

脳波計測・処理システムの開発(第二報)

Development of EEG Data Measurement and Processing System(NO.2)

中山 光幸

Mitsuyuki NAKAYAMA

§ 1. はじめに

第一報では、「脳波計測・処理システム」の機能の中で、①脳波計測部、②定常性の検定部、③脳波スペクトル解析部および脳波帯域成分解析部の開発結果について報告した。第二報の本稿では、本システムのその他の機能である④脳波等レベル線表示部、⑤フラクタル次元解析部、⑥脳波のマハラノビスの距離を用いた判別分析部の三つの機能の開発結果および、各部の処理結果のグラフ表示について報告する。

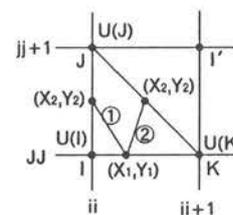
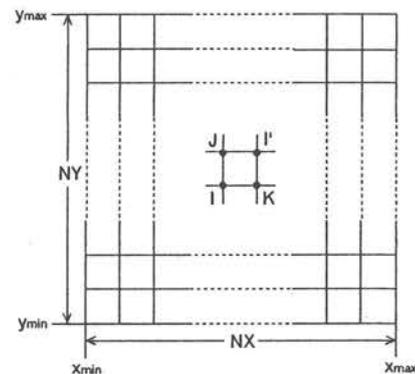
§ 2. 脳波計測・処理システム(続)

2.4 等レベル線表示部

三次元データの特徴を分かりやすく二次元表示するために、等高線と類似の表現方法を持つ等レベル線図が用いられる。以前に、筆者は音の特徴量の抽出を目的として、音響信号の等レベル線図解析システムを開発し、音楽や滝の音等の分析に用いて、その有効性を実証した¹⁾²⁾³⁾。この等レベル線図を、脳波の特徴判定に利用し学習環境を改善することを目的として、脳波等レベル線表示システムの開発を試みた。本システムを用いた解析結果のいくつかは、既に報告済みである⁴⁾⁵⁾。

脳波の等レベル線作図法を(図1)に示す。予め、時系列信号を一定フレーム時間毎にFFT分析し、1つのファイル当りNY個の周波数ポイントから成るスペクトルデータファイルをNX個用意しておく。(図1)の(a)に示すように横軸に時間を、縦軸に周波数を取り、二次元平面をスペクトルデータファイル数NXと、周波数ポイ

ント数NYに応じた数の矩形に分割する。各格子点にはスペクトルデータを対応させる。次に、一つの矩形を二つの三角形に分け、(図1)の(b)に示す線形補間計算によって (X_1, Y_1) および (X_2, Y_2) を求めて、各三角形内の等レベル線を作図する。これを全ての矩形について繰り返すと、全体の等レベル線図が得られる。



(a) 画面の分割

$$X_1 = X(I) + \{X(K) - X(I)\} \frac{L - U(I)}{U(K) - U(I)}$$

$$Y_1 = Y(I) + \{Y(K) - Y(I)\} \frac{L - U(I)}{U(K) - U(I)}$$

X_2, Y_2 についても同様の一次補間計算を行う。
 $U(I) \leq U(J) \leq U(K)$ が成り立てば

1) $L < U(J)$ のとき等レベル線①を作図する

2) $L > U(J)$ のとき " 線② "

ただし、L: 等レベル線のレベル値

(b) 三角形 IJK 内の等レベル線の作図

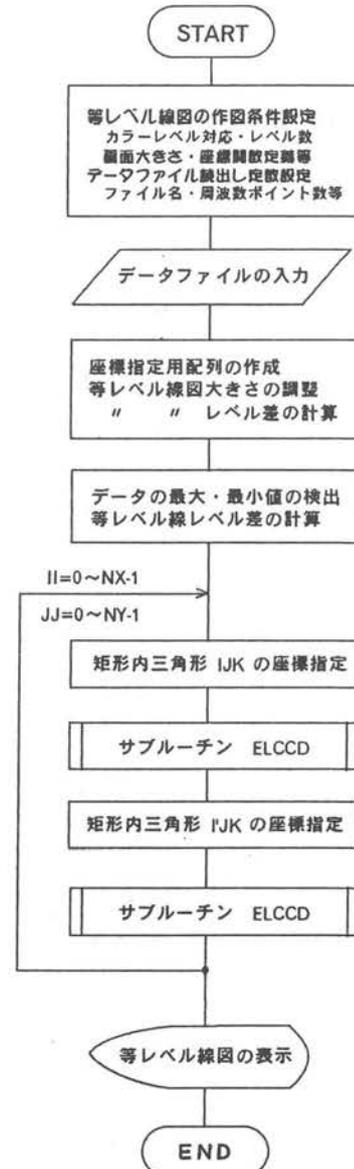
(図1) 脳波の等レベル線作図法

脳波の等レベル線表示部のフローチャートを(図2)に示す。(a)は等レベル線作図のメインルーチン、(b)はサブルーチンである。等レベル線作図に先立って、予め脳波時系列データの周波数解析を行い、その結果をフロッピーディスクに保存しておく。はじめに、等レベル線図の作図条件として、データファイル名・周波数ポイント数等のデータ読み出し用定数及び画面大きさ、レベル数等を設定した後、データディスクよりスペクトルデータを読み出す。次に、作図の下準備として、作図平面上の座標指定用配列の作成、スケールの調整、等レベル線のレベル差計算を行う。その後、(図1)の(a)に示した矩形の左下三角形IJK、右上三角形I'JKの順で、一次補間による等レベル線の計算を行い、等レベル線レベル値Lに応じた色で等レベル線を作図する。これを全画面内の三角形について繰り返す。全画面の等レベル線作図が完了した後、等レベル線図の右端列にレベル数値を表示する。画面の右側帯部には、データ名、ファイルNO等の作図条件と解析結果の情報等を表示してプログラムを終了する。

以上、等レベル線表示部の概要を述べた。一般のグラフ表示では、人間が得意とするパターン認識の能力が十分に生かせないが、等レベル線分析の場合、等レベル線表示されたパターンから、その信号の特徴が的確に読み取れる利点がある。本システムは、一部の変更により各種のデータ形式・表示条件等に対応できる柔軟性を備えている上、電気信号に変換できる物理量であれば、全ての信号に適用できるという特長がある。

なお、脳波の等レベル線分析の利用に際して、その特徴を視覚的に評価するだけでなく、他データと定量的な比較を可能とするために、本システムに脳波帯域成分変動率の計算機能を追加した。この機能は、脳波の $\delta \cdot \theta \cdot \alpha \cdot \beta$ の各帯域成分毎に標準偏差と平均を計算し、両者の比を変動率として求める。脳波帯域成分変動率の計算結果は、脳波の各帯域成分別に等レベル線図の右側帯部に作図条件と併せて表示される。この機能を用いた解析結果の詳細については、別の機会に報告する予定であるので、詳しい説明は割愛した。

等レベル線表示部は、脳波スペクトルデータをディスク入力し解析する。従って、汎用パソコンのみで構成できる安価なシステムといえる。



(a) 主プログラム



(b) サブルーチンELCCD

(図2) 脳波等レベル線図表示部フローチャート

2.5 フラクタル次元解析部

1) フラクタルとは

現代の科学技術の飛躍的な進歩によって、原子内部の極微の世界から地球規模の極大の世界までが工学の研究対象として捉え得るようになった。しかしながら、我々にとって最も身近な自然現象である気象や生体の環境適応機構に関しては、未知の部分が多く本質は解明されていない。このような状況にあって、1975年に Mandelbrot によって提起された概念が“フラクタル”である。フラクタルを一言で説明すれば、「自己相似性を有するもの即ち、全体とその一部分の間に相似性を有する性質の総称」である。身近な例としては、海岸線や山の起伏、川筋のパターンなどがある。その他にも、動物の肺や血管等の複雑に枝分かれした構造等もフラクタル性を有すると考えられている。フラクタルはカオスと密接な関係を有し、気象や生体等の複雑系の問題解決の有力な手段として、今後の発展が期待される。フラクタルの詳細な解説は他書に譲り⁶⁾、本稿ではフラクタル次元解析部の開発に必須の事項に限定して述べる。

2) 相関次元の求め方

フラクタル次元は、散逸力学系のアトラクターを特徴づける重要な概念である。フラクタル次元には、容量次元、情報次元、相関次元などがある。本研究では、比較的短時間で計算可能で、一次元時系列データのフラクタル次元解析の有力手段である相関次元を用いた。簡単に相関次元を計算できる方法がP.GrassbergerとI.Precacciaにより提案されたために、パーソナルコンピュータベースでの相関次元解析が実現したといえる⁷⁾。これは、次の(1)式で示す二体相関関数の積分 $C(r)$ を用いる方法である。

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \prod_{i \neq j} H(r - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|) \quad (1)$$

ここで、 N : データの総数
 H : ヘビサイド関数

$\|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|$: ベクトル \vec{x}_i 、 \vec{x}_j 間の距離

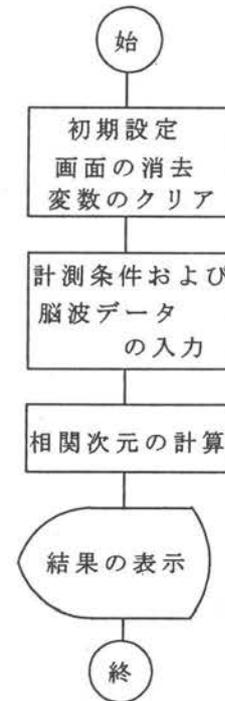
(1)式が、距離 r に関して(2)のように依存するとき、指数 ν を相関次元という。

$$C(r) \sim r^\nu \quad (2)$$

従って相関次元は、 $C(r)$ と r の対数表示のグラフを作成して、その傾きから求められる。

3) プログラムフローチャート

二体相関関数の積分を用いるとともに、高安氏のアルゴリズムを参考にして、脳波の相関次元解析プログラムを開発した⁶⁾。ここでは、(1)式の変数である空間距離 r を時間量 t に置き換え、二体相関関数の積分 $C(t)$ として解析する。そのフローチャートを(図3)に示す。



(図3) フラクタル次元解析部フローチャート

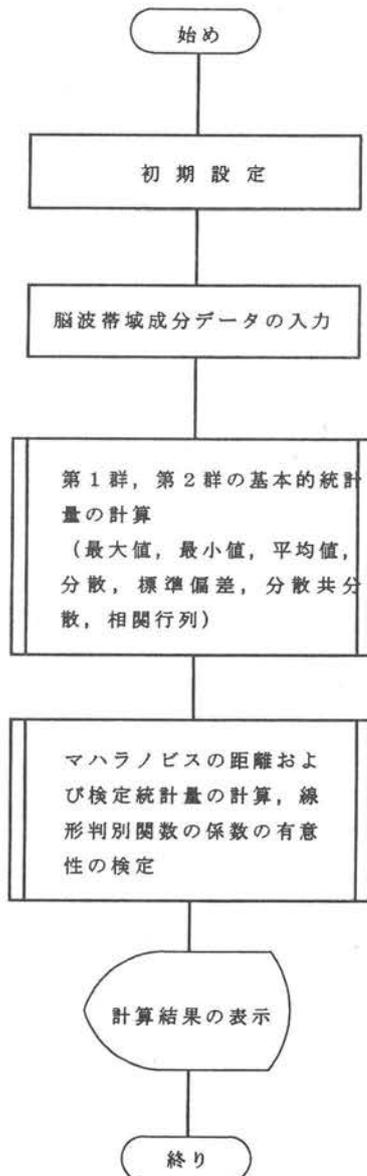
2.6 マハラノビスの距離を用いた判別分析部

マハラノビスの距離を用いた判別分析部の詳細と脳波への応用に関しては、以前に解析結果とともに報告した^{8) 9)}。従ってここでは、プログラム開発に関係する事柄のみを簡単に述べる。

マハラノビスの距離を用いた判別分析プログラムの基本的な機能としては、変数数が δ 波・ θ 波・ α 波・ β 波の四変数で、一変数当たりのサンプル数が17個より成る脳波データ $G^{(1)}$ 、 $G^{(2)}$ の二群間のマハラノビスの距離を計算できればよい。筆者は、スペクトルの平滑化を意図したオーバーラップ高速フーリエ変換によって脳波帯域成分を求めるプログラム[OFT]を開発済みなので、そのプログラムで求めた脳波帯域成分計算値の入力部を判別分析プログラム¹⁰⁾に付加して、マハラノビスの距離を用いた判別分析のプログラム[MBS]として開発した。なお、マハラノビスの距離の計算は、各変量の寄与分を一括して行うた

め、異なった群の同じ変量同士のマハラノビスの距離を得ることができない。そこで、[MBS]では便宜上、 $G^{(1)}$ 、 $G^{(2)}$ の二群とも一変量で構成されるものとして扱い、計算を四回繰り返す方法をとった。

マハラノビスの距離を用いた判別分析プログラム[MBS]のフローチャートを(図4)に示す。はじめに配列宣言等の初期設定と帯域成分データの入力を行ってから、第一群と第二群の基本的統計量(最大値・最小値・平均・標準偏差・分散共分散・相関行列)を計算し、次にマハラノビスの距離の計算・線形判別関数の係数の有意性の検定を行い、最後に結果を表示して解析を終了する。



(図4) マハラノビスの距離を用いた判別分析部[MBS]のフローチャート

§3. ま と め

筆者は、音響信号や脳波の計測と解析の研究を進める上で必要な機能をプログラムとして開発してきたが、それらがいつの間にか多数となり、本稿の脳波計測・処理システムとして再編されるまでに至った。

市販のソフトには、EXCELに代表される等高線や周波数解析の機能を備えた優れたソフトがある。しかしながら、それらのソフトは汎用性に富む反面で、研究上のデータ解析で利用するには不便な点がある。その一つは、計算過程がブラックボックス化されていて、実体が明らかでないという問題である。この点、本システムは、自主開発のために理論値と解析結果を吟味しており、動作上の信頼性が確認済みで、上述の問題はクリアできていると思われる。

なお、本システムには、脳波解析への新しい要求に応じた改良や新機能を随時付加してきた。例えば、第一報で述べた帯域成分解析部を改良し、「高分解能帯域成分解析の機能」を付加したことがその一例である。これは、例えば α 波の帯域をLow α ・Mid α ・High α の三つに細分化して、脳波の特徴を詳しく分析できるものである。筆者は、本機能を利用して、精神負荷の軽重が脳波に与える影響は、主に δ 波および β 波に現れるという結果を報告した¹⁰⁾。その他の付加機能としては、第一報で述べた定常性の検定結果を確認するための脳波の三次元表示ルーチン、スペクトル解析部に追加した最大エントロピー法(MEM)によるスペクトル推定部等があげられる。これらについては、別の機会に報告したい。

脳波計測・処理システムの第一報および第二報(本稿)で説明した①脳波計測部、②定常性の検定部、③脳波スペクトル解析部および脳波帯域成分解析部、④脳波等レベル線表示部、⑤フラクタル次元解析部、⑥脳波のマハラノビスの距離を用いた判別分析部の六つの機能による処理結果の表示例を付録に示した。ただし、一部の図では解析して得た数値を、EXCEL等の市販ソフトを用いてグラフ化している。各グラフの見方や重要性等については、参考文献で詳述したものががあるので参照して戴きたい。

脳波計測・処理システムの開発（第二報）

今後の課題としては、メモリの制限で未達成だったメニュー方式の導入による各機能の総合化、脳波解析時間の延長、ユーザーインターフェースの再検討やプログラムの完成度を高めて使いやすい脳波計測・処理システムとすること、およびWindows版の開発等があげられる。

謝 辞

本研究を進めるにあたって、東京工業大学教育工学開発センターの清水康敬教授に御指導戴いた。ここに記して謝意を表する次第である。また、本システムの開発とデータ収集・解析に関しては、小山高専電気工学科の音響研究室の卒業研究の一環として実施した成果が含まれている。音響研究室の卒業研究関係者に感謝したい。

参考文献

- 1) 中山：“音響信号の等レベル線表示システム”，小山高専研究紀要，NO19, pp113-120 (1987)
- 2) 中山：“等レベル線表示システムによる音響信号の検討” 日本時計学会誌NO.135 (1990) pp1-10
- 3) 中山：“滝の音の等レベル線分析について”，信学全大，(1987) 67
- 4) 中山，清水他：“音環境が学習者の脳波に及ぼす影響の等レベル線図による検討”，電子情報通信学会秋季大会 (1994) D-415
- 5) 中山，清水他：“音環境が学習者の脳波変動に及ぼす影響”，信学会ソサイエティ大会 (1995) D-261
- 6) 高安秀樹：“フラクタル科学”，朝倉書店 (1990)
- 7) P.Grassberger and I.Precaccia：physica 9D, PP.189-208, (1983)
- 8) 中山，高木：“音環境が学習者の脳波に及ぼす影響に関する基礎的検討”，信学技報，ET92-121 (1993-03) pp17-23
- 9) 中山：“音環境が学習者の脳波に及ぼす影響に関する基礎的検討～マハラノビスの距離を用いた音環境脳波の判別分析～” 小山高専研究紀要NO.30, (1998) pp103-108
- 10) 脇本，垂水，田中：“パソコン統計解析ハンドブック”，共立 (1984) pp79-90
- 11) 中山，清水他：“精神負荷が脳波帯域成分に与える影響”，信学秋大 (1994) D-414
- 12) 高木敦：“聴覚刺激時の脳波スペクトルの解

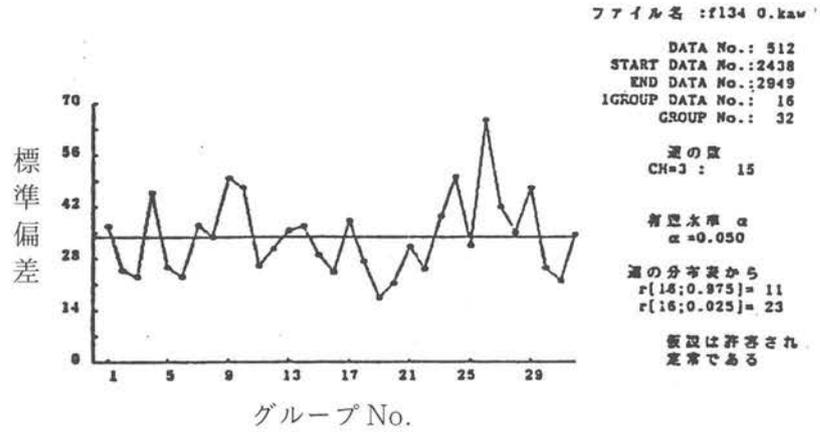
- 析”，小山高専電気工学科卒業研究論文 (1992)
- 13) 鈴木成：“脳波解析システムの構築”，小山高専電気工学科卒業研究論文 (1997)
- 14) 中山，清水：“脳波による意識レベル評価に関する基礎的検討 (その2)”，信学春大 (1990) A-302

〔受理年月日 1999年9月30日〕

付録 脳波計測・処理システムの解析結果出力例

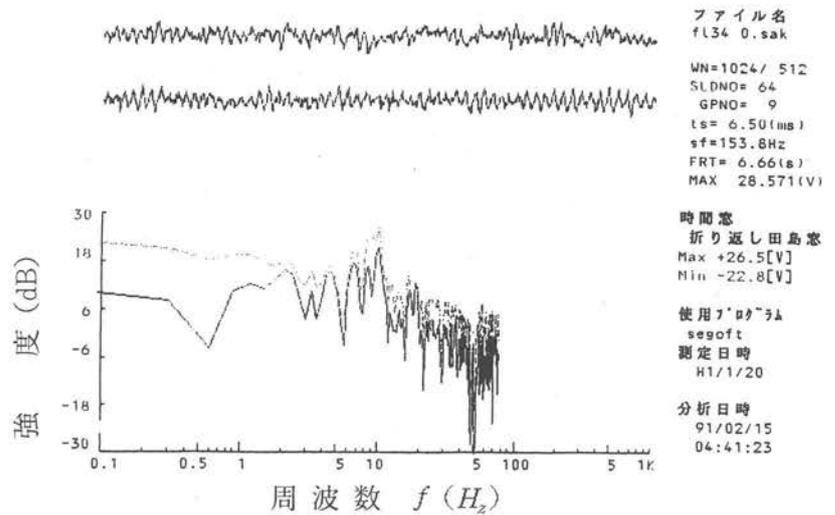
A.1 脳波定常性の検定部

(図A1) フルート協奏曲聴取時の脳波の定常性検定結果¹²⁾



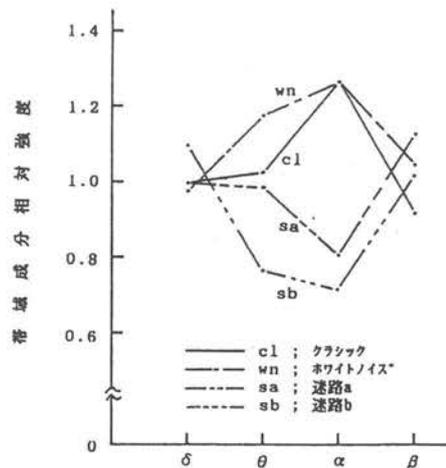
A.2 脳波スペクトル解析部

(図A2) フルート協奏曲聴取時の脳波のスペクトル解析結果¹³⁾

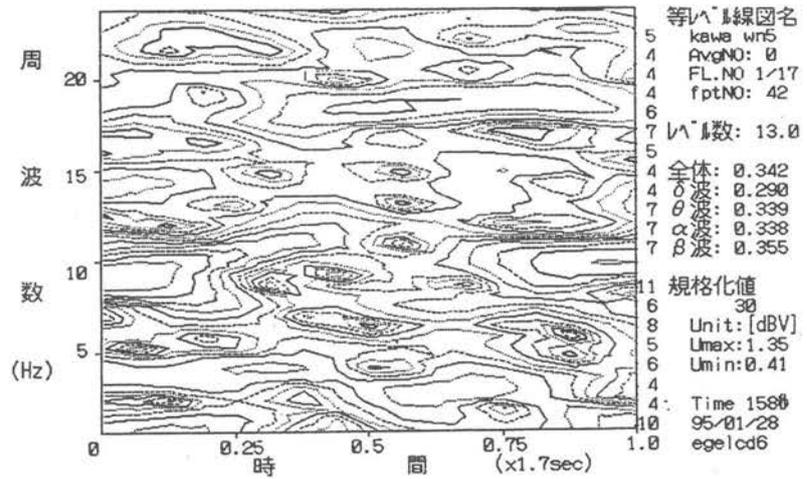


A.3 帯域成分計算部

(図A3) 音環境・知的作業時の脳波帯域成分析結果¹⁴⁾

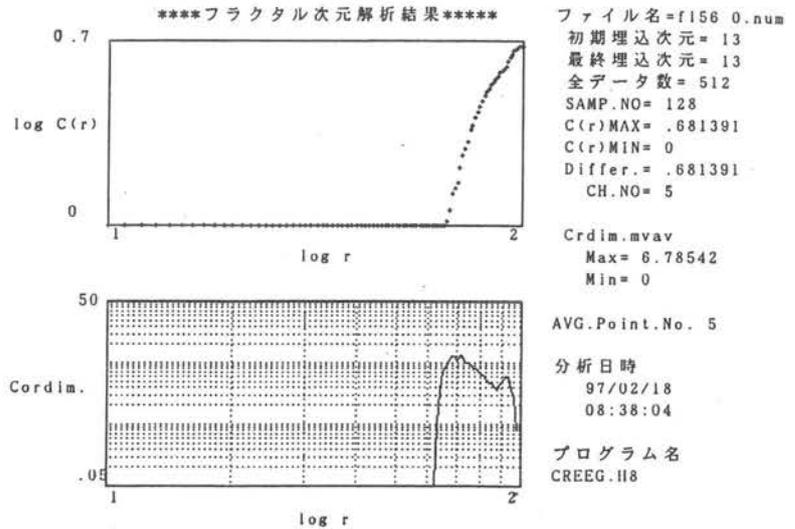


A.4 脳波等レベル線表示部



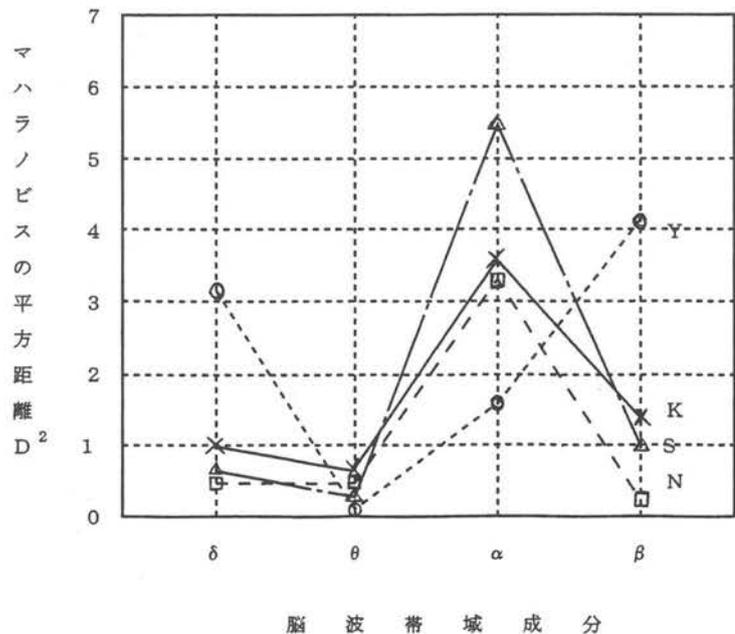
(図A4) ホワイトノイズ音環境の脳波の等レベル線図⁵⁾

A.5 フラクタル次元解析部



(図A5) フルート協奏曲聴取時の脳波フラクタル次元解析結果¹³⁾

A.6 マハラノビスの距離を用いた判別分析部



(図A6) クラシック音楽とホワイトノイズの音環境に於ける脳波帯域成分のマハラノビスの距離を用いた判別分析⁸⁾