液体流量計校正のための高精度転流器の開発*

嶋田 隆 司^{*1}, 小田 慎 嗣^{*2}
高本 正 樹^{*1}, 永井 聰^{*1}

A Novel Diverter for Liquid Flow Calibration Facilities

Takashi SHIMADA^{*3}, Shinji ODA,
Masaki TAKAMOTO and Satoshi NAGAI^{*3} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology,
1-1-1 Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8563 Japan

It is of great importance to improve the accuracy of the diverter to achieve high accuracy liquid flow measurements by using static gravimetric systems with flying start and finish. A new system with the double diverting wing has been developed in order to reduce the diversion timing error that dominates the uncertainty for the calibration of flowmeters. The diversion timing error has been estimated with a small prototype in a water flow circuit in order to make a comparison between the performance of the new system and those of previous system with the single diverting wing. The results show that the jet flow condition has little effect on the timing error estimated by the double wing method, although the error with the single wing is dependent on the liquid flow rate. Therefore, the triggering of the timing system can be easily adjusted over a wide range of flow rate by using the new diverter system.

Key Words: Flowmeter, Flow Measurement, Accuracy, Calibration, Diverter, Uncertainty, Liquid Flow Rate

1. 緒 言

流量計を用いて高い精度で流量測定を行うためには、流量計校正設備の精度を向上させることが非常に重要である。液体用流量計の実流校正方法の一つである通液式秤量法⁽¹⁾は、国家標準設備⁽²⁾ ⁽³⁾で採用されていることからわかるように、高い精度を達成できる校正方法として広く認識されている。被試験流量計内に試験流体が流れている状態で流量を変化させることなく校正する通液法で試験を行うためには、ある一定の時間内に試験流体を秤量タンクへ流入させる転流器(ダイバータ)が必要である。そのため、ノズルで絞られた自由噴流内を1枚の転流羽根を回転または移動させることによって流れを切り換える転流機構が数多くの校正設備で使用されている。しかしながら、大流量の校正では、経済的もしくはスペース的な理由から秤量タンクへの流入時間が制限されるため、切り換え時に生じる流入時間の計測の不確かさが流量計校正全体の不確かさを支配する要素の一つであると言われている。

流入時間の不確かさを小さくするために、ISO 規

格⁽⁴⁾では、流入時間の時間偏差量を評価し、転流器を調整することが推奨されている。しかしながら、すべての校正条件で検証することは非常に難しいことから、偏差量は校正の不確かさに加算される。一方、流入時間の偏差の要因として、矩形ノズルから流れる自由噴流の速度分布の非対称性が指摘されている⁽⁵⁾。そのため、ノズル上流部とノズル形状を最適化することにより、対称な速度分布を形成させることが試みられている。さらに、転流羽根の切り換え信号を出力する計時装置の不確かさも大きな要因であることから、複数の検出器の設置による新たな計時測定方法が提案されている⁽⁶⁾。これらの研究はおおのこの誤差要因による不確かさを小さくすることに着目し、特定された校正条件で実証されたものであるが、偏差要因を根本的に解消するまでには至っていない。

そこで、新たに転流機構を考案し、上述の転流器で生じる不確かさを小さくすることを試みた。具体的には、転流羽根の移動方向に対して垂直に並べた2枚の羽根を用いて、秤量タンク側へ流れを転流させる計測開始時とバイ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方法である。小型の転流モデル装置を製作し、新しい転流方式と従来の1枚羽根による転流方法で流入時間の偏差量を評価した。特に、噴流の速度分布の非対称

* 原稿受付 2001年3月13日。

^{*1} 産業技術総合研究所(☎ 305-8563 つくば市梅園 1-1-1)。^{*2} 新エネルギー・産業技術総合開発機構(☎ 170-6028 東京都豊島区東池袋 3-1-1)。

E-mail: t-shimada@aist.go.jp

性と時間計測用検出器の設置位置が流入時間の偏差に及ぼす影響について重点的に調査し、2枚羽根転流方法の有用性について実証した。

2. 転流器の特性

2.1 流入時間の偏差 秤量法による液体用流量計の校正を行う場合には、被試験流量計を通過する体積流量は、次式で評価される質量流量 q を試験流体の密度 ρ_w で割ることによって求められる。

$$q = \frac{m}{T_M(1 - \rho_a/\rho_w)} \quad (1)$$

ここで、 m は秤量値であり、 ρ_a は大気密度である。秤量タンクへの流入時間 T_M は、計測開始時に計測測定用検出器を転流羽根が通過する瞬間に出力される信号と終了時の信号との時間間隔として測定される。これら切り換え信号の前後で秤量タンクへの流入量が遷移状態となるため、転流動作に伴う流入時間の不確かさが生じる。

秤量タンクへの流入流量 q_{in} の経時変化の概念図を図1に、また、転流羽根の運動形態を表す概念図を図2に示す。まず、ノズルからの自由噴流が転流羽根によってバイパス側へ流れる準備段階では、秤量タンクへ流入されていない。次に、図2中の転流羽根を(a)の位置から(d)へ移動させ、バイパス側から秤量タンク側へ流れの向きを切り換えると同時に、秤量タンクへの流入流量は増加し($t_1 \sim t_2$)、試験開始時の試験流量 q_1 と等しくなる。その後、再び秤量タンク側からバイパス側への流れの切り換えによって、流入流量は試験終了時の試験流量 q_2 から減少し($t_3 \sim t_4$)、バイパス側への流れとなる。この流入流量の増加および減少速度は、転流羽根の移動速度、自由噴流の流動状態、特に噴流の幅方向に対する主流方向の速度分布に依存する。

真の流入時間 $T_{true}(=t_6 - t_5)$ は、試験流量が安定している($q_1 = q_2$)の場合、次式で定義される。

$$T_{true} = -t_2 + t_3 + \frac{1}{q_1} \left(\int_{t_1}^{t_2} q_{in} dt + \int_{t_3}^{t_4} q_{in} dt \right) \quad (2)$$

式(2)は、流入時間以外の遷移時間内($t_1 \sim t_5, t_6 \sim t_4$)に流入された量と流入時間($t_5 \sim t_6$)での過不足分とが一致すること、つまり、図1中の斜線領域と点領域とが等しくなる($Q_1 + Q_2 = Q'_1 + Q'_2$)ことを意味する。図1からもわかるように、この真の流入時間と計測時間との偏差 $\Delta T(=T_{true} - T_M)$ は次式で表される。

$$\Delta T = -T_{J1} + T_{J2} + T_{D1} - T_{D2} \quad (3)$$

ここで、ノズルの中心から計測用検出器まで転流羽根が移動する時間間隔を T_D 、及び真の流入時間を計測

Fig. 1 Flow rate pattern to the weighing tank during measurement.

Fig. 2 Conventional diverter.

する最適位置までの時間間隔を T_J とした。添え字である 1, 2 は、それぞれ転流羽根によって流れが秤量タンク側、およびバイパス側へ切り換え中であることを意味する。この偏差量 ΔT を計時装置の調整によって小さくすることで、転流器による流入時間測定の不確かさを小さくすることが可能となる。なお、試験開始時の流量 q_1 と終了時の試験流量 q_2 の違いによる偏差分は、適切な実験条件では他の要因に比べ大幅に小さな値であることが Pöschel *et al.* によって報告されている⁽⁵⁾。また、本実験でも十分に小さい値となることを確認した。

2.2 従来の転流方式 (1枚羽根による異方向転流方式) これまで多くの転流器で使用されている1枚羽根による異方向転流方式での流入流量の時間変化の概念図を図3(a)に、またノズルと計測用検出器との位置関係を表す概念図を図3(b)に示す。噴流内で

Fig. 3 Diversion timing error with the single wing, (a) flow rate pattern, (b) the position of the switch.

Fig. 4 Diversion timing error with the double wing, (a) flow rate pattern, (b) the positions of the switches.

の転流羽根の移動速度が一定であり、また噴流の流動特性値に時間変動がない場合、流入開始信号と終了信号とを同一検出器による出力が可能であることから、 $T_{D2} = -T_{D1}$, $T_{J2} = -T_{J1}$ の関係が成り立つ。したがって、流入時間の偏差量 ΔT は式 (3) より次式で表される。

$$\Delta T = -2T_{J1} + 2T_{D1} \quad (4)$$

式 (4) にノズルの中心から検出器の最適位置までの時間偏差分 T_{J1} が含まれることは、流量やノズル形状に依存する自由噴流の流動場を把握し、検出器の最適位置を特定する必要があることを示唆する。したがって、1枚羽根による転流器の高精度化を図るためには、すべての校正条件において転流器の特性試験を行い、評価された時間偏差値に基づき計時装置を調整することが必要不可欠である。

2.3 2枚羽根による同一方向転流方式 秤量タンク側への転流時とバイパス側への転流時において、

Fig. 5 Diverter prototype.

Fig. 6 Schematic of a diverter.

噴流に対して同じ方向から異なる転流羽根を移動させる方法では、それぞれの転流羽根に対応した2つの検出器で流入時間を計測する。この転流方式では $T_{J1} = T_{J2}$ の関係が満たされることから、図4からわかるように流入時間の時間偏差 ΔT は次式で表される。

$$\Delta T = T_{D1} - T_{D2} \quad (5)$$

式 (5) からわかるように、固定された2枚の転流羽根を同一駆動源で作動させる場合には、 ΔT の値は転流羽根の間隔と検出器の間隔との差によって生じる偏差時間である。このことは、ノズルと検出器の相対位置や速度の非対称性などの不確定要素を検討する必要性がないことを示唆する。さらに、単一の検出器で転流羽根自体を検知することによって、すなわち、図4(b)中のSwitch 1とSwitch 2に共通の検出器を用いてそれぞれの転流羽根の通過を検出することにより、 $T_{D1} = T_{D2}$ の関係が成り立つことから、 ΔT が零になることがわかる。したがって、流入時間の偏差となる要因が少ないことから、高精度の校正を行ううえで有用であると言える。

3. 実験装置および方法

3-1 転流モデル装置 転流モデル装置の概略図を図5に示す。ヘッドタンクから試験流体である水を流量 $q_{ref}=100 \sim 300$ L/min で転流モデル装置へ流し、矩形ノズルから自由噴流を形成させた。矩形ノズルは、ノズル内の流速測定を行うためにアクリル製とした。また、ノズル出口断面が 10 mm および 20 mm $\times$ 200 mm である絞り比 (1:5 および 2:5) の異なる二種類のノズルを交換することにより、断面平均流速 V_c は 0.4 ~ 2.5 m/s で実験を行った。

秤量部には最大秤量 300 kg、分解能 2 g の電子天秤 (メトラートレド KCC300) を使用し、風袋引きで約 200 kg まで試験流体を秤量することができた。秤量タンク内部からの蒸発を防ぐために秤量タンク上部に蓋を設置し、転流器からの流入部のみを大気に解放させた。

転流部の概略図を図6に示す。頂角 15° の2枚の転流羽根を約 40 mm の間隔で固定した転流部をボールネジを介してサーボモータで駆動させ、転流羽根の移動距離、並びに転流羽根の移動速度 u_w を制御した。なお、噴流内での移動速度を ± 10 mm/s とした。1枚羽根による転流実験では、片方の転流羽根を噴流に対して往復運動させ、また、2枚羽根による実験では、同一方向に移動させることにより2枚の転流羽根を噴流に対して順次通過させた。ボールネジの駆動部にそれぞれの転流羽根に対応させた2つのフォトセンサーを設置し、これらのフォトセンサーで検出した信号をパソコンに取り込むことにより流入時間を算出した。

試験流量は、最大測定流量 942.5 L/min である電磁流量計 (横河電機 AE205SG) を用いて測定された。また、ノズル幅方向 x に対して空隙率を増加させた不均一の多孔板をノズル上流部に設置することにより強制的に偏流を生成させ、速度分布の非対称性が転流器の特性に及ぼす影響について調査した。

3-2 流入時間の偏差量の評価方法 ISO4185⁽⁴⁾ で推奨された方法を用いて流入時間の偏差量 ΔT を評価した。この方法は、 n 回の繰り返し転流動作を行った積算秤量値 $\sum_{i=1}^n m_i$ および積算流入時間 $\sum_{i=1}^n T_{Mi}$ 、並びに試験流量 q_n と、1回の転流で得られた値 m_1, T_{M1}, q_1 から、流入時間の偏差量 ΔT を算出するものである。ISO4185 では、式 (6) に示す評価式が提案されている。

$$\Delta T = \frac{T_{M1}}{n-1} \frac{q_1}{q_n} \left(\frac{\sum_{i=1}^n m_i / \sum_{i=1}^n T_{Mi}}{m_1 / T_{M1}} - 1 \right) \quad (6)$$

しかしながら、この評価式を用いるためには、繰り返し転流時の流入時間がすべて等しいこと ($T_{Mi} = \text{const.}$)、 n 回の繰り返し転流時の積算流入時間と1回転流時の流入時間とがほぼ等しいこと ($\sum_{i=1}^n T_{Mi} \approx T_{M1}$)、さらにそれぞれの秤量値がほぼ等しいこと ($\sum_{i=1}^n m_i \approx m_1$) が要求される⁽⁷⁾。そこで、上述の条件で制限されない評価式を導出した。

n 回の転流動作を繰り返した場合、積算秤量値 m_n 、測定時間の和 T_{Mn} から次式より質量流量 q_n が算出される。

$$\begin{aligned} q_n &= \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{(\sum_{i=1}^n T_{Mi} + \sum_{i=1}^n \Delta T)(1 - \rho_a / \rho_w)} \\ &= \frac{m_n}{(T_{Mn} + n\Delta T)(1 - \rho_a / \rho_w)} \end{aligned} \quad (7)$$

空気及び試験流体の密度が試験中は一定であるとする、式 (7) より、 a 回の転流を行うことで測定された秤量値 m_a 、計測時間 T_{Ma} と、 b 回の転流で得られる値 m_b, T_{Mb} から ΔT が導かれる。

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{T_{Ma} \cdot m_b - T_{Mb} \cdot m_a}{-a \cdot m_b + b \cdot m_a} \\ &+ \frac{1/q_a - 1/q_b}{(1 - \rho_a / \rho_w)(a/m_a - b/m_b)} \end{aligned} \quad (8)$$

さらに、測定中の流量が一定 ($q_a = q_b$) である場合、 ΔT は次式で表される。

$$\Delta T = \frac{T_{Ma} \cdot m_b - T_{Mb} \cdot m_a}{-a \cdot m_b + b \cdot m_a} \quad (9)$$

本研究では、試験流量 $q_{ref} = 100, 200, 300$ L/min に対して繰り返し回数をそれぞれ $a = 14, 7, 5$ 、および $b = 1$ とした転流特性実験を行い、式 (9) を用いて流入時間の偏差量 ΔT を評価した。

3-3 ノズル内部の流速測定 ノズル出口で一樣な速度分布が形成されているのかどうか、また不均一な多孔板をノズル上流部に設置することによって、偏流が形成されたのかどうかを確認するため、PIV (Particle Image Velocimetry) によるノズル内部の流速測定を行った。測定システムの概略図を図7に示す。Nd:YAG レーザ (New Wave Research MINILASE III-15) から発振されたレーザーシートをアクリル製の矩形ノズルに照射し、ノズル断面方向から CCD カメラ (DANTEC 80C60) で撮影した画像を画像処理器 (DANTEC PIV2200) を用いて速度に変換した。得られた速度データをパソコンで統計処理を行い、時間平均流速を求めた。サンプリング数は 5000 であり、また、トレーサ粒子として平均粒径 $20 \mu\text{m}$ のポリスチレン粒子を用いた。

Fig. 7 Measurement of the velocity in the nozzle.

Fig. 8 Vertical velocity profile at the outlet of the nozzle. $\circ, \triangle, \square$; $q_{ref} = 100, 200, 300$ L/min without an inhomogeneous punched plate. $\bullet, \blacktriangle, \blacksquare$; 100, 200, 300 with an inhomogeneous punched plate.

4. 実験結果及び考察

4.1 ノズル出口付近での流速分布 出口幅 W が 20mm のノズルに対して PIV で測定したノズル出口付近における鉛直方向時間平均速度の水平方向分布を図 8 に示す。多孔板を通過させない流れ場では、鉛直方向速度 $\bar{V}$ がほぼ一様な分布を示していることから、使用したノズル形状が適切であることがわかる。一方、上流部に不均一な多孔板を設置した流動場では、空隙率の大きな駆動部側 ($x/W = -0.5$) で速度が大きくなり、速度比が約 1 : 1.5 である偏流が強制的に形成されることがわかる。

以上のことより、ノズル上部に多孔板を設置することによりノズル出口で非対称な速度分布が形成されることが確認された。

4.2 検出器位置と転流特性との関係 流入時間を計測するための検出器とノズルとの相対的な位置関係が流入時間の評価値に及ぼす影響を調べるために、検出器の設置位置を変化させて転流器の特性実験を行った。なお、2 枚羽根での転流実験では、転流羽根の間隔とほぼ等しくなるように 2 つの検出器の間隔を

Fig. 9 Variation of the diversion timing error against the position of the switch at the nozzle ($W=20$ mm) without an inhomogeneous punched plate. $\circ$, single wing; $\square$, double wing. The solid line indicates $\Delta T = 2T_{D1} - 0.195$.

設置した。測定結果の一例として、流量 200 L/min、出口幅 20 mm のノズルにおいてほぼ一様な速度分布が形成された自由噴流に対する流入時間の偏差量 ΔT を、ノズル中心から検出器までの偏差時間 T_{D1} に対してプロットしたものを図 9 に示す。また、転流羽根の先端をノズルの中心に目視で一致させた位置から検出器まで転流羽根を移動させ、その移動距離をノズル中心から検出器までの距離 x とした。さらに、ノズル中心から検出器までの偏差時間は、距離 x と転流羽根の移動速度 u_W との関係 ($T_{D1} = x/u_W$) より算出した。

2 枚羽根による同方向転流方式では、両検出器の間隔を変化させていないことから、 T_{D1} の値に関係なく $\Delta T \approx 0$ となる。それに対し、1 枚羽根による転流方式での評価値 ΔT は、検出器の設置位置によって大きく変化し、 T_{D1} と ΔT との間には式 (4) の関係が満たされることがわかる。また、流量、ノズル幅、偏流の有無に左右されず、式 (4) の関係が成り立つことが確認された。 $T_{D1} = 0$ において ΔT の値が零とならないことは、ノズル中心位置の測定値に誤差が含まれることを示唆する。したがって、1 枚羽根での転流方式では、ノズルの中心に目視によって検出器を設置することは、流入時間の偏差量を大きくさせる可能性があることがわかった。

4.3 噴流速度分布の非対称性の影響 自由噴流内に形成される速度分布の非対称性によって流入流量 q_{in} の時間変化が偏るため、ノズル中心位置と検出器の最適位置との間には差異が生じ、さらに、その差はノズル噴流の流動条件によって変化することが予想さ

れる。そこで、流入時間の偏差量の流量依存性について検討するために、偏流させた噴流（ノズル出口幅 20 mm）に対して偏差量を評価した。評価した偏差量 ΔT から $q_{ref} = 100$ L/min における評価値 $\Delta T|_{q=100}$ を差し引いた値を流量に対してプロットしたものを図 10 に示す。ここで、表 1 中の +, - は、秤量タンク側へ流れを切り換える時の転流羽根の移動方向であり、+ は流速の速い方から転流羽根を進入させたことを表す。1 枚羽根での評価値は流量によって大きく変化し、 $q_{ref} = 300$ L/min での評価値と 100 L/min での値との間には 0.08 s の違いが生じる。さらに、転流羽根の進入方向が + の場合には ΔT の値は流量に対して減少傾向を、逆に - の場合には増加傾向を示すことから、流量の増加に伴い検出器の最適位置が x の負の方向へ、つまり噴流の流速の速い方へ変化することがわかる。このことは、自由噴流の流動特性に流入時間の偏差量が強く依存することを示唆する。

そこで、図 8 に示したノズル出口での鉛直方向速度の水平方向分布を用いて、ノズル中心から真の流入時間を計測する最適位置までの転流羽根の移動時間を求め、偏流による時間偏差 ΔT の変化量を推算した。その結果、偏流の形成による ΔT の変化量は 0.07 s であったが、断面平均流速で無次元化された鉛直方向速度の水平方向分布が試験流量 q_{ref} の違いに関係なくほぼ一致すること（図 8 参照）からもわかるように、試験流量の違いによって生じる変化量は 0.01 s 以下であった。このことは、ノズル出口での流速分布だけでは偏差量を推定できないことを示唆する。

偏流した噴流に対して評価された ΔT の値が流量依存性を示す主な要因として、ノズル出口から転流羽根先端までの自由落下に伴う噴流幅の減少量が自由噴流の主流方向流速に依存し、流速の大きい方へ自由噴流の中心が移動することが考えられる。しかしながら、これらの流量依存性を明らかにするためには、噴流に関する詳細な検討が必要である。

一方、2 枚羽根で評価した値は、流量に関係なくほぼ一定値を示す。したがって、2 枚羽根による異方向転流方式では、噴流の流動特性に関連する偏差要因を検討する必要性がないことがわかる。

4.4 2 枚羽根転流器の調整 前節で示したように、1 枚羽根による従来の転流方式では、流量、検出器の相対位置などの誤差要因を検討する必要があることがわかった。したがって、良好な転流特性を確保するためには、試験流量、ノズル幅など校正条件に応じた転流器の特性評価試験を行うことが要求される。それに対し、新たに考案した 2 枚羽根による同方向転

Fig. 10 The effect of the unsymmetrical liquid jet on the diversion timing error. Symbols are listed in Table 1.

Table 1 Symbols in Fig. 10.

Symbol	○	△	□	◇
diverting wing	1	1	2	2
diverting direction	+	-	+	-

Fig. 11 Diversion timing error with the double wing. ○, before adjustment ; ●, after adjustment.

流方式では、転流特性値に影響を及ぼす誤差要因が少ないことが明らかとなった。そこで、2 枚羽根による転流方式で評価した流入時間の偏差量に基づいて検出器を移動させ、転流特性を向上させることを試みた。

ノズル幅 (10 mm, 20 mm)、強制的な偏流の有無、転流羽根の移動方向の正負と実験条件を変えて 2 枚羽根による転流方式で評価した流入時間の偏差量の平均値を参照流量 q_{ref} に対してプロットしたものを図 11 に示す。図 11 からわかるように、 ΔT の値は、ノズ

ル幅、偏流、および流量に関係なくほぼ一定値を示す。そこで、この評価値に基づいて検出器を調整した後、偏流した自由噴流に対して評価した ΔT の値を図 11 にあわせて示す。調整後に評価した値が、流量、速度分布の非対称性に関係なく ΔT の値が ± 0.006 s 以内となることがわかる。この値は、1 枚羽根での流量の違いによる ΔT の変化量 0.08 s の 1/10 以下であることから、高い精度での校正に対して 2 枚羽根での転流方式が非常に有効であることがわかる。したがって、評価した時間偏差量から検出器を微調整することにより、良好な転流特性を容易に達成できることが明らかとなった。

5. 結 言

転流モデル器を用いて流入時間の偏差時間の評価を行い、新たに考案した 2 枚羽根を用いた同方向転流方式と従来の 1 枚羽根による異方向転流方式との転流特性の比較を行った。その結果、自由噴流の流動特性が流入時間の偏差量に及ぼす影響が、従来の転流方式に比べ 2 枚羽根による転流方式では大幅に小さくなった。これにより、広い流量範囲で高精度の校正を行ううえで、2 枚羽根による転流方式を用いることが非常に有用であることが明らかとなった。

謝 辞

本実験は新エネルギー・産業技術総合開発機構 山下哲生氏（現 神鋼パナテック）の協力を得て得られ

た。記して謝意を表する。本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構新規産業創造型提案公募事業（プロジェクト番号 99E 省 04-001-1）の一部援助を受けて行われた。

文 献

- (1) 社団法人 日本計量機器工業連合会 編, 計装エンジニアのための流量計測 *A to Z*, 工業技術社, (1995), pp.15-19
- (2) 寺尾吉哉, 高本正樹, 液体大流量計校正設備の不確かさ解析, 計測自動制御学会, 36, 1, (2000), pp.10-15
- (3) Pöschel, W., Engel, R., *The concept of a new primary standard for liquid flow measurement at PTB Braunschweig*, Proc. 9th Int. Conf. on Flow Measurement, (1998), pp.7-12
- (4) The International Organization for Standardization, *Measurement of liquid flow in closed conduits - Weighing methods, International Standard*, ISO 4185-1980, 1st edition, (1980), pp.1-21
- (5) Pöschel, W., ほか 7 名, *A unique fluid diverter design for water flow calibration facilities*, Proc. 10th Int. Conf. on Flow Measurement, (2000), A9
- (6) Engel, R., Klages, U., *A novel approach to improve diverter performance in liquid flow calibration facilities*, Proc. 10th Int. Conf. on Flow Measurement, (2000), A10
- (7) Mattingly, G.E., *Fluid Mechanics Measurement*, edited by R.J. Goldstein, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, New York, London, (1983), pp.245-306