

## 振動センサを用いた水道管路内の状態診断

角田, 裕紀 / KAKUTA, Hironori

---

(発行年 / Year)

2013-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2013-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

# 修士論文

振動センサを用いた水道管路内の状態診断

2012年度

法政大学大学院工学研究科システム工学専攻

11R6111

角田裕紀

指導教員 渡辺 嘉二郎 教授

# **A STUDY OF CONDITION MONITORING IN WATER PIPE USING VIBRATION SENSOR**

## **Abstract**

This paper describes a study of condition monitoring in water pipe using vibration sensor. The vibration sensor composed of condenser microphone is placed at water pipe. This sensor picks up vibration by water flow. We estimate of flow rate from the output voltage waveform. It is high cost that any conventional flowmeter which use at outside pipe such as ultrasonic flowmeter. We develop a lower cost system and make measurement of flow rate in water pipe easier.

The validity of sensing pipe vibration by condenser microphone was examined by experiment.

***Key Words :*** *Condenser microphone, Condition monitoring, Water pipe*

## 目次

第1章	はじめに	4
1. 1.	研究背景	4
第2章	計測対象および仮定と問題の記述	5
2. 1.	計測対象	5
2. 2.	仮定	5
2. 3.	問題	5
第3章	提案システムの構造と数学的モデル	6
3. 1.	管路内の水の挙動と配管振動	8
3. 2.	センサ	12
3. 2. 1.	コンデンサマイクロフォン	12
3. 2. 2.	振動センサとしてのコンデンサマイクロフォン	13
3. 2. 3.	圧電素子	15
3. 3.	波形信号処理方法	16
第4章	検証実験	17
4. 1.	使用機器と手順	17
4. 2.	コンデンサマイクロフォンを用いた実験	23
4. 2. 1.	流量の推定	23
4. 2. 2.	異状の検出	37
4. 3.	圧電素子を用いた実験	39
第5章	おわりに	48
	謝辞	49
	参考文献	50

## 第1章 はじめに

### 1. 1. 研究背景

私達の生活に上水道は欠かせないものである。東京都水道局によると [1], 東京都の年間総配水量は  $156,557 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ , 給水区域内人口に対する給水人口の割合は 100% であり, その恩恵が多大なものであることがわかる。このように上水道は生活・経済活動の上で必要不可欠なものであるからこそ, 水道局は古くから断水のない高水準な配水システムの構築の為に, 水質の管理等に並び漏水防止といった項目が大切とされ, 配水量・水圧管理といった項目を実施している。漏水事故発生箇所として最も多いのは配水管から消費者側に水を引き込む給水管である。資料によると全体件数の 97.2% を占めており, 漏水事故はほとんど給水管における漏水であるということを示している [2]。その為, 水道局は古くから, 使用量・騒音の少ない夜間に音聴棒を用い配管の振動を音として聴く, 電磁流量計で最小流量を計測するといった対抗手段を施しているが, 給水管は消費者側の土地における問題である為, はっきり有効であるとは言い難い。

流量計は何らかの内部的構造を持ち, 配管に直接接続するウェット型流量計が一般的である。一方で, 配管の外側から流量計を計測するクランプオン型流量計は, 精度や導入コスト面の観点からすると劣っており, 導入例は少ない。しかしながら外側から流量を計測出来るというメリットはとても重要なことである。これは計測の為の設備工事が不要である, 地点の流量を気軽に計測出来る, 配管内に物体を混入させない為に圧力低下を招かないといったことを示しており, 消費者側の流量計測手段には適している。

本論では水道管路内の状態を, 外部にセンサを設置し流量や漏れ, 詰まり等を診断することを目的とする。またこのとき, 従来のクランプオン型との差別としてローコスト化を実現する。計測の対象としては, 外部からの観測が容易な配管の振動に着目した。

## 第2章 計測対象および仮定と問題の記述

### 2. 1. 計測対象

対象を以下に示す.

(O1) 水道管における流量

(O2) 水道管における詰まりや漏れ等の異状

水道管外部にセンサを設置し, 管路内の水の流れが引き起こす振動を計測する. この振動は水勢に概ね比例することが予想されるので, 流速すなわち流量と振動 (実際にはセンサ電圧) との関係を求め, 校正係数を決定することにより振動から流量を推定出来るようにする.

また詰まり, 漏れの発生時には 1-500 kHz の音響信号や圧力揺動が発生するとされており[3][4], 流れがもたらす振動をセンサで検知出来るならば, これらの異状信号も取得可能であると予測される.

### 2. 2. 仮定

本論の数学的モデルおよび実験において, 以下の仮定を設ける.

(A1) 水は非圧縮流体として考え, 密度を一定とする

(A2) 管路は水で満たされているとする

(A3) 円筒内の圧力変化は断熱変化とする

(A4) FET の入力インピーダンスは抵抗とする

### 2. 3. 問題

計測や実用化においては, 以下の問題が予想される.

(P1) 流量とセンサ出力電圧間の校正係数決定方法

(P2) 流量推定の精度

(P3) 計測可能な流量レンジ制限

(P4) 環境に依存したノイズの影響

## 第3章 提案システムの構造と数学的モデル

本章において必要となる変数を以下に記述する.

共通の変数

$g$  : 重力加速度 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $T$  : サンプル時間 [s]

管路系の変数

$\rho$  : 水の密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $\mu$  : 水の静粘度係数 [ $(\text{N}/\text{m}^2)\cdot\text{s}$ ]  
 $d_p$  : 管路の直径 [ $\text{m}^2$ ]  
 $C_l$  : 損失係数

コンデンサマイクロフォン系の変数

[機械的要素]

$M$  : ピックアップおよび受圧フィルムの質量 [kg]  
 $m$  : エレクトレットフィルムの質量 [kg]  
 $C$  : ピックアップおよび受圧フィルムのダンパ要素 [ $\text{N}/(\text{m}/\text{s})$ ]  
 $c$  : エレクトレットフィルムのダンパ要素 [ $\text{N}/(\text{m}/\text{s})$ ]  
 $K$  : ピックアップおよび受圧フィルムのばね要素 [N/m]  
 $k$  : エレクトレットフィルムのばね要素 [N/m]  
 $k_f$  : エレクトレットフィルム前部の空気ばね定数[N/m]  
 $k_b$  : エレクトレットフィルム後部の空気ばね定数[N/m]  
 $x_p$  : ピックアップおよび受圧フィルムの変位 [m]  
 $x_e$  : エレクトレットフィルムの変位 [m]  
 $\gamma$  : 空気の比熱比  
 $p_{in}$  : 入力される圧力 [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]  
 $P_0$  : 大気圧 [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]  
 $P_f$  : エレクトレットフィルム前部のエンクロージャ内気圧 [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]  
 $P_b$  : エレクトレットフィルム後部のエンクロージャ内気圧 [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]  
 $S_p$  : ピックアップの断面積 [ $\text{m}^2$ ]  
 $S_c$  : エンクロージャの断面積 [ $\text{m}^2$ ]  
 $S_e$  : エレクトレットフィルムの断面積 [ $\text{m}^2$ ]  
 $d_e$  : 電極-エレクトレットフィルム間の距離 [m]  
 $h_f$  : 受圧フィルム-エレクトレットフィルム間の距離 [m]  
 $h_b$  : エレクトレットフィルム-エンクロージャ終端間の距離 [m]

[電氣的要素]

$Q_e$  : エレクトレットフィルムの永久電荷 [C]  
 $\varepsilon$  : 誘電率[N/V]  
 $e_c$  : FET への入力電圧 [V]  
 $C_c$  : FET の静電容量 [C/V]

---

$R_c$  : FET の入力インピーダンス [ $\Omega$ ]

$G$  : FET のゲイン

圧電素子系の変数

$m_d$  : 圧電素子を含めた系の質量 [ $m^2/s$ ]

$c_d$  : 圧電素子を含めた系のダンパ要素 [ $N/(m/s)$ ]

$k_d$  : 圧電素子を含めた系のばね要素 [ $N/m$ ]

$x_d$  : 圧電素子の歪みによる変位 [ $m$ ]

$S$  : 圧電素子の断面積 [ $m^2$ ]

$f$  : 逆圧電効果による力 [ $N$ ]

### 3. 1. 管路内の水の挙動と配管振動

管路内の水の状態の概観を Fig. 1 に示す.

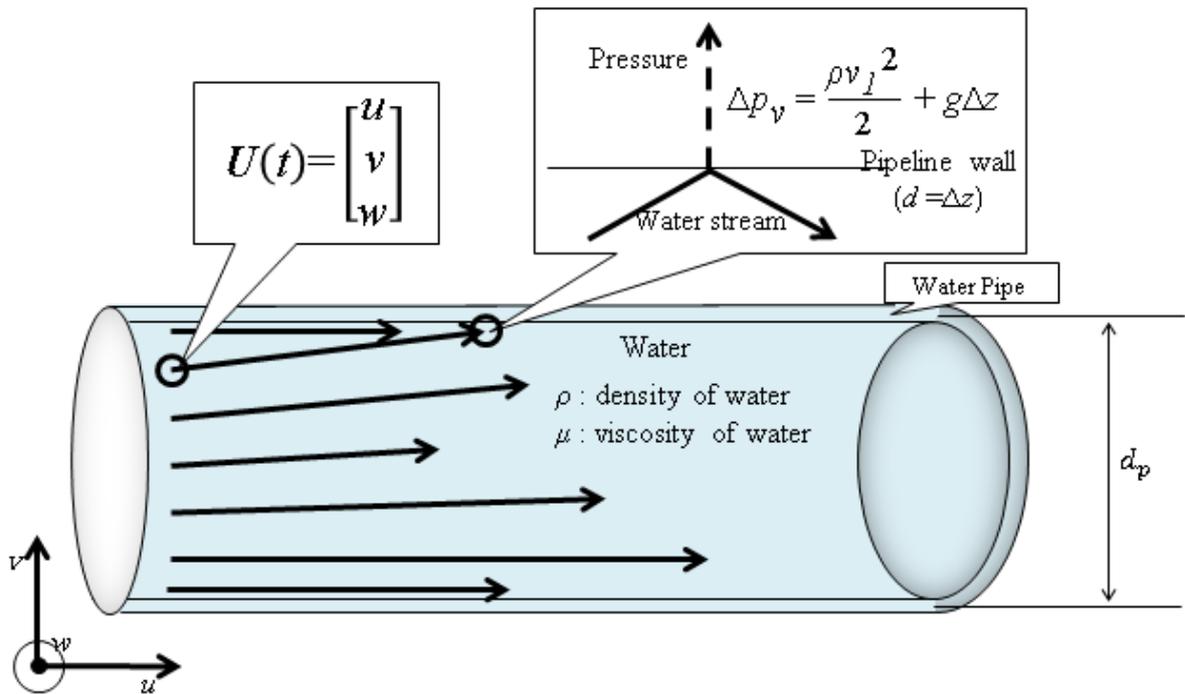


Fig. 1 Model of water behavior in pipe

金属製の配管に聴診器を当てると流水音を聴くことができるが、これは固体伝播音、配管の振動である。水は粘度が小さく遅い流れでも乱流となる為、管内を流れる流体の乱れによって生じた渦が圧力変動を引き起こし、配管内面に振動外力として作用するものとされる [5]。つまり乱流において水は主流方向だけでなく鉛直方向にも速度成分を持つ。なお層流、乱流の判定はレイノルズ数  $R_e$  に依存し、概ね  $R_e > 2320$  のとき、水は乱流的挙動を見せるものとされている [6]。以下 (1) 式にレイノルズ数の定義を示す。

$$R_e = \frac{\rho d_p u}{\mu} \tag{1}$$

ここで、ある一点における乱流の3次元空間の速度ベクトルを、以下 (2) 式のように定義する。

$$U(t) = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \tag{2}$$

主流の方向の速度を  $u$  とすると、(3) 式のように平均速度  $\bar{u}$  と変動速度  $u'$  の和として表せる。

$$u = \bar{u} + u' \tag{3}$$

これらは  $T$  を十分大きく取ったとき, (4) - (5) 式のように表すことができる.

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot dt \quad (4)$$

$$\bar{u}' = \frac{1}{T} \int_0^T u' \cdot dt = 0 \quad (5)$$

一方, 主流に対して直角方向かつ地表に対して垂直となる速度を  $v$ , 平行となる速度を  $w$  としたとき, 流れは (6) - (9) 式のように表すことができる.

$$v = v' \quad (6)$$

$$\bar{v}' = \frac{1}{T} \int_0^T v' \cdot dt = 0 \quad (7)$$

$$w = w' \quad (8)$$

$$\bar{w}' = \frac{1}{T} \int_0^T w' \cdot dt = 0 \quad (9)$$

$v, w$  方向は管路によって閉じられている為, 管路端で速度は必ず  $0$  となり, 管路端の流体位置と配管材料との間に圧力差が生じる. この圧力差は (10) 式に示すベルヌーイの定理で導くことができる.

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = \text{const.} \quad (10)$$

管路端の速度を  $v_1, w_1$ , 圧力を  $p_{v1}, p_{w1}$ , 座標を  $z_1$ , 配管材料の圧力を  $p_{v2}, p_{w2}$ , 座標を  $z_2$  とおくと, 各軸における速度と圧力の関係は (11) - (12) 式のように表すことができる.

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_{v1}}{\rho} + gz_1 = \frac{p_{v2}}{\rho} + gz_2 \quad (11)$$

$$\frac{w_1^2}{2} + \frac{p_{w1}}{\rho} = \frac{p_{w2}}{\rho} \quad (12)$$

このとき,  $\Delta p_v = p_{v2} - p_{v1}$ ,  $p_w = p_{w2} - p_{w1}$ ,  $\Delta z = z_2 - z_1$  とおいて変形すると (13) - (14) 式のように表すことができる.

$$\Delta p_v = \frac{\rho v_1^2}{2} + g\Delta z \quad (13)$$

$$\Delta p_w = \frac{\rho w_l^2}{2} \quad (14)$$

すなわち管路端での速度に応じた圧力変化、管路の振動が発生する。外力がない限り、元々流体の持つエネルギーを保存する範囲で  $v, w$  方向の速度は変化するので、流れの持つエネルギーの大きさに概ね比例するものと考えられる。またこのとき時間変化によって  $v, w$  は不規則に変動する為、その変動頻度が振動の周波数として現れる。この振動の周波数はある程度広い範囲に存在する為、配管系の固有振動数における成分が励振され特徴となるものと考えられる。

(13) および (14) を速度について解くと、(15) - (16) 式が得られる。

$$v_l = \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p_v - g\Delta z}{\rho}} \quad (15)$$

$$w_l = \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p_w}{\rho}} \quad (16)$$

主流方向については、(17) 式のように表すことが出来る。

$$u_l = \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p_u}{\rho}} \quad (17)$$

このとき、 $v$  および  $w$  の速度は元々の流体が持つエネルギーの範囲内で変動するものと考えられる。したがって、流体の持つエネルギーと速度の関係は (18) 式で表される。

$$|U(t)| = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (18)$$

(15) - (17) 式を用いて (18) 式を書き直し、以下に (19) 式として示す。

$$|U(t)| = \sqrt{\frac{2}{\rho} (\Delta p_u + \Delta p_v + \Delta p_w - g\Delta z)} \quad (19)$$

したがって、 $\Delta p_v$  および  $\Delta p_w$  は流量に対して垂直の圧力ではあるものの、流量方向の持つエネルギーに比例するものと考えられる。

この仮定に基づいて考えると、 $v$  および  $w$  の出現頻度は配管振動の周波数として現れる。一般的に配管振動の周波数は幅広い周波数帯に現れ、特に配管系の材質や形状に依存した共振周波数が強調されることがわかっている [7]。そのため、センサは広範な周波数帯において計測可能な感度を持つ必要がある。

流量  $Q$  の定義を (20) 式、流量と圧力変動の関係を (21) 式に示す。

---

$$Q = C_l \cdot (d_p^2 \pi) \cdot u \quad (20)$$

$$Q = C_l \cdot \left(\frac{d_p}{2}\right)^2 \cdot \pi \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p_u}{\rho}} \quad (21)$$

単位時間当たりの流量は水の重量  $q$  と計測時間  $T$  から判断する場合, (22) 式のように表すことが出来る.

$$Q = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{q}{T} \quad (22)$$

### 3. 2. センサ

#### 3. 2. 1. コンデンサマイクロフォン

本論では、振動センサとしてコンデンサマイクロフォンを使用する。コンデンサマイクロフォンは元来、音響センサとして設計されているが、過去の研究から、圧力・加速度センサとしても利用可能であることがわかっている [8]。Fig. 2 に一般的なコンデンサマイクロフォンの概観を示す。

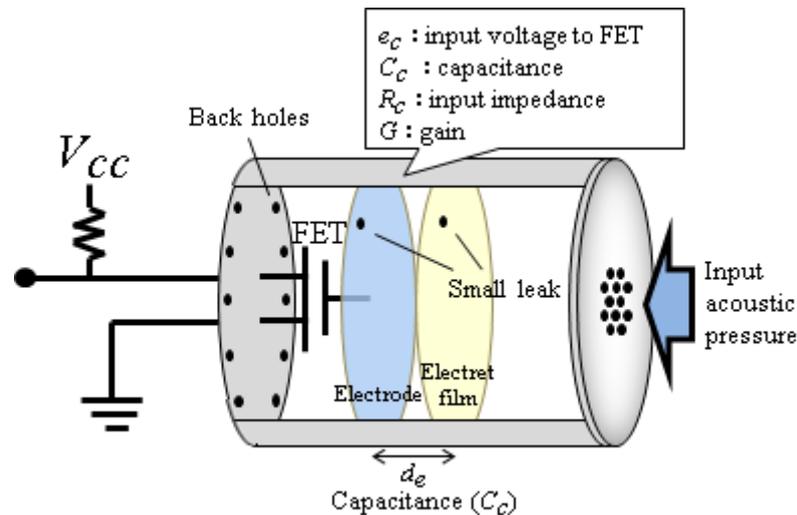


Fig. 2 Structure of a condenser microphone

コンデンサマイクロフォンは円筒前部の穴から入力される空気が、円筒内部の気圧を変動させ、エレクトレットフィルムが湾曲、後部の電極との距離が変化し、静電容量の変化を検出するセンサである。構造が単純である為ローコストであり、また円筒やエレクトレットフィルムの大きさを変化させることで共振周波数（計測可能周波数帯域）を調整することが出来、低周波から高周波まで広域をフラットなゲインを得ることが出来る。

### 3. 2. 2. 振動センサとしてのコンデンサマイクロフォン

Fig. 3 に振動センサとしての円筒付きコンデンサマイクロフォンのモデルを示す. 一般的なマイクロフォンには指向性を持たせるために前後に気孔が空いているが, 本論では振動センサとして利用したいので, 外部の音等が出力に影響しないようマイクロフォン内部の気圧を円筒および受圧フィルムで閉じ込め, 受圧フィルムの中心にピックアップを取り付ける. このとき入力振動  $p_{in}$  に合わせて受圧フィルムが振動する. このとき円筒内体積および気圧変動が空気ばねとして作用し, エレクトレットフィルムを振動させるという構造になっている.

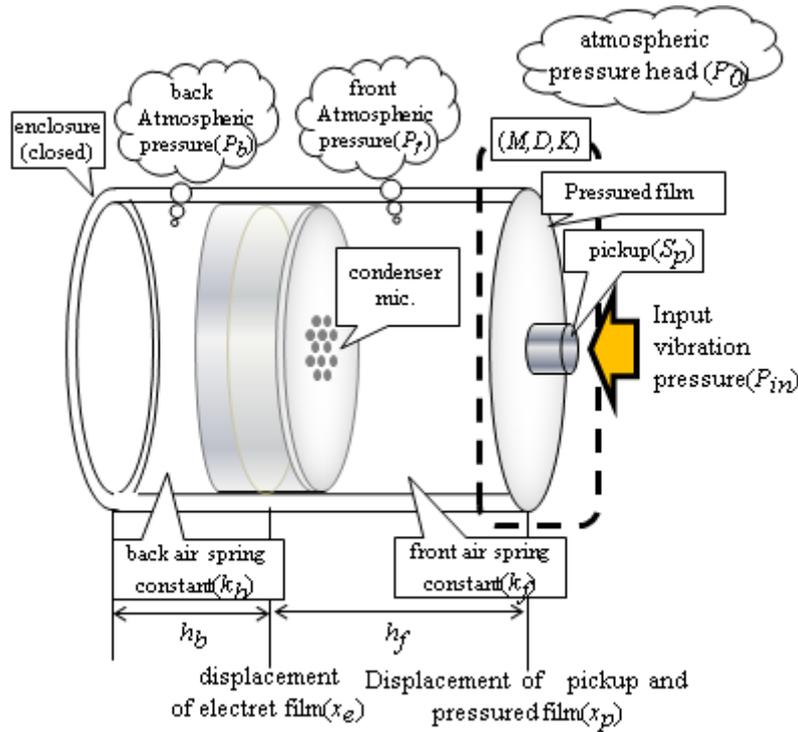


Fig. 3 Structure of an enclosed condenser microphone as vibration sensor

まず, ピックアップおよび受圧フィルムの運動方程式は, (23) 式で表すことができる.

$$M \frac{d^2 x_p(t)}{dt^2} + C \frac{dx_p(t)}{dt} + K x_p(t) = S_p p_{in}(t) - k_f(x_p(t) - x_e(t)) \quad (23)$$

このとき, エレクトレットフィルムの運動方程式は, (24) 式で表すことができる.

$$m \frac{d^2 x_e(t)}{dt^2} + c \frac{dx_e(t)}{dt} + k x_e(t) = k_f(x_p(t) - x_e(t)) - k_b x_e(t) \quad (24)$$

ここで (A3) より, 空気ばね係数  $k_f$  および  $k_b$  は, (25) - (26) 式のように表される.

$$k_f = \gamma P_f \frac{S_c}{h_f(x_p(t) - x_e(t))} \quad (25)$$

$$k_b = \gamma P_b \frac{S_c}{h_b - x_e(t)} \quad (26)$$

この状態で理想気体の状態方程式 (27) 式が成り立つ為、円筒内圧力  $P_f$  および  $P_b$  は (28) - (29) 式のように表すことができる。

$$PV = \text{const.} \quad (27)$$

$$P_0 S_c h_f = P_f(t) S_c \{h_f - (x_p(t) - x_e(t))\} \quad (28)$$

$$P_0 S_c h_b = P_b(t) S_c (h_b - x_e(t)) \quad (29)$$

マイクキャパシタと FET 入力抵抗により、以下 (30) - (32) 式にしたがって変位は電圧に変換される。

$$e_c(t) = \frac{Q_e}{\epsilon S_e} (d - x_e(t)) \quad (30)$$

$$\frac{1}{C_c} \int i(t) dt + R_c i(t) = e_c(t) \quad (31)$$

$$e(t) = R_c i(t) \quad (32)$$

最終的な FET からの出力電圧は (33) 式のように表される。

$$e_{out}(t) = G e(t) \quad (33)$$

### 3. 2. 3. 圧電素子

ここでは、振動センサとして圧電素子を利用する“圧電式流量計”に関して記述する。その構造を Fig. 4 に示す。

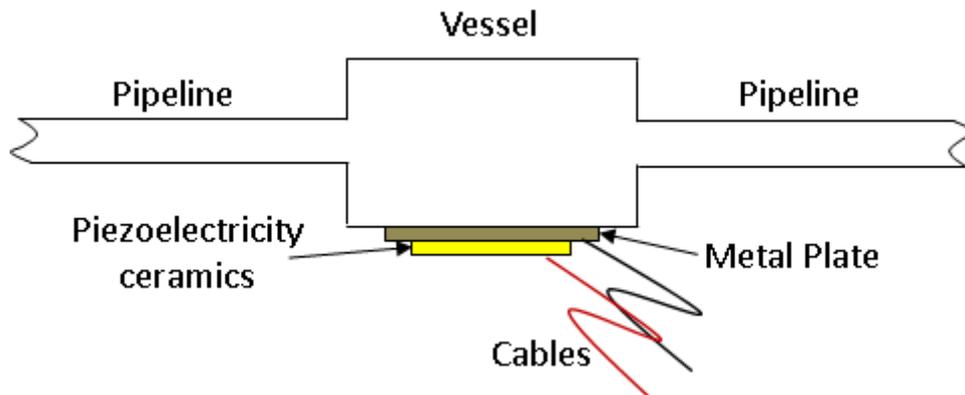


Fig. 4 Structure of flowmeter using piezoelectricity ceramics

センサは流路の外に設置されている上に、容器の中は空洞であり、流れを阻害するような要素を持たない。

圧電素子もまた安価な振動センサとして一般的である。乱流が発生すると管路が振動し、それに伴って取り付けられた圧電素子にも歪みが生じる。歪みは圧電効果によって電圧（電荷）に変換されるので、振動を電圧として対応付けることが出来る。流れが管路壁を振動させ、その振動を取得するという点から、3. 1. までの理論が適用可能であるといえる。

振動による圧力変化は (34) - (37) 式を経て、最終的に電圧へと変換される。  $p(t)$  が入力の変数で、これは配管の振動による圧力変動である。

$$m_d \frac{d^2 x_d(t)}{dt^2} + c_d \frac{dx_d(t)}{dt} + k_d x_d(t) = Sp(t) + f(t) \quad (34)$$

$$q_i(t) = Bx(t) \quad (35)$$

$$R \frac{dq(t)}{dt} + \frac{1}{C} q(t) = \frac{1}{C} q_i(t) \quad (36)$$

$$e_f = R \frac{dq(t)}{dt} \quad (37)$$

### 3. 3. 波形信号処理方法

センサから出力された波形をある時間内  $t_1$  から  $t_2$  間において積分する。ここで、この積分された値を指標  $P$  と定義し、(38) 式として示す。

$$P = A \cdot \int_{t_1}^{t_2} |e_{out}(t) - e_0| dt \quad (38)$$

$e_{out}(t)$  はセンサ出力電圧、 $e_0$  はバイアス電圧であり、 $A$  は圧力変動の理論値  $\Delta p_u$  と指標  $P$  を結びつける校正係数で、実験的に決定される。

さらに、指標  $P$  は直流成分をハイパスフィルターにより除去、指標を  $P_{out}$  と定義し、(39) 式として示す。 $n$  は区間内のデータ数である。

$$P_{out} = P - \frac{\sum_{i=1}^n P}{n} \quad (39)$$

## 第 4 章 検証実験

### 4. 1. 使用機器と手順

センサおよびその周波数特性を Fig.5 - 11 に記載する.

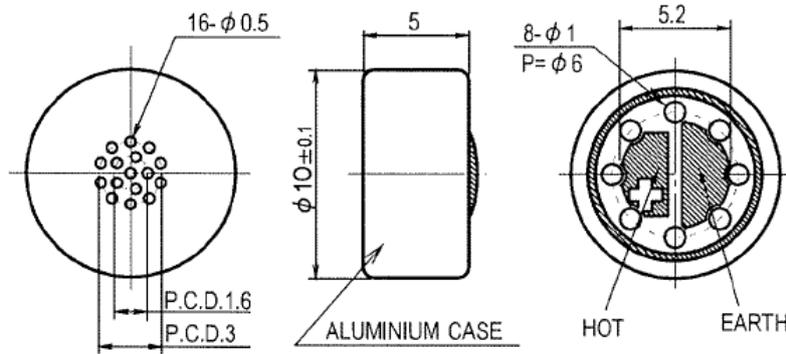


Fig. 5 General condenser microphone EM114

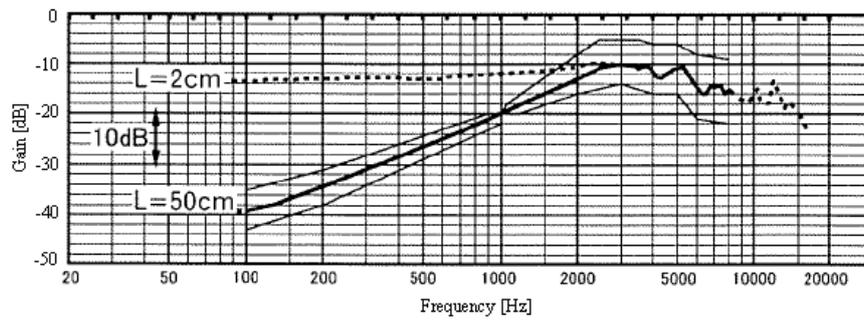


Fig. 6 Frequency response of EM114



Fig. 7 Vibration sensor unit and amplifier

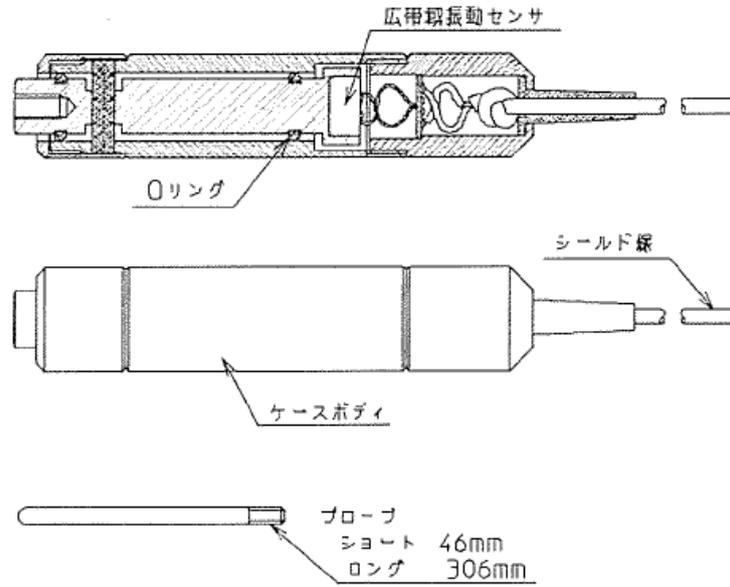


Fig. 8 Vibration sensor unit details

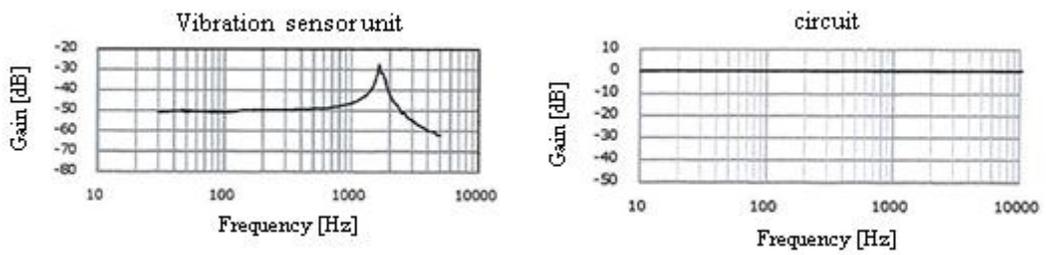
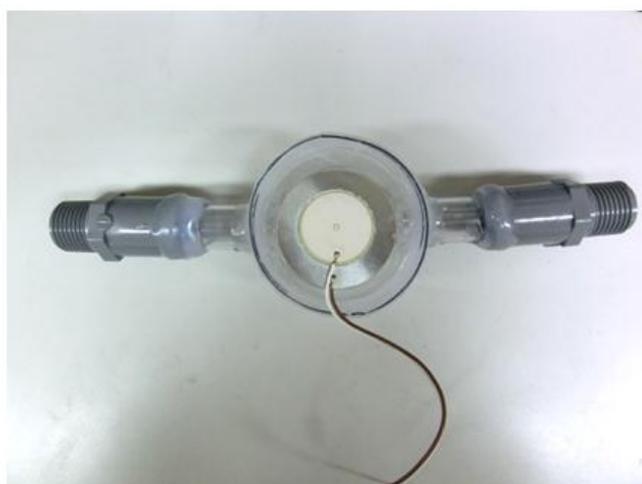


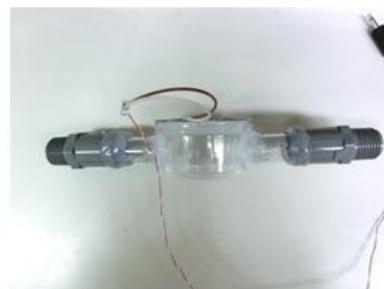
Fig. 9 Frequency characteristics of proposed system



Fig. 10 Piezoelectricity ceramics

Flowmeter using piezoelectricity ceramics  
( top view )

back



front

Fig. 11 Flowmeter using piezoelectricity ceramics

Fig. 5 に一般的なコンデンサマイクロフォンの概観として、プリモ株式会社製 E114 を記載した。Fig. 6 はその周波数特性である。しかしながら、2000Hz 以下の周波数帯域においてゲインがフラットでない。

Fig. 7 にコンデンサマイクロフォンを用いた振動センサ、プリモ株式会社製聴診棒（左部）および増幅器（右部）の概観、Fig. 8 に内部構造、Fig. 9 にその周波数特性を示す。増幅器は全体域においてフラットだと考えてよい。30Hz 以下の低周波は表記がないが、フラットだと考えてよい。共振周波数を含むが約 2000Hz までは利用可能であるものと考えられる。センサは直接的には金属を伝わる振動を取得しており、大気圧の変動や空気の漏れなどを限りなく小さくすることが出来ている。その為、数学的モデルとのずれも少ない。

Fig. 10 に圧電素子, Fig. 11 に圧電素子を用いた簡易的な流量センサの概観を示す. 試験的に, ポリエチレン製の容器に圧電素子を取り付けた.

第3章でも述べたようにセンサの構造は非常に単純なものである為, 従来流量計よりもローコストに製造することが可能であると考えられる.

● 実験の手順

(21) 式より，管路の振動と流量には関係性が見られる．そこで，振動をセンシングし，少しずつ流量を変化させた際の電圧の大きさの関係性を調べる．

流量を固定したまま数秒間データを取得した後，流量を上げ，再び計測，を繰り返す．流量の調節は付属のバルブを用いて手動で行う．また流量の計測は 5s 間に流れた水を密度  $\rho = 1000\text{kg/m}^3$  一定，計測時間  $T$  を  $1/100\text{s}$  単位，水の重量  $q$  を  $1.0 \cdot 10^{-3}\text{kg}$  単位で計測し，(22) 式に代入することで取得した．

Fig. 12 に実験システムのデータフロー図を示す．

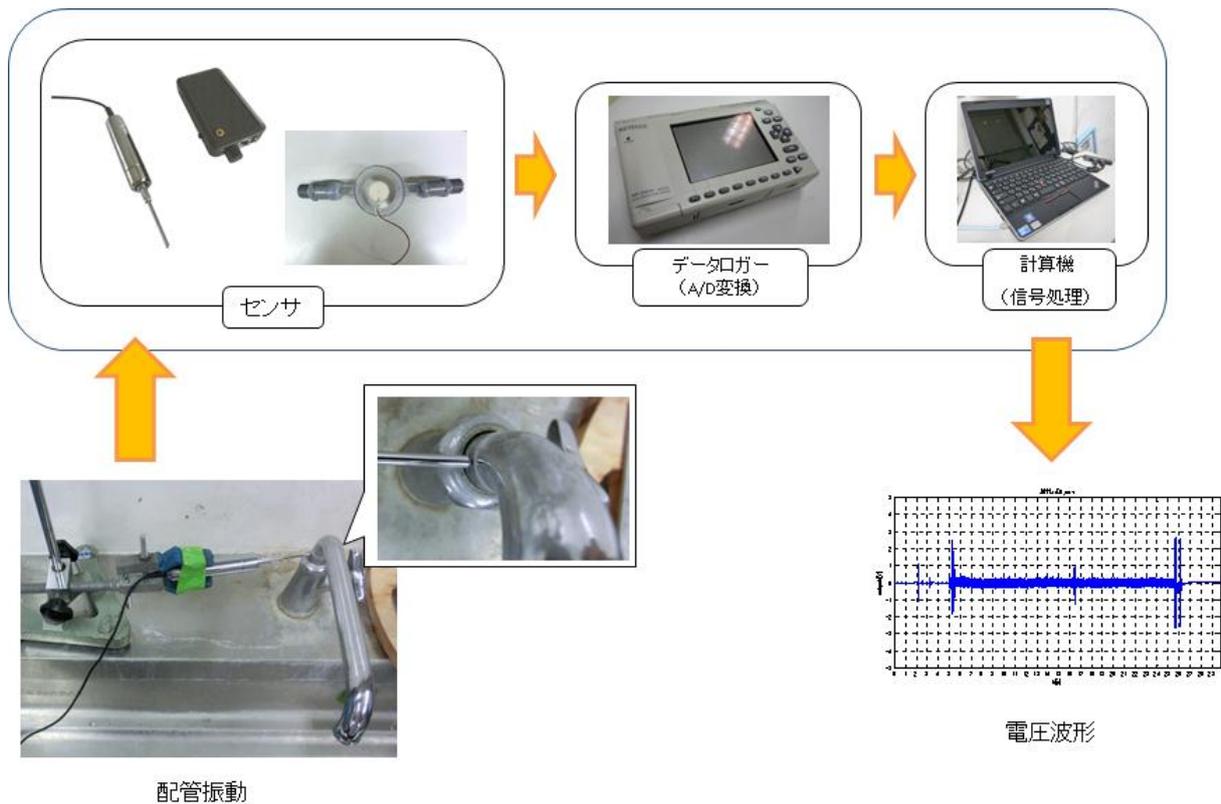


Fig. 12 Data flow diagram of the experimental system

聴診棒のアンプは電源供給と，40dB の電圧増幅を行なっている．データロガーは株式会社キーエンス製 NR-2000 を用いた．積分処理はノートパソコンで行い，波形およびスペクトラムを表示，評価を行う．

● 実験環境における定数の決定

(21) 式に実験環境における定数を代入する．

$C_l$  は損失を表す係数だが不明であるので，本論では仮に 1 と置いておく． $\phi 13\text{mm}$ 水道管で計測を行うとき  $\pi = 3.14$ ， $d_p = 13 \cdot 10^{-3}\text{m}$  となり， $\rho = 1000\text{kg/m}^3$  と考えると，以下 (40) 式が得られる．

$$Q = \frac{4225}{\sqrt{500}} \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{\Delta p_u} \quad (40)$$

(40) 式は主流方向に関する式であるが、乱流の変動成分が不規則に入れ替わることから、 $\Delta p_v$ 、 $\Delta p_w$ も同様に  $Q$  の関数であることが予想される。

● 実験環境における臨界レイノルズ数と対応する流量の制限に関する記述

本実験環境における値を (1) 式に代入する。水の粘性係数  $\mu$  は 20°C において  $1.004 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ 、密度  $\rho$  は  $0.998 \cdot 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$  であるから、レイノルズ数  $R_e$  は (41) 式で表される。

$$R_e \cong 13 \cdot 10^3 \cdot u \quad (41)$$

これを乱流判定基準に当てはめると、(42) - (43) 式が得られる。

$$u > 0.178 \quad (42)$$

$$Q > 0.02361 \cdot 10^{-3} \quad (43)$$

よって、主流方向の速度  $u$  が概ね 0.178m/s 以上、流量が  $0.02361 \cdot 10^{-3} \text{L}/\text{s}$  以上であれば乱流であるといえる。本論で用いるモデルは乱流であるという前提がある為 (42) - (43) 式に当てはまる場合に適用可能であることに注意する必要がある。

## 4. 2. コンデンサマイクロフォンを用いた実験

### 4. 2. 1. 流量の推定

#### ● 蛇口での実験

はじめに、一般的な蛇口において実験を行い、流量の推定が可能かどうか検証を行う。単水栓型のエルボーの直前に聴診棒を動かさないように固定、設置する。Fig. 13 に実験の様子、Table1 に実験環境を示す。

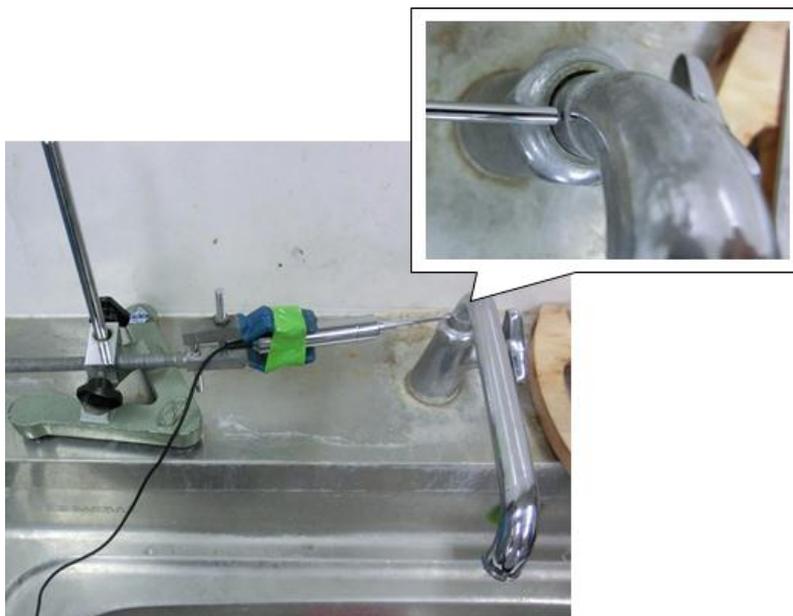


Fig. 13 Measurement system used in the experiment of faucet

Table1 Experimental environment of faucet

internal diameter of pipeline	$\phi 13\text{mm}$
Material of pipeline	Brass (plating nickel)
temperature	22°C
humidity	62%
water temperature	21°C

## ● 結果

実験における代表的な時間波形とそのスペクトラムをFig. 14-19, 流量  $Q$  と  $P_{out}$  の関係を Fig. 20 および Table2 に示す. サンプルング周波数は5kHzとした. また, 積分区間は  $t_1=1$ ,  $t_2=2$ , 校正係数は  $A = 8.0 \cdot 10^5$  とした.

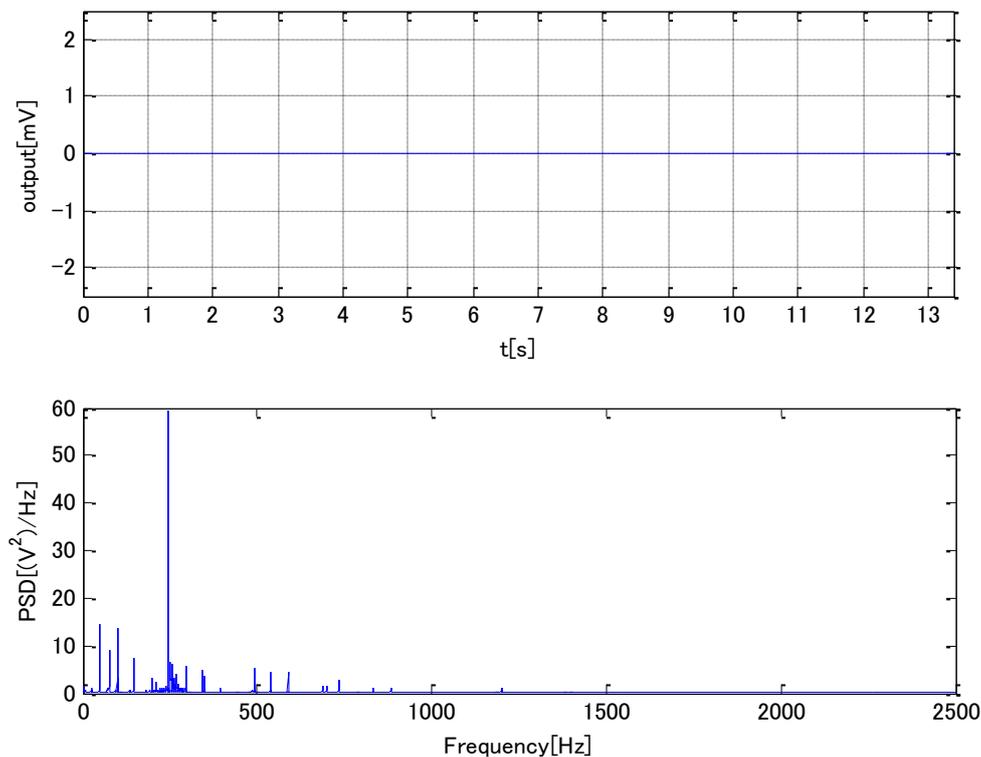


Fig. 14 Output waveform and spectrum when flow rate was 0 L/s in faucet experiment

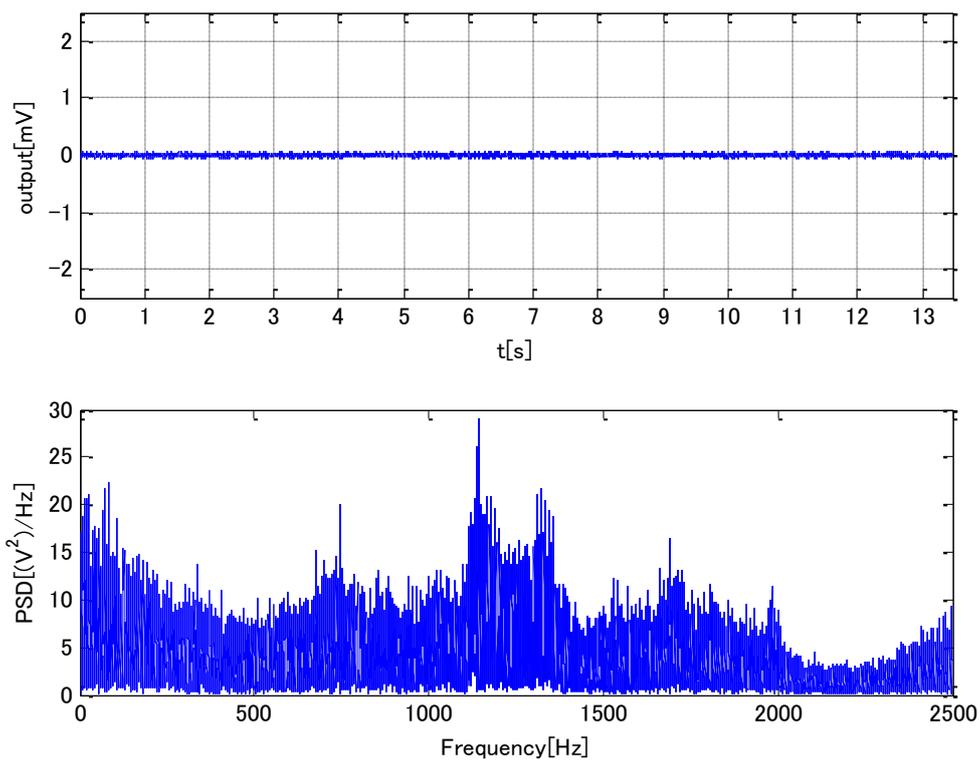


Fig. 15 Output waveform and spectrum when flow rate was 0.038 L/s in faucet experiment

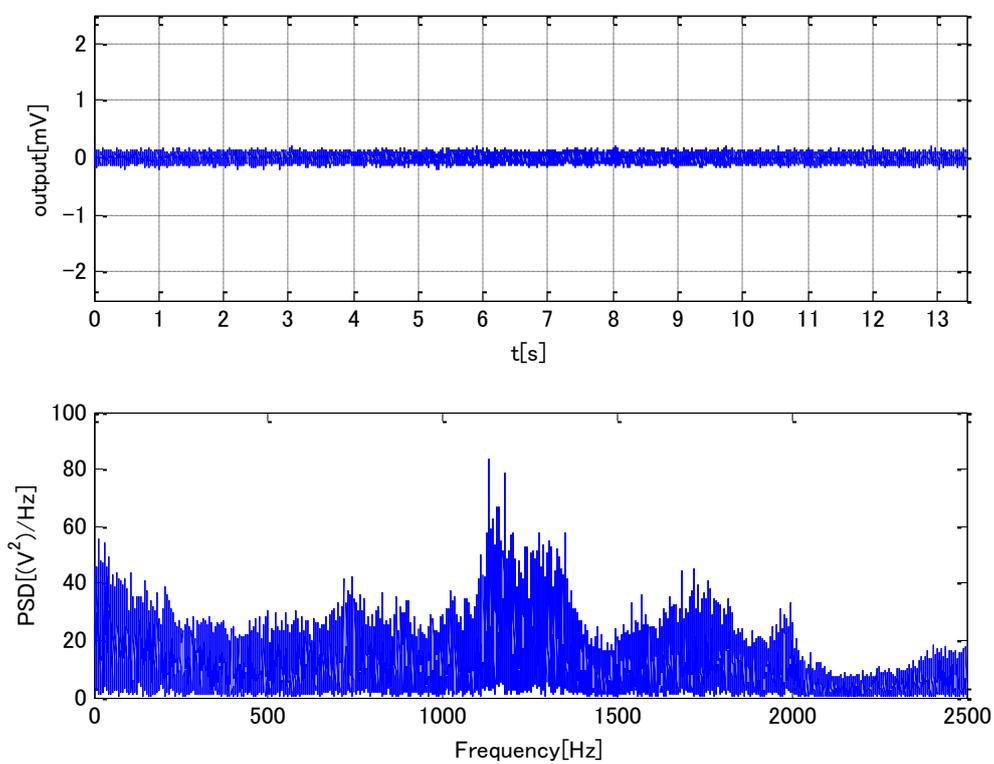


Fig. 16 Output waveform and spectrum when flow rate was 0.073 L/s in faucet experiment

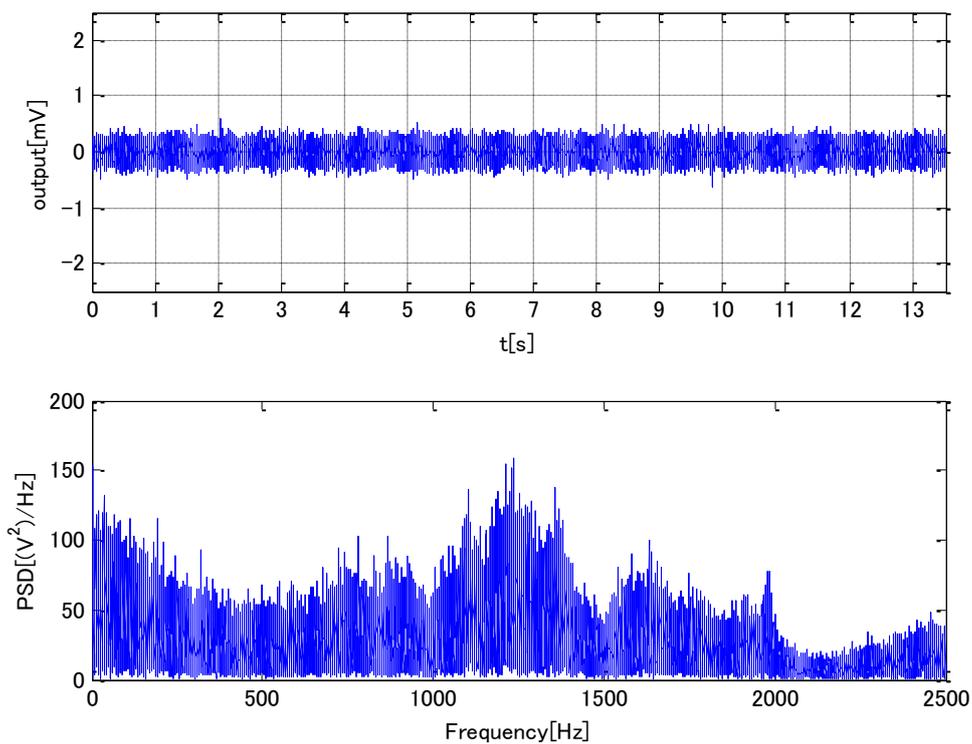


Fig. 17 Output waveform and spectrum when flow rate was 0.120 L/s in faucet experiment

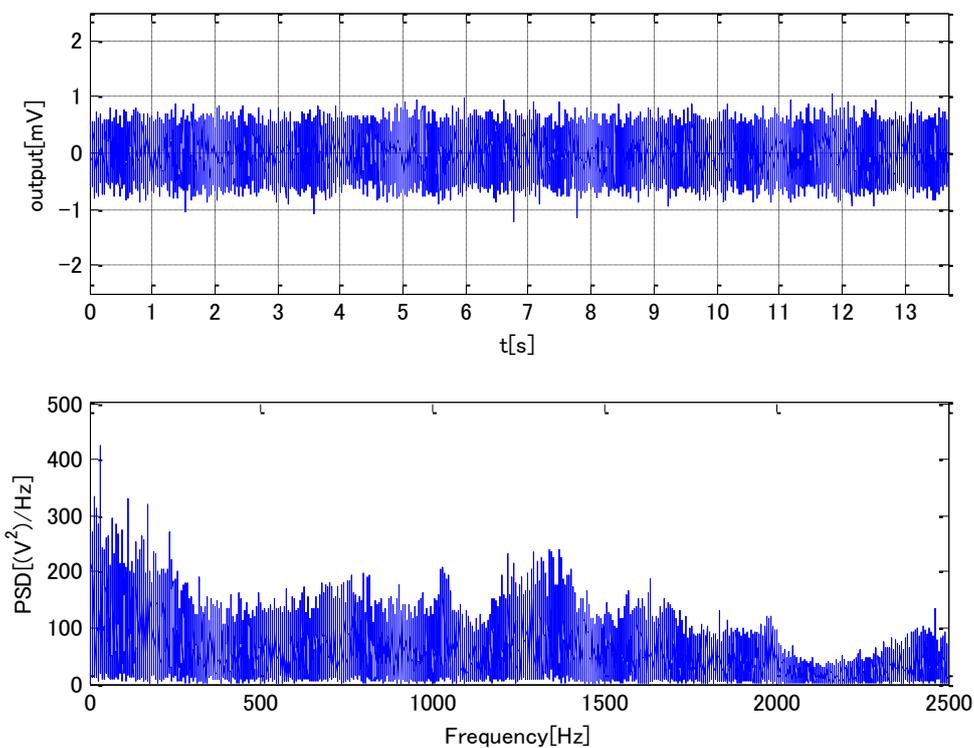


Fig. 18 Output waveform and spectrum when flow rate was 0.157 L/s in faucet experiment

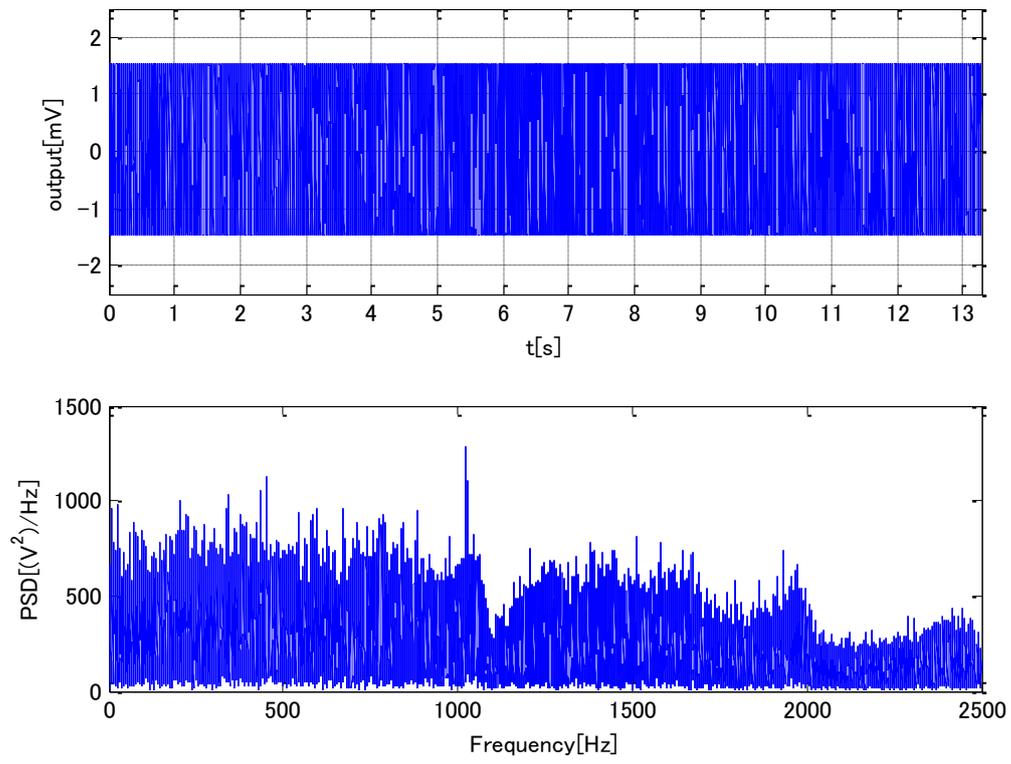


Fig. 19 Output waveform and spectrum when flow rate was 0.169 L/s in faucet experiment

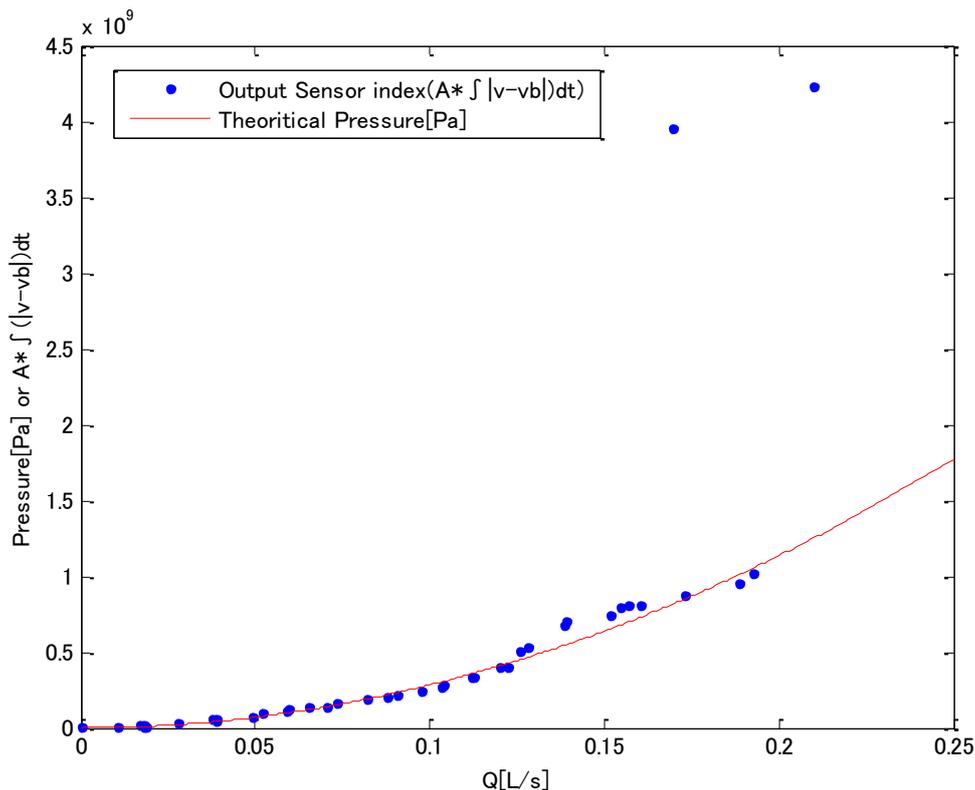


Fig. 20 Scatter diagram of  $Q$  and  $P_{out}$  in faucet experiment

Table2 Result of faucet experiment

Trial number	M[g]	Q[mL/s]	Pout	Trial number	M[g]	Q[mL/s]	Pout
0	0	0.0	0.01	21	92	18.4	14.21
1	54	10.8	4.14	22	93	18.6	13.14
2	84	16.8	18.26	23	193	38.6	63.90
3	90	18.0	23.14	24	246	49.2	98.57
4	141	28.2	43.05	25	294	58.8	138.67
5	190	38.0	72.75	26	354	70.8	180.68
6	195	39.0	81.10	27	439	87.8	262.20
7	260	52.0	121.81	28	489	97.8	312.26
8	299	59.8	153.07	29	520	104.0	353.87
9	326	65.2	173.25	30	563	112.6	413.15
10	367	73.4	204.98	31	611	122.2	500.51
11	409	81.8	230.88	32	642	128.4	661.85
12	454	90.8	277.40	33	697	139.4	873.07
13	517	103.4	336.58	34	774	154.8	992.68
14	561	112.2	424.76	35	803	160.6	1013.99
15	600	120.0	504.26	36	865	173.0	1099.90
16	629	125.8	630.30	37	943	188.6	1196.91
17	693	138.6	840.21	38	964	192.8	1282.83
18	758	151.6	930.55	39	1050	210.0	5282.70
19	784	156.8	1019.26				
20	847	169.4	4944.19				

**● 考察**

実験の結果、流量  $Q$  と指標  $P_{out}$  は全体的に残差少なく理論の曲線に一致していることが確認された。よってベルヌーイの定理に基づいた流速が大きくなれば振動も大きくなるという仮説は妥当であると考えられる。

流量  $0\text{L/s}$ 、全く流していない状態での  $P_{out}$  は  $0.01$  と非常に小さく、環境が含むノイズが流量推定に及ぼす影響はほとんどないことがわかった。

波形のスペクトルに関して、 $2500\text{Hz}$  まではある程度の出力を示していることがわかる。 $0 - 500\text{Hz}$  の低周波も問題なく取得出来ている。Fig. 19 の出力飽和波形を覗いて、 $1200\text{Hz}$  前後に大きなピークを持つという共通の特徴が見られるが、これは聴診棒の共振周波数と一致すると考えると、流れによる振動には突出した周波数特性はないものと考えられる。

また、ある流量を超えると配管から高音を発生し、出力が急激に大きくなり飽和するという現象が見られた。Fig. 19 の波形がそれを示し、Fig. 20 の約  $0.15\text{L/s} - 0.25\text{L/s}$  地点における外れ点2点で観測されている。この場合、あらかじめ決定した補正係数と出力レベルが大幅にずれてしまう為、音が静かである場合と同じに考えることは出来ないことがわかった。

### ● パイプ系での実験

次に、パイプ系の中間にセンサを設置するという想定で、実験を行い、流量の推定をする。蛇口の実験と同様に、センサは聴診棒を用いる。本実験では数回の予備実験において、今回のケースではゲインが 40dB では出力電圧が微小で電圧差を見出しにくかった為、PC への入力をデータロガーから USB オーディオ変換アダプタ (MM-ADUSB, サンワサプライ株式会社) に変更し、PC において 36.0dB の増幅 (マイクブースト機能) を行った。Table3 にアダプタの仕様を示す。

Table3 Specification of MM-ADUSB

Frequency Characteristic	20Hz to 20,000Hz
Correspondence Input Device	Only Condenser Microphone
Impedance	2,200 $\Omega$

以下 Fig. 21 に実験の様子、Table4 に実験環境を示す。



Fig. 21 Measurement system used in the experiment of piping system

Table4 Experimental environment of piping system

internal diameter of pipeline	$\phi 13\text{mm}$
Material of pipeline	Stainless Steel
temperature	21°C
humidity	45%
water temperature	16°C

## ● 結果

実験における代表的な時間波形とそのスペクトラム, 流量  $Q$  と  $P_{out}$  の関係を示す. 今回, サンプルング周波数は96kHzとした. また, 積分区間は  $t_1=1$ ,  $t_2=2$ , 校正係数は  $A = 1.0 \cdot 10^6$  とした. 実験における代表的な時間波形をとそのスペクトラムをFig. 22-27, 流量  $Q$  と  $P_{out}$  の関係を Fig. 28 および Table5 に示す.

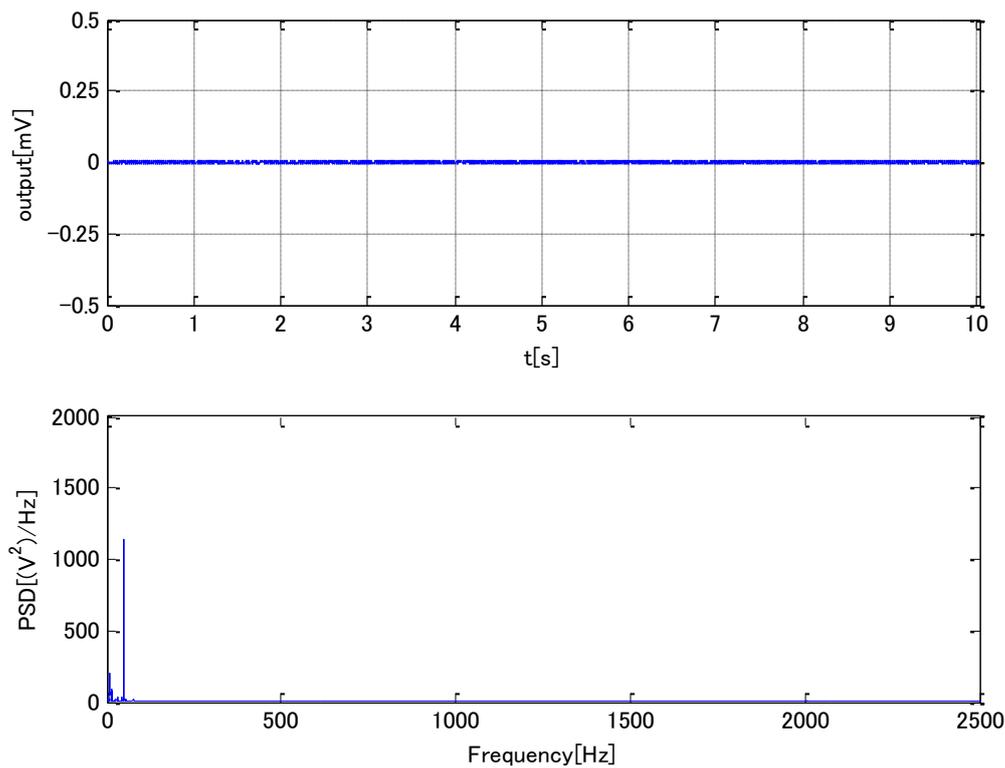


Fig. 22 Output waveform and spectrum when flow rate was 0 L/s in piping system experiment

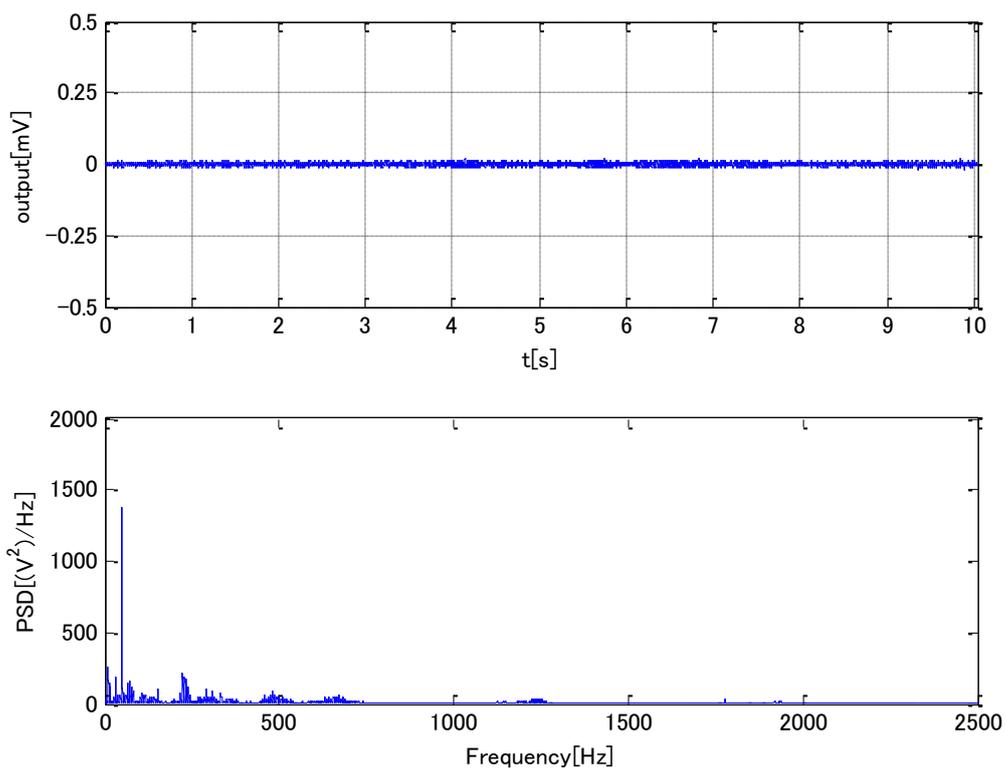


Fig. 23 Output waveform and spectrum when flow rate was 0.070 L/s in piping system experiment

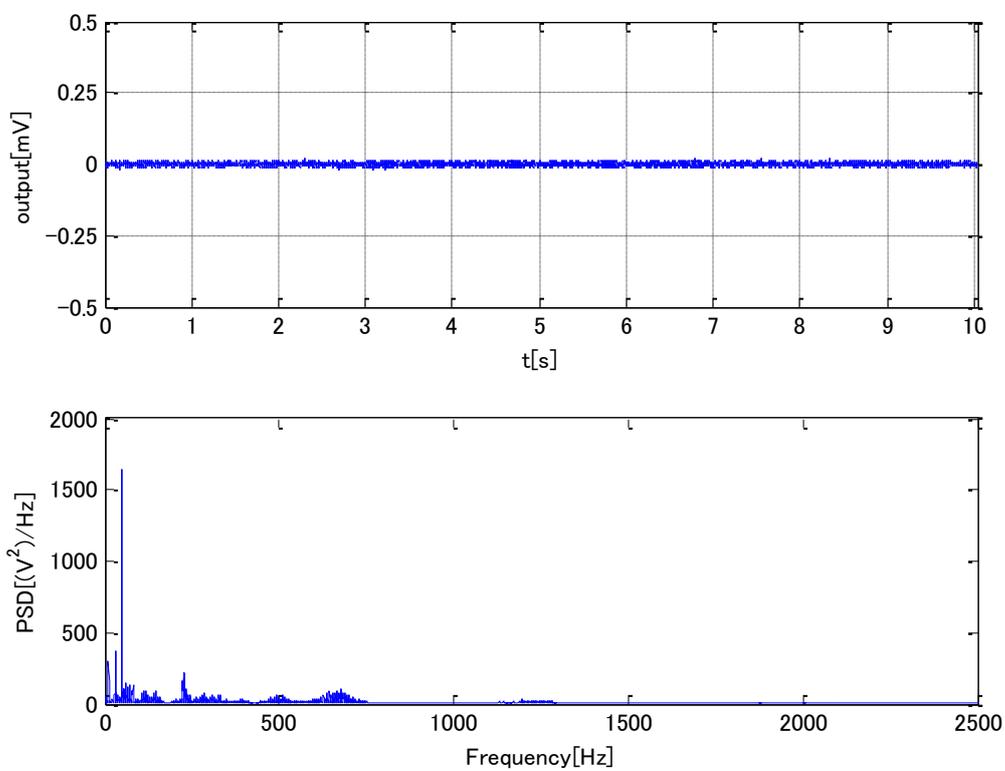


Fig. 24 Output waveform and spectrum when flow rate was 0.091L/s in piping system experiment

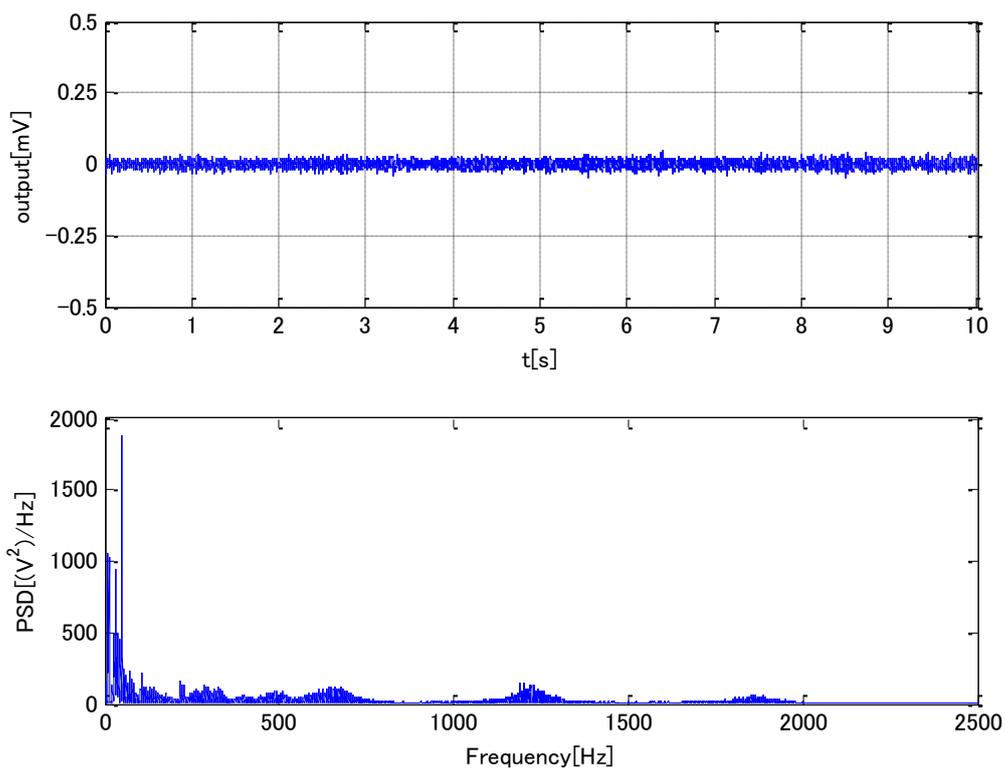


Fig. 25 Output waveform and spectrum when flow rate was 0.191 L/s in piping system experiment

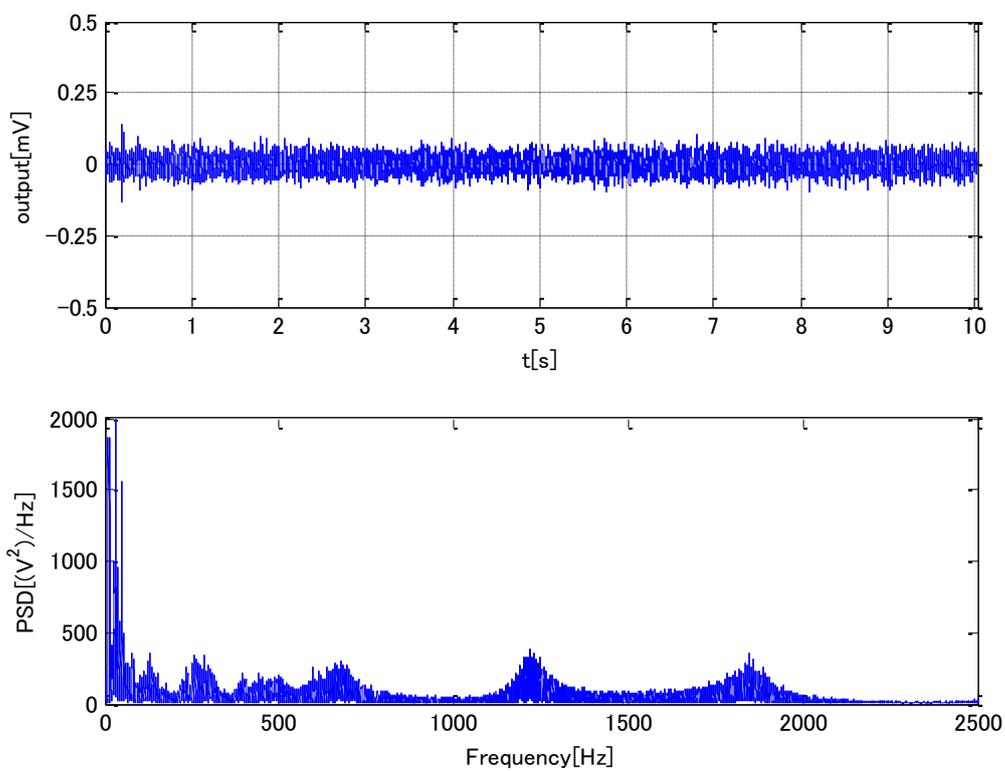


Fig. 26 Output waveform and spectrum when flow rate was 0.274L/s in piping system experiment

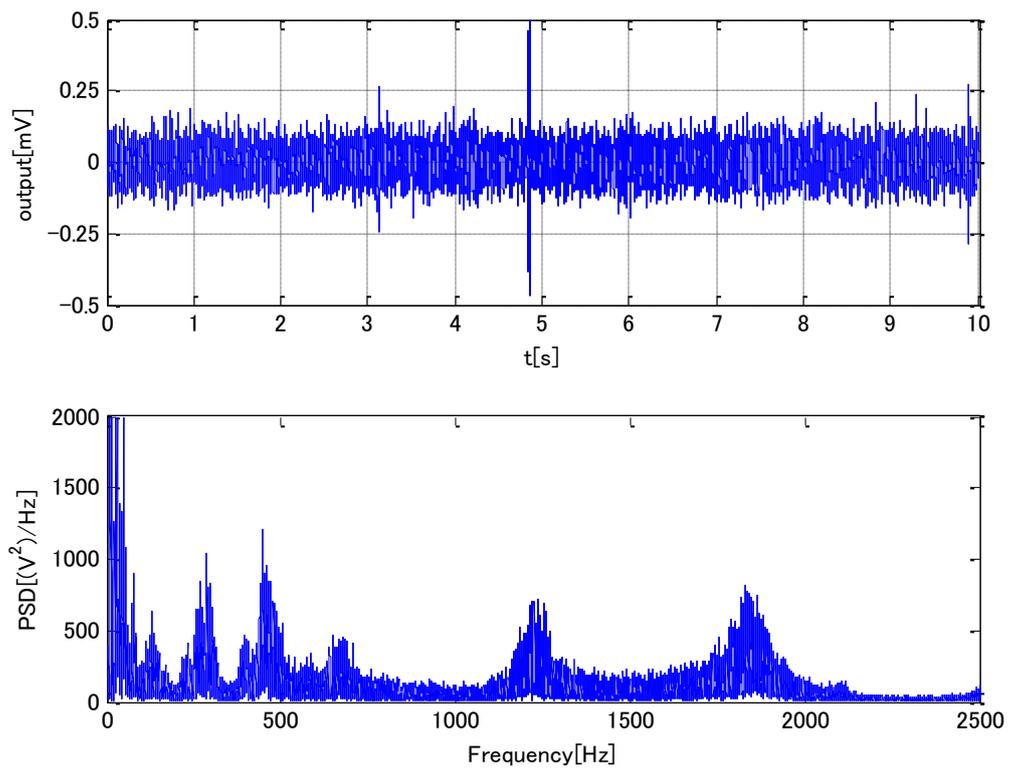


Fig. 27 Output waveform and spectrum when flow rate was 0.341L/s in piping system experiment

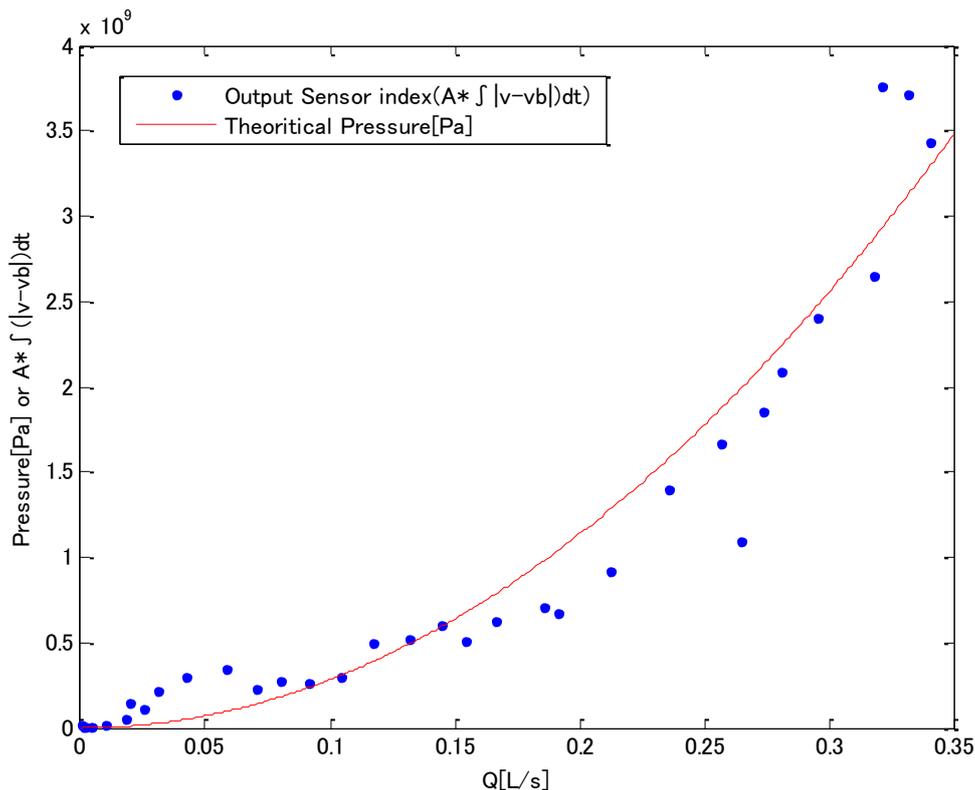


Fig. 28 Scatter diagram of  $Q$  and  $P_{out}$  in piping system experiment

Table5 Result of piping system experiment

Trial Number	M[g]	Q[mL/s]	Pout	Trial Number	M[g]	Q[mL/s]	Pout
0	0	0.0	5.43	21	929	185.8	704.89
1	13	0.4	15.61	22	959	191.8	668.04
2	45	1.5	0.41	23	1063	212.6	919.29
3	53	1.8	1.08	24	1180	236.0	1396.26
4	122	4.1	6.67	25	1326	265.2	1098.50
5	193	9.7	13.16	26	1283	256.6	1665.27
6	359	18.0	49.76	27	1370	274.0	1853.62
7	402	20.1	148.90	28	1404	280.8	2090.85
8	504	25.2	116.02	29	1478	295.6	2406.95
9	623	31.2	212.93	30	1592	318.4	2652.98
10	847	42.4	296.42	31	1660	332.0	3713.21
11	1165	58.3	344.97	32	1023	341.0	3430.26
12	1403	70.2	226.19	33	963	321.0	3758.27
13	801	80.1	272.59				
14	916	91.6	263.90				
15	1047	104.7	304.03				
16	1172	117.2	498.61				
17	1320	132.0	526.07				
18	1451	145.1	603.28				
19	773	154.6	505.54				
20	834	166.8	628.74				

### ● 考察

本実験は管路壁が厚く、振動が微弱であったが 76dB の増幅で振動波形を取得することが出来た。Fig. 22 - 27 から見ても、流量に比例した電圧出力が確認出来る。

Fig. 28 から判断すると、蛇口での実験と同様に、流量  $Q$  と指標  $P_{out}$  は二次関数に比較的フィットしているといえる。0mL/s よりも 0.004mL/s の方の出力が顕著に大きくなってしまいう結果になったが、これは全体的に出力電圧が小さく、誤差の影響を受けやすくなってしまっていたといえる。なお今回、蛇口での実験で観測された高音の発生はなかった。

流量レンジの制限としては、本実験の結果から考えれば 70mL/s 以上であれば近似曲線に近く、信用出来るといえる。

流量レンジの制限としては、本実験の結果から考えれば 0.07L/s 以上であれば近似曲線に近く、信用出来るといえる。上限は家庭用水道管の圧力が Table5 の Trial Number33 で限界だった為、判別は来なかった。しかしながら電圧の飽和は観測されなかった為、0.35L/s 以上の推定も可能であることが予想される。

#### 4. 2. 2. 異状の検出

意図的に異状を発生させ、その際の振動の特徴をセンサの出力電圧から判別出来るかどうか確認する。4. 2. 1. で使用したパイプ系に詰まりを作り、その直後約 5cm 離れた地点に聴診棒を設置し、波形を取得する。Fig. 29 に実験の概観を、Fig. 30 に詰まり部分の拡大写真を示す。



Fig. 29 Experimental environment of clogging

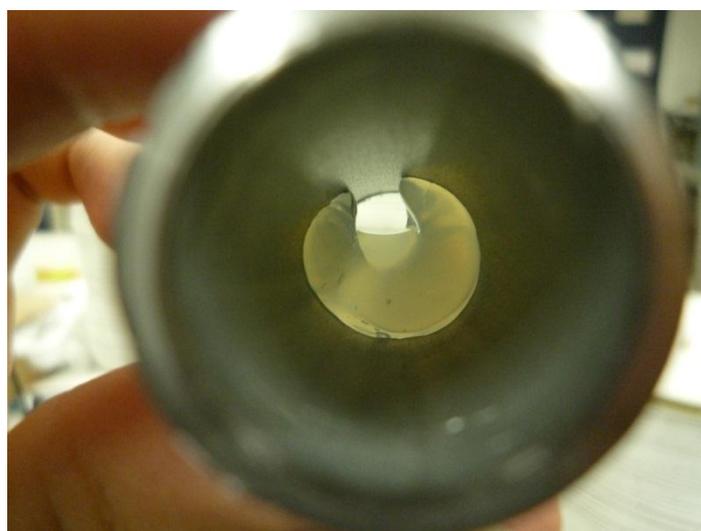


Fig. 30 Clogging in pipeline

#### ● 結果

Fig. 31 に実験システムを用い、数秒間取得した波形を示す。流量は約 0.07L/s 程度である。実験時の室温は 24°C、湿度は 43%、水温は 16°Cであった。

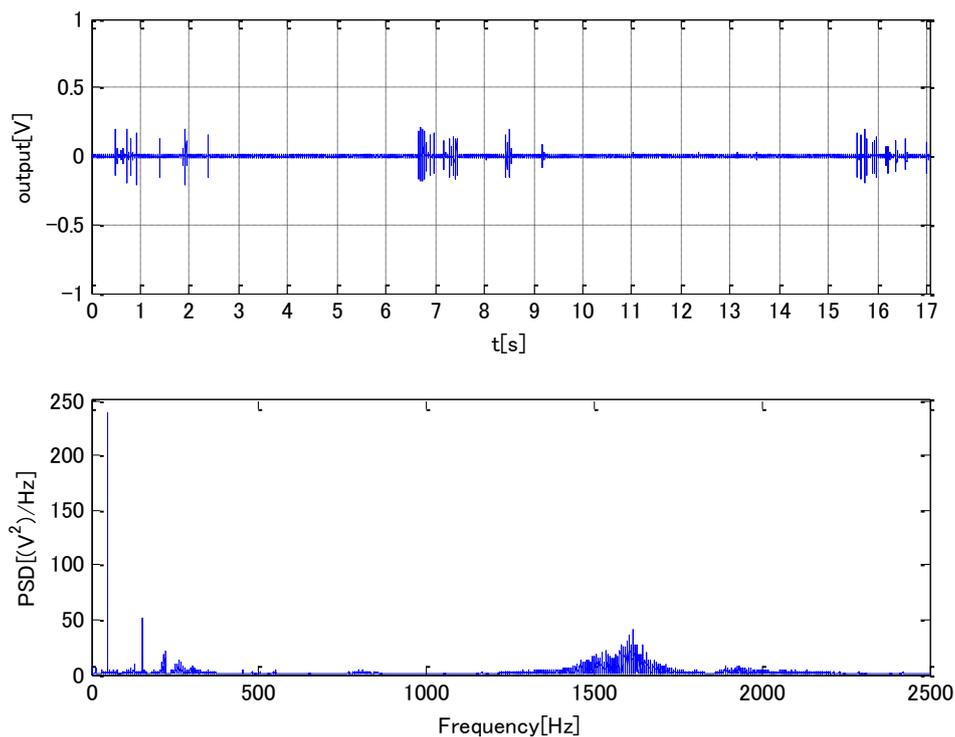


Fig. 31 Output waveform and spectrum when clogging occurs

### ● 考察

数秒の間隔をおいて、約 1600Hz のインパルス状の応答が見られた。これは詰まりに近く流れ安定しておらず、詰まりによる口径の急激な縮小がもたらす圧力揺動の、ランダムな渦の発生による振動であると考えられる。

スペクトラムを見ると、500Hz 以下の低周波を除けば高周波成分は 1600Hz に集中しており、この部分が詰まりあるいは流れを阻害する成分であると断定出来る。配管の外部に衝撃を与えると似たような波形が得られるが、このように連続的でなければ差別は可能である。

### 4. 3. 圧電素子を用いた実験

圧電素子型流量計の性能を評価する。その概観を Fig. 32, 実験環境を Table6 として示す。



Fig. 32 Experiment using piezoelectricity ceramics flowmeter

Table6 Experimental environment of piezoelectricity ceramics

internal diameter of pipeline	$\phi 13\text{mm}$
temperature	$20^{\circ}\text{C}$
humidity	38%
water temperature	$18^{\circ}\text{C}$

#### ● 結果

実験における時間波形とそのスペクトラムを Fig.33 - 44, 流量  $Q$  と  $P_{out}$  の関係を Fig. 45, 実験環境を Table7 に示す。サンプリング周波数は 5kHz とした。なお、各波形のスペクトラム表示における突出した 50Hz の成分は、計測上必ず現れる電源ノイズであることがわかっている。

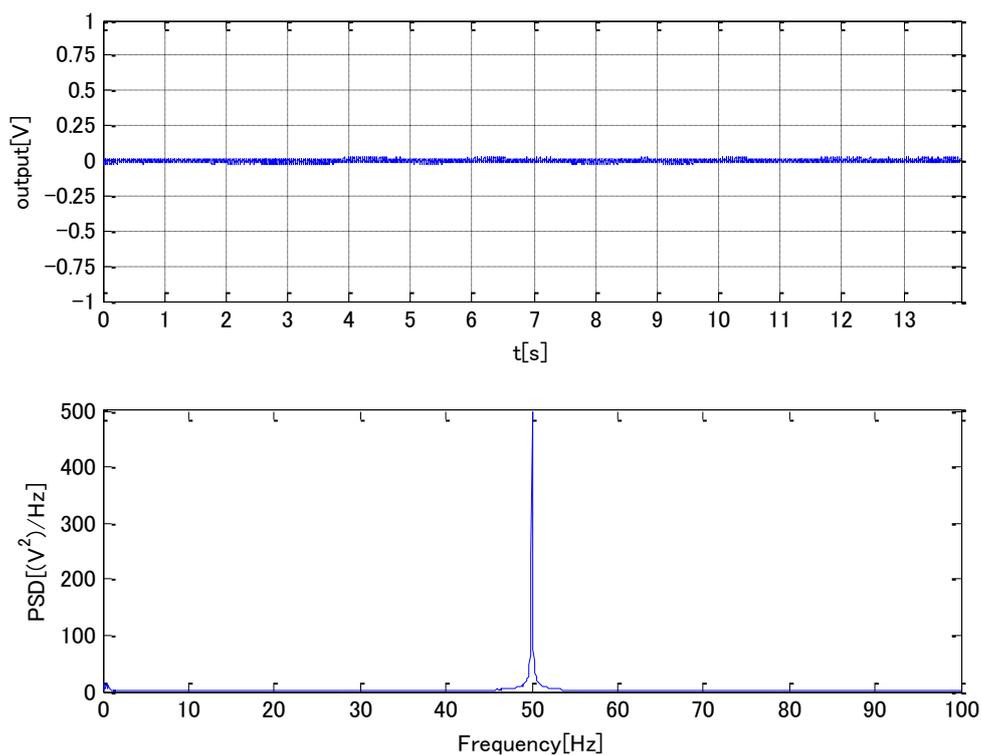


Fig. 33 Output waveform and spectrum when flow rate was 0 L/s in ceramics experiment

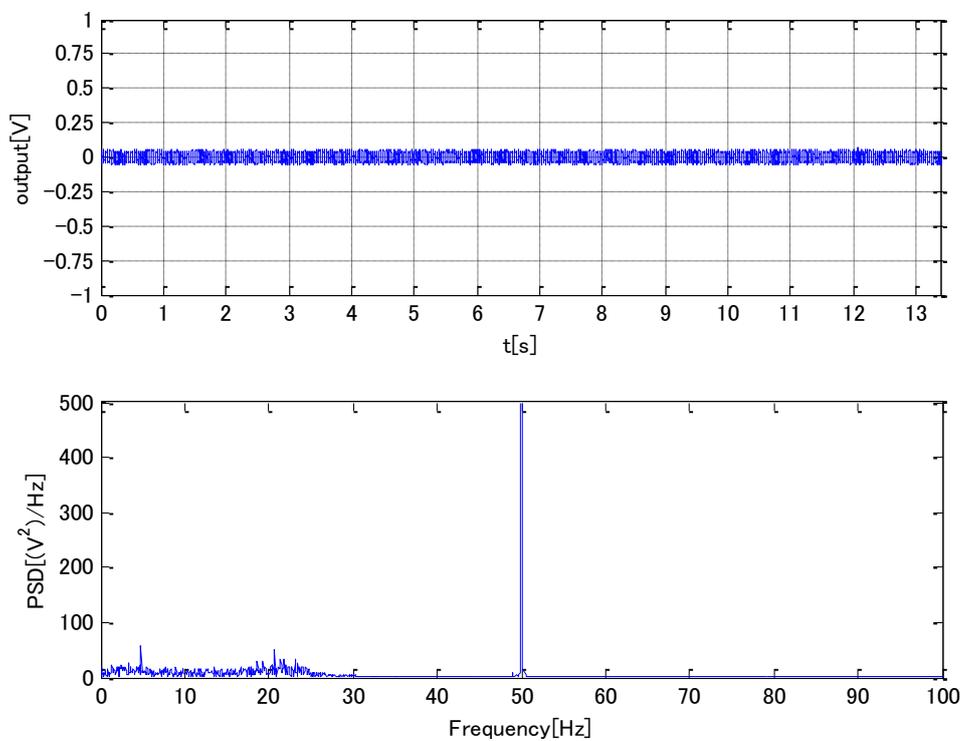


Fig. 34 Output waveform and spectrum when flow rate was 0.034 L/s in ceramics experiment

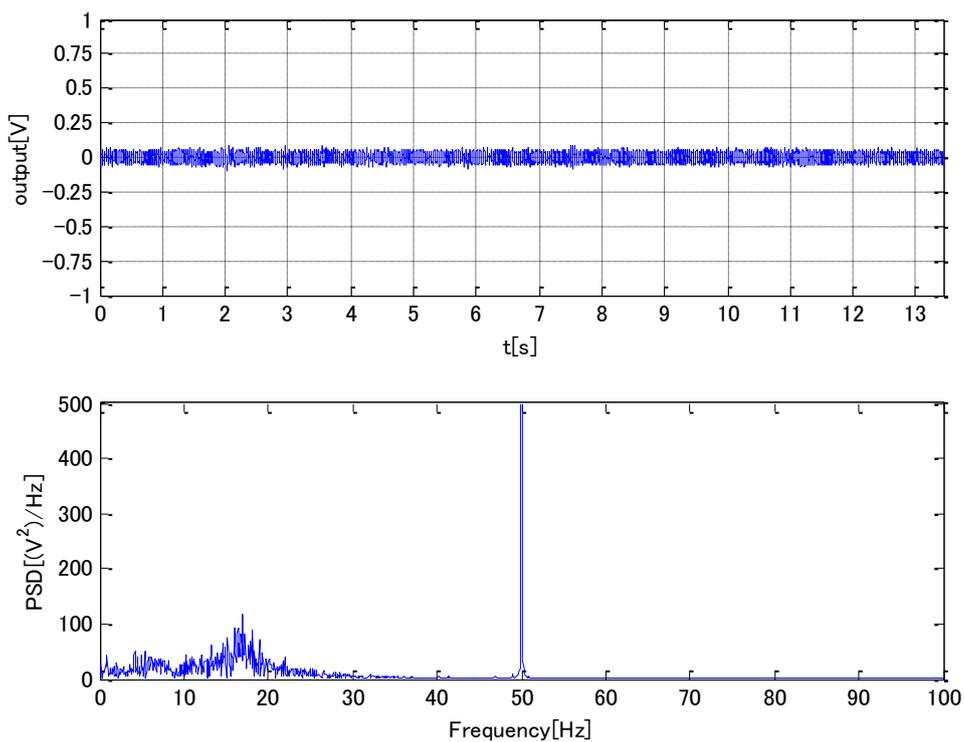


Fig. 35 Output waveform and spectrum when flow rate was 0.051 L/s in ceramics experiment

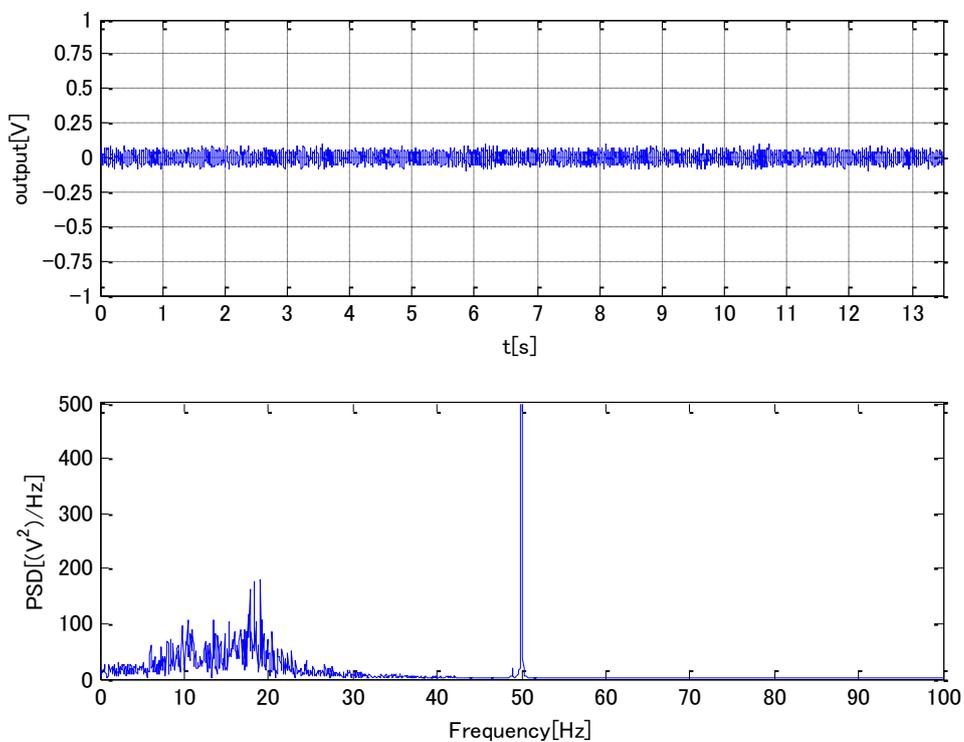


Fig. 36 Output waveform and spectrum when flow rate was 0.073 L/s in ceramics experiment

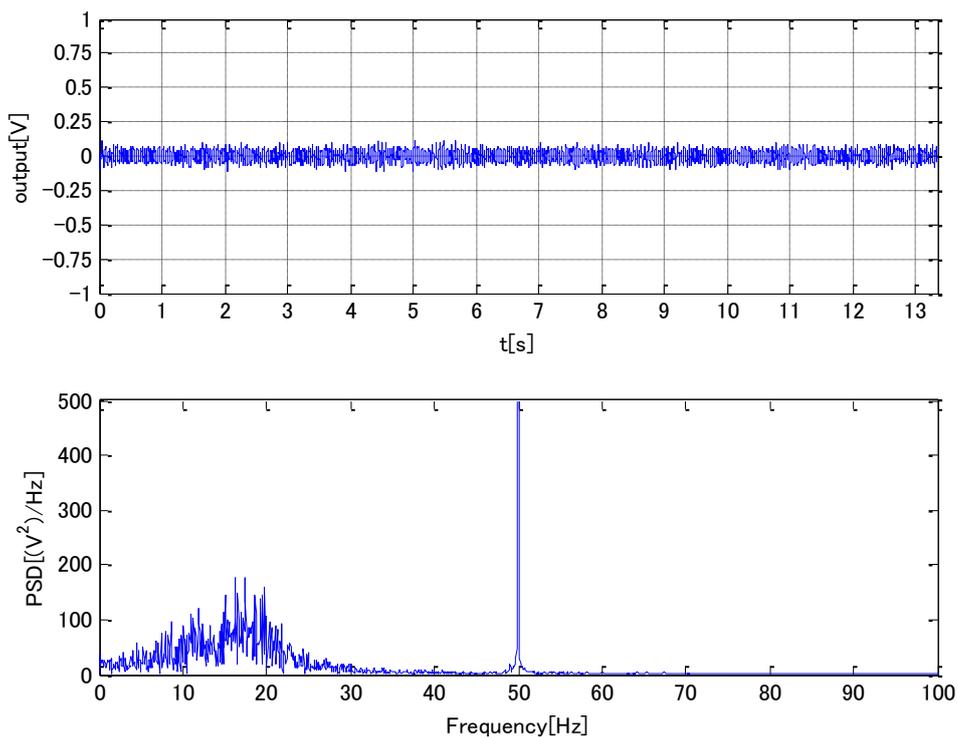


Fig. 37 Output waveform and spectrum when flow rate was 0.096 L/s in ceramics experiment

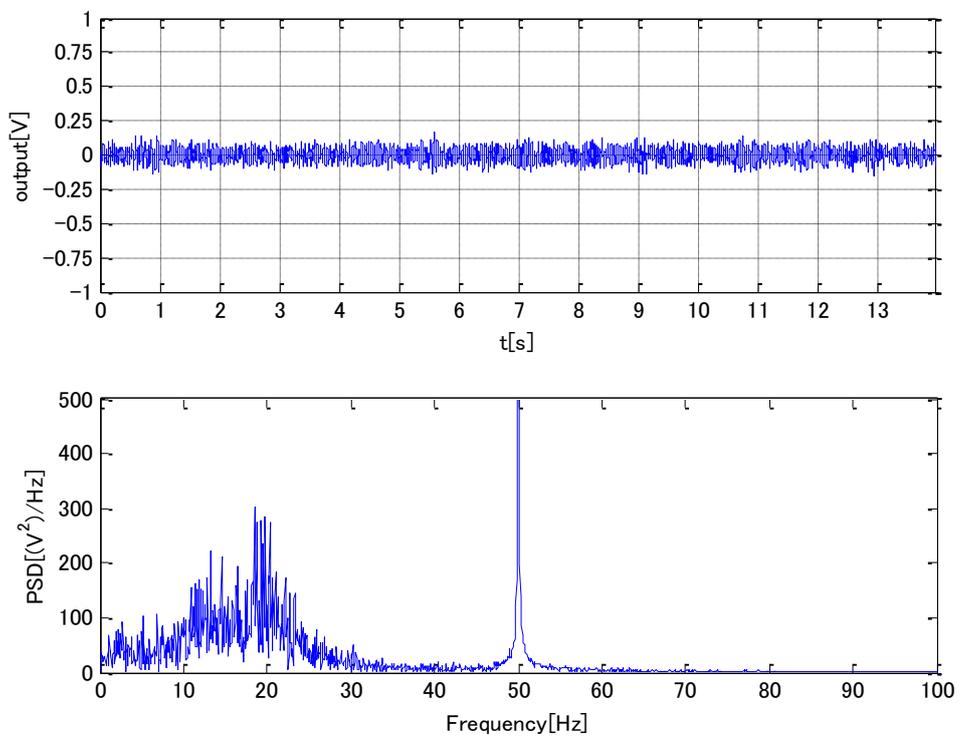


Fig. 38 Output waveform and spectrum when flow rate was 0.118 L/s in ceramics experiment

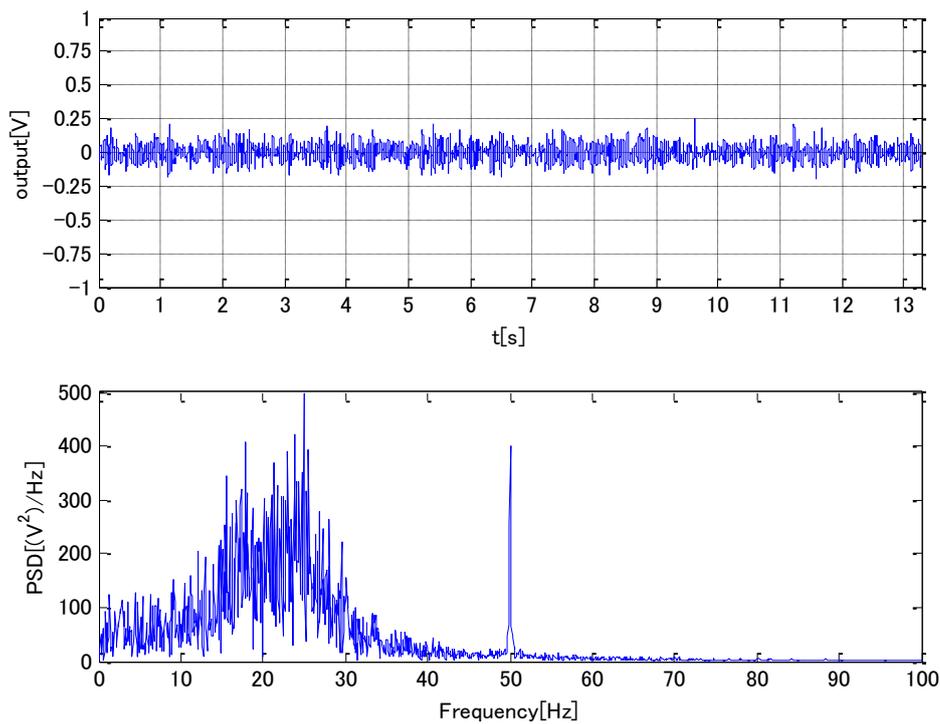


Fig. 39 Output waveform and spectrum when flow rate was 0.147 L/s in ceramics experiment

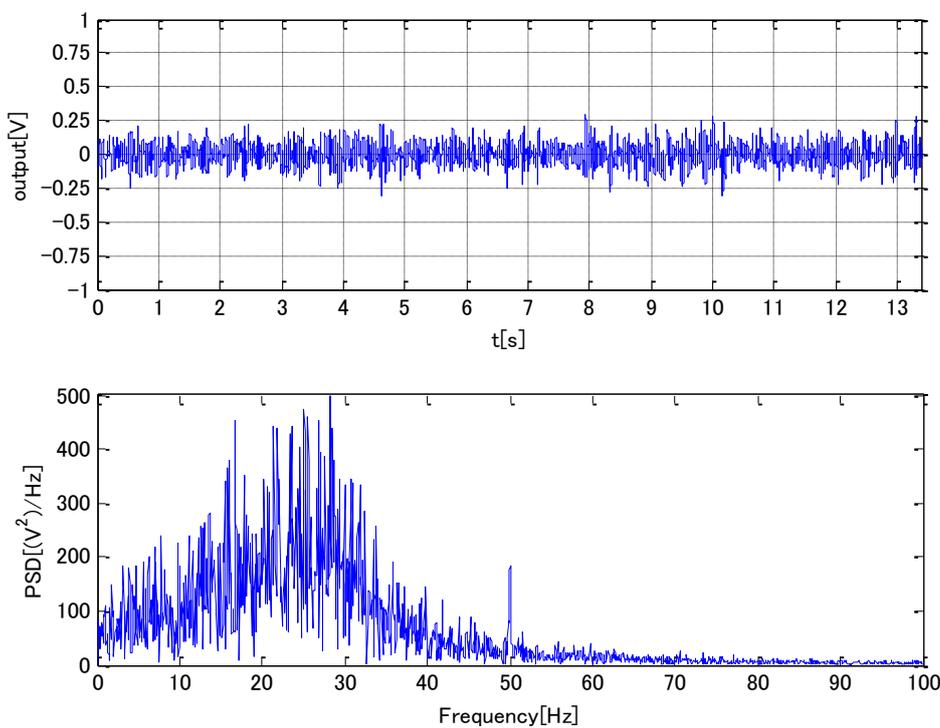


Fig. 40 Output waveform and spectrum when flow rate was 0.204 L/s in ceramics experiment

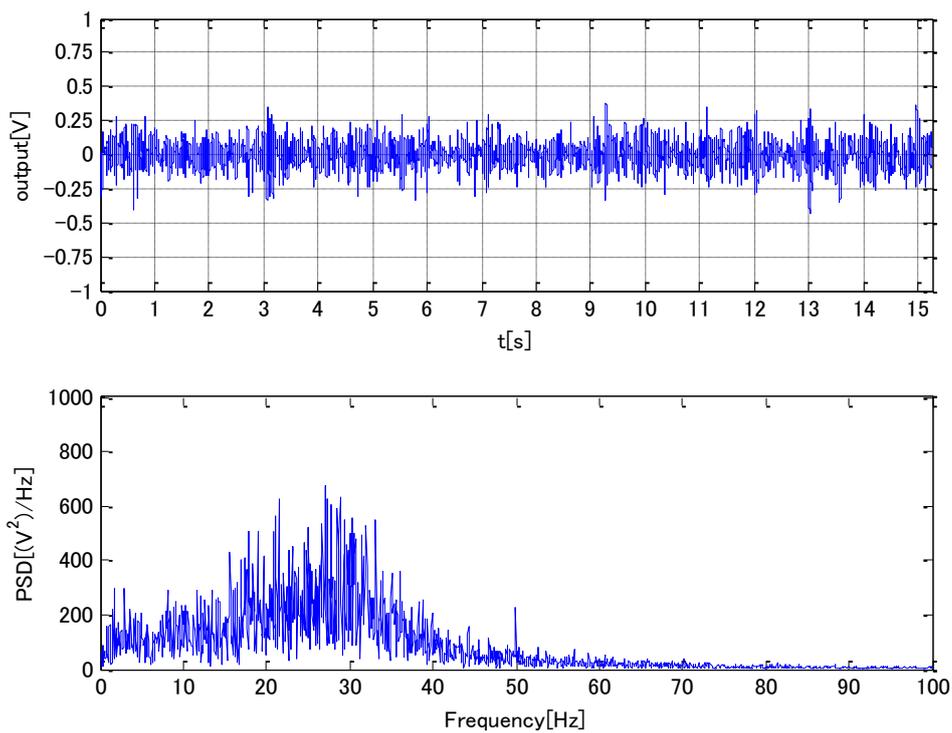


Fig. 41 Output waveform and spectrum when flow rate was 0.207 L/s in ceramics experiment

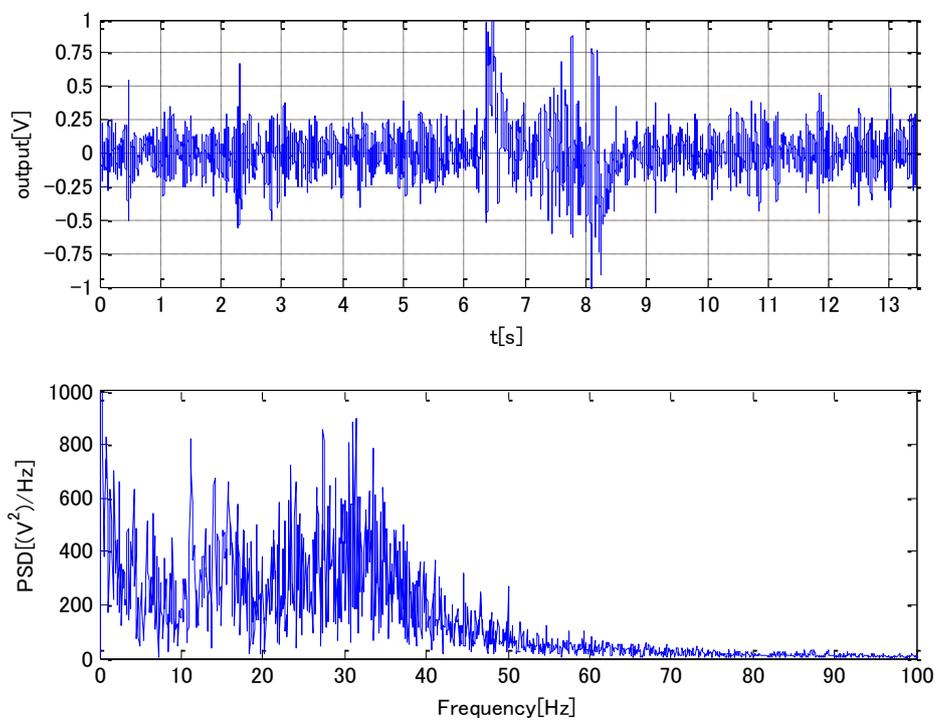


Fig. 42 Output waveform and spectrum when flow rate was 0.223 L/s in ceramics experiment

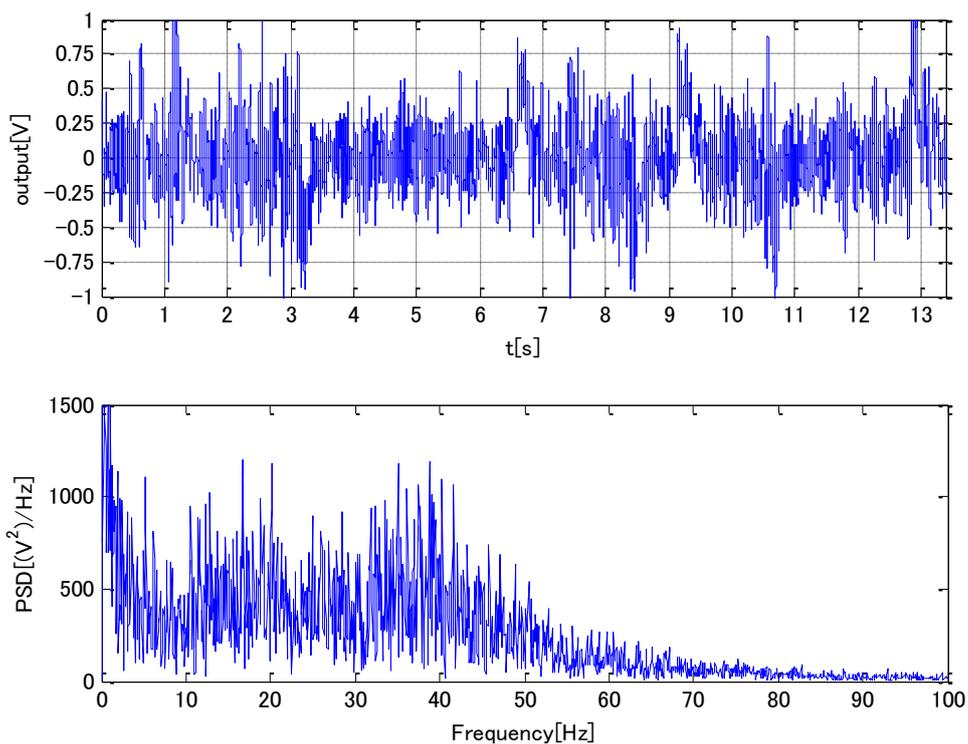


Fig. 43 Output waveform and spectrum when flow rate was 0.236 L/s in ceramics experiment

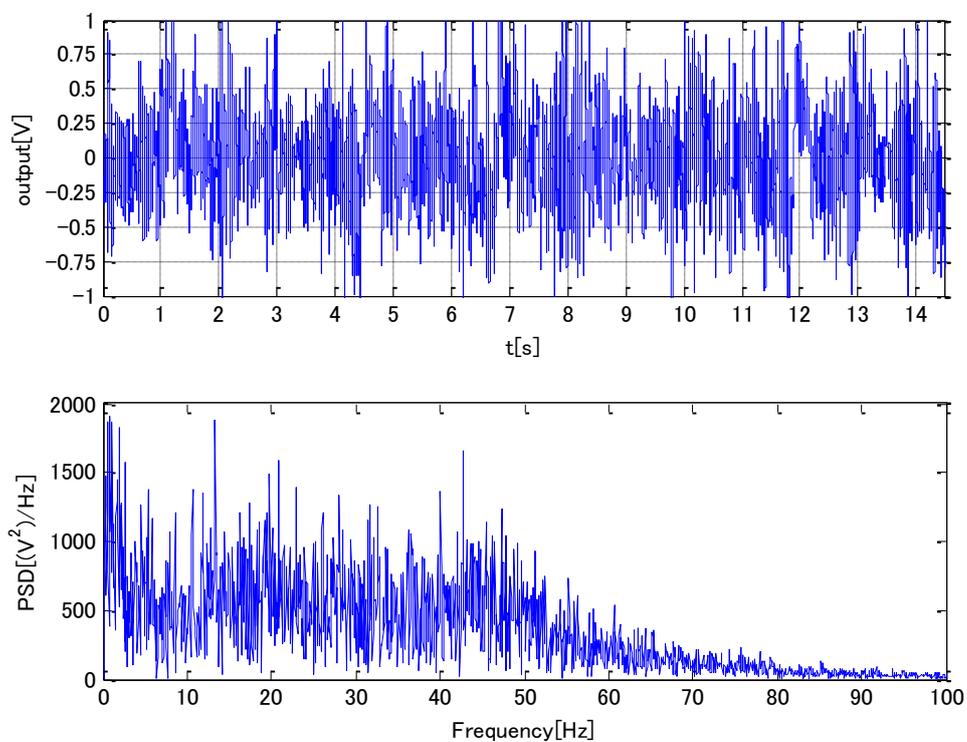


Fig. 44 Output waveform and spectrum when flow rate was 0.288 L/s in ceramics experiment

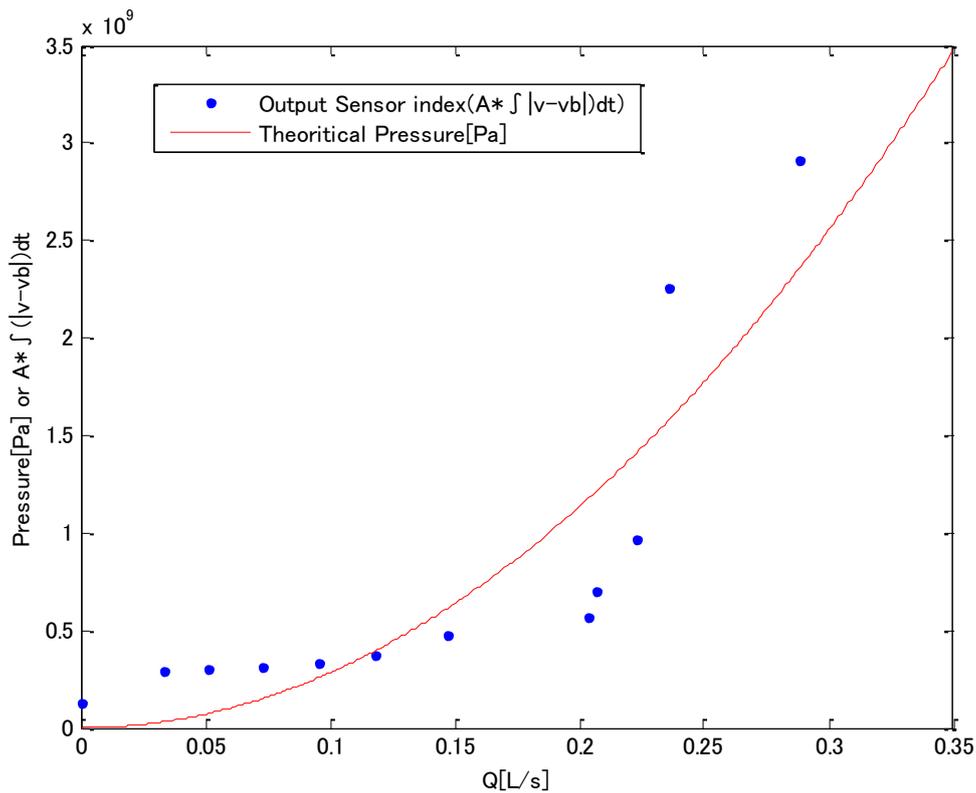


Fig. 45 Scatter diagram of  $Q$  and  $P_{out}$  in ceramics experiment

Table 7 Result of piezoelectricity ceramics experiment

Trial Number	M[g]	Q[mL/s]	Pout	T
0	0	0.0	65.18	なし
1	335	33.5	147.92	10
2	513	51.3	152.11	10
3	727	72.7	157.98	10
4	478	95.6	165.53	5
5	591	118.2	185.07	5
6	734	146.8	237.68	5
7	1020	204.0	283.75	5
8	1035	207.0	352.06	5
9	1114	222.8	485.29	5
10	1181	236.2	1130.59	5
11	1441	288.2	1456.83	5

### ● 考察

圧電素子を用いても比例的な振幅が得られた。Fig. 45 の指標  $P_{out}$  からそのことが判断出来る。しかしながら、理論の曲線にはうまくフィットしない結果となった。

一方で、各波形のスペクトラムを参照すると、聴診棒で計測したときと比べて低周波に特徴を持っている。これは振動を介する対象がプラスチックであり、材質がローパスフィルタの特性を持っているからであると考えられる。

また流量によって成分が大きく異なっていることがわかった。0.051L/s 時点では18Hz 部分に成分が集中しているが、概ね0.147L/s より大きくなると、その成分は徐々に高周波へとシフトしている現象が見られる。

波形や散布図の再現性は確認されているが、流量を推定するには指標  $P_{out}$  にフィットするような理論を考案する必要がある。0L/s のときの波形を参照すると、ノイズは指標  $P_{out}$  に影響を及ぼさないくらい十分小さいと考えられる。また波形の飽和は確認されなかった為、比較的に大容量まで計測可能であると予測される。

## 第5章 おわりに

本論では、振動センサを用いて水道管路内の状態診断を行った。実験の結果、振動が管路壁まで伝わる状況であれば、ある程度の流量において推定は可能であることがわかった。また振動は流量に伴って、二次関数的に増加するという仮説も、実験によって妥当性を証明することが出来た。

また詰まりを作為的に発生させ、聴診棒を用いて測定を行ったが、通常時とは異なるノイズを含んだ波形が得られた。波形は普段よりも大きい高周波のスペクトラムを含んでいることがわかった。実験の条件を増やし、さらなる検証が必要である。

また圧電素子型流量計は現段階においては、曲線にフィットしていない以上、実用的に使うことは難しいと思われる。ある程度の比例的な特徴と、周波数のシフトを確認することは出来たので、これらを説明する理論の構築が課題として挙げられる。

本論の方法であれば、従来のようにクランプオン型の流量計を導入することに比べ、導入コストを抑えることが出来る。厳密な精度を必要としない、流れの有無の判定といった簡易的な用途が考えられる。今後の展望として、流量推定の精度向上や、漏れの検知等が挙げられる。漏れの音響信号はコンデンサマイクロフォンの計測可能周波数である為、実現可能性は高い。

## 謝辞

学部から大学院にかけて3年間面倒を見ていただいた渡辺嘉二郎教授，小林一行教授にはこの場を借りて感謝申し上げます。特に大学院では研究に対する心構えや技術的知識など，今後の人生では得られない貴重な指導をいただき，本当に感謝しています。

また渡辺研究室の皆さまには研究を手伝ったり，知識を交換したりと，様々な面から支えをいただき，充実した学生生活には欠かせない存在であったと感じます。

最後に大学院まで進学させてくれた両親をはじめ，家族全員に感謝します。6年間ありがとうございました。

平成25年2月22日

角田 裕紀

## 参考文献

- [1] 東京都水道局 事業概要 平成 23 年版  
<[http://www.waterworks.metro.tokyo.jp/water/jigyo/syokai/pdf/01\\_gaiyou23\\_01\\_01.pdf](http://www.waterworks.metro.tokyo.jp/water/jigyo/syokai/pdf/01_gaiyou23_01_01.pdf)>, pp. 1-12 ,  
2012.6.7 閲覧
- [2] 東京都水道局 事業概要 平成 23 年版  
<[http://www.waterworks.metro.tokyo.jp/water/jigyo/syokai/pdf/01\\_gaiyou23\\_03\\_03.pdf](http://www.waterworks.metro.tokyo.jp/water/jigyo/syokai/pdf/01_gaiyou23_03_03.pdf)>, pp. 67-70 ,  
2012.6.7 閲覧
- [3] 増田 新, 正曾根 彰, 大橋 新: 配管からの流体漏洩音の空間フィルタによる検出, 機械力学・計測  
制御講演論文集, D & D, p.238, 2000
- [4] 宮地 宣夫, 藪田 薫, 赤堀 秀雄: 差圧伝送器の導圧管詰まり診断, 横河電機技報, Vol.48, No. 1, 2004
- [5] 藤井 正, 近澤 佳隆, 此村 守, 山口 彰: 大口径・高流速配管の流動励起振動試験, サイクル機構  
技報, No.26, pp. 247-248, 2005.3
- [6] 今市 憲作, 田口 達夫, 谷林 英毅, 本池 洋二: わかる水力学, 日新出版(1979)
- [7] D.J.Wang, H.C.Ho, Jeremy Wang, Z.D.Tsai, "WATER INDUCED VIBRATION IN THE NSRRC",  
Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, May 2005
- [8] 山崎 輔, 渡辺 嘉二郎: コンデンサマイクロフォンを用いたセキュリティシステム, センシングフ  
ォーラム資料〔計測自動制御学会〕18, pp. 221-226, 2001.10