

# 液体大流量計校正設備（50t 秤量計）の測定値の処理法および不確かさ解析について

第1版 第4刷

1999年9月28日

計量研究所 力学部流体計測研究室

寺尾吉哉

# 第1章 はじめに

## 1. 本書について

本書では工業技術院計量研究所の所有する液体大流量計校正設備（工業技術院筑波第2研究センター 流体輸送実験施設）において流量計を校正する場合の測定値の処理法および不確かさ解析について述べる。第2章で計測データから最終結果（Kファクタ，レイノルズ数，渦流量計のストローハル数，流量計の器差）を算出する方法を述べ，第3章で最終結果の内最も重要な K ファクタの不確かさを求める。さらに第4章では，秤量計および温度計を個別に校正した結果とその不確かさ，ならびにダイバータの切り換えによる不確かさについて実験的な解析を行った結果を述べる

本書における不確かさの解析と表示は ISO 国際文書，計測における不確かさの表現ガイド（文献(1-1)，以降は GUM と略記）に従っている。

本書の内容は，今後の研究の進展や不確かさの見直しに伴い改訂されることがある。

## 2. 改版履歴

1998年8月3日 第1版

1998年11月19日 第1版 第2刷

- ・第2章2項(p.2)，第4章1.3項(p.18)，第4章2項(p.19)：誤記修正
- ・第2章6.2項：器差算出式訂正

1999年7月15日 第1版 第3刷

- ・第3章2項(p.6)，第3章2.3項(p.9)，第3章2.5項(p.10)，第3章3項(p.11)，表3.1(p.12)，第4章1.1項(p.13)，第4章1.3項(p.18)：誤記修正
- ・図4-3-1追加。これに伴い図4-3-1～図4-3-2の図番修正。

1999年9月28日 第1版 第4刷

- ・表4-1-1 修正

## 第2章 測定値の計算方法

### 1. はじめに

本章では計測データから最終結果（K ファクタ，レイノルズ数，渦流量計のストローク数，流量計の器差）を算出する方法を述べる．本設備の計測装置の概要を図 2-1 に示す．図中の記号は 3.1 節で定義されている．

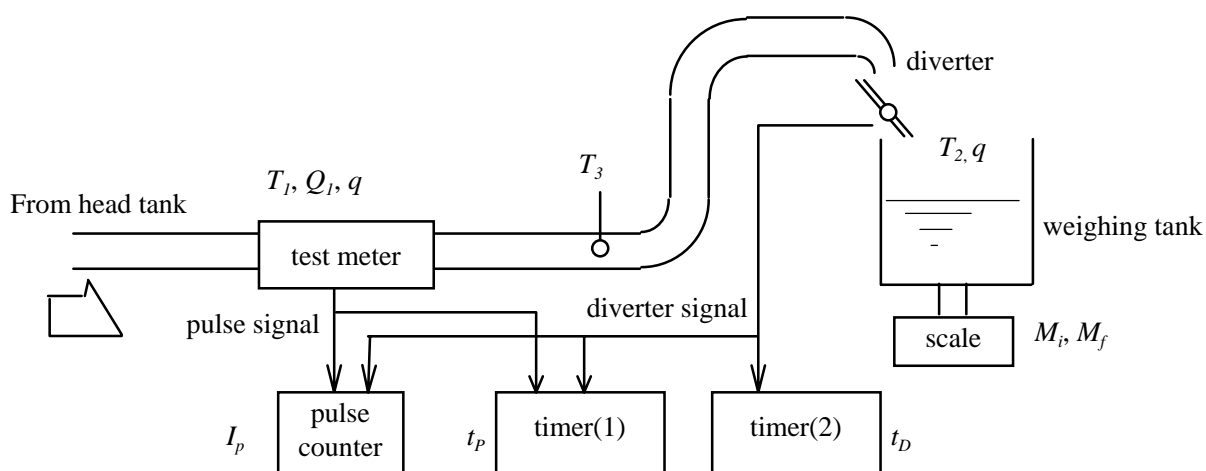


図 2-1 計測装置の概要

### 2. 校正の前提

校正にあたり下記のことを前提とする．

- A. 被校正流量計はパルス出力に限る．
- B. 本校正設備には 50 t 秤量タンク，5 t 秤量タンク，10 m<sup>3</sup> 体積タンクの 3 種の基準タンクが装備されているが，本書では 50 t 秤量タンクによる校正に限る．
- C. 計測開始時の秤量タンク内の水の質量は約 2,000 kg であり，計測終了時の秤量タンク内の水の質量は 40,000 kg ~ 50,000 kg である．

また，本書では被校正流量計に流入する流れの状態が流量計指示値に与える影響については考慮しない．

### 3. K ファクタの算出

#### 3.1 記号

$I_p$ : 時間  $t_p$  にパルスカウンタにより積算された被校正流量計のパルス数．

$K_f$ :	被校正流量計のKファクタ .	(pulse/L)
$k_{si}, k_{sf}$ :	校正によって求められる秤量計の補正係数で, $M_i$ と $M_f$ にそれぞれ対応する値 .	(無次元)
$M_i, M_f$ :	計測開始前と計測終了後の秤量計指示値 .	(kg)
$Q_1$ :	被校正流量計での体積流量 .	(m <sup>3</sup> /s)
$q$ :	管路の質量流量 .	(kg/s)
$T_1, T_2, T_3$ :	それぞれ, 被校正流量計内, 秤量タンク内および計測管内温度計設置位置での水の温度 . また, 添字 $m$ または $c$ が付されているときは, それぞれ各温度計の指示値と補正值を示す .	(°C)
$\Delta T$ :	被校正流量計内と計測管内温度計設置位置での水温の差 .	(°C)
$t_D$ :	一回の計測での秤量タンクへの流入時間 .	(s)
$t_p$ :	計測開始時のダイバータ切換え信号直後の流量計パルスの立ち上がりから計測終了時のダイバータ切換え信号直後の流量計パルスの立ち上がりまでの時間間隔 .	(s)
$\rho_{air}$ :	秤量タンク周囲の空気の密度 .	(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_c$ :	純水の密度と校正設備で使用されている水の密度の差 .	(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{pw}(T)$ :	温度 $T$ での純水の密度 .	(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_w(T)$ :	校正設備で使用されている水の温度 $T$ での密度 .	(kg/m <sup>3</sup> )

### 3.2 水の密度

$$\rho_w(T) = \rho_{pw}(T) - \rho_c \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

$$\rho_{pw}(T) = (999.83952 + 16.945176T - 7.9870401 \times 10^{-3}T^2 - 46.170461 \times 10^{-6}T^3 + 105.56302 \times 10^{-9}T^4 - 280.54253 \times 10^{-12}T^5) / (1 + 16.87985 \times 10^{-3}T) \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

文献(2-1)による .

$$\rho_c = -0.15 \text{ kg / m}^3 \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

熱物性部物性計測研究室における1997年9月の測定による .

### 3.3 空気の密度

$$\rho_{air} = 1.21 \text{ kg / m}^3 \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

定数とする .

### 3.4 質量流量

$$q = \frac{(k_{sf} M_f - k_{si} M_i)}{(1 - \rho_{air} / \rho_w(T_2)) t_D} \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

$$T_2 = T_{2m} - T_{2c} \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

### 3.5 被校正流量計での体積流量

$$Q_1 = q / \rho_w(T_1) \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

$$\begin{aligned} T_1 &= T_3 - \Delta T \\ T_3 &= T_{3m} - T_{3c} \end{aligned} \dots\dots\dots(2.8)$$

$T_1$ を測定するための温度計が設置されていないので、 $T_3$ の測定値から $T_1$ を求める。第3章で述べるとおり、 $T_3$ と $T_1$ の差 $\Delta T$ は0と見なせるが、不確かさの要因となる。

### 3.6 被校正流量計のパルス周波数

$$f_p = \frac{I_p}{t_p} \dots\dots\dots(2.9)$$

### 3.7 被校正流量計のKファクタ

$$K_f = \frac{f_p}{1000Q_1} \dots\dots\dots(2.10)$$

## 4. レイノルズ数の算出

### 4.1 記号

$D$ :	管内径 .	(m)
$\mu$ :	水の粘度 .	(Pa•s)
$U$ :	断面平均流速 .	(m/s)
$Re_D$ :	管レイノルズ数 .	

### 4.2 算出式

$$\mu = 1.002 \times 10^{-3} \times 10^{\frac{20-T_1}{T_1+96} [1.2364 - 1.37 \times 10^{-3} (20-T_1) + 5.7 \times 10^{-6} (20-T_1)^2]} \dots\dots\dots(2.11)$$

文献(2-2)より導出される。

$$U = \frac{4Q}{\pi D^2} \dots\dots\dots(2.12)$$

$$Re_D = \frac{\rho_w(T_1)UD}{\mu} \dots\dots\dots(2.13)$$

## 5. 被校正流量計が渦流量計の場合のストローハル数の算出

## 5.1 記号

$St$ : ストローハル数 .  
 $w$ : 渦発生体の幅 . (m)

## 5.2 算出式

$$St = \frac{f_p \cdot w}{U} \dots\dots\dots(2.14)$$

## 6. 器差 (基準器検査用)

## 6.1 記号

$K_{fn}$ : メーカーの値付けによる被校正流量計のKファクタ . (pulse/L)  
 $E$ : 器差 .

## 6.2 算出式

$$E = \frac{\frac{f_p}{1000K_{fn}} - Q_1}{Q_1} \dots\dots\dots(2.15)$$

### 第3章 不確かさ解析

#### 1. はじめに

ここでは、第2章で求められた被校正流量計のKファクタの不確かさの解析を行う。  
Kファクタの相対合成標準不確かさは下式で表される。

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{u_c(K_f)}{K_f}\right)^2 &= \sum_i \left(\frac{\partial K_f}{\partial x_i}\right)^2 \left(\frac{u(x_i)}{K_f}\right)^2 \\
 &= \left(\frac{\partial K_f}{\partial f_p}\right)^2 \left(\frac{u(f_p)}{K_f}\right)^2 + \left(\frac{\partial K_f}{\partial Q_1}\right)^2 \left(\frac{u(Q_1)}{K_f}\right)^2 \\
 &= \left(\frac{\partial K_f}{\partial I_p}\right)^2 \left(\frac{u(I_p)}{K_f}\right)^2 + \left(\frac{\partial K_f}{\partial t_p}\right)^2 \left(\frac{u(t_p)}{K_f}\right)^2 + \left(\frac{\partial K_f}{\partial q}\right)^2 \left(\frac{u(q)}{K_f}\right)^2 \\
 &\quad + \left(\frac{\partial K_f}{\partial \rho_w(T_1)}\right)^2 \left(\frac{u(\rho_w(T_1))}{K_f}\right)^2 \\
 &= \underbrace{\left(\frac{u(I_p)}{I_p}\right)^2}_{(a)} + \underbrace{\left(\frac{u(t_p)}{t_p}\right)^2}_{(b)} + \underbrace{\left(\frac{u(q)}{q}\right)^2}_{(c)} + \underbrace{\left(\frac{u(\rho_w(T_3 - \Delta T))}{\rho_w(T_3 - \Delta T)}\right)^2}_{(c)} \\
 &\dots\dots\dots(3.1)
 \end{aligned}$$

さらに、

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{u(q)}{q}\right)^2 &= \underbrace{\left(\frac{u(k_{sf} M_f - k_{si} M_i)}{k_{sf} M_f - k_{si} M_i}\right)^2}_{(d)} + \underbrace{\left(\frac{u(1 - \rho_{air} / \rho_w(T_2))}{1 - \rho_{air} / \rho_w(T_2)}\right)^2}_{(e)} + \underbrace{\left(\frac{u(t_D)}{t_D}\right)^2}_{(f)} \\
 &\dots\dots\dots(3.2)
 \end{aligned}$$

また、装置の仕様などから、以下の条件が成立していると考えられるので、これらに関する不確かさは無視する。

- 計測中の流量は一定である。
- 秤量タンク内の水の温度は均一。
- 被校正流量計とダイバータとの間の管路からは漏れがない。

#### 2. 各項の標準不確かさの評価

## 2.1 被校正流量計のパルスの計数 (a)

インターバルアナライザを使用して計測されたパルスの周期を監視し、ノイズによる過計数や信号の減衰によるパルスの欠落を防止することを前提に  $u(I_p) = 0$  とする。

## 2.2 被校正流量計のパルスの計数時間 (b)

$t_p$  を測定する計時装置の仕様書には「水晶発振器精度  $10^{-5}$ 」と記されている。この値を三角形分布の誤差の限界値と仮定すると GUM 4.3.9 (9b)式より、相対標準不確かさは、

$$\frac{u(t_p)}{t_p} = \frac{10^{-5}}{\sqrt{6}} = 4.1 \times 10^{-6} \quad \dots\dots\dots(3.3)$$

となる。

## 2.3 被校正流量計内の水の密度 (c)

不確かさの評価のために(2.1)式を下記のように書き換える。

$$\rho_w(T) = \rho_{pw}(T) - \rho_{pwc} - \rho_c \quad \dots\dots\dots(2.1b)$$

ここで、 $\rho_{pwc}$  は関数 $\rho_{pw}(T)$ の補正值であり、値は零であるが $\rho_{pw}(T)$ が近似式であるために不確かさを持つ。これより、 $\rho_w(T)$ の不確かさは下式で表される。

$$\begin{aligned} u(\rho_w(T)) &= \sqrt{u(\rho_{pw}(T))^2 + u(\rho_{pwc})^2 + u(\rho_c)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_{pw}(T)}{\partial T} u(T)\right)^2 + u(\rho_{pwc})^2 + u(\rho_c)^2} \quad \dots\dots\dots(3.4) \end{aligned}$$

$\rho_{pwc}$  の標準不確かさは文献(2-1)より  $0.01 \text{ kg/m}^3$  と見積もられる。また、 $\rho_c$  の標準不確かさは計測器の仕様より、 $0.02 \text{ kg/m}^3$  である。また、関数 $\rho_{pw}(T)$ は図 3-1 に示すように線形ではなく、 $u(T)$ の感度係数 $\frac{\partial \rho_{pw}(T)}{\partial T}$ も  $T$ の関数である。

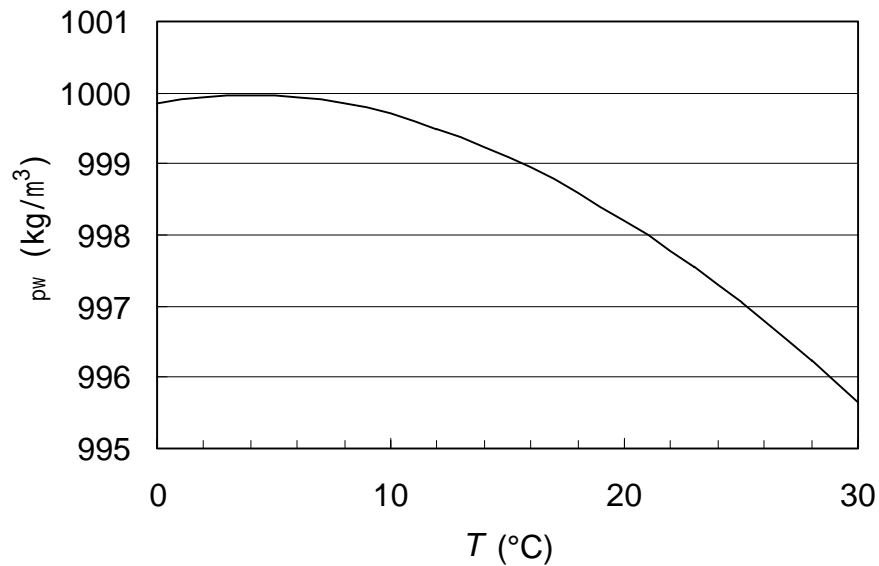


図 3-1 純水の密度と水温

しかし，表 3-1 からわかるように，最終的に求められる K ファクタの不確かさに対する  $\rho_w$  の不確かさの寄与は小さいので，ここでは簡略化のために，設備内の水温が通常変化する範囲（5～30 °C）で感度係数の絶対値が最大になる 30 °C での値  $-0.30 \text{ kg/m}^3\text{ }^\circ\text{C}$  を代表値として用いることとする．以上の値を(3.4)式に代入して，

$$\begin{aligned} u(\rho_w(T)) &= \sqrt{0.01^2 + (0.30u(T))^2 + 0.02^2} \\ &= \sqrt{0.090u(T)^2 + 5.0 \times 10^{-4}} \quad (\text{kg/m}^3) \end{aligned} \quad \text{.....(3.5)}$$

が得られる．

また，第 4 章の式(4.9)より， $T_3$  の標準不確かさは

$$u(T_3) = 0.04 \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{.....(3.6)}$$

である．

さらに，水が被校正流量計から計測管内温度計設置位置まで流れる間の温度変化は，最大でも 0.01 °C と見込まれるので，

$$u(\Delta T) \leq 0.01 \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{.....(3.7)}$$

したがって，

$$u(T_1) = \sqrt{u(T_3)^2 + u(\Delta T)^2} = \sqrt{0.04^2 + 0.01^2} = 0.04 \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{.....(3.8)}$$

この値を式(3.5)に代入して，

$$u(\rho_w(T_1)) = \sqrt{0.090 \times 0.04^2 + 5.0 \times 10^{-4}} = 0.025 \quad (\text{kg} / \text{m}^3) \dots\dots\dots(3.9)$$

$\rho_w \cong 1000 \text{ kg/m}^3$  であるから ,

$$\frac{u(\rho_w(T_1))}{\rho_w(T_1)} = 2.5 \times 10^{-5} \dots\dots\dots(3.10)$$

## 2.4 秤量タンク内に導入されたの水の質量 (d)

さらに不確かさを解析するために ,  $k_{sf} M_f - k_{si} M_i = M_D$  において ,

$$\begin{aligned} u(k_{sf} M_f - k_{si} M_i)^2 &= \left( \frac{\partial M_D}{\partial k_{sf}} u(k_{sf}) \right)^2 + \left( \frac{\partial M_D}{\partial M_f} u(M_f) \right)^2 + \left( \frac{\partial M_D}{\partial k_{si}} u(k_{si}) \right)^2 + \left( \frac{\partial M_D}{\partial M_i} u(M_i) \right)^2 \\ &= \left( M_f u(k_{sf}) \right)^2 + \left( k_{sf} u(M_f) \right)^2 + \left( M_i u(k_{si}) \right)^2 + \left( k_{si} u(M_i) \right)^2 \\ &\dots\dots\dots(3.11) \end{aligned}$$

$u(M_i)$  および  $u(M_f)$  は秤量計の分解能に起因する誤差である . 分解能は 5 kg であるから , これに起因する読みとり誤差は ,  $\pm 2.5 \text{ kg}$  の区間に均等な確率で分布する . したがって , GUM 4.3.7 式(7)より標準不確かさは , 下式で求められる .

$$u(M_i) = u(M_f) = \frac{2.5}{\sqrt{3}} = 1.4 \quad (\text{kg}) \dots\dots\dots(3.12)$$

また , 第 4 章に述べるように , 秤量計の校正より ,

$$k_{sf} \cong k_{si} \cong 1, \quad u(k_{sf}) = 1.2 \times 10^{-4}, \quad u(k_{si}) = 5.3 \times 10^{-4} \dots\dots\dots(3.13)$$

したがって ,

$$\begin{aligned} u(k_{sf} M_f - k_{si} M_i) &= \sqrt{(50000 \times 1.2 \times 10^{-4})^2 + (1 \times 1.4)^2 + (2000 \times 5.3 \times 10^{-4})^2 + (1 \times 1.4)^2} \\ &= 6.4 \quad (\text{kg}) \\ &\dots\dots\dots(3.14) \end{aligned}$$

$M_f - M_i \cong 50000 \text{ kg}$  であるから相対標準不確かさは ,

$$\frac{u(k_{sf} M_f - k_{si} M_i)}{k_{sf} M_f - k_{si} M_i} = \frac{6.4}{50000} = 1.3 \times 10^{-4} \dots\dots\dots(3.15)$$

となる .

## 2.5 浮力補正 (e)

$$\begin{aligned}
 u(1 - \rho_{air} / \rho_w(T_2)) &= \sqrt{\left(\frac{\partial(1 - \rho_{air} / \rho_w(T_2))}{\partial \rho_{air}} u(\rho_{air})\right)^2 + \left(\frac{\partial(1 - \rho_{air} / \rho_w(T_2))}{\partial \rho_w(T_2)} u(\rho_w(T_2))\right)^2} \\
 &= \sqrt{\left(\frac{u(\rho_{air})}{\rho_w(T_2)}\right)^2 + \left(\frac{\rho_{air}}{\rho_w^2(T_2)} u(\rho_w(T_2))\right)^2} \\
 &\dots\dots\dots(3.16)
 \end{aligned}$$

$\rho_{air}$  を定数(1.21kg/m<sup>3</sup>)としたが、実際の測定環境(大気圧 96~106kPa, 気温 5~30 )では、 $\rho_{air}$  は 1.10~1.33 kg/m<sup>3</sup> の範囲で変化する。したがって、 $\rho_{air}$  には定数 1.21 kg/m<sup>3</sup> に対して最大 0.12 kg/m<sup>3</sup> の誤差が発生する。この誤差の分布を一様分布と仮定すると GUM 4.3.7 式(7)より、

$$u(\rho_{air}) = \frac{0.12}{\sqrt{3}} = 0.07 \text{ kg/m}^3 \dots\dots\dots(3.17)$$

である。

また、第 4 章より  $T_2$  は  $T_3$  と同じ標準不確かさを持つので、これを(3.5)式に代入して、 $u(\rho_w(T_2)) = 0.025 \text{ kg/m}^3$  となる。さらに、 $1 + \rho_{air} / \rho_w(T_2) \cong 1$  だから、式(3.17)より、

$$\begin{aligned}
 \frac{u(1 + \rho_{air} / \rho_w(T_2))}{1 + \rho_{air} / \rho_w(T_2)} &\cong u(1 + \rho_{air} / \rho_w(T_2)) \\
 &= \sqrt{\left(\frac{0.07}{1000}\right)^2 + \left(\frac{1.21}{1000^2} \cdot 0.025\right)^2} = 7 \times 10^{-5} \\
 &\dots\dots\dots(3.18)
 \end{aligned}$$

## 2.6 秤量タンクへの流入時間 (f)

秤量タンクへの流入時間の不確かさを解析するために  $t_D$  を以下のように分割する。

$$t_D = t_{Dm} + t_{Dc} \dots\dots\dots(3.19)$$

ここで  $t_{Dm}$  は計測開始時のダイバータ切換え信号パルスの立ち上がりから計測終了時のダイバータ切換え信号パルスの立ち上がりまでの時間間隔であり、図 1-1 のタイマ (2)によって測定される。また、 $t_{Dc}$  は第 4 章で述べるダイバータの切り換え動作に伴う時間測定の誤差に対する補正である。

$t_{Dm}$  を測定する計時装置の仕様書には「120s を測定したときの積算誤差が 120s の  $\pm 1/5000$  以内」と記されている。したがって、式(3.3)と同様に、

$$\frac{u(t_{Dm})}{t_{Dm}} = \frac{1}{5000\sqrt{6}} = 8.2 \times 10^{-5} \quad \dots\dots\dots(3.20)$$

となる。

また、第4章に述べるように  $t_{Dc}$  の値は零で、 $t_D$  に対する相対標準不確かさは  $2.3 \times 10^{-5}$  なので、上式と併せて、

$$\begin{aligned} \frac{u(t_D)}{t_D} &= \sqrt{\left(\frac{u(t_{Dm})}{t_D}\right)^2 + \left(\frac{u(t_{Dc})}{t_D}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{u(t_{Dm})}{t_{Dm}}\right)^2 + \left(\frac{u(t_{Dc})}{t_D}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (3.21) \\ &= \sqrt{(8.2 \times 10^{-5})^2 + (2.3 \times 10^{-5})^2} = 8.5 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

となる。

### 3. 合成標準不確かさと拡張不確かさ

以上により求めた標準不確かさを(3.1)式と(3.2)式に代入して、合成標準不確かさを求めると、

$$\begin{aligned} \frac{u_c(K_f)}{K_f} &= \sqrt{(4.1 \times 10^{-6})^2 + (2.5 \times 10^{-5})^2 + (1.3 \times 10^{-4})^2 + (7 \times 10^{-5})^2 + (8.5 \times 10^{-5})^2} \\ &= 1.7 \times 10^{-4} \quad \dots\dots\dots(3.22) \end{aligned}$$

となる。

包含係数を  $k=2$  とすると、拡張不確かさは下式で与えられる。

$$\frac{U(K_f)}{K_f} = k \frac{u_c(K_f)}{K_f} = 3.4 \times 10^{-4} = 0.034\% \quad \dots\dots\dots(3.23)$$

### 4. まとめ

上記の不確かさの要因をまとめて表 3.1 に示す。最大の要因は秤量タンク内の水の質量の不確かさであるが、これを改善するには、第3章 1.4 節で述べられているように

秤量計の校正をさらに繰り返し行うか、秤量計の校正方法の改善が必要である。また、第3章 1.4 節で述べられているように、秤量計の経年変化に不明の点があるので、今後の見直しによりこの不確かさが増大する可能性もある。

第2 に大きな要因である秤量タンクの流入時間の不確かさは、計時装置の更新により容易に改善できる。第3 の要因である浮力補正の不確かさは、秤量タンク周囲の気温と大気圧を測定して空気密度を求めるように計装を増設することにより、大幅に改善できる。

**表 3.1 Kファクタの不確かさの主な要因と標準不確かさ，ならびに合成標準不確かさと拡張不確かさ**

不確かさの要因	標準不確かさ
被校正流量計のパルスの計数時間	0.0004%
被校正流量計内の水の密度	0.0025%
秤量タンク内の水の質量	0.0130%
浮力補正	0.0070%
秤量タンクへの流入時間	0.0085%
合成標準不確かさ	0.017%
拡張不確かさ(k = 2)	0.034%

## 第4章 秤量計と温度計の校正とその不確かさおよびダイバータの切り換えによる不確かさ

### 1. 秤量計の校正

#### 1.1 校正法

秤量計（容量 50,000 kg）の校正は、図 4-1-1 に示すように、力学部力学標準研究室の実荷重式力標準器（容量 540 kN（55 tf））を基準とし、ロードセル（容量 500 kN）をトランスファー標準器として用いた。

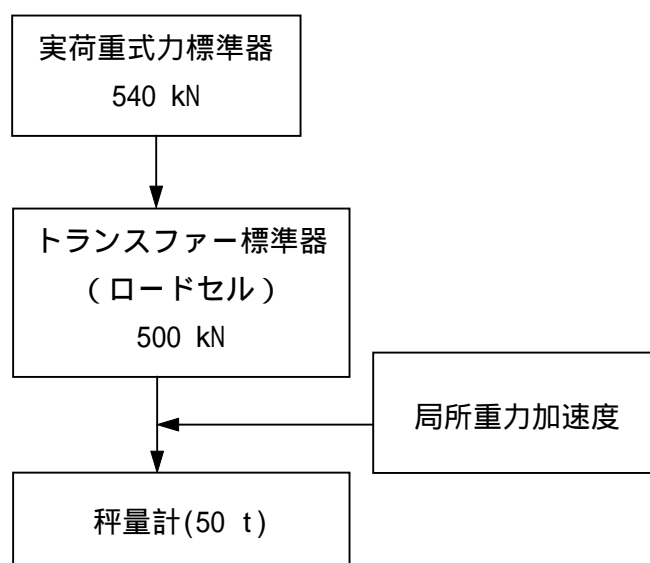


図 4-1-1 秤量計の校正方法

実荷重式力標準器によるトランスファー標準器の校正は、1997年5月に行われた。力標準器に取り付けたトランスファー標準器を初期の状態から軸周りに90度ずつ回転させ、最後に初期の状態に戻して計5通りの取り付け状態での校正が行われた。また、各取り付け状態では2回の測定が行われた。それぞれの測定の手順は標準的な方法に従っている。まず無荷重状態でのトランスファー標準器の指示値を記録した後、49 kNから490 kNまで順次10点の標準荷重をかけ、トランスファー標準器の指示値が記録された。この後、490 kNから49 kNへ順次荷重を減少させたときの指示値も記録された。一般にロードセルは荷重状態に対してヒステリシスを持つので、このように荷重を加える方向と減ずる方向で試験が行われるが、本報告で対象とする秤量タンク内の水の質量の測定では、荷重が増加する方向のみで測定が行われるので、ここでは、荷重が増加する場合の結果についてのみ取り扱う。したがって、あるひとつの荷重での

測定回数  $N_f$  は 10 回である。

トランスファー標準器による秤量計の校正は、1997 年 3 月 14 日、9 月 26 日、10 月 13 日および 10 月 21 日に行われた。トランスファー標準器は秤量タンク下部に張り出した取り付け台に置かれた。取り付け台とタンクの間には取り付け台をまたぐように建物基部に固定された梁があり、秤量タンクが空の状態でのこのトランスファー標準器を手動式のジャッキにより梁に押しつけることにより、模擬的な荷重を発生する。各回の校正でのトランスファー標準器の取り付け状態は 1 通りであるが、日によって、標準状態とこれに対して軸まわりに 90 度回転した状態の 2 通りの状態で取り付けられている。各日での測定は 1 回ずつなので、あるひとつの荷重での測定回数  $N_2$  は 4 回である。試験荷重は上述と同じ 49kN から 490kN までの 10 点で、荷重を順次増加させながら測定を行った。

## 1.2 校正結果

実荷重式力標準器によるトランスファー標準器の校正の結果、トランスファー標準器の補正係数( $k_L$ )が 10 回の測定の平均値として求められた。

$$k_L = F_L / F_D \quad \dots\dots\dots(4.1)$$

ここで、 $F_L$ : ロードセル指示値 (零点補正後の値) (N)  
 $F_D$ : 力標準器指示値 (N)。

この結果を図 4-1-2 に示す。図には後述の 1994 年の結果も併せて示されている。 $k_L$  は試験荷重  $F_D$  の関数で、1.0008 から 1.0011 の間に分布している。また、 $N_f = 10$  回の測定に対する標準偏差( $\sigma_f$ )は、最小荷重の  $F_D = 49$  kN では 0.019%、 $M_f$  の測定範囲 (40,000 kg から 50,000 kg)に対応する  $F_D$  の範囲すなわち 390 ~ 490 kN の範囲では 0.0019%以下であった。

一方、トランスファー標準器による秤量計の校正の結果、秤量計の補正係数( $k_S$ )が以下のように求められた。

$$k_S = \frac{F_L}{k_L \cdot g_\lambda \cdot M} \quad \dots\dots\dots(4.2)$$

ここで、 $g_\lambda$ : 局所重力加速度 (9.79942 m/s<sup>2</sup>)  
 $M$ : 秤量計指示値 (kg)

局所重力加速度は、校正設備の位置 (北緯 36 度 10 分 18 秒、東経 140 度 01 分 20 秒)と標高 (32.5 m)に基づき、国土地理院がインターネットを通じて公開している重力加速度の計算プログラム(<http://vldb.gsi-mc.go.jp/sokuchi/gravity/calcframe.html>)により求

めた。

校正の結果，4回の測定値の平均値として求められた  $k_S$  とその標準偏差を図 4-1-3 に示す．図には後述の 1994 年の結果も併せて示されている． $k_S$  は  $M$  の関数であることがわかる．

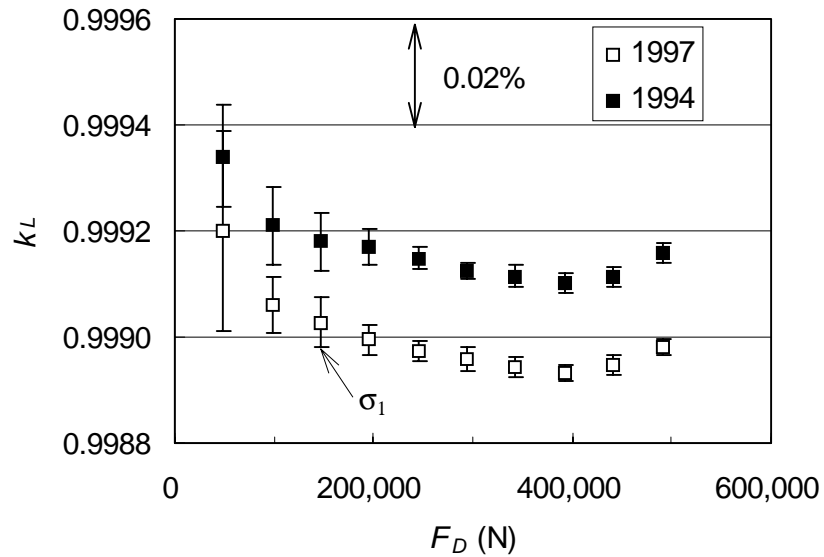


図 4-1-2 トランスファー標準器として用いたロードセルの校正結果

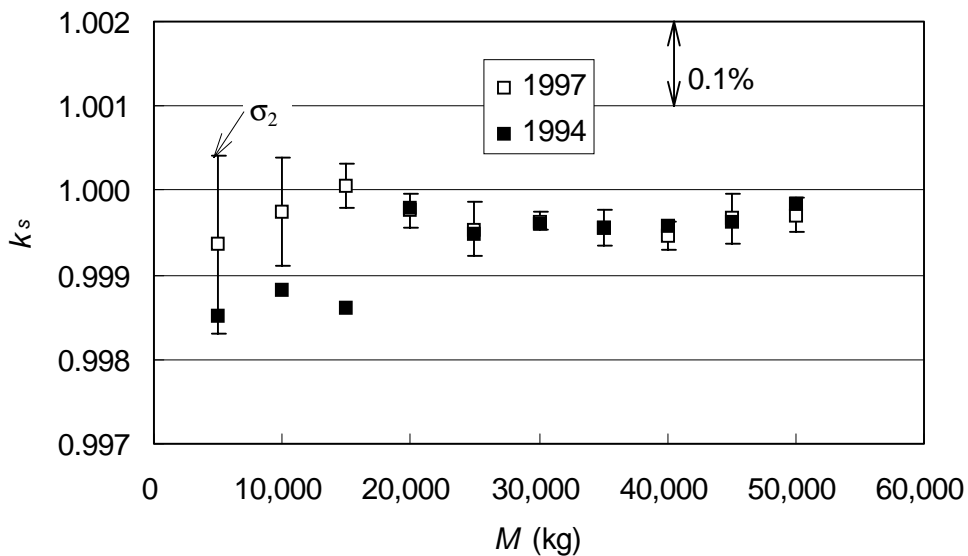


図 4-1-3 秤量計の校正結果

### 1.3 校正係数とその不確かさ

(4.1)式より,  $k_L$ の相対標準不確かさは以下のとおり書ける.

$$\left(\frac{u(k_L)}{k_L}\right)^2 = \left(\frac{u(F_L)}{F_L}\right)^2 + \left(\frac{u(F_D)}{F_D}\right)^2 \dots\dots\dots(4.3)$$

実荷重力標準器の公称精度は 0.002%とされているので, 標準不確かさ  $u(F_D)$ はこの 1/2 の 0.001%と見積もられる. また, この校正は温度の安定した室内で 1 日の内に行われたので,  $N_I = 10$  回の測定に対する標準偏差( $\sigma_I$ )は, 実荷重力標準器の短期的な再現性とトランスファー標準器の短期的な再現性, およびトランスファー標準器を実荷重力標準器に取り付ける際の取り付け状態の差異によりもたらされたものと考えられる. しかし, ここでは簡単のために全てトランスファー標準器の指示値の再現性によるばらつきとして考える.  $k_L$ は  $N_I = 10$  回の平均値として与えられるので, GUM 4.2.4 により, その標準不確かさ  $u(F_D)$ は  $\sigma_I / \sqrt{N_I}$  である. したがって,

$$\left(\frac{u(k_L)}{k_L}\right)^2 = (1 \times 10^{-5})^2 + \frac{\sigma_I^2}{10} \dots\dots\dots(4.4)$$

となる.

一方,  $u(k_S)$ は

$$\left(\frac{u(k_S)}{k_S}\right)^2 = \left(\frac{u(F_L)}{F_L}\right)^2 + \left(\frac{u(k_L)}{k_L}\right)^2 + \left(\frac{u(g_\lambda)}{g_\lambda}\right)^2 + \left(\frac{u(M)}{M}\right)^2 \dots\dots\dots(4.5)$$

により表される。

重力加速度の算出プログラムの表示では「 $g_l$ の精度は  $0.0003 \text{ m/s}^2$ 」となっているので、標準不確かさ  $u(g_l)$ はその  $1/2$  とすると、

$$\left(\frac{u(g_\lambda)}{g_\lambda}\right)^2 = \frac{0.0003}{2} \times \frac{1}{9.799} = 1.5 \times 10^{-5} \dots\dots\dots(4.6)$$

と見積もられる。

また、 $u(F_L)$ と $u(M)$ は  $N_2 = 4$  回の測定結果のばらつき（標準偏差 $\sigma_2$ ）に対応すると考えられるが、この校正は前述のように 7 ヶ月の内の 4 日間に行われ、それぞれの日には 1 回のみ測定が行われたので、4 回の測定結果のばらつきの要因には以下の事項が考えられる。

- A. トランスファー標準器の（1日を超える周期のドリフトに対応する）長期的な再現性
- B. トランスファー標準器の（1日の内のドリフトに対応する）短期的な再現性
- C. 秤量計の長期的な再現性
- D. 秤量計の短期的な再現性
- E. トランスファー標準器を秤量計に取り付ける際の取り付け状態の影響
- F. 温度などの測定環境に対するトランスファー標準器や秤量計の特性の依存性

これらのうち、B は前述の $\sigma_1$ に含まれるが、 $\sigma_1$ は $\sigma_2$ に比べて十分小さいので、この要因は無視できる。また、後述のように  $k_S$  の経年変化が無視できる値であることから、A, C, F がばらつきの要因となっている可能性も小さい。したがって、標準偏差( $\sigma_2$ )で表されるばらつきは、D および E により引き起こされていると思われる。これらの要因に対しては、多数回の校正を行うことにより、その不確かさを低減できると考えられるので、 $N_2 = 4$  を用いて、

$$\left(\frac{u(F_L)}{F_L}\right)^2 + \left(\frac{u(M)}{M}\right)^2 = \frac{\sigma_1^2}{N_2} = \frac{\sigma_1^2}{4} \dots\dots\dots(4.7)$$

が得られる。

(4.5)式に(4.4), (4.6), (4.7)式を代入して、 $k_S$ の相対標準不確かさは下式のとおり求め

られる。

$$\frac{u(k_s)}{k_s} = \sqrt{(1 \times 10^{-5})^2 + \frac{\sigma_1^2}{10} + \frac{\sigma_2^2}{4} + (1.5 \times 10^{-5})^2} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{10} + \frac{\sigma_2^2}{4} + (2.5 \times 10^{-5})^2}$$

.....(4.8)

上式により求められる  $k_s$  とその相対標準不確かさについて、 $M_f$  の測定範囲 (40,000 kg から 50,000 kg) での値 ( $k_{sf}$ ) と  $M_i$  の測定範囲 (約 2,000 kg) での値 ( $k_{si}$ ) を表 4-1-1 に示す。ただし、 $M_f = 2,000$  kg 付近での校正は行われていないので、ここでは  $M_f = 5,000$  kg での値を準用することとした。そのために発生する誤差は図 4-1-3 より  $M_f = 5,000$  kg での  $\sigma_2$  に比べて十分小さいと判断できるので、無視する。

$M_f$ (kg)	$k_{sf}$	$\delta_1$ (%)	$\delta_2$ (%)	$u(k_{sf})/k_{sf}$	$u(k_{sf})$
40,000	0.9995	0.0016%	0.016%	0.009%	$0.9 \times 10^{-4}$
45,000	0.9997	0.0019%	0.029%	0.015%	$1.5 \times 10^{-4}$
50,000	0.9997	0.0016%	0.020%	0.011%	$1.1 \times 10^{-4}$
$M_i$ (kg)	$k_{si}$	$\delta_1$ (%)	$\delta_2$ (%)	$u(k_{si})/k_{si}$	$u(k_{si})$
2,000	0.9994	0.019%	0.11%	0.053%	$5.3 \times 10^{-4}$

表 4-1-1 秤量計の校正係数とその不確かさ

$M_f$  の測定範囲 (40,000 kg から 50,000 kg) での  $u(k_{sf})$  は  $0.9 \times 10^{-4}$  から  $1.5 \times 10^{-4}$  の範囲に分布しているが、第 3 章不確かさ解析では平均値  $1.2 \times 10^{-4}$  を代表値として用いることとする。

#### 1.4 経年変化

1994 年にも同様の手順で校正を行った。測定回数は  $N_1 = 10$ ,  $N_2 = 2$  であった。その校正結果は図 4-1-2 および図 4-1-3 に今回の結果に併せて示されている。

トランスファースタンドの補正係数は 3 年間の間に有意に変化しており、秤量計の校正を行う際にはトランスファースタンドの校正も併せて行う必要があることが明らかである。

また、秤量計の補正係数の 2 回の結果の間の差異は、不確かさに比べて有意とはいえないが、測定の繰り返し回数が 1994 年の  $N_2 = 2$ , 1997 年の  $N_2 = 4$  と決して十分な値ではないので、今後もさらに校正を繰り返す必要がある。その際には校正範囲を 2000kg 付近と 4000 ~ 5000kg の範囲に限定し、その代わりに同じ日での数回の繰り返し測定を行い、これを数週間毎あるいは数ヶ月に繰り返すことにより、短期および長期

の再現性を明らかにするべきである。その結果により、ここに見積もられた不確かさよりも大きな値が得られる可能性もある。

さらに、ここでトランスファースタンドとして用いられている種類のロードセルは個体差が大きく、中には数週間以内に 0.01% を大きく超えるドリフトを示すものもあるといわれている。したがって、さらに正確な秤量計の校正と詳細な不確かさ解析を行うためには、複数のロードセルの組み合わせを使ったトランスファースタンドを用いるなどの対策を講じる必要がある。さらには、分銅をトランスファースタンドとする秤量計の校正システムを新規に整備し、頻繁な校正を実施することが望ましい。

## 2. 温度計の校正

秤量タンク内水温 ( $T_2$ ) および計測管内水温 ( $T_3$ ) は、水晶振動子式温度計により測定される。流体計測研究室所有の温度計校正装置 (標準不確かさ  $0.01^\circ\text{C}$ ) により、これらの温度計を校正し、その結果から図 4-2-1 および表 4-2-1 に示す補正值 ( $T_{2c}$ ,  $T_{3c}$ ) を求めた。

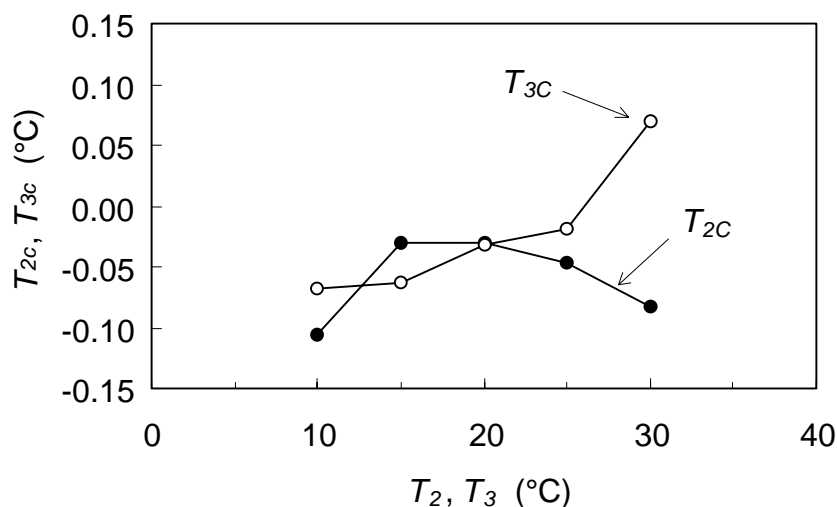


図 4-2-1 温度計校正結果

$T_2, T_3$ (°C)	$T_{2C}$ (°C)	$T_{3C}$ (°C)
10	-0.11	-0.07
15	-0.03	-0.06
20	-0.03	-0.03
25	-0.05	-0.02
30	-0.08	0.07

表 4-2-1 温度計校正結果

この温度計の使用には精度  $0.1^{\circ}\text{C}$  と記されている．校正の結果で補正することにより，これ値よりも小さい不確かさが得られることが期待されるが，経年変化の大きさが不明なため，仕様の精度値をそのまま用いて誤差の分布を三角形分布と仮定すると GUM4.3.9 (9b)式より，標準不確かさは下式により求められる．

$$u(T_2) = u(T_3) = \frac{0.1}{\sqrt{6}} = 0.04 \quad (^\circ\text{C}) \dots\dots\dots (4.9)$$

### 3. ダイバータの切り換えによる不確かさの見積もり

#### 3.1 概要

ダイバータの構造の概略を図 4-3-1 に示す．被校正流量計から秤量棟へ導入された流れは，ノズルにより絞られ，長さ 1400mm，幅 25～150mm の自由噴流となって転流器分岐板に向かって落下する．噴流の幅はノズルの可動式調節羽根により可変であり，流量毎に噴流の流速分布が最も均一になる値に調整される．分岐板はノズルの長軸と平行な軸で支持されており油圧シリンダーにより高速で回転し，流れの向きをタンク

へ流入する状態（タンク側）とタンクを經由せずに直接貯水槽へ還流する状態（放流側）のいずれかに切り換える．分岐板の作動軸には近接スイッチが取り付けられており，分岐板が直立状態になったときにダイバータ切り換え信号が出力される．後に述べるように，このダイバータ切り換え信号の出力時刻と実際に流れが切り換えられたとみなせる時刻との間に差異があることにより，質量流量  $q$  の不確かさの要因となる．前述の2つの時刻の差は流量にほとんど影響されないので，計測時の秤量タンクへの流入時間  $t_D$  が短いほど，すなわち流量が大きいほど， $q$  の不確かさは大きくなる．したがって，ここでは最大流量の  $3000\text{m}^3/\text{s}$  の場合について検討する．

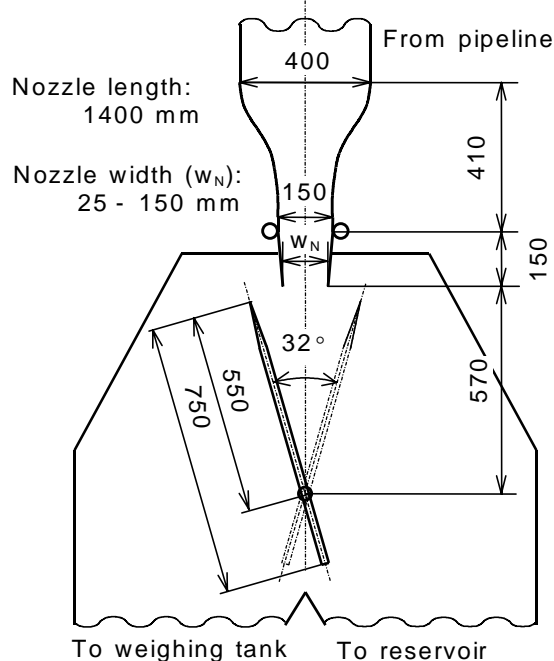


図 4-3-1 ダイバータの構造の概略

### 3.2 不確かさの見積もり

図 4-3-2 にピトー管により測定されたノズル出口直後での噴流の速度分布を示す．縦軸は噴流の断面平均流速により無次元化された流速を示し，長手方向の 14 点で測定された値の平均値である．横軸は噴流幅により無次元化された幅方向の位置を示し， $a/A = 0$  はタンクが設置されている側の噴流端， $a/A = 1$  はその反対の噴流端である．このときの流量は  $3000\text{m}^3/\text{s}$  で，ノズルの幅は 120mm に設定されていた．噴流幅とノズル幅はほぼ等しいとみなせる．

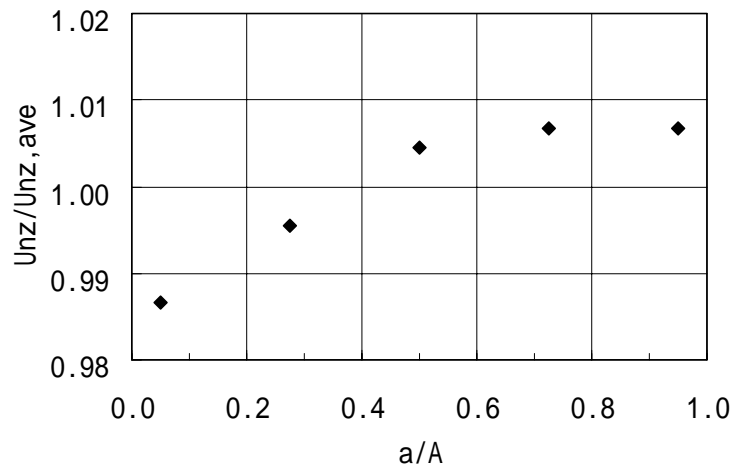


図 4-3-2 ダイバータノズルから放出される噴流の流速分布（ノズル幅方向）

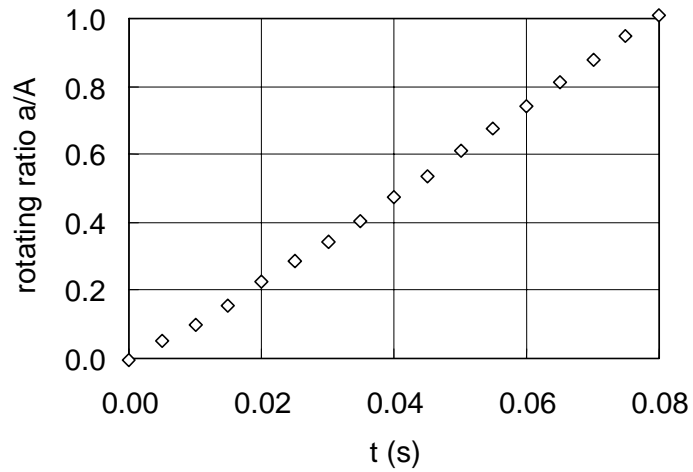


図 4-3-3(a) ダイバータ案内羽根の動作（放流側からタンク側へ）

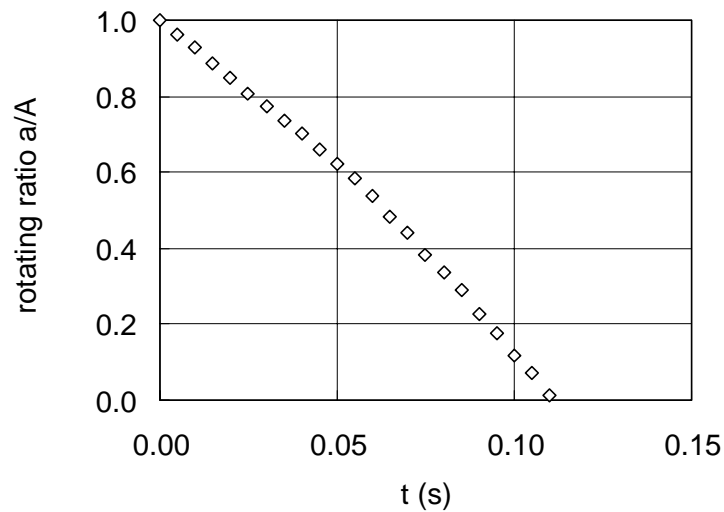


図 4-3-3(b) ダイバータ案内羽根の動作（タンク側から放流側へ）

また，図 4-3-3 は，ストロボスコープを用いた写真により測定した案内羽根が噴流を横切る際の時間経過と案内羽根の先端位置の関係を，計測開始時（放流側からタンク側への切り換え，図 4-3-3(a)）および計測終了時（タンク側から放流側への切り換え，図 4-3-3(b)）である．縦軸は図 4-3-2 の横軸と同じ座標で噴流内部での案内羽根の先端位置を示す．横軸は案内羽根の先端が噴流に接してからの経過時間を示す．このグラフから案内羽根が直立する時刻すなわち  $a/A = 0.5$  となる時刻が求められる．

さらに，これら図 4-3-2 および図 4-3-3 より，切り換え中の各時刻においてタンク側へ流入する流量の全流量に対する比が求められる．これを図 4-3-4 に示す．この曲線を積分することにより切り換え中にタンク側へ流入した体積が求められるが，実際には流量が無次元化されているので，積分値はタンクへの流入体積を全流量で除した時間として得られる．

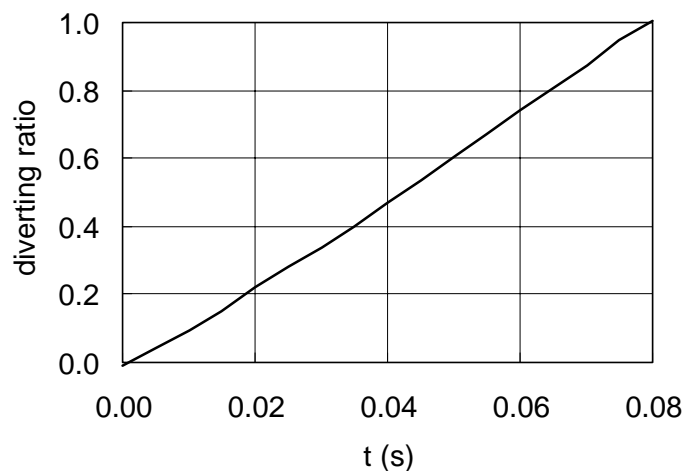


図 4-3-4(a) ダイバータ動作中のタンク側への流量の全流量に対する比  
(放流側からタンク側への動作)

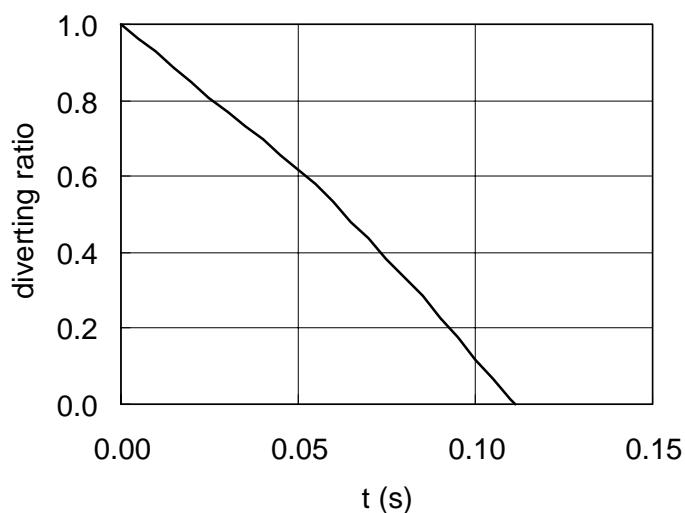


図 4-3-4(b) ダイバータ動作中のタンク側への流量の全流量に対する比  
(タンク側から放流側への動作)

一方、前述のように案内羽根が直立したときにダイバータ切り換え信号が出力されるので、切り換え時間の内、計測時間に算入される値は、計測開始時には図 4-3-3(a)で  $a/A = 0.5$  となった時刻から切り換え終了までの時間、計測終了時には図 4-3-3(b)で切り換え開始から  $a/A = 0.5$  となった時刻までの時間であるので、それぞれの時間と前述の積分時間との差が、計測誤差となる。実測されたこの計測誤差は、計測時間 60s (流量  $3000\text{m}^3/\text{h}$ ) に対し、0.004%であった。この誤差は流量によって変化し、無視できる小さな値からここで求めた 0.004%の間に均等に分布すると考えられるので、GUM4.7.3

より標準不確かさは、 $\frac{0.004\%}{\sqrt{3}} = 0.0023\%$  となる。

## 文献

- (1-1) Guide to the expression of uncertainty in measurement (1993), International Organization Standardization. (日本語訳) 今井 秀孝, 計測における不確かさの表現のガイド (1996), 日本規格協会 .
- (2-1) Kaya and Laby, "Tables of Physical and Chemical Constants 15ed.", P29, 1986, Longman .
- (2-2) JIS Z8803-1991 解説(2)式 .