UVPを用いた高精度流量計の精度評価に関する研究*

大窪 智行^{*1}, 武田 靖^{*1}, 森 治嗣^{*2}

Accuracy Evaluation of High-accuracy Flowmeter using UVP

Tomoyuki OHKUBO^{*3}, Yasushi TAKEDA and Michitugu MORI^{*3} Division of Mechanical Science, Graduate School of Engineering, Hokkaido University,
N 13 W 8, Kita-ku, Sapporo-shi, Hokkaido, 060-8628 Japan

The accuracy evaluation of a pipe flowmeter using UVP is investigated by numerical simulations and experiments. The meter doesn't fundamentally need the profile factor. The fundamental error depends on the number of measuring points set up in the pipe. We ascertained that the error value became less than 1%, if the measuring points are provided more than 110. It doesn't depend in the state of laminar/turbulent flow. In addition, the relation between the measuring time and the error is estimated in pulsatory pipe flows, for which the mean flow rate must be measured usually for a long time. With a statistics theory and a set of experiments we established the estimation method of the error and the necessary measuring time, which are function of the aimed error value, the frequency and pulsatory amplitude of the flow rate.

Key Words: Pipe Flow, Flowmeter, Pulsatory Flow, Flow Rate, UVP, Error Estimate

1. 結 論

プラントの配管, 上下水道さらには血管など, 工業や環境, 医療分野において円管内流は最も基本的な流体システムの一つである。作動流体も水や油などの単相流のみならず, 気液などの二相流, 食品や液体金属などの不透明流, さらには非ニュートン性を含む高粘度流など様々である。これらの管内流における流量は, 生産管理や衛生管理, または安全管理などにおいて最も重要な情報の一つであり, 管内流量を精度よく測定し, 瞬時にモニタリングする技術が必要とされている。

軸対称管内流において, 瞬時の体積流量 $Q(t)$ および主流方向の流速分布 $v(r, t)$ (r は管内の半径方向位置) との関係は,

$$Q(t) = \int v(r, t) ds \quad (1)$$

であり, v を管垂直断面面積 s で積分した形となる。そのため, 高精度の流量測定を行うには管内の瞬時速度分布を精度よく測定することが必要である。通常, 管壁面と流体間に働くせん断応力によって, 管垂直断面

上で一様ではない速度分布が形成され, その速度分布形状はレイノルズ数や管内表面粗さ, さらには脈動などの流れの非定常性により大きく異なる。

一方, 従来の流量測定法は, 管路形状やレイノルズ数に制限を与えた環境で, 流体の差圧や超音波の伝達時間差などを用いた方法により断面平均流速を測定する原理を採用している。この場合の流量は, 平均流速 $\times$ 断面積の値に, 各種校正実験によって得られる補正係数 (profile factor) を乗じることにより得られる。この方法における流量の測定精度は, 補正係数の妥当性に支配される。そのため, 測定対象や測定条件に種々の拘束条件¹⁾が伴う。よって, これらの流量測定法では, 管路の経年変化によって生じる補正係数のずれや, 突発的な事象に伴う流れの状態の変化に対応できず, 場合によっては大きな事故を生じる引き金になりかねない。一方, 式 (1) のように流量を瞬時速度分布の面積分で測定する, いわば第一原理に基づく方法では, 補正係数が不要であり, 上述のような拘束条件は発生しない。従って, 管内流速分布を直接測定する方法では, 測定流量は, 流れの状態や不規則な流速変動の有無とは無関係であり, これを用いることにより, 信頼性の高い, 安定した流量測定が実現できる。

著者らはこれまでに, 超音波流速分布計測法⁽²⁾⁻⁽⁵⁾ (Ultrasonic Velocity Profiler : UVP) を用いた流量計の開発を行ってきた⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。UVP は, 超音波を用いて液体中の一測定線上の瞬時速度分布を時系列で測定す

* 原稿受付 2005年1月19日 改訂原稿受付日 2005年8月1日。

^{*1} 正員, 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8)。

^{*2} 正員, 東京電力(株) (〒230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)。

E-mail: totsui@ring-me.eng.hokudai.ac.jp

る手法である。UVP による流量測定は、流量が測定した管内の瞬時速度分布を積分することにより求められるため、前述の第一原理に基づく方法である。このような、管内流速分布の測定を流量測定に適用した流量計は、これまでに開発されていない。UVP を用いた流量測定のさらなる長所として、超音波を用いることから、油や不透明流体など測定対象とする液体を制約しないことが挙げられる。また、管壁面を介して超音波を透過させることができるため、非接触測定であるだけでなく、配管系の大掛りな加工等を伴うことなく任意位置を自由に測定できる。

UVP を用いた流量測定における精度の高さは、手塚ら⁽⁹⁾により報告されている。彼らは、国内外の検定所において UVP による流量測定の検定試験を行い、1%以下の不確かさが保証されることを確認している。和田ら⁽¹⁰⁾は、UVP を複数用いることによる未発達流の流量測定実験を行い、その有用性を確かめている。このように、UVP 流量計については、経験的にはその高い精度が評価されているが、系統的な誤差解析に基づく精度の評価はこれまでに行われていない。よって、実際にこれを用いて流量を測定する際の、パラメータ設定などには基準がなく、実用化を目指す上でその基準値の設定が求められる。そこで本報では、測定精度に影響を及ぼすいくつかの要因のうち、速度分布の離散化による流量算出の誤差を理論的に検討し、本流量測定法が、従来の平均速度分布測定を用いた他の流量計に比べ、原理的に高精度であり補正係数を要しないことを示す。その上で、流量測定に必要な速度測定点数について論じ、実験による検証を行う。

さらに、もう一つの誤差要因として、流れの非定常効果を取り上げる。管内流量は、ポンプによる振動やそれに伴う配管系の自励振動などにより、一般に定常流と見なしている場合においても少なからず流量の揺らぎを伴う。このような流動の非定常性は流速分布の理論値と実値との相違を誘起することから、旧来の流量計では、平均流量の推定において補正係数の不確かさとして誤差に表れる。これに対して、UVP では、瞬時流速分布を時系列に測定できることから、原理的に、揺らぎを含んでいても瞬時管内流量を式 (1) により求めることで、時間平均流量を所定の精度に制御することができる。ただし、正確な平均流量の推定には、揺らぎの周期よりも長い測定時間を必要とする。よって、揺らぎによる誤差への影響と測定時間との関係を調べる必要がある。Berrebi⁽¹¹⁾らは、単一の周波数成分をもつ脈動流について、適切な測定時間を数値

シミュレーションにより求めた。本報では更にこれを発展させ、任意の周波数の脈動を含む管内流量測定の理論的な検証、および実測試験を行う。そこから、複数の周波数成分をもつ脈動流と精度の関係式を導出し、高精度な測定に必要な測定時間の算出方法を示す。

2 測定原理と管内流量測定法

2.1 測定原理 この節では、UVP を用いた管内流速分布測定および流量測定の原理について説明する。

管内流速測定の模式図および座標系を図 1 に示す。

円管の垂直方向に対して、ある角度 α で設置された超音波トランスデューサから、基本周波数 f_0 を持つ超音波パルスを測定線方向 ξ に発射し、流体中の反射体からのエコーを同一のトランスデューサでとらえる。このとき、超音波パルスの往復時間 t と測定位置 ξ の関係式は、

$$\xi = \frac{ct}{2} \quad (2)$$

と表される。ここで、 c は流体の音速である。その ξ におけるエコーからドップラーシフト周波数 f_D を抽出し、測定線方向速度 v_ξ との関係式、

$$v_\xi = \frac{cf_D}{2f_0} \quad (3)$$

により ξ における反射体の移動速度を算出する。複数の ξ を設定し、以上の関係を用いて同時処理することにより、測定線上の複数の反射体の速度分布が瞬時に得られる。これを任意の超音波発信周波数で繰り返すことにより時系列測定が可能となる。UVP における測定原理の詳細については参考文献⁽²⁾⁻⁽³⁾を参照されたい。

Fig. 1 (a) Configuration of a pipe flow measurement using UVP and coordinate system, and (b) measured velocity profile

2.2 流量測定への応用 円管内の瞬時体積流量

$Q(t)$ は、

$$Q(t) = \int v(t) ds \quad (4)$$

$$= \iint v_x(r, \theta, t) r dr d\theta$$

で与えられる。ここで、 v_x は円管断面上での流速の主流方向成分、 θ は周方向角度である。主流方向のみの1次元流を仮定できるような流れにおいては、

$$Q(t) = \int_0^R 2\pi v_x(r, t) r dr \quad (5)$$

となる。

測定線方向の流速成分は、主流方向の正射影成分であるから、UVPにより得られる瞬時流量 Q_{UVP} は、

$$Q_{UVP}(t) = \sum 2\pi v_x(r, t) r \Delta r$$

$$= \sum \frac{2\pi v_x(r, t) r \Delta r}{\sin \alpha} \quad (6)$$

により求まる。

このように、UVPによる流量測定ではその算出式が離散形ではあるが、式(1)の形式を保持しており、その導出過程において流体の物理法則やモデル、あるいは補正係数を必要としないことが確認できる。

3. 測定点数と誤差について

3.1 流量算出における仮定 式(6)を用いた流量の算出における、誤差の発生要因について検討する。UVPにより測定された各測定点での流速には誤差がないものと見なし(すなわち別の誤差要因としてここでの検討対象から切り離し)、想定された速度分布が得られたと仮定する。また管内の速度分布が、中心軸に対して対称であり、脈動などの時間変動もないものとする。このとき、第一原理から求められる流量 Q_{true} は、式(5)より

$$Q_{true} = \int_0^R 2\pi v_x(r) r dr \quad (7)$$

$$= \int_0^R 2\pi v_x(y) (R-y) dy$$

と書くことができる。ここで、 R は管内半径、 $y=R-r$ である。これに対し、UVPにおける流量 Q_{UVP} は式(6)より、

$$Q_{UVP} = \sum 2\pi v_x(r) r \Delta r \quad (8)$$

$$= \sum 2\pi v_x(y) (R-y) \Delta y$$

となる。

3.2 層流における誤差の導出 層流における管内速度分布を、ハーゲン・ポアズイユ流れの式、

$$v_x(r) = v_{max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (9)$$

とする。ここで、 v_{max} は $r=0$ における流速(管内平均速度を u とすると $v_{max}=2u$)である。式(9)を式

(7)に代入すると流量 Q_{true} は、

$$Q_{true} = \frac{1}{2} \pi R^2 v_{max} \quad (10)$$

のように求まる。同様に、式(9)を式(8)に代入すると、UVPにより測定される流量 Q_{UVP} は、

$$Q_{UVP} = \left(\frac{N+1}{N} - \frac{2}{N^4} \sum_{i=1}^N i^3 \right) \pi R^2 v_{max} \quad (11)$$

と求まる。ただし N は測定点数、 $r=i \times \Delta r = (i \times R)/N$ である。ここで誤差を

$$E(\%) = \frac{Q_{true} - Q_{UVP}}{Q_{true}} \times 100 \quad (12)$$

と定義すると、UVPによる流量計の誤差 E_{UVP} は、

$$E_{UVP}(\%) = \left[1 - 2 \left(\frac{N+1}{N} - \frac{2}{N^4} \sum_{i=1}^N i^3 \right) \right] \times 100 \quad (13)$$

となる。これよりUVPの流量算出における速度分布の離散化による誤差は、測定点数 N にのみ依存することがわかる。

3.3 乱流における誤差の導出 管内乱流の速度分布として指数法則の1/7乗則、

$$v(r) = v_{max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{7}} \quad (14)$$

を用いる。これを式(7)および式(8)に代入すると、

$$Q_{true} = \frac{49}{60} \pi R^2 v_{max} \quad (15)$$

$$Q_{UVP} = \left(\frac{2}{N^{\frac{1}{7}+1}} \sum_{i=1}^N i^{\frac{1}{7}} - \frac{2}{N^{\frac{1}{7}+2}} \sum_{i=1}^N i^{\frac{1}{7}+1} \right) \pi R^2 v_{max} \quad (16)$$

となり、UVPによる流量計の誤差 E_{UVP} は、

$$E_{UVP}(\%) = \left[1 - \frac{60}{49} \left(\frac{2}{N^{\frac{8}{7}}} \sum_{i=1}^N i^{\frac{1}{7}} - \frac{2}{N^{\frac{15}{7}}} \sum_{i=1}^N i^{\frac{8}{7}} \right) \right] \times 100 \quad (17)$$

となる。層流の場合と同様に、その誤差は測定点数 N にのみ依存する。

3.4 結果および考察 式(13)および式(17)に N の具体的な数値を代入し、誤差 E_{UVP} を計算した結果を図2に示す。横軸は測定点数 N 、縦軸は誤差

E_{UVP} である。乱流と層流ともに、測定点の増加にと
もないう誤差がゼロに漸近する。特に層流の漸近が早く、
誤差を 1% 以下に抑制するために必要とする点数は、
わずか 18 点である。乱流では 108 点である。よって
流れの状態を問わず、100 点程度の測定点数を管内に
設定することにより、1% 以下の高精度な測定が可能
である。

流れの状態に対する測定点数の差は、各流れの状態
における速度分布の形状から、以下のように説明する
ことができる。図 3 に、層流および乱流状態である流
れの、管壁面近傍の速度分布を示す。UVP による流
量測定では、速度分布が離散的に扱われるため、図中
の斜線部の差が誤差となって表れる。それぞれの流れ
状態における、壁面近傍での速度分布形状を比較する
と、層流の速度分布が放物線形状であるのに対し、乱
流では矩形に近く、その勾配と曲率が大きい。よって、
管壁面近傍に限れば、乱流速度分布の方が層流に比べ
誤差が大きくなる。さらに管内流では、式 (8) に示
されるように、壁面に近づくにつれて速度にかけられ
る面積 (Δr) が大きくなるため、誤差の感度が大き
くなる。結果として、乱流速度分布では壁面近傍での
細かな分解を要するため、多くの測定点数が必要とな
る。

3.5 実験による証明 前節で示した、流量誤差
と測定点数の関係を実験により検討する。十分な助走
距離を持つ、内径 $2R = 50\text{mm}$ のアクリル管内を流れ
る水の流量を、UVP により測定した。管壁面の垂線
に対して $\alpha = 12$ 度の角度でトランスデューサを設置し、
管内の測定点数 N は 4 点から 136 点の範囲で変化さ
せた。測定した速度分布を時間平均し、式 (9) に代
入して流量を算出した。実験では真の流量 Q_{true} は未
知値のため、 N を設定できる最大の 136 点としたとき
の流量を Q_{true} と仮定し、式 (12) を用いて誤差の評
価を行った。代表速度は Q_{true} を管垂直断面面積で除し
た平均速度、代表長さは円管内径 $2R$ とし、これらの
値と水の動粘性係数 ν を用いてレイノルズ数 Re を計
算した結果、 $Re = 26000$ であり流れの状態は乱流で
あった。

図 4 に、実験により求めた誤差および乱流速度分布
における理論誤差 E_{UVP} をまとめた。両者を比較する
と、理論値と同様に、測定点数の増加に伴い、実験値
においても誤差は単調減少しており、その変化はよく
一致している。よって、実際の流量測定においても、
測定点数と誤差との関係が式 (17) に従うことが確認
できた。

Fig. 2 Error versus number of measuring points in a pipe for laminar and turbulent flows

Fig. 3 Velocity profile near wall in a pipe for laminar and turbulent flows

Fig. 4 Comparison between theoretical and experimental results on variation of error with respect to number of measuring points

4. 脈動流に対する誤差について

4.1 脈動流のシミュレーション 管内乱流を対象とし、速度分布が中心軸に対して対称であるとする。また、脈動周波数は単一とする。管内乱流の一般解を導くことは困難であるため、単一周波数の管内脈動流の速度分布 v_p は、管内乱流における平均流速分布の実験式 (14) に、Uchida⁽¹²⁾により求められた層流での管内単振動流における速度分布 v_u の解析解、

$$v_u(r, t) = A \left\{ 1 - \frac{J_0(i^{3/2}(\omega/\nu)^{1/2}r)}{J_0(i^{3/2}R(\omega/\nu)^{1/2})} \right\} e^{i\omega t_p}, \quad (18)$$

$$A = U_0 \left\{ 1 - \frac{2}{i^{3/2}R(\omega/\nu)^{1/2}} \frac{J_1(i^{3/2}R(\omega/\nu)^{1/2})}{J_0(i^{3/2}R(\omega/\nu)^{1/2})} \right\}^{-1} \quad (19)$$

を単純和として重ね合わせることで与えた。ここで、 ω は脈動の角周波数、 ν は流体の動粘性係数、 t_p は測定時刻、 U_0 は断面平均速度の振幅、 i は虚数単位、 J_0 および J_1 は Bessel 関数である。ただし、乱流に伴う速度変動の振幅は、 U_0 より十分に小さく無視できるものとする。ここで、 $\omega = 18.8 \text{ rad/s}$ 、 $\nu = 1.519 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $R = 0.0125 \text{ m}$ 、 $U_0 = 0.04 \text{ m/s}$ 、 $v_{\max} = 0.079 \text{ m/s}$ の条件における流速分布 v_p を図 5 に示す。各線は、位相が $\pi/5$ 間隔ごとの速度分布を表している。図より、壁面近傍では、振動流におけるアニュラー効果（特定の位相において壁面近傍の速度が管中心の速度を上回る現象）⁽¹²⁾の影響が表れている。

4.2 流量算出および測定時間式の導出 図 6 は、同条件において v_u のみの速度変動を r 方向の 10 点について表したものである。壁面近傍は速度変動の位相が管中心付近と異なる。そのため、アニュラー効果が流量に及ぼす影響を検討する必要がある。そこで各時刻 t_p における v_p を計算し、結果を式 (6) に代入することにより、流量 $Q_p(t_p)$ を算出した。ただし、流量測定の開始が、振動のどの位相から行われるかは不明であるため、位相を $\pi/2$ 間隔でずらし、位相が 0 から $3\pi/2$ について計算を行った。結果を図 7 に示す。図より、 Q_p は t_p に対し正弦波的な挙動を示す。このことより、アニュラー効果による壁面近傍の速度分布形状の影響は、流量の振幅および角周波数には大きく影響せず、流量の時間変動は正弦波として扱うことができることを確認した。

シミュレーションを行った脈動流において無限時間の測定を行うと、式 (18) の平均値はゼロとなる。

Fig. 5 Theoretical velocity profiles in a pulsatory pipe flow at each phase

Fig. 6 Theoretical velocity fluctuations of v_u in a pulsatory pipe flow at each r/R

Fig. 7 Instantaneous flow rate in a pulsatory pipe flow at each phase

Fig. 8 Reduction of error with respect to measuring time T on simulation

そのため、真の流量 Q_{true} は 1/7 乗則のみの速度分布から算出される。このときの流量 Q_{true} は、 $Q_{true}=0.0317$ l/s であった。この値を用いて、測定時間 T に対する誤差 E_p [%] を、

$$E_p(T) = \frac{\Delta t}{T} \sum_{t_p=0}^T \frac{Q_p(t_p) - Q_{true}}{Q_{true}} \times 100 \quad (20)$$

として算出した。結果を図 8 に示す。図より、各位相において、誤差 E_p は T の増加に対して振動しながらゼロに漸近している。すなわち、測定時間 T に対する誤差は、太い実線で示される、位相がゼロにおける誤差 E_p の包絡線以下で常に推移する。この包絡線を表す式を次のように導出する。

瞬時流量 Q_p は正弦波的に振動しているため、

$$\begin{aligned} Q_p(t_p) &= Q_{true} + Q_0 \sin \omega t_p \\ &= Q_{true} + U_0 \pi r^2 \sin \omega t_p \end{aligned} \quad (21)$$

と表すことができる。ここで Q_0 は流量の振幅である。よって、瞬時の流量の誤差を求めると、

$$\begin{aligned} E(t_p) &= \frac{(Q_{true} + Q_0 \sin \omega t_p) - Q_{true}}{Q_{true}} \times 100 \\ &= \frac{Q_0}{Q_{true}} \sin \omega t_p \times 100 = A_e \sin \omega t_p \times 100 \end{aligned} \quad (22)$$

となる。 A_e は誤差の振幅を示している。式 (22) より、測定時間 T と誤差 $E_p(T)$ の関係は、

$$\begin{aligned} E_p(T) &= \frac{\int_0^T A_e \sin \omega t dt}{T} \times 100 \\ &= \frac{A_e}{\omega T} (1 - \cos \omega T) \times 100 \end{aligned} \quad (23)$$

と表すことができる。式 (23) より包絡線を求めると、

$$E_{env}(T) = \frac{2A_e}{\omega T} \times 100 \quad (24)$$

と導かれる。式より、脈動による誤差への影響は誤差の振幅 A_e に比例し、脈動の角周波数 ω および測定時間 T に反比例する。

式 (21) および (22) より、 A_e は U_0 と断面平均流速の時間平均の比と等しい値をとる。そのため、図 8 の包絡線は、式 (24) において A_e を U_0 と断面平均流速の時間平均の比として書かれたものである。

4.3 実験装置および条件 式 (24) を用い、脈動流の流量測定における誤差と測定時間 T の関係を、実験により検討する。実験には、図 9 に示す鉛直据付型の円管水路を用いた。水路は、直径の異なる 2 種類のアクリル製パイプおよびタンクからなる。循環機器として、脈動流を意図的に含ませるため、容積型ポンプである WATSON-MAROW チューブポンプ 520U 型を用いた。ポンプと水路はチューブでつながれており、ポンプから排出される際の脈動が水路に伝わり、脈動流を作り出す。ポンプロータ部の回転周波数 f を 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 Hz に設定し流量を制御した。管内径 $2r$ を代表長さ、実験により得られた断面時間平均流速を代表速度としたときのレイノルズ数はそれぞれ、およそ $Re=1000, 1500, 1900, 2300, 2800, 3100$ である。チューブポンプのロータ部は、二本の円柱がチューブを押しつぶしながら回転することにより流体を駆動しているため、脈動はロータ部回転周波数 f の二倍の周波数で生じる。作動流体には水を使用し、UVP 用のトレーサ粒子として粒径約 $50 \mu m$ のポリエチレン粒子 (みかけ密度 $1.05 g/cm^3$) を混入した。

Fig. 9 Experimental setup for pulsatory pipe flow

測定は直径 25mm の円管について行い、その測定位置はリザーバタンクから 750mm とした。トランスデューサは、管壁面の垂線に対して $\alpha=12$ 度の角度で設置した。空間分解能は 0.38mm に設定した。このとき円管内の測定点数は 65 点である。時間分解能は 24ms とし、2048 プロファイル (約 50 秒間) の測定を行った。

4.4 実験結果 ポンプロータ部の回転周波数 f を 1.5Hz に設定し、得られた時空間速度分布を図 10 に示す。縦軸は、円管内の測定線上の位置、横軸は測定時間、カラースケールは速度を表している。図には縦の縞模様が見られる。これは、管内で流速が時間振動していることを示している。測定時刻 $t_p=0\sim 10$ 秒間においては、約 4 本の縞が見て取れる。さらに、 $t_p=24\sim 26$ 秒間における速度分布を拡大し図 11 に示す。図より、この 2 秒間に約 18 本の縞模様が現れている。これらより、本実験装置を用いた脈動流は、複数の周波数成分が混在していることが確認できる。ここに例示する以外のロータ回転周波数においても、同様の複数の周波数成分が確認された。

脈動の周波数成分を得るため、各測定時刻における瞬時流量 $Q_p(t_p)$ を算出し、その時系列データについてフーリエ解析を行った。結果を図 12 に示す。スペクトルから、ロータ回転周波数の二倍に相当する 3Hz およびその高調波の 6Hz, 9Hz, 12Hz が確認できる。また、加えて、それらよりも低周波数である、0.42Hz の周波数が含まれていた。その他のロータ回転周波数においても同様な低周波数が検出された。これらの低周波数は、リザーバタンク内の対流における非定常性によるものや、オープンタンクにおける水位の変動が挙げられるが、明らかではない。

周波数解析によって得られた、0.42Hz を含めた周波数をそれぞれ式 (24) に代入し、単純和として重ね合わせることで理論誤差 E_{env} の計算を行った。このとき、真の流量 Q_{true} は UVP により、測定点数および測定時間を十分に考慮して、正確に計測した値を用いた。その測定点数は 65 点、時間分解能は 24ms で 4096 プロファイル (約 100 秒間) 計測を行い、管内流を乱流と仮定し、式 (17) を用いて誤差補正を行った値とした。誤差の振幅 A_e は流量の標準偏差を Q_{true} により除した値とした。ロータ回転周波数が大きくなるにつれ A_e は大きな値を示した。

UVP による流量測定誤差は、式 (20) の絶対値 $|E_p|$ として求めた。図 13 に、測定時間 T に対する $|E_p|$ および E_{env} の関係を示した。図より、誤差は、 $T=11\sim 16$ 秒、40 $\sim$ 50 秒付近で包絡線と接してお

Fig. 10 Spatio-temporal velocity fluctuation (long period)

Fig. 11 Spatio-temporal velocity fluctuation (enlarged)

Fig. 12 Power spectrum of fluctuation of flow rate, when rotating frequency of pump rotor $f=1.5$ Hz

Fig. 13 Reduction of error with respect to measuring time T on simulation and experiment, when rotating frequency of pump rotor $f=1.5$ Hz

Fig. 14 Reduction of error with respect to measuring time T on simulation and experiment, when rotating frequency of pump rotor $f = 3\text{Hz}$

り、その推移もよく一致している。同様に、ロータ部の回転周波数が 3Hz の場合についても、 $|E_p|$ と E_{env} はよく一致している (図 14)。これらの結果から、測定誤差の推移が式 (24) に従うことが証明された。上記の結果から、実際の測定において流量測定時間 T を決定するための、以下の手順を提言する。まず、対象となる管路内について、瞬時流量の時間変化を UVP により測定する。次に、流量変動の周波数解析により、脈動流量に含まれる周波数を求める。得られた周波数を式 (24) に代入し、誤差の推移を見積もるための包絡線を導く。得られた式と目標とする許容誤差により、測定時間 T を決定する。例えば、本研究で用いた検証実験において、目標とする許容誤差を 1% 以下に設定した場合、測定時間 T はポンプロータを $f = 1.5\text{Hz}$ で回転させた場合には $T = 59$ 秒、 $f = 3\text{Hz}$ では $T = 93$ 秒を要することになる。

ところで、本論文の目的について誤解のないよう補足するが、ここでは高精度な平均流量の測定のための必要な測定時間を評価しているものであり、瞬時の流量それ自体は脈動の有無や周波数に係わらず正確に得ていることを付記しておく。すなわち時刻 T_1 から T_2 までの間に通過した流体の体積を測定するという目的の場合は、脈動やその周波数に依存せず第一原理式

(1) を時間軸に T_1 から T_2 まで定積分することで得られる。従って、脈動流の周波数自体が時間変化するような体系においても何ら問題は新たに生じない。また、本研究では意図的に大きな振幅をもつ脈動流をとりあげたが、第 1 節で述べたとおり、定常流の流量を測定する場合でも、測定精度を高く設定するほど空間分布だけでなく、時間的な流量のわずかな揺らぎが誤差低減に制約を与える。すなわち、管内流の流量の測

定精度を追求することは、空間分布だけの次元ではなく時空間分布として取り扱う必要がある。ここでは、このような問題を大きな脈動振幅にして理論値と実験値が符号することを述べたものである。

5. 結 言

UVP を用いた管内流量測定について、速度測定点数と誤差の関係を数値シミュレーションにより示し、その検証実験を行った。その結果として、層流や乱流などの流れの状態に関わらず、管内の測定点数を 100 点程度にすることにより、 1% 以下の誤差で測定可能であることを示した。本研究では数値シミュレーションを行う上で、 $1/7$ 乗則などの理想的な速度分布を使用した。この流量測定法では、速度分布形状に依存する補正係数を必要としないため、より一般的な、複雑な速度分布を持つ流れにおいても、同様に高精度の測定が可能である。

また、脈動を伴う管内流と平均流量測定における誤差と測定時間の関係について、同様に数値シミュレーションと検証実験により検討した。その結果、誤差は脈動の振幅に比例し、脈動の角周波数および測定時間に反比例することを明らかにした。また、この関係式より平均流量を正確に得るための適切な必要測定時間の算出方法を確立した。

参考文献

- (1) 日本機械学会, 技術資料流体計測法, (1991), 165 - 222, 丸善.
- (2) 日本機械学会編, 熱流体の新しい計測法, (1998), 148 - 163, 養賢堂.
- (3) Y. Takeda, Instantaneous Velocity Profile Measurement by Ultrasonic Doppler Method, *invited paper to the JSME International Journal*, B 38 (1995), 8-16.
- (4) Takeda, Y., Velocity Profile Measurement by Ultrasonic Doppler Method, *Exp. Therm. and Fluid Sci.*, 10(1995), 444-453.
- (5) 大窪・武田・石川, 超音波 TECHNO, 16 - 1 (2004), 日本工業出版.
- (6) 森・武田, 超音波 TECHNO, 15 - 6 (2003), 日本工業出版.
- (7) Mori M., et al., Development of a novel flow metering system using ultrasonic velocity profile measurement, *Experiments in Fluids*, 32(2002), 153-160.

- (8) Takeda, Y., et al., Development of a new flow metering system using UVP, In *Proc. 2000 ASME Fluid Eng. Div. Summer Meet.*, (2000), FEDSM2000-11102.
 - (9) 手塚・ほか 4 名, 原子力学会 2003 春 要旨集, II - J2 (2003), 428.
 - (10) 和田・ほか 4 名, 原子力学会 2003 春 要旨集, II - J4 (2003), 430.
 - (11) Berrebi, J. , et. Al. , Reducing the flow measurement error caused by pulsations in flows, *Flow Measurement and Instrumentation*, 15(2004), 311-315.
 - (12) Uchida, S., The Pulsating Viscous Flow Superpose on the Steady Laminar Motion of Incompressible Fluid in a Circular Pipe, *Z. Angew. Math. Phys.*, 7(1956), 403-422.
-