

# 論文

## 自然観測フィルタによる時系列データの変曲点の検出

大久保 寛<sup>†a)</sup> 竹内 伸直<sup>†</sup>

Detection of Inflection Point of Time Series Data by Natural Observation Filter

Kan OKUBO<sup>†a)</sup> and Nobunao TAKEUCHI<sup>†</sup>

あらまし 自然環境で実際に観測される大気電気変動量などの電磁界信号の時間変動波形は非常に複雑である。これらの観測された波形の解析においては、時系列データの特徴を示す時間（例えば変曲点となる時間）を正確に決定することが重要となる場合がある。本論文では、モデル時系列データに自然観測法理論によるフィルタを適用することで明確に波形の変曲点を検出できることが示されている。また、信号に雑音が重畳した場合についても高い精度で変曲点を検出できることが報告されている。

キーワード デジタル信号処理, 自然観測法, 自然観測フィルタ, 変曲点

### 1. ま え が き

自然環境で実際に観測される大気電気変動量などの電磁界信号の時間変動波形は非常に複雑である。これらの観測された波形の解析においては、時系列データの特徴を示す時間（例えば変曲点となる時間）を正確に決定することが重要となる場合がある [1]~[9]。

そのような特徴を示す時間を検出する場合には、しばしばフィルタを設計し用いる [10]~[12]。すなわち、目的にあったフィルタを適用することで、観測した時系列データから特徴を示す時間が明確にわかるようなデータ列を構成するのである。フィルタを設計する際には、フィルタ特性としてカットオフ周波数及び窓関数等を決定し、それを基準としフィルタを設計する方法が一般的である。しかし、このように周波数特性に基づいて設計されるフィルタでは、時系列データの特徴を示す時間を正確に決定できない場合がある。特に、本研究で扱う変曲点についてはそのようなフィルタでは困難な場合がある。

そこで、本論文では変曲点の決定に自然観測法理論 [13]~[18] に基づいて設計された自然観測フィルタを用いる。自然観測法理論は、飯島泰蔵東工大名誉

教授により提唱されている波形の瞬時的な変化に着目した全く新しい波形解析法である。自然観測フィルタ [13], [14], [17] は、1 個の低域通過型フィルタ (LPF)、 $M-1$  個の帯域通過型フィルタ (BPF) 及び 1 個の高域通過型フィルタ (HPF) からなる  $M+1$  個のフィルタ群で構成されている。このフィルタは、周波数特性から設計を行う一般的なフィルタとは異なり、時系列データの各時刻における瞬時的な変化（微分）を用いて設計されたフィルタである。

自然観測フィルタは、波形の瞬時的な変化を検出する場合、非常に優れたフィルタであり多くの分野への応用が幅広く期待できる。しかし、提唱者である飯島らによって理論的な考察は十分行われているが、これまでに実際の波形への適用を行った報告はほとんどない。

本論文では、自然観測フィルタの具体的な適用例として、このフィルタ群の中の次数を  $m=1$  とした自然観測フィルタを用いることで、非常に高い精度で変曲点の検出を行うことができることを示す。

### 2. 自然観測法理論によるフィルタ

自然観測法理論は、近年、信号解析の新しい手法として飯島泰蔵東工大名誉教授により提唱されている波形の瞬時的な変化に着目した全く新しい波形解析法理論である。以下に概略を示す。

今、観測された任意の時系列データを  $f(n)$  としたとき、恒等作用素  $I$ 、遅延作用素  $D$  をそれぞれ以下

<sup>†</sup> 秋田県立大学システム科学技術学部, 本荘市

Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University, 84-4 Tsuchiya-Ebinokuchi, Honjo-shi, 015-0055 Japan

a) E-mail: kanne@akita-pu.ac.jp

のように定義する。

$$If(n) = f(n) \quad (1)$$

$$Df(n) = f(n-1) \quad (2)$$

ここで、これらの作用素を用いて

$$\Gamma = (1-\lambda)I + \lambda D \quad (3)$$

$$A = \lambda I - \lambda D \quad (4)$$

の二つの作用素をそれぞれ定義する。λ は  $0 < \lambda < 1$  を満たす重み係数である。ここで、 $M$  を位数、 $m$  を次数、 $A$  を  $m$  回作用させた作用素を  $A^m$  として、

$$X_m^{(M)} = \Gamma^{M-m} A^m \quad (m = 0, 1, \dots, M) \quad (5)$$

なる作用素を新たに考え、

$$n_m^{(M)}(n) = X_m^{(M)} f(n) \quad (6)$$

という新たな時系列を定義する。 $n_m^{(M)}(n)$  は時系列  $f(n)$  に対応する基本観測値と呼ばれる  $M$  位の時系列データとなり、時刻  $n$  における観測波形の瞬時的な変化を示したものである。

このように観測波形  $f(n)$  に作用させることで、観測波形の瞬時的な変化を示す時系列データ  $n_m^{(M)}(n)$  を与える  $X_m^{(M)}$  を  $M$  位の  $m$  次自然観測フィルタと呼ぶ。

ここで、時系列  $f(n)$  に対する 1 階差分を

$$\Delta f(n) = f(n) - f(n-1) \quad (7)$$

で定義するとともに、 $l$  階差分を

$$\Delta^l f(n) = \Delta\{\Delta^{l-1} f(n)\} \quad (8)$$

で定義する。すると、式 (6) は、式 (8) を用いて以下のように表せる。

$$n_m^{(M)}(n) = \sum_{l=m}^M (-1)^{l-m} \binom{M-m}{l-m} \lambda^l \Delta^l f(n) \quad (m = 0, 1, \dots, M) \quad (9)$$

すなわち、 $m$  次自然観測フィルタは  $m$  階差分値から  $M$  階差分値までの合成によって定義することができる。ここで、 $\binom{M-m}{l-m}$  は 2 項係数である。

このように自然観測フィルタは周波数特性から設計されるのではなく、観測波形のこう配から求められたフィルタといえよう。

以下に、式 (9) より得られる基本観測値の導出式を示す。

$$n_m^{(M)}(n) = \sum_{l=0}^M \binom{M}{l} (1-\lambda)^{M-l} \lambda^l \cdot \left\{ \left( \frac{\lambda}{1-\lambda} \right)^m k^{(M)}(m, l) \right\} f(n-l) \quad (m = 0, 1, \dots, M) \quad (10)$$

ただし、

$$k^{(M)}(m, l) = \frac{1}{\binom{M}{l}} \sum_{r=0}^l (-1)^r \binom{m}{r} \binom{M-m}{l-r} \left( \frac{1-\lambda}{\lambda} \right)^r \quad (m, l = 0, 1, \dots, M) \quad (11)$$

λ は  $0 < \lambda < 1$  を満たす係数であるが、標準値は  $1/2$  とされている [14]。

次に、 $n_m^{(M)}(n)$  及び  $f(n+1)$  から  $n_m^{(M)}(n+1)$  を求めるための導出式を式 (12) に示す。

$$n_m^{(M)}(n+1) = (1-\lambda)^{M-m} \lambda^m f(n+1) + n_m^{(M)}(n) - \sum_{p=0}^M n_p^{(M)}(n) R_m^{(M)}(p; \lambda) \quad (m = 0, 1, \dots, M) \quad (12)$$

ただし、

$$R_m^{(M)}(p; \lambda) = \sum_{r=0}^p \binom{M-r}{p-r} \frac{1}{\lambda^r} \cdot \lambda^m \left\{ (1-\lambda)^{M-m} - \sum_{s=0}^{r-m-1} (-1)^s \binom{M-m}{s} \lambda^s \right\} \quad (m, p = 0, 1, \dots, M) \quad (13)$$

ここで、 $M$ ,  $m$ ,  $\lambda$  は式 (10) の場合と同様である。式 (12) より、 $n_m^{(M)}(n+1)$  は時刻  $n$  における基本観測値  $n_m^{(M)}(n)$  と、新たに入力された  $f(n+1)$  によって確定することが可能である。また、ある時刻における基本観測値の導出の際にはその時刻から見て未来にあたる時刻のデータについては全く必要としないことがわかる。これは、自然観測フィルタによってリアルタ

イムの波形解析が可能であることを示している。

ところで、式 (6) は、逆に  $M$  位の時系列  $n_m^{(M)}(n)$  から

$$f(n) = \sum_{m=0}^M \binom{M}{m} n_m^{(M)}(n) \quad (14)$$

なる式によって、完全にもとの時系列  $f(n)$  に復元することができる。ここで、式 (6) 及び式 (14) は併せて自然観測変換と呼ばれている。

### 3. フィルタの設計

文献 [17] によれば、サンプリング周波数を  $f_s$  とすると、自然観測フィルタの振幅特性は式 (15) のように表される。ここで、 $\lambda$  は標準値の  $1/2$  としている。

$$\left| X_m^{(M)} \left( e^{j2\pi \frac{f}{f_s}} \right) \right| = \sqrt{\frac{\left\{ \tan^2 \left( \frac{\pi f}{f_s} \right) \right\}^m}{\left\{ 1 + \tan^2 \left( \frac{\pi f}{f_s} \right) \right\}^M}} \quad (15)$$

図 1 に、わかりやすい例として  $M = 10$  とした場合の式 (15) から求めたフィルタの振幅特性を示す。ただし、横軸はサンプリング周波数  $f_s$  で規格化した値とし、縦軸は 2 項係数による重み  $\sqrt{\binom{M}{m}}$  を乗じた値としている。

図 1 に示されるように、自然観測フィルタは自然観測法理論に基づいて設計された  $M+1$  個のフィルタ群であり、1 個の低域通過型フィルタ (LPF)、 $M-1$  個の帯域通過型フィルタ (BPF) 及び 1 個の高域通過型フィルタ (HPF) から構成されている。

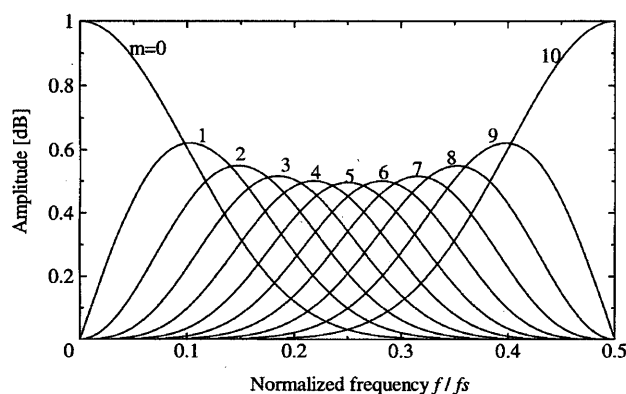


図 1 重み付き振幅特性

Fig. 1 Amplitude characteristic of natural observation filter.  $\left( \sqrt{\binom{10}{m}} \left| X_m^{(10)} \left( e^{j \frac{f}{f_s}} \right) \right| \right)$

本論文では、このフィルタ群から  $m = 1$  とした場合の 1 次自然観測フィルタについて検討を行う。以下では、変曲点の前後の波形変化を解析できるように位数は  $M = 200$  とする。図 2 に 200 位 1 次自然観測フィルタの振幅特性を示す。図より、直流分の全くない滑らかな周波数特性を有していることがわかる。ただし、このフィルタを適用する際、次の点に注意する必要がある。すなわち、図 2 に示されたフィルタはあくまでも自然観測法理論によって設計されたフィルタであり、周波数特性から設計されたものでないということである。

図 3 に比較するフィルタとしてハニング窓を用いた FIR 帯域通過型フィルタの振幅特性を示す。このフィルタは図 2 に示した自然観測フィルタと類似した振幅特性をもつように設計されたものである。すなわち、図 3 中のフィルタのカットオフ周波数  $f_c$  を 200 位 1 次

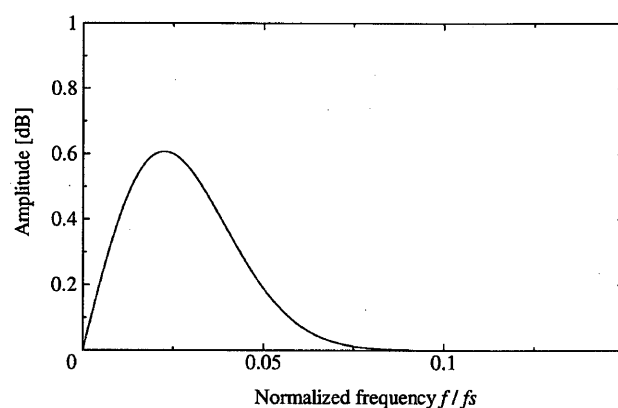


図 2 200 位 1 次自然観測フィルタの振幅特性  
Fig. 2 Amplitude characteristic of natural observation filter.  $\left( \sqrt{\binom{200}{1}} \left| X_1^{(200)} \left( e^{j \frac{f}{f_s}} \right) \right| \right)$

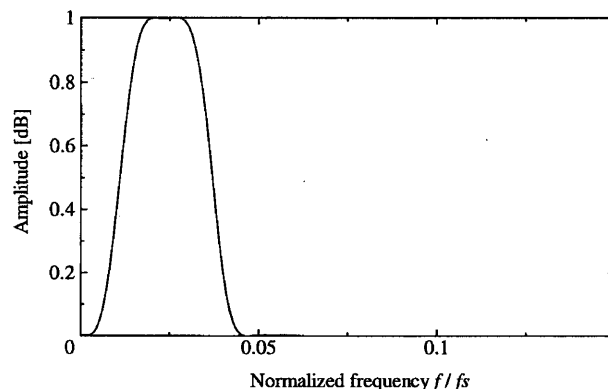


図 3 帯域フィルタの振幅特性

Fig. 3 Amplitude characteristic of BPF.  $(f_c/f_s = 0.011, 0.037)$

自然観測フィルタの振幅特性におけるピーク値のおよそ70% ( $1/\sqrt{2}$ ) となる周波数 ( $f_c/f_s = 0.011, 0.037$ ) として設計した。ここで、図2の自然観測フィルタと比較するために、BPFの次数は201としている。

#### 4. 変曲点をもつ時系列波形へのフィルタの適用

##### 4.1 変曲点をもつ時系列波形

変曲点とは、時系列データを  $f(t)$  としたとき、その微分である  $f'(t)$  が極値をとる点である。変曲点は、観測された時系列データの特徴を示す時間として利用価値が極めて高いと考えられる。なぜなら、時系列データを観測する場合、特にパルスのな過渡信号の波形においては、波形のピーク及び立上りがひずむことがしばしばあるが、変曲点はそのようなひずみの影響が非常に少ないためである。例えば、放電によって発生する過渡電磁界信号 [5], [6] においては、主放電の前に起こる予備放電（前駆放電）が発生する。したがって、放電時の電磁界波形を観測すると、主放電の波形の立上りにはそれらの前駆放電も同時に観測されるため、立上りの時間をはっきり特定することが困難となる場合がある。また、ピーク近傍では同時に細かい放電による信号も観測されるために、はっきりとしたピークを検出することが難しい場合がある。それに対して変曲点では、前駆放電による変動信号は既に減少しており、ピークの時間に比べて細かい信号は少ないために、波形の特徴的な時間として明確に検出できる可能性があると考えられる。

本論文では変曲点をもつデータ列として、

$$f(t) = \begin{cases} 0 & (t < 5) \\ 1 - e^{-(t-5)^2} & (5 \leq t) \end{cases} \quad (16)$$

で示される時系列データを用いる。この時系列データは、 $t = 5 + 1/\sqrt{2}$  において変曲点をもつ。ここで、式(16)をサンプリング時間 0.02 秒の離散データとして示すと、

$$f(n) = \begin{cases} 0 & (n < 250) \\ 1 - e^{-(n/50-5)^2} & (250 \leq n) \end{cases} \quad (17)$$

となる。図4に式(17)の波形を示す。以下の波形解析では式(17)に対してフィルタ処理を行うこととする。

##### 4.2 フィルタの適用

図5に、図4の波形に200位1次自然観測フィルタを適用した波形を示す。ただし、 $\lambda = 1/2$  としている。

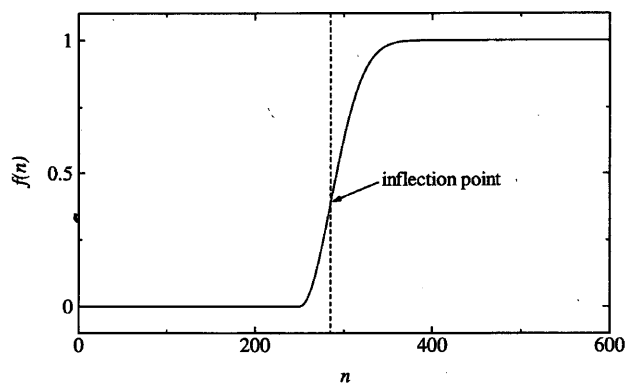


図4  $f(n)$  の波形  
Fig. 4 Waveform of  $f(n)$ .

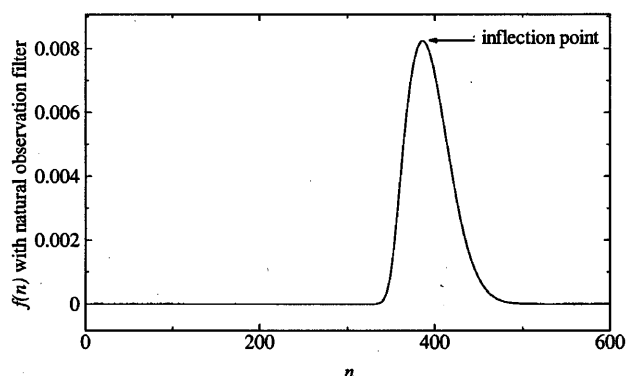


図5  $f(n)$  に200位1次自然観測フィルタを適用した波形  
Fig. 5 Waveform of  $f(n)$  with natural observation filter. ( $M = 200, m = 1$ )

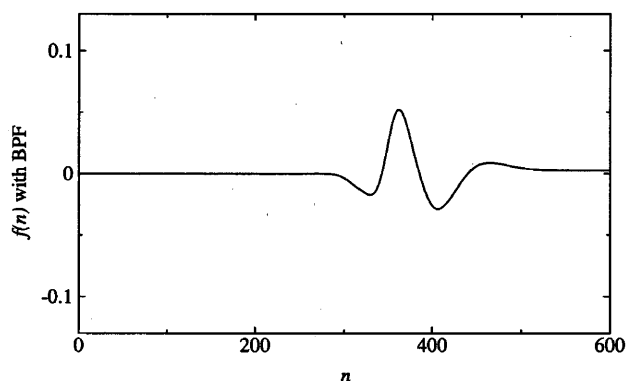


図6  $f(n)$  にBPFを適用した波形  
Fig. 6 Waveform of  $f(n)$  with BPF.  
( $f_c/f_s = 0.011, 0.037$ )

図6に、図4の波形にBPFを適用した波形を示す。ただし、使用したBPFは図3に示されたフィルタとする。図6におけるカットオフ周波数は  $f_c/f_s = 0.011, 0.037$  である。

これより、図5において出力波形のピークは原波形の変曲点となっており、200位1次自然観測フィルタ

を適用することで非常に明確に波形の変曲点を検出することが可能であることがわかる。ただし、重み係数  $\lambda$  によって波形に時間遅れが生じることが知られており、図 5 においては、 $\lambda = 1/2$  であるために、変曲点は右側に  $M/2 = 100$  だけシフトしている。

図 5 及び図 6 の結果より、類似した振幅特性をもつフィルタを使用したとしても、周波数領域で設計される BPF では変曲点は検出できず、自然観測フィルタを使用した場合にのみ、波形のピークで明確に変曲点を検出できることがわかった。

次に、波形に雑音を重畳した場合について自然観測フィルタを適用した結果を示す。雑音を重畳した信号として、式 (18) で表される波形を用いる。式 (18) は、式 (19) で表される乱数ノイズ  $r(n)$  と式 (17) で定めた  $f(n)$  を足し合わせたものである。ここで、 $Rand(n)$  は、0 から 1 までの実数をランダムに発生する関数である。したがって、 $r(n)$  は  $-0.1$  から  $+0.1$  までの乱数を与える関数となる。図 7 に式 (18) の波形を示す。

$$g(n) = f(n) + r(n) \quad (18)$$

$$r(n) = 0.2 * Rand(n) - 0.1 \quad (19)$$

図 8 に、図 7 の波形に対して 200 位 1 次自然観測フィルタを適用した波形を示す。図より、ノイズを含んだ波形に対しても明確に変曲点を検出できることがわかる。

図 9 に、図 7 の波形に対して図 3 に示された BPF を適用した波形を示す。雑音が重畳されない場合の結果 (図 6) と同様に変曲点を検出することはできない。

どの程度の雑音が重畳された場合、変曲点の検出が困難になるかを定量的に評価するのは、雑音の性質や振幅などによって異なるため容易ではない。ここでは式 (19) の雑音の振幅のみを変化させた場合の 1 例として、以下の式 (20) に示される  $h(n)$  に 1 次自然観測フィルタを適用した場合の結果を示す。図 10 及び図 11 にそれぞれ  $h(n)$  の波形及び  $h(n)$  に 1 次自然観測フィルタを適用した出力波形を示す。ここで  $M = 200$  及び  $\lambda = 1/2$  とし、 $h(n)$  の雑音の振幅は  $g(n)$  の雑音の振幅の 5 倍としている。

$$h(n) = f(n) + r'(n) \quad (20)$$

$$r'(n) = Rand(n) - 0.5 \quad (21)$$

この場合、変曲点近くに最大ピークが見られるがピークは変曲点の位置からずれており、雑音により変曲点の検出が困難となっていることがわかる。

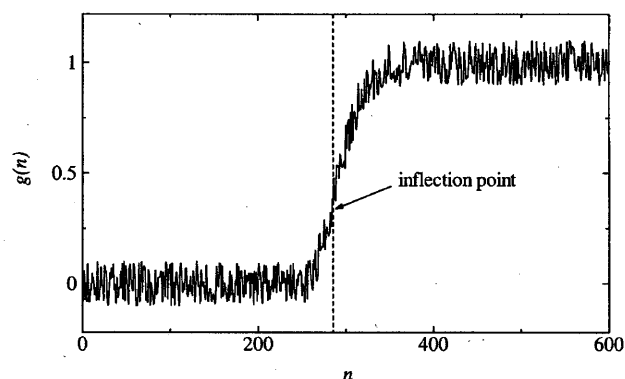


図 7  $g(n)$  の波形  
Fig. 7 Waveform of  $g(n)$ .

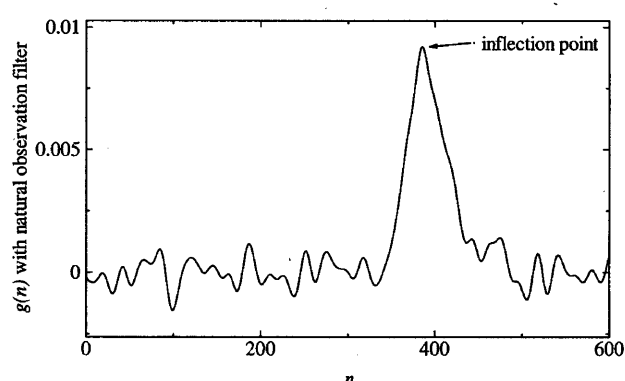


図 8  $g(n)$  に 200 位 1 次自然観測フィルタを適用した波形  
Fig. 8 Waveform of  $g(n)$  with natural observation filter. ( $M = 200, m = 1$ )

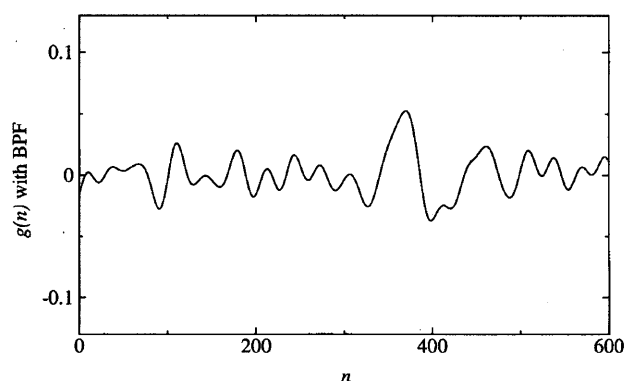


図 9  $g(n)$  に BPF を適用した波形  
Fig. 9 Waveform of  $g(n)$  with BPF.  
( $f_c/f_s = 0.011, 0.037$ )

## 5. 考 察

図 5 より、200 位 1 次自然観測フィルタを適用することで、出力波形のピークが原波形の変曲点を示すことがわかった。以下では、1 次自然観測フィルタについて考察を行う。

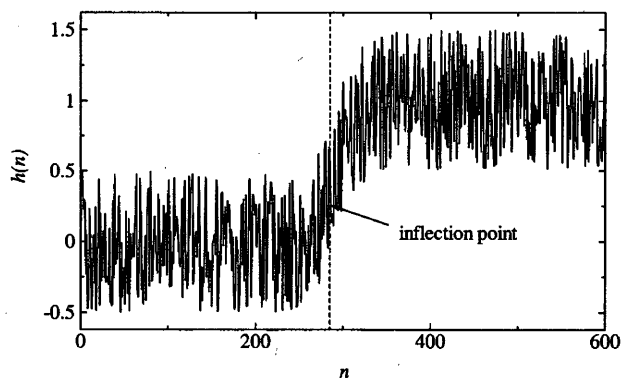


図 10  $h(n)$  の波形  
Fig. 10 Waveform of  $h(n)$ .

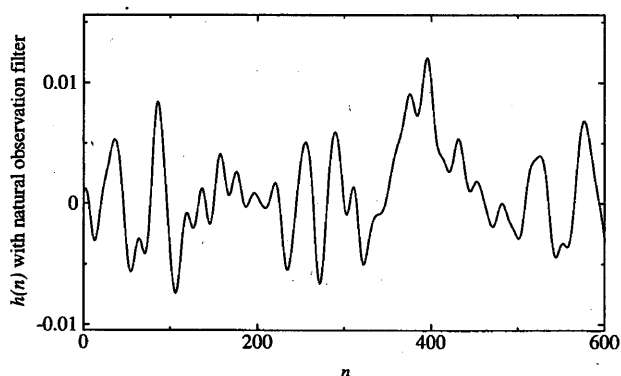


図 11  $h(n)$  に 200 位 1 次自然観測フィルタを適用した波形  
Fig. 11 Waveform of  $g(n)$  with natural observation filter. ( $M = 200, m = 1$ )

式 (3), 式 (4), 式 (5), 式 (6) 及び式 (7) より

$$\begin{aligned} n_1^{(M)}(n) &= \Gamma^{M-1} \Delta f(n) \\ &= \Gamma^{M-1} \lambda (I - D) f(n) \\ &= \lambda \Delta \Gamma^{M-1} f(n) \end{aligned} \quad (22)$$

式 (22) の右辺の  $\Gamma^{M-1} f(n)$  について,  $I$  は恒等作用素,  $D$  は遅延作用素であるから,  $\lambda = 1/2$  とすると,

$$\begin{aligned} \Gamma^{M-1} f(n) &= \left(\frac{1}{2}\right)^{M-1} (I + D)^{M-1} f(n) \\ &= \left(\frac{1}{2}\right)^{M-1} \sum_{l=0}^{M-1} \binom{M-1}{l} f(n-l) \end{aligned} \quad (23)$$

となる. よって, 式 (22) 及び式 (23) より  $n_1^{(M)}(n)$  は以下の式 (24) で示される. ただし,  $\lambda = 1/2$  とする.

$$n_1^{(M)}(n)$$

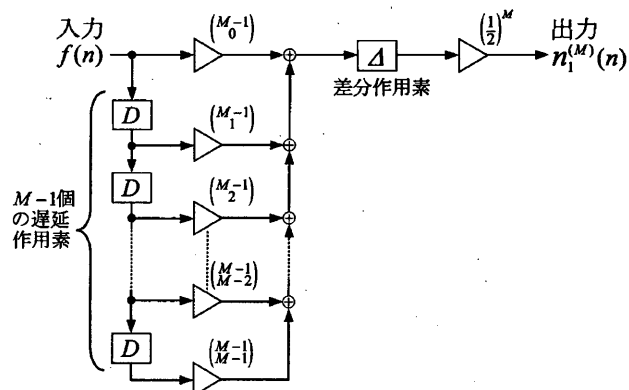


図 12  $M$  位 1 次自然観測フィルタのブロック図  
Fig. 12 Diagram of natural observation filter. ( $m = 1$ )

$$= \left(\frac{1}{2}\right)^M \Delta \sum_{l=0}^{M-1} \binom{M-1}{l} f(n-l) \quad (24)$$

ここで, 式 (23) の  $\sum_{l=0}^{M-1} \binom{M-1}{l} f(n-l)$  を作用素を用いて書き直すと,

$$\begin{aligned} \sum_{l=0}^{M-1} \binom{M-1}{l} f(n-l) &= \left[ \binom{M-1}{M-1} D^{M-1} + \binom{M-1}{M-2} D^{M-2} \right. \\ &\quad + \dots + \binom{M-1}{m} D^m + \dots \\ &\quad \left. + \binom{M-1}{1} D + \binom{M-1}{0} I \right] f(n) \end{aligned} \quad (25)$$

となる. 式 (25) は, 2 項係数による重みを付けた平均化操作を示している.

したがって, 式 (24) 及び式 (25) より次のことがいえる. 1 次自然観測フィルタの出力波形である基本観測値  $n_1^{(M)}(n)$  は, 原波形のある時刻  $n$  と過去の  $(M-1)$  個のデータに 2 項係数による重み付き平均化及び 1 階差分を行い,  $\left(\frac{1}{2}\right)^M$  を乗じた波形となっている. すなわち, 基本観測値 ( $m = 1$ ) のピークの時間は原波形の変曲点の時間を明確に検出できることになる [20].

図 12 に 1 次自然観測フィルタのブロック図を示す. ただし, 図中の  $D$  及び  $\Delta$  はそれぞれ遅延作用素及び差分作用素である.

図 8 において雑音を重畳した場合にも変曲点を検出できることを示したが, これは 2 項係数によって重み付き平均化を行うことで細かいノイズをある程度

減少させられるためであると考えられる。図 13 に、図 7 の波形に対して 1 階差分を行った出力波形を示す。図 13 より、雑音が重畳された場合には、単に原波形に差分を行ったとしても変曲点は検出できないことがわかる。すなわち、実際の観測波形にはある程度の雑音が重畳されていることが考えられるが、1 次自然観測フィルタはそのような信号波形に対して変曲点

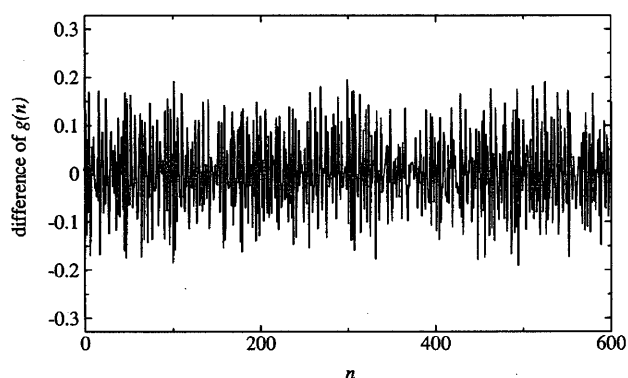


図 13  $g(n)$  を差分した波形  
Fig. 13 Difference waveform of  $g(n)$ .

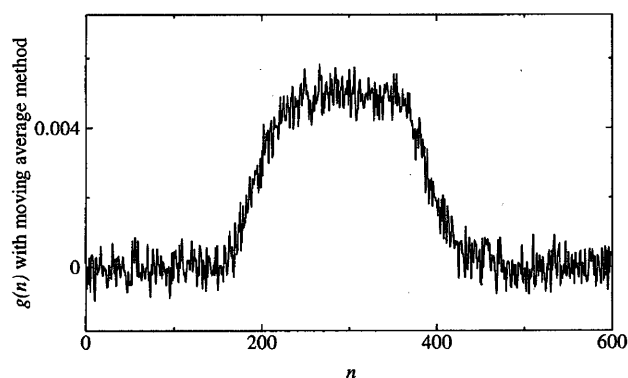


図 14  $g(n)$  に単純移動平均及び差分を適用した波形  
Fig. 14 Difference waveform of  $g(n)$  with moving average method.

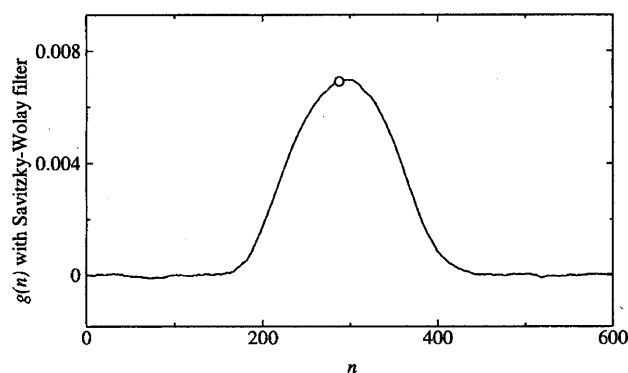


図 15  $g(n)$  に Savitzky-Golay 微分フィルタを適用した波形  
Fig. 15 Waveform of  $g(n)$  with Savitzky-Golay filter.

の検出する場合において非常に有効な手法となり得る。

変曲点を検出するためのフィルタの比較例を図 14 及び図 15 に示す。図 14 では  $g(n)$  に単純移動平均 [12], [21] した後差分フィルタを適用した結果を示す。ただし、平均化を行うためのデータ数は図 8 の結果と比較するために 201 としている。図 14 より、単純移動平均法では変曲点を検出することはできないことがわかる。図 15 では  $g(n)$  に Savitzky-Golay 法 [12], [22] による平滑化微分フィルタを適用した結果を示す。ただし、図 14 と同様に平均化を行うデータ数は 201 としている。図 15 より、Savitzky-Golay 法を適用した場合、図 8 に比べて変曲点を鋭いピークとして検出できない。変曲点近傍は緩やかな山型となっており、そのピークは正確な変曲点の時間（図中に  $\circ$  で示す）からずれている。

位数  $M$  を変えた場合の例として、図 16 及び図 17 に、それぞれ  $g(n)$  に 50 位 1 次自然観測フィルタ及

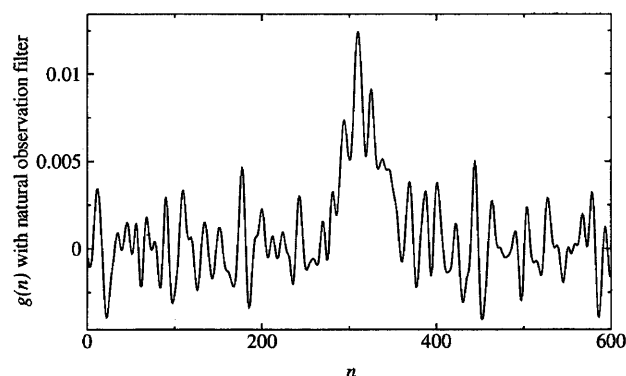


図 16  $g(n)$  に 50 位 1 次自然観測フィルタを適用した波形  
Fig. 16 Waveform of  $g(n)$  with natural observation filter. ( $M = 50, m = 1$ )

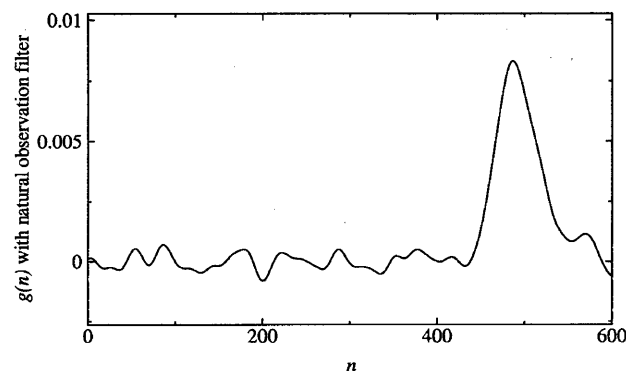


図 17  $g(n)$  に 400 位 1 次自然観測フィルタを適用した波形  
Fig. 17 Waveform of  $g(n)$  with natural observation filter. ( $M = 400, m = 1$ )

び 400 位 1 次自然観測フィルタを適用した結果を示す。ここで図 16 及び図 17 とともに  $\lambda = 1/2$  としているため、図 8 と同様に  $M/2$  の時間遅れが生じている。図 16 では変曲点近傍が最大ピークとなっているが、変曲点以外においても類似のピークが生じている。図 17 では、雑音が低減されピークは明確に確認できるが、図 8 に比べて変曲点前後が滑らかになり、変曲点を鋭いピークとして検出することができない。

これより、図 8、図 16 及び図 17 を比較すると、 $M = 200$  とした場合が  $f(n)$  の変曲点を最も明確に検出できていることがわかる。これまでの検討により、自然観測変換による波形解析において位数  $M$  は対象とするパルス幅程度とすると適当であることがわかってきている [19], [20]。しかし、対象とする波形によってはより適当な位数  $M$  が存在する可能性がある。また重み  $\lambda$  についても、本論文では標準値の  $1/2$  としたが、 $M$  と同様に適当な値が存在する可能性がある [14]。今後の課題として、実際の波形に自然観測法理論を適用する場合の最適なパラメータの決定法の検討が挙げられる。

## 6. む す び

本論文では、全く新しい波形解析法である自然観測法理論によるフィルタについて検討を行った。モデル信号波形に 1 次自然観測フィルタを適用し、その結果、以下の点を明らかにした。

(1) 波形に 1 次自然観測フィルタを適用することで、変曲点を明確に検出することができる。

(2) 雑音が重畳された場合も自然観測フィルタは適用可能である。

(3)  $\lambda = 1/2$  とした場合、 $M$  位 1 次自然観測フィルタの出力波形は、原波形中の  $M - 1$  個のデータに 2 項係数による重みをかけ平均化を行い、差分をとった波形となる。

自然観測法理論は数学的な理論により確立された波形解析法である。これまで本解析法を具体的に適用した報告はほとんど行われていないが、今後様々な分野において適用が行われると考えられる。例えば、放電による電磁界波形のような過渡信号の特徴的な時間を検出することは非常に重要な問題であり、その場合、自然観測法理論は非常に有効な解析法であると考えられる。

今後は、本論文の結果をもとに、自然観測フィルタを自然界における放電による電磁変動現象の解析及び

到来電磁波の推定に応用する予定である。

## 文 献

- [1] R. Reiter, Phenomena in Atmospheric Environmental Electricity, ELSEVIER, 1992.
- [2] M. Uman, Lightning, Dover Publications, 1969.
- [3] 北川信一郎, 河崎善一郎, 三浦和彦, 道本光一郎, 大気電気学, 東海大学出版会, 1996.
- [4] 竹内利雄, 雷放電現象, 名古屋大学出版会, 1987.
- [5] 赤尾保男, 環境電磁工学の基礎, 電子情報通信学会, 1991.
- [6] 日本大気電気学会, 大気電気学概論, コロナ社, 2003.
- [7] 竹内伸直, 中鉢憲賢, 成田憲一, 本間規泰, “地震波による地表面電位変動,” 電学論 (C), vol.116, no.12, pp.1414-1415, Dec. 1996.
- [8] 竹内伸直, 大久保寛, 佐藤 充, 本間規泰, 成田憲一, “仙台市郊外で発生した地震についての電磁変動観測,” 電学論 (C), vol.119, no.8/9, pp.979-984, Aug. 1999.
- [9] 竹内伸直, 大久保寛, 本間規泰, “地震波伝搬時の大気中平板電極の電位変動観測,” 電学論 (C), vol.120, no.10, pp.1409-1415, Oct. 2000.
- [10] 樋口龍雄, デジタル信号処理の基礎, 昭晃堂, 1986.
- [11] 金井 浩, 音・振動のスペクトル解析, コロナ社, 1999.
- [12] 南 茂夫, 科学計測のための波形データ処理, CQ 出版社, 1986.
- [13] 飯島泰蔵, 自然観測法の理論, 森北出版, 2000.
- [14] 飯島泰蔵, デジタル自然観測法, 森北出版, 2001.
- [15] 飯島泰蔵, “自然観測変換の基礎理論,” 信学論 (A), vol.J76-A, no.11, pp.1620-1626, Nov. 1993.
- [16] 飯島泰蔵, 岩城 護, “有限和によって波形を再構成できる自然観測法の基礎理論,” 信学論 (A), vol.J79-A, no.1, pp.77-87, Jan. 1996.
- [17] 岩城 護, 飯島泰蔵, “離散時間波形に対する自然観測法について,” 信学論 (A), vol.J79-A, no.3, pp.728-735, March 1996.
- [18] 飯島泰蔵, 岩城 護, “正規型自然観測変換の瞬時特性について,” 信学論 (A), vol.J81-A, no.11, pp.1575-1582, Nov. 1998.
- [19] 大久保寛, 竹内伸直, “自然観測法理論による微小変動信号の検出についての検討,” 電学論 (A), vol.123, no.7, pp.644-650, July 2003.
- [20] 大久保寛, 竹内伸直, “自然観測フィルタによる時系列データの解析,” 2003 信学総大, B-1-8, 2003.
- [21] 萩原幸男, 糸田千鶴, 地球システムのデータ解析, 朝倉書店, 2001.
- [22] A. Savitzky and M.J.E. Golay, “Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures,” Analytical Chemistry, vol.36, no.8, pp.1627-1639, 1964.

(平成 14 年 12 月 9 日受付, 15 年 6 月 5 日再受付,  
7 月 16 日最終原稿受付)





**大久保 寛 (正員)**

1999 東北大・工・電気卒. 2001 同大大学院工学研究科博士課程前期課程了. 同年秋田県立大学システム科学技術学部電子情報システム学科助手, 現在に至る. 現在, 自然界における電磁変動現象の信号解析・シミュレーションに関する研究に従事. 平

14 年度電気学会論文発表賞.



**竹内 伸直**

1965 東北大・工・電子卒. 1970 同大大学院工学研究科電気及び通信工学専攻博士課程単位修了. 同年東北大工学部助手. 同助教授を経て, 現在, 秋田県立大学システム科学技術学部教授. 工博. 地震, 雷の電磁変動量の計測とその信号解析の研究に従

事. 電気学会会員.