)$$

したがって、今回の比較実験における容積流量計によって生じる測定の拡張不確かさ ($k=2$) は0.06%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超音波流量計(1)の公称K値に対する相対K値を管レイノルズ数に対してプロットしたものを図11に、NMIJで比較実験実施前に校正した値から得られた近似曲線式(3)式に対する相対K値をプロットしたものを図12に示す。ここで、A, B, C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3回以上であった。図中のエラーバーは標準偏差を表す。また、前述の超音波流量計(1)と同様に超音波流量計(2)の公称K値 K_{fULnom} に対する相対K値を図13に、また近似曲線式である(4)式に対する相対K値を図14に示す。さらに、参加校正機関で得られた容積流量計の相対K値を図15に示す。

NMIJが校正した管レイノルズ範囲(16,000~700,000)では、図12より校正機関でのNMIJの校正値に対する超音波流量計(1)の相対偏差は測定の不確かさ0.26%よりも大きく、その値は0~1.2%であることがわかる。一方、図14からわかるように流量計の上流側に整流器を設置した超音波流量計(2)の校正機関における相対偏差は0.2%~0.4%である。この偏差は超音波流量計(1)での偏差に比べて小さな値であるが、超音波流量計によって生じる不確かさ0.22%よりも大きな値を示す。さらに、図15よ

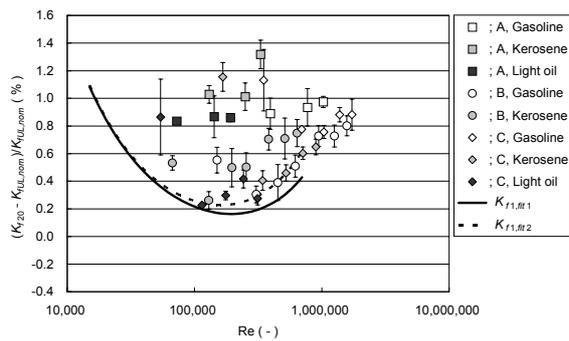


図11 参加校正機関で得られた超音波流量計(1)の相対K値

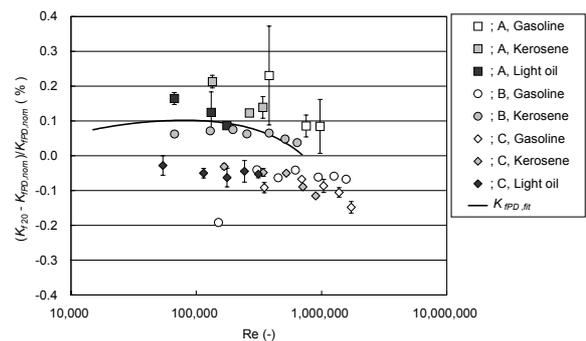


図15 参加校正機関で校正された容積流量計の相対K値

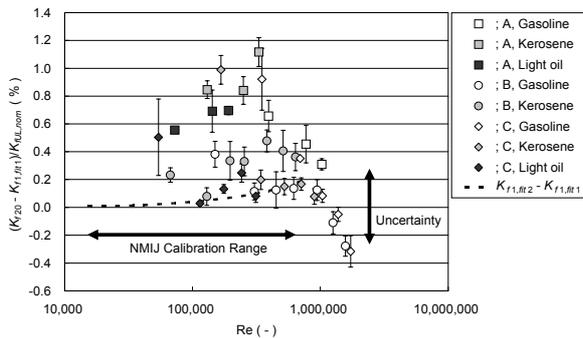


図12 参加校正機関で得られた超音波流量計(1)の近似曲線式(3式)に対する相対K値

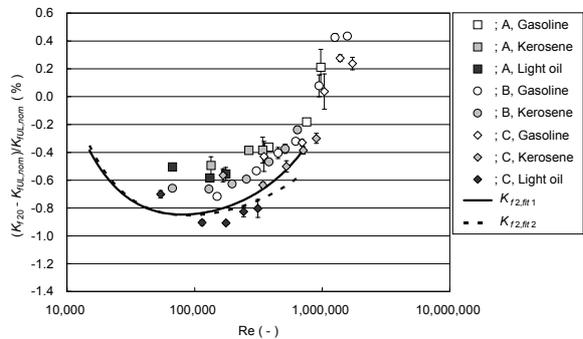


図13 参加校正機関で得られた超音波流量(2)の相対K値

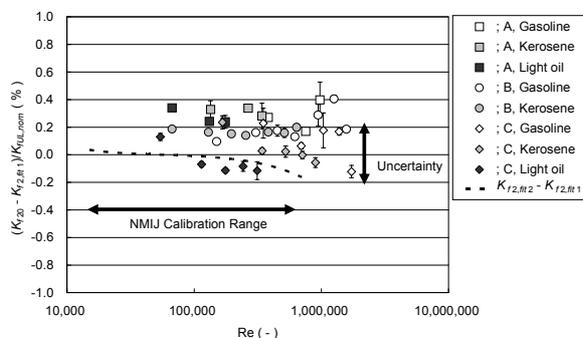


図14 参加校正機関で得られた超音波流量計(2)の近似曲線式(4式)に対する相対K値

り容積流量計での偏差は、超音波流量計での偏差に比べて小さな値である-0.1~0.15%であることがわかる。一般に、超音波流量計は超音波伝搬経路上の平均流速から流量を推測するため、管レイノルズ数に強く依存し、また、上流側の流れの影響を強く受けることが言われている⁶⁾。これらの結果は、上流側に直管10Dのみを配置した超音波流量計(1)は校正機関の試験ラインの上流側の配管形状による偏流や旋回流に対して影響を大きく受け、また整流器を設置した超音波流量計(2)でも配管形状の影響を十分に除去できない場合があったことを示唆する。したがって、超音波流量計による流量計測で高い精度を達成するためには十分な上流直管長により理想的な流れを形成させるか、もしくは、上流側の配管形状の違いによって生じる流速分布の変化を整流器によって十分に除去することが必要であることがわかった。

次に、校正機関において同一管レイノルズ数での液種間で生じるK値の相対偏差を表3に示す。参加校正機関内の1カ所では、それぞれの液種に対して同一の標準器を用いて流量計は校正されたが、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より超音波流量計(1)における液種間の相対偏差は0.35%以下、超音波流量計(2)で0.2%以下、また容積流量計では0.1%以下であることがわかる。上流配管形状の影響を受けにくい流量計ほど液種間の相対偏差は小さな値を示し、また容積流量計の液種間の相対偏差が良好であることは、試験ラインへの付け替えに伴う上流側の配管条件の違いが超音波流量計の特性に大きく影響を及ぼした可能性があることを示唆する。特に、校正機関Cでは、超音波流量計での液種間の相対偏差に比べ、容積流量計での値は非常に良好である。したがって、標準器の違いによる影響を検討する必要があるが、国家標準の液種、すなわち灯油及び軽油の範囲内では容積流量計における参加校正機関での液種間偏差が小さいことから、上流配管の影響が小さい容積流量計のK値が管レイノルズ数に対する近似曲線式

超音波流量計と容積流量計による石油大流量国家標準設備と国内校正設備との比較実験

表3 液種間における同一の管レイノルズ数での流量計の相対偏差

流 量 計			超音波 流量計(1)	超音波 流量計(2)	容積 流量計
校正機関	液種	Re (-)	偏差 (%)	偏差 (%)	偏差 (%)
A	KE-LO	200,000	0.15	0.10	0.10
B	GA-KE	600,000	-0.24	-0.05	-0.09
C	GA-KE	600,000	0.35	0.10	-0.01
	KE-LO	300,000	0.28	0.19	0.01

GA：ガソリン，KE：灯油，LO：軽油

表4 K値の偏差の平均値及び標準偏差

校正 機関	液種	超音波流量計 (1)		超音波流量計 (2)		容積流量計	
		平均値	標準偏差**	平均値	標準偏差**	平均値	標準偏差**
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
A	GA	0.66	0.11	0.27	0.02	0.17	0.14
	KE	0.94	0.16	0.31	0.06	0.08	0.04
	LO	0.65	0.10	0.28	0.06	0.03	0.04
B	GA	0.19	0.14	0.14	0.04	-0.14	0.09
	KE	0.32	0.15	0.17	0.03	-0.01	0.02
C	GA	0.64	0.35	0.15	0.12	-0.12	0.05
	KE	0.38	0.38	0.07	0.11	-0.10	0.02
	LO	0.20	0.21	-0.05	0.10	-0.14	0.02

GA：ガソリン，KE：灯油，LO：軽油

* 近似曲線式(3)式，(5)式及び(9)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

(9)式で表される特性を利用することにより，NMIJで校正した管レイノルズ数の範囲で国家標準の液種範囲外の低粘度であるガソリンにまで標準流量を拡大できる可能性があると言える。

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，(5)式及び(9)式から得られるK値との偏差を全流量点にわたり平均した値，及びその校正値の標準偏差を表4に示す。前報²⁾で報告したタービン流量計で生じた偏差(0.2%)に比べ，本比較実験で得られた偏差は大きな値を示す。この原因の一つとして，前回に比べ流量が大きく，また流量計の呼び径が大きくなったため，十分な上流直管長が確保できなかったことが考えられる。

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，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

超音波流量計及び容積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，今回使用した容積流量計と超音波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，超音波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。今後は登録事業者で校正可能な液種の範囲を拡大できるJCSS制度を立ち上げることを最終目標として，さらに，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，武田一英，寺尾吉哉，高本正樹：タービン流量計とコリオリ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4-4(2006)，261-267.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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(2006)，1551-1558.
- 6) 社団法人日本計量機器工業連合会：流量計の実用ナビ(2005).