

# 法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2024-07-29

## コンデンサマイクロフォンを用いた異状計測システム

石垣, 司 / ISHIGAKI, Tsukasa

---

(発行年 / Year)

2005-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2005-03-24

(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

## コンデンサマイクロフォンを用いた 異状計測システム

2004 年度

法政大学大学院 工学研究科 システム工学専攻

03R6106

石垣 司

指導教授 渡辺 嘉二郎 教授

# **Master's Thesis**

## **Development of Two Measurement Systems of Abnormal Condition by Using Condenser Microphone**

by

**Tsukasa Ishigaki**

System Engineering,  
Graduate School of Engineering,  
Hosei University  
February 2005

## **Abstract**

Condenser microphone type pressure sensor is supersensitive in wide frequency range, inexpensive and small in size. This paper describes two novel measurement systems using condenser microphone. First presented measurement system is an application for household security sensor based on novel idea for sensor design. The condenser microphone for this system was modified in order to be influenced by the pressure, acceleration, temperature and light. We get information of securities from this system after the multi physical quantity mixed one-dimensional time series output data of the sensor was decomposed respective physical quantities be concerned respective security phenomena. The decomposition of the multi quantities mixed data is used by Kalman filter. Next, another presented system is an application for abnormal diagnosis of high-pressure gas regulator. We developed a measurement system which can detect easily diaphragm's vibration of the pressure regulator by using condenser microphone. Then I attempted abnormal diagnosis of pressure regulators from the diaphragm's vibration data I get by using this measurement system.

# 目次

Abstract.....	3
第1章 序論.....	6
1.1 序詞.....	6
1.2 コンデンサマイクロフォン型圧力センサ.....	6
第2章 家庭用スマートセキュリティセンサへの応用.....	8
2.1 はじめに.....	8
2.2 複数の物理量を感知するセンサ.....	9
2.2.1 コンデンサマイクロフォン型デバイス.....	9
2.2.2 センサとしての特性.....	10
2.2.3 センサの数学モデル.....	12
2.3 セキュリティ事象の分析.....	16
2.3.1 火災.....	17
2.3.2 侵入.....	17
2.3.3 地震.....	19
2.3.4 暗騒音の影響.....	19
2.4 複数の事象の分離と判断.....	20
2.4.1 カルマンフィルタの導入.....	20
2.4.2 セキュリティ事象の分離と判定ロジック.....	21
2.5 まとめ.....	26
第3章 高圧ガス圧力調整器異常診断への応用.....	28
3.1 はじめに.....	28
3.2 高圧ガス圧力調整器.....	28
3.2.1 単段式圧力調整器.....	28
3.2.2 圧力調整器のモデリング.....	29
3.3 仮定と問題の記述.....	33
3.3.1 仮定の記述.....	33
3.3.2 問題の記述.....	33
3.4 ダイアフラム振動計測システム.....	33
3.5 異常診断の方法.....	35
3.5.1 流量による検出レベルの違いについて.....	35
3.5.2 振動スペクトルが単峰ではない場合について.....	36
3.5.3 パワースペクトルの推定法について.....	37
3.6 データの測定と結果.....	37

3 . 6 . 1 調整器圧力変動データの測定 .....	37
3 . 6 . 2 結果 .....	38
3 . 7 まとめ .....	39
第4章 結論 .....	41
参考文献 .....	42
Appendix .....	44
Appendix 1 計測とセンシング .....	44
Appendix 2 カルマンフィルタ .....	45
Appendix 3 AR 法によるスペクトル推定と AIC による次数選択 .....	46
Appendix 4 計測回路図 .....	48
研究業績 .....	49
謝辞 .....	50

# 第1章 序論

## 1.1 序詞

センシングは、人間の日常生活や科学的行為、生物の生命活動等において基本的な位置を占める行動である。生物に関する後天的に与えられたインテリジェンスのすべては何らかのセンシングによるフィードバックを必要とするといっても過言ではない。人間は体中に張り巡らされている感覚器により自他の環境現象をセンシングすることで、その変化に対し適切なアクションをとることができる。下等菌類の一種である真性粘菌は神経ネットワークをもたない原形質の固まりであるにもかかわらず、エサとなる物質の濃度勾配をセンシングすることにより全体として最適化された形状をとることが知られている<sup>1)</sup>。このようにセンシングとは生物の生において不可分かつ重要な行為である。それは工学的行為に関しても同様である。計測すること(計測とセンシングについては Appendix1 を参照)なしに知識を得ることはできない。計測は工学行為の基本である。また、計測は、計測という行為自体が研究の対象<sup>2) 3)</sup>にも成り得る科学である。

計測の一つの目的として異状の検出があり、多くの研究成果がある<sup>4)5)</sup>。機械に限らず様々なシステムの異常を検知することは日々の生活の安全のために重要な役割を果たす。そこで本論ではコンデンサマイクロフォンを使用した2つのシステム「家庭用スマートセキュリティセンサ」、「高圧ガス圧力調整器の異常診断装置」の研究開発について述べる。「家庭用スマートセキュリティセンサ」の章では、従来の計測システム設計思想とは正反対の新規な設計思想に基づいて設計されたセンサとその家庭用セキュリティへの応用について述べる。ここでは新規な設計思想に基づいた単一のセンサで、圧力、加速度、温度、光の計測が可能であることを示す。そして、一般家庭における火災、侵入、地震を異常である状態、つまり、異状とみなし、その検出にそのセンサを応用した。「高圧ガス圧力調整器の異常診断装置」の章では、高圧ガス圧力調整器のゴムダイヤフラム振動の計測法とその計測データからの劣化度合い判定への試みについて述べる。圧力調整器ダイヤフラムの振動を直接とらえるための計測システムは従来には存在しない新規なものである。また、その計測器は可搬であり計測法は簡易である。そのシステムにより調整器ダイヤフラムの振動が計測可能であることを示す。

## 1.2 コンデンサマイクロフォン型圧力センサ

Fig 1.1 にコンデンサマイクロフォンを示す。コンデンサマイクロフォンは本来、音響を計測するための機器である。そのため一般には人間の可聴域(約 20Hz ~ 20kHz)に合わせた周波数特性を持つように設計されている。しかし、本論では極低周波を検知することができる低周波マイクロフォン(プリモ社製, EM156T)を使用する。その検出可能な周波数

領域は約 0.1Hz ~ 20kHz であり、また、その感度は 1kHz で -41dB(0dB=1V/Pa)である。Fig 1.2 にそのゲインの周波数特性を示す。このコンデンサマイクロフォンは音響計測のみならず、さまざまな工学的応用が実践されている<sup>6)~8)</sup>。

コンデンサマイクロフォンはその前面にエレクトリックフィルムと電極が微小なスペースをもって装着されている。このフィルムは電荷が荷電されており、その表面は絶縁体でコーティングされている。そのため、電荷が放電することなく永久電荷として蓄えられている。このフィルムは圧力を受け歪む。その歪みにより電極とのスペースが変化し、その変化に対応して静電容量と静電容量両極の電圧が変化する。それにより、圧力の変化を検知する。

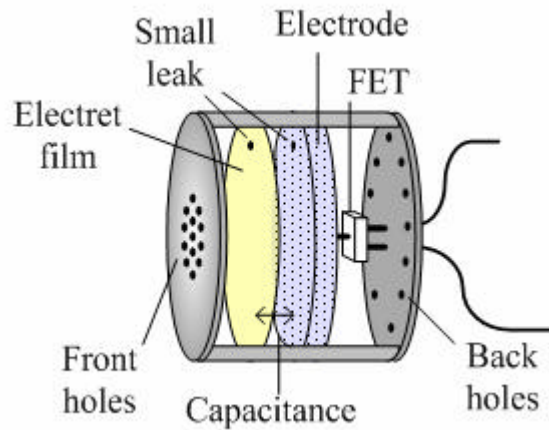


Fig 1.1 Condenser microphone

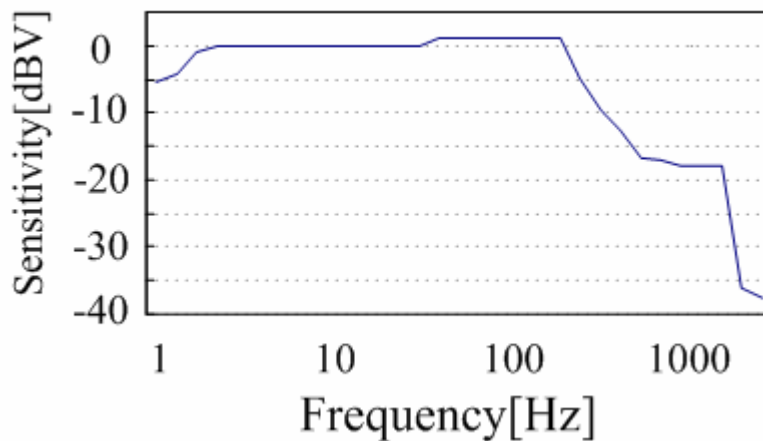


Fig 1.2 Frequency response of condenser microphone EM156T



## 第 2 章 家庭用スマートセキュリティセンサへの応用

### 2.1 はじめに

一般家庭における安全への関心が高まってきている。日本国内の空き巣の認知件数は過去 5 年間で約 2.5 倍にも膨れ上がっている<sup>9)</sup>。ほぼ毎年の火災発生件数は依然一年間で 6 万件を超え、死傷者数は毎年約 2000 人にも及ぶ<sup>10)</sup>。日本列島は、ユーラシア、北米、フィリピン海、太平洋とそれぞれ名付けられた 4 枚のプレートの衝突部にあり、世界でも有数の地震発生地となっている<sup>11)</sup>。これら災害に対する一般家庭の安全対策として、これら災害の発生の検知が必要であり、このために多様なセンサが必要となる。上の 3 つの災害事象の検知のために空き巣用センサ、火災用センサ、地震用センサの 3 つを家庭内に設置しなければならない。

従来センサは、一つの物理量をそれぞれ独立に計測する機器であり、圧力センサは圧力を、光センサは光を検知する。すなわち従来手法では「空き巣」には「空き巣センサ」、  
「火災」には「火災報知器」が必要であった。工場内の設備等で使用されるセンサでは検知したい物理量を高精度・高信頼性をもって計測することが求められているため、これはごく一般的な考え方である。しかし、家庭用総合防災センサは多様な物理量からなる多様な兆候を検知する必要があり、多くの種類のセンサが必要である<sup>12)</sup>。それらのセンサの組み合わせで目的に合うように構築されたシステムは、大規模もしくは高コストとなるため一般家庭用には向かない。

そこで本章では、従来のセンサ設計思想とは正反対の新規なセンサ設計思想に基づいて設計されたセンサと、その家庭用セキュリティセンサとしての応用を述べる。従来のセンサ設計は、そのセンサが計測対象とする物理量以外の物理量の影響をいかに小さくするかを主な目的とし、単一のセンサで単一の物理量を計測するものであった。一方、本センサ設計は、センサが多くの物理量から影響を受けていることに注目している。そして、複数の物理量が混在した一次元の時系列センサ出力から適切な信号処理を施し、セキュリティに必要な情報を抽出することによって、単一のセンサを用いて複数の兆候を計測するものである。それにより、従来と比較して、よりスマートで低コストな計測システムの構築が可能となる。これは、従来のセンサフュージョン<sup>13)</sup>や多次元計測<sup>14)</sup>とは異なる方法論である。ここで、Fig 2.1 に従来の計測システムの概念図、Fig 2.2 に紹介する計測システムの概念図をそれぞれ示す。このセンサ設計方式は、近年のマイコン等プロセッサの著しい処理速度の向上に伴い廉価でインテリジェントな信号処理が容易になったために、実現が容易になってきている。その一つのアプリケーションとして、コンデンサマイクロフォンに新たな構造を付け加えることで、一つのセンサで圧力変動、加速度、温度、光を計測する

方法を述べる。

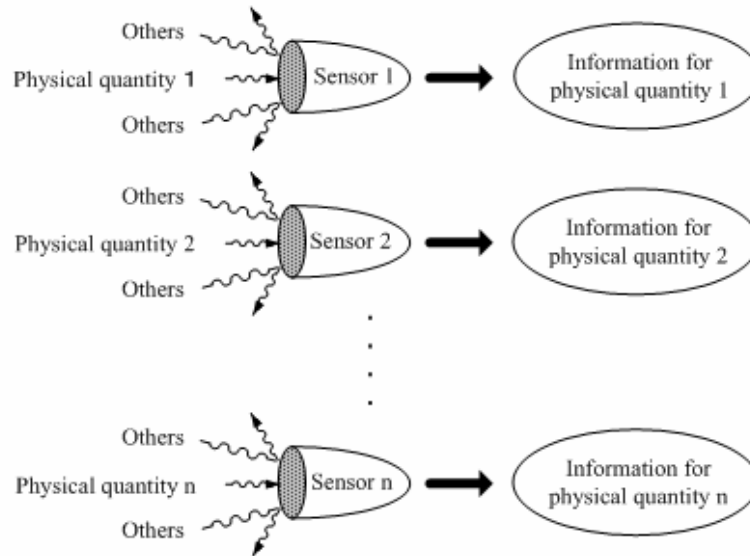


Fig 2.1 Conventional sensor design philosophy

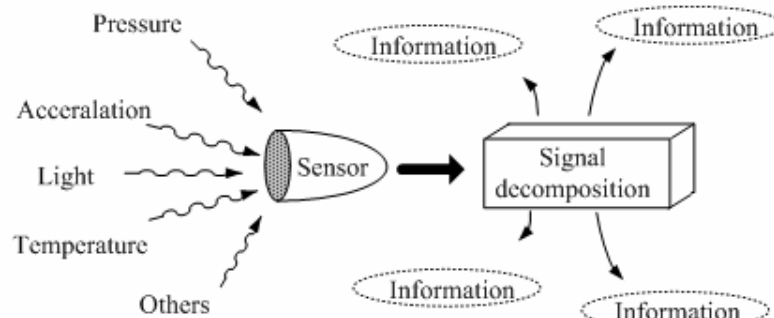


Fig 2.2 Proposed novel sensor design philosophy in this chapter

## 2.2 複数の物理量を感知するセンサ

### 2.2.1 コンデンサマイクロフォン型デバイス

コンデンサマイクロフォンに空気圧回路を構成する簡単な構造を付け加える。コンデンサマイクロフォンの受圧面を透明なエンクロージャでふさぎ、その内部には黒いスポンジ状の物体を収納する。しかし、受圧面はエンクロージャにより完全に密閉されているわけではなく、実際には受圧面の前後には微小な漏れが存在し、定常状態ではエンクロージャ内の圧力と大気圧は等しくなる。光が黒いスポンジ状の物体に照射されると輻射熱が発生

し、これに伴いエンクロージャ内の圧力が上昇する．よって、センサは光を検知できる．さらに、周囲の温度が変化することによりエンクロージャ内の温度も変化し、センサはこの変化もとらえる．Fig 2.3 に本センサを示す．

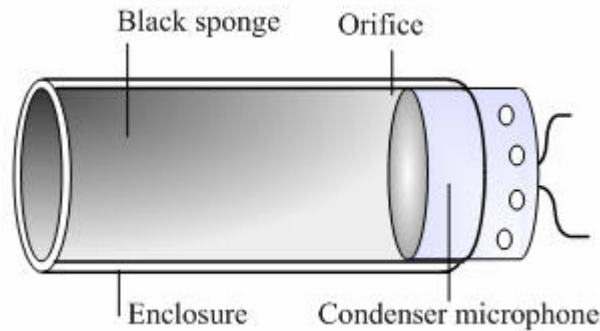


Fig 2.3 Condenser microphone type sensor device

### 2.2.2 センサとしての特性

以下に、本センサのセンシング特性を記す．

[圧力特性]

圧力センサとしての周波数特性は 0.5Hz から 30Hz の範囲でほぼ平坦な特性を持ち、20Hz における感度は -12dB (0dB=1V/Pa) と高感度である．0.1Hz 以下の周波数帯でも十分な感度があり、そのような事象の感知も可能である．また、入力圧力と出力電圧は広い範囲で線形性をもつ．Fig 2.4 に圧力センサとしての周波数特性を示す．

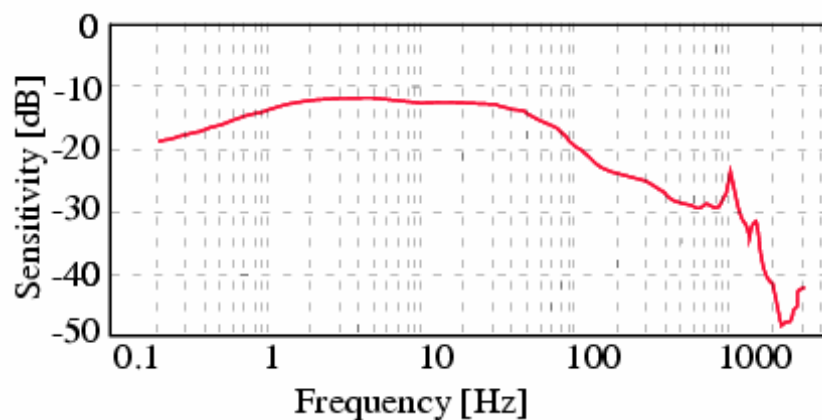


Fig 2.4 Frequency response as a pressure sensor

[加速度特性]

加速度センサとしての周波数特性は、10Hz から 1kHz までの広い周波数帯でほぼ平坦な特性をもち、1Hz 程度の周波数でも十分な感度をもつ．50Hz において -54dB (0dB=1V/0.1G) であり、高感度な加速度センサとはいえないが、セキュリティセンサとして使用するため

には十分な感度である．Fig 2.5 に加速度センサとしての周波数特性を示す．10Hz 以下の領域で周波数特性が得られていないのは，加振機の性能限界のためである．

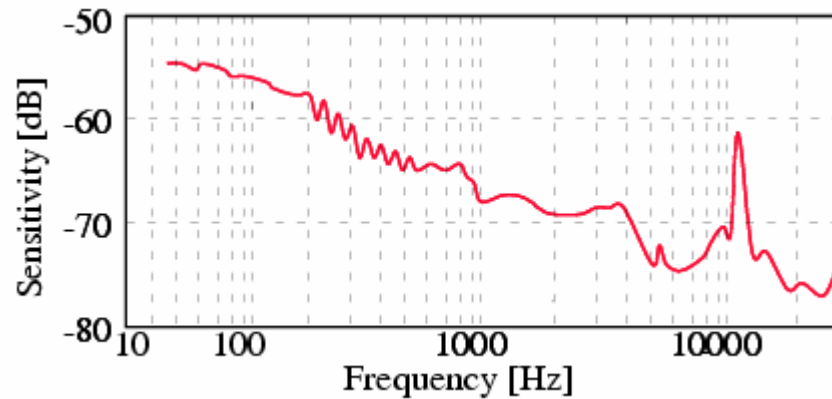


Fig 2.5 Frequency response as an acceleration sensor

[温度特性]

エンクロージャ周囲の温度と出力電圧は線形関係にある．温度センサとして十分使用可能である．Fig 2.6 に温度センサとしての入力 - 出力特性を示す．

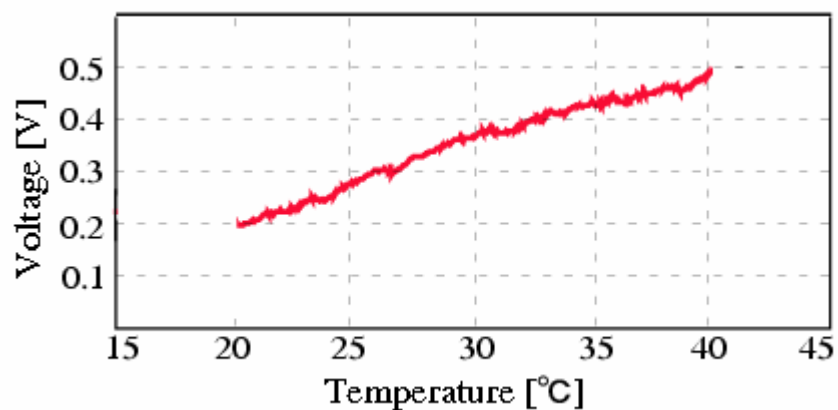


Fig 2.6 Input-output characteristics as a thermometer

[光特性]

照射強度と出力特性は線形関係にある．光センサとして十分使用可能である．Fig 2.7 に光センサとしての入力 - 出力特性を示す．

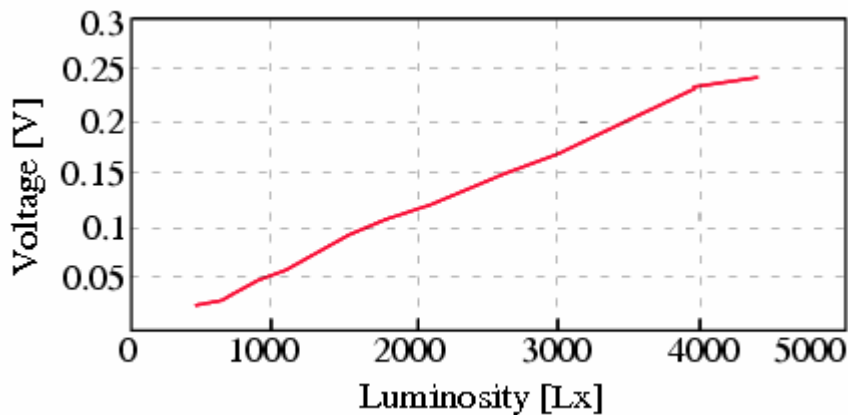


Fig 2.7 Input-output characteristics as an actinometer

### 2.2.3 センサの数学モデル

以下に本センサのモデリングを行う。モデリングに用いる変数と定数は以下の通りである。また、Fig 2.8 にそれらの図も示す。

[センサの変数と定数]

$q(t)$  : オリフィスを流れる空気の流量

$P_i(t)$  : エンクロージャ内の圧力

$P_e(t)$  : センサ外部の圧力

$P(t)$  :  $P_e(t)$  と  $P_i(t)$  の差圧

$v(t)$  : エレクトレットフィルム-電極間の電圧

$E(t)$  : センサの出力電圧

$d$  : オリフィスの直径

$L$  : オリフィスの長さ

$V$  : エンクロージャ内の容積

$A$  : 受圧面の面積

$m$  : エンクロージャ内の空気と受圧面の質量

$C_v$  : 熱輻射係数

$k$  : エレクトレットフィルムのバネ定数

$Q$  : エレクトレットフィルムの永久電荷

$R_c$  : マイクロフォンの電気抵抗

$C_c$  : マイクロフォンの静電容量

$G$  : FET トランジスタによるゲイン

[大気の物理定数]

$T$  : エンクロージャ外部の絶対温度

$P_a$  : 大気圧

$\rho$  : 空気の密度

$\epsilon$  : 空気の誘電率

$\mu$  : 空気の粘性係数

$R$  : 気体定数

[セキュリティ事象発生による変数の変化]

$P_s(t)$  : 受圧面に作用する静圧成分

$P_d(t)$  : 受圧面に作用する動圧成分

$P_o(t)$  : 受圧面に作用する音成分

$a(t)$  : 受圧面が受ける加速度

$\Delta T(t)$  : 温度変化

$I(t)$  : 光の照射強度

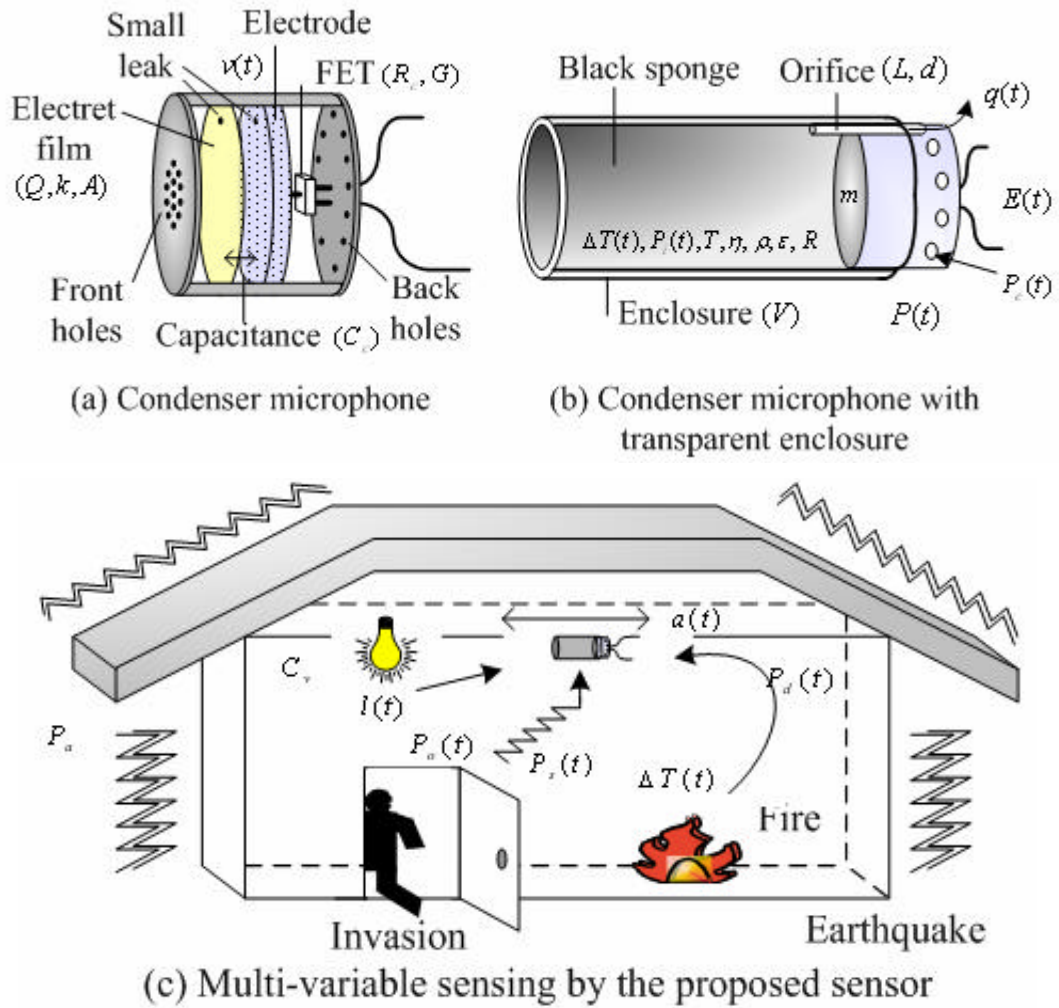


Fig.2.8 Variables and constants for this modeling

センサ受圧面にエンクロージャ外部から作用する圧力  $P_e$  は(2.1)式のようになる .

$$P_e(t) = P_s(t) + P_d(t) + P_o(t) + P_a + \left(\frac{m}{A}\right)a(t) \quad (2.1)$$

ハーゲン? ポアズイユの法則よりオリフィスを流れる流量  $q(t)$  と受圧面が受ける圧力の関係は(2.2)式で表される .

$$Lr \frac{dq(t)}{dt} + \frac{8mL}{(d/2)^2} q(t) = p \left(\frac{d}{2}\right)^2 (P_e(t) - P_i(t)) \quad (2.2)$$

理想気体の法則よりエンクロージャ内圧力  $P_i$  は(2.3)式のようになる .

$$P_i(t) = \frac{R(T + \Delta T(t) + C_v l(t))}{22.4 \times 10^{-3} V} \int_0^t q(t) dt + P_a \quad (2.3)$$

(2.2),(2.3)式より  $P_i(t)$  に関する次の微分方程式を得る .

$$\begin{aligned} & \frac{Lr}{\rho \left(\frac{d}{2}\right)^2} \frac{d^2 P_i(t)}{dt^2} + \frac{8mL}{\rho \left(\frac{d}{2}\right)^4} \frac{dP_i(t)}{dt} + \frac{R(T + \Delta T(t) + C_v l(t))}{22.4 \times 10^{-3} V} P_i(t) \\ & = \frac{R(T + \Delta T(t) + C_v l(t))}{22.4 \times 10^{-3} V} P_e(t) \end{aligned} \quad (2.4)$$

ここで、線形化のための近似を行う。受圧面に作用する動圧・静圧・音圧は大気圧に比べ非常に小さいため、次の近似が成り立つ。

$$P_a \gg P_s(t) + P_d(t) + P_o(t) + \left(\frac{m}{A}\right)a(t) \quad (2.5)$$

エンクロージャ内の圧力変動はその温度変化 ( $\Delta T(t) + C_v l(t)$ ) に比べて非常に速い。よって(2.4)式は以下のように近似して書き直すことができる。

$$\begin{aligned} & \frac{Lr}{\rho \left(\frac{d}{2}\right)^2} \frac{d^2 P_i(t)}{dt^2} + \frac{8mL}{\rho \left(\frac{d}{2}\right)^4} \frac{dP_i(t)}{dt} + \frac{RT}{22.4 \times 10^{-3} V} P_i(t) \\ & = \frac{RT}{22.4 \times 10^{-3} V} \left\{ P_s(t) + P_d(t) + P_o(t) + \frac{m}{A} a(t) + \frac{P_a}{T} (\Delta T(t) + C_v l(t)) \right\} \end{aligned} \quad (2.6)$$

受圧面外部と内部の差圧は(2.7)式のようになる。

$$P(t) = P_e(t) - P_i(t) \quad (2.7)$$

エレクトレットフィルムと電極間の電圧、FET によるゲイン、そしてそれらのセンサ出力の関係は以下のようになる。

$$v(t) + \frac{1}{R_c C_c} \int_0^t v(t) dt = -\frac{Q}{ekA} P(t) \quad (2.8)$$

$$E(t) = Gv(t) \quad (2.9)$$

(2.6),(2.7)式をラプラス変換すると(2.10)式のように整理できる .

$$P(s) = \frac{s^2 + 2z\omega_n s}{s^2 + 2z\omega_n s + \omega_n^2} \left\{ P_s(s) + P_d(s) + P_o(s) + \frac{m}{A} a(s) + \frac{P_a}{T} \Delta T(s) + \frac{C_v P_a}{T} l(s) \right\} \quad (2.10)$$

このとき ,  $\omega_n$  と  $z$  は ,  $\omega_n = \sqrt{\frac{RTp(d/2)^2}{22.4 \times 10^{-3} VLr}}$  ,  $z = \frac{8m}{(d/2)^3} \sqrt{\frac{22.4 \times 10^{-3} VL}{prRT}}$  とおいた . さら

に , (2.8),(2.9)式にラプラス変換を施し整理することによって , (2.11)式が得られる .

$$E(s) = \left( \frac{-Q}{ekA} \right) \frac{R_c C_c s}{1 + R_c C_c s} G \cdot P(s) \quad (2.11)$$

(2.10),(2.11)式より得られたブロック線図を Fig 2.9 に示す .

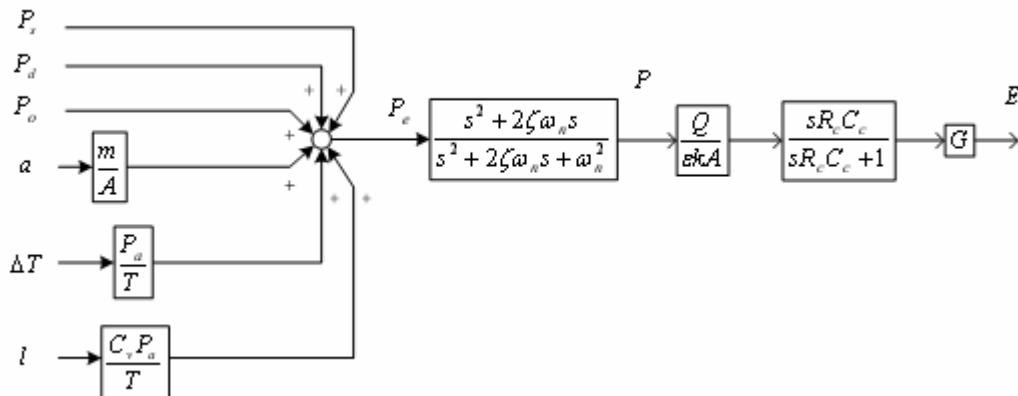


Fig 2.9 Block diagram of proposed sensor's characteristics

固有周波数  $\omega_n$  と減衰係数  $z$  は  $L$  と  $d$  を変化させることで任意に選択することができる . Fig 2.5に示すように , 各事象の入力に対してセンサ出力はハイパスフィルタの特性をもつ . そこで , 以下のような周波数帯でのセンサ応答を考える .



$$w_n, \frac{1}{R_c C_c} < w \quad (2.12)$$

上式のような周波数帯では，ハイパスフィルタの遮断周波数は無視できるほど小さくなる．そのような時，各事象のセンサ入力とセンサ出力は線形でスタティックな(2.13)式のように表すことができる．

$$E(t) = \frac{-Q}{ekA} G \left\{ p_s(t) + p_d(t) + p_o(t) + \frac{m}{A} a(t) + \frac{P_a}{T} \Delta T(t) + \frac{C_v P_a}{T} l(t) \right\} \quad (2.13)$$

そのため，小さな  $w_n$  と  $1/R_c C_c$  を選ぶことにより，センサ出力はセンサ受圧面に影響を与える各事象の線形和として表現できる．

### 2.3 セキュリティ事象の分析

上述のセンサをセキュリティに応用するために，以下に火災，侵入，地震のセキュリティ事象の特性を分析し，実験による実証結果も示す．セキュリティ対象空間に対しては次の4項を仮定した．

対象空間は空気の流動が可能で，遮光するものが無い

火災は家庭用燃焼機器と比べてその燃焼レベルが大きい

侵入口は開閉式の戸とする

室内は無人である

実験は Fig 2.10 に示すような空間で行った．

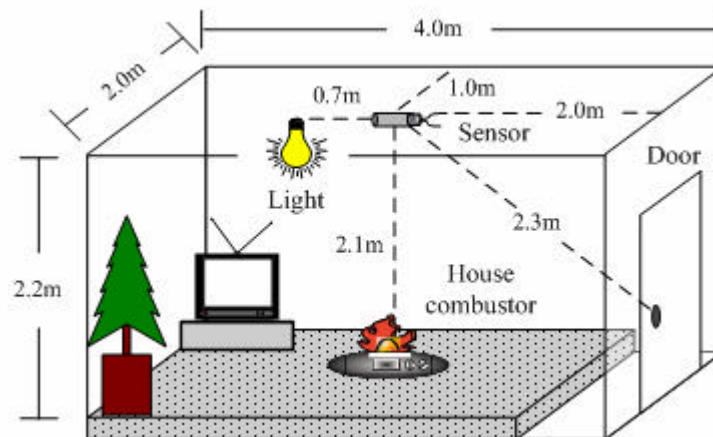


Fig 2.10 Room where carried out measurement

### 2.3.1 火災

#### (1) 火災事象の特性

発生した火災により生じる熱が輻射，対流により室内に拡散し，室内の温度は徐々に上昇する．この変化は緩やかな一次遅れステップ応答状の変化で表すことができる．このようなゆっくりとした変化は，他のセキュリティ事象として現れない．また，室内に発生した火災はゆらぎながら徐々にその規模を拡大していく．火炎によって室内には静圧変動が生じ，そのゆらぎの周波数は 3Hz ~ 6Hz の帯域にピークを持つ<sup>15)</sup>．

#### (2) 火災事象の実験による実証

模擬火災の火源には 2800Kcal/h のガスレンジを用いた．計測開始 4 秒後に着火し，約 20 秒間計測した．そのセンサ出力を Fig 2.11 に示す．室内の温度上昇と火災によるゆらぎが観測されているのが分かる．

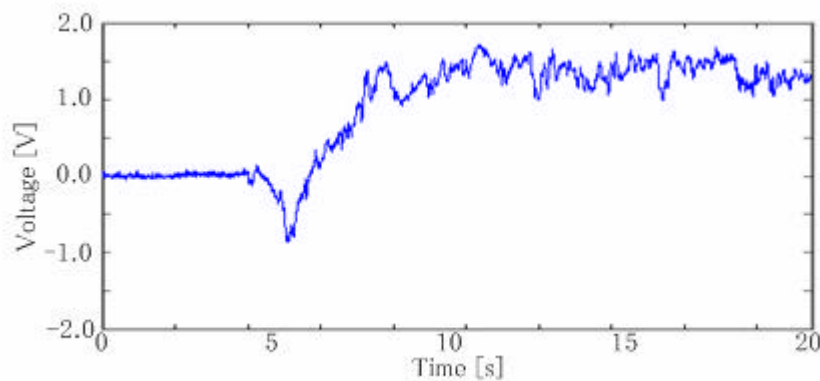


Fig 2.11 A sensor output of simulated fire

### 2.3.2 侵入

#### (1) 侵入事象の特性

##### [ドアの開閉]

ドアの開閉により室内に大きな圧力変動が生じる．その圧力変動は，開閉のスピードにも依存するが，約 2 ~ 3Hz 付近の周波数帯に表れる．

##### [照明のオンオフ]

照明をオン，オフした場合，光の強さはステップ状に変化する．

##### [ピッキング]

ドアの鍵をこじ開ける際に，特徴的な音による空気圧変動が生じる．

#### (2) 侵入事象の実験による検証

##### [ドアの開閉]

計測開始 4 秒後と 14 秒後にドアを開閉した．4 秒後の開閉よりも 14 秒後の開閉は，開度は小さく，その開閉スピードは遅くした．そのセンサ出力を Fig 2.12 に示す．いろいろなドアの開閉速度において計測を行った．その結果，検知波形の振幅は開閉速度に大きく比例した．しかしながら，本センサの圧力変動の検出感度は高く，ドアの開閉速度が遅くても

十分に検知可能である。

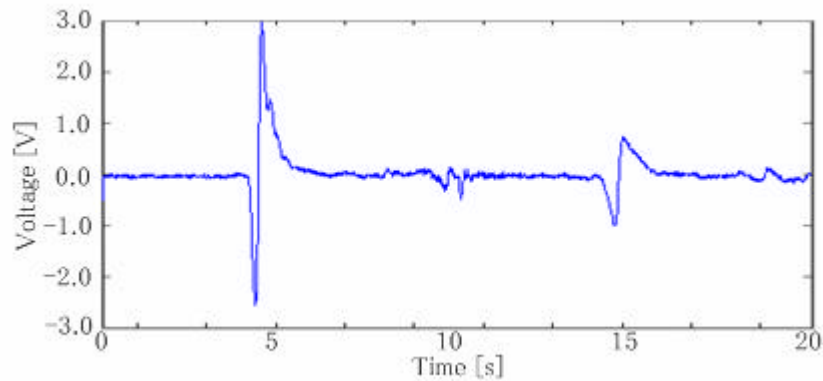


Fig 2.12 A sensor output when door was opened

[照明のオンオフ]

センサを 60W の白熱電球から約 0.7m の位置に設置し、計測開始 5 秒後から約 8 秒間、光を照射した。そのセンサ出力を Fig 2.13 に示す。その結果、光のステップ入力に対して、不完全微分特性をもつ出力波形が検出された。

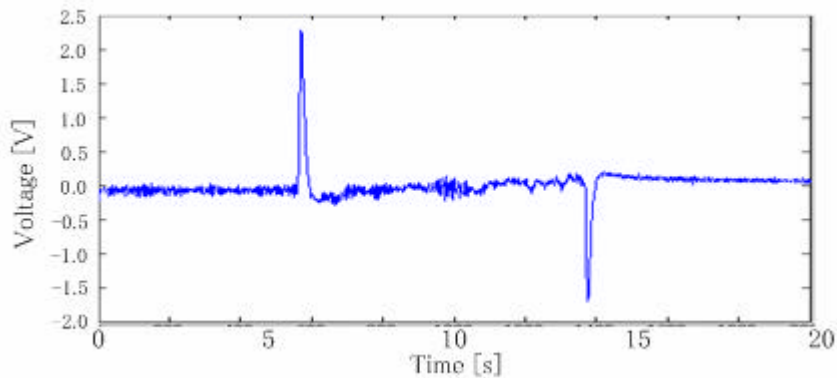


Fig 2.13 A sensor output when sensor was emitted light

[ピッキング]

玄関のドアの鍵を対象とする。センサから鍵穴までの距離は約 1.5m とした。鍵穴に鍵を差込み、それを施錠・開錠方向、またはその逆方向へ何度か動かした。そのセンサ出力を Fig 2.14 に示す。これらの波形は 10Hz 付近の周波数帯に強く現れる。

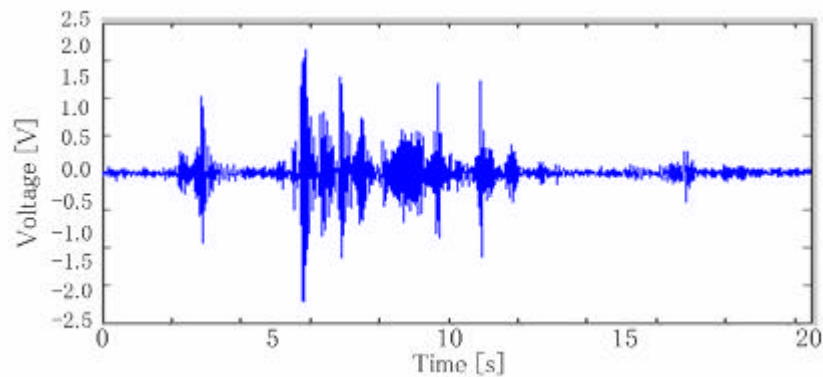


Fig 2.14 A sensor output when picking occurred

### 2.3.3 地震

#### (1)地震事象の特性

地震動にはさまざまな周期と強さの振動が複雑に混ざり合っている．一般の構造物に影響を与えるのは周期 2～3 秒以下の振動である<sup>16)</sup>．特に 0.5～10Hz の範囲で強い加速度が広範囲に発生する．0.05Hz 以下の極低周波数の振動も含まれるが，卓越する振動に比べるとそのレベルは 1/100 倍以下である<sup>17)</sup>．

#### (2)地震事象の実験による検証

実際に地震の状況を再現することができなかった．そのため，重りをセンサに取り付けたものを糸で吊るし，単振動させた．その加速度を計測した．そのセンサ出力を Fig 2.15 に示す．単振動による加速度は精度良く計測できた．実際の地震ではさらに強い加速度が生じるので，その検知は十分に可能である．

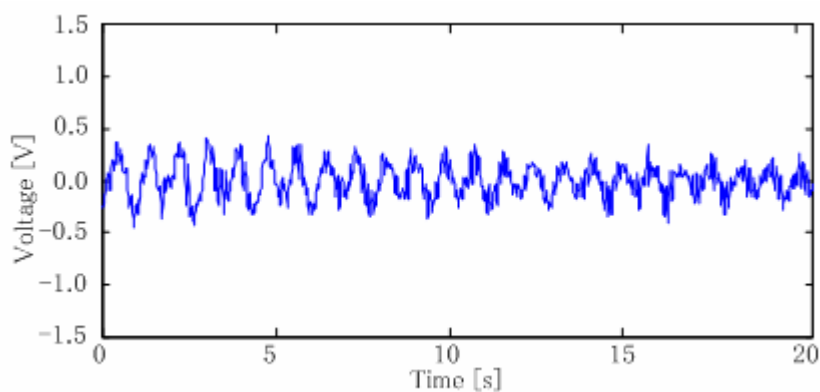


Fig 2.15 A sensor output of simulated earthquake

### 2.3.4 暗騒音の影響

セキュリティ事象の検知を妨害する 2 つの暗騒音(テレビ・ラジオの音，換気扇による送

風)について調べた。テレビ・ラジオの音に関しては、センサから約 2m 離れた場所に通常音量(60dB)でテレビとラジオをつけた状態で計測した。換気扇による送風に関しては、センサから約 1.5m 離れた部屋の角にある換気扇(22W)を回した状態で計測した。

両者ともそのセンサ出力は比較的高い周波数帯において強い周波数成分をもつ。セキュリティ事象検出に必要な 10Hz 以下の低い周波数帯においては、室内に直接圧力変動を発生させる換気扇でも、その検出レベルがセキュリティ事象発生時の約 1/100 倍程度であった。よって、これらの暗騒音はセキュリティ事象の検出にほとんど影響を与えない。

## 2.4 複数の事象の分離と判断

以上のことから本センサにより各々のセキュリティ事象が検出可能であることが確かめられた。しかし、一次元の時系列センサ出力には複数の事象(物理量)が影響を与えている。そのため、それらを適切な信号処理により分離しなければならない。そこで、信号分離のために、カルマンフィルタのアルゴリズム(Appendix2を参照)を応用することを提案する。

### 2.4.1 カルマンフィルタの導入

セキュリティ事象の発生検知と判断に必要な情報は 10Hz 以下の低周波数領域の信号である。そのため最初に、センサ出力には事前に遮断周波数 15Hz のバンドパスフィルタを通し、高周波数領域の信号を取り除いておく。

センサ出力には、 $m$  個の事象の線形和で与えられる。これより、時刻  $n$  のセンサ出力  $y_n$  は次式のように与えられる。

$$y_n = s_n^1 + s_n^2 + \dots + s_n^m + w_n \quad (2.14)$$

$s_n^1 \dots s_n^m$  はそれぞれセキュリティ事象の兆候となる物理量、 $w_n$  はセキュリティ事象が対応できない変動であり平均 0、分散  $s^2$  の正規白色の観測ノイズとした。 $m$  個の事象は周波数  $f_i (i=1, 2, \dots, m)$  を通過周波数とする狭帯域バンドパスフィルタの出力で与えられるとする。 $\Delta t$  をサンプリングタイム、定数  $C_i$  を  $C_i = \cos(2\pi f_i \Delta t)$ 、 $\mathbf{x}_n^i$  を事象  $i$  の平均 0、分散  $t_i^2$  の正規白色雑音とすると、兆候  $s_n^i$  は次のモデルで与えられる<sup>18)</sup>。

$$s_n^i - 2C_i s_{n-1}^i + s_{n-2}^i = \mathbf{x}_n^i \quad (2.15)$$

(2.14)、(2.15)式より状態空間モデルを作成する。ここではセキュリティ対象を火災、侵入(ドアの開閉、照明のオンオフ)、侵入(ピッキング)、地震とし、 $m=3$  とする。それぞれ火災に対し  $f_1=0$ 、侵入(ドアの開閉、照明のオンオフ)に対し  $f_2=2$ 、侵入(ピッキング)に対し  $f_3=10$  とし、地震に対しては  $f_2$  と  $f_3$  の両方を対応させ、 $\mathbf{x}^1$ 、 $\mathbf{x}^2$ 、 $\mathbf{x}^3$  の分散  $t_1^2$ 、 $t_2^2$ 、 $t_3^2$  の値をそれぞれ  $10^{-6}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-3}$ 、 $w_n$  の分散  $s^2$  の値を  $10^{-1}$  として与え、

(2.15)の形式で与えられる3方程式を連立して状態方程式を作る．状態ベクトル $x_n$ を

$$x_n = [s_n^1 \quad s_{n-1}^1 \quad s_n^2 \quad s_{n-1}^2 \quad s_n^3 \quad s_{n-1}^3] \quad (2.16)$$

とすれば，状態空間モデルは次のように与えられる．

$$\begin{aligned} x_n &= Fx_{n-1} + Gv_n \\ y_n &= Hx_n + w_n \end{aligned} \quad (2.17)$$

ただし，行列 $F$ ， $G$ ， $H$ ， $v_n$ は以下の通りである．

$$F = \begin{bmatrix} F_1 & & 0 \\ & F_2 & \\ 0 & & F_3 \end{bmatrix}, F_i = \begin{bmatrix} 2C_i & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ & 0 \\ & 0 \\ & 1 \\ & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.18)$$

$$H = [1 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 0], v_n = [x_n^1 \quad x_n^2 \quad x_n^3]$$

(2.17)式の状態空間モデルと図で示したコンデンサマイクロフォン型センサ出力信号にカルマンフィルタのアルゴリズム<sup>19)</sup>を適用することで，各セキュリティ対象の分離ができる．

#### 2.4.2 セキュリティ事象の分離と判定ロジック

模擬火災，ドアの開閉，照明のオンオフ，ピッキングのデータに上記カルマンフィルタのアルゴリズムを施し，各時刻の状態 $s^1$ ， $s^2$ ， $s^3$ を推定した結果を Fig 2.16，Fig 2.17，Fig 2.18，Fig 2.19 にそれぞれ示す．また，それぞれの事象の特徴を以下に記す．

- Fig 2.16 では室内の温度変化による直流成分(状態 $s^1$ )と火災のゆらぎによる圧力変動成分(状態 $s^2$ )が分離されているのが分かる．
- Fig 2.17 では状態 $s^2$ のみ大きな値の変動が現れ，状態 $s^1$ ， $s^3$ はほとんど変化していない
- Fig 2.18 では Fig 2.17 と同じく状態 $s^2$ のみ大きな値の変動が現れ，状態 $s^1$ ， $s^3$ はほとんど変化していない
- Fig 2.19 では状態 $s^3$ に高い周波数成分の大きな変動が現れ，状態 $s^2$ には小さな変動しか現れていない．また，状態 $s^1$ はほとんど変化していない

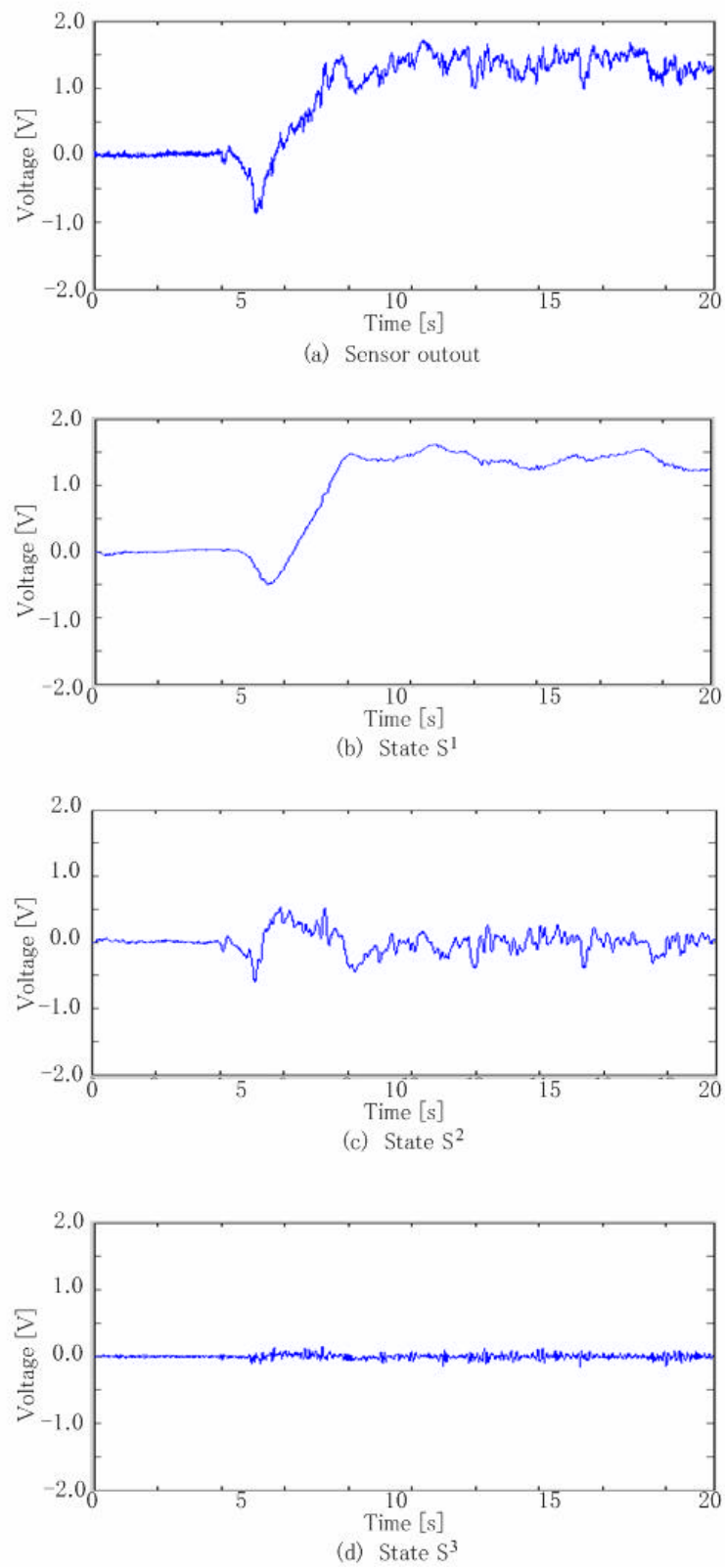


Fig 2.16 Result of pseudo-fire signal dissociation by Kalman filter

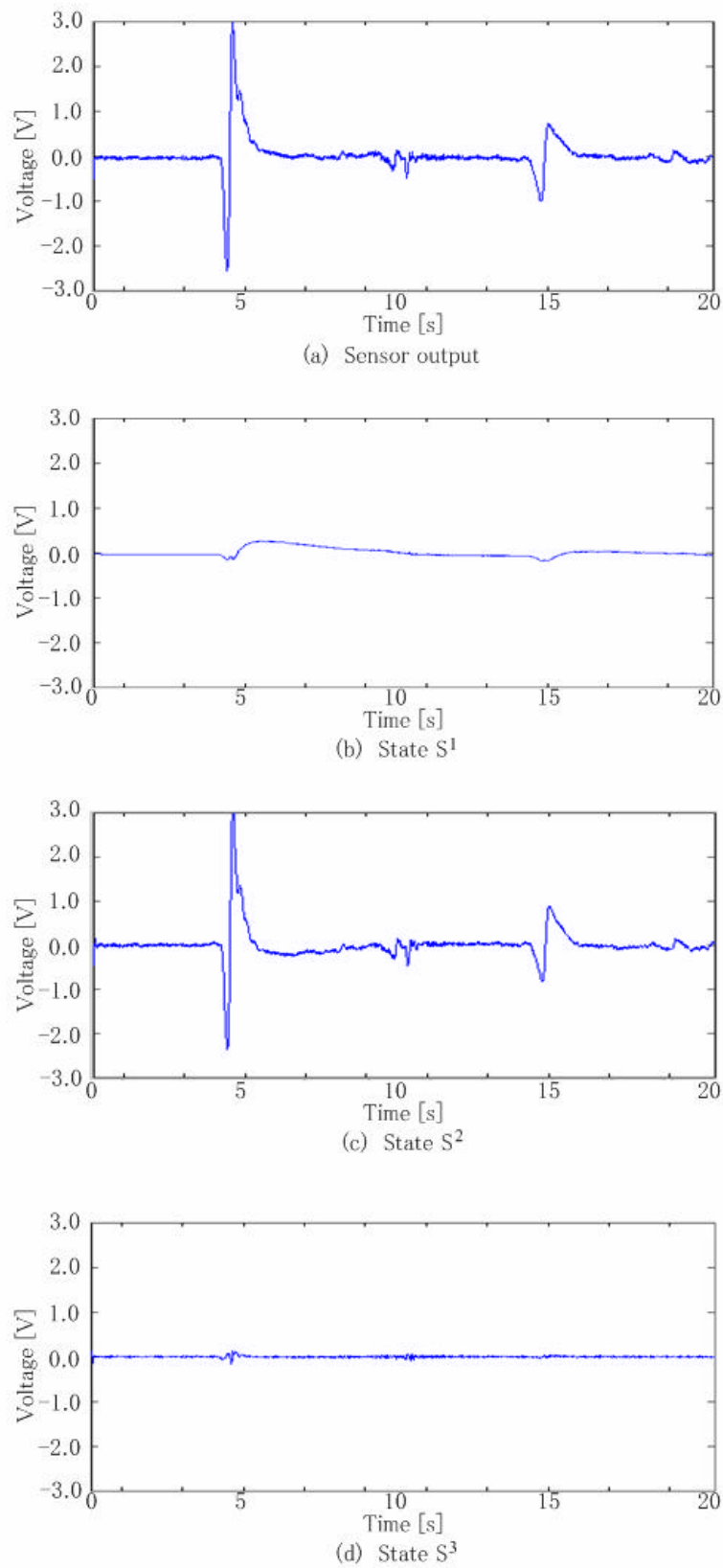


Fig 2.17 Result of door opening and closing signal dissociation by Kalman filter



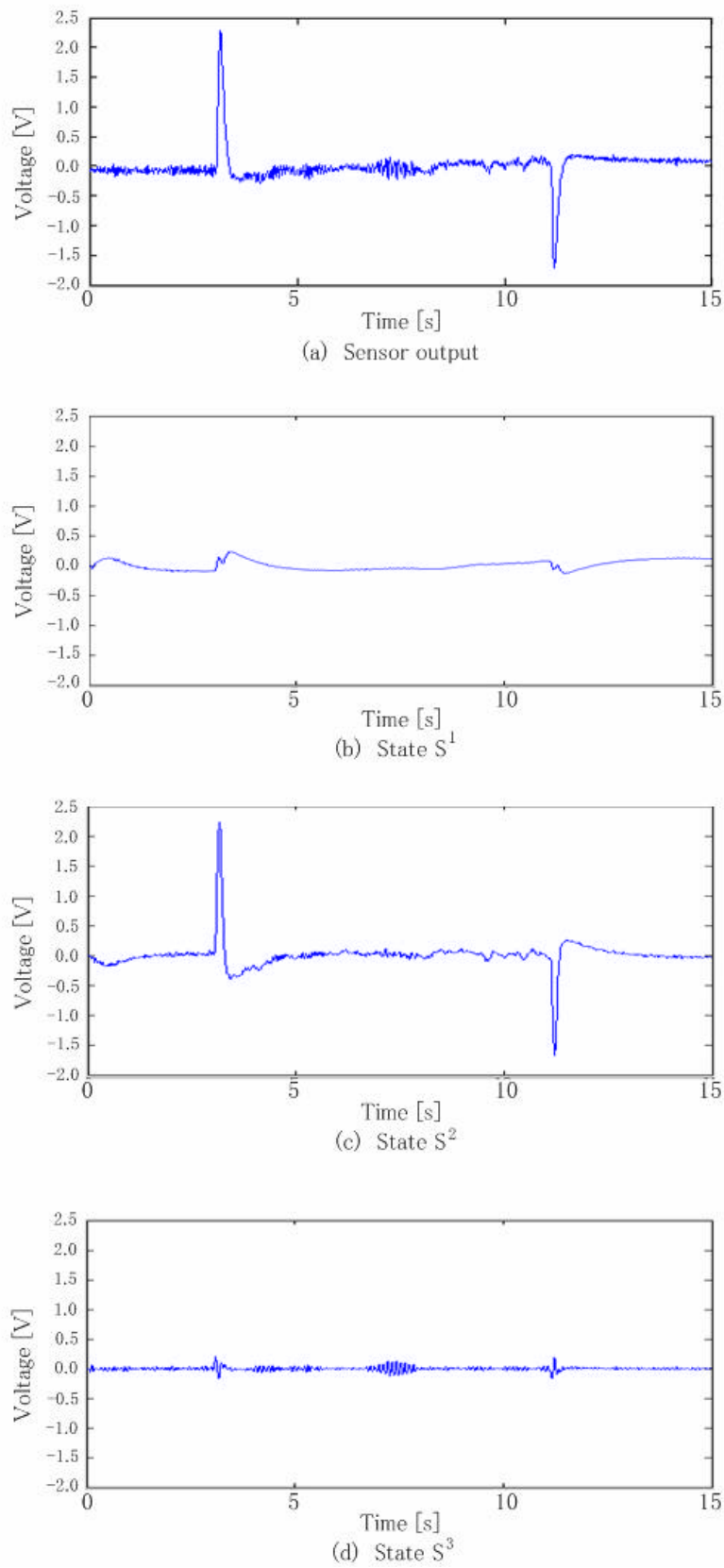


Fig 2.18 Result of light signal dissociation by Kalman filter

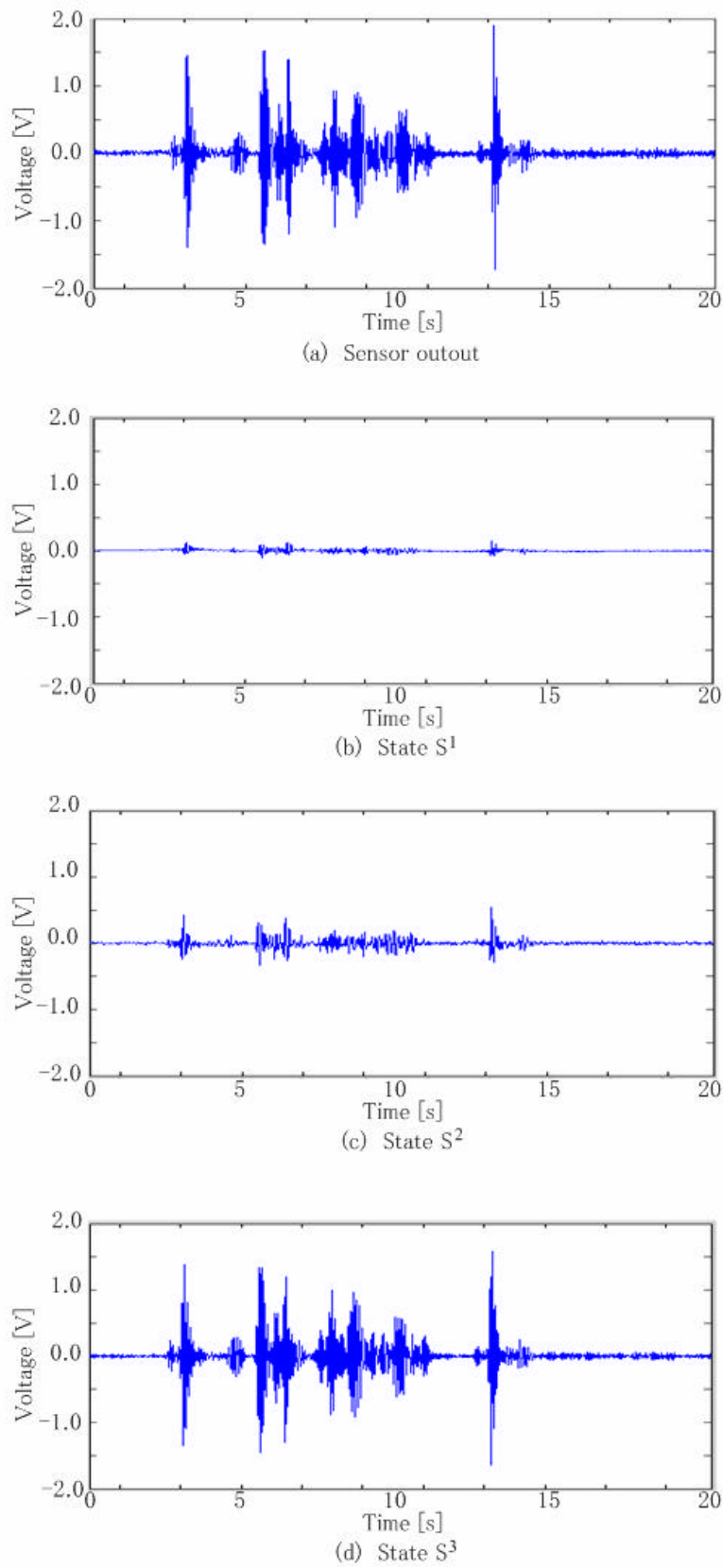


Fig 2.19 Result of picking signal dissociation by Kalman filter

このように各セキュリティ事象には各々特有の変化が現れる．それぞれの出力に適切な閾値を設定し，各セキュリティ事象発生判定には Fig 2.20 のようなロジックを用いることで，各セキュリティ事象の分離・判定が可能となる．

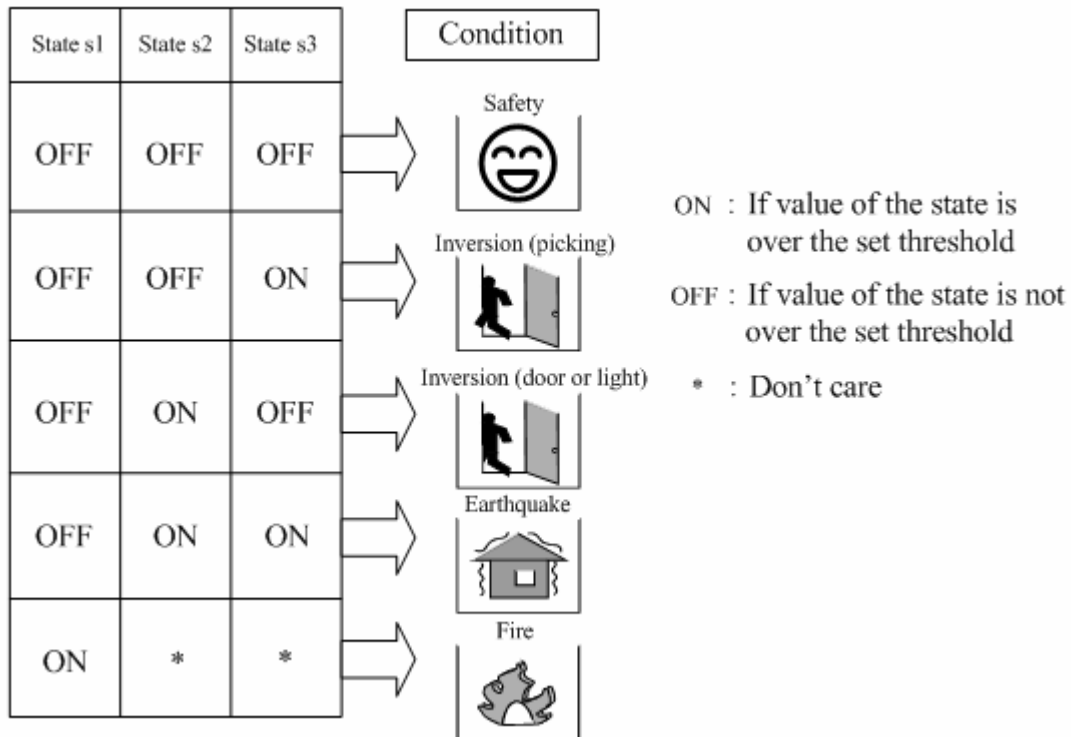


Fig 2.20 A logic for security phenomena judgment

## 2.5 まとめ

本章では，従来のセンサ設計思想とは逆に一つのセンサで複数の物理量を検知する思想に基づいたコンデンサマイクロフォン型センサを利用した家庭用セキュリティシステムを述べた．その新規な計測システム設計思想は，以下の手続きで与えられる．

計測したい複数の物理量を与える

与えられた複数の物理量から影響を受けるセンサを見つける，または作成する信号処理によって必要とする物理量をセンサ出力から分離する．

総合判断処理による情報抽出

そこで，本家庭用セキュリティシステムを上記手続きに当てはめると，

検知対象を，火災，侵入，地震とし，その検出のために圧力，加速度，温度，光を計測対象とする

本来は音響センサであるコンデンサマイクロフォンに簡単な構造を付け加えること

で、 で要求した圧力、加速度、温度、光を感知可能なセンサデバイスを作成対象とする複数セキュリティ事象において現れる兆候の特性の数学モデルを作り、これらを連立した状態方程式のいくつかの状態変数の線形和が で作成したセンサの出力であるとして、これにカルマンフィルタを適用し、各事象を分離した。

で分離された状態変数の大きさに閾値による判断を加えることで、セキュリティ事象が判定を行う。

このようになる。また、単一のセンサで複数の物理量を計測することは、センサ数、配線が本質的に少量であるので、低コストかつスマートであり一般家庭での使用に適している。

本センサ設計思想とセンシング法は本家庭用セキュリティシステムのみならず、様々な分野での応用が可能であると考えられる。本センシング法の一般化は非常に興味深い今後の課題である。

## 第 3 章 高圧ガス圧力調整器異常診断への応用

### 3.1 はじめに

現在，LP ガスは国内 2400 万世帯に普及し，LP ガス消費者にとって日常生活に欠かすことのできない重要なエネルギー源として使用されている．そのため，その供給機器の保守・保全・管理は安全な LP ガス使用のために必須である．しかしながら，それら供給機器の経年変化による性能劣化の報告は多数存在する<sup>20)</sup>．また，経年劣化による供給機器の性能低下を避けることは現実上不可能である．

LP ガス圧力調整器は LP ガス供給機器の一つであり，高圧ガス容器内の圧力を家庭用ガス燃焼機器で使用する圧力まで減圧する機能をもつ．LP ガスを安全に使用するためには，圧力調整器の十分な減圧性能と屋外環境での使用に対し長期間の性能維持が求められる．その圧力調整器が経年劣化することにより，内部で異常な振動を起こす可能性があることが知られている．しかしながら，強い防爆性のために，その内部を直接観測することは不可能である．そのため内部の部品を直接診断することはできない．それゆえ，内部で異常な振動を起こしている性能が低下した調整器に対しても，故障と診断することは困難である．

そこで，本研究では，圧力調整器の外部に可搬型のセンサを取り付けることにより，分解せずにその内部の圧力振動を計測するシステムの研究開発を行った．圧力変動をとらえるためのセンサには，高感度圧力センサであるコンデンサマイクロフォンを用いた．また，その振動を計測することで，圧力調整器内部の異常を検知するための基礎実験と，異常状態を推定する方法の検討も行った．

### 3.2 高圧ガス圧力調整器

#### 3.2.1 単段式圧力調整器

高圧ガス用単段式圧力調整器を Fig 3.1 に示す．ガス圧力調整器には様々な種類が存在するがその減圧部分の機構は単段式圧力調整器とほぼ同様である．よって，本研究で言及する圧力調整器は家庭用単段式圧力調整器に限定する．

以下に使用する圧力の値は大気圧との相対圧力とする．圧力調整器は LP ガス容器とガスメータの間に設置され，LP ガス容器内の圧力(最大圧力:約 1.56MPa ,最小圧力:約 0.07MPa)を給湯器やコンロなどの家庭用ガス燃焼機器に使用する調整圧力 2.8kpa 付近(許容誤差  $\pm 0.5\text{kPa}$ ) まで減圧調整するための機器である<sup>21)</sup>．その機構はダイヤフラム上下の圧力差により弁の開度を調整するものである．減圧室内の圧力が圧力より高くなると，ダイヤフラムが上昇し，そのダイヤフラムに取り付けられたリンク構造を通してゴム弁とノズルの距

離が狭まり，ガスの流量を制限する．一方，減圧室内の圧力が望ましい圧力より低くなると，ダイヤフラムが下降し，ゴム弁とノズルの距離が広がり，ガスが多量に放出される．圧力調整器はこのようなフィードバック系を構成している．

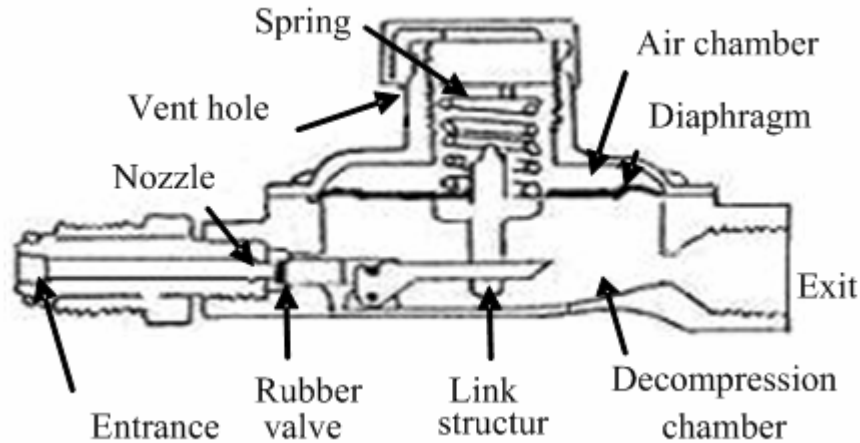


Fig 3.1 High-pressure gas single-stage pressure regulator

### 3.2.2 圧力調整器のモデリング

Fig 3.2, Fig 3.3 に調整器と LP ガス供給機器の数学モデルの作成を行った．モデリングに用いる記号を以下に示す．

$Q_i$ : LP ガス容器から調整器入り口への流量	$d_n$ : ノズルの直径
$Q_1$ : ノズルから減圧室への流量	$r_a$ : 空気の密度
$Q_2$ : 減圧室からゴムホースへの流量	$r_g$ : LP ガスの密度
$Q_3$ : ゴムホースから家庭用ガス機器への流量	$S$ : ダイヤフラムの有効受圧面積
$Q_a$ : 空気室と大気間の流量	$V_1$ : 調整器入口の初期容積
$P_i$ : LP ガス容器内の圧力	$V_2$ : 減圧室の容積
$P_1$ : 調整器入口の圧力	$V_3$ : ゴムホースの容積
$P_2$ : 減圧室内の圧力	$V_a$ : 空気室の初期容積
$P_3$ : ゴムホース内の圧力	$R$ : 気体定数
$P_{atm}$ : 大気圧	$T$ : 温度
$P_a$ : 空気室内の圧力	$m$ : ダイヤフラムとばねの質量
$A_1$ : 調整器入口の断面積	$d$ : ダイヤフラムとばねのダンピング係数
$A_3$ : ゴムホースの断面積	$k$ : ダイヤフラムとばねのばね定数
$A_4$ : 家庭用ガス機器出口の断面積	$x_0$ : ばねの締め上げ量
$A_a$ : 通気口の断面積	$x$ : ダイヤフラムの変位

$l$ : レバー比

$z$ : ノズルとゴム弁の距離

$g$ : 重力加速度

$c_1, c_2, c_3, c_4, c_a$ : 各流量係数

$c_f$ : 単位換算係数

また、本モデルではガスメータでの流量損失は無視する。

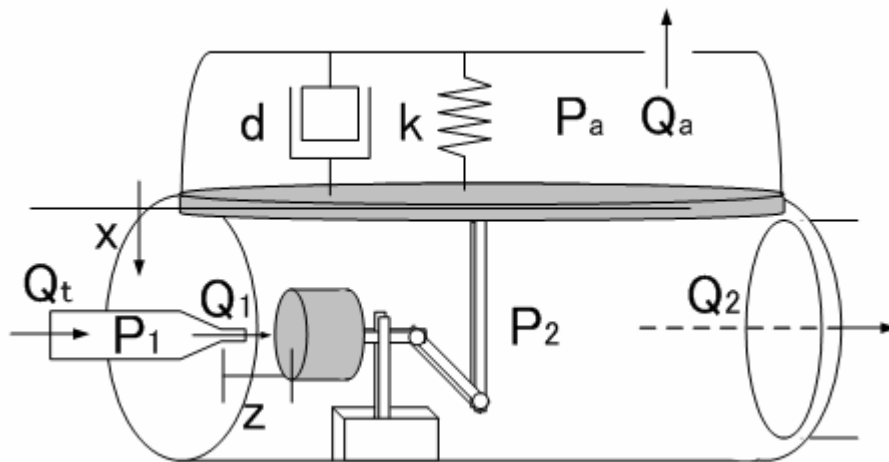


Fig 3.2 Model of single-state pressure regulator

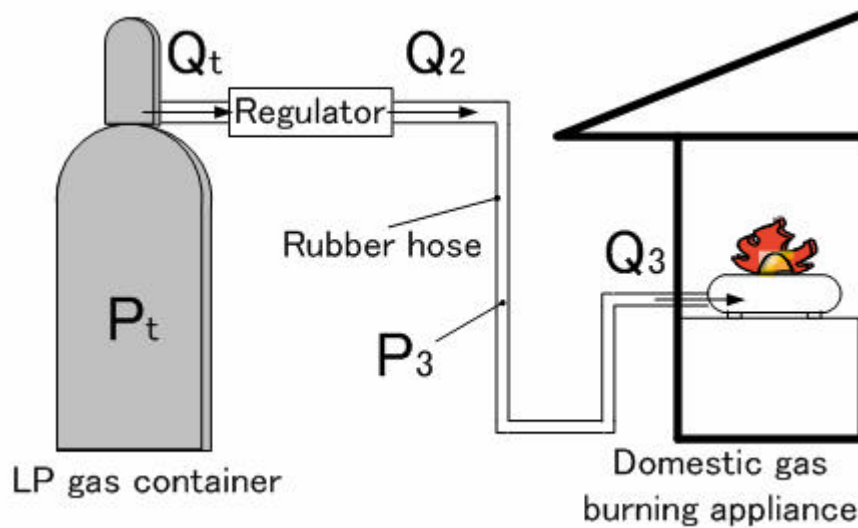


Fig 3.3 Model of the equipment used to supply LP gas

## (1) 流量と圧力

流量  $Q_1, Q_2, Q_3$  はある管路からオリフィスのある管路へ流れ込む流体としてモデル化することができる。流量  $Q_1, Q_2, Q_3$  はベルヌーイの定理から(3.1)～(3.3)式のようになる<sup>22)</sup>。

$$Q_1 = c_1 A_1 \operatorname{sgn}(P_t - P_1) \sqrt{\frac{2}{\rho_g} |P_t - P_1|} \quad (3.1)$$

$$Q_2 = c_3 A_3 \operatorname{sgn}(P_2 - P_3) \sqrt{\frac{2}{\rho_g} |P_2 - P_3|} \quad (3.2)$$

$$Q_3 = c_4 A_4 \operatorname{sgn}(P_3 - P_{atm}) \sqrt{\frac{2}{\rho_g} |P_3 - P_{atm}|} \quad (3.3)$$

管路内圧力  $P_1, P_3$  はそれぞれの管路に流れ込む流量と流れ出る流量の差を用いることでモデル化することができる。状態方程式より管路内圧力  $P_1, P_3$  はそれぞれ(3.4), (3.5)式のようになる。

$$P_1 = \frac{c_f RT}{V_1} \int_0^T (Q_1 - Q_2) dt \quad (3.4)$$

$$P_3 = \frac{c_f RT}{V_3} \int_0^T (Q_2 - Q_3) dt \quad (3.5)$$

## (2) ノズルとゴム弁間の流量と減圧室の圧力

ノズルとゴム弁間の流量は(3.6)式のようなノズルフラップ系とみなすことができる<sup>23)</sup>。

$$Q_1 = c_2 z(x) d_n \rho \operatorname{sgn}(P_1 - P_2) \sqrt{\frac{2}{\rho_g} |P_1 - P_2|} \quad (3.6)$$

減圧室の容積はダイヤフラムの変動によりそのゲインが影響を受ける。その影響を考慮すると、状態方程式より(3.7)式のようになる。

$$P_2 = \frac{c_f RT}{V_2 - xS} \int_0^T (Q_1 - Q_2) dt \quad (3.7)$$



## (3) 空気室の流量と圧力

空気室と大気との流量  $Q_a$  は上記と同様に(3.8)式で表される。

$$Q_a = c_a A_a \operatorname{sgn}(P_{atm} - P_a) \sqrt{\frac{2}{\rho_a} |P_{atm} - P_a|} \quad (3.8)$$

空気室は大気と伝通している。加えて、その容積はダイヤフラムの影響を受けるので(3.9)式のようになる。

$$P_a = \frac{c_f RT}{V_a + Sx} \int_0^t Q_a dt + P_{atm} \frac{V_a}{V_a + Sx} \quad (3.9)$$

## (4) ダイヤフラムと弁のダイナミクス

ダイヤフラムは減圧室の圧力と空気室の圧力との平衡からその位置が決まる。ダイヤフラムの平衡状態の位置が仕様の範囲内におさまる用に  $x_0$  の値を定める。ダイヤフラムの振動はマス - ダンパ - バネ系とみなすことができる。 $x$  はダイヤフラム下方向への変位を正とし、正の値をとる。ばねの締め付け量と重力を考慮するとダイヤフラムの運動方程式は(3.10)式のようになる。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + d \frac{dx}{dt} + kx = S(P_a - P_2) + kx_0 + mg \quad (3.10)$$

$x$  の変位に従い、 $z$  はリンク構造のレバー比に比例して変動し、弁の開度を調整する。

$$z = l \cdot x \quad (3.11)$$

その調整器部分のブロック線図を Fig 3.4 に示す。以上のように調整器はモデル化される。

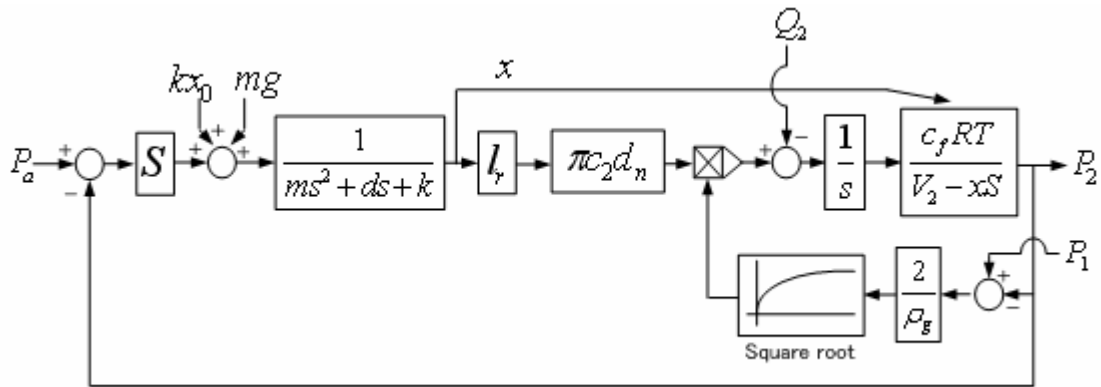


Fig 3.4 A block diagram of a regulator exclude exterior of a regulator

### 3.3 仮定と問題の記述

#### 3.3.1 仮定の記述

本章では以下の仮定を設ける

(A) 強風や地盤振動など強い圧力変動や加速度が発生していない環境での調整器の計測を対象とする。

#### 3.3.2 問題の記述

以下、本章では次の2つの問題について述べる。

- (P1) 圧力調整器ダイヤフラムの簡易計測システムの構築
- (P2) ダイヤフラム振動データからの調整器の異常診断法

### 3.4 ダイヤフラム振動計測システム

問題 (P1) の解決について以下に述べる。

Fig 3.5 に提案するコンデンサマイクロフォンを用いた計測システムを示す。Fig 3.1 に示すように、圧力調整器には空気室と大気との通気口が存在する。調整器のダイヤフラムが振動すると空気室内の圧力も変動し、通気口を介して空気の流入が生じる。そこで Fig 3.5 に示すような半密閉容器で調整器上部を覆い、その内側上部にコンデンサマイクロフォンを取り付けることにより、ダイヤフラム振動に伴う空気室の圧力変動を計測することが可能となる。

そのコンデンサマイクロフォンがとらえた信号に、直流成分、静圧変動、不必要に高い周波数成分を取り除くため 5Hz ~ 500Hz のバンドパスフィルタと電源ノイズを取り除く 50Hz のノッチフィルタを施し、それを信号として PC に取り込んだ。例として、Fig 3.6 に流量 1000L/h で空気を流したときの定常圧力変動を示す。

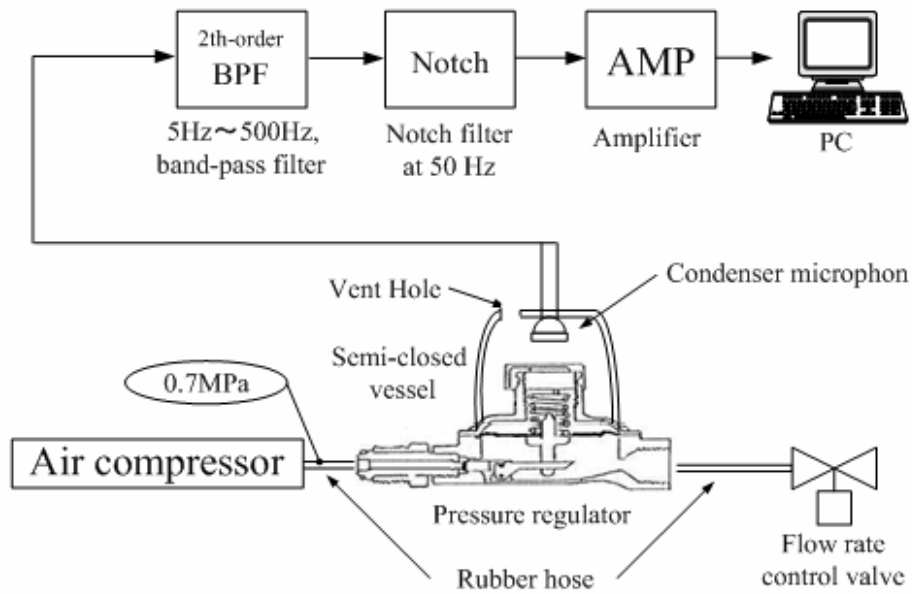


Fig 3.5 Proposed measurement system of diaphragm vibration

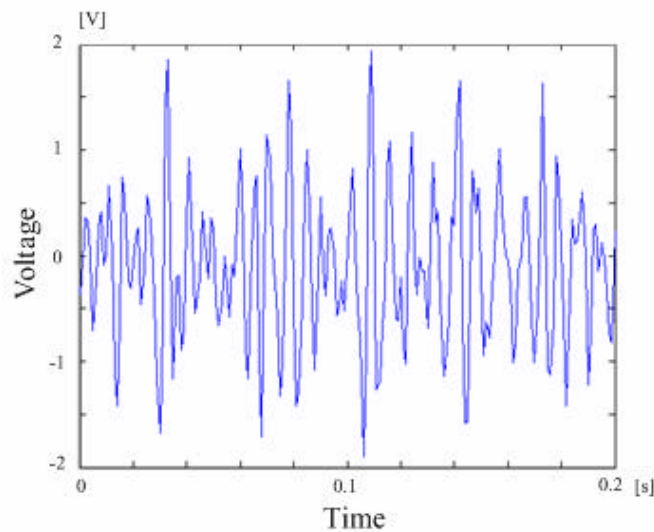


Fig 3.6 Measured pressure vibration at 1000 L/h

このように本システムでダイアフラムの振動の計測が可能であることが示された。そこで以下、ダイアフラム振動の計測は次の条件で行うこととする。

- ・試験流体にはコンプレッサで圧縮した空気を使用
- ・屋内に設置した実験装置により、サンプリングタイム 1 ミリ秒で 4096 点を 1 回の測定とする
- ・測定は、200L/h、400L/h、600L/h、800L/h、1000L/h、の流量でそれぞれ行う

### 3.5 異常診断の方法

問題 (P2) を解決するための問題点とその解決策を以下に述べる

#### 3.5.1 流量による検出レベルの違いについて

- 問題点 -

調整器内の流体流量が大きくなるにつれ、圧力変動の検出レベルも大きくなる。そのため、振動のレベルが大きい場合でもそれが異常な振動であるのかそれとも大きな流量によるものなのかの判別ができない。Fig 3.7 に未使用の調整器で各流量において実測した 50 測定データのエネルギーの平均値を示す。エネルギーは時系列データの二乗積分で表現されるため、その値は振動データのレベルに依存する。

Fig 3.7 に示すように流量が大きくなるにつれ振動のエネルギーも大きくなる。異常診断のための評価規準に計測データのレベルを直接使用すると、流量の違いを考慮しなくてはならなくなる。また、半密閉容器の密閉度によりその検出レベルも異なるため、その設置箇所や方法を厳密に定めなければいけなくなる。そのため、検出レベルを直接使用しない診断方法が望ましい。

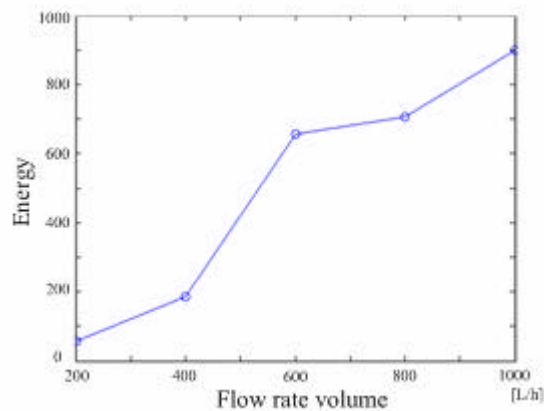


Fig.3.7 Energy of time series vibration data at each flow rate volume

- 解決策 -

一自由度振動系の解析や評価に頻繁に使用される評価指標として減衰係数  $\zeta$  がある<sup>24)</sup>。また、ゴム材は劣化することによりその減衰係数が減少することが知られている<sup>25)</sup>。減衰係数は、対象とするシステムの振動の収まりの速さを表す指標である。その値はゼロ以上で値が小さいほど、その系は振動的であることを表している。また、単位は無次元であり、値は振動レベルに依存しない。このような特徴を持つ評価指標であれば、上記の問題を解決できる。減衰係数  $\zeta$  はパワースペクトルのピーク値の  $1/\sqrt{2}$  倍の値でのスペクトルの幅を  $\Delta f$ 、固有振動数を  $f_n$  とすると次式から求めることができる。

$$z = \frac{\Delta f}{2f_n} \quad (3.12)$$

### 3.5.2 振動スペクトルが単峰ではない場合について

- 問題点 -

実際に調整器のダイヤフラム振動による圧力変動の測定を行うと、何らかのハーモニックな成分がスペクトルに現れ、ピークが1つではないものが存在する。その1例を Fig 3.8 に示す。減衰係数は一自由度系での指標であり、多自由度系での評価指標として使用することはできない。

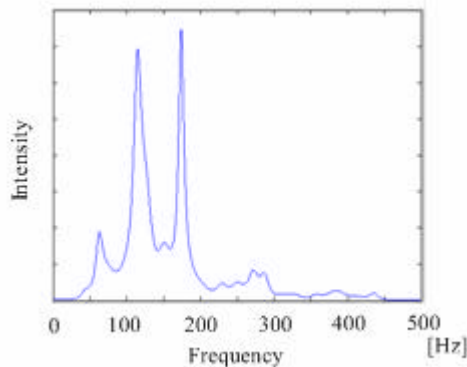


Fig 3.8 A spectrum of diaphragm vibration with two peaks at 600 L/h

? 解決策?

減衰係数のような特徴を備えた新たな評価指標を作成する。減衰係数は一自由度系でのスペクトルのピークの鋭さの指標である。そこでパワースペクトルを  $F$  とし、 $F$  は上界でその上限は存在するという条件の下で、新たな評価指標  $h$  を以下のように定義する。

$$h = \frac{\int F(f)df}{F^{-1}[\sup\{F(f)\}] \cdot \sup\{F(f)\}} \quad (3.13)$$

この評価指標はパワースペクトルの設定した範囲の面積をそのピーク値とピーク周波数で割ったもので、ピークが鋭いほど値が小さくなり、その値はゼロ以上である。また、単位も無次元であり、その値は信号レベルの大きさには影響しないという減衰係数と同様の特徴を持っている。減衰係数は共振エネルギーの大きさを与える指標である。よって  $H_2$  ノルム<sup>25)</sup>の規範内での評価法をいえる。その方法と比較して評価指標  $h$  は  $H_2$  ノルムと  $H_8$  ノルム<sup>25)</sup>の両者の比を規範とする評価の指標であるということが出来る。

実際の評価には未使用調整器と使用済み調整器の間で評価値の差を大きくするために、パワースペクトルのピーク値を  $P$ 、ピーク値を持つ周波数を  $f_n$ 、ピーク周波数前後 25Hz を取り除いたパワースペクトルの面積を  $m$  とした 3.14 式の値  $h'$  を用いた。この  $h'$  は  $h$  に対応している。Fig 3.9 に 3.14 式の変数を示す。

$$h' = 1000 \times \frac{m}{f_n P} \quad (3.14)$$

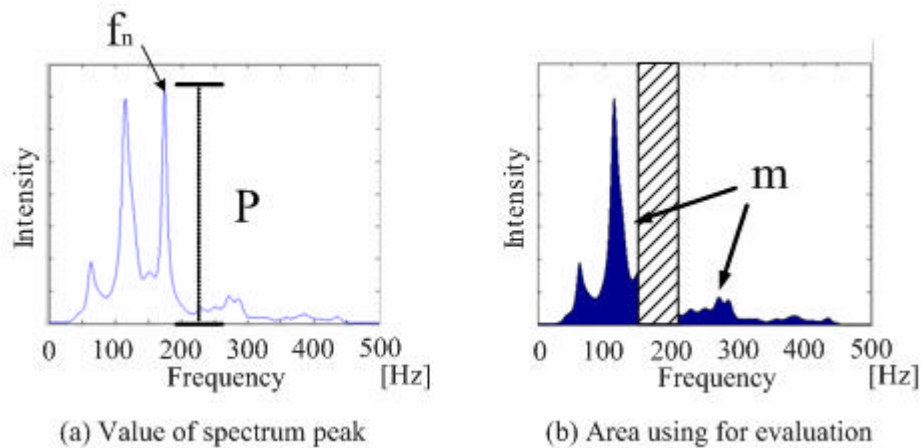


Fig 3.9 Variables for abnormal judgment

### 3.5.3 パワースペクトルの推定法について

? 問題点?

FFT により推定されるピリオドグラムでは、離散値を扱うプロセッサ上でピークの幅や最大値を求める作業には適していない。

? 解決策?

スペクトルの推定には、スペクトル包絡を推定するアルゴリズムである AR 法<sup>27)</sup>を用いた。また、AR 次数は AIC (赤池情報量規準)<sup>28)</sup>に従い決定した。(スペクトル推定のアルゴリズムは Appendix3 を参照)

## 3.6 データの測定と結果

### 3.6.1 調整器圧力変動データの測定

データの測定に用いた調整器を Table.1 に示す。各調整器で各流量に対してデータの測定を 50 回行い、その評価値  $h'$  を求めた。A 社、B 社の両調整器とも、定められた使用期限は 10 年間である。

Table.1 Data of measured regulators

社名	個数	使用年数
A 社	1	0 年
A 社	3	不明であるが少なくとも 10 年以上
B 社	1	0 年
B 社	1	10 年

### 3.6.2 結果

A 社の調整器の評価値  $h'$  の平均を Fig 3.10 に、B 社の調整器の評価値  $h'$  の平均を Fig 3.11 にそれぞれ示す。

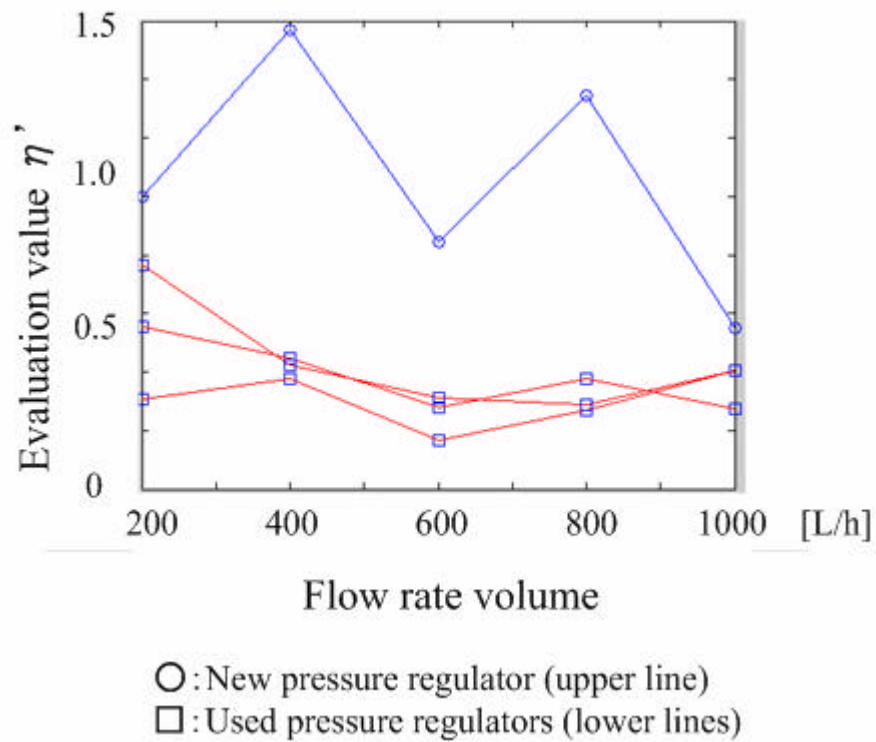


Fig 3.10 Evaluation value of regulators produced by A.C.O.

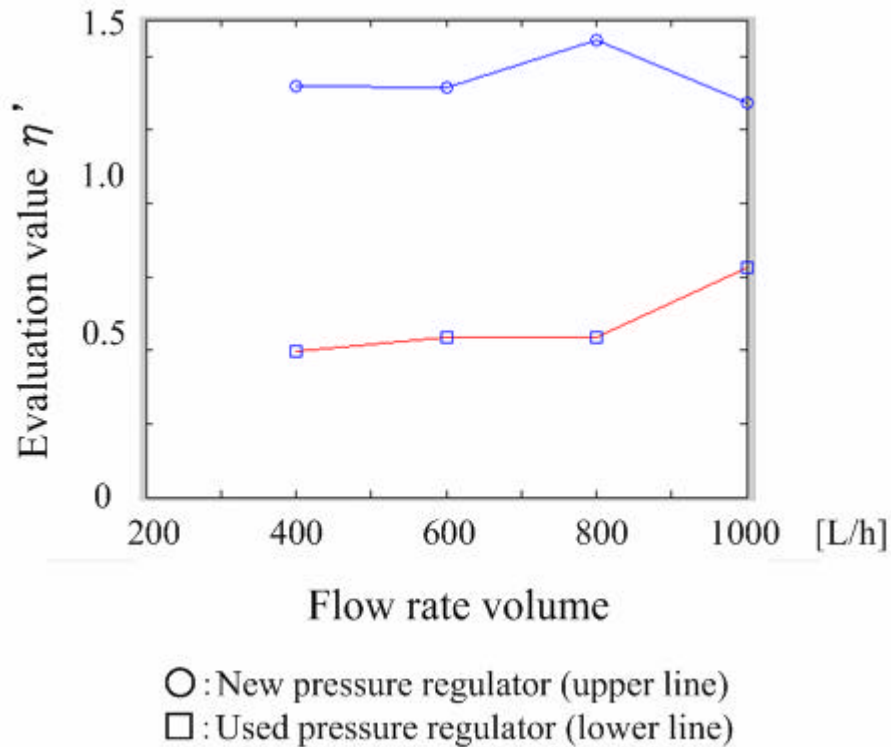


Fig 3.11 Evaluation value of regulators produced by B.CO.

以上のように，A社，B社，両社の調整器で未使用と使用済み調整器の間で $h'$ の値に差が現れた．しかしながら Fig 3.10 と Fig 3.11 値は $h'$ の平均値であり，実際には未使用と使用済み調整器の間でデータの分布が重なり合いが大きく，一つのデータのみで単純にその調整器が正常であるか異常であるかの判定は，現時点では困難である．また，B社の調整器では流量 200L/h での値が得られていないのは，B社の調整器ではその流量での S/N 比が非常に小さいため（約 2），測定データとしての信頼性に欠けるので結果から取り除いた．

### 3.7 まとめ

本章では高圧ガス圧力調整器の異常診断装置の研究開発について述べた．従来，調整器の設計や故障診断はその調整圧のスタティックな値のみを性能指標としていた．そこで，調整器のダイナミクスをみることで，スタティックな部分には現れない，より詳しい調整器の状態を知ることができるという考えに基づき，本研究は行われた．

具体的には，調整器のダイアフラム振動を計測することで，圧力調整器内部の異常を検知するための基礎実験と，異常状態を推定する方法の検討を行った．その推定のために異常状態評価のための新しい指標を作成した．その指標は，一自由度振動系の解析に用いられる減衰係数の性質を多峰ピークを持つスペクトルの評価に適用したものである．その新



しい評価指標を用いた結果，未使用の調整器と 10 年以上実際に使用した調整器の両者の評価値の平均には差が認められた．しかしながら，未使用と使用済み調整器の間でデータ分布の重なりが大きく，一つのデータのみで単純にその調整器が正常であるか異常であるかの判定は難しい．また，調整器を流れる流量が小さくなるにつれ，S/N 比が小さくなる問題も残されている．本システムには未解決の問題も多く，異常診断の方法としての確立には更なる研究，開発が必要である．

## 第4章 結論

本論では、コンデンサマイクロフォンを用いた2つの異状計測システム「単一のセンサで複数の物理量を計測する家庭用セキュリティセンサ」、「高圧ガス圧力調整器の異常診断装置」の研究について述べた。コンデンサマイクロフォンは本来音響を計測するための圧力センサであるが、その感知可能な周波数を低周波数領域まで下げることにより、多様な工学的応用が可能となる。本論はコンデンサマイクロフォン型圧力センサの工学的応用の可能性は極めて豊富であるという考えに則り、その応用例を2例示した。その2つの応用は新規なものであり、それぞれ有益な結果を得ることができた。それぞれの具体的な結論は各章のまとめに記してある。

今後の課題としては以下のことがあげられる。ほとんどすべての計測は逆問題であるといわれる<sup>29)~31)</sup>。計測とは、知りたい対象を量としてとらえ情報を得ることを目的としている。しかしながら、知りたい量が直接測定可能であることはきわめて稀である。そのために計測という行為には、物理量の変換を介する必要がある。また、その変換のプロセスは数段階におよぶこともある。その変換過程を経て、知りたい量をセンサが検知する。そして、そのセンサが検知した量から知りたい情報を得るためには、その変換過程と計測対象のモデル(物理モデルや統計モデル)を使用し、変換を因果の逆に遡らなければならない<sup>3)</sup>。この観点に基づいてみたとき、本論で述べた2つの計測システムの研究開発では、モデルの重要性についての認識が不足している。両研究とも有益な成果は得られているが、モデルについての認識を深めることでさらなる発展が期待できるだろう。

## 参考文献

### [第1章]

- 1) T.Nakagaki, H.Yamada, A.Toth : Maze-solving by an amoeboid organism, Nature Vol.407 470 (2000)
- 2) 高田誠二：計測の科学的基礎，コロナ社 (1987)
- 3) 北森俊之：計測の本質と計測工学，計測と制御，Vol.26 No.2 145-152 (1987)
- 4) 渡辺嘉二郎：生産システムの異状診断入門，日刊工業新聞社 (1983)
- 5) 山崎弘郎編：異状の検出と予知，工業調査会 (1988)
- 6) 渡辺春美，渡辺嘉二郎：睡眠中の心拍，呼吸，イビキ，体動および咳の無侵襲計測，計測自動制御学会論文集，Vol.35 No.8 1012-1019 (1999)
- 7) 大原，脇，岸田，渡辺：火災に伴う室内圧力変動による火災感知システム，日本火災学会論文集，Vol.47 No.1・2 13-20 (1997)
- 8) 渡辺，小林，西沢：スポーツにおける上下運動の計測，計測自動制御学会論文集，Vol.29 No.1 10-18 (1993)

### [第2章]

- 9) 法務省法務総合研究所：犯罪白書，財務省印刷局 (2002)
- 10) 総務省統計局・統計研修所：日本の統計，財務省印刷局 (2003)
- 11) 力武，竹田監修：日本の自然災害，国会資料編纂会 (1998)
- 12) 大森豊明編：システムとセンサ，産業図書 (1988)
- 13) 山崎，石川編：センサフュージョン，コロナ社 (1992)
- 14) 藤村貞夫：センシング技術? 多次元化? ，計測と制御，Vol.25 No.2 151-158 (1986)
- 15) 小野，石井，室井他：火災時における火災の周波数スペクトル，日大理工学部学術講演会論文集，601-603 (1982)
- 16) 元田，萩原：地震工学概論，森北出版 (1999)
- 17) K.Aki, P.G.Richards : Quantitativ Seismology. 2nd ed, University Science Books (2002)
- 18) T.Higuchi : Processing of Time Series Data Obtained by Satellites ,The Practice of Time Series Anaisis , Ed. H.Akaike , G.Kitagawa , Springer-Verlag New York, Inc. (1999)
- 19) 片山徹：応用カルマンフィルタ，朝倉書店 (2000)

**[第3章]**

- 20) 大熊秀明：供給機器の経年変化研究，高圧ガス，Vol.30 No.5, 32-47 (1993)
- 21) 高圧ガス保安協会：自主基準 LP ガス設置設備基準及び取り扱い要領，高圧ガス保安協会，97/100 (2002)
- 22) 増淵，川田：システムのモデリングと非線形制御，コロナ社 (1996)
- 23) 浦田，中尾：水圧サーボ弁に用いるノズルフラップ系の研究，日本機械学会論文集 ( B 編 )，Vol.63 No.610, 2062-2069 (1997)
- 24) モード解析ハンドブック編集委員会：モード解析ハンドブック，コロナ社 (2000)
- 25) 社団法人日本鉄道車両工業会：防振ゴム-改訂版，現代工学社 (1963)
- 26) 木村英紀：H<sub>∞</sub>制御，コロナ社 (2000)
- 27) 廣田，生駒：確率過程の数理，朝倉書店 (2001)
- 28) H.Akaike：A New Look at the Statistical Model Identification, IEEE Trans. Automatic. Control Vol.19 No.6, 716-723 (1974)

**[第4章]**

- 29) 赤塚，田村：計測と逆問題，計測と制御，Vol.27 No.5 400-406 (1988)
  - 30) 北森俊之：センシング技術における逆問題の意義と構造，計測と制御，Vol.36 No.7 459-463 (1997)
  - 31) 田邊國士：帰納推論と経験ベイズ法 逆問題の処理をめぐって，階層ベイズモデルとその周辺 ( 甘利，竹内，竹村，伊庭編 )，235-252，岩波書店 (2004)
-

# Appendix

## Appendix 1 計測とセンシング

計測とは対象の状態を規定する量（多くの場合，多量的な諸量）を機器あるいは機器システムにより検出・測定・観測し，対象に関する（理論的，経験的な）知識に基づいて，その結果（事実）から対象の状態について有用な情報を形成し，対象とその状態を認識し，さらにその意味を解釈，理解することである．その結果に基づいて対象の状態について判断・評価・予測が行われる．なお測定とは対象の量の数値を基準と比較して決定することであり，観測とは観察しつつ測定を行うことである．

センシングとは，対象事象の存在を検知・感知・探知・探査または事象の状態を観測し，その収録データを情報化処理して，事象またはその状態の識別・判別・同定・評価などを行うことで，また広義の計測である．

（宮尾，矢部監修：知能化センシング技術，サイエンスフォーラム(1989) より抜粋）

## Appendix 2 カルマンフィルタ

ある時刻  $n$  の数学モデルが線形ガウス型の状態空間モデル

$$\begin{aligned}x_n &= F_n x_{n-1} + G_n v_n \\y_n &= H_n x_n + w_n\end{aligned}\tag{A2.1}$$

として表わされるとき、以下のカルマンフィルタを用いることにより、時系列の観測値  $y_n$  に基づいて状態  $x_n$  の推定を行うことができる。

[1 期先予測]

$$\begin{aligned}x_{n|n-1} &= F_n x_{n-1|n-1} \\V_{n|n-1} &= F_n V_{n-1|n-1} F_n^T + G_n Q_n G_n^T\end{aligned}\tag{A2.2}$$

[フィルタ]

$$\begin{aligned}K_n &= V_{n|n-1} H_n^T (H_n V_{n|n-1} H_n^T + R)^{-1} \\x_{n|n} &= x_{n|n-1} + K_n (y_n - H_n x_{n|n-1}) \\V_{n|n} &= (I - K_n H_n) V_{n|n-1}\end{aligned}\tag{A2.3}$$

ただし、 $V$  は状態  $x$  の誤差分散共分散行列、 $Q$  は  $v$  の分散共分散行列、 $x_{n|n-1}$ 、 $V_{n|n-1}$  はそれぞれの条件付平均ベクトル、条件付分散共分散行列とする。

$$x_{n|n-1} \equiv E(x_n | y_{n-1}), \quad V_{n|n-1} \equiv E[(x_n - x_{n|n-1})(x_n - x_{n|n-1})^T]\tag{A2.4}$$

(A2.2)により状態遷移行列  $F$  から 1 時刻先の値を予測し、(A2.2)で(A2.2)により時刻  $n-1$  時に得られた予測値  $x_{n|n-1}$ 、 $V_{n|n-1}$  と実際の観測値  $y_n$  より、それぞれの最適な推定値  $x_{n|n}$ 、 $V_{n|n}$  を算出している。ここでの最適とは各時刻での誤差分散共分散行列  $V$  のトレースが最小になるような  $K_n$  を算出していることを意味する。

<? 予測? フィルタ? ...? 予測? フィルタ? >、という逐次のイタレーションにより状態空間モデルの状態推定を行うことができる。このアルゴリズムはハミルトン-ヤコビ-ベルマン方程式、直交原理、ベイズの公式など複数の方法でそれぞれから導出することができる。

### Appendix 3 AR 法によるスペクトル推定と AIC による次数選択

因果的な離散線形システムを考える。過去の出力の重み付きの線形結合に平均 0, 分散  $\mathbf{s}^2$  の白色雑音  $\mathbf{e}$  を加えたものを考える。時刻を  $n$ , 時刻  $n$  の出力を  $x_n$  としたとき,

$$x_n = \sum_{j=1}^p a_j x_{n-j} + \mathbf{e}_n \quad (\text{A3.1})$$

と表される確率過程は AR (autoregressive=自己回帰) 過程と呼ばれる。このとき重み係数  $a_j$  は AR 係数といい,  $p$  は AR 過程の次数という。角周波数を  $\mathbf{w}$  とすると, この AR 過程のパワースペクトル  $F(\mathbf{w})$  は次式のようになる。

$$F(\mathbf{w}) = \frac{\mathbf{s}^2}{\left| 1 - \sum_{j=1}^p a_j e^{-i\mathbf{w}j} \right|^2} \quad (\text{A3.2})$$

実データからの AR 係数の推定には複数の方法が存在するが, ここでは実際に使用したユール-ウォーカー法について紹介する。

時間差を  $t$ , 時間差  $t$  の自己共分散を  $C_t$  とすると次式はユール-ウォーカー方程式とよばれる。

$$\begin{bmatrix} C_0 & C_1 & \cdots & C_{p-1} \\ C_1 & C_0 & & C_{p-2} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ C_{p-1} & C_{p-2} & \cdots & C_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_p \end{bmatrix} \quad (\text{A3.3})$$

自己共分散  $C_t$  の代わりに標本自己共分散  $\hat{C}_t$  を使用し AR 係数を求めることができる。また, 分散の推定値  $\hat{\mathbf{s}}^2$  はユール-ウォーカー方程式を解いて得られた推定値  $\hat{a}_j$  を用いて,

$$\hat{\mathbf{s}}^2 = \hat{C}_0 - \sum_{j=1}^p \hat{a}_j \hat{C}_j \quad (\text{A3.3})$$

で求めることができる。この推定値は AR 係数と分散の最尤推定値となっている。

ここで問題となるのは AR 次数  $p$  の決定である。ここではその決定規準として, 赤池によって提唱された, AIC (赤池情報量規準) を用いる。AIC は最尤推定によって得られた最適推定パラメータをに含まれる偏ったバイアスを取り除いたもので次式のように表される。

$$\text{AIC} = -2 \times (\text{最大対数尤度}) + 2 \times (\text{自由パラメータ数}) \quad (\text{A3.3})$$

この AIC の値が最小となる次数が AIC の意味で最適な AR 次数である。

ここで AR モデルの AIC を得るためには、その最大対数尤度を求める必要がある。AR モデルのパラメータ  $\mathbf{q}$  を

$$\mathbf{q} = [a_1, a_2, \dots, a_p, \mathbf{s}^2] \quad (\text{A3.4})$$

としたとき、データ数  $N$  に対して  $N \gg p$  を仮定した近似と、時系列の同時確率分布  $f(x_1, x_2, \dots, x_N; \mathbf{q})$  をベイズの定理より条件付き確率の積への変換を行うことによりその尤度  $L(\mathbf{q})$  は

$$\begin{aligned} L(\mathbf{q}) &= f(x_1, x_2, \dots, x_N; \mathbf{q}) \\ &\cong \prod_{n=p+1}^N f(x_n | x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_{n-p}; \mathbf{q}) \\ &= (2ps^2)^{\frac{N-p}{2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2s^2} \sum_{n=p+1}^N \left( x_n - \sum_{j=1}^p a_j x_{n-j} \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (\text{A3.5})$$

となり、よって、対数尤度  $l(\mathbf{q})$  は

$$l(\mathbf{q}) = -\frac{N-p}{2} \log 2ps^2 - \frac{1}{2s^2} \sum_{n=p+1}^N \left( x_n - \sum_{j=1}^p a_j x_{n-j} \right)^2 \quad (\text{A3.3})$$

となる。対数尤度をパラメータ  $\mathbf{q}$  で微分してその値が 0 に等しいものが最大の値をとる対数尤度である。その結果、最大対数尤度  $\max(l(\mathbf{q}))$  は

$$\max(l(\mathbf{q})) = -\frac{N-p}{2} (\log 2ps^2 + 1) \quad (\text{A3.3})$$

となる。また、自由パラメータ数とは AR 次数に分散のパラメータ数を加えた  $(p+1)$  である。この両方を(A3.3)式に代入することで AIC が得られる。そして、候補となる次数すべてに対して AIC を求め、AIC が最小となる次数を選択することにより AIC の意味で最適な AR 次数が決定できる。候補となる次数の最大値は  $2\sqrt{N}$  を目安とすればよいことが知られており、AIC の効率的な計算アルゴリズムとしてレビンソン・ダービンのアルゴリズムがよく知られている。

以上のように計測データに対して AR 係数の推定、AR 次数の決定を行うことにより (A3.2) 式から計測データのパワースペクトルを求めることができる。



## Appendix 4 計測回路図

第 2 章 , 第 3 章で計測のために作成した回路の回路図を Fig.A1 , Fig.A2 にそれぞれ示す . Fig.A1 は第 2 章に示した計測システムに用いた回路である . 温度変化による直流成分の検知を可能とするため , 直流カットのハイパスフィルタを用いず , 差分増幅回路を用いた .

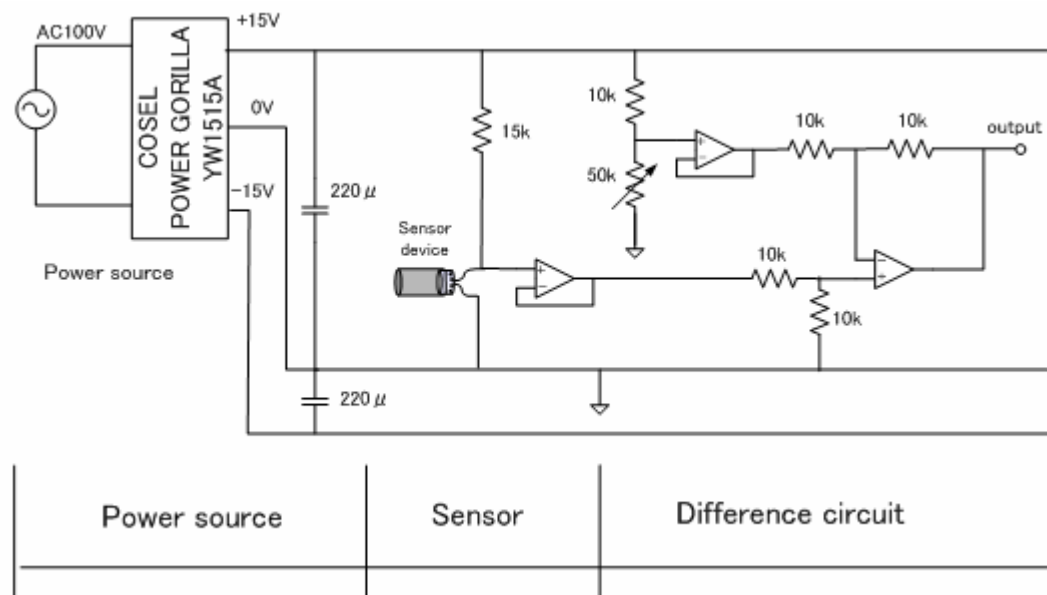


Fig.A1 Circuit module for proposed measurement system in capture 2

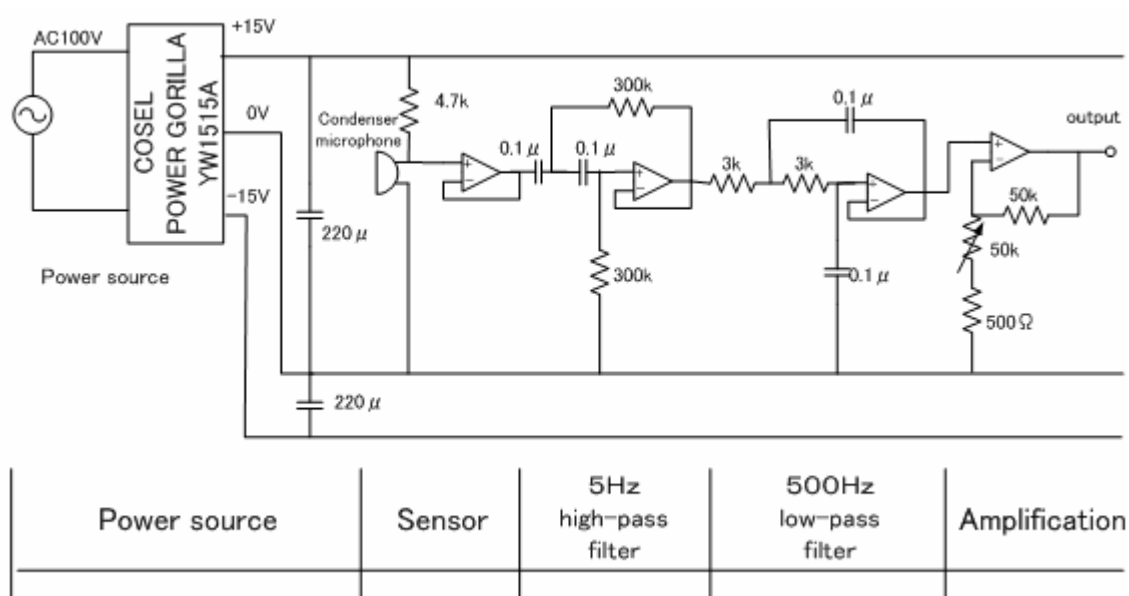


Fig.A2 Circuit module for proposed measurement system in capture 3

## 研究業績

### [論文発表等]

Kajiro Watanabe, Tsukasa Ishigaki : Multi-variables Detecting Device and Application to Security, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement (投稿中)

渡辺嘉二郎, 石垣司 : 複数セキュリティ事象の単一デバイスによるセンシング, 計測と制御, Vol.44, No.3 (2005)

### [学会発表]

石垣司, 渡辺嘉二郎 : コンデンサマイクロフォン型センサによる LP ガス圧力調整器内部振動の計測と状態推定, 計測自動制御学会計測部門大会第 21 回センシングフォーラム September 14 (2004)

T.Ishigaki, K.Watanabe : Modeling of LP Gas Single-Stage Pressure Regulator and Simulation of the Behavior of a Deteriorated Diaphragm, SICE Annual Conference 2004 in Sapporo, August 4-6 (2004)

T.Ishigaki, I.Okawa, K.Kobayashi, K.Watanabe : Alignment and Uniform Dispersion of Multiple Mobile Robots in a Room, SICE Annual Conference 2003 in Fukui, August 4-6 (2003)

### [特許]

渡辺嘉二郎, 石垣司, 高圧ガス保安協会, 矢崎計器 : 「圧力調整器異常検出装置」(出願中)

## 謝辞

本研究を進めるに当たり、多大なる方々に御指導御鞭撻をいただき、また、御迷惑をおかけいたしました。以下、この場に感謝の意を表させていただきます。

学部生 3 年後期時から、いたらない私に御指導を頂いた渡辺嘉二郎教授に厚く御感謝申し上げます。その後 3 年間、先生に御指導いただくことを志望いたしましたが、その結果として、先生には多大なる御世話・研究への御啓蒙をいただき、私には最高にプラスな選択となりました。研究の進行にあたって技術的に困難な問題に対して御指導いただき、大変お世話になりました小林一行助教授に深く御感謝申し上げます。先生には TA でも大変お世話になりました。第 2 章作成にあたり、大変お世話になりました山崎輔先輩に感謝いたします。第 3 章作成にあたり、設備を貸していただき、また大変お世話になりました高压ガス保安協会液化石油ガス研究所の皆様にも感謝申し上げます。

大学院での生活を有意義に楽しく過ごすことができたのは研究室の皆さんのおかげです。石川貴之君、あなたのその周囲への心遣い・気配りには感服させられ、言わずもがなのお世話を受けました。伊東洋介君、あなたの大きさにはかないません。小林圭太君、なかなかのお茶目さんっぷりです。木島亜衣さん、やはり焼酎は黒霧が好きです。吉田森之介君、ツッコミありがとう。山本健君、アミノバイタルにはお世話になっています。榎本浩也先輩、西谷泰昭先輩にも感謝いたします。いろいろと教えていただき、また、先輩のおかげで研究室生活を楽しく過ごすことができました。小俣善史君、今後もネタにするのは一向に構いませんのでご自由にどうぞ。真鍋宗広君、今後もその素晴らしい話術の向上に励んで下さい。大川泉さん、この 3 年間、大学の中ではほとんど一緒にいましたね。周囲から変な勘違いもされましたが、そのような人を見ているのもそれはそれで楽しかったです。その他の研究室の皆さんにも感謝します。皆さん、これからもよろしく願います。

心体共に鍛えてくださった、昭道館武蔵野の皆様にも感謝いたします。皆様には生きていく上でのいろいろと大切なことを学ばせていただきました。また、研究がうまく進まないときは良い気分転換をすることができました。

最後に、私を育ててくれた父、母、弟、石垣・井上の両祖父母に最大限の感謝を捧げます。