

## ウェーブレット変換を用いた Ep 型脳波の解析

三星邦史\*<sup>1</sup>・藤森成一\*<sup>2</sup>・平井慶彦\*<sup>2</sup>・鈴木隆道\*<sup>3</sup>

### Analysis Based on the Wavelet Transform for Ep Type Brain Wave

by

Kunihito MITSUBOSHI, Seiichi FUJIMORI,  
Yoshihiko HIRAI and Takamichi SUZUKI

(Received on Mar. 29, 1996)

#### Abstract

In this paper, non-periodic properties of the Ep type brain wave (E. B. W.) measured by 10/20 methods are discussed with the Wavelet Transform (a kind of Multi-resolution Analysis) which makes it possible to analyze the time series in the 2 dimensional plane by the time and frequency.

We especially took notice of a pulse wave called spike characterizing the brain wave which appears suddenly in the time series, and analyzed it by the Wavelet Transform.

The results show that the non-periodic spike exists in the data filtered through the several steps, and its time position can be precisely detected.

**Keywords :** Brain wave, Spike of brain wave, Wavelet Transform, Multi-resolution

#### 1. はじめに

現在、脳の活動は、脳内の個々の微妙な電位変動によって得られる電氣的インパルス系列からなる脳波等によって観測されている。脳波は、波としての諸量（周波数、振幅、位相など）が異なるものや、正常波や異常波のように、波それ自身として意味の異なるものもある。何れにしても、脳波には様々な特徴があり、それらが周期的に現れたり、非周期的に現れたり、あるいはこれらが複雑に合成しあったりしているものもある。この脳波は、脳の活動を知る上で非常に重要なもののひとつである<sup>1)</sup>。一般に、波と名の付く現象は、いくつかの波の合成で

ある。その波には、固有の周波数があり、このような系の解析には、古くからフーリエ解析が用いられてきた。しかし脳波は、上記のように複雑な波の合成であるので周波数に主眼をおいているフーリエ解析では、対応しきれない部分がある。近年このような複雑な時系列信号を解析する上で効果を発揮する、カオス的解析法を用いた研究<sup>2,3)</sup>も多数報告されているが、本論文では、この脳波の検討に際し、非周期的な現象を解析する時に時間領域と周波数領域の両面から同時に表現できるという特徴を持つウェーブレット解析を用いることにした。さらに、この解析手法とフーリエ解析との比較をも行った。またウェーブレット変換をフィルターとして用い、脳波に関

\* 1 工学研究科電気工学専攻博士課程前期

\* 2 工学部電気工学科教授

\* 3 逗葉内科クリニック医師

し、この面からの検討をも実施した。

## 2. 理 論

### 2.1 ウェーブレット変換

ウェーブレット変換<sup>4-7)</sup>は、フーリエ変換と同様、ウェーブレット関数と呼ばれる関数を積分核に用いる一種の積分変換である。フーリエ変換との大きな違いは、その関数の性質にある。フーリエ変換における積分核は、三角関数であり周波数領域でみるとパルス的に局在している<sup>8)</sup>。それに対しウェーブレット変換における積分核は、時間領域での局在性に重点がおかれ、そのため、ある帯域の周波数成分を持ち、その周波数領域での局在性は、フーリエ変換ほど良くはない。ウェーブレット変換では、その積分核はマザーウェーブレットと称され、次の式 (2.1) で示されるアドミッシブル条件を満たす積分核が用いられる。

$$\int \phi(t) dt = 0 \quad (2.1)$$

ここで、式 (2.1) は、この関数が振動的であることを意味する。この条件を満たす関数に次式中の  $a$ 、 $b$  で表されるスケール、シフトの各パラメータを用いることにより、このマザーウェーブレットを時間的に移動（シフト）したり、周期（スケール）を変えることによって、その関数の持つ性質を分解、解析することができる<sup>9,10)</sup>。

$$2^{-1/2} \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.2)$$

また、式 (2.1) の条件を満たす関数は無限個あり、この構成法には、様々な方法が提案されている。本研究では、マザーウェーブレットの構成法の1つであり、ウェーブレット変換をフィルタとして用いる場合、データの分解（変換）、再構成（逆変換）の操作が簡単な多重解像度解析を用いた。

### 2.2 多重解像度解析

多重解像度解析は信号をさまざまなスケールで局所的に解析するときに用いられる解析法であり、Morlet 等によりウェーブレット解析との密接な関係が明らかにされて以来マザーウェーブレット構成法の1つに用いられるようになった<sup>10,11)</sup>。ここでは対象とする関数  $f$  として時系列信号を考えることにする。また、この節で使用されている文字  $j$ 、 $k$  は整数であり、多重解像度解析において、トゥー・スケール関係と呼ばれる式 (2.3) で定義される関数をスケーリング関数と呼び、

$$\phi(x) = \sum_k p_k \phi(2x-k) \quad (2.3)$$

この式を満たすスケーリング関数  $\phi$  によってウェー

ブレット関数  $\psi$  を作ることができる。

$$\psi(x) = \sum_k q_k \phi(2x-k) \quad (2.4)$$

ここで、 $p_k$ 、 $q_k$  はそれぞれ、式 (2.3)、式 (2.4) で与えられる  $\phi$  及び  $\psi$  によって決まる数列であり、データの分解、再構成に利用する。

次に、式 (2.3) の  $x$  を  $2^j x$  に置き換えて信号  $f$  を式 (2.5) のように近似できるとき  $f_j$  をスケール  $j$  での  $f$  の近似と呼ぶことにする。

$$f_j(x) = \sum_k c_k^j \phi(2^j x - k) \quad (2.5)$$

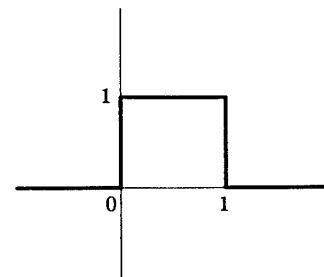
ここで、係数  $c_k^j$  は信号  $f$  と、 $j$  を固定し  $k$  をパラメータとしたときの  $\phi$  との内積である。またトゥー・スケール関係を使えば  $f_{j-1}$  を作ることができ、スケールを1つ下げたことによって失われた部分  $g_{j-1}$  は次式のように表現される。

$$f_j(x) = f_{j-1}(x) + g_{j-1}(x) \quad (2.6)$$

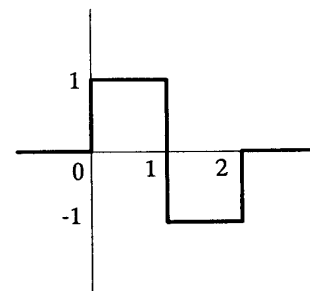
また  $g_j$  も係数  $d_k^j$  を用いて式 (2.5) と同じ関係で表わすることができる。ここで係数  $d_k^j$  も  $c_k^j$  同様に信号  $f$  と  $\psi$  との内積である。

$$g_j(x) = \sum_k d_k^j \psi(2^j x - k) \quad (2.7)$$

このようにして信号  $f$  を各スケールごとに分解していくことができる。また信号  $f$  の再構成は分解によって得られた  $c_k^j$ 、 $d_k^j$  を用いて行うことができる。なお、関数  $\phi$ 、 $\psi$  はトゥー・スケール関係を満たしているので、



scaling function



wavelet function

Fig. 2.1 Haar's functions.

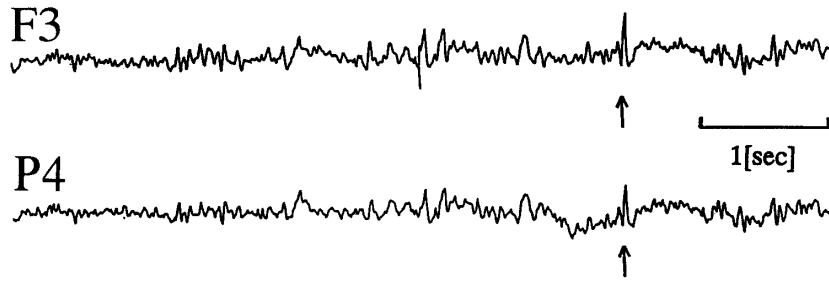


Fig. 3.1 Brain waves at F3 and P4.

$c_k^j$ ,  $d_k^j$  は,  $p_k$ ,  $q_k$  を用いて計算することができる。

以上は, ウェーブレット変換においてスケール, シフトのパラメータを  $a=2^{-j}$ ,  $b=2^{-j} \cdot k$  と離散化したときに対応し,  $d_k^j$  はその時のウェーブレット係数に対応している。

今回,  $p_0=1$ ,  $p_1=1$ ,  $q_0=1$ ,  $q_1=-1$  とし, Fig. 2.1 で表される Haar の関数を用いた。この関数は, 図からも分かるように時間領域での局所性に優れ, またウェーブレット関数の周期性に関しては, 関数幅の逆数の値の周波数成分を多く含んでいるという特徴を持っている。

### 3. 脳 波

本論文で使用した脳波は, 国際脳波学会標準電極配置法 (10/20法) で電極を設置し, 16電極法で記録されたものである。実験の前半を単極誘導法で行い後半は横双極誘導法による。Fig. 3.1 には, 後半の横双極誘導法で記録されたデータを示す。

対象となるこの脳波は, epilepsy と診断されている, 現在は間歇期にある, 60歳男子のもので, 安静時非賦活の状態で測定されたものである。この脳波の図中矢印で示した所に, 専門医師によってスパイクと判断された波が現れている。このスパイクと呼ばれる脳波は, 80 [msec] 以下の幅を持つ波で, 一般に周期性がないとされ, spiky といわれるスパイク状の脳波とは区別される。また, スパイクは, epilepsy に特徴的に現れる波形であり, この波が現れる脳波は, Ep 型脳波とも言われている。

一般に, 正常人の安静時には 8 から 13 [Hz] の正弦波状の  $\alpha$  波が現れる<sup>1)</sup>。そこで, 得られた脳波をこの  $\alpha$  波を基準に, スパイクを見るのに十分なサンプリング間隔 25 [msec] で離散化することにより, 得られた脳波を周波数 20 [Hz] で帯域制限し, 解析用のデータとした。

### 4. 結果および考察

離散化した脳波データをウェーブレット変換した後, それぞれのスケールごとにウェーブレット逆変換を実施したものを Fig. 4.1 に示す。ここで, 最大のスケール 1 は, 元のデータの幅と同じ 6.4 [sec] の関数幅を持つウェーブレット関数が, 式 (2.7) で示されるように結合されているものである。スケールの番号が 1 つ上がるに連れ, ウェーブレット関数の幅が半分になり, 最小のスケール 8 では, ウェーブレット関数の幅は, サンプリング間隔の 2 倍の時間間隔 50 [msec] となる。このスケール 8 のデータでは, 元の脳波中のスパイクが現れている時刻に, 大きな変化が現われている。他のスケールには, このような明らかな変化が見られない。このことから, 脳波に現れているスパイクの情報は, スケール 8 の中に特徴的に現れ, 含まれていると考えることができる。さらに, スケール 8, すなわち高周波成分を多く含むスケールの中にスパイクの情報が含まれていることは, このスパイクが単独に現われ, 他にはあまり影響しないという性質と対応しているものと思われる。

また, 元の脳波の中程に波高値がスパイクとよく似た波が 2 つ現われている。これ等の波は, Fig. 4.1 のスケール 7 の中程において, 一段と振幅の激しい部分に相当していると思われるが, これに対応する部分をスケール 8 で見ても, 他の時間との違いは, 明確ではない。したがって, これらの波は, スパイクとは違う性質を持つ波であると推定できる。この様にウェーブレット変換をすることにより, 違う性質を持つ波を, より明確に分類することが可能であると考えられる。また, スケールが 1 と 2 の様に, 全体を通し, その振幅にほとんど変化の見られないスケールがある。これはウェーブレット関数のスケールパラメータが非常に大きいため, 脳波データの全体的特徴を捉えることとなり, 結果として, 使用した脳波は全体的には大きな変化が無いことを表している。一

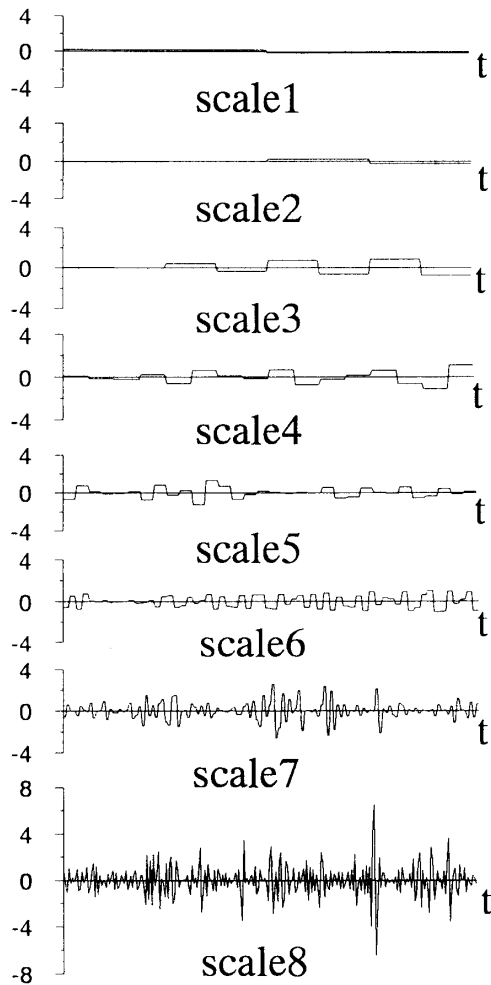
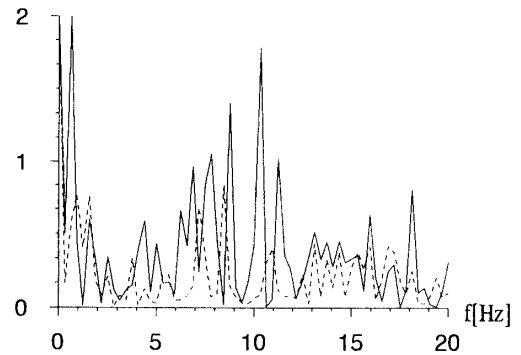


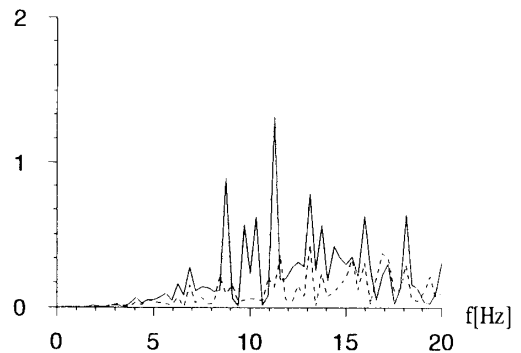
Fig. 4.1 Scale resolution for the brain wave at F3.

方、スケール 6 の様にすべての時間に渡り一定の変化を見せるものや、スケール 3 の様に時間が経つにつれその変化が大きくなっていくものなど、今後の課題となるようなデータも得られることとなった。

次に、スパイクについてウェーブレット解析とフーリエ解析との比較を行う。Fig. 4.2 (a)に、脳波データをスパイクの含まれている部分とそうでない部分に分け、それぞれのフーリエスペクトルをとったものを示した。Fig. 4.2において、スパイクの含まれている部分のパワースペクトルを実線で表し、スパイクが含まれていない部分のパワースペクトルを破線で表した。この図を見ると、10～12 [Hz]、18 [Hz] 付近で、スパイクが含まれているものはスペクトルが大きく出ているが、スパイクが含まれていないものでは、この周波数帯でのスペクトルは小さい。このことより、スパイクの影響がでているのは、スペクトル分布に違いが見られるこれらの周波数帯であると思われる。



(a) All scales



(b) Scale 8

Fig. 4.2 Power spectrum of the brain wave at F3.

ここで、同図(b)は、Fig. 4.1の中で、スパイクの情報が含まれていると考えられるスケール 8 のデータのパワースペクトルを(a)と同じ条件でとったものである。先ほど示した周波数帯で非常によく似た特徴を示している。また、スパイクの含まれているデータのスペクトル分布を全体的に見ても、両図のスペクトル分布が似ていることが分かる。これらの類似性により、Fig. 4.1において、スケール 8 のデータ中に、特に大きな変化が現れたのだと考えることができる。このように、ウェーブレット解析とフーリエ解析との対応関係を見ることができた。しかしながら、ウェーブレット解析では周波数と時間の情報を同時にみることができ、この意味ではウェーブレット解析の方が直接的認識においてフーリエ変換より勝っていることがわかる。

また、Fig. 4.2 (b)に見られるように、ウェーブレット変換によって得られる各スケールごとに分解されたデータは、ある程度の帯域幅を持っている。これは、フィルタという観点から考えると、帯域通過フィルタを通した結果であると考えられる。そこで、Fig. 4.2 (b)のスペク

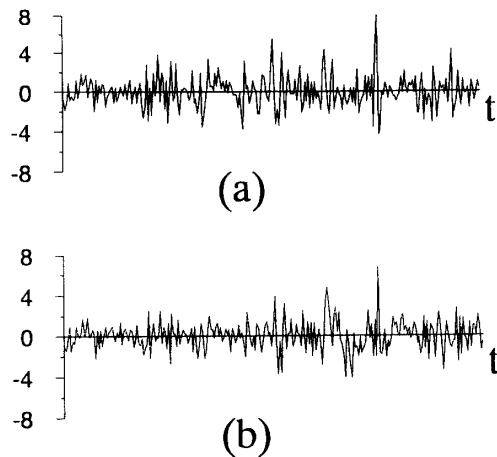


Fig. 4.3 A spike reconstructed by wavelet transform.

トル分布において Fig. 4.2(a)とは、あまり特徴が似ていない低周波帯域に対し、Fig. 4.1のスケールの中で、スパイクの残りの情報が含まれていると考えられるスケールを合成したもので、これを Fig. 4.3 に示した。この図で(a)は、電極 F3 の脳波のものである。これを見るとスパイクの周辺以外のところでは、零をはさみ正負に振動的であるが、スパイクの部分のみ正の振幅にたいする負の振幅が現れていない。これより、スパイクの情報を含んでいるスケールを合成したことで、スパイクが単独な半波である特徴を明確につかみとることができるようになったと思われる。また、同図(b)は、電極 F3 と同じ時間帯に、電極 P4 で記録された脳波に対して、F3 と同じ条件で合成したデータである。電極 P4 で観測されたスパイクでは、F3 のものより先程の特徴がよく出ているのが分かる。さらに、元の脳波では大きな周期を持つ波の上にスパイクが現れているが、合成されたデータは、この大きな周期を持つ波は消えてしまい、スパイクの特徴を残すものとなった。これは、高い周波数成分を持つスケールのものだけを合成したので、スパイクの情報が含まれていない低い周波数帯域が、フィルタリングによりカットされたためであると思われる。

ウェーブレット変換をフィルターとして考えた場合、Fig. 4.3 の結果は、この変換が、スパイクの様な局所の変化を他の時間帯に波及させないでフィルタリングできることを示している。何れにしても、ウェーブレット解析を実施した場合、スケール、シフトパラメータをどの様を選択し、対象データの特徴をどのスケールで捉えるかは解析技術として今後の大きな問題となる。

## 5. まとめ

以上、脳波データを用いてフーリエ変換と比較しながらそのウェーブレット解析を実施したが、得られた結果をまとめると以下になる。

(1) ウェーブレット解析を利用すると、元の脳波データをさまざまなスケールに分解しながらも、これらのデータの中に、非周期性のスパイクが時間情報も含めて確認できることが分かった。

(2) ウェーブレット解析で分解されたデータは、ウェーブレット変換における積分核の性質がよく現われているので、その関数の性質をつかむことでフーリエ解析との関連づけを行うことができた。

(3) スパイクのような様々なスケールに及ぶ1つの現象をみるときにもウェーブレット解析では任意にそのスケールを取り出すことができるので、より明確にスパイクの特徴をつかむことができた。

今回のサンプリング間隔では、検討できなかったが、他に影響をおよぼさないフィルタリングの性質を利用することにより、脳波データに現れる雑音消去も可能になると考えられるので、今後さらなる検討が期待される。

**謝辞** 本研究に対し、熱心なご討論を頂いた、東海大学電気系研究会に深く感謝申し上げます。また、この研究を実施するに当たり、数々の励ましを頂いた Mr. Minoru Fujimori & Mrs. Kesami Fujimori, Mr. Hideaki Mitsuboshi & Mrs. Tamae Mitsuboshi, Mr. Hiroshi Yoda & Mrs. Etsuko Yoda, Mr. Hiroshi Yamada & Mrs. Kazuko Yamada, Mr. Fumio Hayakawa & Mrs. Keiko Hayakawa 夫妻並びに Mrs. Mikiko Fujimori 氏に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 工藤達之, 吉井信夫「脳波のとり方とよみ方」南山堂 (1973).
- 2) 小森幸樹, 中川匡弘: 信学技報 Vol. 95, No. 84, MBE 95-5.
- 3) 山本光璋, 中浜 博: 信学技報 Vol. 86, No. 179, MBE 86-42.
- 4) Y. Meyer: "Wavelets and Operators" Cambridge University Press (1992).
- 5) S. G. Mallat: Trans. AMS, Vol. 315 (1989), No. 1, pp. 69-87.
- 6) S. G. Mallat: IEEE Trans. PAMI, Vol. 11 (1989), No. 7, pp. 674-693.
- 7) 山田道男, 大木耕司: ウェーブレットについて,

- 物性研究, 第57巻, 第5号 (1992), pp. 601-612.
- 8) Ronald N. Bracewell 「フーリエ変換とその応用」  
マグローヒル好學社 (1980).
- 9) 山田道夫: 数理科学 (1992) No. 354, p. 10.
- 10) 佐藤雅昭: 日本音響学会誌 Vol. 47, No. 6, p. 405.
- 11) 榊原 進: いわき明星大学理工学部研究紀要第8  
号, pp. 39-46 (平成7年3月).