

脳波の時間周波数解析システムの開発とその解析結果

古賀 義亮・軽部 幸浩・谷口 泰富

Development of EEG Time-Frequency Analyzing System and Some Given Results

Yoshiaki Koga (Former Professor of National Defense Academy, Japan)

Yukihiro Karube and Yasutomi Taniguchi (Department of Psychology, Komazawa University, Japan)

ABSTRACT

Presently, the short time Fast Fourier Transform (FFT) is applied to analyze EEG as a major frequency analyzing method. The time-frequency analyzing methods have been developed recently as the Cohen class based on the Wigner distribution. In this paper, a modified time-frequency analysis for EEG is presented with development for the field application and some given results. In the first stage of this study, the EEG analyzing system, code name KOMA 04, is developed on the MATLAB platform for time-frequency analysis of EEG. To verify the properties of the KOMA 04 system, a signal generation system to simulate EEG is also developed and the specification of the KOMA 04 is evaluated exhaustively. As the second stage, actual EEG were analyzed by using the KOMA 04 system, where EEG were collected from university students (five males and four females) with 15~30 minutes record time by stimulation given 10~20 oral questions and special sound. Some results are described in this paper. We observed new phenomena which will become a problem about the relation between EEG and psychological processes. The precise time-frequency analysis of EEG is developed as shown and further studies will be directed to the causal relation between human psychological state and EEG as problems by given results.

KEY WORDS: EEG, Time-Frequency Analyzing

はじめに

脳波の周波数による解析は、これまでに短時間フーリエ変換によるものが主流である。周波数が時間とともに変化するような信号について短時間フーリエ変換により解析をおこなう場合、周波数領域での分解能を上げるためには時間幅を長く設定する必要があり、周波数が連続的に変化するような信号はそれが原因となって階段状に表示される。また時間幅を短く設定すると周波数の分解能が下がるために、解析結果は上述と同じ理由から階段状に表示されることは避けられないという問題点があった。このことはフーリエ変換の時間周波数不確定性といわれている。

ウィグナー分布をもとに拡張した時間周波数解析が、コーエンにより1995年に公表されている。それ以来コーエンクラスと呼ばれている時間周波数解析手法は、フーリエ変換の時間周波数不確定性を克服するものとして注目されるようになってきている。ここではこのコーエンクラスによる脳波の時間周波数解析をとりあげ、その研究の背景ならびに研究成果について解析例をあげて記述する。

まずコーエンクラスの時間周波数解析を実施するために、信号解析を目的としたMATLABをプラットフォーム（脳波分析をおこなうシステムを記述するために基礎となるソフトウェアのことをさす）として、脳波の時間周波数解析システム（KOMA 04）を新規に開発したのでその概要を述べる。このコーエンクラスによる脳波の時間周波数解析システムは、初心者でも容易に操作できるようにMATLABの持っているGUI（Graphic User Interface；図的表示による操作容易化）機能を有効に利用し、しかも分析結果表示がわかりやすくできるように作成している。また作成したシステムの能力と性能を評価するテスト信号を生成するためのシステムを作成して、脳波の時間周波数分析システムの性能評価を実施している。

新たに開発した脳波の時間周波数解析システムにより、20歳代9名の被験者から脳波を記録して分析を実施した。その中から特徴的な分析結果について報告する。本論文に記述する θ 波、 α 波、 β 波に関する分析結果は、これまでに解析困難であったと考えられる事象を明らかにしている。なお、最後に今後の課題と展望について述べ

る。

研究経過の概要

駒澤大学文学部心理学科では、かねてより教育ならびに研究のため脳波の記録・分析がおこなわれており、優れた機材も整備されている。これまで、この機材によりペンプロッタ記録による脳波信号情報をもとに分析を実施してきている。

最近になって周期的現象の解析にあたり、これまでのフーリエ変換による周波数分析の時間と周波数解析に関する問題点を克服する手段として、新たな時間周波数解析手法が数多く提唱されている。ここでは脳波の分析について、さらに精度を高く、しかも解析を容易にすることを目的とした脳波の時間周波数解析システムを試作した。このシステムの導入は、提唱されている時間周波数解析手法による脳波分析の有用性を明らかにしている。

さらにこのシステムを用いて、脳波分析をおこなって、これまでに不明確であった脳波の周波数が増加する様相をとらえることができるようになってきている。

時間周波数解析

時間周波数解析の研究には、現在のところウェーブレット関数による手法とコーエンクラスによる手法の二つが大きな流れとしてある。これまで脳波分析が周波数帯域によって θ 波、 α 波、 β 波のように分類されていることから、ここでは周波数分析に直接かわりあいがあるコーエンクラスの時間周波数解析手法を用いる。

コーエンクラスの時間周波数解析は、ウィグナー分布がもとになっている。ウィグナー分布は t を時間、 ω を角周波数 (rad)、時間関数を $s(t)$ として次の式で表される。

$$W_s(t, \omega) = \int s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j\omega\tau} d\tau$$

$$= \mathcal{F}_{\tau \rightarrow \omega} \left[s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \right]$$

(係数 $\sqrt{2\pi}$ は無視)

z^* : z の複素共役 ($z = a - bj$ のとき $z^* = a + bj$)

$s(t)$: 解析信号に変換する必要がある

注: $W_s(t, \omega)$ を $W(t, \omega)$ と書くこともある

このウィグナー分布に関して、次の式に表すよ

うな核関数を導入して時間周波数解析をおこなう方式をコーエンが提唱し、コーエンクラスの時間周波数解析として以下の理由で、注目されるようになっていく。

時間とともに周波数が増加するチャープ信号 (chirp signal) の解析は、短時間高速フーリエ変換を用いる場合、フーリエ変換の本質的な特性、すなわち解析をおこなう時間については一定の周波数として計算処理しなければならない。チャープ信号のように時間とともに周波数が増加する信号の解析に関してフーリエ変換は適していない。ウィグナー分布をもとにしたコーエンクラスの時間周波数解析は、時間とともに周波数が増加するチャープ信号解析にも有効な手法とされている。

コーエンクラスの核関数には多くの方式が提案されている (コーエン, 1998; 吉川, 1996 a~1996 f)。核関数によって分析結果の表示が異なっていることから、解析対象の信号に適した核関数を用いることで時間周波数の持つ特徴が抽出できる。このことから核関数の選択が一つの研究対象にもなっている。

コーエンクラスの時間周波数分布は、解析しようとする信号を $s(t)$ とするとき、次のように定義されている。

$$C_s(t, \omega) = \iiint s\left(u + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) \times \phi(\theta, \tau) e^{-j\theta t - j\tau\omega + j\theta u} du d\tau d\theta$$

$$= \iint A_s(\theta, \tau) \phi(\theta, \tau) e^{-j\theta t - j\tau\omega} d\tau d\theta$$

$$= \mathcal{F}_{\tau \rightarrow \omega} [\mathcal{F}_{\theta \rightarrow t} [A_s(\theta, \tau) \phi(\theta, \tau)]]$$

(定数係数は無視)

$$A_s(\theta, \tau) = \int s\left(u + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) e^{j\theta u} du$$

(Ambiguity 関数)

$$= \mathcal{F}_{u \rightarrow \theta}^{-1} \left[s\left(u + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) \right]$$

(定数係数は無視)

$\phi(\theta, \tau)$: 核関数という。 $C_s(t, \omega)$ を $C(t, \omega)$ と書く。

ここでは、コーエンクラスの核関数としてチョイ・ウィリアムス (Choi-Williams) および2次元ガウス分布関数を用いて脳波の解析をおこなっている (図 1, 2)。

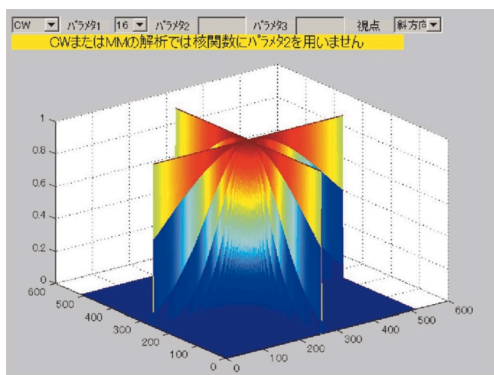


図1 チョイ・ウィリアムス (Choi-Williams) 核関数

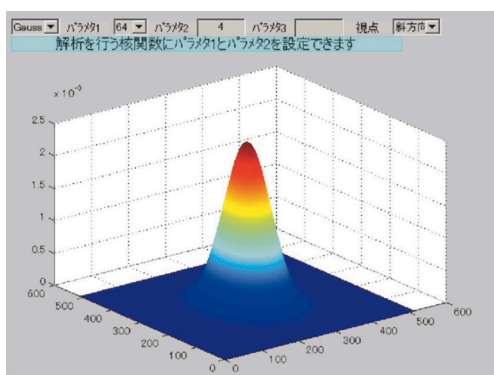


図2 ガウス分布関数による核関数

作成した脳波時間周波数解析システムの概要

今回作成した脳波の時間周波数解析システム(開発コード名KOMA 04, 以下KOMA 04と略称する)は, 駒澤大学文学部心理学科において研究と教育に利用している脳波計で記録されたデジタル記録データの解析を目的としている。KOMA 04は, 各種信号解析システムMATLAB 6 (Service Pack 1)をプラットフォームとして作成した。

KOMA 04は三つの主要部分, 脳波計データファイル識別部, 脳波データ抽出部, および時間周波数解析部から構成されている。

脳波計データファイル識別部は, 利用者が容易に脳波計の原データファイルを指定することができるようにした。また指定されたファイルのヘッダ部分から, 次段階の脳波データ抽出に必要なパラメタ, すなわち時間あたりのサンプル数, チャンネル数, モンタージュ方式による記録かエ

図3 指定された脳波計出力データの確認要求の例

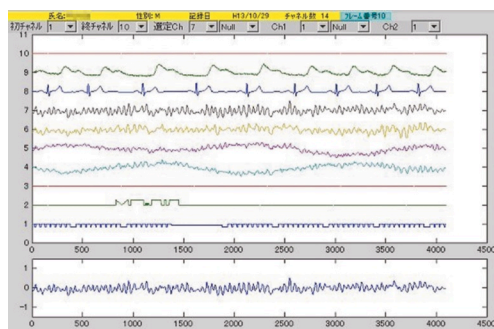


図4 脳波データ抽出部の表示例(図面の下部部分に指定されたチャンネルのデータが表示されている)

クトロードの直接記録かなどの情報を取り出す(図3)。

脳波データ抽出部は, 記録されている全チャンネルのデータをチャートとして表示する。これをもとにして, 観測したい範囲のチャンネルの指定をおこなうことができ, 次段階の時間周波数解析をおこなうため指定されたチャンネルのデジタルデータを作成する(図4)。チャンネル間のデータの演算をおこなうこともできるように作成されており, モンタージュ記録されたチャンネル間の信号についても演算ができる。これにより脳波測定用電極間をダイポール(双極)とみなして解析ができる。特にエレクトロード記録による直接記録の場合は, アーチフェクトを軽減するためにこの演算を実施することが必要である。

時間周波数解析部はKOMA 04の主要部分である。データのサンプル周波数は1秒間あたり500ポイントとして, 4096ポイントごとに2画面, すなわち約4秒分のデータの時間周波数分布を1フレームとして読み込み表示する。表示結果

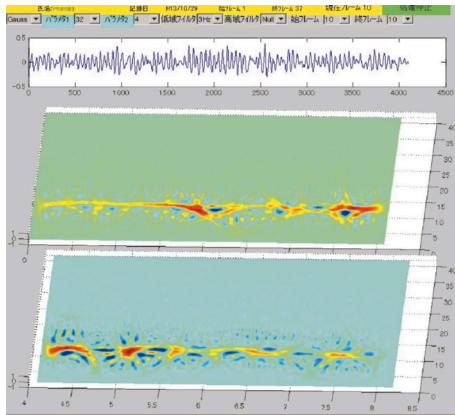


図5 時間周波数解析部による解析結果表示例
(図面の上部に解析ファイル名、フレーム番号が示され、解析するチャンネルの信号波形が表示される。この例では約4秒間にわたって α 波が認められる)

の観察を容易にするため分布強度を色相区分する立体表示となっている。なお、周波数範囲は0~40 Hzである(図5)。これは多くの試行をおこなった結果、脳波の観測上最も都合のよい条件と思われる時間周波数のパラメータである。開発初期にはこれらのパラメータも変更可能としていたが、操作する上で煩雑になる経緯があったため固定値とした。

また、解析を連続しておこなうために、開始フレームと終了フレームを指定できる。このフレームの数は、前段階の脳波データ抽出部において計測された結果から決定される。さらに、抽出されたデータについて任意の解析範囲も指定できるとともに、注目したいフレームで停止させることも可能である。解析処理速度はコンピュータの処理速度に依存するが、プロセッサとして「3.2 GHz Pentium IV」による場合は、実時間に近い解析ができることを確認している。

時間周波数解析部は、低域阻止と高域阻止のフィルタを指定できるようになっている。脳波測定で基線変動が大きい場合は、KOMA 04による脳波解析において支障がある。低域阻止フィルタは、アーチファクトとしての基線変動の除去に極めて有効に働くことを確認している。一方、高域阻止フィルタは、脳波の原波形の雑音(ノイズ)を軽減するために効果があるが、脳波の時間周波数解析には大きな支障はない。KOMA 04によるこれまでの観測により、 β 波が認められるような

時間周波数解析結果表示に対しては、ペンプロッタの記録と比較しながら β 波の存在を確かめるために高域阻止フィルタが必要である。

脳波時間周波数解析システムの解析能力の評価

作成した脳波時間周波数解析システム KOMA 04 の解析能力を評価するために、疑似脳波信号発生システム(開発コード名 TSTGEN 04)を作成した。これにより複数の連続もしくは不連続の任意周波数信号、連続もしくは不連続のチャープ信号、任意レベルのガウス雑音を合成できる。TSTGEN 04 で作成された合成信号を KOMA 04 で分析することにより、KOMA 04 の解析能力を評価することができる。

特に、核関数のパラメータによって時間周波数解析の能力が微妙に変化することから、既知信号による評価手段を用いて観測結果の正確さを明らかにすることは重要なことである。図6は合成信号の作成の様子、図7および図8は疑似脳波信号の解析結果を示しているが、これより、核関数とその核関数とそのパラメータにより解析結果が変化する様子を読み取れる。

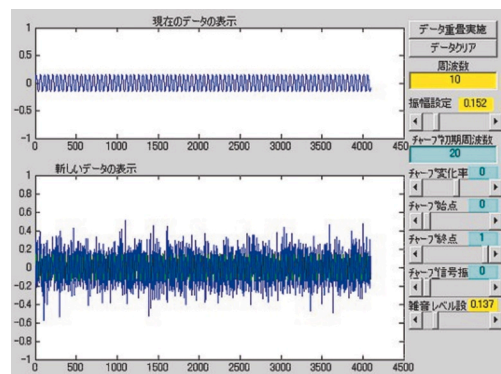


図6 疑似脳波信号発生システムによるテスト信号作成画面

ここでチャープ率は、初期周波数に対する1秒あたりの変化率であり、始点位置と終点位置は全フレームを1としたときの値である。したがって、初期周波数35 Hz、チャープ率-0.227の場合、1秒間あたり8 Hz ずつ減少し、始点位置0.061は1フレーム約8秒としたとき約0.5秒であり、4096ポイントについて250ポイント目になる。初期周波数5 Hz、チャープ率0.486では

約 2 秒後には 15 Hz となる。

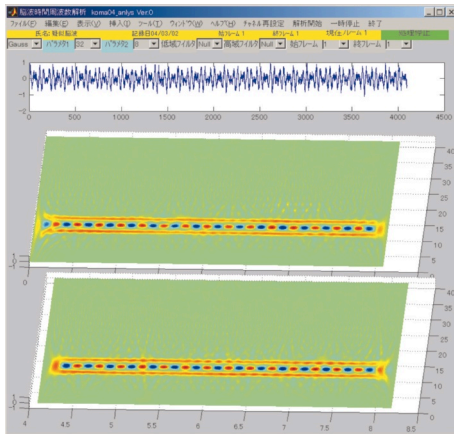


図 7 疑似脳波信号発生システムにより作成したデータ解析例 1 (10 Hz および 14 Hz の一定周波数一定レベルの複合信号に同一レベルのガウス雑音を重畳した信号。解析結果にクロス項が認められる)

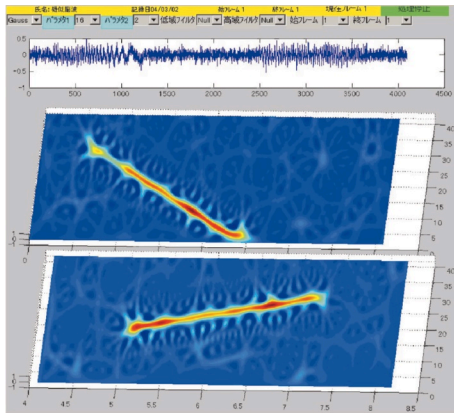


図 8 疑似脳波信号発生システムにより作成したデータ解析例 2 (二つのチャープ信号, 初期周波数 35 Hz, チャープ率 -0.227, 始点位置 0.061, 終点位置 0.303 と, 初期周波数 5 Hz, チャープ率 0.486 始点位置 0.607, 終点位置 0.895 に同レベルのガウス雑音を重畳した信号。雑音とのクロス項が認められる)

開発システムによる脳波の時間周波数分析結果

今回開発した脳波の時間周波数分析システム KOMA 04 を用いて, 2003 年 10 月~11 月にかけて, 20 歳代の男子 5 名および女子 4 名から記録した脳波データの解析を実施した。脳波の測定は

15~30 分であり, 測定中に 10~20 問の異なる口頭による質問, 音響刺激を与えた。この脳波すべてについて KOMA 04 による解析をおこなった。

ここでは数多くの解析結果の中から, 特徴的と思われる解析結果について記述する。

(1) α 波に関する解析結果

α 波が安静状態で発現することはよく知られている。今回実施した解析結果から, 一般的に α 波は時間的に安定した周波数であるといえる。また連続した α 波についても, その位相が変化する場合, 周波数が変化するように観測されることがあることがわかっている。例として前掲の図 5 は安定した α 波が出現しているフレームであるが, 1000 ポイントおよび 2500 ポイント付近で位相変化が周波数変化のように現れている。これは, 時間周波数解析において位相変化の解析は本質的におこなえないことが原因である。 α 波の位相変化は時間周波数分布表示において周波数の変動として現れたことで明らかにできる。したがって, α 波の位相変動は性質の異なる別の α 波であることが予想される。

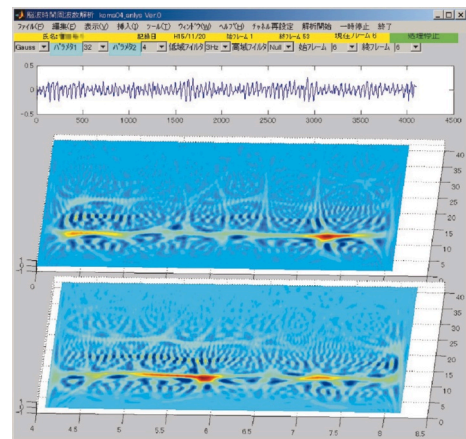


図 9 α 波の上に β 波が重畳している脳波の解析例

図 9 は, α 波の上に β 波が混在している解析例である。図 9 の上部に表示されている脳波の原信号波形から β 波の存在を明らかにすることは困難である。しかしながら, 解析結果からは β 波が混在していることが認められる。先に, ウィグナー分布の好ましくない特性として, 周波数が異なる二つの信号の間にはクロス項が現れるこ

とを述べたが、図9の α 波と β 波の間にクロス項が認められることから β 波の存在が確定できる。すなわち本来は好ましくない特性としてのクロス項の出現が、逆に観測が困難な信号の存在証拠となっている。

(2) β 波に関する解析結果

一般に、高域阻止フィルタをかけたモンタージュ記録での β 波の観測は必ずしも容易ではない。ペンプロット記録をおこなう場合は、雑音の高域周波信号による無用なペンの固有振動を抑制しなければならず、これが β 波がフィルタによって隠蔽される原因となる。したがって、ペンプロット出力から β 波を観測することも同様に困難なことがある。

図10はモンタージュ記録した信号波形について、KOMA 04により低域阻止フィルタを10 Hzまで高めて解析を実施した例である。低域阻止フィルタを10 Hzまで高めた理由は、 α 波を抑えて β 波を観測しやすくするためである。また、雑音成分を軽減するために高域阻止フィルタもかけてある。この例は、「二つの風景（具体的に提示）をイメージとして思い浮かべその差を考えなさい」という設問に対して、それをイメージしているときの脳波である。後に被験者本人は、「イメージがなかなか浮かばなかった」と述べておりその心的状態を表しているものと思われる。

α 波の後に数百ミリ秒間程度、30 Hz前後の高周波の β 波が出現していることが観察される。

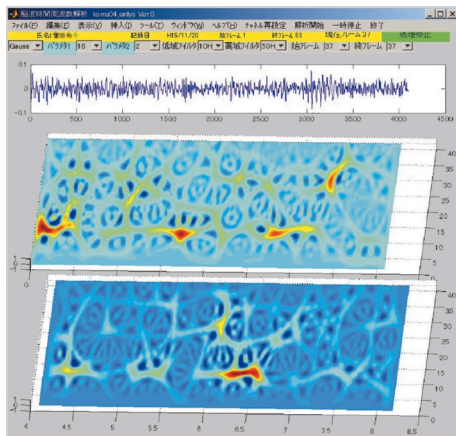


図10 β 波が多く出現する例（Cz電極のモンタージュ記録について、低域阻止フィルタをかけて α 波の影響を軽減してある）

このような解析結果を、図10の上部に記録してある原信号波形から抽出するのは困難である。さらにこの場合は、 β 波がチャープ状、すなわち周波数が時間とともに変動していることが観測される。 α 波がチャープ状になることは前述のようにあまりないと思われるが、 β 波についてはこれ以外にもチャープ状の β 波が多く観測されており、今後の解析検討課題となるであろう。

図11は、数学の双子素数について質問したときにみられた脳波である。脳波記録後の内省報告によれば、被験者は、双子素数のことを既に知識として持っていたということであり、これは突然の質問に対する知識照合過程で生じた β 波と推測される。

図12は脳波の記録を開始し、静粛にするよう指示している間の脳波であり、 α 波と β 波が交

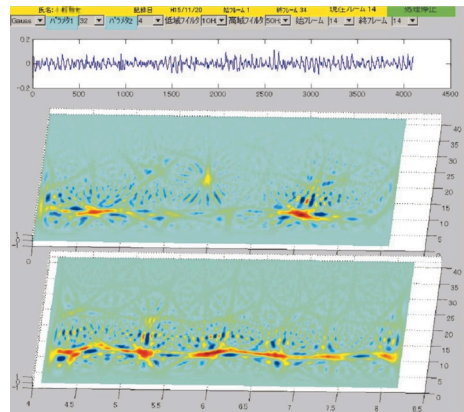


図11 独立して出現する β 波の例（ α 波とのクロス項から β 波の出現が確認できる）

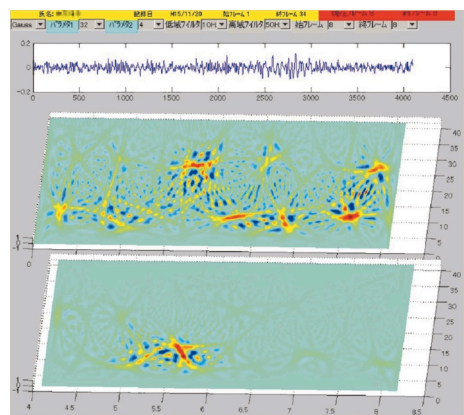


図12 α 波と交互に出現する β 波の例（ α 波とのクロス項から β 波の出現が確認できる）

互に出現している例である。

図13は、被験者に対して「四国には四つの県があります。その四つの県の名前を思い出してください」という指示下における Cz 電極モンタージュ記録脳波の分析結果である。後に被験者は、「どうしても一つの県名が思い出せなかった」と述べている。フレーム後半、 α 波が出現する直前の3000点から3500点にかけての信号に β 波が存在することは、クロス項の存在が認められることから確定できる。ここにみられる β 波は複雑な様相を呈しているが、現段階ではこのような例も少なく、質問と脳波の因果関係を明確にすることはできない。因果関係の究明のためには、同様の脳波についてさらに多くの解析が必要であり、

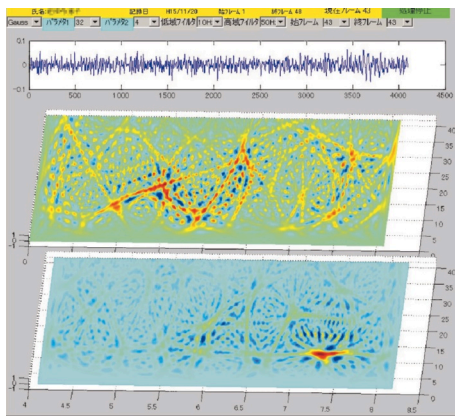


図13 β 波解析例 (Cz電極のモンタージュ記録について、低域阻止フィルタをかけて α 波の影響を軽減した解析)

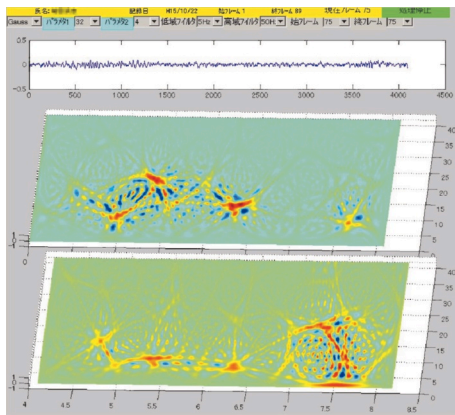


図14 α 波、 β 波が交互に出現している解析例 (エレクトロード記録の中からPz-Czダイポール電極、静かにしている状態で大声による驚愕刺激を提示)

今後の課題である。

図14は、 α 波と β 波が交互に出現している解析結果である。これはエレクトロード記録の中からPz-Czダイポール電極(双極導出)として取り出した信号を解析したものであり、被験者が静かにしている状態で、突然大声による驚愕刺激を提示したときのものである。突然の感覚刺激により β 波が出現し、その刺激が一過性のものであるという認識の後、その事態について思考を開始したものと推測される。

(3) θ 波に関する解析結果

θ 波の解析には基線変動の影響がともなうので、基線変動と θ 波の分離が必要であることからその解析は困難性をともなう。KOMA 04には、前述のシステム作成経緯で述べたように低域阻止フィルタが組み込まれており、これを適宜用いることで基線変動の影響を分離して解析をおこなうことができる。

図15は、低域阻止フィルタを3Hzに設定して解析をおこなったもので、図の上部の原波形からも基線変動がほとんどないことが確認できる。これは、エレクトロード記録の中からCz-Pzダイポール電極として取り出して解析したものである。被験者をしばらく静粛な環境においた後、これから質問を開始することを告げたときの脳波である。被験者は脳波記録が初めての体験であることから、精神的に緊張していると推定できる。この例では α 波がブロックされた後に、周波数が変化する θ 波が出現し、その後同様に周波数が

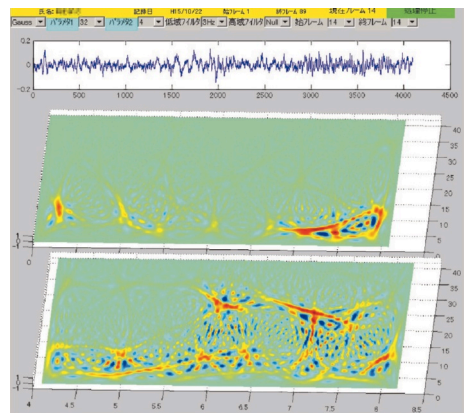


図15 θ 波の解析例 (θ 波観測のため3Hzの低域阻止フィルタを挿入)

変動する β 波が出現していると解釈できる。しかしながら、原波形からこのような判定をすることは困難である。なお、 θ 波については周波数が変動する例が他にも観察されている。

今後の展望と課題

これまでのところ、脳波の時間周波数解析は、短時間フーリエ変換による解析が主流としておこなわれてきた。本論文ではウィグナー分布を基本としてコーエンクラスに発展した時間周波数分析をおこなうことを試み、その結果について述べた。

この研究を進めるため、新たに MATLAB をプラットフォームとして脳波の時間周波数解析をおこなうシステム KOMA 04 を開発した。KOMA 04 の能力と有用性を明らかにするために、実際に脳波を記録して解析をおこない、いくつかの事例を取り上げて記述した。脳波と心理的な変化の対応関係について、わずかではあるが今後の課題となる断面をとらえることができたことは、このシステム活用のさらなる発展の可能性を示唆している。

しかしながら、

- ・ α 波に関しては、位相変動をとまなうことはあるものの、周波数変動は少なく、しかも持続的に出現すること
- ・ β 波は数百ミリ秒程度と短時間に出現することが多いこと
- ・ 数百ミリ秒以上継続する β 波や θ 波はチャープ状になること、すなわち周波数が変動すること

についての意味づけに関しては、さらなる検討が必要である。

今後の課題は、ヒトの心的状態と脳波との対応関係を明らかにすることである。そして、さらに多くの脳波を記録し、環境や刺激提示状況とヒトの心的状態の対応関係、さらには病理判定ができるような特異的脳波反応パターンの資料を蓄積することも重要な課題といえる。

謝辞

本研究の実施にあたり、脳波の時間周波数解析の理論的背景を指導いただいた防衛大学校講師松原隆博士に感謝いたします。さらに、駒澤大学大学院学生並びに防衛大学校情報工学科松原研究室

卒業研究学生の脳波記録協力と解析の助力に対しても感謝いたします。

引用文献

- コーエン, L. 1998 時間一周波数解析 朝倉書店 東京.
- MATLAB 6 release 13 マニュアル 2003 The Math Works.
- 吉川 昭 1996 a 時間一周波数解析の展望 [I]—非定常スペクトル序—非定常信号のスペクトル解析とは何か 電子情報通信学会誌, **79**(5), 515-520.
- 吉川 昭 1996 b 時間一周波数解析の展望 [II]—マッチドフィルタから非定常スペクトルへ—テンプレートマッチングによる、信号の存在時刻と大きさの検出 電子情報通信学会誌, **79**(6), 597-602.
- 吉川 昭 1996 c 時間一周波数解析の展望 [III]—フーリエ解析そしてスペクトログラム—直交展開から短時間フーリエ変換、スペクトログラムへ 電子情報通信学会誌, **79**(7), 746-751.
- 吉川 昭 1996 d 時間一周波数解析の展望 [IV]—ウェーブレットとその分類—時間と周波数の不確定性関係への挑戦 電子情報通信学会誌, **79**(8), 820-830.
- 吉川 昭 1996 e 時間一周波数解析の展望 [V]—コーエンのクラス—ウィグナー分布とその一般化 電子情報通信学会誌, **79**(9), 927-935.
- 吉川 昭 1996 f 時間一周波数解析の展望 [VI・完]—時間—スケール表現と双線形表現の分類—ウェーブレット解析との関係を探る 電子情報通信学会誌, **79**(10), 1008-1016.