

ケプストラム処理による室内ガス発生事象信号の復元

広林 茂樹[†] 木村 春彦[†] 東山三樹夫^{††} 大藪多可志^{†††}

Gas-Generating Events Estimation Using Remote Sensing and Cepstrum Processing in an Indoor Space

Shigeki HIROBAYASHI[†], Haruhiko KIMURA[†], Mikio TOHYAMA^{††},
and Takashi OYABU^{†††}

あらまし 一般に流体における伝達系は Navier Stokes の方程式で記述される非線形場である。しかし、室内気流の状態変化が小さい場合には、線形場で近似できることが知られている。本論文では、室内空間におけるガス伝達系を線形システムによってモデル化し、可燃性ガスセンサの観測信号から人間の生活活動による空間環境変動としてとらえられるガス発生事象信号の抽出を試みた。はじめに、センサ観測信号から最小位相ケプストラムのロータイムウィンドウ処理によって、室内のガス発生源からセンサに至る伝搬路特性を抽出できることを明らかにした。その結果、ガス伝達系の最小位相特性に着目した逆フィルタリング処理によって、観測信号から過去に発生したガスの室内残留成分の影響を軽減して、ガス発生に伴う事象信号の概略が復元できることがわかった。これらは一般家庭のモニタリング実験によって確認された。本研究は、ガスセンサを用いた環境変動モニタリングによる人の活動検知に有効であると期待できる。

キーワード ブラインドデコンボリューション、ケプストラム、ガスセンサ、逆フィルタリング、最小位相、室内伝達関数

1. ま え が き

室内環境の異常変動モニタリングでは、ガス状態の空気汚染度調査や、室内空間における人の行動を認知することは重要である [1]。人間の振舞いの認知に関して、既に監視カメラや小型マイクロホン等の視聴覚情報によって環境の変化を推定することは実用化されつつある。しかし、個人のプライバシーを考えるとシステムの設置場所等も制限される。本研究は、室内（居住空間）に設置されたガスセンサの観測信号から居住空間での人の活動に起因する環境変化の検知を目的とする。

一般家庭に広く普及しているガス漏れ警報器に用いられているセンサのほとんどが酸化スズや酸化亜鉛といった酸化物半導体を応用したセンサである。本論文では、可燃性ガスを検知する目的で開発された酸化ス

ズ系ガスセンサの観測信号から人間の振舞いを認知する可能性に着目した。

これまで、人のさまざまな活動によってさまざまなガス種が発生することが報告されている [2]。更に、可燃性ガスセンサは人のさまざまな行動を識別するに重要なガスの選択性には乏しいが、ガスセンサの出力値や観測信号の成長曲線から、起床、食事、就寝、喫煙などの日常的な人間の行動を検知することが試みられている [3],[4]。

しかし、変動検知のための観測時間が長いことや、ガス発生間隔が短く室内ガス濃度の変動が激しい場合には、過去に発生したガスの室内残留成分の影響によってセンサ観測信号の過渡応答精度が見かけ上低下するという問題が生じている。筆者らは、ガスの発生地点からガスセンサに至るまでの経路をモデル化し、ガス濃度の変化に現れるガス発生事象信号の抽出を試みてきた [5]。特に観測信号より室内で過去に発生したガスの残留成分の影響を除去すれば、信号検知精度の改善が期待できることを明らかにしてきた [6]。

筆者らは、残留成分を室内残響音のようにとらえて系の伝搬路特性に起因するものと考え、室内残留成分

[†] 金沢大学工学部, 金沢市
Kanazawa University, Kanazawa-shi, 920-8667 Japan
^{††} 工学院大学, 八王子市
Kogakuin University, Hachioji-shi, 192-0015 Japan
^{†††} 金沢経済大学, 金沢市
Kanazawa College of Economics, Kanazawa-shi, 920-8620 Japan

の影響を室内ガス伝達系のインパルス応答とみなした。その結果、既に室内のガス発生源からガスセンサに至る伝搬路特性を測定し、その正確な逆フィルタリングによって、ガスの発生を表す事象信号を抽出できることを既に明らかにした [6]。しかし、伝搬路特性を測定することは一般的に難しく、家庭内で測定することは実用的でないように思われる。

そこで本論文では、室内空間のガス伝搬路特性を測定することなく、ガスセンサの観測信号からガス発生事象信号を抽出することを試みる。その結果、ガスの伝搬路特性が最小位相特性を有することや、複素ケプストラム領域における最小位相ケプストラムのロータイムウィンドウ処理によってガスの伝達系とガス発生事象信号を分離し、ガス発生事象信号を抽出できることを数値計算および実測実験より明らかにする。

2. 室内空間のモデル化

2.1 室内ガスの伝達系

室内空間におけるガスの伝搬は、一般に乱流拡散で複雑であり、非線形場である。しかし、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 [6]~[8]。

図 1 のように、サンプリングされた時系列番号を n とおき、センサ観測信号はガス発生源による濃度変化 $x(n)$ が室内伝搬経路を経て観測されるものと仮定する。人の活動を検知するためのモニタリングシステムではこのガス発生源の濃度変化 $x(n)$ 、すなわちガス発生情報を抽出することが重要である。本論文ではセンサ観測信号 $y(n)$ から、このガス発生情報を抽出し、人の活動検知の可能性を検討するものである。

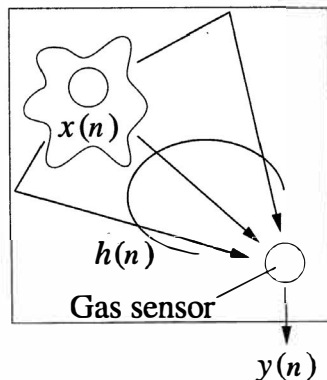


図 1 室内空間におけるガス発生とガスセンサ配置モデル図

Fig. 1 A gas source location and propagation to a gas sensor in an indoor space.

室内におけるガスの伝達系を線形システムとすればセンサ観測信号は、伝達系のインパルス応答とガス濃度変化信号の畳込み演算で書き表される。すなわち、センサ観測信号 $y(n)$ はガス発生源からセンサに至る伝搬路のインパルス応答を $h(n)$ とし、

$$y(n) = \sum_{k=0}^N x(k)h(n-k) = x(n) * h(n) \quad (1)$$

(*: convolution)

と表される。

本論文では、入力信号 $x(n)$ を、時間的な濃度変化に現れるガス発生量を表す信号として、事象信号と定義する。式 (1) は、周波数領域では

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

と表される。但し、 $\omega = 2\pi f$ (rad/s)、 f は周波数 (Hz) である。従って、事象信号スペクトル $X(\omega)$ は

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

と記述できる。

伝達関数の逆フィルタ $H^{-1}(\omega)$ を推定し、センサ観測信号 $y(n)$ から伝搬路のインパルス応答 $h(n)$ の影響を取り除けば、観測信号から室内ガス残留成分の影響が軽減され、ガス発生事象信号 $x(n)$ が推定できる。例えば、図 2 (a) のようにガス発生源からガスを発生させると、図 2 (b) のような観測信号が得られる。発生間隔が室内におけるガス残留時間 (residual

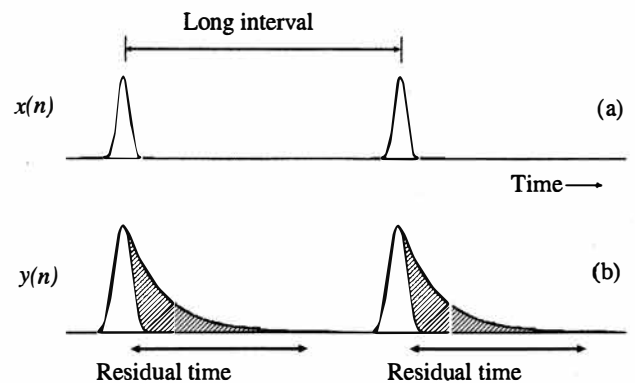


図 2 発生間隔の長いガス発生事象とセンサ観測信号 (a) 原信号 $x(n)$, (b) 観測信号 $y(n)$

Fig. 2 A source signal model for gas switching events with a long interval and sensor responses. (a) Gas source events $x(n)$, (b) sensor responses $y(n)$.

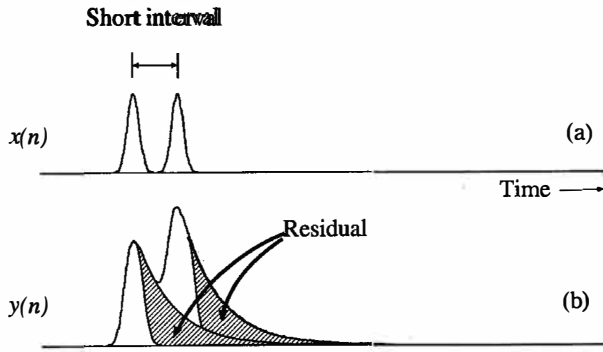


図3 発生間隔の短いガス発生事象とセンサ観測信号
(a)原信号 $x(n)$, (b)観測信号 $y(n)$

Fig.3 A source signal model for gas switching events with a short interval and sensor response. (a) Source events $x(n)$, (b) sensor responses $y(n)$.

time) より十分長ければ、発生時間を検知することは容易である。しかし図 3(a) のようにガス発生間隔が短ければ図 3(b) のように過去に発生したガス残留成分 (residual) を示すセンサ応答に事象信号が埋もれ、発生時間を検知することは難しい。そこで本論文では、ガス濃度変化に起因する事象信号の復元を試みる。

2.2 伝達系の特徴

式 (1) のインパルス応答 $h(n)$ にはガス伝搬に起因する $h_r(n)$ と、センサ自体のインパルス応答に起因する $h_s(n)$ が畳み込まれている。すなわち、インパルス応答は

$$h(n) = h_r(n) * h_s(n) \quad (4)$$

と表される。一般にセンサ自体のインパルス応答は短く、約 2~5 秒程度でほぼ反応前のセンサ出力値に減衰する。ガスの伝搬路のインパルス応答は、センサ応答に比べれば、一般に十分長い。本論文では、センサ自体のインパルス応答が短くガス伝搬に対するインパルス応答を式 (1) のインパルス応答それ自身とみなした。すなわち、

$$h(n) \approx h_r(n) \quad (5)$$

と近似する。

そこで、ガス伝搬路のインパルス応答の再現性 (時不変性)、線形性、ならびに最小位相性を調べるため以下に述べる実験を行った [6]。時不変性、線形性を調べる実験は式 (1) の線形システム近似を定量的に評価するためのものである。また、最小位相性を調べる実験は後述するケプストラム処理での仮定を検証するものである。

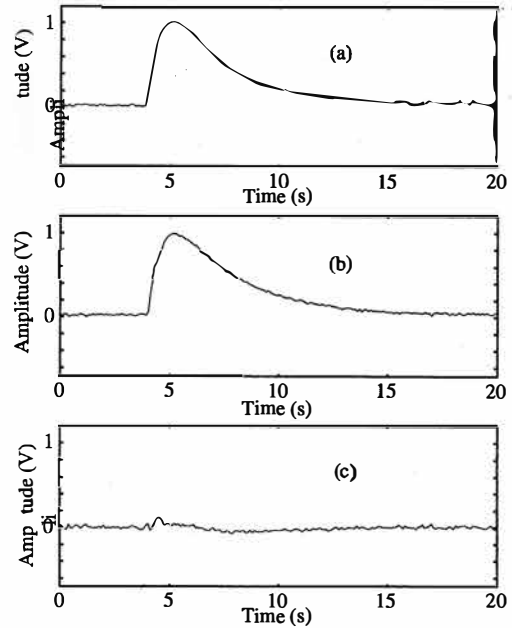


図4 定常時 (無風状態) のガスセンサ観測波形と応答の時不変性 (a) 1 回目の測定波形, (b) 2 回目の測定波形 (2 分後), (c) 応答の時間変化成分 (a)-(b)

Fig.4 Measured sensor responses with two minutes time interval in an indoor space (a) first, (b) two minutes later) and temporal variations of responses without air winds (c).

図 4, 図 5 はインパルス応答の時不変性を調べた結果の例である。図 4(a) は無風状態 (以下、定常時と略す) でガスセンサにフィガロ技研 TGS800, ガスの発生源にエタノールスプレーを用いてパルス的にガスを発生させたとき (約 1 秒間) の応答例である。本実験で用いるガスセンサはエタノールに高い感度を有する。ガス発生源とセンサの間隔は約 1m である。ガスが発生しないときのセンサ観測値を 0V とした。図 4(b) は (a) から 2 分後に再びガスを同様に発生させて測定したセンサ応答, 図 4(c) は図 4(a) と (b) の間の時間変動である。変動評価指標を

$$E = \frac{\sum_{k=0}^N e(k)^2}{\sum_{k=0}^N h(k)^2} = \frac{\sum_{k=0}^N \{h_1(k) - h_2(k)\}^2}{\sum_{k=0}^N h_1(k)^2} \quad (6)$$

としたとき、時間変動は 0.6% ($E \times 100$) であった。但し、 N は測定時系列データのサンプル数である。

同様に、図 5 は室内でエアコンを稼働させ人工的に気流を乱した (風速約 0.2 m/s) ときの 2 回の測定例である (以下、非定常時と略す)。気流の揺らぎのため、

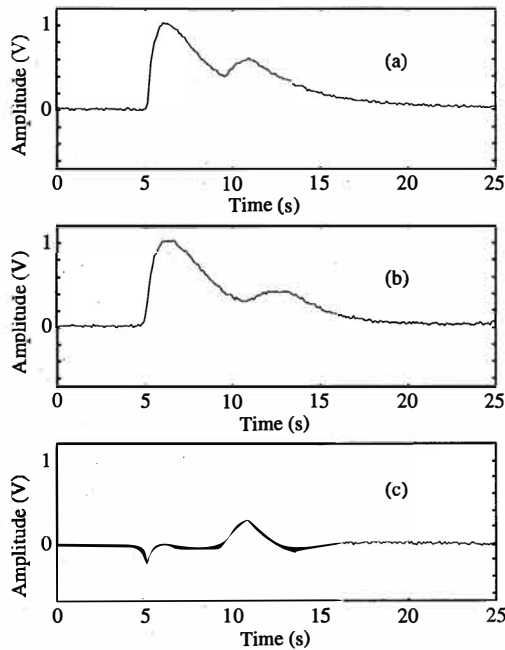


図5 非定常時のガスセンサ観測波形と応答の時不変性 (a) 1回目の測定波形, (b) 2回目の測定波形 (2分後), (c) 応答の時間変化成分 (a)-(b)

Fig.5 Measured sensor responses with two minutes time interval in the indoor space ((a) first, (b) two minutes later) and temporal variations of responses with air flow of 2 m/s (c).

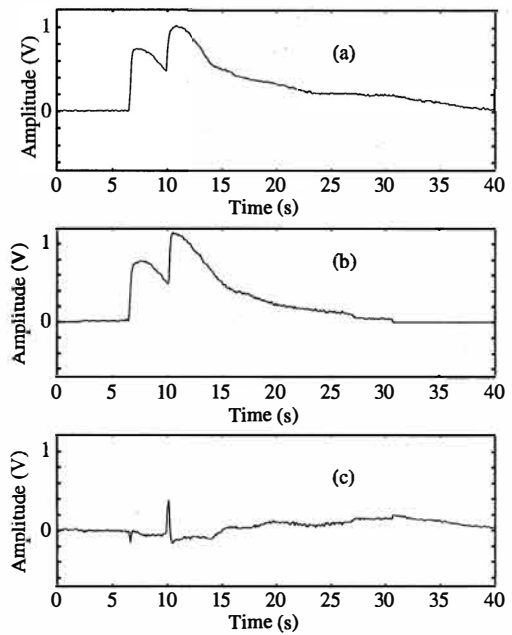


図6 ガス応答波形と畳込みによる応答波形 (a) 測定波形, (b) 図4(a)のインパルス応答による推定波形, (c) 誤差波形

Fig.6 Sensor response estimation by the linear convolution. (a) Measured response, (b) estimated wave by the linear convolution using Eq. (7) and the impulse response $h(n)$ shown in Fig. 4, (c) error wave.

波形後方ではセンサ観測信号の変動は増大したが、変動の大きさは全体で約 3.5%であった。定常、非定常時でそれぞれ同様な実験を 3 回測定した結果、センサ観測信号の時間変動はそれぞれ 2%と 6%程度であり、数分程度の時間範囲であればインパルス応答は時不変性を満足するとみなすことができる。

図 6 は伝搬路とセンサ観測信号の線形性を調べた結果である。ガス発生量に対するセンサ観測信号の特性 (センサ出力電圧) は、ガスが高濃度になると飽和してしまうため線形ではないが、低濃度では線形近似できる [9]。図 6 (a) は定常時においてパルス的にほぼ同量のガスを 3 秒間隔で 2 回発生させたときのセンサ観測信号の例である。図 6 (b) は図 4 (a) のパルス応答 $h(n)$ を用いて図 6 (a) の波形 $y(n)$ を

$$\hat{y}(n) = h(n) * \{\delta(n) + \delta(n - \tau)\} \quad (7)$$

により推定したものである。但し、 $\delta(n)$ は $n = 0$ のとき 1 で、それ以外は 0 である。 τ は時間遅れでガス発生時間間隔を表し、ここでは τ は 3 秒に対応する時系列番号である。図 6 (c) の誤差 $y(n) - \hat{y}(n)$ の大きさは、真の波形 $y(n)$ の大きさに比べて約 6%である。

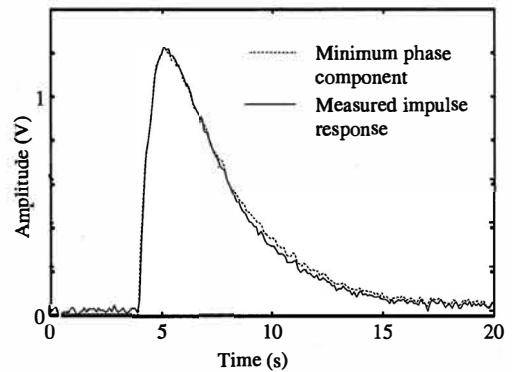


図7 伝達系のインパルス応答とその最小位相成分
Fig.7 Minimum phase component of the impulse response from the gas source to the sensor in the space.

これらの結果から筆者らは、伝達系を時不変とし、ガスセンサ観測信号を線形システムの応答信号として近似することとした。

図 7 は、定常時 (無風状態) のインパルス応答とその最小位相成分抽出波形 (付録参照) である [10]~[13]。最小位相とは時間遅れがない信号で位相回りが最小になるため、最小位相成分のみで構成されている波形は前方に波形のエネルギーが集中する特性を有す

る。図 7 の実線で示す両波形はほぼ一致しており、伝達系は最小位相特性とみなすこととした。

2.3 事象信号の特徴

長時間にわたってセンサから観測される事象信号は朝食や夕食などの習慣的な行動によるため、その周期は長い。しかし広域的な習慣的な行動を除けば事象信号は日周行動に依存せず周期性が低下すると考えられる。従って本論文では、局所的なガス発生事象信号 $x(n)$ は非周期的であると仮定した。

3. ケプストラムによる伝達系の分離

3.1 ケプストラム領域における伝達系の特徴

本論文では、伝搬路特性を測定することなく、センサ観測信号からガスの伝搬路特性と事象信号を分離するため複素ケプストラムを用いる [10]~[13]。複素ケプストラムは対数スペクトルの逆フーリエ変換によって求められる。式 (2) よりセンサ観測信号の複素ケプストラムを求めると

$$\begin{aligned} & \mathcal{F}^{-1}\{\ln Y(\omega)\} \\ &= \mathcal{F}^{-1}\{\ln X(\omega) + \ln H(\omega)\} \\ &= \mathcal{F}^{-1}\{\ln X(\omega)\} + \mathcal{F}^{-1}\{\ln H(\omega)\} \quad (8) \\ & \mathcal{F}^{-1}\{*\}: \text{Inverse Fourier Transform} \end{aligned}$$

となり、センサ観測信号のケプストラムは事象信号と伝達関数の各ケプストラムの和となる。右辺第 1 項は事象信号のケプストラムであり、第 2 項は伝達関数のケプストラムである。

実の時間関数の複素ケプストラムは実関数となる。図 8 にケプストラム分析結果の模式図を示す。日常の習慣に伴って長い周期をもつ事象信号成分のケプストラムは周期的に分布する (図 8(a))。しかし局所的な事象信号変化を表す不規則成分はロータイムからハイタイムに広く小さな値で分布する (図 8(b))。ここでは、ケプストラム領域の原点近傍をロータイム、それ以外をハイタイムと呼ぶことにする。一方、ガス伝達系インパルス応答の継続時間 (室内ガス残留時間) は習慣に伴う周期より短く、伝達関数のケプストラムは主としてロータイムに存在する (図 8(c))。従って、ガスセンサ観測信号 (図 8(d)) のケプストラムのロータイム部を取り除くことによって、伝達関数と事象信号の分離が期待できる。

3.2 最小位相ケプストラム処理

センサ観測信号は一般に非最小位相特性を有する。そのためセンサ観測信号 $Y(\omega)$ は、

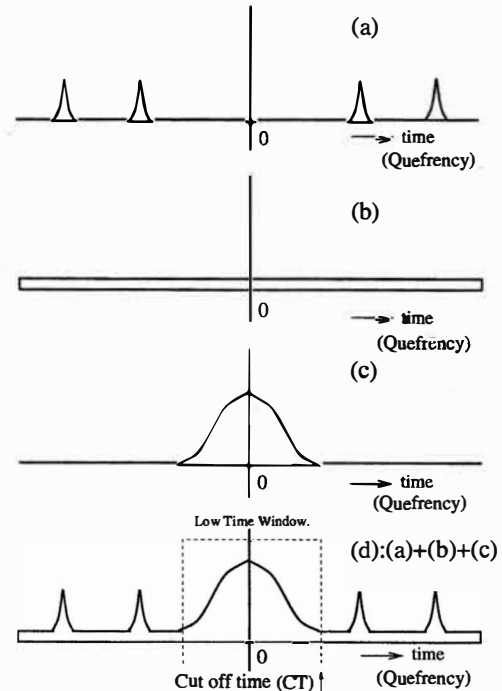


図 8 事象信号と伝搬路特性の複素ケプストラム分布概念図 (a) 事象信号の長周期的成分, (b) 事象信号の非周期成分, (c) 伝達関数, (d) ガスセンサ観測信号

Fig. 8 A schematic model of complex cepstrum distributions for source events and the transfer function. (a) Periodic components of source events, (b) random source events, (c) transfer function, (d) gas sensor response.

$$Y(\omega) = Y_{\min}(\omega)Y_{\text{ap}}(\omega) \quad (9)$$

のように最小位相成分と非最小位相成分 (all-pass 成分) の積で表すことができる。ここで、 Y_{\min} は最小位相成分を表し、 Y_{ap} は all-pass 成分を表す。すなわち、ケプストラムは最小位相と all-pass 成分のそれぞれのケプストラムの和として

$$\begin{aligned} & \mathcal{F}^{-1}\{\ln Y(\omega)\} \\ &= \mathcal{F}^{-1}\{\ln Y_{\min}(\omega)\} + \mathcal{F}^{-1}\{\ln Y_{\text{ap}}(\omega)\} \quad (10) \end{aligned}$$

$$\text{但し、}|Y_{\text{ap}}(\omega)| = 1$$

と表される。

伝達関数が図 7 に示したように最小位相成分だけからなると仮定する。その結果、センサ観測信号から観測されるケプストラムの all-pass 成分は、伝達関数ではなく事象信号のみに起因するものである。従って、図 7 に示すように観測したセンサ観測信号のケプストラムの最小位相成分のみに伝達系情報が含まれ、最小位相ケプストラムのロータイムウィンドウ処理から最小位相伝達関数で表される伝搬路特性の特徴が抽出さ

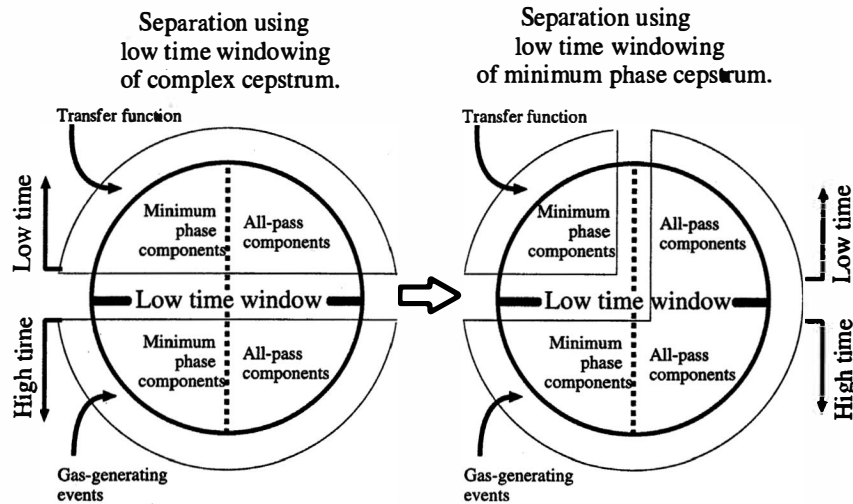


図9 最小位相特性を有する伝搬路特性を抽出するケプストラムロータイムウィンドウ処理
 Fig.9 Low time windowing in the complex cepstrum domain for estimating the minimum phase transfer function.

れる。反対に、センサ観測信号のケプストラムから最小位相ケプストラムを抽出し、そのロータイム成分を削除することによって、事象信号を復元できる。すなわち、抽出事象信号 $\hat{X}(\omega)$ のケプストラムは

$$\mathcal{F}^{-1}\{\ln \hat{X}(\omega)\} = \mathcal{F}^{-1}\{\ln Y(\omega)\} - w(n)\mathcal{F}^{-1}\{\ln Y_{\min}(\omega)\} \quad (11)$$

$$\text{但し, } w(n) = \begin{cases} 1 & n \leq c \\ 0 & n > c \end{cases}$$

で表される。右辺第1項は観測信号のケプストラム、第2項は窓関数 $w(n)$ を乗じた最小位相ケプストラム、 c はカットオフタイム (CT) に対応する時系列番号である。本論文では、式(11)による事象信号抽出手法を最小位相ケプストラムのロータイムウィンドウ処理と呼ぶことにする。図9に3.1で示した複素ケプストラムのロータイムウィンドウ処理と本最小位相ケプストラムのロータイムウィンドウ処理の概略図を示す。図7に示したようにガスの伝搬路特性はほぼ最小位相特性を有する。従って、複素ケプストラムのロータイム部の all-pass 成分はガス発生事象に起因するものであると考えられる。本最小位相ケプストラムのロータイムウィンドウ処理では、より正確にガス発生事象を回復するため、ロータイム部の all-pass 成分をガス発生事象信号のケプストラムの一部とみなし、ガス伝搬路特性とガス発生事象信号をそれぞれ分離して推定することができる。ガスセンサ観測波形からガス伝搬路特性を推定する本手法は、伝搬路のインパルス応答の測定

が必要なく、居室内における事象信号の抽出に有効性が期待できる。

4. パルス事象信号の復元

上記の最小位相ケプストラム処理により、パルスのなガス発生事象信号の回復を試みた。図10(a)はパルスのなガス発生事象信号の観測信号、図10(b)は図10(a)の最小位相ケプストラムである。図10(c), (d), (e)はそれぞれカットオフタイム (CT) 0.5秒, 2秒, 5秒のロータイムウィンドウ (方形窓) によって最小位相ケプストラムのロータイム領域を取り除いて復元したガス発生事象信号である。図10(b)よりわかるようにケプストラム上における伝搬路特性は、ロータイム部に集中する。図10(c)はカットオフタイムが短いため、十分に残留成分の影響を軽減できない。その結果、5~15秒の範囲で残留成分の影響が見受けられる。図10(d), (e)よりカットオフタイムが2秒程度で、センサ観測信号から残留成分の影響を軽減し、ガス発生事象を表すパルス情報が復元できることがわかる。

同様に、図11は周期的なパルス列で表される事象信号 (約2~3秒間隔でガスを発生させたもの) に対する復元例である。図10と同様に図11(a)はセンサ観測信号、図11(b)は図11(a)の最小位相ケプストラム、図11(c), (d), (e)はそれぞれカットオフタイムを0.5秒, 2秒, 5秒としたときの事象信号パルス列の復元例である。周期的な信号のケプストラムはやはり周期的となる。従って、図11(a)に示されるパルス列の周期性と同様に図11(b)のケプストラムに周期的なパルス

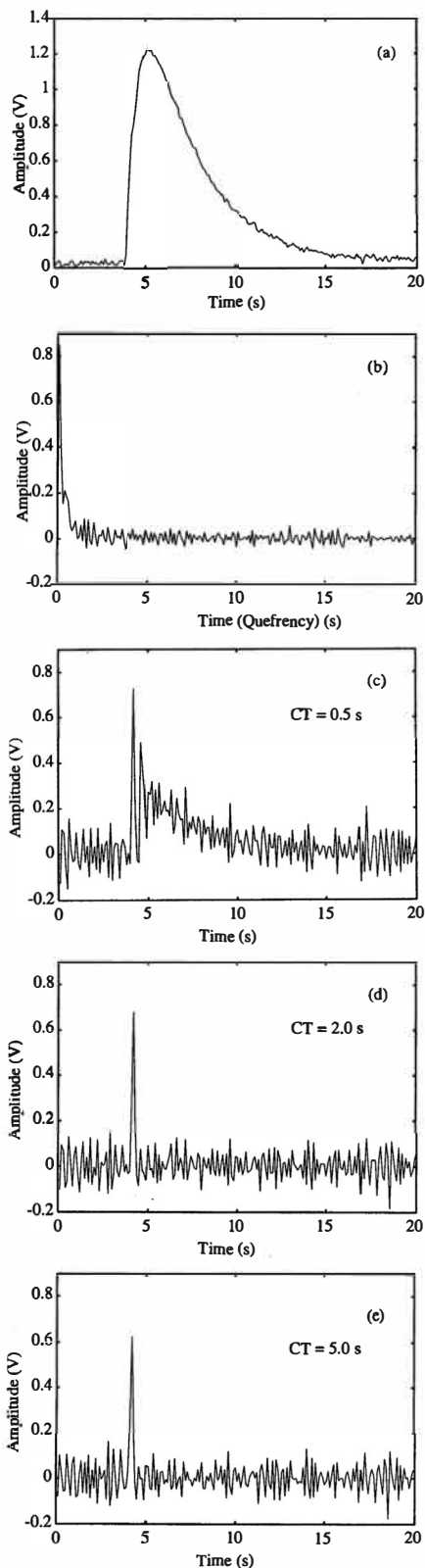


図 10 パルスのな事象信号の復元 (a) センサ観測信号, (b) センサ観測信号の最小位相ケプストラム, (c)~(e) 復元された事象信号

Fig. 10 Recovery of a pulse like source event waveform. (a) Measured sensor response, (b) minimum phase cepstrum of the measured response (a), (c)~(e) recovered source event.

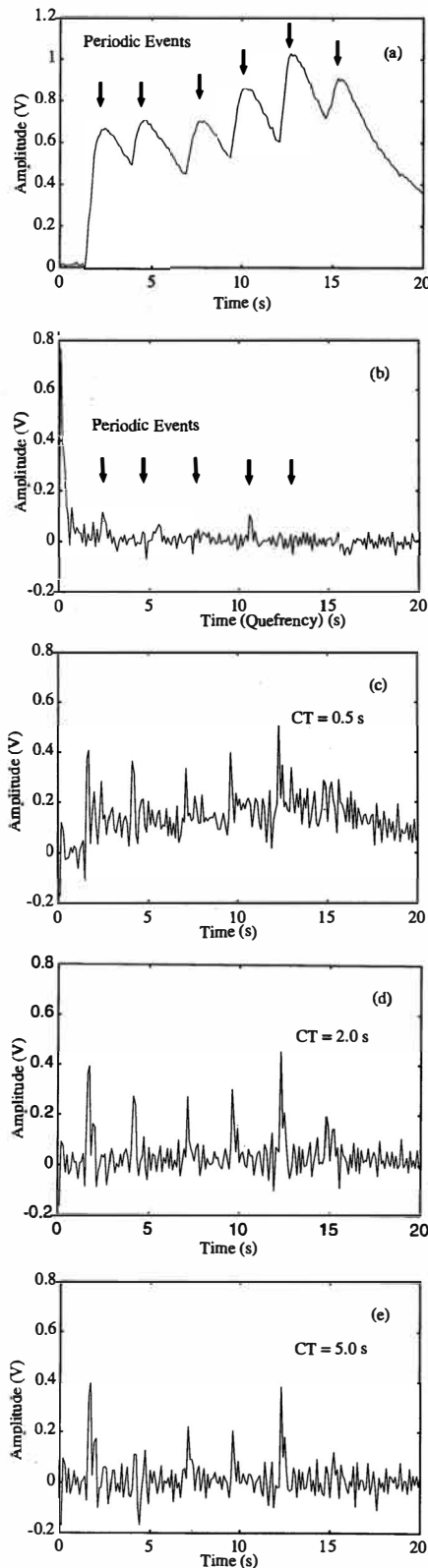


図 11 周期的事象信号パルス列の復元 (a) センサ観測信号, (b) センサ観測信号 (a) の最小位相ケプストラム, (c)~(e) 復元波形

Fig. 11 Periodic source events recovery of a periodic pulse train. (a) Sensor response, (b) minimum phase cepstrum of the response (a), (c)~(e) recovered source events train.

ス列が観測される。図 11 (d) は事象信号の周期性を表すパルス列の概略が復元されている。図 11 (c) はカットオフタイムが短いため、残留成分の影響が十分に軽減されていない。逆に図 11 (e) はカットオフタイムが長い場合、周期情報の一部が失われ事象信号パルス列の周期性を復元できない。

5. 室内における事象信号回復実験

5.1 事象信号の抽出

式 (11) に従って可燃性ガスセンサの観測信号から最小位相ケプストラムのロータイムウィンドウ処理によって伝達系と事象信号を分離することが期待できる。本論文で取り上げている事象信号とは、人の活動に起因するガス発生の特徴量である。本節では、ガスレンジ・石油ストーブ・トースタの点火や、食事の有無、換気扇の開閉等によって発生する信号を想定して実際の住宅内における事象信号抽出実験を試みることにした。可燃性ガスセンサの観測信号を測定した被験者宅の間取りを図 12 に示す。

図 13 (a) は 1 日分のセンサ観測信号の例である。図 13 (b) は図 13 (a) の最小位相ケプストラムである。図 13 (c) は図 13 (b) の最小位相ケプストラムの 40 分以前 (ロータイム部) から復元した伝搬路特性である。筆者らは最小位相ケプストラムの 40 分以前を主として伝搬路特性によるものと考えた。

図 14 (A) はケプストラム領域のロータイムウィンドウ処理によって 40 分以降を削除して、事象信号を抽出した例である。図 14 (A) (a) は夕食後 3 時間で図 12 に示した室内にて、観測したガスセンサ観測信号である。図中の指示時刻にそれぞれ石油ストーブ、ガスコンロ、トースターの電源を ON にし、数分後に OFF にした。図 14 (A) (b) はケプストラムのロータイム

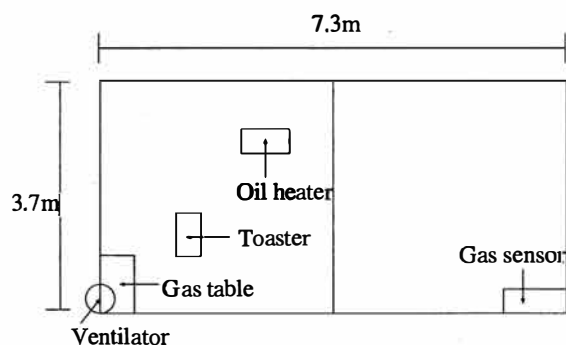


図 12 実験に用いた居室の間取り
Fig. 12 Layout of the indoor space where the experiment was conducted.

ムウィンドウイングによって伝達系の影響を軽減し、パルス事象信号を抽出した例である。復元信号からガス発生事象情報の概略が得られる。

同様に、図 14 (B) に朝食前後 3 時間のセンサ信号回復例を示す。測定したガスセンサの観測信号を図 14 (B) (a)、ガスセンサ観測信号から最小位相ケプストラムのロータイムウィンドウ処理によって抽出したガス発生事象信号を図 14 (B) (b) にそれぞれ示す。また、図 14 (B) において被験者が記録したガス発生事象要因を表 1 に示し、次節で考察する。

5.2 抽出したガス発生事象信号の検証

図 14 (B) (b) の抽出信号を検証するため、表 1 に示す事象から事象信号を推定した。石油ストーブ、ガスレンジ、換気扇の各稼動時間と図 14 (B) (b) の事象信号の関係を図 15 に示すようにモデル化した。それぞれの機器において、ガスの発生点とガスセンサの設置点

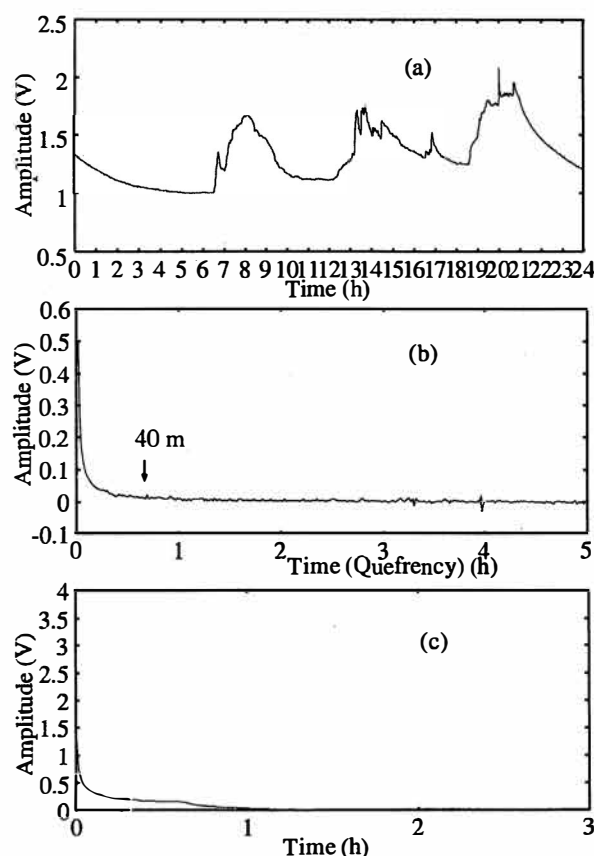


図 13 長時間ガスセンサ観測の例 (a) センサ観測信号, (b) 最小位相ケプストラム, (c) 伝搬路インパルス応答
Fig. 13 A long time record of the sensor response and its minimum phase cepstrum. (a) Sensor response record, (b) minimum phase cepstrum, (c) transfer function estimated by low timewindowing of the minimum phase cepstrum.

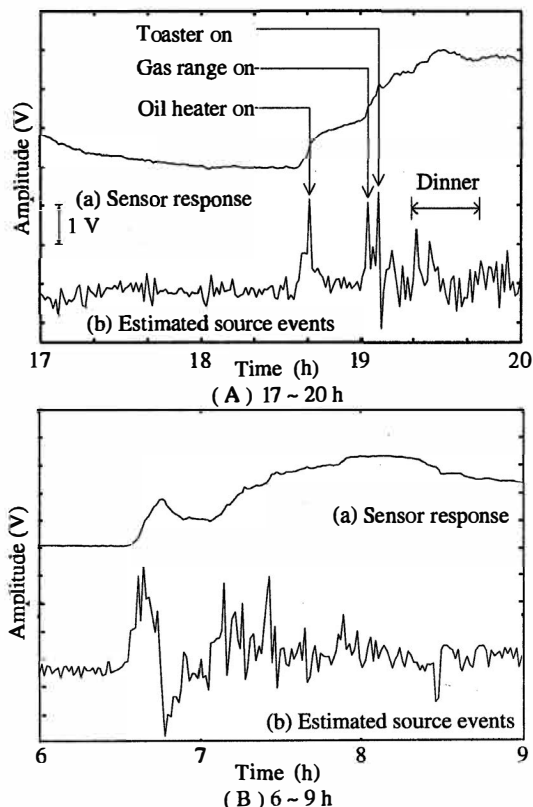


図 14 抽出されたガス発生事象信号例

Fig. 14 The sensor response (a) from which the source events are recovered (b) from the sensor response (a).

表 1 センサ応答の変動要因
Table 1 List of source events.

番号	時刻	行動名
1	6:30	石油ストーブ ON
2	35	ガスレンジ ON
3	46	換気扇 ON
4	48	ガスレンジ OFF, 食事(朝食)開始
5	50	ガスレンジ ON
6	56	ガスレンジ OFF
7	7:00	換気扇 OFF
8	06	ガスレンジ ON
9	09	ガスレンジ OFF
13	35	食事終了
14	8:10	石油ストーブ OFF

は固定されており、稼動時間内でほぼ一様にガスを発生すると考える。図 15(a) は表 1 から推定される石油ストーブの事象信号モデルである。センサ観測信号から稼動時間信号の振幅値 (Amplitude) を石油ストーブのみ稼動する時間帯で測定したセンサ観測信号の平均値 0.02 (V)、非稼動時間の振幅値を 0 (V) と推定した。石油ストーブと同様に平均値を用いて、ガスレンジ、換気扇に振幅値を定め、図 15(b) にガスレンジ、図 15(c) に換気扇の各稼動信号のモデルを示す。これ

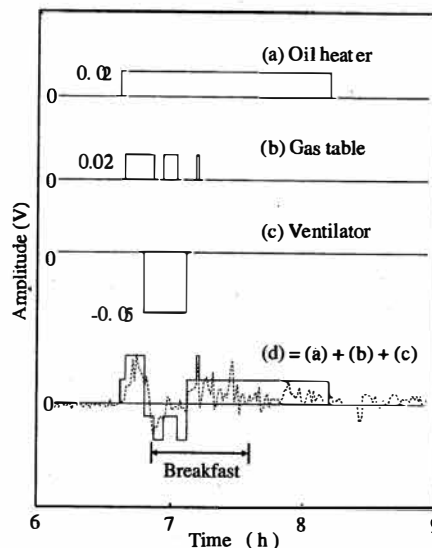


図 15 事象信号のモデルと復元されたガス発生事象信号の例

Fig. 15 Models of source events and recovered gas-generating source events.

ら三つの信号の和になる図 15(d) 実線に推定事象信号のモデルを示す。また、図 15(d) 点線に図 14(B)(b) の復元事象信号を図示した。但し、換気扇では、稼動時間が短く運転時より既に発生ガスの濃度が高いため、一定量の定常空気が室内に入ってくることによって事象信号に負の作用が働くと仮定した。表 1 から推定した事象信号モデル図 15(d) と抽出事象信号と図 14(B)(b) の概略が一致していることが確認できる。

ガスセンサ周辺ではほぼ無風状態であり、ガス発生情報とセンサ観測信号の関係は式 (1) の線形畳込みで近似できると考えた。微風状態の測定環境でも、既に筆者らはこれまでにその線形性を定量的に明らかにした [6]。しかし、風量が大きくなるにつれてその線形性は徐々に崩れ、復元された信号に除去できなかった残留成分の影響が現れることも明らかになっている [6]。また、各機器からセンサまでの伝搬路特性を最小位相ケプストラムのロータイムウィンドウ処理によって得られる一つの伝搬路特性でフィルタリングしているため、センサに至る各伝搬路特性の類似性が低下してしまうと、ガス発生機器の設置場所の違いによる影響が抽出信号に現れる。従って、図 15(d) の推定信号と抽出信号の細かな誤差はこの伝搬路の非線形な残留成分や各機器からの伝搬路特性の相違の影響であると考えられる。

5.3 伝搬路特性の検証

次に、伝搬路特性の線形性 (線形モデルの妥協性)

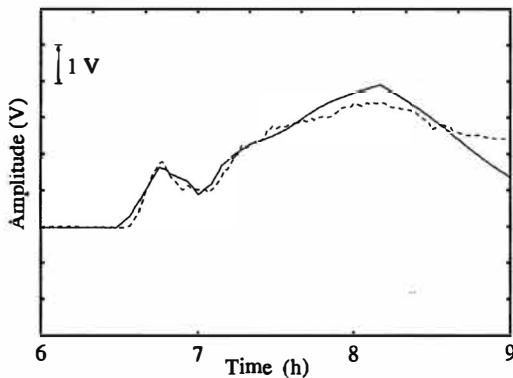


図 16 伝搬路インパルス応答の畳込みによるセンサ観測信号の推定

Fig. 16 Estimated sensor response by convolution of the impulse response shown in Fig. 13(c) and source events waveforms shown in Fig. 14(B)(a).

を実験環境下で検証するため、図 15(d) に示す推定事象信号からセンサ観測信号を推定した。図 16 の実線は、図 14(B)(a) に示されるセンサ観測信号 $y(n)$ を、図 13(c) に示される最小位相ケプストラムのロータイム部 (40 分以前) から推定した伝達系 $\hat{h}(n)$ と図 15(d) の推定事象信号 $\hat{x}(n)$ との畳込みによって、推定したものである。図 16 の点線に図 14(B)(a) を図示した。センサ観測信号の概略が復元されていることが確認できる。従って、図 16 においてセンサ観測信号をガス発生事象信号と伝搬路インパルス応答の畳込みでほぼ表現できることを実証することができた。

これまで、事象信号の間隔が十分長い場合には、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、ガス発生間隔が狭く信号が連続する場合には室内に残留するガスの影響によって、観測信号にガス発生情報が埋もれてしまう。図 14 では、伝達系の影響を取り除くことによりガス発生事象信号を、また図 15 では事象信号をモデル化することによってセンサ観測信号をそれぞれ推定することができた。室内ガスの残留成分のためこれまで検知できなかったガス発生事象信号から、人の行動検知の可能性が考えられる。

6. むすび

本論文では、線形システムによって室内空間のガスの伝搬をモデル化した。伝達系を測定することなく、ガスセンサ観測信号のケプストラム処理によって伝達系とガス発生に伴う事象信号を分離した。ガス伝達系の最小位相性を示し、最小位相ケプストラムのロータ

イムウィンドウ処理によってセンサ観測信号から過去に発生したガスの残留成分の影響を軽減した。その結果、周期的にガスを発生させたときセンサ観測信号からの事象信号抽出実験では残留成分の影響を軽減していたパルス的なガス発生情報が回復できた。一般室内における実測実験でも、おおむねガス発生に伴う事象信号がセンサ観測信号から回復された。信号回復によって抽出された事象信号はほぼ人の行動と対応し、本手法は人の活動検知、更にはモニタリングシステムへ応用することに対し有効性が期待できる。

謝辞 本研究に際し実験試料等を御提供頂いたフィガロ技研(株)松浦吉展氏に謝意を表す。また、実験に際し、お手伝い頂いた本学、山崎雅和君、小阪友裕君、古川真士君に御礼申し上げる。

文 献

- [1] T. Oyabu, H. Kimura, T. Nishikawa, and S. Ishizuka, "Indoor air-pollution detector using tin oxide gas sensor," Proceeding of the 4th Conference on Sensor Technology, vol.4, no.1, pp.173-178, 1993.
- [2] T. Oyabu, S. Hirobayashi, and H. Kimura, "The detection of gaseous indoor air pollutants using a multi-sensor system," Sensor and Materials, vol.9, no.3, pp.177-186, 1997.
- [3] T. Seiyama, A. Kato, K. Fujiishi, and M. Nagatani, "A new detector for gaseous components using semiconductive thin films," Anal. Chem., vol.34, pp.1502-1503, 1962.
- [4] T. Seiyama, "Chemical sensor-current state and future outlook," Chemical Sensor Technology, vol.1, pp.1-13, Kodansha Ltd and Elsevier, 1988.
- [5] 広林茂樹, 山崎雅和, 木村春彦, 大藪多可志, "ケプ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, CPM97-34, OME97-43, 1997.
- [6] 広林茂樹, 小阪友裕, 木村春彦, 大藪多可志, "ガスセンサ応答信号における流体伝達場の線形性," 電学論, vol.118-E, no.2, pp.106-112, Feb. 1998.
- [7] 木田重雄, "流体方程式の解き方入門," pp.66-96, 共立出版, 1994.
- [8] 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.
- [9] 山香英三, "ハイテクノロジー・センサ," 共立出版, pp.182-183, 1986.
- [10] A.V. Oppenheim, R.W. Schafer, and T.G. Stockham, Jr., "Nonlinear filtering of multiplied and convolved signals," Proc. IEEE, vol.56, pp.1264-1291, 1968.
- [11] M. Tohyama, R. Lyon, and T. Koike, "Pulse waveform recovery in a reverberant condition," J. Acoust. Soc. Am., vol.91, no.5, pp.2805-2812, 1992.
- [12] M. Tohyama, R. Lyon, and T. Koike, "Reverberant transfer functions and cepstrum dereverberation," J. Acoust. Soc. Am., vol.92, no.4, part 2 1pPA64, 1992.

[13] M. Tohyama, R. Lyon, and T. Koike, "Inverse filtering for reverberant transfer functions and cepstrum dereverberation," ICASSP '93, pp.157-160, 1993.

付 録

本論文では最小位相成分を取り出すために複素ケプストラム処理を用いた。複素ケプストラムは次式のよ
うに、

$$\begin{aligned} \mathcal{F}^{-1}\{\ln Y(\omega)\} &= \mathcal{F}^{-1}\{\ln |Y(\omega)|e^{j\phi(\omega)}\} \\ &= \mathcal{F}^{-1}\{\ln |Y(\omega)|\} + j\mathcal{F}^{-1}\{\phi(\omega)\} \end{aligned} \quad (A.1)$$

対数振幅スペクトル、位相スペクトルの各逆 Fourier 変換がそれぞれ実部、虚部になる。右辺第 1 項が振幅ケプストラム、第 2 項が位相ケプストラムである。振幅スペクトルは偶関数で、位相スペクトルは奇関数である。従って、両スペクトルの逆 Fourier 変換の和によって得られる複素ケプストラムは実関数となる。遅延を取り除いた最小位相成分 (minimum phase 成分) のみで構成される時間信号は因果関数となり、複素ケプストラムの負の時間軸の値は 0 になる。すなわち、正の時間軸のみに値が現れる。逆に、非最小位相成分 (all-pass 成分) は負の時間軸に現れる。図 A.1 のように複素ケプストラムを分解すると、最小位相ケプストラムは振幅ケプストラムで負の部分
を 0 とし、正の

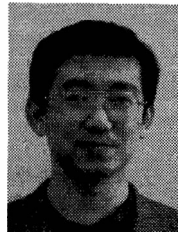
部分を 2 倍することによって求められる (原点 $t = 0$ は不変)。最小位相成分抽出波形はこの最小位相ケプストラムを時間領域に変換することで得られる。

(平成 9 年 11 月 21 日受付, 10 年 5 月 21 日再受付)



廣林 茂樹 (正員)

1994 工学院大学工学研究科修士課程了。1995 同大学院博士課程中退。同年 4 月金沢大学工学部助手。主として、音響波動・振動論、音響信号処理、音場制御、流体伝達系のモデル化に関する研究に従事 (工博)。計測自動制御学会、電気学会、米国音響学会、日本音響学会各会員。



木村 春彦 (正員)

1974 東京電機大・工・応用理化学卒。1979 東北大学工学研究科博士 (情報工学) 課程了。同年富士通 (株) 勤務。1980 金沢女子短期大学講師。1984 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度の研究に従事 (工博)。情報処理学会、人工知能学会各会員。



東山三樹夫 (正員)

1975 早大学院博士課程了。同年電電公社 (現、NTT) 入社。以来、音響振動、信号処理に関する研究に従事 (工博)。1993 工学院大学電子工学科 (情報工学コース) 教授。音響・音声・音楽情報処理とそのネットワーク応用に関する研究に従事。日本音響学会、米国音響学会、英国音響学会、米国オーディオ協会、IEEE 各会員。



大藪多可志 (正員)

1973 工学院大学工学研究科修士課程了。1975 早大・第二文学・英文学卒。1973 電気音響 (株) 技術研究所勤務。1980 金沢女子短期大学講師、助教授、教授、1991 富山国際大学人文学部社会学科助教授、教授。1998 金沢経済大学教授。ガスセンサシステムに関する研究に従事 (工博)。

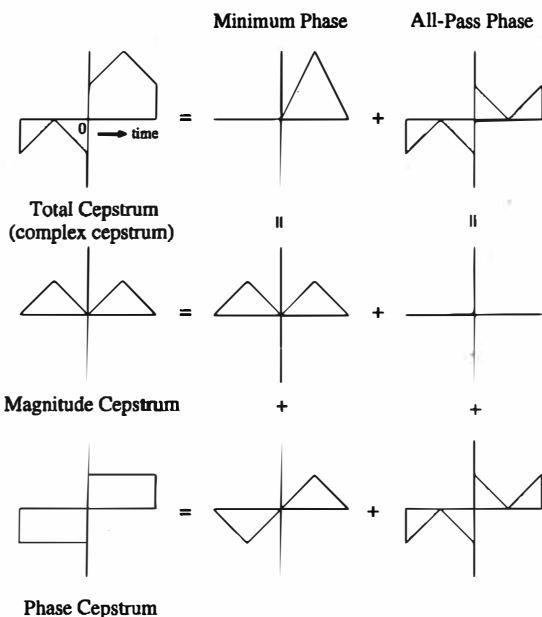


図 A.1 複素スペクトラムの分離

Fig.A.1 Separation of complex cepstrum.