

ウェーブレットによる脳波信号の解析

山 口 千 里*

Wavelet Analysis of Electroencephalogram

Chiri Yamaguchi

The purpose of this work is to study feasibilities to analyze Electroencephalogram (EEG) signals using Fourier transform (FFT) and wavelet transform (WT) as well as wavelet packet transform (WPT) in order to estimate nerve activities in the brain. The power spectra of EEG showed $1/f^\alpha$ fluctuations over the frequency on which a corresponding α -wave has been clearly observed but not other waves. WT and WPT analyses were found to be appropriate to detect local slow wave components of EEG. Further analysis will be necessary for the automatic detection of various peak shapes of EEG

1. 緒言

筆者らは、昨年度ウェーブレット変換を用いて、Massachusetts Institute of Technology の心電図データベース (MIT-BIH) から得た心電図のウェーブレット解析を行い、結果を報告した。時間 - 周波数位相空間のプロット図には心電図パルス系列が明確に現れ、不連続波形の検出に有効であった。解析した心電図パルス系列及びパルス波形は単純であったために、マザー・ウェーブレットは単純なものが適しているように見られた。

本年度は、心電図よりも遥かに複雑な様相を呈する脳波信号のウェーブレット解析を試みた。本研究の動機は非侵襲的に測定された脳波の局所的特徴をウェーブレット変換により解析し、脳の神経活動の状態を推定する可能性を検討することにある。さらに、最終的には脳疾患の診断や異常脳波発生の予測に役立てることを目標とする。

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ある。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。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。

脳波信号データは脳機能研究所（武者利光社長）により典型的なデータを提供して戴いた。初期解析の結果を紹介し、今後の方針を示した。

* 経営工学科

2. Fourier 変換とウェーブレット変換

関数 $f(t)$ の Fourier 変換は次のように表される。

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

Fourier 変換の定義は幾つかあり、上の式は電気工学で一般に用いられている標記であるが、物理学で一般に用いられる式では、指数関数の符号がこれと逆になる。また、係数 $1/\sqrt{2\pi}$ を含む定義もある。本論文で用いた Mathematica Ver.4 (Wolfram Research Inc)では、

$$G(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{i\omega t} dt \quad (2)$$

のように定義されている。また、長さ n のリスト a_r の Fourier 変換 b_s は、

$$b_s = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{r=1}^n a_r e^{2\pi i(r-1)(s-1)/n} \quad (3)$$

で与えられている。

ウェーブレット変換に関する参考書には種々のものがある[2~14]。アナライジング・ウェーブレット（または、マザー・ウェーブレット） $\psi(x)$ による関数 $f(x)$ の連続ウェーブレット変換は次のように定義される。ここでは、慣用的に上記の時間 t の代わりに変数 x を用いる。

$$(W_\psi f)(b, a) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{a}} \overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)} f(x) dx \quad (4)$$

$\psi((x-b)/a)$ は $\psi(x)$ を b だけ平行移動し、 a 倍伸縮（スケール）したものである。 a はスケール・パラメータと呼ばれ、 $1/a$ は周波数に対応する。 $\psi(x)$ は実関数であるので、複素共役 $\overline{\psi(x)}$ と $\psi(x)$ の区別はいらない。実際の計算にあたっては、座標 $(b, 1/a)$ を $(2^{-j}k, 2^j)$ と置いて（4）式を離散化する。離散ウェーブレット変換は以下の式で表される[13]。

$$d_k^j = 2^{j/2} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\psi(2^j x - k)} f(x) dx \quad (5)$$

信号平面は幅（時間）が $1/2^j$ 、高さ（周波数）が 2^j の長方形のセルに分割され、夫々のセルが番地 (k, j) に対応する。 d_k^j の値をセル (k, j) 対応させると、各セルの面積は一定（＝

α) になる。

ウェーブレット変換による時間周波数解析では、 $j \rightarrow -\infty$ で時間周波数窓が時間方向に伸びてしまい、局所的時間解析ができなくなる。この問題を解決するために、ウェーブレットパケットという方法が考えられている[15]。ウェーブレット変換(WT)では低い周波数に対応する空間を分解するのに対し、ウェーブレットパケット変換(WPT)変換では高低両方に対応する空間を分解する。

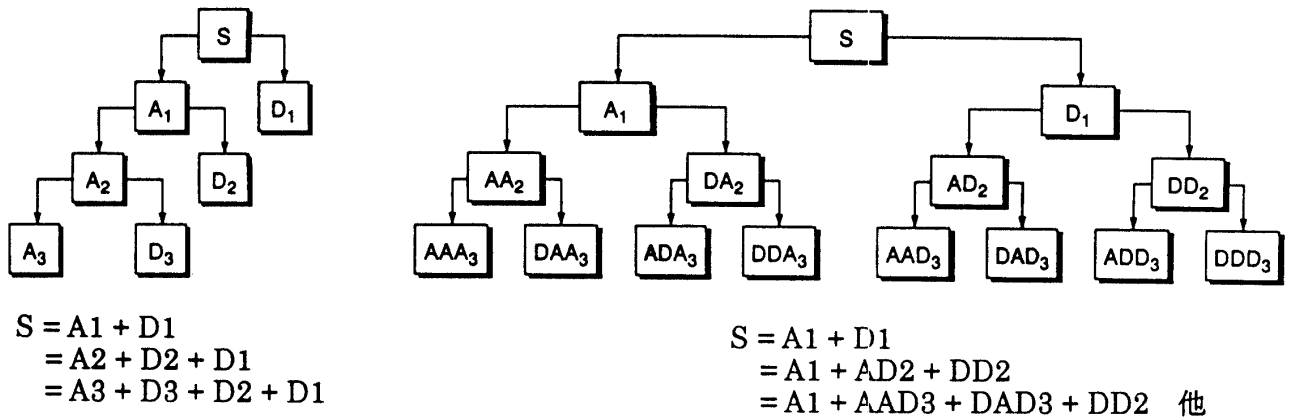


図1. ウェーブレット解析とウェーブレットパケット解析の分解木。左図のウェーブレット解析では信号Sは近似A1と詳細D1に分解され、その近似はさらに近似A2と詳細D2に分解され、これを繰り返す。右図のウェーブレットパケット解析では、近似A1も詳細D1も近似と詳細に分解される。

3. 脳波データ

脳波データは脳機能研究所により典型的なデータを提供して戴いた。脳波の測定法には種々の方法があるが、これらのデータは30歳位の正常な者から、覚醒時に脳波測定国際規格である10-20法で測定されたものである。この測定法では19個の頭皮上電極および基準電極とアース電極の合計21の電極が用いられる(図2)。

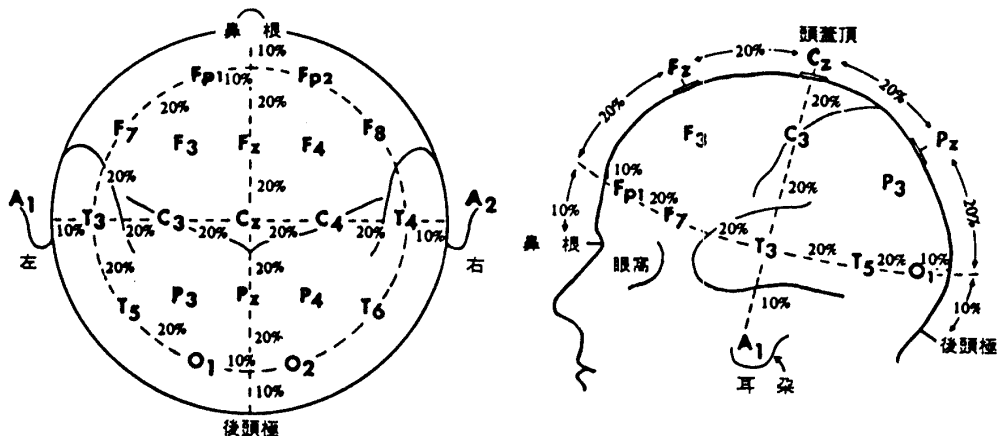


図2. 10-20法の基準的電極配置を示す上面図(左)と側面図(右)(Goldensohn 1984) [16]

与えられた脳波データを次図3に示す。データは100Hzのサンプリング周波数で記録されたもので、全体で8192 ($= 2^{13}$)個ある。即ち、測定時間は約14分(819秒)間である。通常、脳波の振幅は基準点を0Vとして上下に20~70 μ V振れる。この電圧は心電図で測定される電圧の1000分の一程度しかない。紙に記録する場合は1秒間に3cmと定められているので、実際には820秒間で約2.5mの長さになる。

緒言でも述べたように、脳波は非常に複雑で、年齢、脳内活動、体の状態、導出方法(電極の数や配置、取付け方)、脳内病巣(腫瘍など)の有無、その他の病状、等で大きく変る。また、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。

脳波の周波数は大きく四つの帯域に分けられ、周波数の低い方から δ 波(0.5~4Hz)、 θ 波(4~8Hz)、 α 波(8~14Hz)、 β 波(14~30Hz)と呼ばれる。 α 波を基準として、それより遅い θ 波と δ 波を徐波、 α 波よりも周波

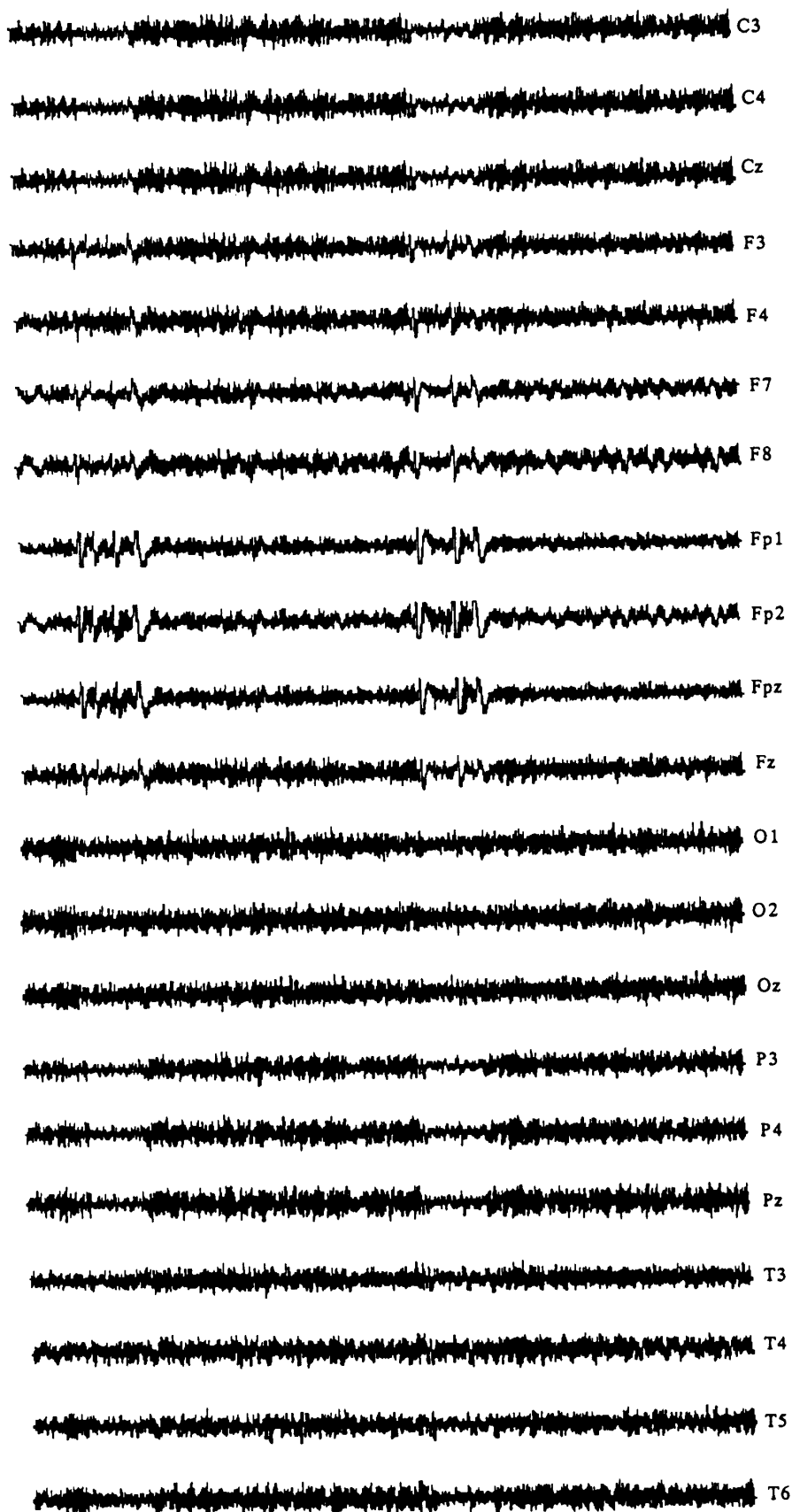


図3. 典型的な脳波信号データ(脳機能研究所より提供)

数の高い成分を速波と呼ぶ。30Hz 以上の波は γ 波と呼ばれる。正常成人の覚醒安静閉眼時の脳波は α 波の律動が主成分で、多少 β 波を含む。脳波の検査対象とされる病状には、「意識障害、知能障害、失神、痙攣、情緒障害、行動異常、中枢性運動感覚障害、言語障害、その他」がある[17]。脳波の参考書にざっと目を通しただけで、そのあまりの多様性に驚かされる。

4. 解析結果

4.1 Fourier 解析

まず、一部の脳波データ (C3、F7、Fp1) のパワースペクトルを図 4 に示す。パワースペクトルは Fourier 変換の絶対値の二乗で表される。横軸はデータのサンプル (チャンネル ch) 番号である。Fourier 変換では最大サンプル周波数の半分の周波数までしか解析できない (サンプリング定理) ので、最大チャンネル番号 (横軸) は 4096 である。これは周波数にして 50Hz に対応する。800ch 付近のピークは α 波 (10Hz の近傍) に対応している。 α 波の右に小さな β 波 (14~30Hz) のピークを認める。10~100ch (約 0.1~約 1Hz) の間の構造については明確なことは言えない。しいて言えば、 δ 波の成分が現れていると見えなくもない。パワースペクトルには全体として $1/f^\alpha$ のゆらぎ[18,19]が見られる。他部位の脳波のパワースペクトルも似通った形状を示している。解析は Mathematica v.4 で行った。

4.2 ウェーブレット解析

図 5 に脳波 C3 (図 5a) に対するウェーブレット packets 変換の時間-周波数空間プロット (図 5b) を示す。マザーウェーブレットには Daubechies (N=4) を用いた。横軸は時間、縦軸は周波数 (最大は $2 \times$ 分解の深さ=8) を表す。図 5c にウェーブレット packets 分解係数を示す。横軸は時間、縦軸は周波数を表す。同様に、図 6 に脳波 Fp1 の一部 (500~1523ch) (図 6a) に対するウェーブレット packets 変換の時間-周波数空間プロット (図 6b) とウェーブレット packets 分解係数 (図 6c) を示す。図 6c のウェーブレット packets 分解係

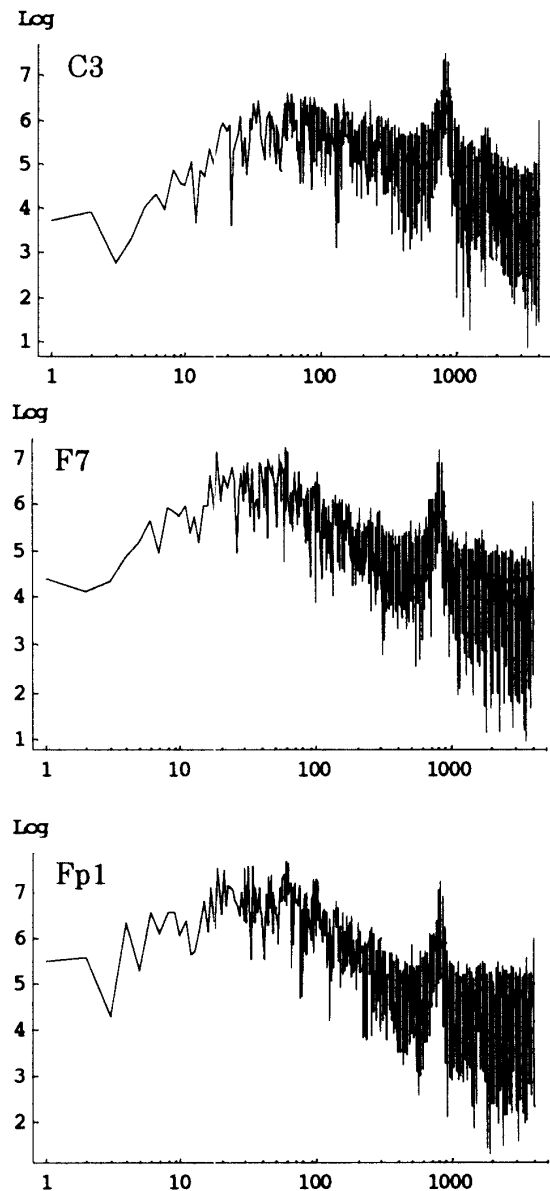


図 4. 脳波データのパワースペクトル。横軸は相対周波数、縦軸は対数の指標を表す。

数には、脳波のスパイクの位置が良く現れている。解析には Mathematica を用いた。

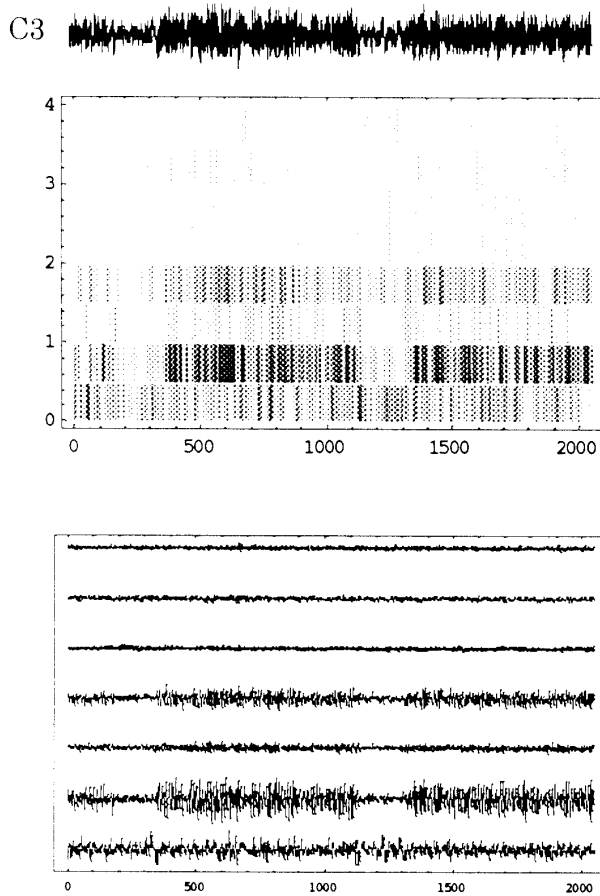


図 5. a) 脳波信号 C3 に対する、b)ウェーブレットパケット変換の時間・周波数プロットと、c) ウェーブレットパケット係数。横軸は時間、縦軸は周波数を表す。(Daubechies N=4)

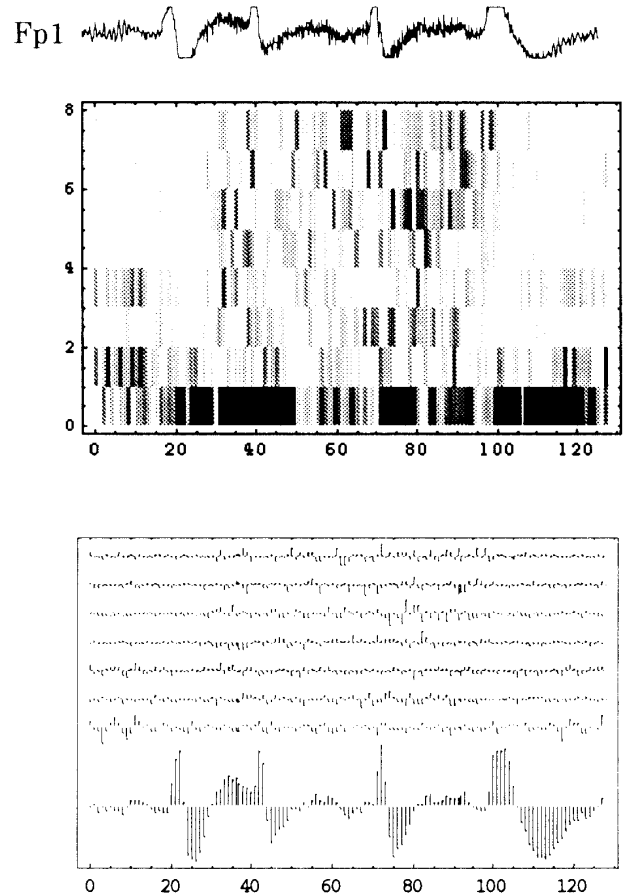


図 6. a) 脳波信号 Fp1 の一部に対する、b)ウェーブレットパケット変換の時間・周波数プロットと、c) ウェーブレットパケット係数。横軸は時間、縦軸は周波数を表す。(Daubechies N=4)

次に、MATLAB (The MathWorks Inc.)による連続ウェーブレット解析の結果を図7示す。横軸は時間 (チャンネル番号、最大値 8196)、縦軸はスケールを表す。マザーウェーブレットには Daubechies (N=4)を用いた。左上は脳波信号 C3、左下は C3 のうちの 500~1011ch (512 = 2^9 ch 分) を取出したもの、右上は脳波信号 Fp1 に対するものである。マザーウェーブレットは Daubechies N=4 で、スケール (分解のレベル) は左上が最大 128、その他は 48 である。低周波数の成分が良く認識される。

図 8 も同様に Daubechies N=4 によるウェーブレット解析 (分解のレベル 4) の結果で、各レベルにおける波形を示したものである。D1 から D4 に行くにしたがって、周波数が下がっていく (図 1 を参照)。色の具合で判りにくい、A4 では低周波成分が描出されている。

4. 考察

Fourie 解析によるパワースペクトルでは、脳波のうちの α 波成分しか検出できなかった。長時

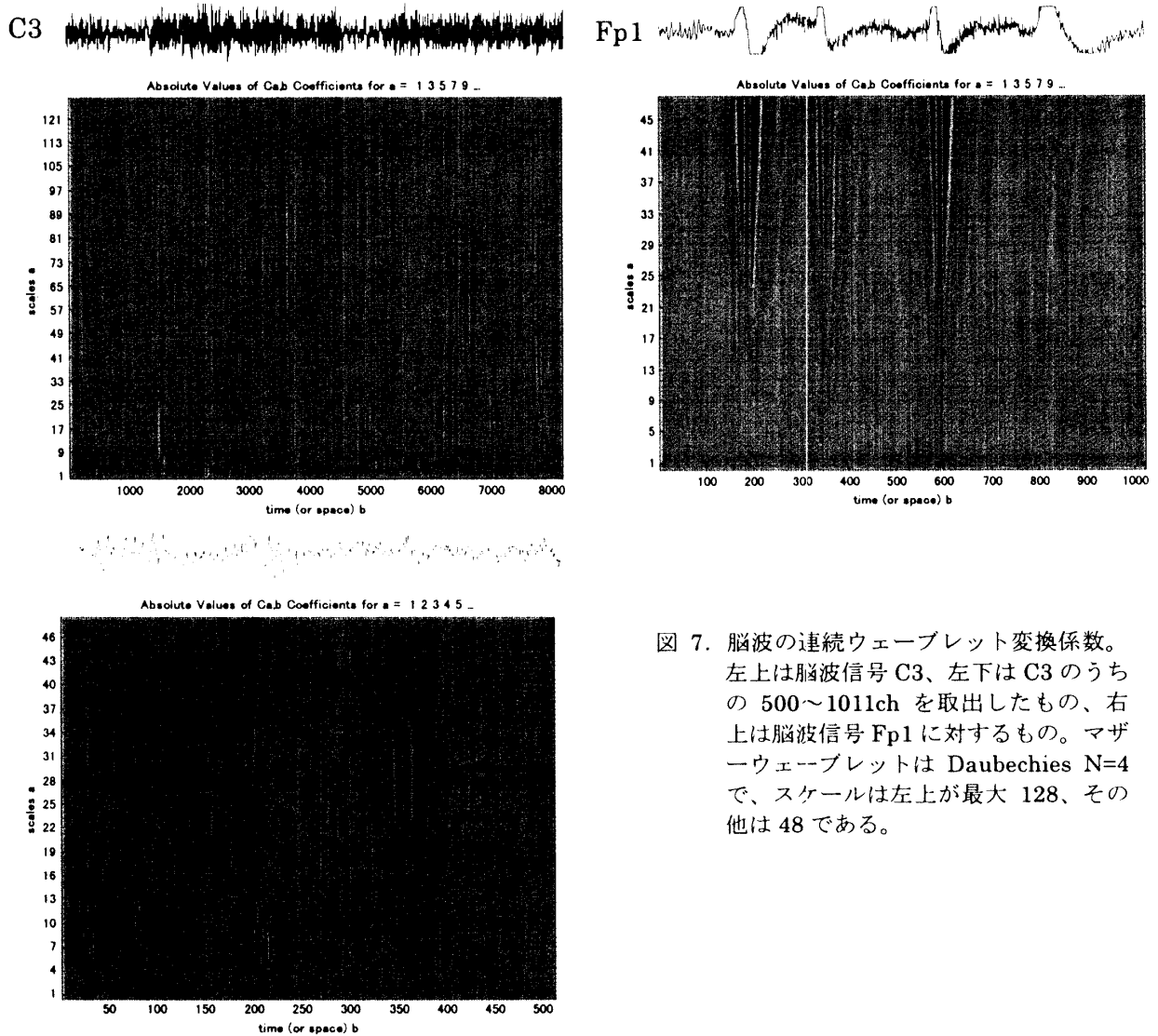


図 7. 脳波の連続ウェーブレット変換係数。
左上は脳波信号 C3、左下は C3 のうちの
500~1011ch を取出したもの、右上
は脳波信号 Fp1 に対するもの。マザ
ーウェーブレットは Daubechies N=4
で、スケールは左上が最大 128、その
他は 48 である。

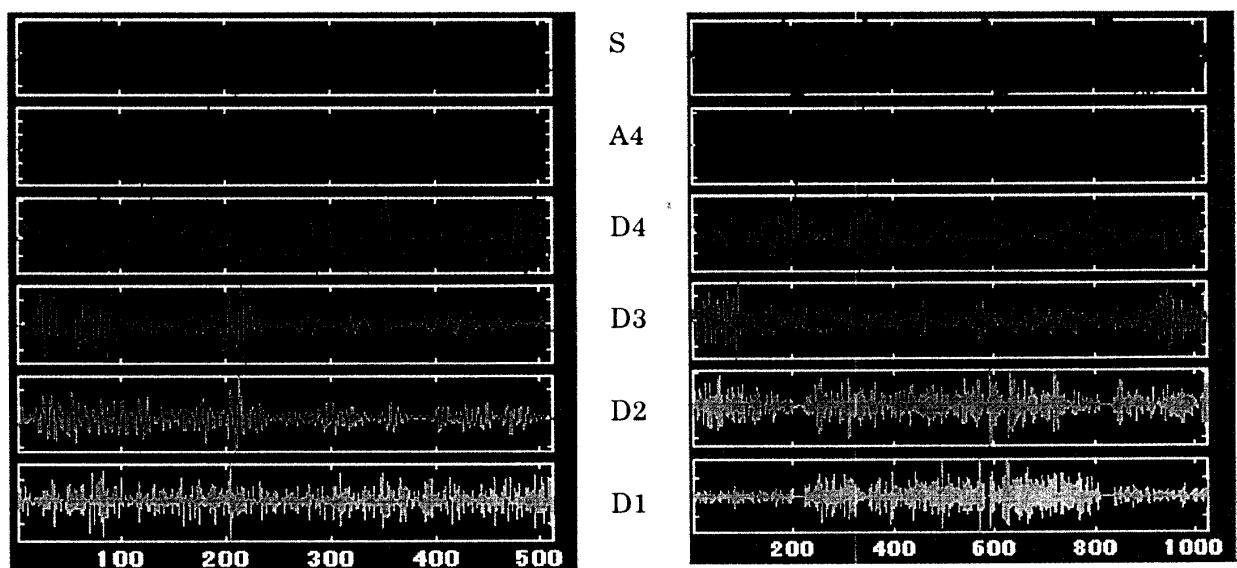


図 8. Daubechies (N=4, level=4)による連続ウェーブレット解析。S は元の脳波信号、記号 D1~D4、A4 の
意味は図 1 を参照のこと。左は図 7 の左下の脳波、右は図 7 の右上の脳波に対応している。

間の脳波のパワースペクトルには全体として $1/f^\alpha$ のゆらぎが見られた。脳波信号のウェーブレット解析では、局所的低周波成分が良く描出できた。今回は Daubechies のマザーウェーブレットのみを用いたが、対象とする脳波信号の波形により、他のマザーウェーブレットによる解析も試みたい。さらに、ウェーブレットによる脳波スパイクの自動的検出を試みる予定である。

謝辞

本解析にあたり、脳波信号データをご提供下さった脳機能研究所（社長：武者利光）に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 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 第29号（第一部）、273-280（1999）。
- 2) C.K. Chui, "Introduction to wavelets", Academic Press, New York, 1992.（桜井明、新井勉、訳「ウェーブレット入門」東京電機大学出版局、1993）。
- 3) I. Daubechies, "Ten Lectures on Wavelets", SIAM, Philadelphia (1992).
- 4) G. Kaiser, "A Friendly Guide to Wavelets", Birkhaeuser, Boston, (1994).
- 5) Y. Mener, "Wavelets: Algorithms and Applications", SIAM, Philadelphia (1993).
- 6) C.K. Chui and J.Z. Wang, "On compactly supported spline wavelets and a duality principle", Trans. Amer. Math. Soc. 330, 903-915 (1992).
- 7) I. Daubechies, "Orthonormal bases of compactly supported wavelets", Comm. Pure and Appl. Math. 41, 909-996 (1988).
- 8) D.E. Newland, "An Introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis", 3rd Ed., Longman, Edinburgh Gate, (1993).
- 9) G.G. Walter, "Wavelets and Other Orthogonal Systems With Applications", CRC Press (1994).
- 10) C.K. Chui, "Wavelets: A Mathematical Tool for Signal Analysis", SIAM, Philadelphia (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) 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）。
- 14) 芦野隆一、山本鎮男「ウェーブレット解析」、共立出版社（1997）。
- 15) D. Gabor "Theory of communications", J. IEE (London), 93, 429-457 (1946).
- 16) E.S. Goldensohn, "Neurophysiologische Grundlagen der EEG-Aktivitäten." In D.W. Klass and D.D. Daly (Hrsg) Klinische Elektroenzephalographie, Fischer, Stuttgart, S 379-395 (1984).
- 17) 宮坂松衛、福澤等「臨床脳波」、日本医事新報社、東京（1986）。
- 18) 武者利光「ゆらぎの世界」、講談社（1980）。
- 19) 武者利光、ゆらぎ科学研究会編「ゆらぎの科学 1～9」、森北出版。

（平成11年12月6日受理）