

ガスセンサ応答信号における流体伝達場の線形性

正員 広林茂樹 (金沢大学)

非会員 小阪友裕 (金沢大学)

非会員 木村春彦 (金沢大学)

正員 大藪多可志 (富山国際大学)

Approximate linear scheme for analyzing gas sensor responses of flow fields

Shigeki Hirobayashi, Member, Tomohiro Kosaka, Non-member, Haruhiko Kimura, Non-member (Kanazawa University), Takashi Oyabu, Member (Toyama University of International Studies)

Identification of primary factors responsible for indoor environments gas sensor responses is difficult due to the residual components in the room. By removing these components from observed sensor signal, we analyzed the linear components of the gas transfer route. A gas transfer routes, generally expressed by Navier Stokes equation, are non-linear fields. However, gas transfer routes can be approximated to a linear field with reducing flow velocity. We report here a model of indoor flow field generated using a linear system, and applied this model to experimental results. The results of this study indicated that over 90% of residual components of the gas sensor response were linear. Thus, the identification can be improved by reducing residual components from the sensor response using the minimum phase inverse filter.

キーワード：ガスセンサ，伝達関数，線形システム，逆フィルタ，最小位相

1. はじめに

先進国では、高齢化社会が問題となっている。特に、日本国内では、近年、高齢者の数が急激に増加し、独居老人の世帯数も増加している。これに伴い、老人の孤独死などの社会問題も発生し、一般家庭における室内環境変化をモニタリングすることが重要な課題となっている⁽¹⁾。一般に、画像や、音によって人の活動や室内の環境変化を認知しようとする試みは広く行われている。既に監視カメラや小型マイクロホン等を用いた視聴覚情報によって環境の変化をモニタリングすることは実用化されつつある。しかし、モニタリング対象者のプライバシー問題等、実用化にはまだ問題が多いように思われる。本研究では、これまで環境変化の定量的な指標として、一般に重要視されていなかった臭覚情報^{(2)~(6)}を用いることに着目した。すなわち、視聴覚情報を用いず、室内空間のガス濃度変化のみから環境変化を認知することを目的としている。これまでの著者らの研究では、様々な人の活動によって、それぞれ特徴的なガスが発生することがわかっている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。例えば、起床、食事、就寝の大局的な行動に加え、喫煙、暖房器具の運転等局所的な行動も、一般家庭におけるモニタリングにより認知出来る可能性があることが明らかになって

いる⁽⁸⁾。しかし、室内の閉空間で観測されたセンサ応答信号には、時間的に前の行動によって発生したガスの残留成分が、認知したい時間の応答信号に重畳され活動同定の精度が低下する等の問題がある。

一般に流体の伝播路は非線形場で表されるため、この重畳成分を取り除くことは難しい。これは、良く知られている流体場を表す Navier Stokes 方程式の慣性項の非線形性に起因する。しかし、方程式中の粘性項については線形性が明らかになっている⁽⁹⁾。本論文では、特に流体伝達場の線形成分に着目し、非線形場の伝達系から線形な拡散成分のみを取り除くことによって残留成分の軽減を行うことの可能性を実測実験により検討する。ガスセンサにおける流体場の線形性が実証できれば流体伝達場を線形システムで近似でき、理論的に観測信号から残留成分の影響を取り除くことが可能になる。

2. 室内空間におけるの残留成分の影響

一般に、ガスは発生点から観測点間の伝達路を得てセンサに観測される。例えば、図1のような室内でガスを発生させた場合、発生点 P_s で図2(a)の信号に同期した発生量を与えると図2(b)のような観測信号が得られる。発生間隔がガス残留時間より長ければ、行動周期を同定する

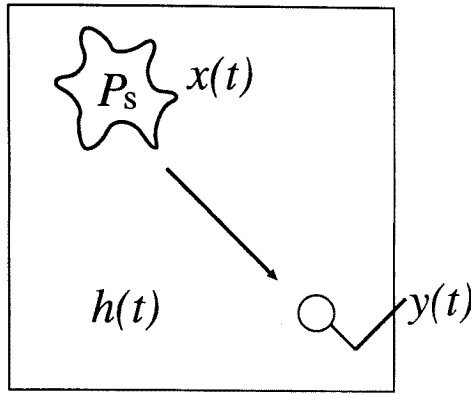


図1 室内空間におけるガスの伝播
Fig. 1. A gas propagation model in the room.

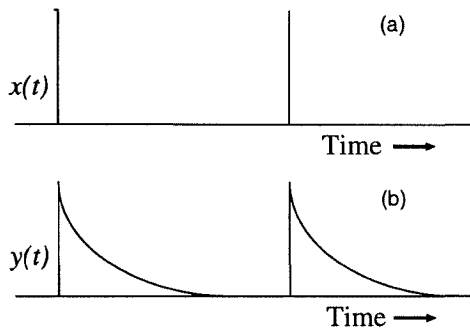


図2 観測信号から認知が容易な場合
(a) 原信号 (b) 観測信号
Fig. 2. A possible case of recognition from received signal. (a)Source signal, (b)received signal.

ことは容易である。しかし、図3 (a) のようにガス発生間隔が短ければ時間的に前に発生したガスの残留成分に重畳され、行動周期を同定することは難しい。すなわち、ガスセンサ応答はガスの発生する時間間隔に大きく依存し、観測信号から人の行動に起因する信号変化を読み取ることは一般に困難である。本論文では、この残留成分を取り除くため、ガスセンサにおける流体伝播特性について実測実験によりその特性を明らかにする。

3. 流体の伝播

一般にガスに代表される流体の伝搬は Navier Stokes の方程式で表される。この方程式では慣性項が非線形、粘性項が線形な系で表され、主に流体場の非線形性は慣性項に起因することが明らかになっている⁽⁹⁾。しかし、流体速度が小さい場合には慣性項が粘性項に比べ小さくなり、線形な系で近似できることも明らかになっている。室内気流の状態が変化しなければ、ガス濃度に対し拡散方程式は線形となり、線形システムで近似できる⁽¹⁰⁾。そこで本論文では、線形な系を有する粘性項に着目し、流体場を線形システムで近似することを試みる。すなわち、非線形場を線形

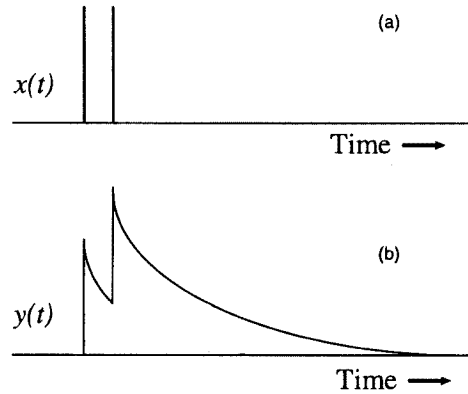


図3 観測信号から認知が困難な場合
(a) 原信号 (b) 観測信号
Fig. 3. A impossible case of recognition from received signal. (a)Source signal, (b)received signal.

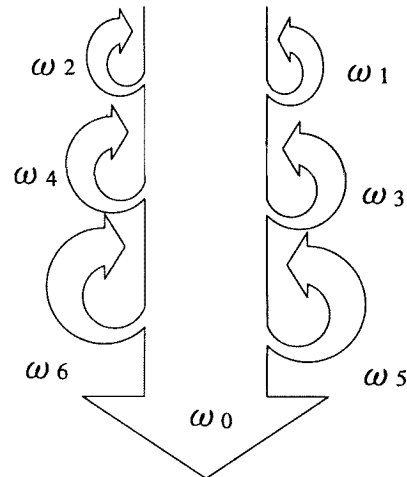


図4 直達成分と渦成分
Fig. 4. Direct component and swirl components.

場で近似することで正確な残留成分の除去は不可能であるが、線形項のみに着目することによって残留成分の軽減をはかる。一般に線形システムを仮定すると、図1に示す流体場で観測信号 $y(t)$ はガス発生源信号 $x(t)$ と伝達特性 $h(t)$ のたたみ込みで表わせる。

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)h(\lambda - t)d\lambda = x(t) * h(t) \dots\dots (1)$$

また、周波数領域では

$$Y(\omega) = X(\omega)H(\omega) \dots\dots\dots (2)$$

で表せる。したがって、観測信号からガス発生源信号を求めるためには、

$$X(\omega) = \frac{Y(\omega)}{H(\omega)} = Y(\omega)H(\omega)^{-1} \dots\dots\dots (3)$$

式で求められる。しかし、一般に非線形場では $h(t)$, $H(\omega)$ は時間的に揺らいでおり、上式によって求められた駆動信号 $x(t)$ には誤差が含まれる。本論文では、測定実験より得られる測定値を用いて定量的にこの誤差を評価する。

室内空間におけるガス伝播路をモデル化する。図4に示すように、一般に流体伝播は主にガス発生点から観測地点へ直接到来する減衰関数（主成分）と角周波数 ω_m で回転する渦成分（副成分）の和で表される。一般に渦運動は減衰を伴う回転ベクトルで表わされるため、 ω_m は複素数である。 ω_m の実部は損失がないときの回転角周波数 (rad/s), ω_m の虚部は減衰係数である。本論文では、特に伝達特性の変動要因として ω_m に着目し、変動量を定量的に評価した。

4. 伝達関数の変動量

実験環境を図5に示す。室内にはエアコンが1台置いてある。本論文の定常状態とはエアコン非稼働で可能なかぎり流体の揺らぎを小さくした状態、非定常状態とは一般家庭を想定しエアコンを稼働させ揺らぎを大きくしたときの状態である。ガスセンサにはフィガロ技研 TGS800 を用い、発生源には一例としてエタノールスプレー缶を用いた。エタノールは本実験で用いるセンサに高い感度を有する。また、センサ測定ではサンプリング周期 0.1s とし、定常時の電圧を基準電圧 (0V) とした。図6 (a) は一般的な室内空間の定常状態において、パルス的な駆動源 (約 1s 間) を与えたときのガスセンサ測定信号 $h_1(t)$ である。図6 (b) は同様に2分後に測定した信号 $h_2(t)$ である。図6 (c) はこの2つの波形の誤差である。誤差波形からわかるように両波形 (図6 (a), (b)) は完全に一致はしない。本論文では波形の違いを定量的に評価するため誤差指標

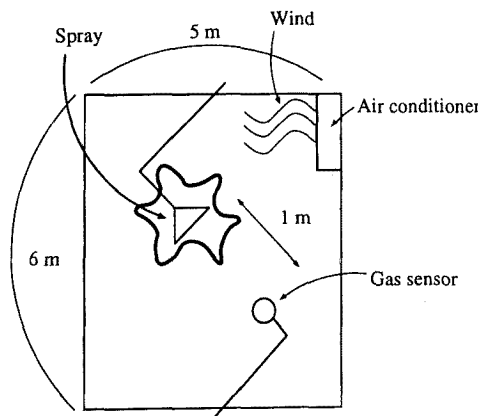


図5 測定環境

Fig. 5. An indoor environments.

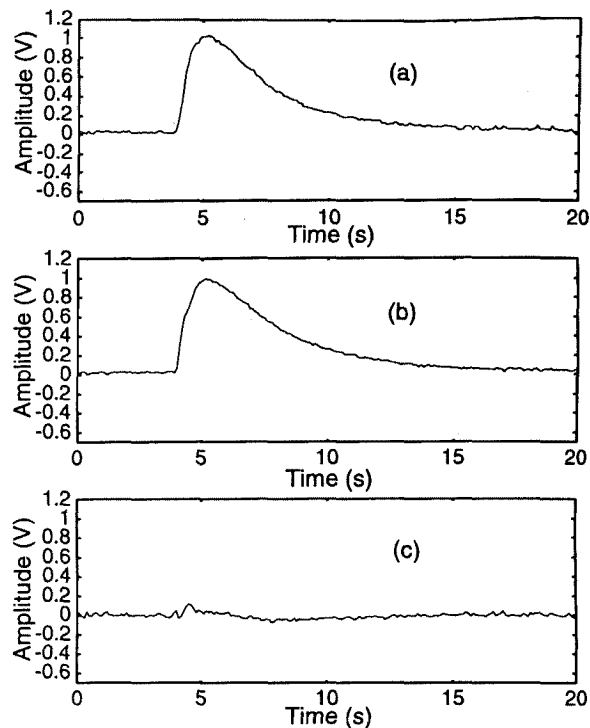


図6 定常時の測定波形と誤差波形 (a) 1回目の測定波形 (b) 2回目の測定波形 (2分後) (c) 誤差

Fig. 6. Measured waves and an error with flow calmed. (a)The first measurement (b)the second(two minutes later) (c)error.

表1 誤差

Table 1. The error of measured waves.

測定回数	誤差 (%)	
	定常	非定常
1	0.610	3.471
2	1.139	4.532
3	2.430	7.001

$$E = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} e(t)^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} h(t)^2 dt} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \{h_1(t) - h_2(t)\}^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} h_1(t)^2 dt} \quad (4)$$

を用いた。図6で計算した場合、誤差が、0.6% ($E \times 100$), すなわち -22dB ($10 \log_{10} E$) となり、少ない誤差で時不変性が近似できることがわかる。すなわち、この誤差の範囲であれば時不変性が保障されることになる。

次に、同じ室内でエアコンを稼働させ風を起こし、伝達場に揺らぎを与えたときの測定例を図7に示す。図7 (a) は図6 (a) と同様にパルスの一回ガスを発生させ伝達系を測定したものであり、図7 (b) も約2分後に測定した信号である。両波形とも後方第2波が存在する。これは、流体の非線形な揺らぎに伴う渦成分の影響と考えられる。このため、図7 (c) で示す誤差波形は無風状態の図6 (c) に比べやや大きくなり、誤差も3.4%

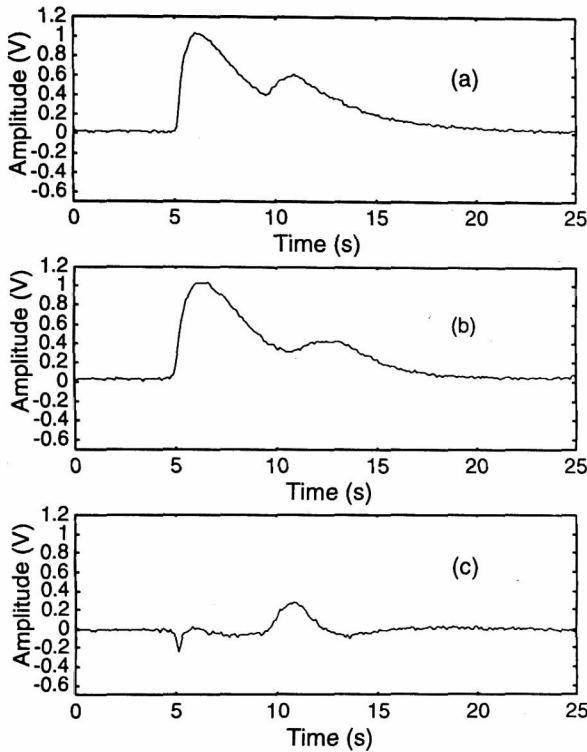


図7 非定常時の測定波形と誤差波形 (a) 1回目の測定波形 (b) 2回目の測定波形 (2分後) (c) 誤差

Fig. 7. Measured waves and an error wave with flow stormed. (a)The first measurement (b)the second(two minutes later), (c)error.

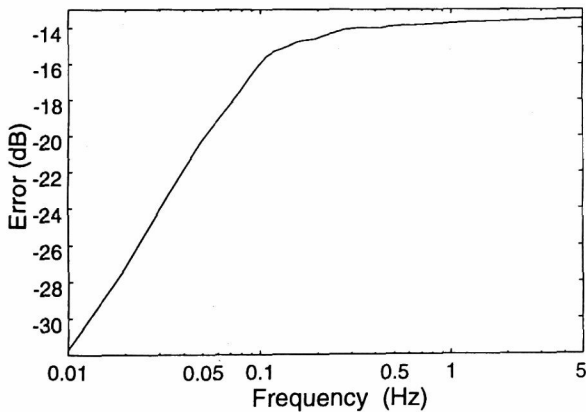


図8 周波数領域における誤差
Fig. 8. The error wave in frequency.

(-14dB)と増大してしまう。しかし、逆に図7 (a)と (b)の波形において96%は一致することになり、伝達路の時不変性が近似的に成立することがわかる。両波形において、どのような帯域で誤差が発生しているか調べるため、図8に周波数領域における誤差を示す。縦軸はdB表

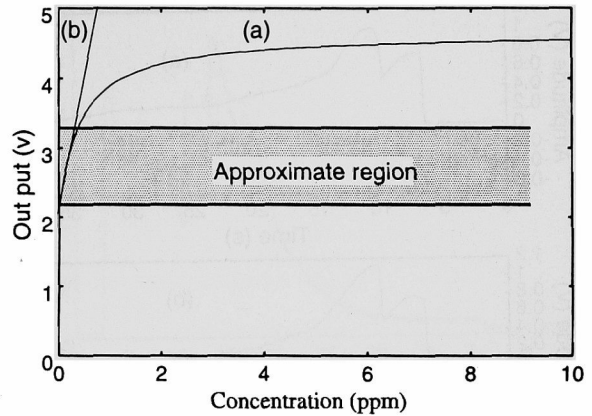


図9 ガスセンサの感度特性
(a)測定特性, (b)近似特性

Fig.9. Sensitivity characteristics of gas sensor. (a)Measured property, (b)approximation.

示で、下にあるほど誤差が低く波形が一致している。特に0.1Hzを境に低周波域で誤差が小さく、誤差の要因は主として0.1Hz以上の高周波域にある事がわかる。この実験結果から主成分 ω_0 は線形性が高く、渦運動に伴う他の回転角周波数成分は線形性が低いことが推定できる。

表1に定常、非定常時の、各環境下における誤差を示す。定常時ではほぼ3%未満で小さい誤差が生じていることがわかる。一方、非定常時には3~8%の範囲とやや大きい誤差が生じているものの、約90%以上で時不変成分が一致していることがわかる。

5. 伝達路の線形性

次にセンサ応答関数の線形性について調べた。本実験で用いたセンサ自体はガス発生量に対し、図9に示す特性を有する。したがって、特性図の逆関数を求め電圧特性をガス発生量に変換すればセンサ出力に対し線形性が成立する。しかし、温度や湿度の変動によって特性曲線が変化し、特に高濃度帯域で変換誤差が著しく大きくなる。そこで、出力電圧の狭い範囲であれば線形的に近似することが可能であることに着目し、伝達路の線形性について実験を行った。

図10 (a)は定常環境下においてはほぼ同一なパルスの駆動源を時間差3秒で2回与えたときのセンサ観測信号である。図10 (b)は1回のパルス観測波形 $h(t)$ に時間差信号を畳み込んだ推定波形

$$\hat{y}(t) = h(t) * \{\delta(t) + \delta(t - \tau)\} \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{ただし, } \delta(t) = \begin{cases} 1 & (t = 0) \\ 0 & (t \neq 0) \end{cases}$$

である。 τ は時間遅れを表す定数である。図10 (c)の誤差は6%になり、一回のパルスにつき平均3%の誤差が生

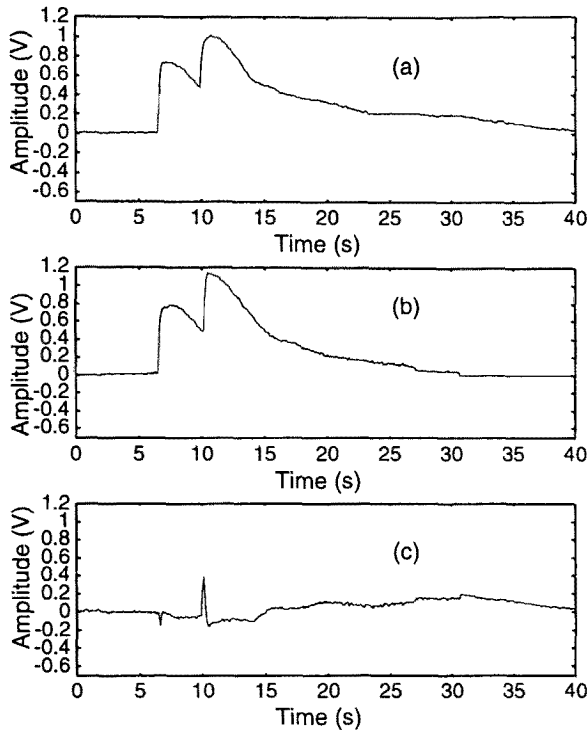


図10 測定波と推定波形
 (a) 測定波形 (b) 推定波形 (c) 誤差波形
 Fig. 10. Measured wave and estimated wave.
 (a) Measured wave, (b) estimated wave,
 (c) error wave.

表2 推定波形の誤差
 Table 2. The error of estimated wave.

測定回数	線形誤差 (%)
1	6.035
2	7.018
3	6.929

じている。すなわち94%以上の割合で推定できることがわかる。推定誤差がこの範囲であれば流体場の線形性が成立する可能性がある。表2に同様な実験結果を示す。測定値と推定値でほぼ90%以上のエネルギー成分が一致していることがわかる。

6. 伝達関数のフィルタリング

本論文では伝達系の線形性を示すため、実測実験によって駆動源であるパルス波形の抽出を行った。式(3)に示される逆フィルタ処理により、駆動源の復元を試みる。一般に逆フィルタ $H(\omega)^{-1}$ は伝達系の零点の影響で不安定な系になるため、最小位相フィルタ $H_{\min}(\omega)^{-1}$ を用いた⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。測定した離散的信号 $([1 \ a_0 \ a_1 \ \dots])$ は有限長のため、 z 変換で

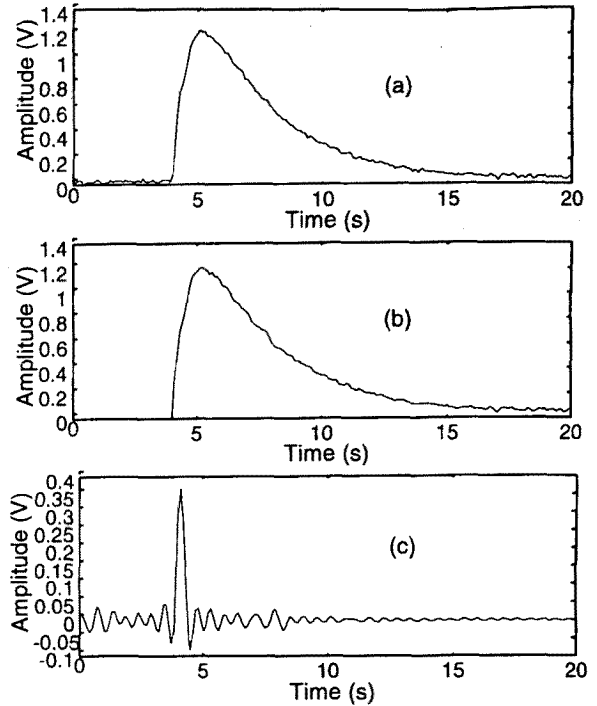


図11 最小位相逆フィルタを用いた単一パルスの復元 (a) 測定波形, (b) 最小位相波形, (c) 復元波形

Fig. 11. Recovery of using minimum phase inverse filter. (a) Measured wave, (b) minimum phase wave, (c) recovered wave.

$$\begin{aligned}
 H(z) &= a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{N-1} z^{-(N-1)} \\
 &= \sum_{k=0}^{N-1} a_k z^{-k} \\
 &= \alpha_0 (1 - \alpha_1 z^{-1})(1 - \alpha_2 z^{-1}) \\
 &\quad \dots (1 - \alpha_{N-1} z^{-1}) \\
 &= \alpha_0 \prod_{k=1}^{N-1} (1 - \alpha_k z^{-1}) \dots \dots \dots (6)
 \end{aligned}$$

と表わされ全零モデルとなる。したがって、逆フィルタは

$$H(z)^{-1} = \frac{1}{\alpha_0 \prod_{k=1}^{N-1} (1 - \alpha_k z^{-1})} \dots \dots \dots (7)$$

となり、全極モデルとなる。一方、極は

$$\frac{1}{1 - \alpha z^{-1}} = 1 + \alpha z^{-2} + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \alpha^k z^{-k} \dots \dots (8)$$

と無限等比級数になり、等比数列的な時間信号 $([1 \ \alpha \ \alpha^2 \ \dots])$ を発生させる。このとき、 $|\alpha| > 1$ であれば、信号は発散し逆フィルタリングが不安定になる。最小位相変換とは極を安定にさせるため、 $|\alpha| > 1$ の場合 α を α の逆数に

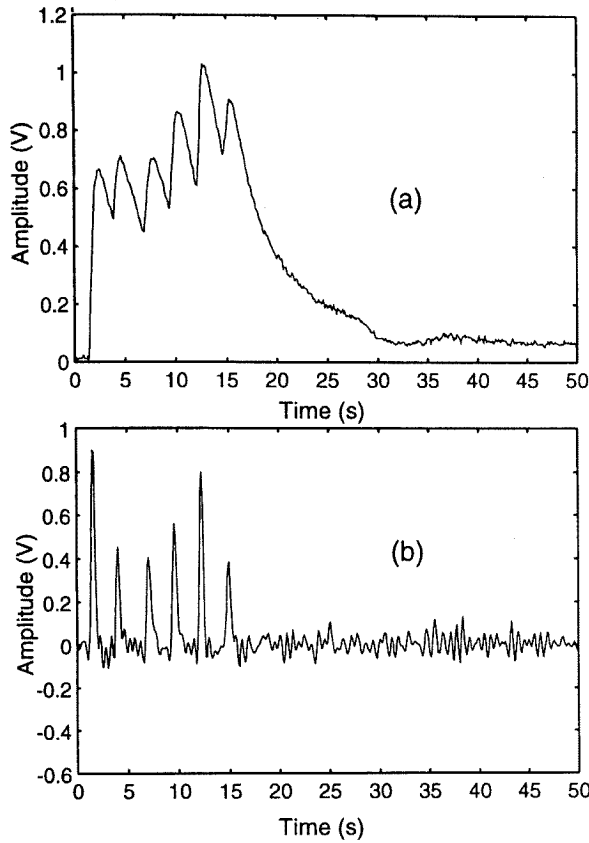


図 12 定常時におけるパルス列の復元
(a) 測定波形, (b) 復元波形

Fig. 12. Recovery of pulse trains with flow calmed. (a) Measured wave, (b) recovered wave.

変換することである。この特性 $|H_{\min}(\omega)|$ は、周波数領域で振幅特性 $|H(\omega)|$ に一致する。図 11 (a) は定常状態で測定した伝達特性 $h(t)$ 、図 11 (b) は最小位相変換した特性 $h_{\min}(t)$ である。時間特性はほぼ一致していることがわかる。図 11 (c) は逆フィルタリング

$$\hat{X}(\omega) = \frac{H(\omega)}{H_{\min}(\omega)} \dots\dots\dots (9)$$

で抽出したパルス信号である。ただし、復元帯域は約 $0 \sim 2\text{Hz}$ である。最小位相逆フィルタでパルス波が復元できていることがわかる。図 12 (a) は一定の時間間隔で 6 回連続的に、パルスのガス駆動源を発生させたときの観測信号である。図 12 (b) は式 (3) の逆フィルタリングによって抽出した波形である。信号に重畳された残留成分が除去され、ノイズ成分が強調されているがパルス列が復元されていることがわかる。図 13 に非定常時の測定波形 (a)、抽出波形 (b) を示す。図 13 (a) は、不安定な風のため図 12 (a) と比べると中央部の出力が低下している。しかし、図 13 (b) では、定常時に比べノイズ成分や抽出誤差が増大しているものの観測信号からはほぼ忠実にパルス列の

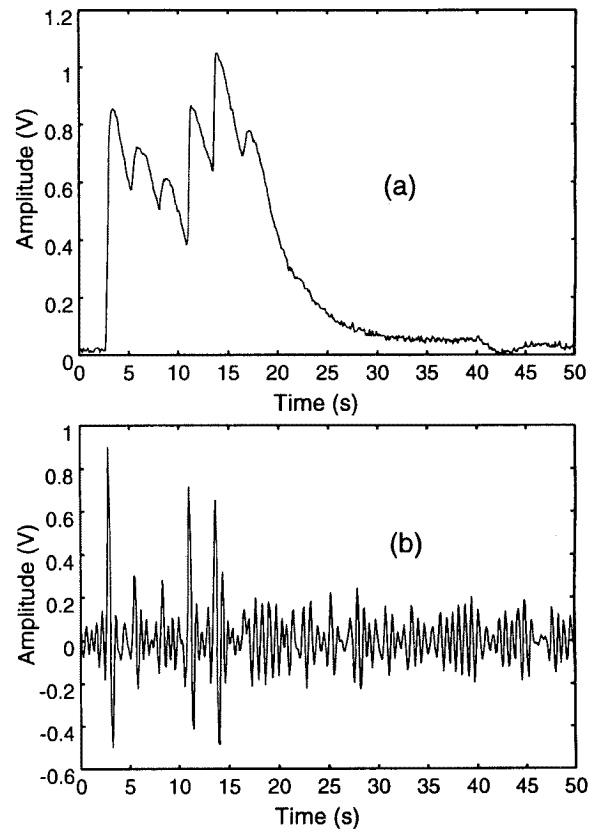


図 13 非定常におけるパルス列の復元
(a) 測定波形, (b) 復元波形

Fig. 13. Recovery of pulse trains with flow stormed. (a) Measured wave, (b) recovered wave.

概略が復元できる。

7. ま と め

本論文では、ガスセンサにおける流体場の線形成分について定量的な評価実験をおこなった。ガス流体場を線形システムでモデル化し、測定値と推定値のエネルギー誤差を求めた。その結果、一般の室内において室内気流の状態が変化しなければ、伝達特性の 90% 以上が時不変成分、線形成分で構成されていることがわかった。これまでも、ガスセンサ応答信号が単調な場合、その前後関係から環境変動の始点・終点を推定することは可能であった。しかし、環境変動が連続する場合には重畳成分によって、発生信号が埋もれ変動検出が困難であった。本論文で実証したガス流体場の線形性により、最小位相フィルタ等の逆フィルタリングによって室内残留成分の影響をセンサ観測信号より取り除くことができることがわかった。

謝 辞

本研究に際し、流体伝達場の線形性に関する本研究の動機付けと研究の枠組みについてご訂論頂いた東京工業大

学 森泉豊栄 教授, 測定実験でセンサ試料をご提供頂いた
(株) フィガロ技研 松浦吉展 氏に厚くお礼申し上げます。
(平成9年7月24日受付, 同9年9月24日再受付)

文 献

- (1) 大藪多可志, 広林茂樹, 木村春彦, “複数の酸化スズ系ガスセンサによる独居老人世帯モニタリング,” 電気学会論文誌, Vol. 117-E, No. 6, pp. 314-320 (1997)
- (2) 福山博文, “室内空気質,” 空調調和衛生工学, Vol. 66, No. 10 pp. 741-748 (1992)
- (3) T. Seiyama, “Chemical Sensor-Current State and Future Outlook,” Chemical Sensor Technology, Vol.1, pp.1-13, Kodansha Ltd and Elsevier (1988)
- (4) T. Seiyama, et al., “A New Detector for gaseous components using Semiconductive thin films,” Anal. Chem. 34, pp1502-1503 (1962)
- (5) T. Oyabu, et al., “The Detection of Gaseous Indoor Air Pollutants using a Multi-Sensor System,” East Asia Conference on Chemical Sensors '95, No. 1G04, pp.23-26 (1995)
- (6) 大藪多可志, 木村春彦, “プロダクションシステムを用いた家庭災害の同定,” 電気学会論文誌, Vol. 30, No. 9, pp. 431-436 (1994)
- (7) 大藪多可志, 木村春彦, “プロダクションシステムを用いた相対的室内空気汚染の測定,” 電気学会論文誌, Vol. 117-E, No. 5, pp. 243-249 (1997)
- (8) 広林茂樹, et al., “ケブストラムを用いたガスセンサ応答からの人間活動量の復元,” 信学技報, CMP97-37, OME97-43, p45-50, (1997-06)
- (9) 例えば, 木田重雄, 流体方程式の解き方入門, 共立出版 (1994)
- (10) 沢田康次, “非平衡系の秩序と乱れ-非線形物理学序論”, 朝倉書店, pp.1-28, (1993)
- (11) M. Tohyama, R. Lyon, and T. Koike, “Pulse Waveform Recovery in a Reverberant Condition,” J. Acoust. Am. Vol.91, No.5, 2805-2812 (1992)
- (12) M. Tohyama, R. Lyon, and T. Koike, “Inverse Filtering for Reverberant Transfer Functions,” IUTAM Symposium '92 pp.39-48 Springer-Verlag (1992)

広 林 茂 樹 (正員) 1968年9月1日生まれ。94年3月工学院
大学工学研究科修士課程修了。95年3月同大学博士
課程中退。同年4月金沢大学工学部助手。主として、
室内音響、音響振動論、音響信号処理、流体伝
播のモデル化の研究に従事。電子情報通信学会、計
測自動制御学会、日本音響学会、米国音響学会各会
員。



小 阪 友 裕 (非会員) 1973年10月16日生まれ。98年3月金
沢大学工学部電気情報工学科卒業見込み。ガスセン
サを用いた人の活動同定に興味がある。



木 村 春 彦 (非会員) 1974年 東京電気大学工学部応用理化学科
卒業。79年東北大学工学研究科博士(情報工学)
課程修了。同年富士通(株)勤務。80年金沢女子
短期大学講師。84年金沢大学経済学部助教授を経
て、現在、同大学工学部電気情報工学科教授。そ
の間、最適コード変換、プロダクションシステムの
高速化の研究に従事(工学博士)。電子情報通信学
会、情報処理学会、人工知能学会各会員。



大 藪 多 可 志 (正員) 1973年工学院大学工学研究科修士課程修
了。75年早稲田大学第二文芸部英文科卒業。73年
電気音響(株)技術部研究所勤務。80年金沢女子
短期大学講師, 助教授, 教授を経て91年富山国際
大学人文学部社会学科助教授, 94年教授。ガスセ
ンサシステムに関する研究に従事(工学博士)。

