

## 音環境が学習者の脳波に及ぼす影響の基礎的検討 ～マハラノビスの距離を用いた音環境脳波の判別分析～

A Fundamental Study on Effect of Acoustic Surroundings upon Learner's EEG

～The Discriminant Analysis of EEG Using Mahalanobis' Generalized Distance～

中山 光 幸

Mitsuyuki NAKAYAMA

EEG was measured on purpose to clarify the effect of acoustic surroundings upon learner's consciousness. And the band spectrum of EEG was examined by the method of the discriminant analysis using Mahalanobis' Generalized Distance. Investigating these numerical results, it was obtained that learner's  $\alpha$  wave decreased in white noise surroundings. But, it increased in classic music surroundings.

### はじめに

高度情報化社会の到来を間近にして、次世代のコンピュータには感性情報処理技術の実現が必須となると予想される。ここでいう感性情報とは、人間の五感を通して与えられた入力情報が、ヒトの心の内部情報と相互作用を生じて、新しく形成された情報を意味する。この感性情報処理技術は、人の感性や個性が尊重される高度情報化社会にあつては、生活環境やマン—マシンシステムの機能性の評価に必須になると考えられる。しかしながら、現段階ではヒトの内部での感性情報処理のメカニズムは、あまり解明されていない。さらに、苦痛や疲労などの医療の分野で重要な感性情報を定量的に扱うシステムは、いまだに実現されていない。

そこで筆者は、感性情報処理技術研究の第一段階として、環境（音、温度、光、空間、その他の五感で感じられる周囲の状況）が人間に及ぼす影響を、脳波で評価・検討する方法について研究を重ねてきた<sup>1)</sup>。筆者は学習者の周囲の音楽や雑音の生じている空間（これを音環境と呼ぶ）に着目し、音環境によって学習者がどのような影響を受けるかを脳波を分析することによって明らかにすることを考えた。本研究では、音環境が学習者の意識レベルに及ぼす影響を示す基礎データを得る目的で、クラシック音楽とホワイトノイズの二つの音環境下での脳波の測定を行い、脳波の帯域成

分を統計解析の一手法であるマハラノビスの距離を用いて判別分析し、音環境と脳波帯域成分との関係を検討した。

### § 1. マハラノビスの距離を用いた判別分析法

次に、生体信号の特徴およびマハラノビスの距離を用いた判別分析法<sup>2)</sup>について述べ、そして、マハラノビスの距離を用いた判別分析プログラムの概要を説明する。

#### 1.1 生体信号分析上の問題点と判別分析法の必要性

生体信号は、それを検出して被験者の状態を推定しようとする場合、不要ともいえる雑音成分が付随するため、目的を達成するのは容易ではない。特に脳波の場合、その電圧値が数十 $\mu$ Vと微弱であるので、もし、眼球運動や体動による筋電位等の雑音があると、信号がこれらの雑音（これらは総称してアーチファクトと呼ばれる）に大きく影響を受ける心配がある。教育環境が脳波に与える影響を検知するには、さらに微小な脳波の変動分を問題とせねばならない。そこで、この難点を克服するため筆者は、マハラノビスの距離を用

いた判別分析法を導入して、教育環境が脳波に与える影響を検討することにした。このマハラノビスの距離を用いた判別分析の手法は、筆者の知る限りでは、視覚刺激時の誘発脳波の分析に宇都宮氏等が適用した研究例がいくつか報告されている<sup>3)</sup>。本研究は、同手法を脳波の帯域成分の分析に応用したものである。

### 1.2 マハラノビスの距離<sup>2)</sup>

p変量の二群の母集団  $G^{(k)}$  ( $x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_p^{(k)}$ ) (ただし,  $k = 1, 2$ ) があり、各変量はm個のサンプルより成っているものとする。k群のj番目の変量  $x_j$  のm個のサンプルの平均値を  $\mu_j^{(k)}$  とし、平均値ベクトル  $\mu^{(k)}$ 、分散共分散行列  $\Sigma^{(k)}$  を

$$\mu^{(k)} = \begin{pmatrix} \mu_1^{(k)} \\ \mu_2^{(k)} \\ \vdots \\ \mu_p^{(k)} \end{pmatrix}$$

$$\Sigma^{(k)} = \begin{pmatrix} \sigma_{11}^{(k)} & \sigma_{12}^{(k)} & \dots & \sigma_{1p}^{(k)} \\ \sigma_{21}^{(k)} & \sigma_{22}^{(k)} & \dots & \sigma_{2p}^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{p1}^{(k)} & \sigma_{p2}^{(k)} & \dots & \sigma_{pp}^{(k)} \end{pmatrix}$$

とする (ただし,  $k = 1, 2$ )。ここで、 $\sigma_{jj'}^{(k)}$  は k 群の j と j' 番目の変数の共分散で、 $\sigma_{jj}^{(k)}$  は k 群の j 番目の変数の分散を表す。p 変量から成る任意のサンプル点  $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)$  と  $G^{(k)}$  の重心との距離は

$$D_k^2 = (x - \mu^{(k)})' \Sigma^{(k)-1} (x - \mu^{(k)})$$

で定義される。これをマハラノビスの平方距離という。上式で、 $(x - \mu^{(k)})'$  は  $(x - \mu^{(k)})$  の転置行列、 $\Sigma^{(k)-1}$  は  $\Sigma^{(k)}$  の逆行列を表す。

マハラノビスの距離  $D^2$  の特徴は、これが変量の分散および変量間の相関を考慮して標準化した距離である点で、二群の違いを定量的に表す一つの指標として、平均値の差のみで表すよりも確かな値であるといえる。

特に脳波の場合は、脳波振幅値の個人差や帯域成分別の振幅特性を考慮する必要がある、このマハラノビスの距離を用いることによって、その問題が解決できると思われる。

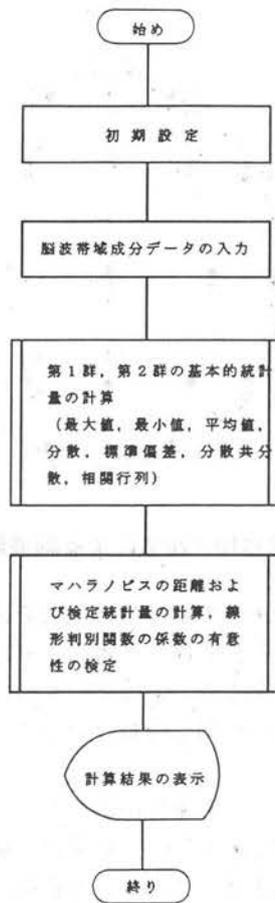
### 1.3 マハラノビスの距離を用いた判別分析プログラムの開発

マハラノビスの距離を用いた判別分析プログラムの開発に際しては、既存のプログラム<sup>4)</sup>を参考とした。開発する分析ソフトの基本的な機能としては、変量数が  $\delta$  波・ $\theta$  波・ $\alpha$  波・ $\beta$  波の四変量で、一変量当たりのサンプル数が17個より成る  $G^{(1)}$ 、 $G^{(2)}$  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、既に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上述の判別分析プログラムに付加して、マハラノビスの距離を用いた判別分析のプログラム [MBS] として開発し利用した。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志のマハラノビスの距離を得ることができない。そのため、[MBS] では便宜上、 $G^{(1)}$ 、 $G^{(2)}$  の二群とも一変量で構成されるとして扱い、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1) 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。

## § 2. 実験方法

音環境と脳波との関係を計測するための実験システムは、次の二つの部分から構成されている。第1は、各種の音環境を実現するため音響信号を発生し、その音環境での脳波の導出を行う音環境試験部、そして第2は、その時の脳波を計測し記録し、脳波時系列データのスペクトル分析と帯域成分の計算・マハラノビスの距離による判別分析を行う脳波計測・分析部である。次に、各部について説明する。

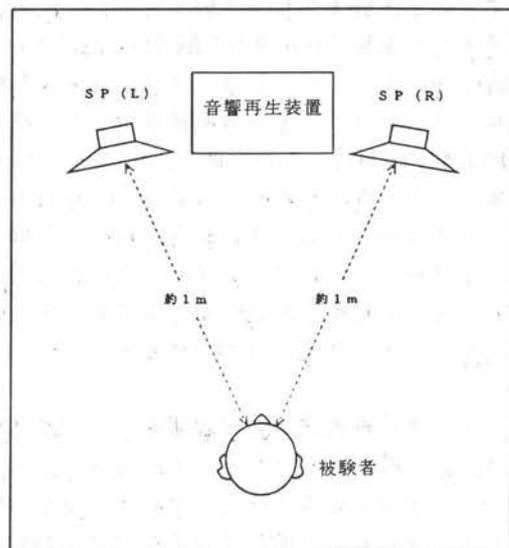


(図1) 音環境脳波の判別分析プログラム

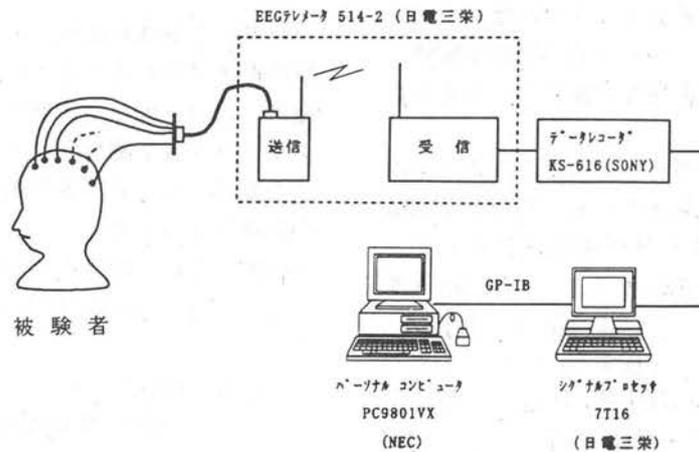
[MBS] のフローチャート

## 2.1 音環境試験部

音環境試験部は、(図2)に示すように各種の音環境を実現するための音響信号発生装置とその音環境での脳波導出のために被験者に装着された脳波導出用の皿電極で構成されている。音響信号発生装置は、カセットデッキと増幅器より成る音響再生装置および左右二個のスピーカを使用している。被験者には各スピーカより約1mの距離で試験音を聴かせて実験を行う。使用音源の一つとして、FM放送の局間ノイズを利用したホワイトノイズを、もう一つはクラシック音楽の一例としてJ. S. バッハ作曲のフルート協奏曲を用いた。



(図2) 音環境試験部



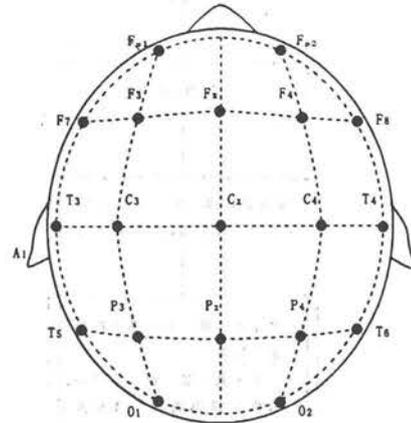
(図3) 脳波計測・分析部

## 2.2 脳波計測・分析部

脳波計測・分析部を(図3)に示す。この部分は、機能上、脳波計測部と脳波分析部の二つに分けられる。まず、脳波計測部は、脳波テレメータ514-2(日電三栄)、データレコーダKS-616(SONY)で、また、脳波分析部は、シグナル・プロセッサ7T16(日電三栄)、パソコンPC9801VX(日本電気)で、それぞれ構成されている。ここでは、シグナル・プロセッサをデータ収集・転送用として、また、パソコンをデータ解析用として使用している。脳波計測は単極誘導法で行い、電極配置は(図4)に示される国際式10/20法によるF<sub>3</sub>, F<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub>, O<sub>1</sub>, O<sub>2</sub>の8チャンネル構成とし、成人男子4名を被験者として実験を行った。被験者の頭部に装着した電極で検出された脳波は、脳波テレメータで無線伝送され、データレコーダに記録された後、シグナル・プロセッサにより分解能8ビット、サンプリング周波数150[Hz]でAD変換し、デジタル信号として収集される。次いでそのデータは、GP-IBバスを経てパーソナルコンピュータに転送されて、分析が行われる。本計測システムはテレメータ方式のため、座学はもとより、実験中でも測定が可能であって、被験者の自由度が大きい状態で計測できるという利点がある。

次に、データ分析法について説明する。脳波計測の際、まばたき・咳・あくびなどによって生じる筋電位等のアーチファクトが混入することがよくある。今回使用したデータにも部分的にアーチファクトが含まれているため、この影響の少ない区間のデータを選んで使用した。厳密に言えば、検討する脳波データに対して定常性の検定を行う必要がある。本研究では、解析を容易にするために脳波時系列データは問題としている区間では定常性を有する、いわゆる“区間定常性”を仮定している。さらに、正規性も備えているものとして以下の分析を行う。

まず、計測した脳波時系列データよりアーチファクトの少ない、区間定常性を備えていると見なせる部分を256サンプル抽出し、これを分析用脳波時系列データとして用いる。このデータをパソコンPC9801VXを用いて、オーバーラップFFTによる脳波帯域成分の計算プログラム[OFT]で分析する。分析に先だって、データの補正・直流分の除去等の前処理を行い、次いでデータ数256、スライド数16、分割グループ数17の条件でオーバーラップFFTし、17グループの脳波の周波数成分を約0.6[Hz]の分解能で算出する。そして、その周波数成分から各グループ毎に $\delta$ 波・ $\theta$ 波・



(図4) 国際式10/20法による脳波計測用電極配置

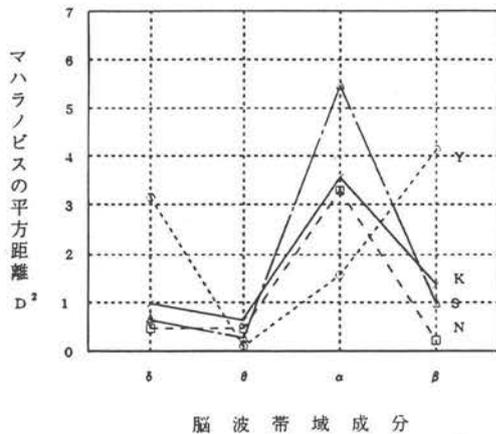
$\alpha$ 波・ $\beta$ 波の四つの脳波帯域成分を求める。従って、脳波帯域成分としては、一組当たり四個から成る17組の計算結果が求まる。このデータは、次のマハラノビスの距離を用いた判別分析プログラムの入力データとなる。

そして最後に、§1で説明したマハラノビスの距離を用いた判別分析を行う。結果は、第I群(ホワイトノイズ)と第II群(クラシック音楽)間の四つの脳波帯域成分に対応したマハラノビスの距離 $D^2$ の数値として得られる。

## §3. 実験結果および考察

計測した脳波時系列データ中で、音環境の影響が比較的顕著に表れると考えられる頭頂部電極C<sub>4</sub>の脳波を選び、判別分析した結果を(図5)に示す。この図は、クラシック音楽聴取時とホワイトノイズ聴取時の音環境の脳波について、各帯域成分毎にマハラノビスの平方距離 $D^2$ を求めたものである。 $D^2$ が大きいほど二つの状態の違いが明らかで判別がしやすいことになる。(図5)の判別分析結果より、次の1)~3)が指摘できる。

- 1) 四人の被験者のうち三人については、 $\alpha$ 波帯域成分の $D^2$ が他の帯域成分と比較して4~8倍になっており、二つの音環境による脳波振幅の違いが $\alpha$ 波の帯域である10[Hz]付近で最もよく表れたと考えられる。



(図5) クラシック音楽とホワイトノイズの二つの音環境に於ける脳波帯域成分の判別分析

- 2)  $\alpha$  波帯域以外の帯域成分には、二つの音環境による違いが  $\alpha$  波のように明確には現れていない。特に  $\theta$  波は、四人の被験者全てで  $D^2$  が 1 未満であり、二つの音環境による違いは殆どないと見なせる。
- 3) 四人の被験者のうち Y だけが、二つの音環境で  $\alpha$  波が殆ど変化を示さないという、他の被験者と異なる傾向を示した。

次に、上述の結果を考察してみよう。判別分析結果によれば、クラシック音楽聴取時とホワイトノイズ聴取時の二つの音環境における脳波で、 $D^2$  が大きいのは  $\alpha$  波といえる。 $\alpha$  波については、これまでの研究で、次の性質があることが明らかにされている<sup>5)</sup>。 $\alpha$  波が最も安定して現れるのは被験者が眼を閉じた安静な状態にあるときである。精神作業・注意集中・情動興奮・感覚刺激等によって  $\alpha$  波は消失する（これは  $\alpha$  波ブロッキング、または  $\alpha$  波阻止といわれる）。感覚刺激による  $\alpha$  波阻止作用はヒトの場合視覚刺激が最も有効であり、痛覚刺激がこれに次いでいる。普通の場合、聴覚刺激の  $\alpha$  波阻止作用は極めて弱い。この定説を参考として、上述の判別分析結果を検討すると、さらに次の 4) あよび 5) が得られる。

- 4) 上述の 1) は、従来の定説と一致する。即ち、クラシック音楽の音環境では、 $\alpha$  波の消失の程度は小さかったものの、ホワイトノイズの音環境の場合、情動興奮・感覚刺激等が著しかったために  $\alpha$  波は減少または消失したと考えられる。即ち、ホワイトノイズの音環境は被験者に大きな音響ストレスを与え、安静状態を乱したといえる。これに対し

て、クラシック音楽の音環境では被験者はそれ程音響ストレスを受けていないと思われる。即ち、 $\alpha$  波帯域成分の状態から考えてフルート協奏曲はホワイトノイズより精神をリラックスさせる効果があるといつてよい。

- 5) 被験者のうち、Y 一名だけが、異なる傾向を示した理由を知るために、脳波時系列データ波形を確認したところ、この被験者 Y はフルート協奏曲聴取時とホワイトノイズ聴取時の脳波の双方とも他の被験者よりも  $\alpha$  波がかなり出現していた。即ち、フルート協奏曲聴取時に  $\alpha$  波が多量に出現したが、ホワイトノイズ聴取時にも  $\alpha$  波がかなり出現し、 $\alpha$  波阻止作用が小さいため二つの音環境に差が少なく、マハラノビスの距離が小さくなったものと思われる。この被験者 Y の場合、これまでの生活環境で雑音の影響を頻繁に受けてきたため、雑音に馴れてしまい、あまり気にならなかったと考えられる。

以上の結果は、デパートや工場等で利用される BGM (バックグラウンドミュージック) の効果を実験的に証明したといつてよい<sup>6)</sup>。

#### §4. まとめ

感性情報評価のための基礎データを得る目的で、音環境が学習者の脳波にどのように影響するかを検討した。そして、以下の結果を得た。

- 1) クラシック音楽とホワイトノイズに代表される雑音の二つの音環境が学習者の脳波に及ぼす影響を比較すると、雑音の音環境では、学習者は音響ストレスを受け  $\alpha$  波が低減する。これに対し、クラシック音楽の音環境では、 $\alpha$  波の低減の程度は雑音の音環境に比べて小さい。
- 2) ただし、この場合の  $\alpha$  波の低減の度合いは、被験者がどのような生育環境に在ったかによって個人差がある。
- 3) 社会的に認知されている BGM (バックグラウンドミュージック) の効果を定量的に証明した。

本研究の問題点としては、第一に、判別分析の基準信号の選び方があげられる。音環境の脳波への影響を評価するにあたっては、閉眼覚醒時の脳波を基準とするのが適当であるが、こうすると従来の定説と矛盾する結果となった。この原因としては、マハラノビスの距離の式に含まれる分散の項の大小による影響が考え

られる。このため、今回は判別分析の基準信号を特に想定していない。第二に、マハラノビスの距離を用いた判別分析法は二群の差を示すだけで、これから大小関係を知ることはできない。この点は各群間の違いを評価するための新しい評価式の検討やソフトの改善が必要といえる。第三に、今回の被験者は成人男子四名であったが、個人差を明確にすると共に結果の信頼性を増すためには、被験者の数を増やす必要があると思われる。

今後の課題としては、上述の問題点の検討に加えて、脳波への音環境の影響の音圧依存性の検討、他の音環境要因の脳波への影響の検討、音楽の種別の脳波への影響の検討等があげられる。

#### 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。また、本校電気工学科卒研究生の高木敦司君（現ソニー勤務）には、プログラム開発等に御協力願った。ここに記して謝意を表する次第である。

#### 参考文献

- 1) 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”, 電子情報通信学会春季全国大会, A-133(1989)
- 2) 圓川隆夫: “多変量のデータ解析法”, pp52-55, 朝倉(1990)
- 3) 例えば, 山田, 池口, 的崎, 宇都宮: “立体視知覚の脳波による判別”, 電子情報通信学会春季全国大会, D-159(1992)
- 4) 脇本, 垂水, 田中: “パソコン統計解析ハンドブック”, pp79-90共立(1984)
- 5) 時実利彦編: “脳の生理学”, 朝倉, pp304-308(1966)
- 6) 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

(受理年月日 1997年 9月30日)