

## 研究速報

### 自然観測法理論による時系列データの屈折点の検出

大久保 寛<sup>†a)</sup> (正員)      竹内 伸直<sup>†</sup>

Detection of Reflection Point of Time Series Data by  
Theory of Natural Observation Method

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

<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 Prefec-  
tural University, 84-4 Tsuchiya-Ebinokuchi, Honjo-shi, 015-  
0055 Japan

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

あらまし 自然環境電磁界変動信号の観測波形解析においては、過渡的変動波形の開始時間やピーク時間などを決定する必要がある。本論文では、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屈折点を検出できることが示されている。

キーワード デジタル信号処理, 自然観測法, 基本観測フィルタ, 屈折点, 時系列データ

#### 1. まえがき

自然現象により発生する電磁界変動信号の観測波形は、発生機構の複雑性や観測対象以外から発生する信号が重畳し非常に複雑な波形となる。すなわち、信号に一定周期をもつような規則性はほとんど期待できず、雑音とみなされるような信号が重畳している場合がほとんどである。観測波形解析においては、このような波形から過渡的変動波形の開始時間やピーク時間などを決定する必要がある [1]~[7]。特に、ある現象の開始時間の決定や信号の到達時間差ではなく到達時間そのものを決定することが非常に重要となる場合がある。到達時間は、信号が 0 レベルから増加または減少し始める時間であるから、信号のこう配が不連続となる点である屈折点を決定すればよいことになる。そのような時間を検出する場合には、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分かるようなデータ列を構成し、特徴を示す時間を決定する方法がある [8]~[11]。

そのようなフィルタの選択方法としては、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選択する方法が一般的である。しかし、このような周波数特性から設計されたフィルタでは、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。更に、屈折点を検出する場合に、2 階差分を利用することが考えられるが、ノ

イズが重畳した場合には単に 2 階差分を行っても屈折点の検出は非常に困難である。

そこで、本論文では屈折点の決定に自然観測法理論 [12]~[17] に基づいて設計された基本観測フィルタを適用する。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) に着目した信号解析理論によって決定されたフィルタである。

筆者は、国内外を通して初めて自然環境電磁界変動信号への自然観測法理論による波形解析の適用例を報告した [18]。基本観測フィルタは、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、提唱者である飯島氏らによって理論的な考察は十分行われているが、実際の波形への適用例はあまり見られない。

本論文では、基本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  $m = 2$  とした基本観測フィルタをモデル波形へ適用することで、高い精度で屈折点の検出を行うことができることを明らかにする。また、実際の観測波形への適用例として、落雷による放射電界波形への適用結果を示す。

#### 2. 自然観測法理論

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新しい波形解析法理論である [12], [13]。文献 [12] において連続系の自然観測法が述べられており、文献 [13] では文献 [12] の内容を離散系に適用したデジタル自然観測法についての理論が展開されている。以下にデジタル自然観測法について概略を示す。

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。  $\lambda$  は  $0 < \lambda < 1$  を満たす重み係数であり、標準値は  $1/2$  とされている [13]。ここで、 $A$  を  $m$  回作用させた作用素を  $A^m$

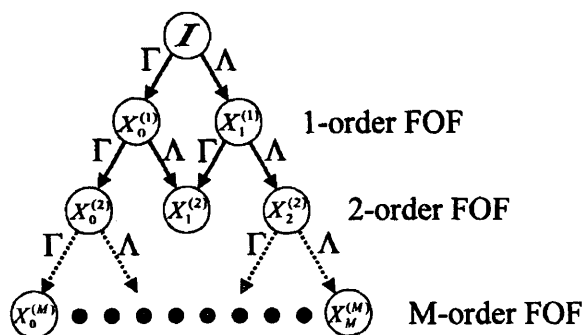


図1 基本観測フィルタ (FOF) のブロック図  
Fig.1 Diagram of fundamental observation filter (FOF).

として,

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

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データを定義する。ここで、 $M$  は位数、 $m$  は次数と呼ばれている [13]。  $n_m^{(M)}(n)$  は時系列データ  $f(n)$  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  $m$  次基本観測フィルタと呼ぶ。式 (5) から明らかなように、基本観測フィルタは  $\Gamma$  及び  $\Lambda$  の組合せによって構成されている。図 1 に基本観測フィルタのブロック図を示す。

また、式 (6) は、逆に  $M$  位の時系列データ  $n_m^{(M)}(n)$  から

$$f(n) = \sum_{m=0}^M \binom{M}{m} n_m^{(M)}(n) \quad (7)$$

なる式によって、完全にもとの時系列データ  $f(n)$  に復元することができる。ここで、式 (6) 及び式 (7) は併せて自然観測変換と呼ばれている。

### 3. 屈折点をもつ時系列波形へのフィルタの適用

#### 3.1 屈折点をもつ時系列波形

以下では、時系列データを  $f(t)$  としたとき、その微分である  $f'(t)$  が不連続な点を屈折点とする。すなわち、屈折点  $t_r$  は + 側からの微分  $f'_+(t_r)$  と - 側からの微分  $f'_-(t_r)$  が異なる点となる。屈折点は、観測された複雑な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。すなわち、時系列データを観測する場合、一定の傾きを有していた波形に異なる傾きの信号が観測される場合には、その信号の開始時間が屈折点となるからである。また、一過性の立上りの鋭いパルスの波形に対しては、波形の立上り点が屈折点となる可能性があり、その時刻を特定することでパルス波形の開始時間を決定できると考えられる。

本論文では屈折点をもつモデルデータ列として、

$$f(t) = \begin{cases} 1 & (t < 5) \\ 2t - 9 & (5 \leq t < 7) \\ t - 2 & (7 \leq t) \end{cases} \quad (8)$$

で示される時系列データを用いる。この時系列データは、 $t = 5, 7$  において屈折点をもつ。ここで、式 (8) をサンプリング時間 0.05 秒の離散データとして示すと、

$$f(n) = \begin{cases} 1 & (n < 100) \\ \frac{n}{10} - 9 & (100 \leq n < 140) \\ \frac{n}{20} - 2 & (140 \leq n) \end{cases} \quad (9)$$

となる。図 2 に式 (9) の波形を示す。以下の波形解析では式 (9) に対してフィルタ処理を行うこととする。

#### 3.2 フィルタの適用

時系列データに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分かるようなデータ列を構成し、特徴を示す時間を決定する方法がある。本論文では、基本観測フィルタを時系列データに適用する場合について検討する。ただし、式 (5) の基本観測フィルタ群から  $m = 2$  とした場合の 2 次基本観測フィルタに着目する。基本観測フィルタのパラメータとしては、次数  $m$  のほかに、位数  $M$  及び  $\lambda$  がある。 $M$  についてはパルス性信号の特徴を示す時間を解析する場合、対象とするパルスの幅程度とすると適当であることが分かってきている [18]~[20]。ここでは文献 [20] に従って位数を  $M = 100$  とする。すなわち、3.1 で与えられたモデルデータ列の屈折点の間隔は 40 点であるため、一つの屈折点をパルスの頂点とし、屈折点を検出するための適当な位数をパルス幅の 1.0~1.4 倍の範囲内で  $M = 100$  とした。また、重み係数は標準値の  $\lambda = 1/2$  とする。

このフィルタと比較するためのフィルタとしてハニソ

レター

グ窓を用いた FIR 帯域通過型フィルタ (以下 BPF) を用いる。このフィルタは基本観測フィルタ ( $M = 100$ ,  $m = 2$ ,  $\lambda = 1/2$ ) 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, BPF のカットオフ周波数  $f_c$  は 100 位 2 次基本観測フィルタの周波数特性 [13], [16] から ( $f_c/f_s = 0.028, 0.065$ ) として設計した。ただし,  $f_s$  はサンプリング周波数とする。ここで, 基本観測フィルタと対応させるために, BPF の次数は 101 としている。

図 3 に, 図 2 の波形に 100 位 2 次基本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 に, 図 2 の波形に BPF を適用した波形を示す。ただし, 使用した BPF は前述したフィルタとし, カットオフ周波数は  $f_c/f_s = 0.028, 0.065$  である。

これらの結果より, 図 3 において出力波形のピークは原波形の屈折点となっており, 100 位 2 次基本観測フィルタを適用することで非常に明確に波形の屈折点を検出することが可能であることが分かる。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 3 においては,  $\lambda = 1/2$  であるため, 屈折点は右側に  $M/2 = 50$  だけシフトしている。図 4 では, 原波形は屈折点前後で周波数の高い成分をもつ波形であるために, ピークが屈折点となっている。しかし, 屈折点の前後に逆の極性の振れが生じており, 図 3 と比べて屈折点を明確に示しているとはいえない。

次に, 波形に雑音を重畳した場合について基本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 (10) で表される波形を用いる。式 (10) は, 式 (11) で表される乱数ノイズ  $r(n)$  と式 (9) 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  $-0.25$  から  $+0.25$  までの乱数を与える関数となる。図 5 に波形を示す。

$$g(n) = f(n) + r(n) \quad (10)$$

$$r(n) = 0.5 * (Rand(n) - 0.5) \quad (11)$$

図 6 に, 図 5 の波形に対して 100 位 2 次基本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屈折点を検出できることが分かる。図 7 に, 図 5 の波形に対して BPF を適用した波形を示す。同図より明らかなように雑音が重畳された場合は屈折点を検出することはできない。

雑音が重畳された場合では, ほぼ同様の周波数特性

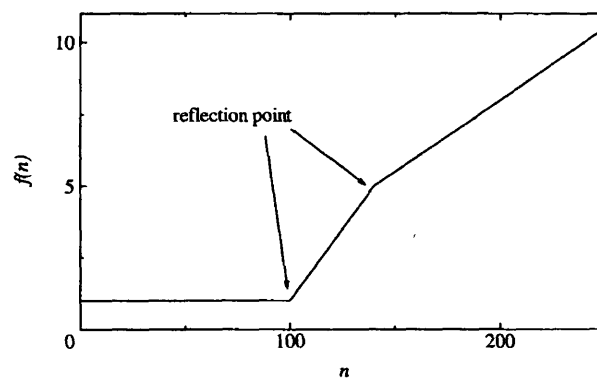


図 2  $f(n)$  の波形  
Fig. 2 Waveform of  $f(n)$ .

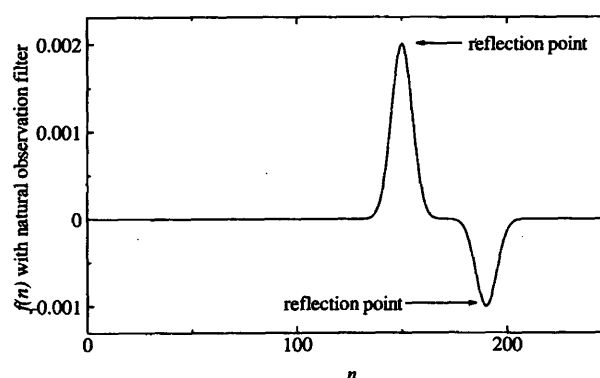


図 3  $f(n)$  に 100 位 2 次基本観測フィルタを適用した波形  
Fig. 3 Waveform of  $f(n)$  with fundamental observation filter. ( $M = 100, m = 2$ )

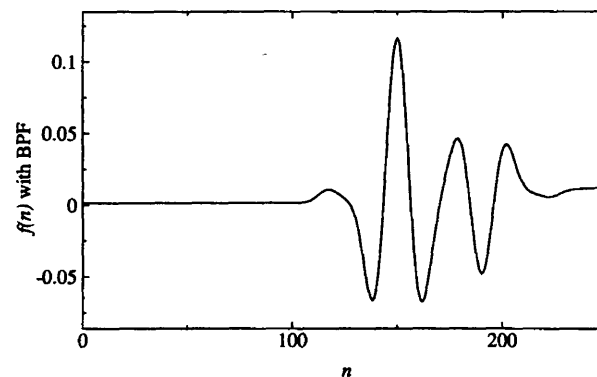


図 4  $f(n)$  に BPF を適用した波形  
Fig. 4 Waveform of  $f(n)$  with BPF.  
( $f_c/f_s = 0.028, 0.065$ )

を有するフィルタを用いたとしても, BPF では屈折点は検出できず, 基本観測フィルタを使用した場合のみ, 波形のピークで明確に屈折点を検出できることが分かった。

#### 4. 考 察

図 3 より, 2 次基本観測フィルタを適用することで,

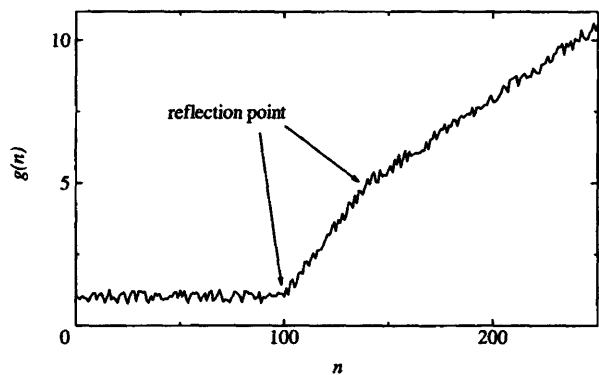


図5  $g(n)$  の波形  
Fig. 5 Waveform of  $g(n)$ .

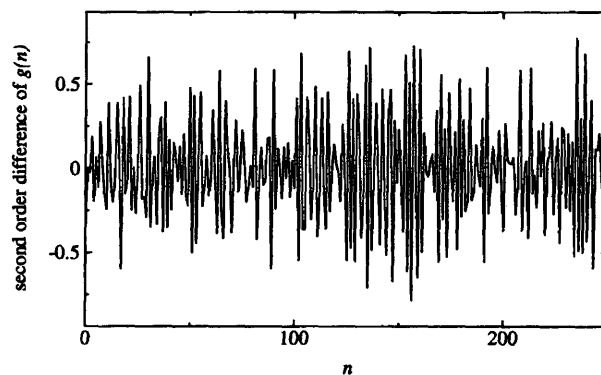


図8  $g(n)$  を 2 階差分した波形  
Fig. 8 Second order difference waveform of  $g(n)$ .

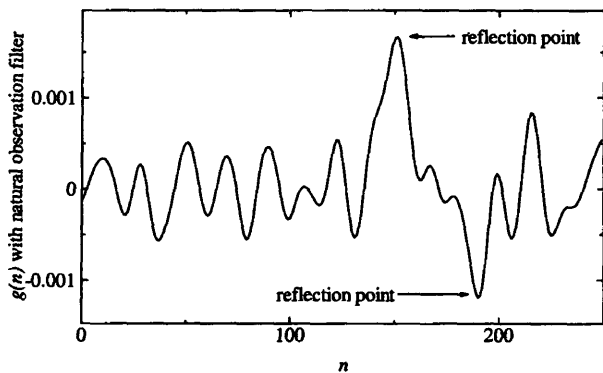


図6  $g(n)$  に基本観測フィルタを適用した波形  
Fig. 6 Waveform of  $g(n)$  with fundamental observation filter. ( $M = 100, m = 2$ )

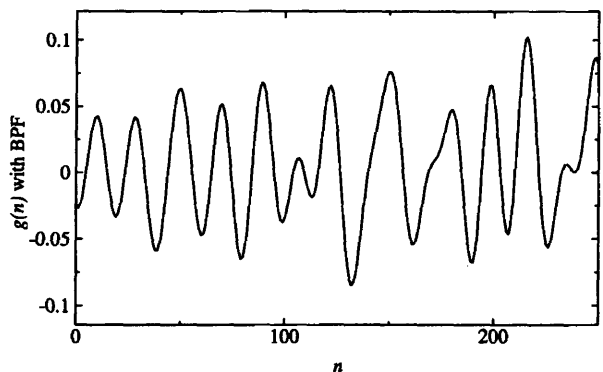


図7  $g(n)$  に BPF を適用した波形  
Fig. 7 Waveform of  $g(n)$  with BPF.  
( $f_c/f_s = 0.028, 0.065$ )

出力波形のピークが原波形の屈折点を示すことが分かった。以下では、2次基本観測フィルタについて考察を行う。

時系列データ  $f(n)$  に対する 1 階差分を

$$\Delta f(n) = f(n) - f(n-1) \quad (12)$$

で定義すると、式 (4)、式 (5)、式 (6) 及び式 (12) より、 $\lambda = 1/2$  とすると、

$$\begin{aligned} n_2^{(M)}(n) &= \Gamma^{M-2} \Lambda^2 f(n) \\ &= \left(\frac{1}{2}\right)^M (I + D)^{M-2} (I - D)^2 f(n) \\ &= \left(\frac{1}{2}\right)^M \Delta^2 (I + D)^{M-2} f(n) \quad (13) \end{aligned}$$

ここで  $\Delta^2$  は 2 階差分の作用素である。式 (13) の右辺の  $(I + D)^{M-2} f(n)$  について、 $I$  は恒等作用素、 $D$  は遅延作用素であるため、

$$(I + D)^{M-2} f(n) = \sum_{l=0}^{M-2} \binom{M-2}{l} f(n-l) \quad (14)$$

となる。

したがって、式 (13) 及び式 (14) より  $n_2^{(M)}(n)$  について次のことが分かる。すなわち、 $n_2^{(M)}(n)$  は、原波形に対してある時刻  $n$  と過去の  $(M-2)$  個のデータに 2 項係数による重みをかけて平均化を行ったデータ列に対して 2 階差分を行い、 $(\frac{1}{2})^M$  を乗じることで得られるデータ列である。

すなわち、2次基本観測フィルタは原波形に対して 2 項係数による重み付き平均化を行い 2 階差分を行うフィルタであると考えられ、フィルタの有する周波数特性だけでなく、この 2 階差分のもつ特性により原波形の屈折点を明確に検出できることになる。

図 6 において雑音が重畳した場合にも屈折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 8 に、図 5 の波形に対して 2 階差分を直接行った出力波形を示す。この図より、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屈折点は検出できないことが

分かる。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ほとんどであるが、2次基本観測フィルタはそのような信号波形に対して屈折点を検出するには非常に有効な手法となり得る。

### 5. 雷放電による放射電磁界波形への基本観測フィルタの適用

対地雷撃（以下、落雷）による放電現象においては、主放電であるリターンストロークの前駆現象として発生するステップリーダや雲放電及びリターンストロークと同時に発生する雲放電などによる電磁界変動 [2], [7], [21], [22] などが観測波形に記録される場合が多く、波形は複雑になる。ここでは大型平板電極を用いて観測された雷放電による放射電磁界波形に2次基本観測フィルタを適用した結果を示す。

5.1 では、雷放電の観測システムの概要を示す。

5.2 では、5.1 のシステムで観測された電磁界波形に対する2次基本観測フィルタを適用した結果を示す。

#### 5.1 観測システム

雷放電による放射電磁界変動信号の観測を行っているのは、秋田県本荘市の秋田県立大学システム科学技術学部構内にある本荘観測点である。図9にシステムの配置状況を示す。電界変動観測用アンテナとしては、アルミニウム製の1辺4mの正方形の金属板を平板電極として使用している。電極は、地上高約4mに絶縁体（碍子）によって固定されている。記録装置には、大地に対する電極の電位が記録される。すなわち、本アンテナは大型のコンデンサとして作用し、電界のz方向成分を記録している。信号はサンプリング時間1 $\mu$ sの時間分解能をもつデータ記録装置で記録されている。この記録装置は、電界信号がある一定の出力を超えるとトリガがかかり、トリガ以前の25msとそれ以後の25msを記録する。観測された信号は記録装置によってA-D変換され、離散データとして蓄積される。

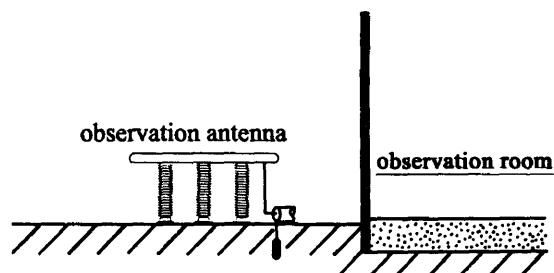


図9 観測システムの配置図

Fig. 9 Arrangement of the observation sensors.

#### 5.2 観測波形への基本観測フィルタの適用

図10に観測された雷放電による電界変動信号の波形を示す。ただし、時間軸は最大値を記録した時間に対する相対的な時間として示している。時刻0の最大ピークをもつパルスは負極性落雷によって放射された電界変動信号である。図10にはリターンストロークの前後に細かい変動信号成分が観測されている。また、時刻0.4msに観測されている小さなパルス信号は、リターンストロークによる放射電磁界の電離層からの反射波成分である。

図11の上段に図10を拡大した波形、下段に基本観測フィルタを適用した波形をそれぞれ示している。ただし、フィルタの各パラメータは $M = 20$ ,  $m = 2$ 及び $\lambda = 1/2$ である。図3と同様に、 $\lambda = 1/2$ としたため、フィルタの遅れにより屈折点は $M/2 = 10$ 点だけ右にシフトしている。したがって、今、サンプリング時間は1 $\mu$ sであるので、10 $\mu$ sの遅れとなる。このため、図11では下段の波形を10 $\mu$ sだけ前にずらして表示している。

図11の下段において破線で示した第1ピークはリターンストロークによる放射電磁界の立上り点を示している。すなわち、電界波形の屈折点がピークとして検出できることが分かる。

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分かってきており [20], 図11の上段の波形に対してはパルス幅を20 $\mu$ s程度として $M = 20$ としている。しかし、対象の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 [13]. 今

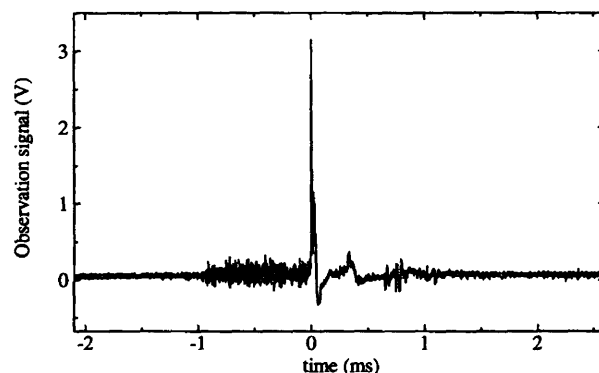


図10 雷放電による放射電磁界波形 (2002/10/15 16:58)

Fig. 10 Electromagnetic field radiated by lightning discharge. (2002/10/15 16:58)

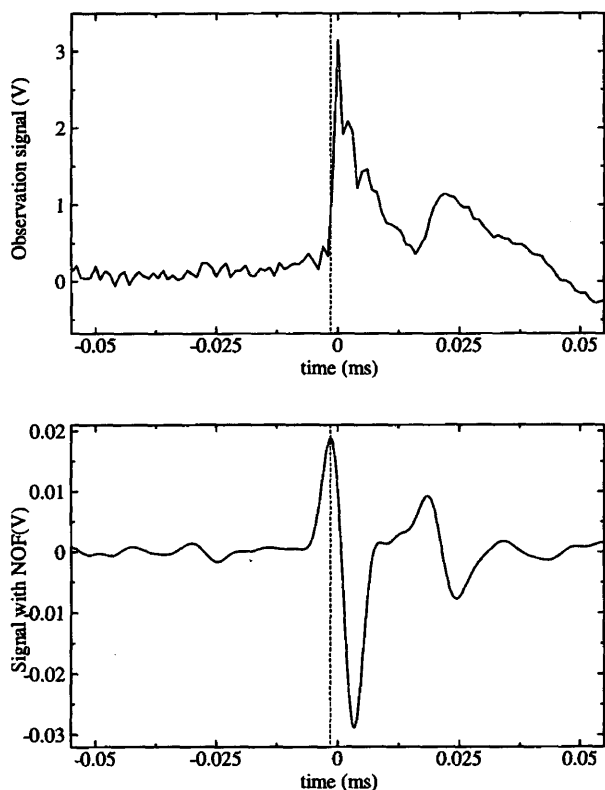


図 11 図 10 に 2 次基本観測フィルタを適用した波形 (上: 観測波形, 下: フィルタを適用した波形)

Fig. 11 Waveform applying 2-order fundamental observation filter to Fig. 10 (upper: observed waveform, lower: waveform with fundamental observation filter).

後の課題として、観測で得られた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、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 2 次基本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 2 次基本観測フィルタを適用することで、屈折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基本観測フィルタは適用可能である。

また、実際の波形の適用例として、落雷による放射電界信号に基本観測フィルタを適用し、その有効性を確認した。今後は本論文における適用例を電磁波の受

信時刻の校正法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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 赤尾保男, 環境電磁工学の基礎, 電子情報通信学会, 1991.
- [8] 南 茂夫, 科学計測のための波形データ処理, CQ 出版社, 1986.
- [9] 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.
- [10] 樋口龍雄, デジタル信号処理の基礎, 昭見堂, 1986.
- [11] 金井 浩, 音・振動のスペクトル解析, コロナ社, 1999.
- [12] 飯島泰蔵, 自然観測法の理論, 森北出版, 2000.
- [13] 飯島泰蔵, デジタル自然観測法, 森北出版, 2001.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 大久保寛, 竹内伸直, “自然観測法理論による過渡電磁界信号の特性時間決定法,” 信学論 (B), vol.J86-B, no.9, pp.1731–1738, Sept. 2003.
- [20] 大久保寛, 竹内伸直, “デジタル自然観測法により特性時間を検出する場合の位数  $M$  の決定に関する検討,” 信学論 (A), vol.J87-A, no.3, pp.409–412, March 2004.
- [21] 竹内利雄, 雷放電現象, 名古屋大学出版会, 1987.
- [22] 日本大気電気学会, 大気電気学概論, コロナ社, 2003.  
(平成 16 年 5 月 19 日受付, 6 月 23 日最終原稿受付)