

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局

(43) 国際公開日  
2018年5月3日(03.05.2018)



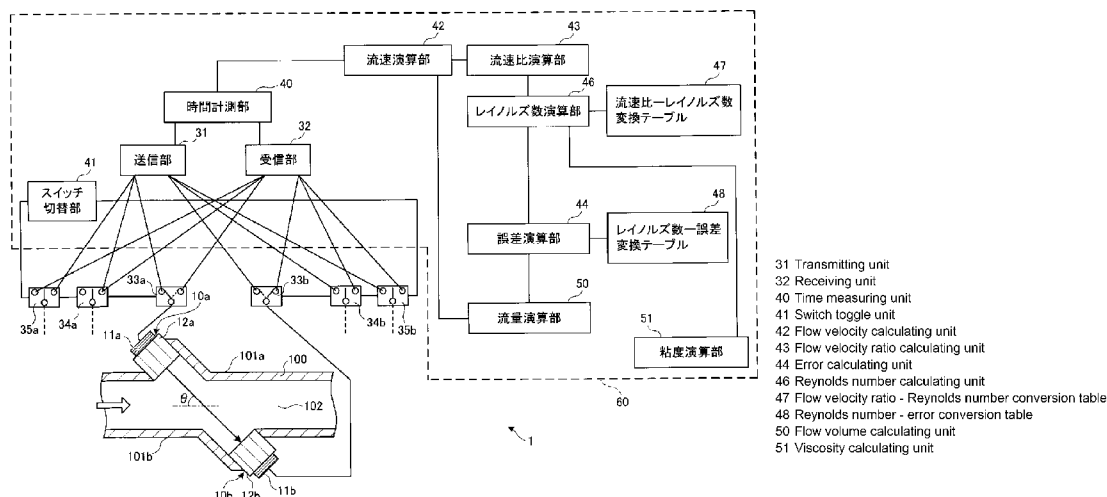
(10) 国際公開番号

WO 2018/079269 A1

- (51) 国際特許分類:  
G01F 1/66 (2006.01) G01N 29/024 (2006.01)  
G01F 1/00 (2006.01) G01P 5/24 (2006.01)  
G01N 11/04 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2017/036900
- (22) 国際出願日: 2017年10月12日(12.10.2017)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願 2016-208860 2016年10月25日(25.10.2016) JP
- (71) 出願人: 富士電機株式会社 (FUJI ELECTRIC CO., LTD.) [JP/JP]; 〒2109530 神奈川県川崎市川崎区田辺新田1番1号 Kanagawa (JP).
- (72) 発明者: 木代 雅巳 (KISHIRO, Masami); 〒2109530 神奈川県川崎市川崎区田辺新田1番1号 富士電機株式会社内 Kanagawa (JP).  
森本 泰文 (MORIMOTO, Yasufumi); 〒2109530 神奈川県川崎市川崎区田辺新田1番1号 富士電機株式会社内 Kanagawa (JP).
- (74) 代理人: 青木 宏義, 外 (AOKI, Hiroyoshi et al.); 〒1020076 東京都千代田区五番町5番地1 J S市ヶ谷ビル5F Tokyo (JP).
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ,

(54) Title: FLUID MEASURING DEVICE

(54) 発明の名称: 流体計測装置



(57) **Abstract:** The objective of the present invention is to provide a fluid measuring device with which it is possible to measure easily and accurately a physical quantity relating to a fluid with a higher degree of accuracy than in the past, irrespective of whether flow is laminar or turbulent. A fluid measuring device (1) forms a plurality of traverse lines by transmitting and receiving ultrasonic waves, from a plurality of ultrasonic probes installed in a pipeline (100), into and from a fluid (102) inside the pipeline, and obtains a physical quantity relating to the fluid using a control unit (60). The control unit is configured to include: a flow velocity calculating unit (42) which calculates flow velocities of the fluid, measured using the plurality of traverse lines; a flow velocity ratio calculating unit (43) which calculates a flow velocity ratio on the basis of the flow velocities of the fluid; and a physical quantity calculating unit (Reynolds number calculating

BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 一 国際調査報告(条約第21条(3))

unit (46), flow volume calculating unit (50), viscosity calculating unit (51)) which calculates the abovementioned physical quantity on the basis of the flow velocity ratio.

(57) 要約: 従来に比べて、層流・乱流にかかわらず高精度で流体の物理量を容易に且つ精度よく、計測することができる流体計測装置を提供することである。配管(100)に設置した複数の超音波プローブから配管内の流体(102)へ超音波を送受信することにより複数の測線を形成し、制御部(60)にて、流体の物理量を求める流体計測装置(1)において、制御部は、複数の測線で計測した流体の流速を演算する流速演算部(42)と、流体の流速に基づいて流速比を演算する流速比演算部(43)と、流速比に基づいて、前記物理量を演算する物理量演算部(レイノルズ数演算部(46)、流量演算部(50)、粘度演算部(51))と、を有する構成とした。

## 明 細 書

**発明の名称：** 流体計測装置

### 技術分野

[0001] 本発明は、超音波により、配管内の流体の流量やレイノルズ数等の物理量を計測する流体計測装置に関する。

### 背景技術

[0002] 従来から、配管を流れる流体の流量を計測するにあたり、超音波を利用した流量計測装置が知られている（特許文献1参照）。超音波による流量計測装置では、配管に、複数の超音波送受信部を配置し、交互に超音波の送受信を行って、その伝搬時間の差から流量を検出するものである。

### 先行技術文献

#### 特許文献

[0003] 特許文献1：特開昭55-160814号公報

### 発明の概要

#### 発明が解決しようとする課題

[0004] ところで、流量計測の場合、流体の配管内の流速分布を求めることが必要である。流速分布は、レイノルズ数により変化する。このため、レイノルズ数を求めることが必要となるが、レイノルズ数を求めるには、配管寸法、流体の流速、更には、流体の動粘度が必要である。このうち、流体の流速は、超音波送受信部より得られた信号に基づく測定値を使用できるが、配管寸法と動粘度は、代表値をあらかじめ入力しておく必要があった。特に、動粘度は、流体温度によって変化する。このため、あらかじめ動粘度の温度特性を測定してテーブル等を作成し保存しておかなければならない。そして、別途、温度を測定して正確な動粘度を求める等、複雑な補正をする必要があり、簡単に、流量を計測することができなかった。また、複雑な補正により、精度良く流量を計測することができなかった。

[0005] また、従来の流量計測装置にて、流体の流量を計測する際、超音波の測線

は、線であるため、配管断面全体の平均流速に対し誤差を生じるという課題があった。

[0006] 例えば、特許文献 1 では、ガウス数値積分法を適用して、 $n$  点の測線で測定した平均流速の重み付け加算で、配管断面の平均流速を求めている。

[0007] しかしながら、流速分布は、例えば、乱流域では  $1/n$  乗則で知られるような指数関数で近似されるように高次の項を含む。このため、これにガウス数値積分法を適用すると、積分誤差が発生する。特に、レイノルズ数の小さい層流域からレイノルズ数の大きい乱流域まで広く適用しようとする、層流域では、放物線であった流速分布が、乱流域では  $1/n$  乗の指数関数の形状に大きく変化する。このため、特に乱流域では、レイノルズ数によって誤差が大きく変動し、流体の流量を正確に求めることができない問題があった。

[0008] このため、従来では、精度保証をレイノルズ数で限定し、乱流域、或いは層流域のみとする必要があった。しかしながら、精度保証を、乱流域か層流域かで限定すると、例えば、動粘度が小さい水には、乱流用の流量計を適用し、例えば、動粘度が大きい油には、層流用の流量計を適用するように、流量計を 2 種類用意する必要がある。また、レイノルズ数は、流速や動粘度で変化するので、流速が低い場合は層流だが、流速が高くなると乱流になる場合や、低温では動粘度が大きく層流だが、高温になると動粘度が小さくなり乱流になる場合では、層流域から乱流域まで、精度良く計測できないといった課題があった。

[0009] 本発明は、このような問題に鑑みてなされたもので、その目的とするところは、従来に比べて、層流・乱流にかかわらず、高精度に、流体の物理量を計測することができる流体計測装置を提供することである。

### 課題を解決するための手段

[0010] 本発明の流体計測装置は、配管に設置した複数の超音波送受信部から前記配管内の流体へ超音波を送受信することにより複数の測線を形成し、制御部にて、前記流体の物理量を求める流体計測装置において、前記制御部は、前

記複数の測線で計測した前記流体の流速を演算する流速演算部と、前記流体の流速に基づいて、流速比を演算する流速比演算部と、前記流速比に基づいて、前記物理量を演算する物理量演算部と、を有することを特徴とする。

[0011] この構成により、層流・乱流にかかわらず、高精度に、流体の物理量を計測することができる。

### 発明の効果

[0012] 本発明の流体計測装置によれば、流体の流速比を求め、流速比に基づいて、流体の物理量を演算する。これにより、層流・乱流にかかわらず、高精度に、流体の物理量を計測できる。

### 図面の簡単な説明

[0013] [図1]本実施の形態の流体計測装置を構成する超音波プローブの配管への配置を示す正面図である。

[図2]第1の実施の形態の流体計測装置のブロック図である（なお、図1に示すA—Aに沿って切断し矢印方向から見た配管、及び、超音波プローブの部分断面図を含む）。

[図3]流体の流速比と、レイノルズ（ $Re$ ）数との相関を表したグラフである。

[図4]レイノルズ（ $Re$ ）数と、誤差 $\varepsilon$ との相関を表したグラフである。

[図5]第2の実施の形態の流体計測装置のブロック図である（なお、図1に示すA—Aに沿って切断し矢印方向から見た配管、及び、超音波プローブの部分断面図を含む）。

[図6]流速比と、誤差 $\varepsilon$ との相関を表したグラフである。

[図7]図6の誤差を補正した後の、流速比と、誤差 $\varepsilon$ との相関を表したグラフである。

### 発明を実施するための形態

[0014] 以下、本実施の形態に係る流体計測装置について詳細に説明する。なお、以下の説明では、すべての図面において同様な構成要素には同様の符号を付し、適宜説明を省略する。

[0015] 図1は、本実施の形態の流体計測装置を構成する超音波プローブの配管への配置を示す正面図である。

[0016] 図1に示す実施の形態では、配管100は円筒形状であり、配管100には、3組の超音波プローブ（超音波送受信部）が配置されている。すなわち、図1に示す超音波プローブ10aと、超音波プローブ10bとが組とされ、超音波プローブ13aと、超音波プローブ13bとが組とされ、超音波プローブ14aと、超音波プローブ14bとが組とされている。

[0017] これら各組の超音波プローブ間で送受信された超音波の3つの測線 $\alpha$ 、測線 $\beta$ 、及び、測線 $\gamma$ は、夫々平行である。このうち、測線 $\alpha$ は、配管100の中心を通過して配管100を横断し、測線 $\beta$ と、測線 $\gamma$ とは、測線 $\alpha$ を挟んで対称位置にある。また、 $R$ は、配管100の内半径を示し、 $r$ は、測線 $\alpha$ と測線 $\beta$ との間の距離、及び、測線 $\alpha$ と測線 $\gamma$ との間の距離を示す。なお、測線位置  $r/R$  は、ガウス数値積分法等の適用する数値積分法に基づいて適宜決定することができる。

[0018] なお、配管100は、円筒形状に限定されるものではなく、測線数も複数であれば3測線でなくても良い。また、測線 $\alpha$ は、配管100の中心を通らなくても良いし、測線 $\beta$ と測線 $\gamma$ が測線 $\alpha$ を挟んで対称であることにも限定されない。なお、各測線 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ は、夫々平行であることに限定されるものでないが、各測線 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ を平行とすることで、平均流速を求めるうえでの数値積分の精度を向上させることができる。

[0019] 図2は、第1の実施の形態の流体計測装置1のブロック図である。なお、図2は、図1に示すA-Aに沿って切断し矢印方向から見た配管100、及び、超音波プローブ10a、10bの部分断面図も含む。

[0020] 図2に示すように、本実施の形態の流体計測装置1は、配管100に設置した複数の超音波プローブ10a、10b、13a、13b、14a、14b（ただし、図2では、超音波プローブ10a、10bのみを図示）と、流体102の物理量を演算する制御部60と、を有して構成される。

[0021] 図2の部分断面図に示すように、配管100の外面101a、101bに

、超音波プローブ10a、10bが配置されている。なお、図2において、図示を省略した超音波プローブ13a、13b、14a、14bに関しては、超音波プローブ10a、10bと配置が異なるだけで以下と同様の構成であるため、説明を省略する。

[0022] 図2に示すように、超音波プローブ10aは、配管100内の流体102の流れに対して上流側に配置され、超音波プローブ10bは、流体102の流れに対して下流側に配置されている。超音波プローブ10aは、超音波振動子11aと楔12aを有して構成され、超音波プローブ10bは、超音波振動子11bと楔12bを有して構成されている。図2に示すように、各超音波振動子11a、11bは、流体102の流れ方向に対して斜めに傾斜して配置されている。

[0023] 図2に示すように、各超音波振動子11a、11bは、夫々スイッチ33a、33bに接続されている。なお、図1に示した超音波プローブ13a、13bは、図2に示す各スイッチ34a、34bに電氣的に接続され、図1に示した超音波プローブ14a、14bは、図2に示す各スイッチ35a、35bに電氣的に接続される。

[0024] 続いて、制御部60について説明する。図2に示すように、制御部60は、送信部31、受信部32、時間計測部40、スイッチ切替部41、流速演算部42、流速比演算部43、レイノルズ数演算部46、流速比ーレイノルズ数変換テーブル47、誤差演算部44、レイノルズ数ー誤差変換テーブル48、流量演算部50、及び、粘度演算部51を有して構成される。

[0025] 送信部31は、各スイッチ33a、33b、34a、34b、35a、35bに電氣的に接続される。送信部31では、スイッチに電氣的に接続された超音波振動子に電気信号を送信し、超音波を発生させる。

[0026] 受信部32は、各スイッチ33a、33b、34a、34b、35a、35bに電氣的に接続される。受信部32では、スイッチに電氣的に接続された超音波振動子からの電気信号を受信する。

[0027] 時間計測部40は、送信部31、及び、受信部32に電氣的に接続される

。時間計測部 40 では、各測線  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ （図 1 参照）における超音波の送信から受信までの伝搬時間を計測する。

[0028] 流速演算部 42 は、時間計測部 40 と電氣的に接続される。流速演算部 42 では、時間計測部 40 から送信された伝搬時間に基づいて、流体 102 の各測線  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  の流速を演算する。また、流速演算部 42 では、配管断面全体の平均流速を、例えば、ガウス数値積分法により、各測線  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  に重み付け加算して演算する。

[0029] 流速比演算部 43 は、流速演算部 42 と電氣的に接続される。流速比演算部 43 では、流速演算部 42 で得られた各測線  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  の流速に基づいて、流速比を演算する。

[0030] レイノルズ数演算部 46 は、流速比演算部 43 と電氣的に接続されている。レイノルズ数演算部 46 では、流速比に基づいて、レイノルズ ( $Re$ ) 数を演算する。

[0031] 流速比－レイノルズ数変換テーブル 47 は、レイノルズ数演算部 46 に電氣的に接続される。流速比－レイノルズ数変換テーブル 47 は、レイノルズ数、及び、流量を演算するにあたって、予め用意されている。流速比－レイノルズ数変換テーブル 47 では、流速比と、レイノルズ数とが相関づけられている。そして、レイノルズ数演算部 46 では、流速比に基づいて、流速比－レイノルズ数変換テーブル 47 からレイノルズ数を演算する。

[0032] 誤差演算部 44 は、レイノルズ数演算部 46 と電氣的に接続される。誤差演算部 44 では、流速演算部 42 にて得られた平均流速の誤差（積分誤差）を求める。この誤差を、図 2 に示す実施の形態では、レイノルズ数と誤差との関係から求めている。

[0033] レイノルズ数－誤差変換テーブル 48 は、誤差演算部 44 に電氣的に接続される。レイノルズ数－誤差変換テーブル 48 は、流量を演算するにあたって予め用意されている。レイノルズ数－誤差変換テーブル 48 では、レイノルズ数と、誤差とが相関づけられている。そして、誤差演算部 44 では、レイノルズ数演算部 46 より取得されたレイノルズ数に基づいて、レイノルズ

数—誤差変換テーブル48から誤差を演算する。

[0034] 流量演算部50は、流速演算部42、及び、誤差演算部44と電氣的に接続される。流量演算部50では、平均流速、及び、誤差に基づいて流量を演算する。

[0035] 次に、図2に示すブロック図を用いて、時間計測から流量演算に至るまでの各種演算処理の流れについて説明する。

[0036] 図2に示すように、スイッチ切替部41からの信号により、送信部31とスイッチ33aとを電氣的に接続する。これにより、超音波振動子11aと、送信部31とが、スイッチ33aを介して電氣的に接続される。また、スイッチ切替部41からの信号により、受信部32とスイッチ33bとを電氣的に接続する。これにより、超音波振動子11bと、受信部32とが、スイッチ33bを介して電氣的に接続される。

[0037] このとき、送信部31では、超音波振動子11aに対し、電気信号を送信し超音波を発生させる。発生した超音波は、楔12aを透過し、配管100内の流体102に入射される。配管100内の流体102に入射された超音波は、流体102の上流側から下流側に向かって、流体102内を入射角 $\theta$ で伝搬する。超音波プローブ10bに伝搬した超音波は、超音波振動子11bで電気信号に変換される。この電気信号は、スイッチ33bを介して、受信部32で受信される。

[0038] このとき、時間計測部40では、超音波の送信から受信までの伝搬時間を計測する。流体102の流れに沿った伝搬時間を $T_f$ とする。

[0039] 続いて、スイッチ切替部41からの信号により、スイッチ33aと、スイッチ33bとを、夫々切り替える（スイッチ33aと、スイッチ33bに点線で示した。後述の図5においても同様）。これにより、超音波振動子11aと、受信部32とが、スイッチ33aを介して電氣的に接続され、超音波振動子11bと、送信部31とが、スイッチ33bを介して接続される。このとき、超音波は、下流側の超音波振動子11bから上流側の超音波振動子11aに向かって伝搬される。そして、超音波プローブ10aにまで伝搬し

た超音波は、超音波振動子 11 a で電気信号に変換される。この電気信号は、スイッチ 33 a を介して、受信部 32 で受信される。

[0040] このとき、時間計測部 40 では、流体 102 の流れに逆らった超音波の伝搬時間を  $T_r$  として計測する。

[0041] これにより、図 1 に示す測線  $\alpha$  の伝搬時間  $T_f$ 、 $T_r$  を取得することができる。ここで、超音波の伝搬時間は、流体 102 の流れの影響を受けて、 $T_f$  は短く、 $T_r$  は長くなる。 $T_f$  と  $T_r$  の差は、流体 102 の流速に応じて変化するので、この差を測定することにより、流体 102 の測線上の平均流速を計測することができる。

[0042] 図 1 に示すように、本実施の形態では、測線  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  が 3 つある。したがって、スイッチ切替部 41 からの信号により、各スイッチ 34 a、34 b、35 a、35 b を、送信と受信との間で切り替えて、測線  $\beta$ 、 $\gamma$  の伝搬時間  $T_f$ 、 $T_r$  も上記と同様の方法で取得する。

[0043] 各測線  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  の伝搬時間  $T_f$ 、 $T_r$  は、時間計測部 40 から流速演算部 42 に送信される。そして、流速演算部 42 では、伝搬時間  $T_f$ 、 $T_r$  から、流体 102 の流速  $V$  を演算する。伝搬時間  $T_f$ 、 $T_r$  は、以下の数式 (1)、(2) より表される。

$$[0044] \quad T_f = L / (C + V \cos \theta) \quad (1)$$

$$T_r = L / (C - V \cos \theta) \quad (2)$$

ここで、 $C$  は、流体 102 の音速、 $\theta$  は、入射角及び、 $L$  は、流体 102 の中を超音波が伝搬する伝搬路長である。

[0045] 各数式 (1)、(2) から、流速  $V$  を、以下の数式 (3) より表すことができる。

$$V = L / 2 \cos \theta \times ((1 / T_f) - (1 / T_r)) \quad (3)$$

[0046] 各測線  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  の流速  $V$  について各々演算し、得られた流速値を、それぞれ  $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$  とする。

[0047] また、流速演算部 42 では、例えば、ガウス数値積分法に基づいて、配管断面全体の平均流速を、各測線  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  に重み付けして求める。ガウス数

値積分法とは、 $(2n-1)$  次の多項式の積分は、 $n$  点の重み付け加算で求められるという数値積分法の一つである。すなわち、 $n$  点の測線で測定した平均流速の重み付け加算で、配管断面全体の平均流速を得ることができる。この平均流速は、レイノルズ数によらず求めることができる。

[0048] 平均流速は、 $w_1 \cdot v_1 + w_2 \cdot v_2 + w_3 \cdot v_3$  の積分値で、求めることができる。ここで、 $w_1$ 、 $w_2$ 、及び、 $w_3$  は、流速値  $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$  の夫々に対する重み付け加算値であり、重み付け加算値  $w_1$ 、 $w_2$ 、及び、 $w_3$  は、規定値である。例えば、本実施の形態では、3 測線 ( $n=3$ ) である。3 測線である場合、配管 100 の中心を通る測線  $\alpha$  は、測線位置  $r/R=0$  であり、測線  $\beta$ 、 $\gamma$  は、測線位置  $r/R=0.7746$  (小数点第 5 位を四捨五入) となるよう調整される。そして、ガウス数値積分法によれば、測線  $\alpha$  (すなわち、流速値  $v_1$ ) の重み付け加算値は、0.4444444 (小数点第 8 位を四捨五入) である。また、測線  $\beta$ 、 $\gamma$  (すなわち、流速値  $v_2$ 、 $v_3$ ) の重み付け加算値は、0.2777778 (小数点第 8 位を四捨五入) である。このような、測線位置 (分点) と重み付け加算値との関係は、一般的に知られている。測線位置 (分点) と重み付け加算値との関係は、適用する数値積分法により決定することができる。本実施の形態では、ガウス数値積分法を代表して用いるが、数値積分法としては、ガウス数値積分法以外に、チェビシェフ積分法や、ロバット積分法を用いることができる。

[0049] 数値積分法では、通常の積分法のように、面積を求める際に、面積内を短冊状に分けて各短冊面積を全て加算するものでなく、特定箇所に重み付け加算を行うものである。そして、数値積分法を、本実施の形態の流体計測装置に適用すると、特定箇所の測線の流速を重み付け加算することで、配管断面全体の平均流速を求めることができる。ただし、数値積分法では、特に、流体 102 の乱流域において、積分誤差変動が大きくなる。そこで、本実施の形態では、流速比、或いは流速比と相関関係のあるレイノルズ数と、誤差 (積分誤差) との関係を見出し、流速比やレイノルズ数から誤差を推定することを可能とした。誤差の具体的な求め方に関しては後述する。

[0050] 次に、流速演算部42で求められた各測線 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ の流速値 $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$ が、流速比演算部43に送られる。そして、流速比演算部43では、流速値 $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$ により流速比 $V_r$ を演算する。

[0051] 図1に示す実施の形態では、測線 $\alpha$ が、配管100の中心を通り、測線 $\beta$ と測線 $\gamma$ は、測線 $\alpha$ に対して左右対称に位置している。このような構成では、例えば、以下の数式(4)で、流速比を演算することができる。

$$V_r = 2 \times v_2 / (v_1 + v_3) \quad (4)$$

[0052] 続いて、レイノルズ数演算部46では、流速比演算部43より得られた流速比に基づいて、レイノルズ( $Re$ )数を演算する。本実施の形態では、流速比 $V_r$ とレイノルズ数との関係を予め、シミュレーション等で導き出している。そして、シミュレーション結果は、流速比－レイノルズ数変換テーブル47として、流体計測装置1の制御部60内に記憶されている。そして、流速比演算部43より得られた流速比 $V_r$ を用いて、流速比－レイノルズ数変換テーブル47からレイノルズ( $Re$ )数を演算することができる。

[0053] 図3は、流体の流速比と、レイノルズ( $Re$ )数との相関を表したグラフである。図3に示す相関関係は、乱流の流速分布の近似式として、 $1/n$ 乗則(具体的には $1/7$ 乗則)を用い、層流の流速分布として放物線を用いて数値解析して得ることができる。図3によれば、流速比 $V_r$ に対してレイノルズ( $Re$ )数は、ほぼ単調に減少している。また、図3の実線で示した乱流域においては、流速比 $V_r$ に対応するレイノルズ数は1つしかなく、レイノルズ数を一意に求めることができる。なお、図4、図6、図7においても同様に、乱流域を実線で示した。なお、層流での流速比 $V_r$ は、一定値とされる。層流域では、流速比からレイノルズ数は特定できないが、後述するように層流域で発生する誤差は一定値なので、誤差を補正することはできる。また、図3に示す点線は、層流と乱流との間の遷移領域を示している。図4、図6、図7においても同様に、層流は、一定値であり、また遷移領域を点線で示した。

[0054] 図2に示す流速比－レイノルズ数変換テーブル47は、図3に示すグラフ

に基づいた変換テーブルを構成している。よって、流速比演算部 43 から得られた流速比  $V_r$  を用いて、流速比—レイノルズ数変換テーブル 47 からレイノルズ ( $Re$ ) 数を演算することができる。

[0055] 続いて、図 2 に示す誤差演算部 44 では、レイノルズ数演算部 46 で取得されたレイノルズ数に基づいて、誤差  $\varepsilon$  を演算する。ここで、誤差  $\varepsilon$  は、ガウス数値積分法等の数値積分法で求めた平均流速に対する積分誤差に相当する。

[0056] 図 2 に示すように、レイノルズ数と誤差  $\varepsilon$  との相関関係は、予め、レイノルズ数—誤差変換テーブル 48 に用意されている。レイノルズ数と誤差  $\varepsilon$  との関係性を予め、シミュレーションして導き出している。そのシミュレーション結果は、レイノルズ数—誤差変換テーブル 48 として、流体計測装置 1 の制御部 60 内に記憶されている。そして、レイノルズ数演算部 46 より得られたレイノルズ数を用いて、レイノルズ数—誤差変換テーブル 48 から誤差  $\varepsilon$  を演算することができる。

[0057] 図 4 は、レイノルズ ( $Re$ ) 数と、誤差  $\varepsilon$  との相関を表したグラフである。図 4 では、数値積分法を用いて重み付け加算して求めた流量測定値の誤差との相関を示している。図 4 に示すように、乱流域では、レイノルズ数により、誤差  $\varepsilon$  の変動が大きいことがわかる。層流域では誤差  $\varepsilon$  は一定値となる。図 3 において、層流域ではレイノルズ数を特定できないと前述したが、層流域であることは判るので、誤差  $\varepsilon$  を求めることができる。

[0058] 図 2 に示すレイノルズ数—誤差変換テーブル 48 は、図 4 に示すグラフに基づいた変換テーブルを構成している。よって、レイノルズ数演算部 46 から得られたレイノルズ数を用いて、レイノルズ数—誤差変換テーブル 48 から誤差  $\varepsilon$  を演算することができる。

[0059] 続いて、図 2 に示す流量演算部 50 にて、以下の数式 (5) により流量  $Q$  を演算する。

[0060] 
$$Q = A \times (w_1 \cdot v_1 + w_2 \cdot v_2 + w_3 \cdot v_3) \times (100 / (100 + \varepsilon)) \quad (5)$$

ここで、 $A$ は、配管100の断面積であり、配管100の内径 $D$ （内半径 $R \times 2$ ）を用いて、以下の数式（6）で表される。

$$A = (D / 2)^2 \times \pi \quad (6)$$

[0061] 数式（5）に表される $w_1 \cdot v_1 + w_2 \cdot v_2 + w_3 \cdot v_3$ の部分は、平均流速を示し、誤差 $\varepsilon$ は、平均流速の積分誤差に該当する。よって、数式（5）の演算により、誤差 $\varepsilon$ を加味して、流量 $Q$ を演算でき、これにより、流量 $Q$ を精度よく演算することができる。

[0062] また、図2に示す粘度演算部51では、レイノルズ数を求める以下の数式（7）を変形した数式（8）を用いて、流体102の動粘度 $\nu$ を演算する。

$$Re = D \cdot v / \nu \quad (7)$$

$$\nu = D \cdot v / Re \quad (8)$$

[0063] なお、数式（7）、及び、数式（8）に示す流速 $v$ には、図1に示す配管100の中心を通る測線 $\alpha$ の流速値 $v_1$ を用いることができる。

[0064] 図5は、第2の実施の形態の流体計測装置1のブロック図である。なお、図5には、図1に示すA-Aに沿って切断し矢印方向から見た配管100、及び、超音波プローブ10a、10bの部分断面図を含む。以下、図2に示す第1の実施の形態のブロック図と異なる箇所を中心に説明する。

[0065] 図5では、図2に示すレイノルズ数演算部46、流速比－レイノルズ数変換テーブル47、レイノルズ数－誤差変換テーブル48、及び、粘度演算部51が設けられていない。一方、図5に示す第2の実施の形態では、誤差演算部44が、流速比演算部43と電氣的に接続されており、誤差演算部44では、流速比演算部43から流速比を取得し、流速比に基づいて、誤差 $\varepsilon$ を演算する。

[0066] また図5に示すように、流速比－誤差変換テーブル45は、誤差演算部44に電氣的に接続される。流速比－誤差変換テーブル45は、流量を演算するにあたって予め用意されている。流速比－誤差変換テーブル45では、流速比と、誤差 $\varepsilon$ とが相関づけられている。そして、誤差演算部44では、流速比に基づいて、流速比－誤差変換テーブル45から誤差 $\varepsilon$ を演算する。

- [0067] 図5に示すように、流量演算部50は、流速演算部42、及び、誤差演算部44と電氣的に接続される。流量演算部50では、平均流速、及び、誤差に基づいて流量を演算する。
- [0068] 図6は、流速比と、誤差 $\varepsilon$ との相関を表したグラフである。既に説明した図3、及び、図4の相関関係により、流速比からレイノルズ数を求めることができ、レイノルズ数から誤差 $\varepsilon$ を推定できる。よって、流速比から誤差 $\varepsilon$ を推定することができる。
- [0069] 図6に示す乱流域においては、流速比と誤差 $\varepsilon$ との関係を、2次関数で近似（最小二乗法）でき、或いは、折線近似できる。
- [0070] すなわち、図5に示す誤差演算部44では、例えば、流速比—誤差変換テーブル45から2次関数で近似した式を導き出し、流速比演算部43から取得された流速比を、2次関数で近似した式に当てはめることで、誤差 $\varepsilon$ を算出することができる。
- [0071] 図5に示す流量演算部50では、上記に記載した数式（5）により流量Qを演算することができる。このように本実施の形態では、流量Qの演算に、平均流速の誤差 $\varepsilon$ を加味することができ、よって、流量Qを精度よく演算することができる。
- [0072] 図7は、図6の乱流域における流速比と誤差 $\varepsilon$ との関係を、2次関数で近似した式を用いて図6の誤差を推定して補正した後の、流量誤差を示している。すなわち、図6は、補正前の誤差を示し、図7は、補正後の誤差を示している。図7に示す誤差は、図6に示した誤差 $\varepsilon$ に比べて、最大で1／100倍にまで小さくでき、本実施の形態によれば、流量の誤差を極めて小さくすることができる。
- [0073] なお、本発明は上記実施の形態に限定されず、種々変更して実施することが可能である。上記実施の形態において、添付図面に図示されている構成については、これに限定されず、本発明の効果を発揮する範囲内で適宜変更することが可能である。その他、本発明の目的の範囲を逸脱しない限りにおいて適宜変更して実施することが可能である。

[0074] 例えば、本実施の形態においては、流量、レイノルズ数、及び、動粘度を、流体の物理量として測定している。特に、図2、及び、図5は共に、最終的に、流体102の流量を求めるためのブロック構成となっている。ただし、例えば、図2において、流量まで求めず、レイノルズ数と動粘度、或いは、レイノルズ数のみを演算する構成とすることも出来る。

[0075] また、本実施の形態では、特に、限定するものではないが、スプール型の流体計測装置に好ましく適用できる。

[0076] 最後に、上記の実施の形態における特徴点を整理する。

[0077] 本実施の形態の流体計測装置1は、配管100に設置した複数の超音波プローブから配管100内の流体102へ超音波を送受信することにより複数の測線 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ を形成し、制御部60にて、流体102の物理量を求める流体計測装置1において、制御部60は、複数の測線 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ で計測した流体102の流速を演算する流速演算部42と、流体102の流速に基づいて、流速比を演算する流速比演算部43と、流速比に基づいて、物理量を演算する物理量演算部と、を有することを特徴とする。ここで、物理量演算部は、図1、図2の実施の形態では、レイノルズ数演算部46、流量演算部50、及び、粘度演算部51が該当する。

[0078] このように、本実施の形態では、流体102の流速の比に基づいて、流体102の物理量を求めることが可能であり、特に、層流・乱流にかかわらず物理量を高精度に計測できる。したがって、層流用と乱流用とに分けて別々の流体計測装置を用意する必要がなく、一台の流体計測装置で高精度な計測を行うことが可能である。

[0079] また、本実施の形態では、物理量演算部は、少なくとも流体102の流量を演算する流量演算部50であり、更に、流速から数値積分法により演算される平均流速の誤差を求める誤差演算部44を、具備しており、流量演算部50では、平均流速と、誤差演算部44で得られた誤差とを用いて、流体102の流量を演算することが好ましい。図2、及び、図5に示す実施の形態が該当する。これにより、流量演算において、誤差を加味することができ、

特に、誤差変動が大きい乱流域において、流量を高精度に演算することができる。

[0080] また、本実施の形態では、レイノルズ数演算部46を、更に備えており、レイノルズ数演算部46では、流速比に基づいてレイノルズ数を演算し、誤差演算部44では、誤差を、レイノルズ数に基づいて演算する構成とすることができる。図2に示す実施の形態が該当する。これにより、物理量として、レイノルズ数と共に、流量を取得することができる。特に、本実施の形態では、レイノルズ数の演算に必要であった配管寸法と動粘度を必要とすることなく、流速比に基づいて、レイノルズ数を簡単且つ精度よく演算することができる。また、レイノルズ数を演算することで、誤差演算部44では、レイノルズ数に基づく誤差を演算できる。そして、流量演算部50では、平均流速と、誤差演算部44で得られた誤差とを用いて、流体102の流量を精度よく演算することが可能である。

[0081] また、本実施の形態では、レイノルズ数と誤差との変換テーブル48を、更に備えており、誤差演算部44では、レイノルズ数演算部46から取得されたレイノルズ数を用いて、レイノルズ数－誤差変換テーブル48に基づき、誤差を演算することが好ましい。図2に示す実施の形態が該当する。このように、予め、レイノルズ数－誤差変換テーブル48を設けておくことで、レイノルズ数を取得すれば、迅速に誤差を演算でき、ひいては、流量の演算処理時間を短縮することができる。

[0082] また、本実施の形態では、物理量演算部は、少なくとも流体のレイノルズ数を演算するレイノルズ数演算部46であり、レイノルズ数演算部46では、流速比に基づいてレイノルズ数を算出することが好ましい。図2に示す実施の形態、及び、その変形が該当する。図2の変形とは、図2では、流体102の流量まで演算しているが、流量まで演算しない形態が該当する。これにより、本実施の形態では、レイノルズ数の演算に必要であった配管寸法と動粘度を必要とすることなく、流速比に基づいて、レイノルズ数を簡単且つ精度よく演算することができる。

[0083] また、本実施の形態では、流速比とレイノルズ数との変換テーブル47を、更に備えており、レイノルズ数演算部46では、流速比演算部43から取得された流速比を用いて、流速比－レイノルズ数変換テーブル47に基づき、レイノルズ数を演算することが好ましい。図2に示す実施の形態が該当する。このように、予め、流速比－レイノルズ数変換テーブル47を設けておくことで、流速比を取得すれば、迅速かつ精度よくレイノルズ数を演算できる。

[0084] また、本実施の形態では、粘度演算部51を、更に備えており、粘度演算部51では、レイノルズ数演算部46にて求められたレイノルズ数に基づいて、流体102の動粘度を演算することが可能である。図2に示す実施の形態が該当する。このように、本実施の形態では、レイノルズ数とともに動粘度を迅速かつ高精度に演算することができる。

[0085] また、本実施の形態では、流速比と誤差との変換テーブル45を、更に備えており、誤差演算部44では、流速比演算部43から取得された流速比を用いて、流速比－誤差変換テーブル45に基づき、誤差を演算することが可能である。図5に示す実施の形態が該当する。これにより、流量演算において、誤差を加味することができ、特に、誤差変動が大きい乱流域において、流量を高精度に演算することができる。特に、本実施の形態では、流速比を演算することで、誤差演算部44では、流速比に基づく誤差を演算できる。そして、流量演算部50では、平均流速と、誤差演算部44で得られた誤差とを用いて、流体の流量を度よく演算することが可能である。図5の実施の形態においては、図2のように、レイノルズ数の演算を必要とせず、流速比に基づいて、迅速かつ精度よく、流量演算を行うことが可能である。

[0086] また、本実施の形態では、図1に示すように、複数の測線 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ は、平行であることが、平均流速を求めるうえでの数値積分の精度を向上させることができ、好適である。

### 産業上の利用可能性

[0087] 以上説明した本発明は、流体の物理量、具体的には、流量や、レイノルズ

数、及び、動粘度等を計測するための流体計測装置に有用である。

[0088] 本出願は、2016年10月25日出願の特願2016-208860に基づく。この内容は、全てここに含めておく。

## 請求の範囲

- [請求項1] 配管に設置した複数の超音波送受信部から前記配管内の流体へ超音波を送受信することにより複数の測線を形成し、制御部にて、前記流体の物理量を求める流体計測装置において、
- 前記制御部は、前記複数の測線で計測した前記流体の流速を演算する流速演算部と、
- 前記流体の流速に基づいて、流速比を演算する流速比演算部と、
- 前記流速比に基づいて、前記物理量を演算する物理量演算部と、
- を有することを特徴とする流体計測装置。
- [請求項2] 前記物理量演算部は、少なくとも前記流体の流量を演算する流量演算部であり、
- 更に、前記流速演算部により演算される平均流速の誤差を求める誤差演算部を、具備しており、
- 前記流量演算部では、前記平均流速と、前記誤差演算部で得られた前記誤差とを用いて、前記流体の流量を演算することを特徴とする請求項1に記載の流体計測装置。
- [請求項3] 前記流速演算部は、前記流速から数値積分法により平均流速を演算することを特徴とする請求項2に記載の流体計測装置。
- [請求項4] レイノルズ数演算部を、更に備えており、
- 前記レイノルズ数演算部では、前記流速比に基づいてレイノルズ数を演算し、
- 前記誤差演算部では、前記誤差を、前記レイノルズ数に基づいて演算することを特徴とする請求項3に記載の流体計測装置。
- [請求項5] 前記レイノルズ数と前記誤差との変換テーブルを、更に備えており、
- 、
- 前記誤差演算部では、前記レイノルズ数演算部から取得された前記レイノルズ数を用いて、レイノルズ数－誤差変換テーブルに基づき、前記誤差を演算することを特徴とする請求項4に記載の流体計測装置

。

[請求項6] 前記物理量演算部は、少なくとも前記流体のレイノルズ数を演算するレイノルズ数演算部であり、

前記レイノルズ数演算部では、前記流速比に基づいてレイノルズ数を算出することを特徴とする請求項1に記載の流体計測装置。

[請求項7] 前記流速比と前記レイノルズ数との変換テーブルを、更に備えており、

前記レイノルズ数演算部では、前記流速比演算部から取得された流速比を用いて、流速比－レイノルズ数変換テーブルに基づき、前記レイノルズ数を演算することを特徴とする請求項4から請求項6のいずれかに記載の流体計測装置。

[請求項8] 粘度演算部を、更に備えており、

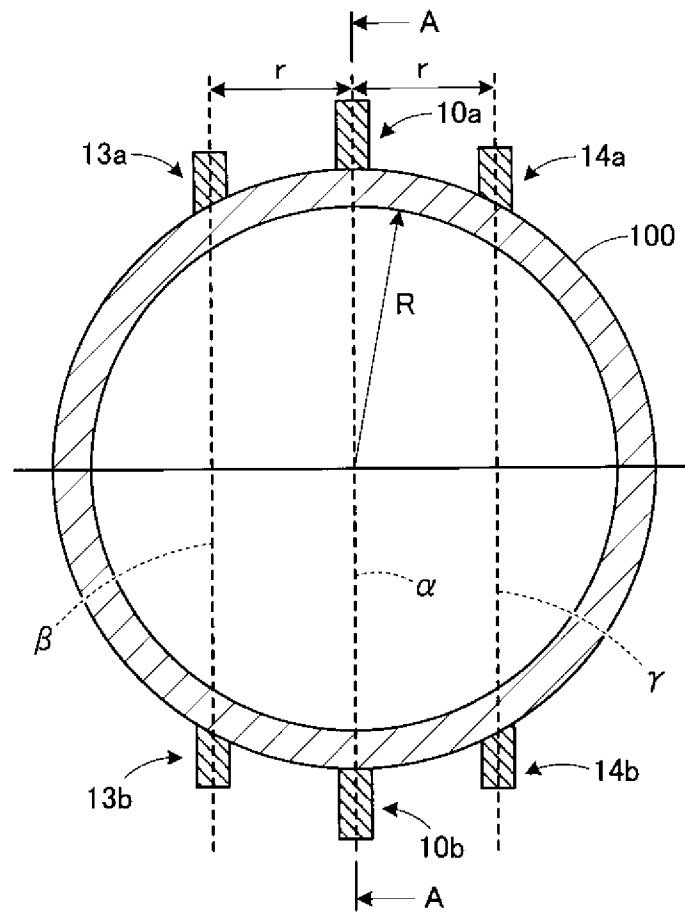
前記粘度演算部では、前記レイノルズ数演算部にて求められた前記レイノルズ数に基づいて、前記流体の動粘度を演算することを特徴とする請求項4から請求項7のいずれかに記載の流体計測装置。

[請求項9] 前記流速比と前記誤差との変換テーブルを、更に備えており、

前記誤差演算部では、前記流速比演算部から取得された流速比を用いて、流速比－誤差変換テーブルに基づき、前記誤差を演算することを特徴とする請求項3に記載の流体計測装置。

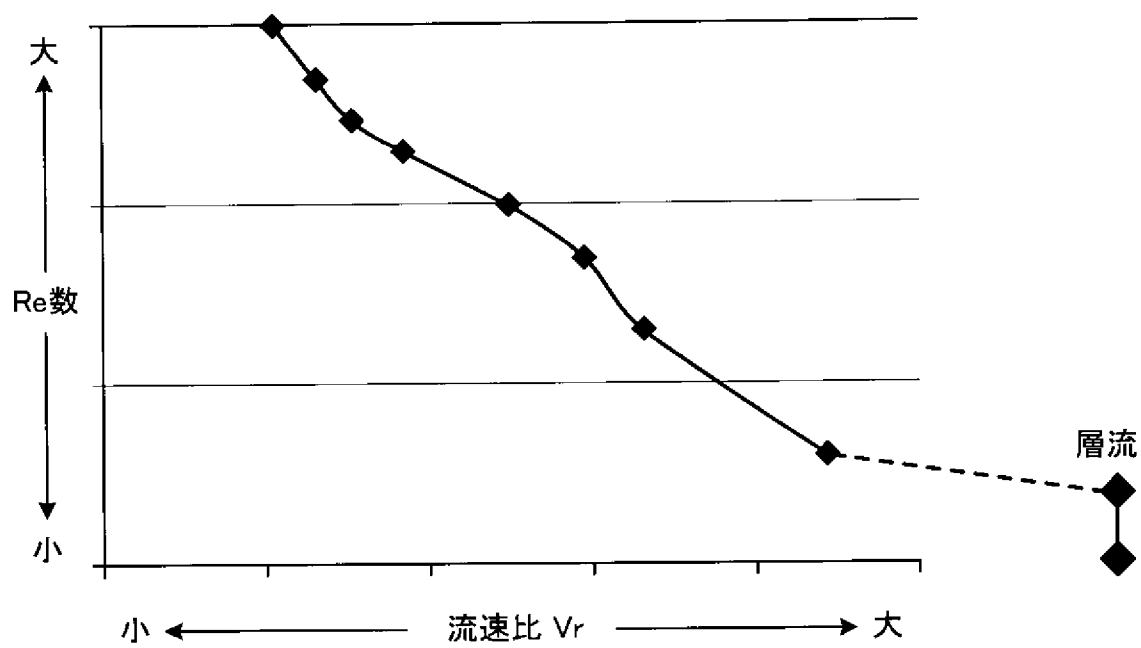
[請求項10] 前記複数の測線は、平行であることを特徴とする請求項1から請求項9のいずれかに記載の流体計測装置。

[図1]

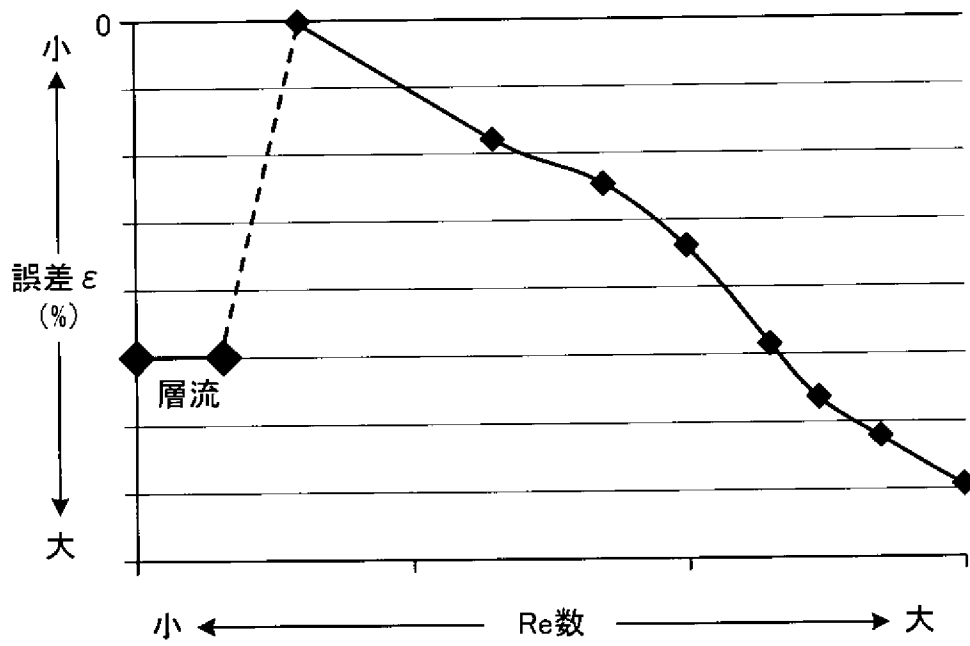




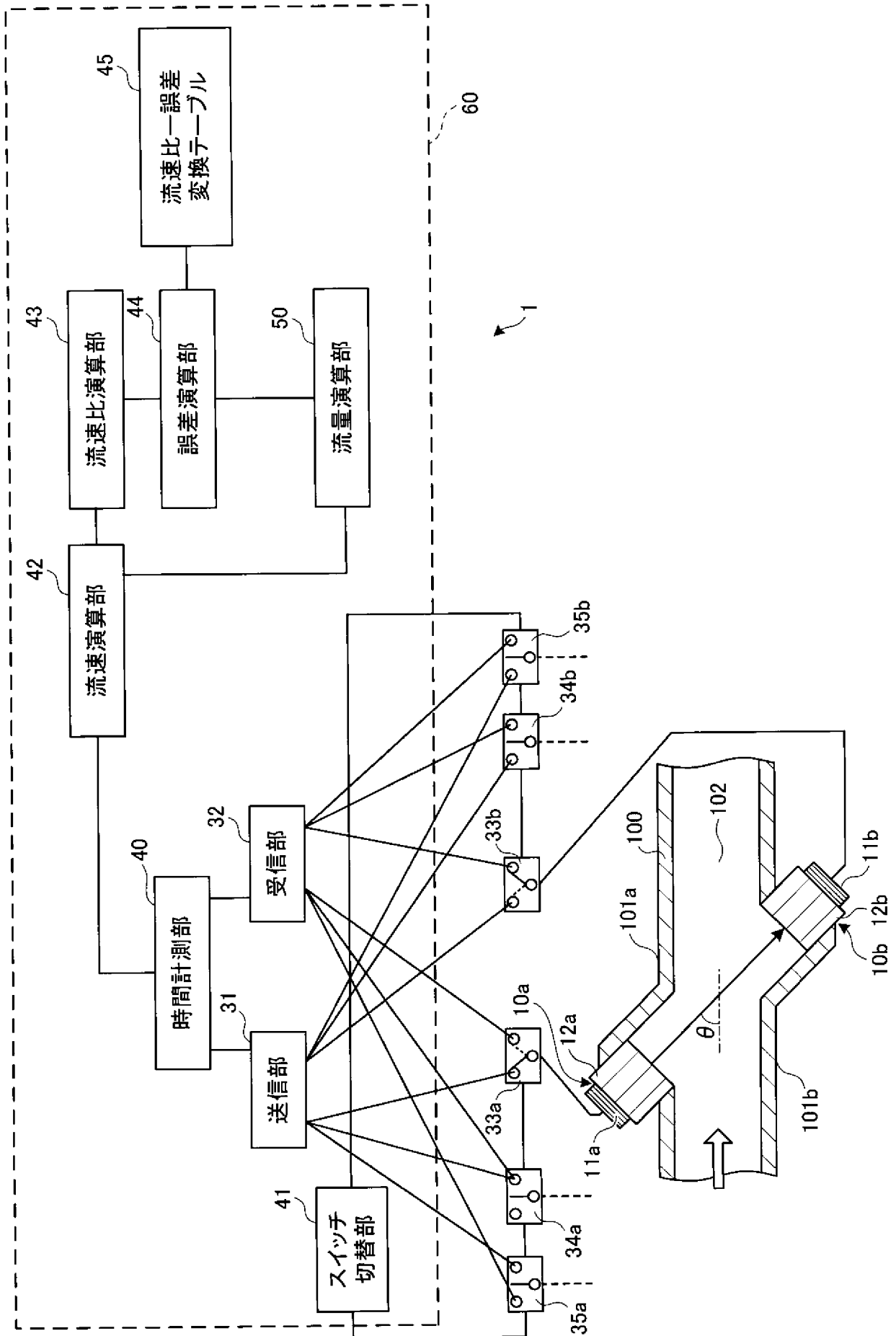
[図3]



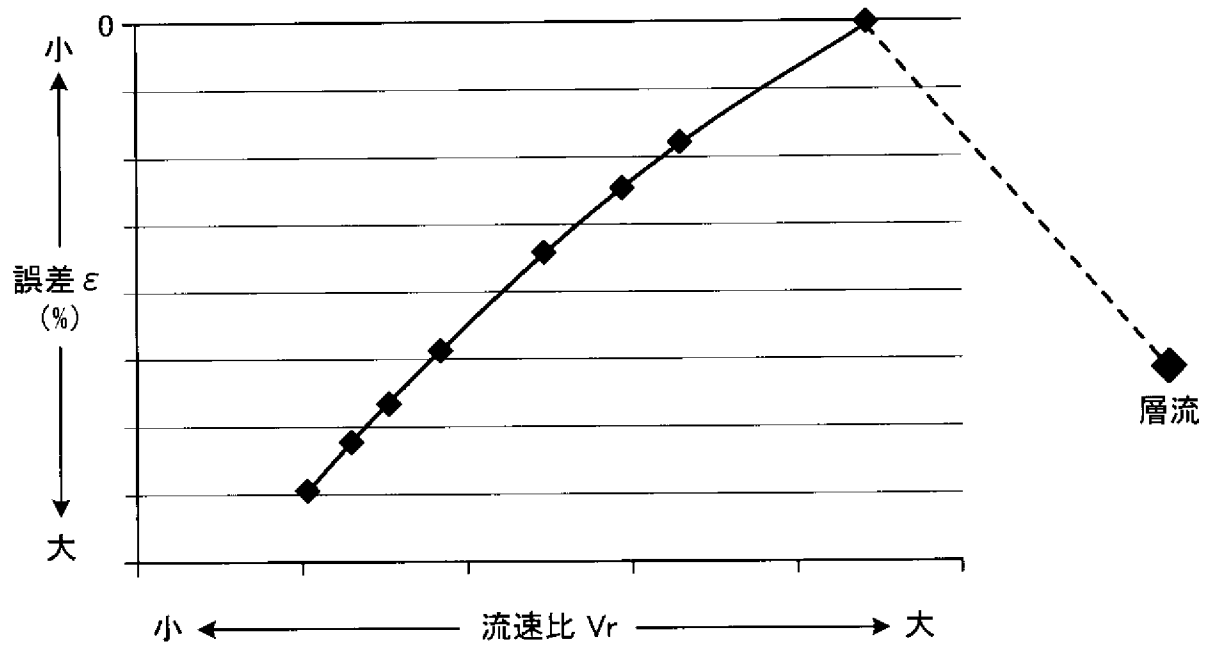
[図4]



【図5】



[図6]





# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/036900

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01F1/66(2006.01)i, G01F1/00(2006.01)i, G01N11/04(2006.01)i, G01N29/024(2006.01)i, G01P5/24(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01F1/66, G01F1/00, G01N11/04, G01N29/024, G01P5/24

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

|                           |           |                            |           |
|---------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
| Jitsuyo Shinan Koho       | 1922-1996 | Jitsuyo Shinan Toroku Koho | 1996-2017 |
| Kokai Jitsuyo Shinan Koho | 1971-2017 | Toroku Jitsuyo Shinan Koho | 1994-2017 |

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                         | Relevant to claim No. |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| X         | JP 3478833 B2 (Krone AG.),<br>15 December 2003 (15.12.2003),<br>fig. 1, 5, 6, 7<br>& EP 0804717 B1<br>fig. 1, 5, 6, 7<br>& US 5987997 A<br>fig. 1, 5, 6, 7 | 1-10                  |

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance  
 "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date  
 "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)  
 "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means  
 "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention  
 "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone  
 "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art  
 "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  
27 October 2017 (27.10.17)

Date of mailing of the international search report  
07 November 2017 (07.11.17)

Name and mailing address of the ISA/  
Japan Patent Office  
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,  
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

## A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. G01F1/66(2006.01)i, G01F1/00(2006.01)i, G01N11/04(2006.01)i, G01N29/024(2006.01)i, G01P5/24(2006.01)i

## B. 調査を行った分野

## 調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. G01F1/66, G01F1/00, G01N11/04, G01N29/024, G01P5/24

## 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

|             |                     |
|-------------|---------------------|
| 日本国実用新案公報   | 1 9 2 2 - 1 9 9 6 年 |
| 日本国公開実用新案公報 | 1 9 7 1 - 2 0 1 7 年 |
| 日本国実用新案登録公報 | 1 9 9 6 - 2 0 1 7 年 |
| 日本国登録実用新案公報 | 1 9 9 4 - 2 0 1 7 年 |

## 国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

## C. 関連すると認められる文献

| 引用文献の<br>カテゴリー* | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示                                                                                                                                                                                                                                          | 関連する<br>請求項の番号 |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| X               | <p>J P 3 4 7 8 8 3 3 B 2<br/>           （クローネ アクチェンゲゼルシャフト）<br/>           2 0 0 3 . 1 2 . 1 5<br/>           【図 1】【図 5】【図 6】【図 7】<br/>           &amp; E P 0 8 0 4 7 1 7 B 1 (F i g . 1 , 5 , 6 , 7)<br/>           &amp; U S 5 9 8 7 9 9 7 A (F I G . 1 , 5 , 6 , 7)</p> | 1 - 1 0        |

☐ C 欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

## \* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの  
 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの  
 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）  
 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献  
 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの  
 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの  
 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の 1 以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの  
 「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

2 7 . 1 0 . 2 0 1 7

国際調査報告の発送日

0 7 . 1 1 . 2 0 1 7

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A / J P）  
 郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5  
 東京都千代田区霞が関三丁目 4 番 3 号

特許庁審査官（権限のある職員）

森 雅之

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 2 1 6

2 F

8 5 0 5