

# 層流型多層方式における超音波流量計測技術

Ultrasonic Flow-Measuring Technique Using Laminar-Type Multi-Layer Method

佐藤 真人  
Masato Sato

永原 英知  
Hidetomo Nagahara

中林 裕治  
Yuji Nakabayashi

## 要 旨

超音波による流量計測は、古くから行われてきた技術である。この主要課題の1つは、流量補正係数特性のフラット化である。層流型多層方式を用いた超音波流量計測では、矩形（くけい）断面の計測流路を多層分割し、流路の高さ方向と、幅方向における流速分布の均一性を図った構成としている。本報告では、矩形断面流路を複数層に分割し、それぞれを層流状態に設定することでフラット化を達成する技術について、この方式における特長を実験による流速分布の確認とシミュレーションにより明らかにし、超音波を用いた流量計測技術としての有用性を明らかにした。

## Abstract

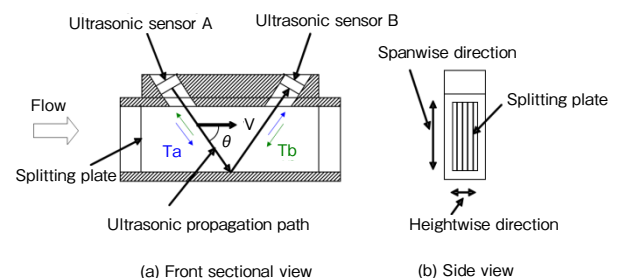
The ultrasonic flow meter has been used for a long time. One of the main problems with this meter is the difficulty in attaining a constant value for the flow rate correction factor, which means attaining a flat curve for this factor. A rectangular cross-sectional channel is divided into multiple layers so as to attain a uniform velocity profile in both the heightwise and spanwise direction of the measurement channel in an ultrasonic flow-measuring technique. In this paper, a rectangular, cross-sectional channel is divided into multiple layers by splitting plates. With this arrangement, the velocity profile between layers becomes uniform and a two-dimensional velocity profile is realized; this makes it possible to attain a flat curve. This feature was investigated by experiments and simulation and the usefulness of this method was revealed.

## 1. はじめに

超音波による流量計測は、古くから行われてきた技術である。この主要課題の1つは、流量補正係数特性のフラット化（一定値を保つ）である。従来、矩形（くけい）断面の流路を用い、流路断面全域に超音波を発することにより、フラット化を達成できることが報告されている[1]。また端的に、測定を層流域で行うことにより、フラット化を達成する方式も報告されている[2]。筆者らは、これらとは異なる方法として、矩形断面流路を複数層に分割し、それぞれを層流状態に設定することでフラット化を達成する技術（層流型多層方式）を開発している[3][4]。本報では、この方式における特長を実験とシミュレーションによる流速分布の評価により明らかにし、超音波を用いた流量計測技術としての有用性を明らかにした。

## 2. 計測原理

計測原理を第1図に示す。第1図(a)は、本方式における超音波流量計の正面の断面図である。第1図(b)の側面図に示すように、流路全体は矩形断面をしており、内部は、複数層（この図では5層）に分割されている。流れは矢印の方向である左側から流入させる。超音波はセンサAとセンサBをV字型に結ぶ伝搬路にそって、送受信さ



第1図 計測原理

Fig. 1 Measurement principle

れる。センサAからセンサBへの伝搬時間を $T_a$ 、センサBからセンサAへの伝搬時間を $T_b$ とすると、流速 $V$ は、(1)式により求められる。ここで、 $L$ は超音波が流路内を通過する伝搬距離、 $\theta$ は流れと超音波の伝搬路とがなす角度である。

$$V = \{L / 2 \cos \theta\} \{ (1 / T_a) - (1 / T_b) \} \quad \dots \dots \dots (1)$$

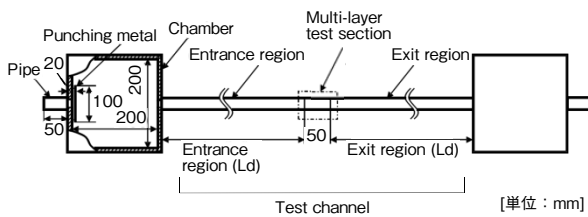
このとき求められた流速から平均流速を求めるため、補正係数 $k$ を導入する。これにより流量 $Q$ は(2)式で求められる。ここで、 $S$ は流路の断面積である。補正係数 $k$ が1のときは、補正が不要なため精度の高い流量計測が可能となる。

$$Q = (kV)S \quad \dots \dots \dots (2)$$

本方式では、あとで詳しく述べるように、流路を複数の層に分割し、この層の高さを代表長さとして用いたレイノルズ数が最大流量でも層流になるように設定する。これにより、多層部では、層内で発達する境界層に基づく抵抗により、各層間での流速分布の均一化が図られる。また、複数層に分割することにより、各層の断面のアスペクト比が大きくなり、多層部における第1図 (b) における上下方向である幅方向の二次元性が向上する。以上により、多層部の高さ方向の流速分布の均一性、幅方向の均一性を確保することができ、超音波による流量計測を高精度で行うことのできる条件が保障される。

### 3. 実験装置

本方式の有効性を検証するための実験に用いた実験装置を第2図に示す。

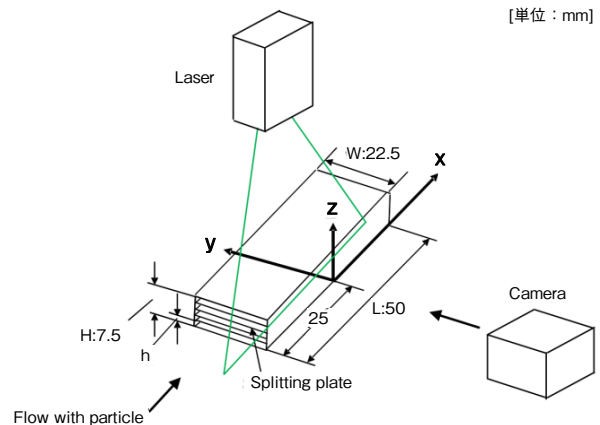


第2図 実験装置  
Fig. 2 Testing apparatus

第2図において、テスト流路は、入口部、多層部、出口部より構成されている。入口部、出口部の長さ (Ld) は、300 mm、とした。チャンバを構成する壁面の厚みが10 mmあり、入口部、出口部にそれぞれ追加される。チャンバは、内部の寸法が200 mmの立方体空間を形成している。空気は図の左側より流入する。テスト流路は、すべて透明な材料で作成している。

第3図に多層部の構成の斜視図を示す。この図は5層の例を示しており、矩形のテスト流路の寸法は高さ (H) 7.5 mm、幅 (W) 22.5 mmそして長さ (L) 50 mmとしている。矩形断面の流路は厚さ0.3 mmの仕切り板4枚で各層均一に区切られている。実験装置の座標原点は図に示すように、x方向は中央、z方向およびy方向については多層部の端部とした。実験は1, 3, 5層タイプについて行った。1層タイプとは仕切り板を設けない場合であり、多層との比較のために用いた。本文中で、高さ方向とはz方向、幅方向とは、y方向のことである。

流速分布の測定は、PIV実験装置 (粒子画像計測方法) を用いて行った。この図では、高さ方向の流速分布を確認するPIV実験装置の配置例も合わせて示している。流



第3図 多層部の構成 (5層タイプ)  
Fig. 3 Multi-layer Test Section (5-layer type)

入口から粒子を含んだ流体を流し、Z方向よりレーザー光を照射し、y方向からカメラで粒子画像を取得し流速分布を得る。

第1表に実験およびシミュレーションで用いた多層部の寸法および2種類の流量条件とそのときのレイノルズ数を示す。レイノルズ数は、各層の層間寸法を代表長さとして算出した。試験モデルの寸法関係は6000 L/hのときに、高アスペクト比でレイノルズ数が層流領域に当てはまる条件とした。また、3層タイプは5層タイプの比較対象とした。

シミュレーションは実験装置と同等にモデル化し、有限体積法を用いて行った。

第1表 多層部の寸法および実験条件のレイノルズ数  
Table 1 Reynolds number for each experiment and dimension of the multi-layer test section

Type		1 Layer	3 Layer	5 Layer
Dimension				
Layer height (h) [mm]		7.50	2.30	1.26
Aspect ratio (W/h)		3.00	9.78	17.86
Reynolds number	40 [L/h]	31	10	6
	6000 [L/h]	4618	1539	924

### 4. 実験およびシミュレーション結果

#### 4.1 高さ方向の流速分布

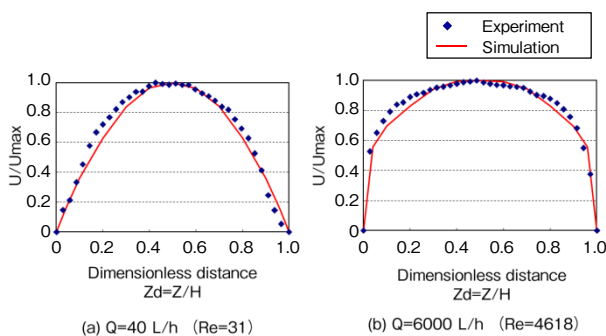
##### [1] 多層部中央の確認結果

第4図は、1層タイプのx=0 mm、y=11.25 mmにおけるx-z面の高さ (z) 方向の流速分布である。PIV実験での測定結果とシミュレーション結果を示している。横軸Zdはz方向の距離を高さ (H) で規格化したものである。また、

縦軸 $U/U_{max}$ はx方向の流速 $U$ をU方向の最大流速 $U_{max}$ で規格化したものである。流量は40 L/hと6000 L/hである。シミュレーションの解析条件として、40 L/hを層流モデルで行い、6000 L/hは標準 $k-\varepsilon$ モデルで行った。

40 L/hのときは、放物線型の層流の流速分布を示している。

一方、6000 L/hでは矩形型の乱流の典型的な流速分布である。いずれも、実験結果とシミュレーション結果は比較的良好に一致している。

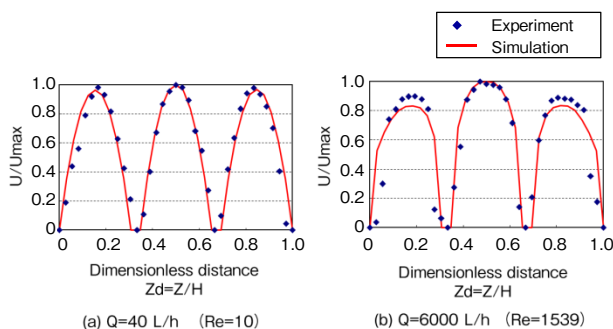


第4図 高さ方向の流速分布 (1層タイプ)

Fig. 4 Velocity profile in the heightwise direction (1-layer type)

第5図は、第4図と同じ位置における3層タイプの実験結果とシミュレーション結果を示したものである。40 L/hのときは、分割された各層の流速分布はそれぞれ層流の流速分布であり、シミュレーション結果ともよく一致している。一方6000 L/hでは、流速分布は放物線型から少し変化しており、乱流の流速分布形状に近づいていることがわかる。この場合においても実験とシミュレーションは定性的に一致している。40 L/hと6000 L/hの流速分布のパターンの差は1層タイプと比較して小さくなっている。

また、ほかの特徴として6000 L/hでは外側の層の流速の最大値が内側の層より低くなっている。これは多層部



第5図 高さ方向の流速分布 (1層タイプ)

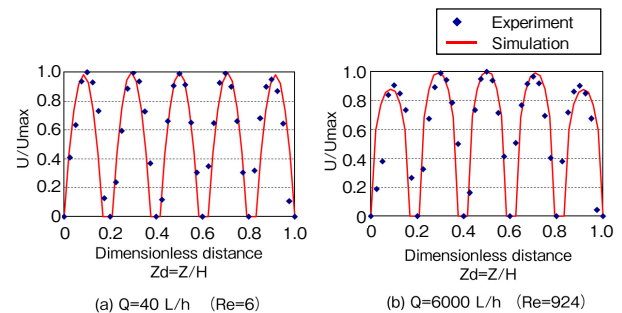
Fig. 5 Velocity profile in the heightwise direction (1-layer type)

へ入る前の入口部である助走区間が長い間、この間で発達した境界層の影響によるものと思われる。この傾向は、シミュレーション結果でも表現されている。

第6図は、第4図と同じ位置における5層タイプの実験結果とシミュレーション結果を示したものである。

5層タイプについての実験結果は、40 L/h、6000 L/hともに流速分布が層流の放物線型である。シミュレーション結果と実験結果は、よく一致している。40 L/hと6000 L/hで流速分布のパターンの差は、3層タイプと比較してさらに小さくなっている。以上の結果でわかるように、3層タイプ、5層タイプへと層の数が増えるにしたがって、流速分布の各層間で均一性が増えてくる。この均一性は、層の内部における境界層の発達による。その抵抗効果に依存するものと思われる。

なお、6000 L/hは入口部、出口部で乱流領域となるため、乱流モデルで解析しているが、5層タイプのように多層部で層流領域となる場合には、乱流領域と混在するため、DNS (直接数値解析) などの解析手法による検討も必要である。



第6図 高さ方向の流速分布 (5層タイプ)

Fig. 6 Velocity profile in the heightwise direction (5-layer type)

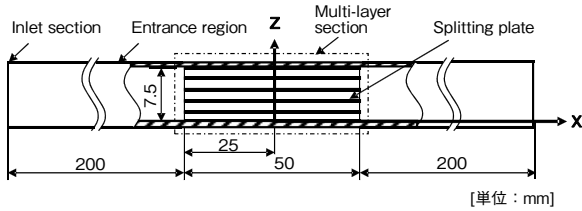
## [2] シミュレーションによる助走部の確認結果

前項において、PIV実験結果とシミュレーション結果は、よく一致していることが確認できたため、ここではシミュレーションを用いて以下の確認を行った。

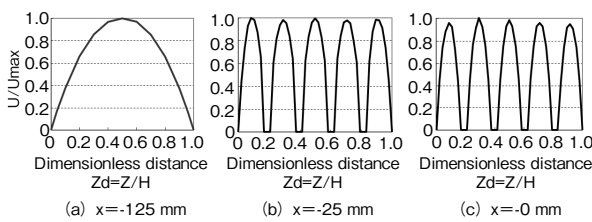
多層部中央に至るまでの、入口部における流速分布の変化を確認するため、第7図に示す5層タイプのシミュレーションモデルを用いた。寸法およびモデルの座標系は第3図と同様である。

第8図は、40 L/hのときのY方向 (奥行き方向) が $y=11.25$  mm, X方向 (流れ方向) が $x=-125$  mm,  $x=-25$  mm,  $x=0$  mmにおけるx-z面の高さ方向の流速分布結果である。この図に表れているように、 $x=-125$  mmの位置で放物線状の流速分布が、 $x=-25$  mmで5分割され各層ともほぼ同一の放物線形状となり、各層の均一化が図られていることがわかる。この形状は $x=0$  mmの位置でも維持されてい

る。これは、多層内部で発達する境界層の抵抗効果によるものと考えている。

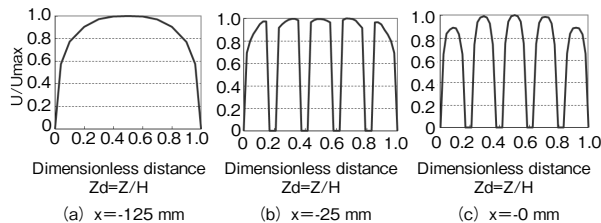


第7図 シミュレーションモデル図 (5層タイプ)  
Fig. 7 Test model for simulation (5-layer type)



第8図 シミュレーションによる高さ方向の流速分布 (40 L/h)  
Fig. 8 Velocity profile in the heightwise direction by simulation (Q = 40 L/h)

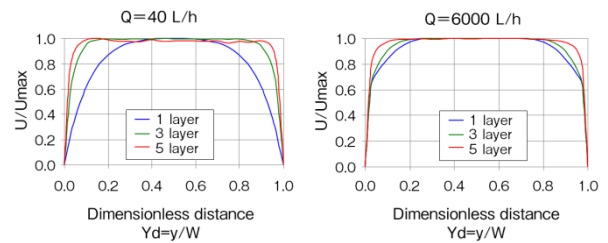
第9図は6000 L/hのときのY方向が $y=11.25$  mm, X方向が $x = -125$  mm,  $x = -25$  mm,  $x = 0$  mmにおけるx-z面の高さ方向の流速分布である。この図に示すように、 $x=-125$  mmの位置で比較的平たんな流速分布が、 $x=-25$  mmのところでは層状に5分割されている。このときの流速分布は、 $x=-125$  mmで見られる流速分布を分割したような状態であるが、 $x=0$  mmでは各層の境界層が発達しそれぞれが層流の速度分布の状態となり、中央の3層が均一化される傾向にある。また、中央の3層と比較して、外側の層で流速が少ないのは助走区間で発達した境界層の抵抗成分による影響のものと思われる。



第9図 シミュレーションによる高さ方向の流速分布 (6000 L/h)  
Fig. 9 Velocity profile in the heightwise direction by simulation (Q = 6000 L/h)

## 4.2 幅方向の流速分布

第10図は第3図における多層部の幅方向の40 L/hと6000 L/hの流速分布を、Z方向を $z=3.75$  mm, X方向を $x=0$  mmにおいて、シミュレーションにより求めた結果である。モデルは第7図と同一である。横軸の $y_d$ は、y軸方向の距離を幅Wで無次元化した値である。縦軸は $U/U_{max}$ である。40 L/hおよび6000 L/hのいずれも、1, 3, 5層タイプと層の数が増加するに伴い、流速分布一定の範囲が拡大し二次元性の向上が見られる。この傾向は40 L/hにおける層流の場合が著しい。計測原理の第1図でもわかるように、流速の計測は二次元平面上で行われることが前提となっているため、多層化による二次元性の向上は、計測精度の向上に寄与するものである。



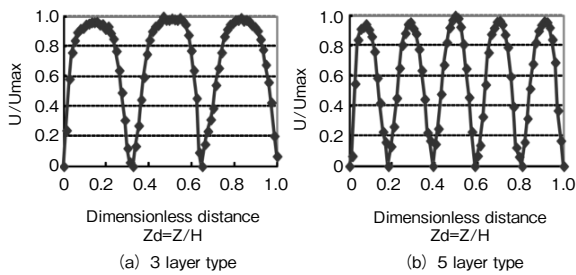
第10図 シミュレーションによる幅方向の流速分布  
Fig. 10 Normalized velocity profile in the spanwise direction by simulation

## 5. 実用化モデル

第2図の実験装置で、入口部、出口部の長さ ( $L_d$ ) が300 mmのものは、基礎実験用として用いたものである。この区間は、チャンバからの流体の流速分布を放物線型に十分に発達させるための助走区間として設けたものである。実際は、そのような長い助走区間を有するものではないため、実用的なモデルとして、入口部、出口部の長さ ( $L_d$ ) が20 mmのものによる実験を行った。

### 5.1 高さ方向の流速分布

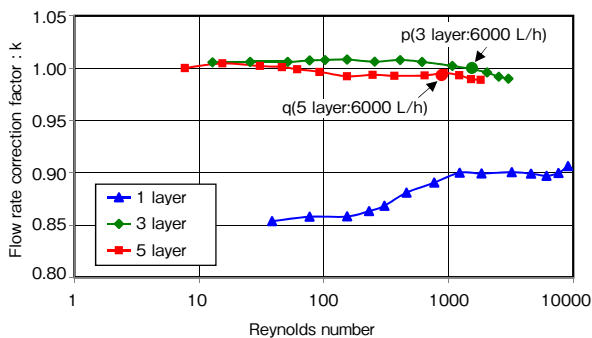
実用化モデルのPIV実験結果を第11図に示す。(a) は3層タイプの場合、(b) は5層タイプの場合で、いずれも流量は6000 L/hである。流速分布はいずれの場合も、多層間でほぼ均一になっている。この場合は、入口部の長さが短いため、この区間における境界層の発達が少なく、第5図 (b)、第6図 (b) で示した状態からさらに均一化が改善されていると考えられる。



第11図 実用化モデルの高さ方向の流速分布 ( $Q = 6000 \text{ L/h}$ )  
Fig. 11 Flow profile of the practical model ( $Q = 6000 \text{ L/h}$ )

## 5.2 流量補正係数の特性

実用化モデルに第11図で示すように、超音波センサを取り付け、流量補正係数特性を測定した結果を第12図に示す。多層部としては、1, 3, 5層タイプを用いた。なお、超音波センサの直径は、多層部の高さ (H) より大きい値となっている。



第12図 流量補正係数特性  
Fig. 12 Characteristics of flow rate correction factor

第12図からわかるように、1層タイプは流量係数が1からかなり離れた位置にある。超音波センサは、多層部の高さより大きいが、超音波は、その高さの範囲内で強度分布を有しており、層流の放物線状流速分布のピークとなる流速が大きい位置をとらえるため、流量係数は小さな値となっていると思われる。

3, 5層タイプの結果でわかるように、矩形流路を分割するだけで、流量補正係数がフラット化され、その値も1に近くなっている。これは、これまで述べたように、多層化により、各層間の流速分布が均一化され、超音波がその平均化された部分をとらえているためであると思われる。また、流量も40 L/hから12000 L/hの広範囲にわたり流量補正係数は、ほぼフラットに保たれている。

第12図でp点での流速分布は第11図 (a) に、また、q点での流速分布は第11図 (b) に該当する。5層タイプのq点では層流状態が維持されており、少なくともこの流量

までのフラット化が層流状態で達成されている。3層タイプのp点では、流速分布は放物線状ではなく、乱流状態に遷移している。しかしながら、流量補正係数のフラット状態からの誤差は、比較的小さい範囲にとどまっている。

この例で示すように、多層間にわたる流速分布の均一性が維持されておれば、多層内の流れは必ずしも層流でなくても、流量補正係数のフラット化がある程度、達成されるものである。

このように、多層化することにより、流量補正係数の値は誤差幅が小さい状態で、広い流量範囲にわたり一定の値が保たれるため、流量測定の精度向上につながるものである。また、この効果を生み出す多層部での境界層の発達は、層流の場合は短い距離で行われるため、計測部全体のコンパクト化にも寄与するものである。

## 6. まとめ

層流化多層方式による超音波流量計測技術のメカニズムを調べて、以下のことが確認された。

(1) 矩形断面流路を複数層に分割することにより、高さ方向と幅方向の均一な流速分布が形成される。高さ方向の均一な分布は、境界層の抵抗効果により生じる。幅方向の均一な分布は、各層の高アスペクト比により生じる。これらの特長は各層における流れが層流になるように、層の高さを定めることにより実現される。この流れ状態は、超音波での流量計測に適したものである。

(2) 流路の多層分割により流量補正係数特性の大幅な向上が見られた。矩形断面 (高さ7.5 mm, 幅22.5 mm) の流路を、3もしくは5分割することにより、流量補正係数特性のフラット化が行われる。これはとりわけ、層流域において著しい。しかしながら、乱流域においても、フラット化された補正係数の誤差はわずかな範囲にとどまる。これらの特徴は主に高さ方向における流速分布の均一化に起因するものである。

なお、本報告はモデル化した実験装置での検討のため、チャンバからの整った流れを解析した。実際には、計測部上流側の流れはさまざまな様相を呈するため、それぞれの状況に応じた工夫が必要となる。

本方式は、上記結論に示した特長を有しており、超音波流量計測の一手法として、今後幅広く利用できるものと思われる。

## 参考文献

- [1] A. von. Jena et al., “Ultrasound gas-flow meter for household application,” *Sensors and Actuators A*, vol. 37-38, pp. 135-140, 1993.
- [2] Nozomu Nagai et al., “Basic Design of the Rectangular Duct of a Low Flow Rate Ultrasonic Flow Meter,” *Proc. FLUCOME2007*, Florida, pp.1010-1020, 2007.
- [3] 別荘大介 他, “層流型多層 (LML) 方式 超音波流量計測技術,” *日本機械学会誌*, vol. 110, no. 1066. p. 738, 2007.
- [4] Masato Sato et al., “ Ultrasonic Flow Measuring Technique Using Laminar Type Multi-layer Method,” *Proc. FLUCOME 2013*, Nara, OS2-03-4, 2013

## 執筆者紹介



佐藤 真人 Masato Sato  
アプライアンス社  
スマートエネルギーシステム事業部  
Smart Energy System Business Div.,  
Appliances Company



永原 英知 Hidetomo Nagahara  
アプライアンス社  
スマートエネルギーシステム事業部  
Smart Energy System Business Div.,  
Appliances Company



中林 裕治 Yuji Nakabayashi  
アプライアンス社  
スマートエネルギーシステム事業部  
Smart Energy System Business Div.,  
Appliances Company