

## 癲癇性脳波のウェーブレット解析

山 口 千 里\*

### Wavelet Analysis of Epileptic Electroencephalogram

Chiri Yamaguchi

Epileptic electroencephalogram (EEG) signals have been analyzed using Fourier transform (FFT) and Continuous Wavelet Transform (CWT) as well as Wavelet Packet Transform (WPT) and the results have been compared with the previous results studied for normal EEG signals. The power spectra of EEG obtained by FFT showed  $1/f^\alpha$  fluctuations over the frequency range. However, the alpha rhythm that had been clearly observed in the power spectra of normal EEG has not been observed in epileptic EEG. FFT could not reveal low frequency components that are typical among epileptic seizures. CWT and WPT analyses, on the other hand, have been found to be appropriate to detect local slow wave components of EEG.

#### 1. 緒言

脳波は組織的な脳の神経活動に起因した誘発電位の時間変化を、頭皮上の電極を通して記録したもので、典型的脳波の波形は基準電極をゼロとして上下に数十 $\mu\text{V}$ の振幅を持つ。脳波は個人差が大きく、また、年齢により波形の振幅や周波数、形状が大きく異なる。正常の脳波でも覚醒時と睡眠時、閉眼時と開眼時、その他の状況で波形が異なる。脳波の周波数範囲は0.5Hz~40Hzで、低い周波数からデルタ( $\delta$ )波、シータ( $\theta$ )波、アルファ( $\alpha$ )波、ベータ( $\beta$ )波と分類されている。正常波形は多様性が著しいのに対して、異常波形は年齢による影響が少なく、棘波、鋭波、徐波、振幅、周波数等の変化に限られた異常所見が見られるとされている。周波数から見れば、明らかな徐波( $\delta$ 波と $\theta$ 波)が見られれば、境界または異常とみられる。異常波は突発性と持続性に分類され、突発性のものには癲癇波形、自律神経発作脳波、突発性徐波などがある。持続性のものには、脳卒中、頭部外傷、脳腫瘍、脳炎、髄膜炎、昏睡、他、多くの意識障害脳波が含まれる[1]。

筆者らはウェーブレットによる生体信号解析の研究を行っており、これまでに心電図[2]及び典型的正常脳波データ[3]のFourier解析とウェーブレット解析を行った。長時間の脳波のパワースペクトル密度には全体として $1/f^\alpha$  ( $f$ は周波数)のゆらぎが見られた。また、パワースペクトル密度には $\alpha$ 波の大きなピークと $\beta$ 波(速波)の小さなピークを認識できたものの、それより周波数の低い成分(徐波)は検出できなかった。その第一の理由は、正常成人の脳波が $\alpha$ 波の出現で特徴付けられることにある。一方では、長時間の周期的信号に埋もれた局在性の低周波信号の解析にFourier解析が適して

---

\* 経営工学科

いないことを示している。

他方、連続ウェーブレットによる解析では、低周波成分および局在性の波形パターンが良く検出できた。また、ウェーブレット packets 変換 (WPT) の時間 - 周波数プロットとウェーブレット packets (WP) 係数にも、脳波を特徴付ける明確なパターンが得られた。脳波信号のウェーブレット解析では、局在性の低周波成分が良く描出できた。本年度は、典型的な癲癇性異常脳波に対して昨年と同様の Fourier 解析とウェーブレット解析を試みた。

## 2. 脳波データ

典型的な癲癇性異常脳波信号データはチェコの Professor V. Krajca よりインターネットを通して提供されたものを用いた[4]。脳波データのサンプリング周波数は 128Hz で、チャンネル (Ch) あたりのサンプリング数は 3200、測定時間は

25 秒間である。図 1 はデータの一部 (10 秒間) を示したもので、最上部の第 1 Ch の矩形波はトレースマーカで、横方向に 500ms 間隔、上下方向の振幅は  $\pm 50 \mu V$  (上向きが陰性、下向きが陽性) である。データは国際規格である 10-20 法で測定されたもので、この測定法では 19 個の頭皮上電極及び基準電極 (耳朵や鼻尖) とアース電極の合計 21 の電極が用いられる (図 2)。図 1 の各チャンネルは、被測定者の頭上から電極を見たときに左から右、鼻から後頭部に向かう順

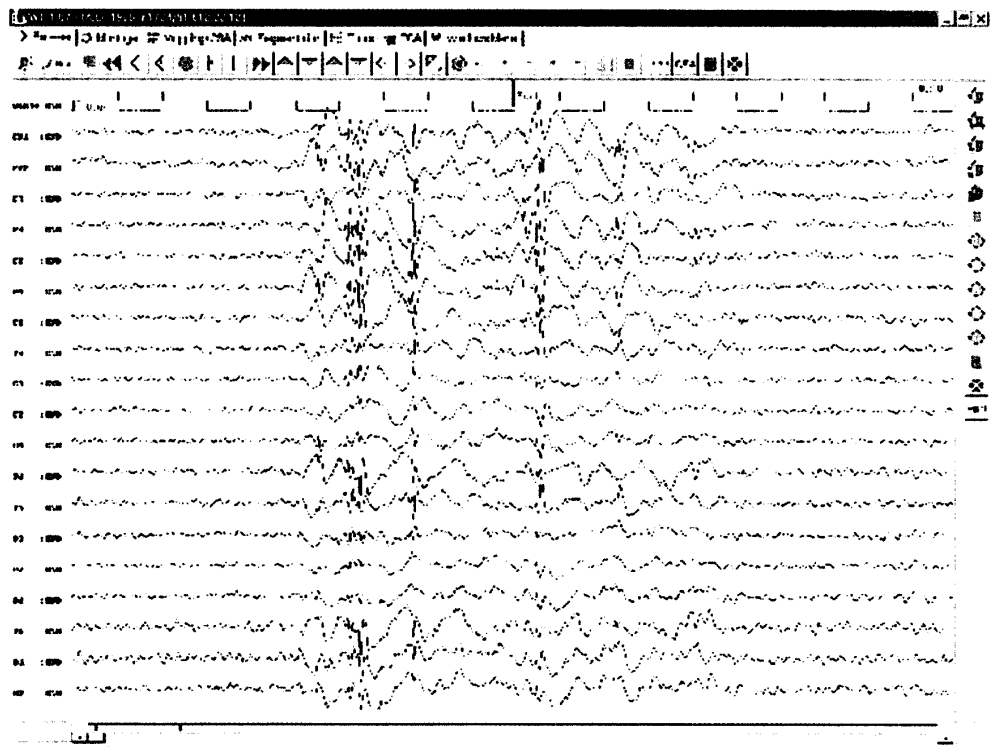


Fig.1 Epileptic EEG after Prof. Vladimir. Krajca [4]. EEG file, diagnosis epilepsy (epileptic spikes), first page (10 seconds). First trace - marker (approximately  $-50 \mu V$ .. $+50 \mu V$ ).

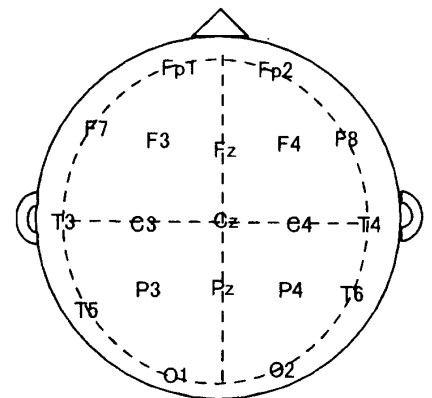


Fig. 2. International 10-20 electrodes settings for electroencephalogram (EEG) measurements.

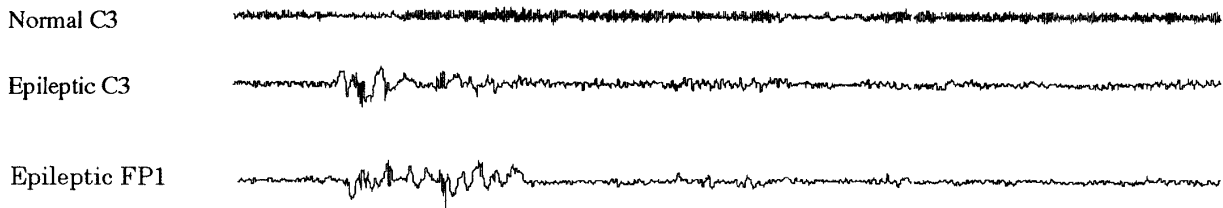


Fig. 3. Comparison of normal EEG (C3) and epileptic EEG (C3 and Fp1) signals. Normal EEG has been measured for 82 sec. And epileptic EEG for 25 sec.

序に脳波信号を並べたもので、上から Fp1、Fp2、F7、F3、Fz、F4、...に対応する。

### 3. 解析結果

#### 3.1 Fourier 解析

全脳波信号に対して Fourier 変換を行い、そのパワースペクトルを調べた。パワースペクトルは Fourier 変換の絶対値の自乗で表される。図 3 は正常脳波 (C3 電極、82 秒間) と癲癇性異常脳波 (C3 及び Fp1 電極、25 秒間) の波形を、図 4 (a、b、c) はそれぞれのパワースペクトルを示す。正常脳波[3]は 100Hz で 8192 点、癲癇脳波は 128Hz で 3200 点サンプルされたもので、パワースペクトルはその全体に対するものである。サンプリング定理により、スペクトルの最高周波数はサンプリング周波数の半分(Nyquist 周波数)である。

正常脳波のパワースペクトルには明確な  $\alpha$  波 ( $\sim 10\text{Hz}$ ) とその右の小さな  $\beta$  波が観測されたが、癲癇性異常脳波ではいずれの部位のパワースペクトルにも  $\alpha$  波及び  $\beta$  波の出現は見られなかった。成人覚醒閉眼時に  $\alpha$  波がまったく見られないのは異常性脳波を示している [1]。

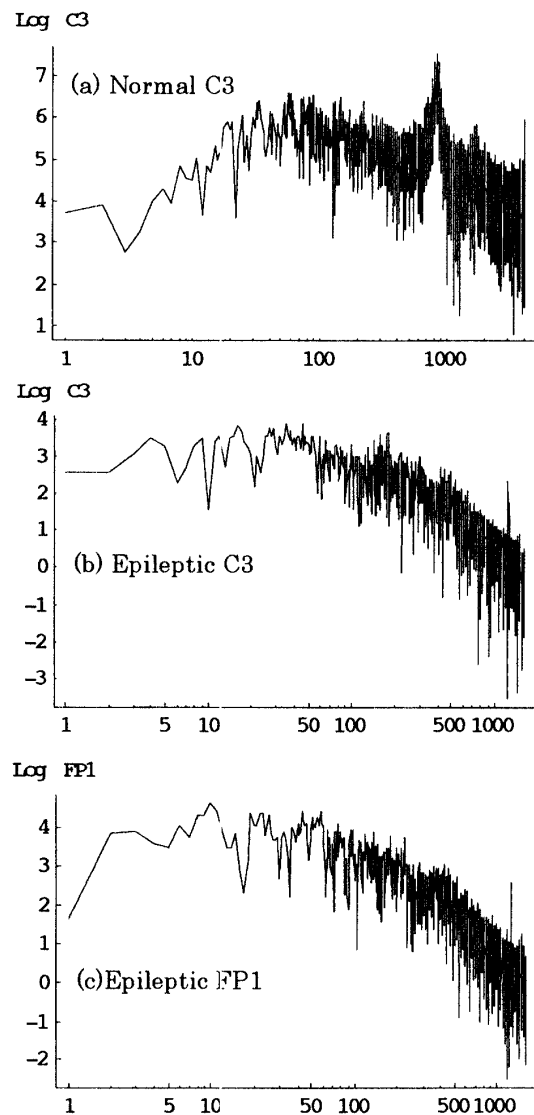


Fig.4. Power spectra for: (a) Normal EEG C3; (b) Epileptic EEG C3; (c) Epileptic EEG Fp1.

### 3.2 ウェーブレット解析

#### 3.2.1 ウェーブレットパケット変換

ウェーブレットパケットによる方法は、ウェーブレット分解を一般化したものである。ウェーブレットパケットの関数系は

$$w_{n,j,k} = 2^{j/2} w_n(2^j t - k) \quad (1)$$

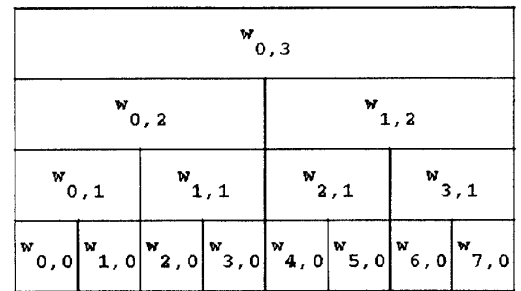


Fig. 5. Decomposition diagram of the space  $W_{0,3}$  using wavelet packets.

の形をしている。基底  $\{w_{n,j,k}(t)\}_k$  の張る空間を  $w_{n,j}$  で表すとすれば、空間  $w_{0,3}$  に対するウェーブレットパケット分解のダイアグラムは図5のようになる。すなわち、信号  $W_{0,3}$  はまず低周波部分  $W_{0,2}$  と高周波部分  $W_{1,2}$  に分解される。次に、 $W_{0,2}$  は低周波部分  $W_{0,1}$  と高周波部分  $W_{1,1}$  に、 $W_{1,2}$  は  $W_{2,1}$  と  $W_{3,1}$  に分解され、この手順を続けてゆく。nレベルの分解では信号の符号化に  $2^n$  のやり方がある。ウェーブレット解析に関しては多くの文献がある[5-15]。

図6に癲癇性異常脳波 FP1 (図6a) に対するウェーブレットパケット変換 (WPT) の時間-周波数空間プロット (図6b) を示す。図6bでは、分解には Daubechies のマザーウェーブレット(次数  $N=4$ : db4)を用いた。分解の深さは3である。横軸は時間、縦軸は周波数を表す。時間軸の値は相対値で、最大値はデータ数 (3200) を4分割した値 (800) になっているが、図6aのオリジナル信号の時間軸と対応している。また、図6cにウェーブレットパケット分解係数を示す。同様に横軸は時間、縦軸は周波数である。ウェーブレットの基底の位置は図8に示されている。すなわち、図6cのウェーブレットパケット分解係数は、図5のダイアグラムの最下段の  $W_{0,0}$ 、 $W_{1,0}$ 、 $W_{2,0}$  ...、 $W_{5,0}$  及び下から二段目の右端  $W_{3,1}$  に対応する。図6dはウェーブレットパケット分解係数の最後の4ブロック (図5cの上段から4ブロック) を強調するために示したものである。オリジナルの脳波信号の低周波数領域の特徴がはっきりと見て取れる。解析は Mathematica V.4.0 で行った。

同様に、図7に脳波 FP1 の局所性異常部分 (200~1223 ch) (図7a) に対するウェーブレットパケット変換の時間-周波数空間プロット (図7b) とウェーブレットパケット分解係数 (図7c) を示す。ウェーブレットの基底の位置は図6の場合と同じである。図7dはウェーブレットパケット分解係数の最後の4ブロックを強調したものである。

#### 3.2.2 連続ウェーブレット変換

次に、MATLAB V.5.2 (The MathWorks Inc.)を用いて、脳波 FP1 に対する連続ウェーブレット変換を行った結果を図7に示す。離散ウェーブレット変換と異なり、連続ウェーブレット変換では信号

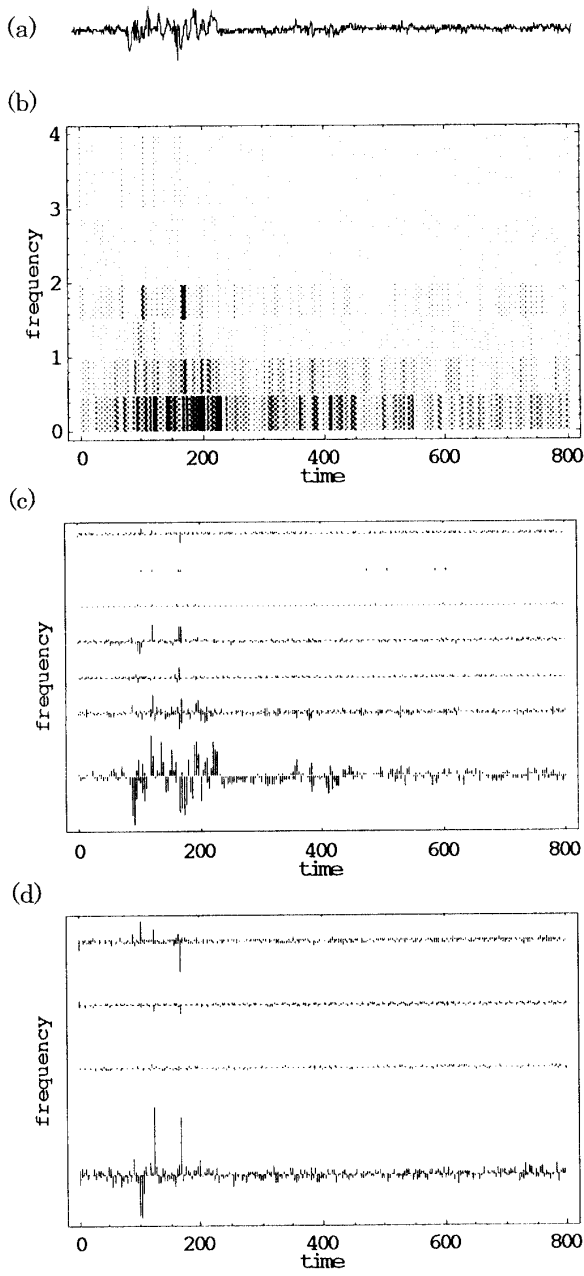


Fig. 6. Wavelet packet transform. (a) Epileptic EEG C3; (b) Time-frequency plot of wavelet packet transform for C3; (c) Wavelet packet coefficients for Daubechies mother wavelet ( $N=4$ ), and level 3; (d) Last 4 blocks of wavelet packet coefficients to show details.

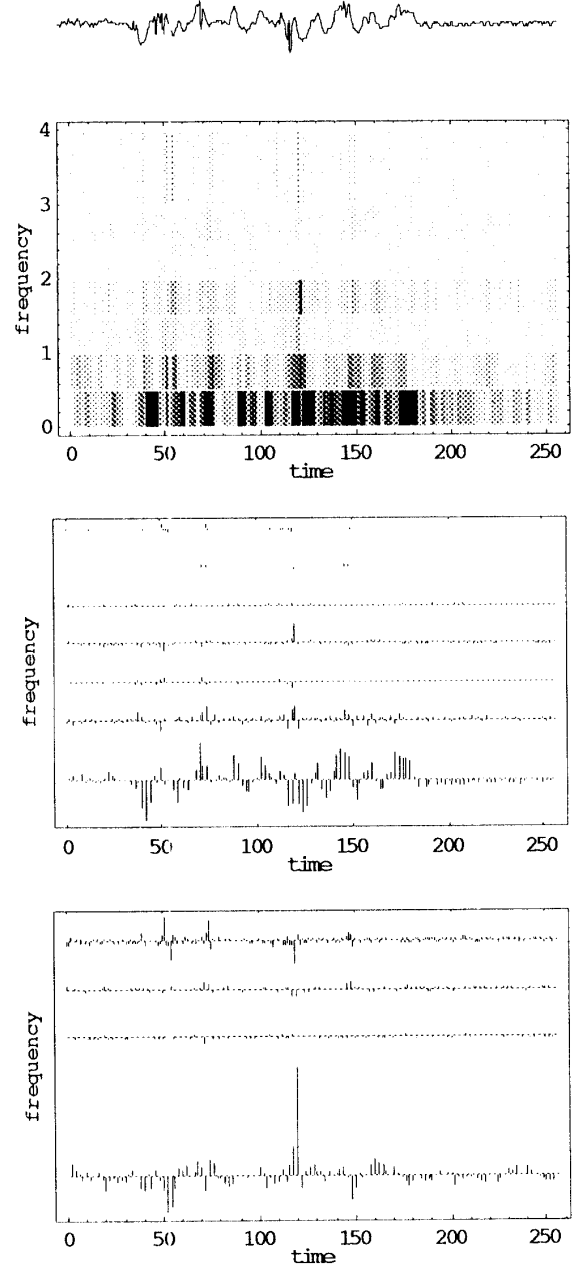


Fig. 7. Wavelet packet transform. (a) Part of epileptic EEG C3 (200 ~ 1223 Ch); (b) Time-frequency plot of wavelet packet transform; (c) Wavelet packet coefficients for Daubechies mother wavelet ( $N=4$ ) and level 3; (d) Last 4 blocks of wavelet packet coefficients to show details.



Fig. 8. Basis functions (or subspaces) chosen for wavelet packet decomposition.

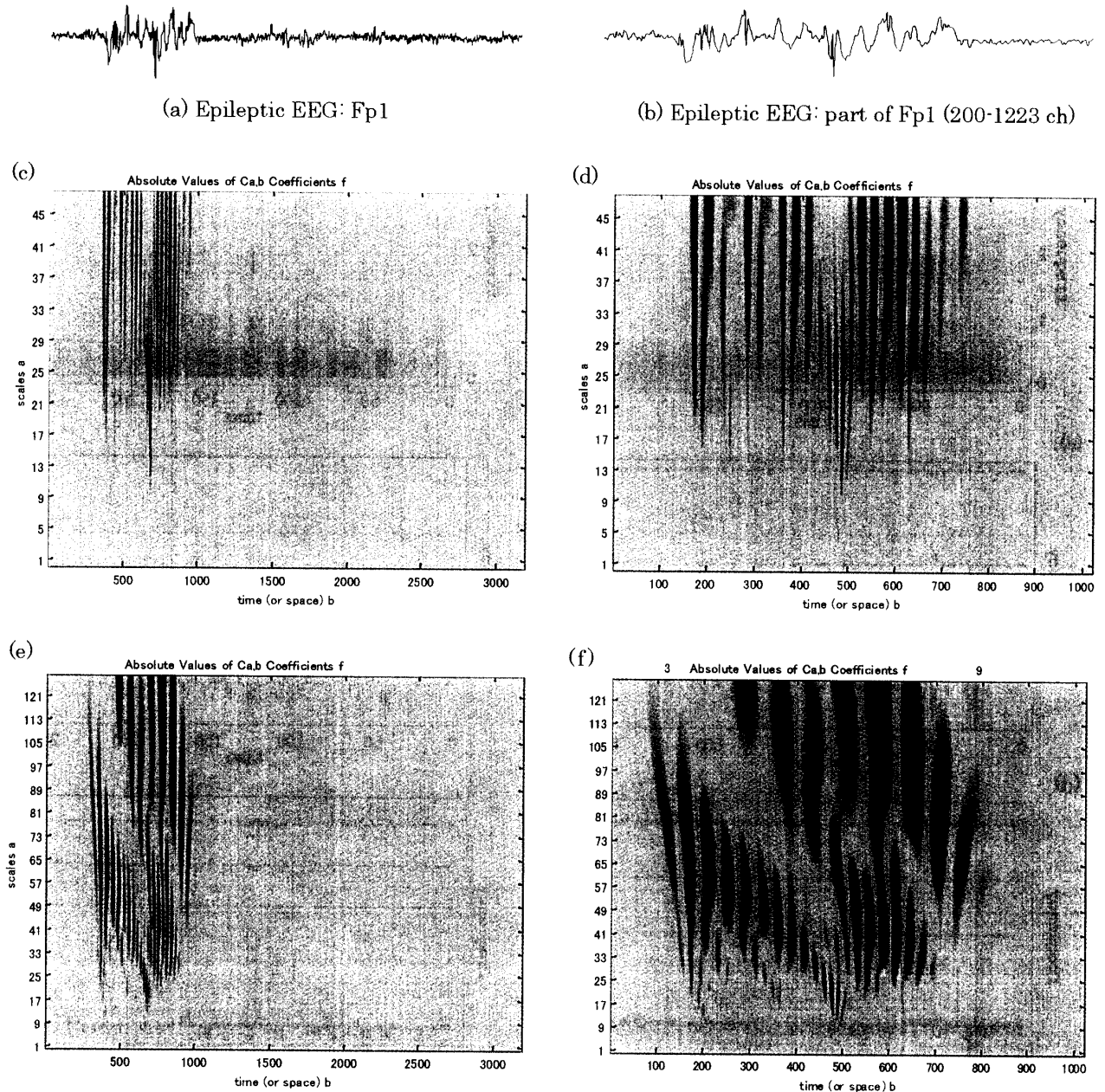


Fig. 9. Plot of the coefficients of continuous wavelet transform (CWT). (a) Epileptic EEG signal from Fp1; (b) Part of epileptic EEG signal from Fp1 (200-1223 ch); (c) and (d) Coefficients of CWT of Fp1 signal with Daubechies N=4 (db4) wavelet for scales 1-48; (e) and (f) Coefficients of CWT with Daubechies N=8 (db8) wavelet for scales 1-128.

のスケールから指定した最大スケールまで、スケールごとに連続して計算を行う。また、計算に際しマザーウェーブレットを連続してシフトさせる。ウェーブレット解析では、まず信号 (s) を周波数波数の低い近似部分 (a1) と周波数の高い詳細部分 (d2) に分解する。次に a1 を第二のレベルの近似部分 (a2) と詳細部分 (d2) に分解し、この手順を繰返す。すなわち、低周波部分 (近似部分) のみが次々と分解され、高周波部分 (詳細部分) は分解されない。繰返しが多いほど分解のレベル (深さ) 上がる。分解のレベルが n のとき、分解の仕方や符号化の仕方は n + 1 通りある。分解のレベルが 5 のとき (n = 5)、 $s = a5 + d5 + d4 + d3 + d2 + d1$  で表される。

図 9a は脳波 FP1 の全体 (3200 ch)、図 9b は FP1 の一部 (200-1223 ch) を示す。それぞれの信

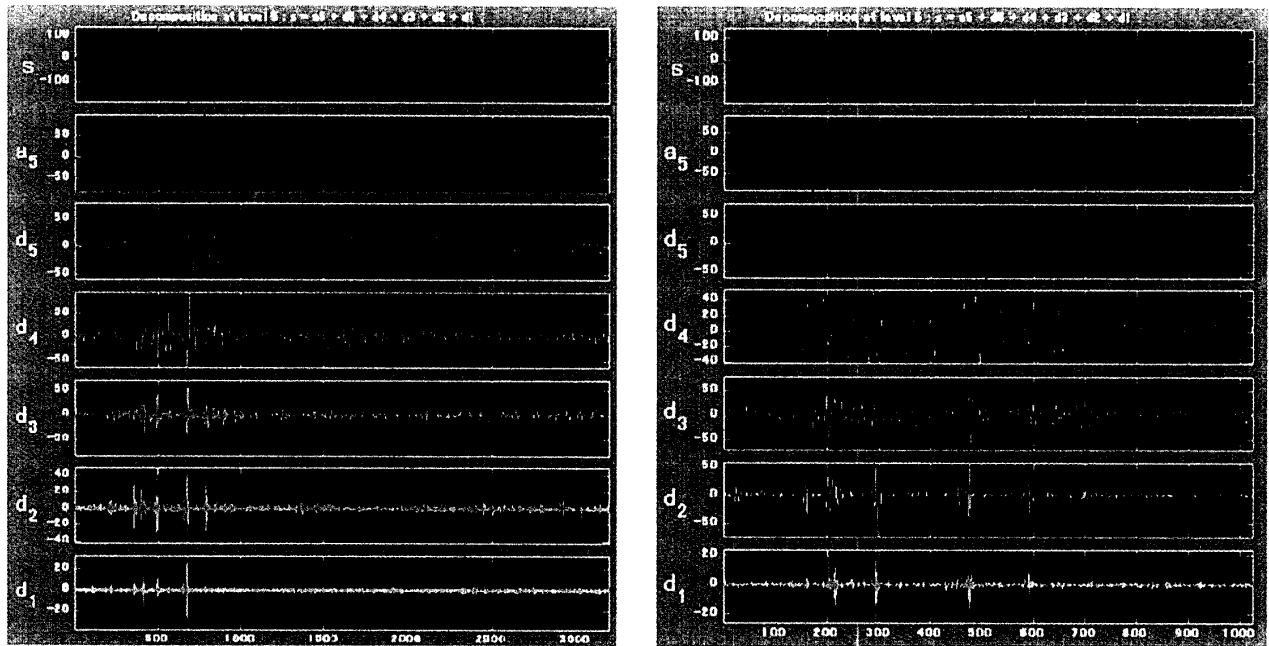


Fig. 10. Continuous wavelet analysis of epileptic EEG signal (Fp1) with Daubechies wavelet (N=4). Maximum decomposition level is 5. S shows original signals, either whole or part of Fp1. S has been decomposed into lower frequency “approximate” part a1 and higher frequency “detail” part d1. Then, a1 has been decomposed into a2 and d2, and this continues till decomposition level 5. A5 is the lowest frequency part of the decomposition.

号に対する連続ウェーブレット変換係数を図 9c,d,e,f に示す。横軸は時間（または空間）b、縦軸は連続ウェーブレット変換のスケールレベル a を表す。スケールレベルの最大値は図 9c,d で  $a=48$ 、図 9e,f では  $a=128$  である。また、用いた Daubechies のウェーブレットの次数は、図 9c,d で  $N=4$  (db4)、図 9e,f で  $N=8$  (db8) で、1 ステップごとに計算した。青い色から赤い色に向うほど、ウェーブレット変換係数の値が大きくなる。

図 10 は Daubechies  $N=4$  によるウェーブレット変換（分解レベル 5）の結果をしめすもので、各分解レベルにおける波形を表す。前述のとおり信号  $s$  は、 $s=a_5+d_5+d_4+d_3+d_2+d_1$  で表される。D1 から d5 に向うにつれて、周波数が低くなる。最終的に得られる低周波成分が  $a_5$  に相当する。Fourier 解析では検出できなかった異常脳波の低周波成分（徐波）の特徴がよく描出されている。

#### 4. 結語

癲癇性異常脳波の Fourier 解析及びウェーブレットパケット解析及び連続ウェーブレット解析を行い、既報の正常脳波に対する解析の結果と比べた。正常脳波の Fourier 解析では  $\alpha$  波が顕著に検出されたのに反して、癲癇性異常脳波では 10-20 法で測定された何れの波形にも  $\alpha$  波は認められなかった。また、Fourier 解析では  $\beta$  波や異常脳波の特徴である徐波（ $\delta$  波）も検出できなかった。これは、周期性のない局在性信号の解析に Fourier 解析が適していないことを示している。正常脳波と異常脳波の何れにおいても、パワースペクトルには  $1/f^\alpha$  のゆらぎが見られた。一方、ウェーブレット解析では徐波や棘波や鋭波を含め、局在性異常脳波が鮮明に検出できた。今後は、ウェーブレットによる種々

の異常脳波の診断可能性や脳波スパイクの自動検出について検討する予定である。

#### 謝辞

癲癇性異常脳波を提供して下さった Prof. Vladimir. Krajca (Dept. Neurology, Faculty Hospital, Bulovka, Budinova 2, CZ-18081, Prague 8, Czech Republic) に感謝いたします。

#### 参考文献：

- [1] 宮坂松衛、福澤等：「プリンシパル臨床脳波」、日本医事新報社。
- [2] 山口千里、山西輝也：「ウェーブレットによる心電図波形解析の試み」、福井工業大学研究紀要 29 号 第1部 273-280 (1999)。
- [3] 山口千里：「ウェーブレットによる脳波信号の解析」、福井工業大学研究紀要 30号 第1部 309-316 (2000)。
- [4] Prof. Vladimir. Krajca, Dept. Neurology, Faculty Hospital, Bulovka, Budinova 2, CZ-18081, Prague 8, Czech Republic.
- [5] I. Daubechies, "Ten Lectures on Wavelets", SIAM, Philadelphia (1992).
- [6] I. Daubechies, "Orthonormal bases of compactly supported wavelets", Comm. Pure and Appl. Math. 41, 909-996 (1988).
- [7] K. Chui and J.Z. Wang, "On compactly supported spline wavelets and a duality principle", Trans. Amer. Math. Soc. 330, 903-915 (1992).
- [8] D. Gabor "Theory of communications", J. IEE (London), 93, 429-457 (1946).
- [9] 榊原進「ウェーブレットビギナーズガイド」、東京電機大学出版局 (1995)。
- [10] 芦野隆一、山本鎮男「ウェーブレット解析」、共立出版社 (1997)。
- [11] M. Kobayasi, Ed., "Wavelets and Their Applications", SIAM, Philadelphia (1998).
- [12] J.J. Benedetto and M.W. Frazie, "Wavelets: Mathematics and Applications", (山口昌哉、山田道夫、訳「ウェーブレット：理論と応用」、Springer 東京 (1994))。
- [13] E.S. Goldensohn, "Neurophysilologische Grundlagen der EEG-Aktivitaeten.". In D.W. Klass and D.D. Daly (Hrsg) Klinische Elektroenzephalographie, Fischer, Stuttgart, S 379-395 (1984).
- [14] D.E. Newland, "An Introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis", 3<sup>rd</sup> Ed., Longman, Edinburgh Gate, (1993).
- [15] E. Hernandez and G. L. Weiss, "A First Course on Wavelets", CRC Press 1996, 邦訳：芦野隆一、萬代武史、浅川秀一、「ウェーブレットの基礎」、科学技術出版 (1999)。

(平成12年12月7日受理)