

# 体積管式校正装置を用いた石油用流量計校正の不確かさ解析

嶋田隆司\*, 土井原良次\*, 寺尾吉哉\*\*

(平成 24 年 7 月 26 日受理)

## Uncertainty Analysis of Calibration for Hydrocarbon Flowmeters using Pipe Prover

Takashi SHIMADA, Ryouji DOIHARA, Yoshiya TERAO

### Abstract

The uncertainty of the calibration for hydrocarbon flowmeters using a pipe prover calibrated by a standard flow meter has been evaluated analytically in detail in accordance with the 'ISO Guide to the expression of uncertainty in measurement'. The combined standard uncertainty has been estimated using the typical reference values at the hydrocarbon flow calibration. This evaluation shows that the uncertainties of the pulse counting, the duration of pulse counting, the measurement time and the fluctuation of the flow rate and the density are negligible in comparison with the combined uncertainty. The dominant sources of combined uncertainty of flow rate are the prover calibrated volume and the density of oil flowing through the prover and the flowmeter under test. In particular, the uncertainties of the temperature measurements at the prover have large effect of the combined uncertainty of volumetric flow rate.

## 1. 緒言

さまざまな測定原理を有する流量計は、商取引やプロセス管理などに数多く用いられている。これらの流量計の性能を最大限に発揮させ、高い精度で流量測定を行うためには、流量計校正装置を用いて流量計を校正するとともに、精度を担保する校正の不確かさを規定することが必要不可欠である。さらに、校正装置による校正の不確かさの各要因を吟味することは、校正装置の最適設計、並びに効率的な校正作業を行ううえで重要である。

石油類の数量管理に用いられる流量計を校正するために、体積管を用いた校正装置（パイププルーバー）<sup>1)</sup>が数多く利用されている。この体積管式校正装置は、あらかじめ測定区間の体積が計測された管路内（体積管）を移動するピストンなどの運動子の位置を検出することによって標準流量を算出するものである。測定区間の体積を校正する方法の一つとして、水を用いたウォータード

ロー方式<sup>2)</sup>が用いられる。しかしながら、体積管内を移動する運動子の位置から測定区間の体積を推定することから、高い精度で校正を行うためには、校正される液種や流量による体積値の変化量を評価することが必要である。一方、標準流量計を用いて測定区間の体積を校正する方法<sup>3)</sup>が確立されているが、校正の不確かさを評価するまでには至っていない。また、体積管式校正装置を用いた校正の不確かさを推定するためには、体積だけでなく、付随する温度測定、圧力測定などの不確かさ要因を詳細に評価することが求められる。

そこで、本報では、トレーサビリティが確保された標準流量計で体積管式流量計校正装置を校正し、この校正装置を用いて石油用流量計を校正する場合の校正の不確かさを「ISO 国際文書 計測における不確かさの表現ガイド」<sup>4)</sup>に従い、検討した。

## 2. 主な記号

$I_p$  : パルス計数器により積算された流量計のパルス数 (pulse)

\* 計測標準研究部門 流量計測科 液体流量標準研究室

\*\* 計測標準研究部門 流量計測科

$K_f$  : 体積流量計の校正係数 (K 値) (pulse/m<sup>3</sup>)  
 $K_{fm}$  : 質量流量計の校正係数 (K 値) (pulse/kg)  
 $K_{pp}$  : 体積管測定区間体積の校正係数 (-)  
 $\delta K_{pp}$  : 体積管の校正に伴う偶然効果及び再現性などによる効果 (-)  
 $p_{FM}$  : 流量計内のゲージ圧力 (MPa)  
 $p_{pp}$  : 計測終了時における体積管の計測区間内のゲージ圧力 (MPa)  
 $t_p$  : 計測開始時の計測開始信号直後の流量計パルスの立ち上がりから計測終了後の流量計パルスの立ち上がりまでの時間間隔 (s)  
 $T_{FM}$  : 流量計内の温度 (°C)  
 $T_{pp}$  : 計測終了時における体積管の計測区間内の平均温度 (°C)  
 $t_D$  : 計測時間 (s)  
 $M_{pp}$  : 体積管の測定区間で計測される質量 (kg)  
 $\Delta M_{LDV}$  : 計測時間内に生じる接続管路内の質量変化量 (kg)  
 $Q$  : 流量計を通過する質量流量 (kg/s)  
 $q$  : 流量計を通過する体積流量 (m<sup>3</sup>/s)  
 $V_{NOM}$  : 温度  $T_{NOM}$ , 圧力  $P_{NOM}$  での体積管の公称体積 (m<sup>3</sup>)  
 $V_{pp}$  : 計測終了時における体積管内の測定区間体積 (m<sup>3</sup>)  
 $V_{DV}$  : 校正装置の接続管路の体積 (m<sup>3</sup>)  
 $\alpha_L$  : 温度に対する試験液密度の感度係数である熱膨張係数 (kg m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup>)  
 $\alpha_{pp}$  : 温度に対する体積管内の測定区間体積の感度係数 (熱膨張係数) (K<sup>-1</sup>)  
 $\beta_L$  : 圧力に対する試験液密度の感度係数である圧

縮係数 (MPa<sup>-1</sup>)  
 $\beta_{pp}$  : 圧力に対する体積管体積の感度係数 (圧力膨張係数) (MPa<sup>-1</sup>)  
 $\gamma$  : 密度と体積管内の測定区間体積から求められる係数 (-)  
 $\rho_L$  : 試験液密度 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\rho_{pp}$  : 計測終了時における体積管測定区間内の試験液密度 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\Delta(\rho_{LMS}q_{SM})$  : 体積流量と密度変動の相関に伴う影響分 (kg/s)  
 添え字  
 $cal$  : 体積管式校正装置の校正時  
 $SM$  : 標準流量計  
 $TM$  : 被校正流量計  
 $-$  : 計測時間で時間平均化された  
 $\langle \rangle$  : 測定回数で平均化された

### 3. 体積管を用いた校正装置による流量計の校正方法

#### 3.1 体積管を用いた校正装置の概要

本報で検討を行う代表的な体積管を用いた校正設備 (パイププルーバー)<sup>1)</sup> の概略図を図1に示す。まず、試験液を校正対象の流量計と体積管に通液させる。バルブ等の操作により、球状ピストンを体積管へ向けて発射する。球状ピストンが体積管内を移動し、体積管の上流部と下流部に設置された検出器によって球状ピストンの通過が検知され、計測時間が計時システムにより測定される。また、その間の体積が測定区間体積となる。体積値を計測時間で除することにより標準流量を得て、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

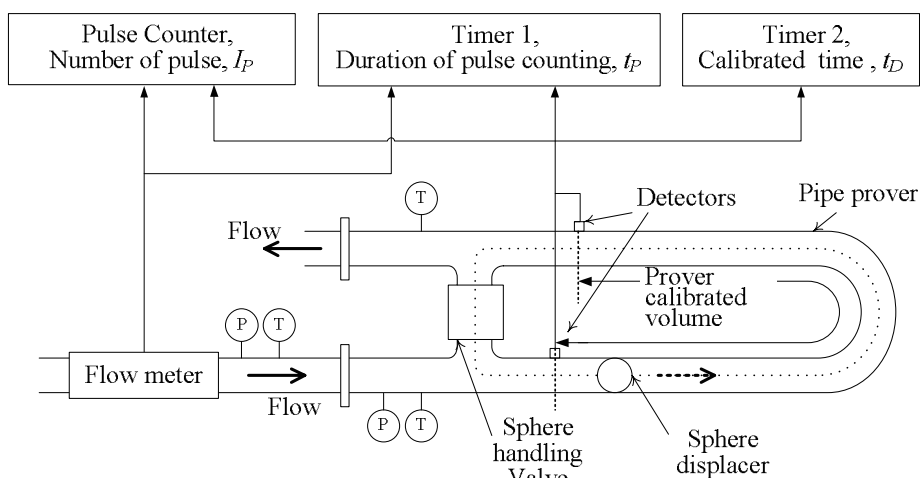


図1 体積管を用いた校正設備の概略図

により校正を行う。本報では、流量計は通過流量に比例した周波数のパルスを出力する型式に限定した。計時システムとしてパルス計時器及びパルス計数器を組み合わせることによるパルス内挿法を採用する。流量計下流部に設置された温度計と圧力計を用いて流量計を通過する試験液の温度及び圧力が測定され、体積管上流部の圧力計及び上下流部に設置された温度計により体積管内の温度及び圧力が測定される。また、流量計の種類として体積流量を計測する体積流量計と質量流量を計測する質量流量計があるが、本報では、主に、標準流量計及び被校正流量計が体積流量計である場合について検討を行った。

### 3.2 体積管の校正係数の算出

体積流量計である標準流量計を用いて体積管を用いた校正装置を校正し、体積管内測定区間体積の校正係数の算出方法を検討する。

標準流量計から上流側検出器までの管路間に試験液の漏れや気相の発生および減少がないと仮定すると、標準流量計を通過する時間平均質量流量  $\overline{Q_{SM}}$  (kg/s) は、質量保存則より、(1) 式が導かれる。

$$\overline{Q_{SM}} t_{D,CAL} = M_{PP,CAL} + \Delta M_{LDV,CAL} \quad (1)$$

ここで、 $t_{D,CAL}$  (s)、 $M_{PP,CAL}$  (kg)、 $\Delta M_{LDV,CAL}$  (kg) はそれぞれ計測時間、体積管の測定区間で計測される質量、接続管路内の質量変化量を意味する。質量流量  $\overline{Q_{SM}}$  (kg/s) は、計測時間で時間平均化された密度値  $\overline{\rho_{LSM}}$  (kg/m<sup>3</sup>) と、標準流量計を通過する体積流量の時間平均値  $\overline{q_{SM}}$  (m<sup>3</sup>/s) との積、及び体積流量と密度変動の相関に伴う影響分  $\Delta(\rho_{LSM} q_{SM})$  (kg/s) より (2) 式で表わされる。

$$\overline{Q_{SM}} = \overline{\rho_{LSM} q_{SM}} + \Delta(\rho_{LSM} q_{SM}) \quad (2)$$

体積管の計測区間で測定される質量  $M_{PP,CAL}$  (kg) は計測終了時の測定区間内の試験液密度  $\rho_{PP,CAL}$  (kg/m<sup>3</sup>) および体積管の測定区間体積の校正係数  $K_{PP}$  (-) より (3) 式で表される。

$$M_{PP,CAL} = K_{PP} \rho_{PP,CAL} V_{PP,CAL} \quad (3)$$

ここで、 $V_{PP,CAL}$  (m<sup>3</sup>) は体積管校正時の温度と圧力で補正された体積管の計測区間の体積である。体積管の温度が体積管内の試験液温度に等しいと仮定した場合、 $V_{PP,CAL}$  (m<sup>3</sup>) は、参照温度  $T_{NOM}$  (°C)、参照圧力  $P_{NOM}$  (MPa) で

の公称体積  $V_{NOM}$  (m<sup>3</sup>) を計測終了時における体積管の計測区間内の試験液の平均温度 (°C) 及び平均圧力  $P_{PP}$  (MPa) を用いて温度と圧力による体積変化量を補正する (4) 式で表される。

$$V_{PP,CAL} = V_{NOM} \{1 + \alpha_{PP}(T_{PP} - T_{NOM})\} \{1 + \beta_{PP}(P_{PP} - P_{NOM})\} \quad (4)$$

ここで、 $\alpha_{PP}$  (K<sup>-1</sup>)、 $\beta_{PP}$  (MPa<sup>-1</sup>) は、それぞれ温度に対する体積管の測定区間体積の感度係数 (熱膨張係数)、圧力に対する測定区間体積の感度係数 (圧力膨張係数) である。

計測時間内に標準流量計を通過する時間平均体積流量は、計測開始時の計測開始信号直後の流量計パルスの立ち上がりから計測終了後の流量計パルスの立ち上がりまでの時間間隔  $t_{P,CAL}$  (s)、パルス計数器により積算された標準流量計のパルス数  $I_{P,SM}$  (pulse)、標準流量計の校正係数である K 値  $K_{JSM}$  (pulse/m<sup>3</sup>) から (5) 式より求められる。

$$\overline{q_{SM}} = \frac{I_{P,SM}}{t_{P,CAL} K_{JSM}} \quad (5)$$

したがって、(1) ~ (3) 式及び (5) 式より、体積管の校正係数  $K_{PP}$  (-) は (6) 式から得られる。

$$K_{PP} = \frac{\overline{\rho_{LSM}} I_{P,CAL} t_{D,CAL}}{\rho_{PP,CAL} V_{PP,CAL} t_{P,CAL} K_{JSM}} + \frac{\Delta(\rho_{LSM} q_{SM}) t_{D,CAL}}{\rho_{PP,CAL} V_{PP,CAL}} - \frac{\Delta M_{LDV,CAL}}{\rho_{PP,CAL} V_{PP,CAL}} \quad (6)$$

ここで、通常、密度と流量変動の相関に伴う影響分と接続管路内の質量変化量の期待値を零として見なすことから、体積管の測定区間体積の校正係数  $K_{PP}$  は (7) 式から求められる。

$$K_{PP} = \frac{\overline{\rho_{LSM}} I_{P,CAL} t_{D,CAL}}{\rho_{PP,CAL} V_{PP,CAL} t_{P,CAL} K_{JSM}} \quad (7)$$

この校正係数  $K_{PP}$  は、標準流量計で校正された条件 (液種、流量、温度、圧力など) での値である。通常、得られた  $K_{PP}$  を校正範囲で平均した値  $\langle K_{PP} \rangle$  が校正係数として用いられる。

なお、校正係数  $K_{Jm,SM}$  (pulse/kg) である質量流量計を標準流量計として体積管を校正した場合には、校正係数  $K_{PP}$  は (8) 式から求められる。

$$K_{PP} = \frac{I_{P,CAL} t_{D,CAL}}{\rho_{PP,CAL} V_{PP,CAL} t_{P,CAL} K_{Jm,SM}} \quad (8)$$

### 3.3 体積流量計の校正係数の算出

体積管の校正係数の算出方法と同様に, 体積管式校正装置で校正される体積流量計の校正係数である K 値  $K_{JTM}$  (pulse/m<sup>3</sup>) は算出され, 体積管の校正係数  $\langle K_{PP} \rangle$  を用いた (9) 式で表される.

$$K_{JTM} = \frac{\overline{\rho_{LFM}} I_P t_D}{\langle K_{PP} \rangle \rho_{PP} V_{PP} t_P} \quad (9)$$

(7)(9) 式より校正された体積流量計の K 値  $K_{JTM}$  (pulse/m<sup>3</sup>) は (10) 式から求められる.

$$K_{JTM} = \gamma \left( \frac{I_P}{I_{P,CAL}} \right) \left( \frac{t_D}{t_{D,CAL}} \right) \left( \frac{t_{P,CAL}}{t_P} \right) K_{JSM} \quad (10)$$

ここで, 密度と測定区間体積の比である係数  $\gamma$  (-) を (11) 式で定義する.

$$\gamma = \left( \frac{\overline{\rho_{LFM}}}{\rho_{LSM}} \right) \left( \frac{\rho_{PP,CAL}}{\rho_{PP}} \right) \left( \frac{V_{PP,CAL}}{V_{PP}} \right) \quad (11)$$

流量計内を通過する試験液平均密度  $\overline{\rho_{LFM}}$  (kg/m<sup>3</sup>) は, サンプルングされた試験液を密度計を用いて温度  $T_{REF}$  (°C) 及び大気圧で測定し, その測定値  $\rho_{REF}$  を温度及び圧力補正した (12) 式から求められる.

$$\overline{\rho_{LFM}} = \{ \rho_{REF} + \alpha_L (T_{FM} - T_{REF}) \} (1 + \beta_L p_{FM}) \quad (12)$$

ここで,  $\alpha_L$  (kg m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup>),  $\beta_L$  (MPa<sup>-1</sup>),  $T_{FM}$  (°C),  $p_{FM}$  (MPa) は, それぞれ温度に対する試験液密度の感度係数である熱膨張係数, 圧力に対する試験液密度の感度係数である圧縮係数, 流量計内の温度, 流量計内のゲージ圧力である. 流量計内の圧力は被試験流量計の下流のゲージ圧力測定値である.

また, 計測終了時における体積管の計測区間内の密度  $\rho_{PP}$  (kg/m<sup>3</sup>) は, 計測区間内の平均温度  $T_{PP}$  (°C) 及び圧力  $p_{PP}$  (MPa) より (13) 式から求められる.

$$\rho_{PP} = \{ \rho_{REF} + \alpha_L (T_{PP} - T_{REF}) \} (1 + \beta_L p_{PP}) \quad (13)$$

したがって, (4)(12)(13) 式より係数  $\gamma$  は (14) 式に展開される.

$$\begin{aligned} \gamma \approx & 1 + \frac{\alpha_L}{\rho_{REF}} (T_{FM} - T_{SM}) + \beta_L (p_{FM} - p_{SM}) \\ & + \left( \frac{\alpha_L}{\rho_{REF}} + \alpha_{PP} \right) (T_{PP,CAL} - T_{PP}) + (\beta_L + \beta_{PP}) (p_{PP,CAL} - p_{PP}) \end{aligned} \quad (14)$$

計測終了時における計測容積内の平均温度  $T_{PP}$  及び圧力  $p_{PP}$  は, 通常, 体積管計測区間の上流部及び下流部で測定された温度の平均値及び上流部の圧力値から推定される<sup>5)</sup>. さらに, 温度が安定している場合には, 上流部もしくは下流部で測定された温度が採用される<sup>5)</sup>.

### 3.4 質量流量計の校正係数

標準流量計が体積流量計及び質量流量計である場合の質量流量計の K 値  $K_{JmTM}$  (pulse/kg) はそれぞれ (15)(16) 式から求められる.

$$K_{JmTM} = \left( \frac{\rho_{PP,CAL}}{\rho_{PP}} \right) \left( \frac{V_{PP,CAL}}{V_{PP}} \right) \left( \frac{I_P}{I_{P,CAL}} \right) \left( \frac{t_D}{t_{D,CAL}} \right) \left( \frac{t_{P,CAL}}{t_P} \right) K_{JmSM} \quad (15)$$

$$K_{JmTM} = \left( \frac{1}{\rho_{LSM}} \right) \left( \frac{\rho_{PP,CAL}}{\rho_{PP}} \right) \left( \frac{V_{PP,CAL}}{V_{PP}} \right) \left( \frac{I_P}{I_{P,CAL}} \right) \left( \frac{t_D}{t_{D,CAL}} \right) \left( \frac{t_{P,CAL}}{t_P} \right) K_{JSM} \quad (16)$$

## 4. 流量計の校正係数の不確かさ

### 4.1 不確かさ解析のためのモデル式

体積流量計の校正係数である K 値  $K_{JTM}$  の不確かさ解析のためのモデル式は (17) 式で表される.

$$\begin{aligned} K_{JTM} = & \gamma \left( \frac{I_P}{I_{P,CAL}} \right) \left( \frac{t_D}{t_{D,CAL}} \right) \left( \frac{t_{P,CAL}}{t_P} \right) K_{JSM} \left( 1 - \frac{\Delta(\rho_{LSM} q_{SM})}{\rho_{LSM} q_{SM}} \right) \\ & + \frac{\Delta M_{LDV,CAL}}{M_{PP,CAL}} + \frac{\delta K_{PP}}{K_{PP}} \left( 1 - \frac{\Delta M_{LDV}}{M_{PP}} + \frac{\Delta(\rho_{LFM} q_{FM})}{\rho_{LFM} q_{FM}} \right) + \delta K_f \end{aligned} \quad (17)$$

ここで,  $\delta K_{PP}$  (-) は体積管の校正に伴うばらつき成分 (偶然効果) 及び校正された条件 (液種, 流量など) と流量計校正時の条件の違いが測定区間体積に及ぼす影響分であり, 測定区間体積の再現性の寄与も含まれる. (17) 式を展開すると, 体積流量計の K 値  $K_{JTM}$  の相対合成標準不確かさは (18) 式で表される. (18) 式の右辺の各項は, それぞれ標準流量計の校正係数, 流量計のパルス計数, 計測時間, パルス計数時間, 接続管路内の質量変化, 流量変動と密度変動の相関, 密度及び体積から求められる係数, 体積管の校正に伴う偶然効果及び測定区間体積の再現性, 流量計の偶然効果による寄与を意味する.

$$\begin{aligned} \left\{ \frac{u_c(K_{JTM})}{K_{JTM}} \right\}^2 &= \left\{ \frac{u(K_{JSM})}{K_{JSM}} \right\}^2 + \left\{ u \left( \frac{I_P}{I_{P,CAL}} \right) \right\}^2 + \left\{ u \left( \frac{t_D}{t_{D,CAL}} \right) \right\}^2 \\ &+ \left\{ u \left( \frac{t_{P,CAL}}{t_P} \right) \right\}^2 + \left\{ \frac{u(\Delta M_{LDV} - \Delta M_{LDV,CAL})}{M_{PP}} \right\}^2 \\ &+ \left[ \left\{ \frac{u(\Delta(\rho_{LSM} q_{SM}))}{\rho_{LSM} q_{SM}} \right\}^2 + \left\{ \frac{u(\Delta(\rho_{LFM} q_{FM}))}{\rho_{LFM} q_{FM}} \right\}^2 \right] \\ &+ \{u(\gamma)\}^2 + \left\{ \frac{\delta K_{PP}}{K_{PP}} \right\}^2 + \left\{ \frac{u(\delta K_f)}{K_f} \right\}^2 \quad (18) \end{aligned}$$

それぞれの不確かさ要因の寄与を調べるために、次節では、表 1 に示す代表的な参考値を用いて試験液が灯油である校正装置における不確かさを評価する。

#### 4.2 標準流量計の不確かさ

標準流量計の校正値に付随する校正の不確かさに加え、体積管の校正の際に生じる標準流量計の測定の不確かさを推定することが必要である。測定の不確かさ要因として、標準流量計の長期安定性、繰り返し性、直線性、試験液物性の影響 (Re 数, 粘度, 密度の依存性), 温度及び圧力の影響, 上流側配管の影響が考えられる。ここでは標準流量計による測定相対標準不確かさを (19) 式と仮定する。

$$\frac{u(K_{JSM})}{K_{JSM}} = 3 \times 10^{-4} \quad (19)$$

#### 4.3 パルス計数に伴う不確かさ

通常、流量計からのパルスは全てカウントできると判断し、パルス計数に伴う標準不確かさ  $u(I_P)$  および  $u(I_{P,CAL})$  零と見なすことから、パルス計数に伴う不確かさは (20) 式で表される。

$$\left\{ u \left( \frac{I_P}{I_{P,CAL}} \right) \right\}^2 = \left\{ \frac{u(I_P)}{I_P} \right\}^2 + \left\{ \frac{u(I_{P,CAL})}{I_{P,CAL}} \right\}^2 = 0 \quad (20)$$

#### 4.4 パルス計数時間及び体積管の計測時間に伴う不確かさ

パルス計時器により測定されるパルス計数時間  $t_p$  の不確かさ解析のためのモデル式は (21) 式で表される。

$$t_p = t_{pm} + t_{pc} + \delta t_p \quad (21)$$

ここで、 $t_{pm}(s)$ ,  $t_{pc}(s)$ ,  $\delta t_p(s)$  はそれぞれ、パルス計時器の指示時間, 補正時間, 経年変化を含む再現性を意味する。体積管の校正と流量計の校正で同じパルス計時器を使用する場合には、それぞれの補正時間には強い相関関係があると考えられる。したがって、それぞれの補正時間の相関係数が 1 であると仮定することにより<sup>6)-7)</sup>, パルス計数時間の標準不確かさの寄与は (22) 式で推定される。

$$\begin{aligned} \left\{ u \left( \frac{t_{P,CAL}}{t_P} \right) \right\}^2 &= \\ \left\{ \frac{u(t_{pm})}{t_P} \right\}^2 + \left\{ \frac{u(\delta t_p)}{t_P} \right\}^2 + \left\{ \frac{u(t_{pm,CAL})}{t_{P,CAL}} \right\}^2 + \left\{ \frac{u(\delta t_{p,CAL})}{t_{P,CAL}} \right\}^2 \quad (22) \end{aligned}$$

同様に、計測時間の標準不確かさは (23) 式で表される。

$$\begin{aligned} \left\{ u \left( \frac{t_D}{t_{D,CAL}} \right) \right\}^2 &= \\ \left\{ \frac{u(t_{Dm})}{t_D} \right\}^2 + \left\{ \frac{u(\delta t_D)}{t_D} \right\}^2 + \left\{ \frac{u(t_{Dm,CAL})}{t_{D,CAL}} \right\}^2 + \left\{ \frac{u(\delta t_{D,CAL})}{t_{D,CAL}} \right\}^2 \quad (23) \end{aligned}$$

パルス計時器の指示時間の標準不確かさ  $u(t_{pm})$ ,  $u(t_{pm,CAL})$ ,  $u(t_{Dm})$ ,  $u(t_{Dm,CAL})$  はパルス計時器の分解能に相当するが, その値は十分小さいと考えられるので無視する。パルス計時器の再現性による不確かさ  $u(\delta t_p)$ ,  $u(\delta t_{p,CAL})$ ,

表 1. 校正装置と試験液物性

Prover				Liquid properties(Kerosene)		
$V_{NOM}$	$V_{DV}$	$\alpha_{PP}$	$\beta_{PP}$	$\rho_{REF}$	$\alpha_L$	$\beta_L$
5 m <sup>3</sup>	1 m <sup>3</sup>	3.5×10 <sup>-5</sup> K <sup>-1</sup>	2.5×10 <sup>-5</sup> MPa <sup>-1</sup>	788 kg/m <sup>3</sup>	-0.74 kg/(m <sup>3</sup> K)	9×10 <sup>-4</sup> MPa <sup>-1</sup>

$u(\delta t_p)$ ,  $u(\delta t_{D,CAL})$  をパルス計時器の仕様書の記載内容から推定することが考えられるが, ここでは, パルス計時器の再現性による相対標準不確かさが  $2.0 \times 10^{-5}$  であると仮定した. したがって, (22)(23) 式よりパルス計数時間の相対標準不確かさ  $u(t_p/CAL/t_p)$  及び計測時間の相対標準不確かさ  $u(t_p/t_{D,CAL})$  はともに  $2.8 \times 10^{-5}$  であると見積もられる.

#### 4.5 接続管路内の質量変化

流量計から体積管の上流側検出器までの接続管路内では流れ方向の各位置で試験液と管路の温度がほぼ等しいと仮定し, また管路の熱膨張及び圧力膨張は試験液の熱膨張及び圧縮に対して非常に小さい場合には, 接続管路内で計測時間に生じる質量変化量  $\Delta M_{LDV}$  は (24) 式で表わされる.

$$\Delta M_{LDV} = \rho_{DV} V_{DV} \left\{ \frac{\alpha_L \Delta T_{DV}}{\rho_{DV}} + \beta_L \Delta p_{DV} \right\} \quad (24)$$

ここで,  $\rho_{DV}(\text{kg/m}^3)$ ,  $\Delta p_{DV}(\text{MPa})$ ,  $\Delta T_{DV}(\text{°C})$ ,  $V_{DV}(\text{m}^3)$  はそれぞれ, 校正設備の接続管路の平均密度, 計測開始から終了までに生じる接続管路内の圧力変化量および温度変化量, 接続管路の体積である.  $\Delta M_{LDV}$  の期待値を零と見なすことにより, 流量計校正時における接続管路内の質量変化量  $\Delta M_{LDV}$  と体積管校正時の質量変化量  $\Delta M_{LDV,CAL}$  の相対合成不確かさは (25) 式に展開される.

$$\left\{ \frac{u(\Delta M_{LDV} - \Delta M_{LDV,CAL})}{M_{PP}} \right\}^2 \approx \left( \frac{V_{DV}}{V_{NOM}} \right)^2 \left\{ \left( \frac{\alpha_L}{\rho_{DV}} \right)^2 u^2(\Delta T_{DV} - \Delta T_{DV,CAL}) + \beta_L^2 u^2(\Delta p_{DV} - \Delta p_{DV,CAL}) \right\} \quad (25)$$

接続管路内の温度及び圧力の変化量は基準値 (温度:  $\pm \delta T_{DV}(\text{K})$ , 圧力:  $\pm \delta p_{DV}(\text{MPa})$ ) 以下であると見なす場合には, 体積管を校正する際に生じる接続管路内の温度及び圧力の変化量と流量計校正時の変化量に相関がないことから, これら誤差要因が一様分布に従うと想定すると, (18) 式中の接続管路内の質量の変化量による流量計の校正係数の不確かさへの寄与は (26) 式で表される.

$$\left\{ \frac{u(\Delta M_{LDV} - \Delta M_{LDV,CAL})}{M_{PP}} \right\}^2 = \left( \frac{V_{DV}}{V_{NOM}} \right)^2 \left\{ \frac{2}{3} \left( \frac{\alpha_L}{\rho_{DV}} \delta T_{DV} \right)^2 + \frac{2}{3} (\beta_L \delta p_{DV})^2 \right\} \quad (26)$$

ここで, 接続管路内の温度変化量が  $\pm 1 \text{ K}$  以下 ( $\delta T_{DV} =$

$1 \text{ K}$ ), 圧力変化量が  $\pm 0.01 \text{ MPa}$  以下 ( $\delta p_{DV} = 0.01 \text{ MPa}$ ) と仮定すると, 表 1 及び (26) 式より接続管路内の質量の変化量による流量計の校正係数の不確かさへの寄与は  $1.5 \times 10^{-4}$  であると見積もられる.

#### 4.6 流量計内での流量及び密度変動の影響

流量計内での密度変動と流量変動との相関に伴う影響分  $\Delta(\rho_{LSM} q_{SM})$  は, 密度変動強度  $\rho_{LSM,rms}(\text{kg/m}^3)$  と流量変動強度  $q_{SM,rms}(\text{m}^3/\text{s})$  で表される (27) 式から推定される.

$$\Delta(\rho_{LSM} q_{SM}) \leq \rho_{LSM,rms} q_{SM,rms} \quad (27)$$

圧力変動, 温度変動から推定される  $\rho_{LSM,rms}$  は,  $1 \times 10^{-3} \overline{\rho_{LSM}}$  以下であり, また, 流量変動強度は  $0.05 \overline{q_{SM}}$  以下であると仮定すると, 標準体積に対する相対標準不確かさは  $5 \times 10^{-5}$  以下であると見積もられる. したがって, 体積管校正時と流量計校正時の不確かさを合成することによって流量計内での密度変動と流量変動の影響による標準体積に対する相対標準不確かさの寄与は  $7 \times 10^{-5}$  以下であると見積もられる.

#### 4.7 密度及び計測区間体積の違いによる影響

(11) 式で定義される密度と計測区間体積の積の比率である係数  $\gamma$  の不確かさは, 温度に対する測定区間体積の感度係数は試験液密度の値に比べ無視できること ( $\alpha_L / \rho_{REF} \gg \alpha_{PP}$ ), また圧力に対する測定区間体積の感度係数も試験液密度の値に比べ無視できること ( $\beta_L \gg \beta_{PP}$ ) から, (14) 式より (28) 式に展開される.

$$u^2(\gamma) = \left\{ \frac{(T_{FM} - T_{SM} + T_{PP,CAL} - T_{PP})}{\rho_{REF}} u(\alpha_L) \right\}^2 + \left\{ \frac{\alpha_L}{\rho_{REF}} u(T_{FM} - T_{SM} + T_{PP,CAL} - T_{PP}) \right\}^2 + \left\{ (p_{FM} - p_{SM} + p_{PP,CAL} - p_{PP}) u(\beta_L) \right\}^2 + \left\{ \beta_L u(p_{FM} - p_{SM} + p_{PP,CAL} - p_{PP}) \right\}^2 + \left\{ (T_{PP,CAL} - T_{PP}) u(\alpha_{PP}) \right\}^2 + \left\{ (p_{PP,CAL} - p_{PP}) u(\beta_{PP}) \right\}^2 \quad (28)$$

(28) 式の右辺の各項は, それぞれ試験液の熱膨張係数, 流量計内及び体積管内測定区間の温度計測, 試験液の圧縮係数, 流量計及び体積管内測定区間の圧力測定, 体積管の熱膨張係数, 体積管の圧力膨張係数による寄与を意味する. 次にそれぞれの不確かさ要因について記述する.

#### 4.7.1 試験液の熱膨張係数による不確かさ

試験液の熱膨張係数  $\alpha_L$  の算出には、温度を変化させた試験液の密度測定から得る方法、もしくは文献値<sup>8)</sup> から引用することが考えられる。ここでは、試験液の熱膨張係数の相対標準不確かさ  $u(\alpha_L)/\alpha_L$  を 10% であると仮定し、また、流量計校正時における流量計内温度と体積管内温度の差 ( $T_{FM} - T_{PP}$ ) と体積管校正時における温度差 ( $T_{SM} - T_{PP,CAL}$ ) の偏差が  $\pm 2$  K 以下であることを仮定すると、(28) 式中の係数  $\gamma$  に対する熱膨張係数が起因する相対標準不確かさは  $1.9 \times 10^{-4}$  以下であると見積もられる。

#### 4.7.2 温度計測の不確かさ

被校正流量計及び標準流量計内の試験液の温度  $T_{FM}$ ,  $T_{SM}$ , 体積管校正時及び流量計校正時における体積管の計測区間内の計測終了時平均温度  $T_{PP,CAL}$ ,  $T_{PP}$  は、流量計の下流部に設置された温度計の指示値  $T_{FMm}$  (°C),  $T_{SMm}$  (°C) 及び体積管の上流及び下流部に設置された温度計指示値の平均値  $T_{PP,CALm}$  (°C),  $T_{PPm}$  (°C) から推定することから、不確かさ解析のためのモデル式は (29) 式で表される。

$$\begin{aligned} & T_{FM} - T_{SM} + T_{PP,CAL} - T_{PP} \\ &= T_{FMm} + T_{FMC} + \delta T_{FM} - (T_{SMm} + T_{SMC} + \delta T_{SM}) \\ & \quad + T_{PP,CALm} + T_{PP,CALC} + \delta T_{PP,CAL} - (T_{PPm} + T_{PPC} + \delta T_{PP}) \end{aligned} \quad (29)$$

ここで、体積管校正時と被試験流量計校正時において同一の温度計で流量計内の温度及び体積管内の温度を推定することから、温度計の補正值 (標準値からの偏差)  $T_{FMC}$  (°C) と  $T_{SMC}$  (°C) との間に、また  $T_{PP,CALC}$  (°C) と  $T_{PPC}$  (°C) の間には相関があると考え、被校正流量計及び標準流量計内温度測定時における温度計の補正值は温度計の再現性と非直線性に伴う寄与に相当すると見なす。  $\delta T_{FM}$  (°C),  $\delta T_{SM}$  (°C) はそれぞれ被校正流量計における温度測定位置と測定対象の試験液温度との差及び標準流量計での温度差を、また  $\delta T_{PP,CAL}$  (°C),  $\delta T_{PP}$  (°C) は体積管校正時及び流量計校正時における温度計設置位置と体積管測定区間内との試験液温度差を意味する。ここでは温度計の保護管等からの外部熱伝達による温度測定の誤差並びに温度計の最小目盛に伴う丸め誤差による影響を無視した。したがって、温度計測の不確かさは、(30) 式に展開される。

$$\begin{aligned} & u^2(T_{FM} - T_{SM} + T_{PP,CAL} - T_{PP}) = \\ & u^2(T_{FMm}) + u^2(T_{FMC}) + u^2(\delta T_{FM}) + u^2(T_{SMm}) + u^2(T_{SMC}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + u^2(\delta T_{SM}) + u^2(T_{PP,CALm}) + u^2(T_{PP,CALC}) + u^2(\delta T_{PP,CAL}) \\ & + u^2(T_{PPm}) + u^2(T_{PPC}) + u^2(\delta T_{PP}) \end{aligned} \quad (30)$$

試験液温度は、計測時間中に測定された温度指示値の平均値から推定されることから、温度計の指示値による標準不確かさは平均の実験標準偏差として見積もられ、ここでは、標準不確かさ  $u(T_{FMm})$ ,  $u(T_{SMm})$ ,  $u(T_{PP,CALm})$ ,  $u(T_{PPm})$  を 0.05 K と仮定する。流量計下流部の温度計設置位置と流量計内との試験液温度差は最大  $\pm 0.2$  K の範囲で、一様に分布すると仮定すると、標準不確かさ  $u(\delta T_{FM})$ ,  $u(\delta T_{SM})$  は 0.17 K と見積もられる。さらに、校正中の温度の時間変動と流れ方向の温度分布を考慮することにより、体積管の温度計設置位置の温度で推定される試験液温度と体積管測定区間内の温度の差が最大 0.5 K であると仮定すると、測定位置及び温度分布によって生じる温度計測の標準不確かさは 0.33 K であると見積もられる。温度計の再現性等に伴う標準不確かさ  $u(T_{FMC})$ ,  $u(T_{SMC})$ ,  $u(T_{PP,CALC})$ ,  $u(T_{PPC})$  を 0.1 K と仮定すると、(30) 式より温度計測の標準不確かさが 0.49 K であり、また係数  $\gamma$  に対する温度測定による相対標準不確かさは  $4.6 \times 10^{-4}$  であると見積もられる。

#### 4.7.3 試験液の圧縮係数による不確かさ

試験液の圧力に対する密度の感度係数 (圧縮係数)  $\beta_L$  は、一般に試験液の温度および 15 °C での密度値を用いた ISO の推算式<sup>9)</sup> を用いて求められる。この推算式の拡張不確かさ ( $k = 2$ ) は 6.5% であることが記述されているが、推算式に対する温度測定値及び密度値に起因する不確かさを含めて、圧縮係数の相対標準不確かさ  $u(\beta_L)/\beta_L$  として  $1 \times 10^{-1}$  と仮定する。また、流量計校正時における流量計内圧力と体積管内圧力の差 ( $p_{FM} - p_{PP}$ ) と体積管校正時における圧力差 ( $p_{SM} - p_{PP,CAL}$ ) の偏差は、主に標準流量計と被校正流量計の圧力損失の違いに起因することから、0.1 MPa 以下であると仮定した。係数  $\gamma$  に対する圧縮係数が起因する相対標準不確かさは  $9 \times 10^{-6}$  以下であると見積もられる。

#### 4.7.4 圧力計測による不確かさ

被校正流量計及び標準流量計内の圧力  $p_{FM}$ ,  $p_{SM}$ , 体積管校正時及び流量計校正時における体積管の計測区間内の計測終了時平均圧力  $p_{PP,CAL}$ ,  $p_{PP}$  は、流量計の下流部に設置された圧力計の指示値  $p_{FMm}$  (MPa),  $p_{SMm}$  (MPa) 及び体積管上流部に設置された圧力計の指示値  $p_{PP,CALm}$  (MPa),  $p_{PPm}$  (MPa) から求めることから、不確かさ解析のためのモデル式は

(31) 式で表される.

$$\begin{aligned}
 & p_{FM} - p_{SM} + p_{pp,CAL} - p_{PP} \\
 &= p_{FMm} + p_{FMC} + \delta p_{FM} - (p_{SMm} + p_{SMC} + \delta p_{SM}) \\
 &+ p_{pp,CALm} + p_{pp,CALC} + \delta p_{pp,CAL} - (p_{ppm} + p_{ppC} + \delta p_{pp}) \quad (31)
 \end{aligned}$$

ここで, 体積管校正時と被試験流量計校正時において同一の圧力計 (ゲージ圧計) を用いて流量計内の圧力及び体積管測定区間の圧力 (ゲージ圧) を推定することから, 流量計下流部の圧力計の補正值  $p_{FMC}$  (MPa) と  $p_{SMC}$  (MPa) との間に, また体積管上流部の圧力計の補正值  $p_{pp,CALC}$  (MPa) と  $p_{ppC}$  (MPa) との間に相関があると考え, 被校正流量計及び標準流量計内圧力測定時における圧力計の補正值は圧力計の再現性と非直線性に伴う寄与に相当すると見なせる.  $\delta p_{FM}$  (MPa),  $\delta p_{SM}$  (MPa) は, 被校正流量計及び標準流量計における圧力測定位置と測定対象の圧力差を, また  $\delta p_{pp,CAL}$  (MPa),  $\delta p_{pp}$  (MPa) は体積管校正時及び流量計校正時における圧力計設置位置と体積管測定区間内との試験液の圧力差を意味する. 圧力計の最小目盛に伴う丸め誤差による影響を無視することにより, 圧力計測の不確かさは, (32) 式に展開される.

$$\begin{aligned}
 u^2(p_{FM} - p_{SM}) &= u^2(p_{FMm}) + u^2(p_{FMC}) + u^2(\delta p_{FM}) + u^2(p_{SMm}) \\
 &+ u^2(p_{SMC}) + u^2(\delta p_{SM}) + u^2(p_{pp,CALm}) + u^2(p_{pp,CALC}) \\
 &+ u^2(\delta p_{pp,CAL}) + u^2(p_{ppm}) + u^2(p_{ppC}) + u^2(\delta p_{pp}) \quad (32)
 \end{aligned}$$

まず, 圧力計の指示値として計測時間中に測定された圧力の時間平均値を用いるが, 圧力計の指示値による標準不確かさは平均の実験標準偏差として推定され, ここでは, 標準不確かさ  $u(p_{FMm})$ ,  $u(p_{SMm})$ ,  $u(p_{pp,CALm})$ ,  $u(p_{ppm})$  を 0.01 MPa と仮定する. 流量計内の圧力は流量計下流部で測定した圧力値に対して 0.1 MPa 以下の偏差があると仮定すると, 測定される圧力値と流量計内圧力との差による標準不確かさは, 0.06 MPa であると見積もられる. なお, この不確かさは流量計の圧力損失に依存する. また, 体積管内の圧力と体積管上流部で測定した圧力値との差を最大 0.05 MPa と仮定すると, 体積管内圧力に寄与する測定位置による標準不確かさ  $u(\delta p_{pp,CAL})$ ,  $u(\delta p_{pp})$  は, 0.03 MPa であると見積もられる. さらに, 圧力計の再現性等に伴う標準不確かさ  $u(p_{FMC})$ ,  $u(p_{SMC})$ ,  $u(p_{pp,CALC})$ ,  $u(p_{ppC})$  を 0.05 MPa と仮定すると, 流量計内及び体積管測定区間の圧力計測の不確かさは, (32) 式より 0.14 MPa であり, 圧力測定が起因する係数  $\gamma$  に対する相対標準不確かさは  $1.2 \times$

$10^{-4}$  であると見積もられる.

#### 4.7.5 体積管の熱膨張係数及び圧力膨張係数による不確かさ

体積管の熱膨張係数及び圧力膨張係数の相対標準不確かさをともに  $1 \times 10^{-1}$ , また, 体積管校正時と流量計校正時の温度差 ( $T_{pp,CAL} - T_{pp}$ ) 及び圧力差 ( $p_{pp,CAL} - p_{pp}$ ) をそれぞれ 20 K 以下, 0.3 MPa 以下と仮定すると, 体積管の熱膨張係数及び圧力膨張係数による相対標準不確かさは (33) 式で求められる.

$$\begin{aligned}
 & \left\{ (T_{pp,CAL} - T_{pp}) u(\alpha_{pp}) \right\}^2 + \left\{ (p_{pp,CAL} - p_{pp}) u(\beta_{pp}) \right\}^2 \\
 &= (20 \times 3.5 \times 10^{-6})^2 + (0.3 \times 2.5 \times 10^{-6})^2 = (7.0 \times 10^{-5})^2 \quad (33)
 \end{aligned}$$

#### 4.7.6 密度及び計測区間体積の違いによる不確かさのまとめ

前述の密度及び計測区間体積測定に及ぼす各要因の不確かさの寄与と (28) 式より求められた係数  $\gamma$  の相対合成標準不確かさをまとめたものを表 2 に示す. 表 2 より温度測定の不確かさが支配的であることがわかる.

#### 4.8 体積管の偶然効果及び再現性等による不確かさ

体積管式校正装置の校正及び校正装置による測定に伴う不確かさとして, 体積管の偶然効果, 体積管の検出器の再現性, 校正設備の流量依存性, 及び液種 (粘度, 密度など) 依存性が考えられる. 灯油及び軽油において国家標準で校正された標準流量計を用いて体積管式校正設備を校正した結果の一例として図 2 に示す. 校正流量範囲 (30 ~ 300 m<sup>3</sup>/h) で得られた体積管の校正係数  $K_{pp}$  の平均値  $\langle K_{pp} \rangle$  は 0.9997 であり, 平均値に対する偏差は 0.0002 であることがわかる. ここでは, 体積管の再現性を含めた体積管校正及び測定に伴う標準不確かさを  $3 \times 10^{-4}$  と仮定する.

#### 4.9 流量計の偶然効果による不確かさ

体積管による校正設備を用いて流量計を校正したときに生じる流量計の偶然効果による K 値の不確かさ  $u(\delta K)$  は, 平均の実験標準偏差として推定される. この不確かさは流量計によって大きく異なるが, 相対標準不確かさを  $1 \times 10^{-4}$  と見積もる.

#### 5. 不確かさのまとめ及び考察

前章で得られた不確かさ要因をまとめたものを表 3 に示す. 相対合成標準不確かさは 0.07 % であり, 相対拡



表 2. 密度及び計測区間体積の相対標準不確かさ

Uncertainty source	Relative standard uncertainty
Thermal coefficient of liquid density	$1.9 \times 10^{-4}$
Temperature measurement	$4.6 \times 10^{-4}$
Compressibility of liquid	Negligible
Pressure measurement	$1.4 \times 10^{-4}$
Thermal and pressure expansion coefficient of prover calibrated volume	$0.7 \times 10^{-4}$
Combined relative standard uncertainty	$5.2 \times 10^{-4}$

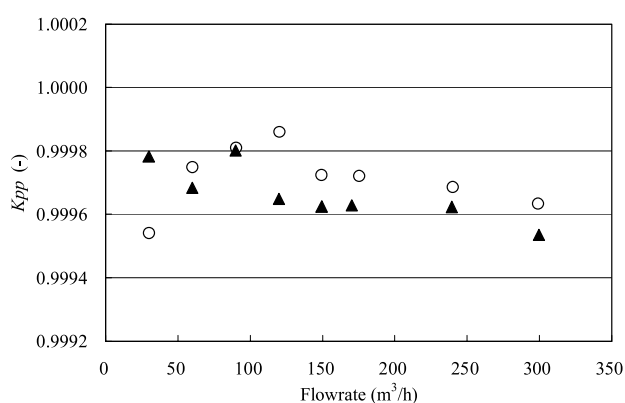


図 2 体積管の校正係数, ○; 灯油, ▲; 軽油

表 3. 体積流量計の校正の不確かさ

Uncertainty sources	Relative standard uncertainty
Standard flowmeter	$3.0 \times 10^{-4}$
Pulse counting	0
Duration of pulse counting	$0.2 \times 10^{-4}$
Measurement time	$0.2 \times 10^{-4}$
Change in mass within connection pipe	$1.5 \times 10^{-4}$
Fluctuation of the flow rate and density	$0.7 \times 10^{-4}$
Liquid density and prover calibrated volume	$5.2 \times 10^{-4}$
Reproducibility of prover	$3.0 \times 10^{-4}$
Random effect due to flowmeter	$1.0 \times 10^{-4}$
Relative combined standard uncertainty	$7.0 \times 10^{-4}$

張不確かさは 0.14 % (包含係数  $k = 2$ ) と表される。参考値を校正条件に採用することにより不確かさが算出されたが、パルス計数に伴う不確かさ、パルス計数時間及び体積管の計測時間に伴う不確かさ、並びに流量計内での流量及び密度変動の影響に伴う不確かさは相対合成標準不確かさの 1/10 である 0.007 % より小さく十分に無視することができる。また、体積管を用いた校正装置による体積流量計の校正の不確かさの主な要因は、試験液密度及び体積管の体積に起因する不確かさであり、特に、試験液温度の測定が大きく影響を及ぼすことがわかる。

本報では、温度計による測定値と体積管における計測区間の試験液温度差を最大 0.5 K であると仮定したため、温度計測が不確かさの主な要因の一つと評価された。計測終了時における体積管における計測区間の平均温度  $T_{pp}$  は、通常、体積管計測区間の上流部及び下流部で測定された温度及び圧力の平均値から推定される。しかしながら、ポンプによる発熱に伴う試験液の温度上昇や温度調節機器による温度調節などの温度の時間変動が生じ、また、体積管外部との熱移動、圧力損失に伴う発熱などによる流れ方向の温度分布が存在するため、これらが体積管測定区間内の試験液温度の測定値に及ぼす影響を考慮することが必要である。したがって、温度の時間変動に伴う試験液が上流側温度計を通過して計測区間へ流入することから、上流側で測定された時間平均値を採用することが妥当であると言える。さらに、体積管外部との熱移動によって測定区間内の温度は変化することが考えられる。そこで、流れ方向に対する温度変化量が一定であると仮定すると、計測終了時の計測容積内の平均温度は上流部で測定した温度の時間平均値  $\overline{T_{pp,U}}$  (°C) を用いた (34) 式で推定される。

$$T_{pp} = \overline{T_{pp,U}} + \frac{T_{ppf,D} - T_{pps,U}}{2} \quad (34)$$

(34) 式の右辺の第二項は計測終了時に下流側温度計で測定された温度値  $T_{ppf,D}$  (°C) と計測開始時の上流側温度値  $T_{pps,U}$  (°C) から推定される体積管測定区間での温度変化量の補正量を意味する。このことは、温度が安定している場合には、温度計による測定値と体積管における計測区間の試験液温度差の影響はほとんどないが、測定方法を改善することで不確かさを小さくすることが可能であることを示唆する。

現在では、国家標準へのトレーサビリティを確保する JCSS (校正事業者登録制度) が確立されている。この登録の要件として規定されている技術的要求事項適用指

針<sup>10)</sup>には、並列設置された複数台の流量計から標準流量を発生させる流量範囲の拡大や Re 数に対する流量計の特性を利用した校正液種の拡張を行う方法が記述されている。流量範囲の拡大や校正液種の拡張を行うためには、標準流量計もしくは仲介用流量計による体積管式校正装置の校正、及び校正装置による流量計の校正といった体積管式校正装置と流量計との間で複数回の校正が実施される。そのため、校正回数分の流量計内温度並びに体積管内温度測定の不確かさが積算され、最終的な校正の不確かさが大きくなることが考えられる。しかしながら、通常の体積管式校正装置による流量計の校正を行う場合とは異なり、体積管式校正装置の校正を行う場合には、試験液温度を十分に安定させるなど特別な条件で校正を実施することにより、校正装置に伴う不確かさを最小化することが可能である。

校正には、不確かさ解析の前提である接続管路内に混入する気体に注意を払うことが求められる。校正開始時と校正終了時において接続管路内の残存気体の体積が変化しない場合、例えば温度、圧力が変化しない場合には、残存気体の影響はないが、液体に比べ温度に対する膨張係数及び圧力に対する圧縮係数が非常に大きいため、十分に注意する必要がある。また、接続管路の分岐管に付属するバルブからの漏れも校正の不確かさに大きな影響を及ぼす。そこで、リークチェック機構を有するバルブの使用やバルブを連結したブロックアンドブリードとすることにより、校正装置には漏れが確認できる仕組みを構築することが必要である。

本報では、代表的な参考値を用いて校正の不確かさを評価した。一般に、不確かさを小さくするためには、校正作業が複雑になるとともに、厳しい維持管理が求められるが、それぞれの校正事業者が保有する体積管式校正装置および流量計を用いて校正を実施する条件にあわせて、校正の不確かさを評価し、目標とする校正の不確かさを達成するための適切な計量管理を実施されることが期待される。

## 6. 結語

標準流量計で校正された体積管式流量計校正装置において被試験流量計の校正に伴う不確かさの推定を行い、参考値を用いてそれぞれの不確かさ要因を検討した。その結果、不確かさの主な要因は、試験液密度及び体積管計測区間の体積であり、特に、試験液の温度測定が校正の不確かさに大きく影響を及ぼすことがわかった。

文献

- 1) American Petroleum Institute: Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 4 - Proving Systems Section 2 - Pipe Provers (Provers Accumulating at Least 10,000 Pulses), 2nd edition, (2001)
- 2) American Petroleum Institute: Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 12 - Calculation of Petroleum Quantities Section 2 - Calculation of Petroleum Quantities Using Dynamic Measurement Methods and Volumetric Correction Factors Part 4 - Calculation of Base Prover Volumes by the Waterdraw Method, 1st edition, (1997)
- 3) American Petroleum Institute: Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 12 - Calculation of Petroleum Quantities Section 2 - Calculation of Petroleum Quantities Using Dynamic Measurement Methods and Volumetric Correction Factors Part 5 - Calculation of Base Prover Volumes by Master Meter Method, 1st edition, (2001)
- 4) 今井秀孝: 計測における不確かさの表現ガイド, 財団法人 日本規格協会, (1996)
- 5) American Petroleum Institute: Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 7 - Temperature Determination Section 2 - Dynamic Temperature determination 2nd edition, (1995)
- 6) Brown, K.K., et al.: Evaluation of Correlated Bias Approximation in Experimental Uncertainty Analysis, AIAA Journal, 34-5 (1996) 1013-1018.
- 7) Coleman, H.W. and Steele, W.G.: Experimentation and Uncertainty analysis for Engineers, John Wiley & Sons (1999).
- 8) JIS K 2249 - 1995 原油及び石油製品 - 密度試験方法及び密度・質量・容量換算表, 日本規格協会編 (1995)
- 9) ISO 9770 - 1989 Crude petroleum and petroleum products - Compressibility factors for hydrocarbons in the range 638 kg/m<sup>3</sup> to 1 074 kg/m<sup>3</sup> (1989)
- 10) 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9版), JCT20830-09 (2011)

