

琉球大学学術リポジトリ

芸術である音楽を科学しようとする試み：
精神生理学的アプローチの有用性と新たな脳波解析
システムの必要性

| | |
|-------|---|
| メタデータ | 言語: 出版者: 琉球大学教育学部 公開日: 2015-11-09 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 緒方, 茂樹, 相川, 直幸, 吉田, 嵩, 岩城, 達也, Ogata, Shigeki, Aikawa, Naoyuki, Yoshida, Takashi, Iwaki, Tatsuya メールアドレス: 所属: |
| URL | http://hdl.handle.net/20.500.12000/32474 |

芸術である音楽を科学しようとする試み

—精神生理学的アプローチの有用性と新たな脳波解析システムの必要性—

*緒方茂樹、**相川直幸、**吉田嵩、***岩城達也

*琉球大学教育学部、**東京理科大学、***広島国際大学

Scientific Approach for Art of Music

-Effective in Psychophysiological Approach and Needs for New EEG Analysis-

*Shigeki OGATA, **Naoyuki AIKAWA, **Takashi YOSHIDA, ***Tatsuya IWAKI

*Univ. of the Ryukyus, **Tokyo Univ. of Science, ***Hiroshima International Univ.

抄録

音楽は、学校現場において実践的な取り組みに結びつきやすく、なおかつ子どもの様々な要素の発達を知る指標ともなり得る有効な媒体（メディア）であるといえる。従って、音楽に対する生体（人間）の認知の特性と反応様式を客観的に評価し、得られた所見を基盤として子どもの実態把握及び具体的な取り組みに関わる実践カリキュラムを考案することができれば、将来的な子どもの発達支援に向けて音楽の活用はさらに有効な手段となりうると考える。そのためには、「音楽に関わる知覚認知・反応性に関わる基礎的研究」と「総合的な発達や系統的な教育実践プログラムに関わる実践的研究」が共に不可欠となる。これら音楽に関わる基礎的あるいは実践的研究はいずれも、いわば「芸術である音楽を科学する」ひとつの試みとして捉えることができる。

本稿では、特に音楽鑑賞時の精神生理学的研究に関わるこれまでの経験を例にとりながら、まず「音楽を科学すること」を目的とした基礎的研究に伴って生じた具体的な課題について整理する。次にそれらの課題を踏まえながら、今後「音楽を科学すること」を目的とした研究アプローチの新たな方策のひとつとして、日本独自の脳波分析方法である藤森法を紹介する。さらに、これまでの藤森法を応用した脳波解析システムの開発経過を示しながら「音楽を科学すること」を目的とした、システムの有用性と今後の可能性についてまとめる。

1. はじめに

障害児教育において音楽は、教科としての「音楽科」をはじめとし、領域・教科を合わせた指導である「遊びの指導」「日常生活の指導」「生活単元学習」等、様々な教育実践場面において活用されている。特に領域・教科を合わせた指導の一つである「自立活動」では、以前の「養護・訓練」の持つ訓練的なイメージを打破することを意図し、楽しいイメージのある音楽を取り入れながら活動を行うことも増えてきている。子どもは音楽が大好きであり、楽しみながらの教育につながる可能性が極めて高い（松井、1989）¹¹⁾ことは音楽がもつ大きな特徴のひとつであり、指導する側から見ても音楽は身近で扱いやすい教材であることが考えられる。また、知的障害の場合には発達の初期において言語の習得に困難を来す場合が多く、対人関係あるいは情緒的な面での発達にも遅れがみられることが少なくない。こうした子どもたちに対して極めて有効な関わり方の一つに、非言語的コミュニケーションの方法を工夫することが挙げられる。遠山（1989）²⁹⁾は、「音楽は非言語的コミュニケーション（Non-Verbal-Communication）の手段である」とした上で、さらに「障害をもつが故に言語的コミュニケーションが困難な子どもにおいても音楽は、「お互いに理解（了解）し合える世界」「共感し合える世界」をもたらすであろう」と述べている。これらのことは、非言語的コミュニケーションの手段としての音楽の有効性

を示唆しているものであり、障害児教育において音楽が様々な目的や方法で活用され、重要視されている大きな理由のひとつを示している。

一方「子どもの発達支援」という観点から、実際の教育現場に目を向けてみた場合、果たして音楽は子どもの成長、発達に対してどのような影響や効果を及ぼしているのでしょうか。音楽が子どもの発達全般に対してきわめて大きな効果を与えることは、経験的に見て確かな事実であろう。子どもは、成長過程においてそれぞれの発達段階に応じ、歌を歌ったり、楽器に触れて音を出したり、音楽に合わせて身体を動かして自己表現をしたり、音や音楽にじっと耳を傾けたりするような様々な音楽的行動を体験していく。これらのことから、音や音楽に関わる発達と子どもの心身の発達との間には密接な関係があると考えられる。さらにいえば、そこには音楽に対する特定の反応性のみならず、子どもの総合的な心身の発達もまた含まれていると考えるべきであろう。すなわち、音楽に関わる発達とは特定の音楽的スキルの要素のみで成立するものではなく、認知や情動を始めとする様々な要素がいわば「モザイク状」に組み合わせられた複合体として構成されるものであり、それこそが音楽の持つ最も大きな特性の一つであると考えられる。音楽に関わる子どもの発達に焦点を当てることはすなわち、音楽を通じてそこに内包している子どもの様々な発達の様子を総合的に知ることに繋がるものと考えられる。

これらのことから音楽は、学校現場において実践的な取り組みに結びつきやすく、なおかつ子どもの様々な要素の発達を知る指標ともなり得る、極めて有効な媒体（メディア）であると結論づけることができる。従って、音楽に対する認知の特性や反応様式を客観的に評価し、得られた所見を基盤として具体的な実践カリキュラムを考案することができれば、将来的な子どもの発達支援に向けてさらに効果的な音楽の活用を考えることができる。そのためには、音楽に関わる知覚認知・反応様式に関わる基礎的研究の蓄積と、系統的な教育プログラムの開発に見られるような実践的研究が共に不可欠となる。いうまでもなく音楽は芸術であるが、この芸術である音楽に関わる自然科学的なアプローチ、すなわち基礎的あるいは実践的

研究は、いわば「芸術である音楽を科学する」ひとつの試みとして捉えることができよう。

以上のことから本稿では、特に音楽鑑賞時の精神生理学的研究に関わるこれまでの我々の経験を例にとりながら、まず「音楽を科学すること」を目的として行った基礎的研究に伴って生じた課題について整理する。次にそれに基づいて、今後「音楽を科学すること」を目的としたより効果的な研究アプローチの方策を探る。特に音楽鑑賞時の精神生理学的研究に当たって、日本独自の分析方法である藤森法に基づいた脳波解析システムの開発経過を示しながら、「音楽を科学すること」を目的とした、藤森法の有用性と今後の可能性についてまとめる。

1. 音楽のもつ諸特性と精神生理学的な研究アプローチ

1. 音楽を科学しようとするこれまでの我々の試み

前述した「音楽を科学する」試みとして筆者らはこれまでに、以下の二つのアプローチを行ってきた。すなわち、1) 音楽に対する知覚認知・反応様式に関わる基礎的研究として、音楽鑑賞時の精神生理学的研究⁵⁾⁶⁾⁷⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾²¹⁾²⁶⁾²⁸⁾、2) 子どもの総合的な発達評価と系統的な教育実践プログラムの開発に繋がる実践研究として、音楽に関わる発達段階の尺度（評価ツール）の開発²³⁾³²⁾と、音楽を活用した教育実践に関するデータベースの開発及び事例研究³⁾¹⁹⁾²⁰⁾である。とりわけ教育への応用を念頭においた場合に、これら基礎的研究と実践的研究は車の両輪のような関係にあり、いずれも欠くことができない補完的な関係をもつ研究分野であると考えられる。これまでの我々の経験から、これらの研究遂行に当たっては、音楽という特殊な媒体を扱うことから様々な課題に直面してきた。例えば、実験デザインの設定に当たっては、鑑賞態度や音楽に対する好み等に代表される被験者の個体内、個体間変動をどのように統制するか、あるいはそれらを考慮しながらどのように選曲を考えるか等、克服すべき課題は数多くあった。何より精神生理学等の自然科学的なアプローチをもって研究しようとしたときに課題となったのは、後述する時間芸術として音楽がもつ諸特性であった。音楽の持つ多様性と、それに対する人

間の反応様式の複雑さを目の当たりにした時に、「音楽を科学すること自体、果たして可能であるのか」という研究遂行に当たっての根本的な課題に突き当たることもしばしばであった。ここでは主に音楽の持つ諸特性を考慮しながら、これまでに我々が行ってきた研究経過を踏まえつつ、「音楽を科学する」ことを目的とした精神生理学的研究に伴って生じた課題を整理する。

2. 空間芸術と時間芸術

芸術の中でも絵画や彫刻のようないわゆる「空間芸術」に対して音楽は「時間芸術」といわれる。すなわち、音楽は時間経過に沿って音が連続的に変動するものであるが、それは目には見えず、さらにその場その場で一瞬にして消えていくという特徴を持つ。さらに音楽を研究対象にした場合には「マクロ」と「ミクロ」の排反関係というジレンマに直面する場合も少なくない。例えば、ひとつの楽曲全体がもつ音の周波数特性は、適当なサンプリング周波数を設定した上でフーリエ変換（以下FFT）等の周波数分析を行い、スペクトルの形で示すことで客観的に視覚化が可能である。これは楽曲全体をまとめて分析を行ったことから、音楽を「マクロ」にみた一例といえる。しかし、このような「マクロ」な見方をした場合には、楽曲のもつ部分的な和音の進行や主題の再現に対する知覚・認知の特性等、いわゆる「ミクロ」な特徴については同時に把握ができなくなる。逆に「ミクロ」な見方をした場合には、楽曲全体がもつ「マクロ」な特徴に関して、先と同様に把握することが不可能となる。これらのことから、「音楽を科学する」ためには「マクロを見ようとするればミクロが見えなくなり、ミクロを見ようとするればマクロが見えなくなる」というジレンマを常に念頭に置きながら、その両面からアプローチすることが重要である。

次にミクロな観点から、音楽が持つまとまり（単位）についてさらに詳細に考えてみる。一般に音楽がもつまとまりについては、ソナタ形式等の作曲技法に乗っ取った分け方が可能であるが、最も小さなまとまりとしては、「フレーズ（楽句）、以下フレーズとする」と呼ばれる数秒単位のものがある。フレーズは一般に楽譜上に明記されず、こ

のまとまりがどの程度の持続時間を持つかについては一概にいけないことが多い。精神生理学的な観点からすれば、「時系列に沿ったこれらの音楽的まとまりを逐次認識しているという生体の持続的な状態が、音楽鑑賞時の人間の状態である」といえる。これらのことから、音楽鑑賞時の生体の反応様式を「ミクロ」に知るためには、この音楽的まとまりと生理学的指標の変動との関わりを、刻々と変化する時間の流れの中で常に対応させながら検討を加えて行く必要がある。換言すれば、個々のフレーズに対して、脳波上に見られるアルファ波やシータ波、あるいは筋電図、眼球運動等の生理学的指標の変動パターンをポリグラフィックに対応させ、その変動様式を客観的に分析する事ができれば、音楽がもつミクロな部分が生体に及ぼす効果、あるいはそれに対する生体の反応様式についての定量化がはじめて可能となる。

3. 音楽のもつ音響的要素のコントロールと視覚化

音楽は「時間芸術」である。目に見えないという特性をもつ音楽を視覚化することは果たして可能であろうか。音楽を科学するためには音楽自体、すなわち実験に使用した楽曲を何らかの形で定量化することも不可欠であった。ここで「作曲」は「鑑賞」、「演奏」と並んで、重要な音楽的行動のひとつであり、確かに音楽は作曲時に現された「楽譜」という形態をもって目で見ることができる。音楽学では楽典に基づいて、作曲家が作成した楽譜が演奏の基本となる³¹⁾。しかし実際に演奏が行われる際には、作曲家の意図した楽譜に基づいていながらも、指揮者あるいは演奏家の意図によって同じ楽曲が様々なバリエーションをもって具現化される。すなわち、同じ楽譜に基づいていながらも、演奏者によって具現化されたものは一様ではないのが普通である。恐らくそのことが、演奏家の個性の表現と芸術性に繋がっていくものと考えられる。これらのことから、精神生理学的手法に基づいた研究では、実験中に被験者に鑑賞させる楽曲は通常再生音楽を用いることが一般的である。すなわち特定の楽曲について特定の演奏家による演奏が録音されたメディアを再生して提示する。このCD等のメディアを同一の音響環境条件下で再生することで初めて、複数の被験者に同一

の楽曲を音響刺激として呈示することが可能となる。

被験者に同一の楽曲を音響刺激として呈示することが可能となったことを踏まえて、次の段階としては音楽鑑賞時と対照するコントロールをどのように設定するかが課題となった。最初に行った実験では、人間の可聴域の周波数成分を全て含む白色雑音を一定音圧で提示したが、慣れや順化の課題を克服することが困難であった¹⁴⁾。この経験は、音楽のもつ音響的な要素の意図的なコントロールの重要性を知るきっかけとなった。一般に、音楽の持つ三大要素は「旋律」、「リズム」、「和声（協和）」といわれており、各々が音響的な要素である「高低」、「音圧」、「音色」、さらに物理的な要素としての「振動数」、「振幅」、「振動の波形」にそれぞれ対応している（図 1）。この事実を基に

筆者らは、音楽鑑賞時の生体の知覚・認知の変動パターンや特徴を知ろうとする際に、特に生体の意識変動に直接的に関わる音圧変動はきわめて重要な要素であると考えた。その後様々な試行錯誤を繰り返した末に、音楽鑑賞時の生体の状態に対してコントロールとなりうる音響刺激を新たに開発した。すなわち、特定の楽曲が持つ時系列に沿った音圧変動を、白色雑音の変動に置き換えて新たな聴覚刺激を作成した（変調雑音）¹⁵⁾。この変調雑音は基になる楽曲がもつ時系列に沿った音圧変動と同一の変動パターンをもつ白色雑音である。その特性は、音響的な三大要素から特に「音圧」をコントロールしたものであり、音楽のもつ三大要素に言い換えれば主に「リズム」に関わる要素をコントロールしたものである。音楽的な「ハーモニー」と「メロディ」については情報が全く含ま

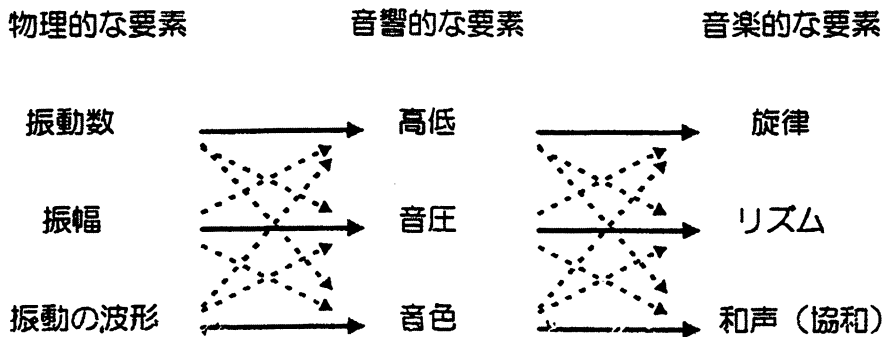


図 1. 音楽の持つ音響的、音楽的 3 大要素の関わり（緒方 1995）¹⁸⁾

れておらず、ややリズムカルに聞こえる部分を除けば音響的にはほぼ「無意味刺激」であるといっていよい。この変調雑音をコントロールとして、音楽鑑賞時の脳波変動と比較対照する実験的検討を行った。その結果、特に脳波上に現れる微妙な意識状態の変動について、音楽鑑賞時の生体の反応様式として興味深い所見を得ている¹⁷⁾。

これまで述べてきた新たな音響刺激の作成段階で、実験中被験者が聴取している楽曲や変調雑音を視覚化する方法として、楽曲の持つ音圧変動を時系列に沿って脳波等の生理指標と同時に紙記録することにも成功した（図 2）。実験中に被験者の耳の位置にマイクロフォンを設置し、得られた実験室内の音響信号を音楽の持つダイナミックレ

ンジを考慮してまずアナログ的に対数圧縮した。対数圧縮された音響信号は、脳波計の上に設置されたガルバノメーターに接続され、ロングストロークの特殊なペンを用いて記録用紙に脳波などと同時に描画を行うことができる。図 3 は演奏時間 32 分にわたる Beethoven 作曲交響曲第 5 番「運命」全楽章の音圧レベルと、それに伴う脳波から見た覚醒水準の変動と心拍数の変動を対応させたものである。このように脳波や心電図などの生理学的指標と、提示楽曲のもつ音圧レベルを同時に記録できたことで、時系列に沿って刻々と変化する音圧レベルと、それに対する覚醒反応等の生理学的指標の反応様式を対応させて分析することができるようになった。換言すれば、この工夫によっ

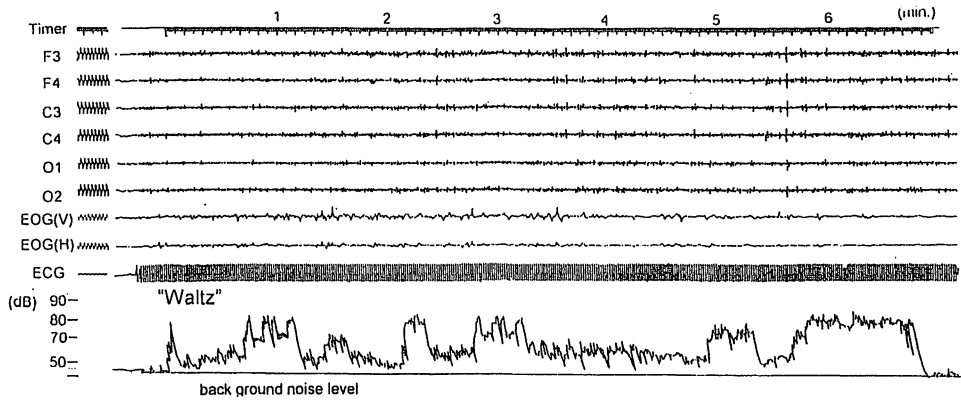


図2. 各生理学的指標と楽曲がもつ音圧変動を同時記録した紙記録の実例
(楽曲A、紙送り速度1mm/秒、校正電圧 $50\mu\text{V}/5\text{mm}$ (緒方 1995) ¹⁸⁾

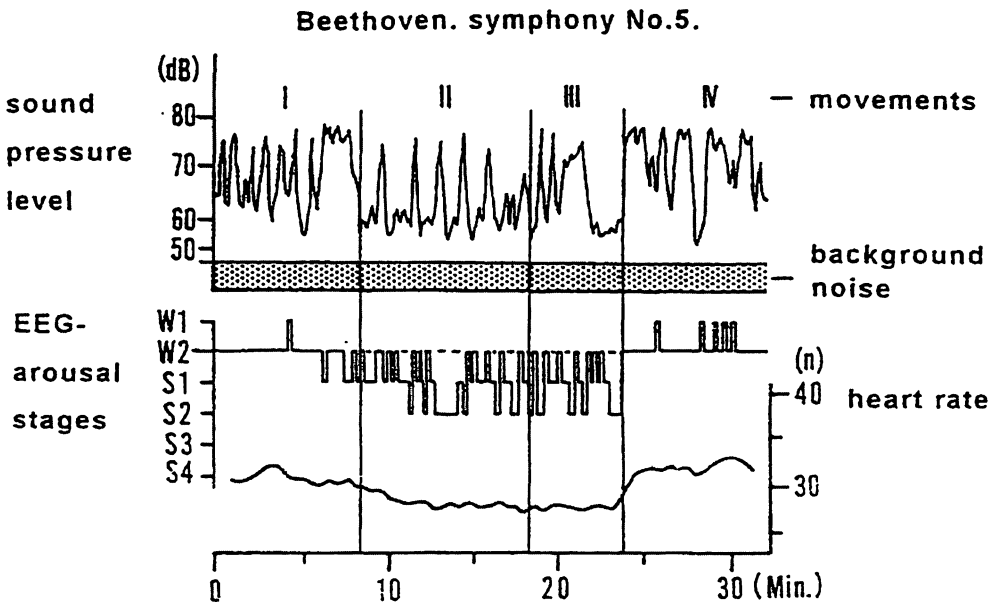


図3. 時間経過に伴う覚醒水準、心拍数と楽曲の音圧レベルの変動
(上段：楽曲の音圧レベル (5秒毎)、I, II, III, IV：楽章、
中段：脳波的覚醒段階 (10秒毎)、下段：心拍数：(30秒毎))

て、初めて時系列に沿ったダイナミックな音圧変動と脳波変動との関わりについて、実験中の紙記録時に直感的に把握することが可能となったといえる。

しかし、それらの定量化に際しては、生理学的指標の分析手法上大きな課題を克服する必要があった。前述したように、楽曲がもつ個々のフレーズの持続時間は決して一様ではなく、仮に楽譜上では同じフレーズであっても、楽曲の部分によってそ

の持続時間は容易に変化するものであった。従来脳波分析の常套手段とされてきたFFTでは原則として固定長の分析区間の設定が必要とされる。そのためFFTを応用して、個々のフレーズに対応させながら詳細な脳波分析を行う際には、分析区間長をその都度変更しながら繰り返し分析を行う必要があり、固定した分析区間の設定は困難であることが分かる。すなわち、音楽を精神生理学的なアプローチをもって科学しようとする際には、

従来の脳波の分析方法の適用のみでは不足であることが明らかとなったといえる。このことは、いわゆる「時間分解能」に関する大きな課題のひとつとして捉えることができる。この時系列に沿ったダイナミックな音圧と脳波変動について詳細に検討することを目的として、本研究が次の段階にステップアップするために、従来の固定した分析区間（エポック）に縛られない脳波分析の新たな方策が強く求められるようになった。この分析区間に縛られない脳波分析の新たな方策については、藤森法の開発経過として後で詳細に述べる。

Ⅲ. 音楽鑑賞時の生体情報を知るための新たな方策

1. 精神生理学的な脳波の分析方法

上述したように脳波をひとつの指標として、精神生理学的な手法を応用して音楽を科学しようとする場合には、どうしても時間分解能に関わる課題を克服する必要があった。すなわち、「フレーズに代表される音楽的なまとまり」と「脳波のもつ定常性」、この二点を同時に考慮できる分析方法が工夫されなければならないということである。翻って、脳波の分析方法に目を向けると、その方策にはいわゆる定性的な分析方法である「視察判

定」と定量的な分析方法である「周波数分析」の二つのアプローチに大別される。定性的な分析の代表は視察判定である。視察判定は突発性の異常波を含む臨床脳波の判定に関して効果的であるが、その判定にはきわめて高度な熟練が必要とされる。これらの視察判定は客観性に乏しいという批判もあるが、特に臨床脳波における突発性異常波の検出にはコンピュータなどを用いた自動判定は、現段階ではほぼ不可能に近い⁸⁾。また、睡眠脳波のステージ判定にはポリグラフ的な紙記録を基にした視察判定が用いられることが一般的である。しかし、視察判定も国際的な睡眠脳波の分析方法²⁴⁾を踏襲する限りにおいては、分析区間の制約に縛られ続けることになる。筆者らはこれまでの研究において、上述した脳波の持つ定常性や、分析方法、アーチファクトの除去、個々の楽曲がもつ特徴などを総合的に勘案して、分析区間を便宜的に5ないし10秒としてきた。しかし分析区間の制約がある限り、刻々と変化する楽曲の音圧変動（いわゆる曲想の変動）に対する一過性の覚醒反応や、極めて微妙な意識状態の変動に関しては検出することは困難であった（図4）。このことはすなわち、従来の手法では同一分析区間内に内包される極

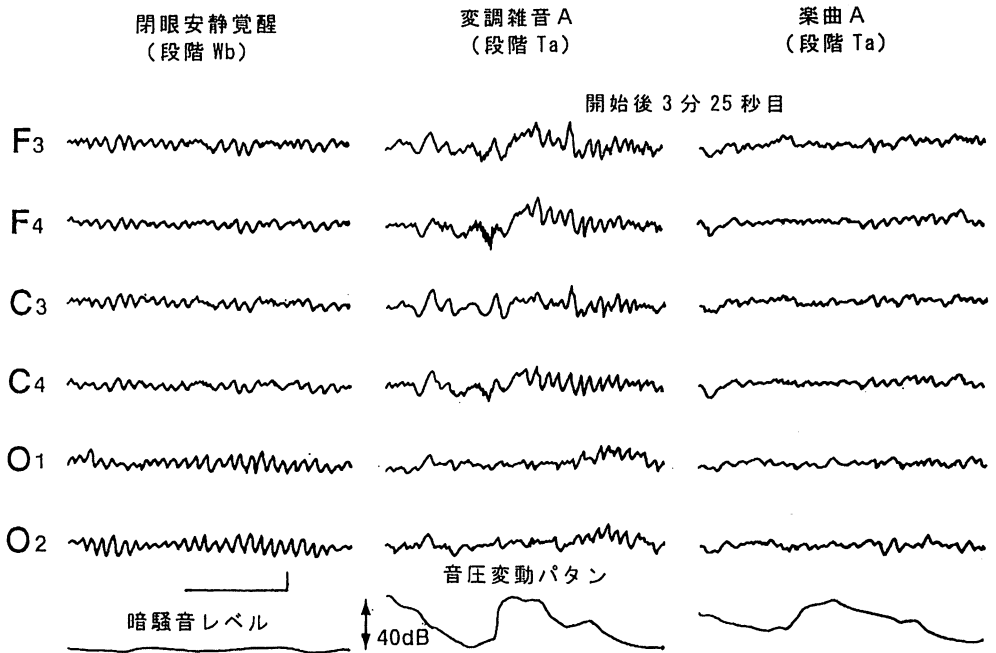


図4. 音楽鑑賞時と変調雑音聴取時に典型的にみられた段階Taの原波形の例

めて微妙な意識状態の変動を検出するには限界があることを示している。そのために、視察判定のクライテリア（判定基準）を見直し、より詳細な意識変動を検出する試みも行っているが（図5）、固定分析区間に縛られている以上、どうしても限界があったのは事実である。

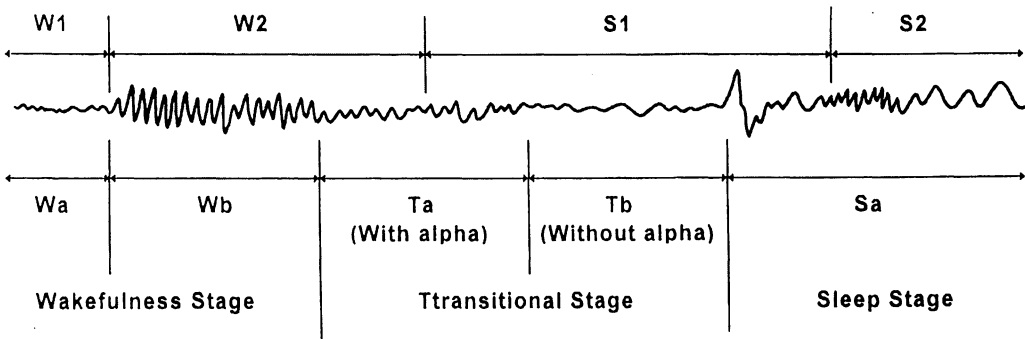
一方で、脳波の周波数分析の方法も様々に考えられているが、定量的な分析の代表例はFFTである。FFTは脳波が内包する周波数成分の詳細な分析には効果を発揮するが、上述したように分析区間を区切って分析する性格上、時系列に沿ったダイナミックな脳波波形の変化を計測、分析する目的には不向きである。すなわち、FFTも睡眠脳波のステージ判定と同様に分析区間の制約を受けることが大きな課題となる。一方、同じ定量的な分析であっても、人間が行う視察判定の状況と同じように紙記録上に描画された脳波をそのまま個々の波として捉え、その作業を手的に行う分析方法もある。このような分析方法を総括的に波形認識法と呼ぶ。FFTと波形認識法の異同については過去に藤森が指摘しているところであるが²⁾、決定的な相違はFFTが脳波を波の複合体として数学的にみることに對して、波形認識法は人間の行う視察判定により近い方法で見ようとするという点にある。この特性を生かして波形認識法は、臨床脳波の分析をはじめ、睡眠ステージの自動判定の試み等にも応用されている¹⁾⁸⁾⁹⁾²⁵⁾²⁷⁾。国内外の波形認識法に関する概説は筆者らが別稿

にまとめているので参考にされたい³⁰⁾。

2. 音楽を科学することを目的とした藤森法の有用性と開発

上述したように、これまで我々が行ってきた分析は、先行研究とのデータの比較を考慮して分析区間を便宜的に5-10秒とし、従来の分析方法を応用しながら行ってきた。これまでの研究においては、いわばマクロ的、すなわち包括的な分析を試みてきたといえる。このことを踏まえて今後は次の段階にステップアップし、楽曲のもつ個々の「フレーズ（楽句）」がもつ「曲想」等を考慮しながら分析を行い、これまで得られた所見と照らしながら、音楽のもつ効果と生体の反応様式についていわばミクロ的に探っていきたいと考えている。そのためのひとつの方策として現在、波形認識法に基づく新たな脳波解析システムを構築中である。上述したように、これまで脳波の周波数分析には脳波を数学的な波の複合体と見なすFFTが常套手段として使用されてきた経緯がある。しかし、臨床的に専門家が脳波を視察判定する際には決してひとつの波を複数の波の複合体という数学的な見方はしていない。具体的には、波はふたつの谷とひとつの頂点をもって構成されており、谷と谷の幅がすなわち周波数であるという捉え方をしている。臨床脳波における突発性異常波の検出や睡眠脳波の判定は、まさにこのような視察による方法で行われており、紙記録に描画された脳

Modified standard criteria (Rechtschaffen & Kales 1968) used in Exp.1 & 2



New criteria

図5. 国際基準（一部修正）と新たに設定した脳波的覚醒段階の対応

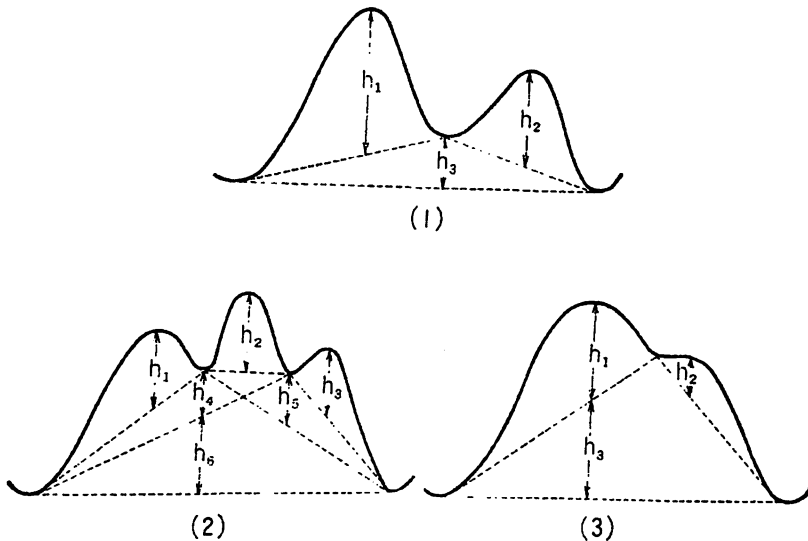
波の変動を視覚的にいかに読み取れるかが、臨床家としての能力を問われることにも繋がっている。このように、視察判定の状況と同じように脳波を個々の波として捉え、その作業をコンピュータ上のアルゴリズムを用いて行おうとする分析方法が波形認識法である。中でも日本にオリジナリティのあるヒストグラム法（以下藤森法とする）は、用手的なアナログ的分析方法をデジタル化するアルゴリズムの基本的な考え方を提供するものであり、時系列に沿った脳波波形の連続的な変化を追うことが可能な分析方法である（図6）。

さらに「音楽を科学する」という観点に立ち戻って考えてみれば、藤森法がもつ「分析区間の制約を受けない」という特性もまた極めて大きな利点である。藤森法は、個々の波の幅（周波数）と高さ（電圧）を、逐次計測してデータとして示すことができるために、仮に楽曲中の個々のフレーズが不定長であっても、その区間毎に抽出した脳波の変動を客観的に知ることができる。極端に言えば、時系列に伴う脳波の一つ一つの周波数と電圧変動を個々の波単位で知ることすら可能である。もちろん分析後、オフラインであれば二次、三次

処理として任意の時間長あるいは周波数帯域にまとめて整理し、記録部位間等の変動を比較対照することもまた容易である。例えば音楽鑑賞時に前頭部と頭頂部の脳波に見られた微妙な脳波の徐波化について、これまでの分析区間毎にまとめた分析の範囲内では自然睡眠時のものと明確に区別することが困難であった¹³⁾。今後藤森法を用いた分析を行うことで、必要に応じて1秒以下の時間精度で徐波化に関わる変動を知ることができる。このことは、音楽鑑賞時における先の時系列に沿った徐波化に関する部位間変動や、フレーズに対して秒単位で生じる生体の詳細な意識変動についてもまた、新たな所見を得られる可能性がある。

3. 藤森法開発の実際

図6に示したように藤森法の基本アルゴリズムは極めて単純なものであるが、解析システムの構築に当たって、実際に記録された脳波波形を分析する際には様々な制約があったことも事実である。ここからは、我々が行ってきた藤森法の開発の実際を示しながら、その過程において生じた課題とそれに対する対策等について、各々まとめながら



徐波は $30\mu V$ 、その他は $10\mu V$ 以下はする。(1) $h_1, h_2 > 10\mu V$, $h_3 < 30\mu V$ のばあい。 h_1, h_2 だけを探る (h_3 は徐波)。(2) $h_1, h_2, h_3 > 10\mu V$, $h_4, h_5 < 30\mu V$, h_4 は捨てられるからこれも含めた h_6 より h_1, h_2, h_3, h_6 を探る (h_4, h_5, h_6 は徐波)。(3) $h_1 > 10\mu V$, $h_2 < 10\mu V$ であるから、 h_3 はよいものとみて重畳波とせず、 h_3 のみを探る (h_3 は徐波)。

図6. 波の採り方と振幅の計り方（藤森 1957）²⁾

述べていく。

3-1. プログラムの作成環境と言語等

新たな藤森法のプログラム開発は、MS-DOS環境下のDOSベースでまず藤森法アルゴリズムのチェックからスタートし、その後のOSの進歩に従って、現在ではWindows上で開発を行っている。

Windows上の開発当初はマイクロソフト社製のVisualBASICを用いてコーディングを行ったが、その後デジタル信号処理の専門家との共同研究を契機として、処理速度を向上させるために、同じマイクロソフト社製VisualStudioC++への全面的な移植を行っている。開発言語のバージョンについては必要に応じてバージョンアップを図ってきたが、現段階においてはVisualStudio2008を用いて開発を行っている。サンプリング周波数については、使用するデジタル脳波計の性能やこれまでに記録した過去のアナログあるいはデジタルデータを再度分析できるよう、今回は500Hzとしてプログラミングを行っている。

3-2. アーチファクトの除去

一般に、筋電図や体動、交流雑音等、脳波波形に含まれるアーチファクト（人工雑音）については、視察的に分析対象から除外することを前提としているが、本研究ではさらに分析精度を向上させることを狙って、藤森法の適用に先立って雑音

除去の前処理を行った。今回の藤森法の開発に当たっては、分析対象とする脳波の周波数帯域は臨床脳波への応用を考慮して0.5～30Hzとしている。このことに基づいて、特に30Hz以上の高周波成分には筋電図や交流雑音等が多く含まれている可能性があることから、FIRデジタルフィルタを応用した高周波遮断の前処理を行った。この脳波アーチファクトの除去を目的としたデジタルフィルタの応用については、別稿で詳細に述べている²¹⁾。特に従来のアナログフィルタでは脳波の波形が歪むという致命的な問題があったが、FIR方式のデジタルフィルタを用いることでこの問題を解決することができたことは大きな改善点であったと考えている（図7）。このような前処理を行うことで、結果的に藤森法における波形認識アルゴリズムの簡略化と処理速度の向上を図ることができた。

3-3. サンプリング周波数の設定

数学的なサンプリング定理を応用すれば、「サンプリングに関わる周波数は検出しようとしている最大周波数の倍を確保」しておけば再現できることになっている。すなわち、仮に検出しようとしている脳波の最大周波数が30Hzの場合、FFT等の数学的な周波数分析を行うのであればサンプリング周波数は最低60Hzあれば問題はないこと

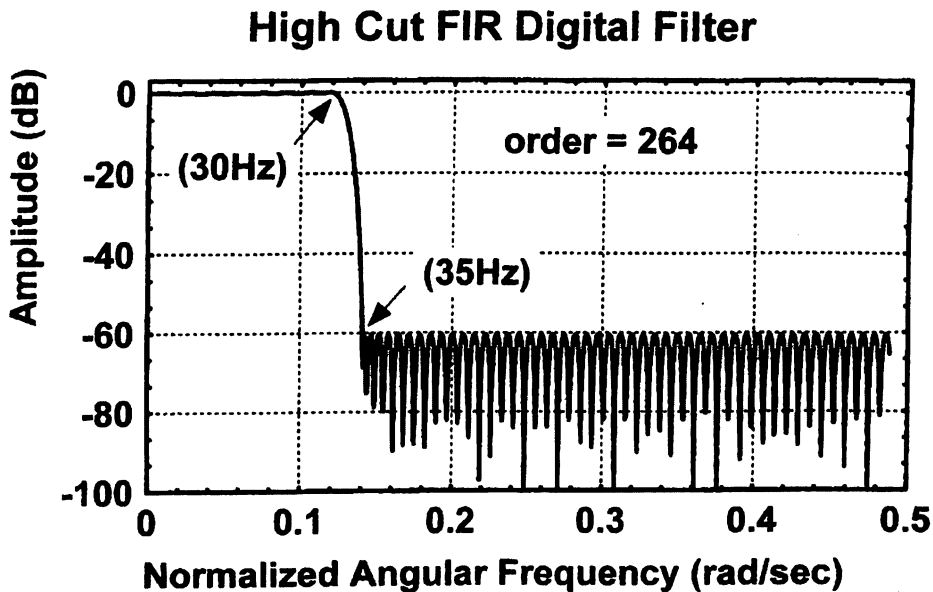


図7. 本システムで利用したFIRデジタルフィルタの周波数特性（緒方 2004）²¹⁾

になる。今回の開発はサンプリング周波数を 500Hz としたが、この分解能はサンプリング定理に照らせば十分すぎる値である。しかし、藤森法のアルゴリズムに基づく波形認識においては、この定理が単純に適用できないことが明らかとなった。すなわち、20Hz 以上の脳波ベータ帯域において一部検出困難な周波数領域が生じた。このことは、データレコーダなどのアナログ機器からコンピュータにデータを取り込む、アナログ→デジタル変換 (A/D 変換) 時にサンプリング周波数を単純に増加させることで解決可能であるが、この場合処理コンピュータ側のメモリやストレージ容量等の制約を十分考慮しなければならない。さらに、脳波計自体がデジタル化されている現在であっても、脳波計のもつ性能面を考慮すれば 500Hz 以上のサンプリング周波数は現実的ではないのが実情である。この点については単純なアルゴリズムの問題としての解決は困難であったことから、今回抜本的な見直しを図った。本研究では、試行錯誤を繰り返した結果、現在オーバーサンプリングの手法を応用したプログラムの一部修正を行うことで解決の糸口が見つかっている。オー

バーサンプリングの手法は、過去に梶村ら²⁵⁾が藤森法への応用を最初に試みているが、その目的はノイズ除去を主眼とした前処理であった。本研究では過去に記録されたデータの再処理が可能となるよう、500Hz のサンプリング周波数を固定したままでオーバーサンプリングを行った。これらデジタル信号処理の詳細については、別稿で詳細に述べる予定である。

3-4. 単独波と重畳波の扱い

藤森法については、これまでにいくつかの研究施設等でコンピュータ上に移植され、実用化が試みられてきた。特に東京医科歯科大学のグループによる研究はオリジナルといえるものであったが、藤森が発表した用手的方法を便宜上簡便化している部分があった¹²⁾²²⁾³³⁾³⁴⁾。すなわち先の図 6 に示した通り、オリジナルの藤森法はひとつの波の谷と谷を結び、その間にある頂点を検出しながら、設定した周波数帯域の波が検出されなくなるまで波形認識を続ける。ここでは便宜的に最初に検出した波を一次波、その次を二次波、三次波と呼ぶこととする。通常、深睡眠時に見られるデルタ波等を検出する際には、重畳する一次波と重畳され

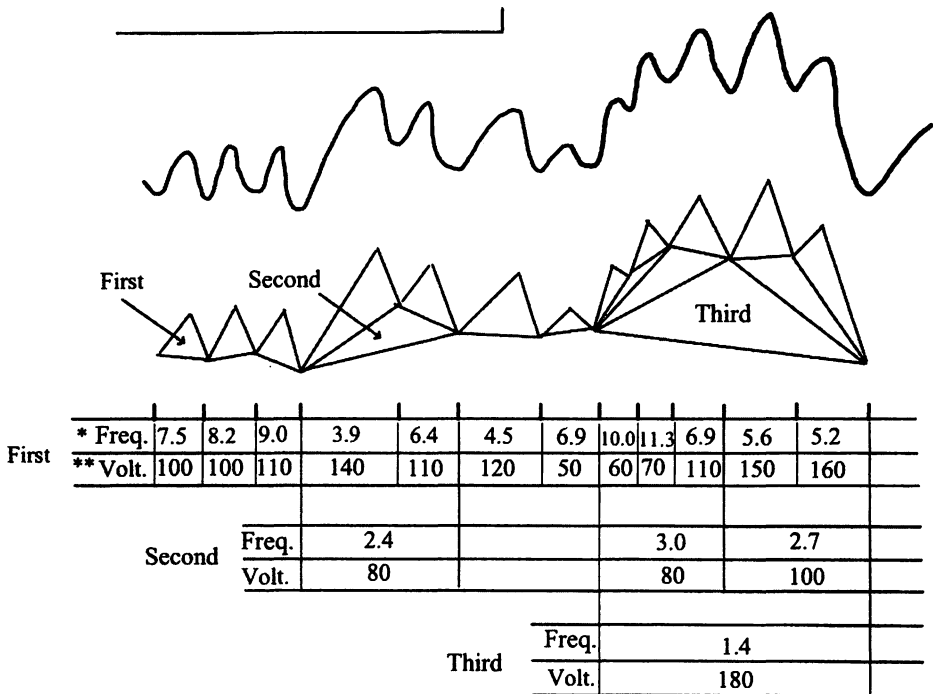


図 8. 藤森法に則った本システムにおける波形認識の模式図 (* Freq.:Hz, Volt.: μV) (First: 一次波、Second: 二次波、Third: 三次波、)

る二次波を検出することで波形認識を終了することが多いことから、先行研究では波の検出を二次波で終わるようアルゴリズムを設定している³³⁾³⁴⁾。メモリやストレージの容量など、先行研究が開発を行っていた時代のコンピュータのスペックを考慮すれば止むを得なかったものと考えられる。しかし、本来の藤森法のアルゴリズムに正確に則れば、三次波以降の波の検出もすべきであると考えられる。本研究で新たに開発した藤森法においては次数の制限を設けず、オリジナルの藤森法に忠実に従ったアルゴリズムに則ってプログラミングを行った。図8は本システムにおける脳波波形認識の模式図である。横軸は徐波が認識しやすいように、臨床脳波における通常の紙記録条件である3cm/秒より大幅に拡大して示してある。藤森法のアルゴリズムに厳密に従い、まず一次波(図中: First)をとっていく。一次波が重畳波となる場合には条件に応じて重畳される波として二次波(図中: Second)をとり、さらに条件を満たす場合には三次波(図中: Third)以降の波についても順次とっていく。ここで、各次数の波について個々に周波数(単位: Hz)と電圧(単位: μ V)の情報をそれぞれ得ることができる。このことが藤森法の最大の特徴であり、藤森法を用いることで時系列に沿った分析が可能となる所以である。これらの基礎データを基に、研究目的に合わせてヒストグラムにまとめる、あるいは電圧と周波数をパワに換算しながら、二次処理、三次処理を行っていく²⁵⁾。

3-5. 重畳波の検出精度

システムの開発当初から、特に脳波のアルファ波検出に関してはほぼ100%問題のない波形認識が可能であった。しかし、例えば軽睡眠時に出現するK-複合(K-Complex)にみられるような複雑なデルタ波や、陽性方向に切れ込みの深い瘤波(Hump wave)等、複数の次数に分かれて認識されるべき波形については、重畳波の取り方などについて実際の視察判定とは異なる認識をする場合も一方でみられた。これらの点については検出精度の問題であると同時に、誤差の許容範囲の問題であると考えられる。現在開発中の藤森法においては、様々なバリエーションの脳波波形を認識させ、視察的な判定との整合性を確認す

る地道な作業を行ってきた。その結果、少なくとも自発脳波に関してはノイズレベルの設定や、変化点の認識アルゴリズムの改善などでほとんど問題にならない程度まで検出精度を高めることができており、現在開発中の解析システムは十分に実用に足るものと考えている。

以上述べてきたように、この藤森法を脳波分析に応用することで、分析区間の制約を受けずに時系列に沿った脳波波形のダイナミックな変化を検出することが可能となった。このことから、上述した「時間分解能」の課題をある程度克服できたと考えている。このことはすなわち、これまで困難であった楽曲がもつフレーズと生体の脳波変動との詳細な対応関係について、新たに知る手がかりが得られたことを示している。図9は先の図2を改変したもので、楽曲がもつ最小のまとまりであるフレーズを選択的に抽出して藤森法による波形認識を行った一例である。図中、枠内は右後頭部から導出された脳波の原波形を拡大したものを上段に示し、それに対して波形認識を行った結果(谷と頂点の検出結果)を下段に示してある。先に述べたように、脳波のアルファ波検出に関してはほぼ100%問題のない波形認識が可能であることがわかる。ここで、例えば楽曲の演奏開始後4秒から、持続時間3.5秒のフレーズが存在していた場合、その部分を選択的に抽出し、その間に生じる脳波の変動様式を個々の波の単位で知ることができる(枠内)。図中では右後頭部からの導出を例にとっているが、他の導出部位についても同様の波形認識を行うことで、前頭、中心との部位間比較等も容易に可能となる。我々のこれまでの研究経過では、分析区間を設定したことによる制約から、どちらかといえば「マクロな視点」からの分析を行わざるを得なかった。しかし、今回の藤森法による新たな分析システムの開発によって、音楽のもつ効果と生体の反応様式について「ミクロな視点」から探っていくことがようやく可能となったと考えている。今後は、この藤森法を用いて楽曲のもつ個々のフレーズがもつ「曲想」等を考慮しながら、生体が音楽から受ける「効果」あるいは「影響」等について、さらに詳細な分析を行っていく予定である。

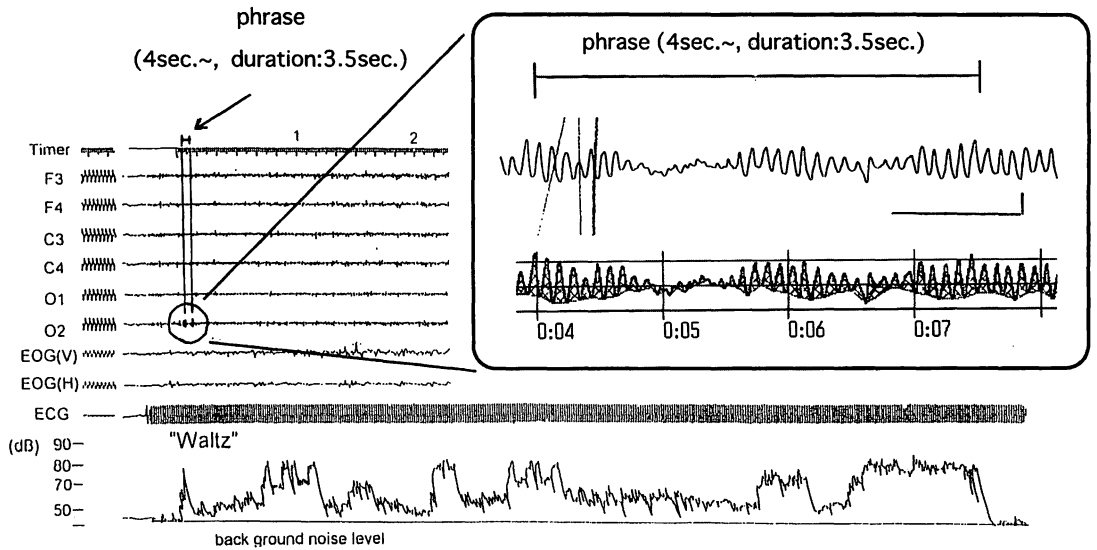


図 9. 楽曲の持つ最小のまとまりである「フレーズ」を選択的に抽出した脳波波形分析の一例
 (楽曲演奏開始後4秒から持続時間3.5秒、枠内上段：フレーズ、枠内中段：右後頭部から導出した原波形、
 枠内下段：波形認識の結果)

IV. 現段階における藤森法の改善点と今後の課題

現在開発中の藤森法を用いた分析は以下の手順に従って分析されている。すなわち、過去に行った脳波記録は A/D 変換されており、これに前述した FIR デジタルフィルターを前処理としてかけたものをバイナリー形式で光磁気ディスクに保存してある。現段階においてはこの光磁気ディスクのメディアから、バイナリーファイルを藤森法の分析プログラムに読み込んで分析を行っていることから、いわゆる「オフライン処理」の段階に留まっている。実際問題として、藤森法のアルゴリズムを応用した分析プログラムの開発を優先させたためにこのような状況になっているのが現状である。一昔前のアナログ脳波計の時代には、データレコーダなどのアナログ機器にまずデータを保存し、コンピュータ処理のためには A/D 変換をすることでデジタルデータに変換する必要があった。しかし、現在では脳波計自体がデジタル化されていることから、実験中にオンラインでデータをコンピュータに取り込み、同時に藤森法の波形認識を適用することで、実験終了後に分析結果をすぐに関覧することも不可能ではない。さらに現在のシステムでは、導出部位毎に分析をしているが、例えば臨床脳波で記録される、左右前頭、頭

頂、後頭、側頭の 8 部位について、オンラインで同時に並行した分析も理論上不可能ではない。現在、藤森法の波形認識アルゴリズムに工夫を加え、デジタル脳波計との接続も考慮しながら、実験中にオンラインで藤森法を適用できるよう修正を加えている。

最後に本システムの臨床脳波への応用の可能性について述べる。臨床家が脳波を判読する場合には、記録の前後関係や他の部位との対応関係などを総合的にみて行われており、ケースバイケースで判読基準は柔軟に変化しているのが実情である。しかし波形認識された結果について、突発性異常波の検出はいうまでもなく、どのような脳波記録についても視察判定と異なる場合が全く皆無であるとは言い切れない。臨床脳波で不可欠な突発性異常波の検出についても、熟練した臨床家であれば見逃すことは無い。しかし、仮に突発性異常波として認識された波形であっても、別の記録上では同じ波形であっても単なる速波として認識される場合もあることから、コンピュータ上における突発性異常波の検出は極めて困難である⁸⁾。現在開発中の藤森法による波形認識システムは、自発脳波である基礎律動への適用に関してはほぼ問題が無いところまで開発が進んでいると考えている。しかし、突発性異常波の検出等、特殊な脳波の波

形認識に関しては、藤森法の用手的なアルゴリズムのさらなる改善に加えて、今後はファジー理論あるいはフラクタル理論等にみられるような数学的な手法の応用も考慮する必要があると考えられる⁴⁾¹⁰⁾。

V. まとめ

音楽は、学校現場において実践的な取り組みに結びつきやすく、なおかつ子どもの様々な要素の発達を知る指標ともなり得る有効な媒体（メディア）であると言える。音楽を教育実践に効果的に応用するためには、音楽に対する認知の特性と反応性を客観的に評価し、得られた所見を基盤として子どもの実態把握及び具体的な取り組みに関わる実践カリキュラムを考案することが必要である。そのためには、音楽に関わる知覚認知・反応様式に関わる基礎的研究の蓄積と総合的な発達や系統的な教育実践プログラムに見られるような実践的研究が共に不可欠となる。これらの音楽に関わる基礎的あるいは実践的研究はいずれも、いわば「音楽を科学する」試みであると考えられる。本稿では、特に音楽鑑賞時の精神生理学的研究に関わるこれまでの経験を例にとりながら、まず「音楽を科学すること」に関する課題について整理した。次にそれに基づいて、今後「音楽を科学すること」を目的とした精神生理学的な研究アプローチの具体的な方策を探るために、藤森法に基づく脳波解析システムの構築に基づくこれまでの経過とその有効性について述べた。この藤森法を脳波分析に応用することで、分析区間の制約を受けずに、時系列に沿った脳波波形のダイナミックな変化を追うことが可能となり、時間分解能に関するこれまでの課題をある程度克服することができた。このことはすなわち、これまで困難であった楽曲がもつフレーズと生体の脳波変動との詳細な対応関係等について、今後新たに知るための極めて有効な手がかりが得られたことを示している。

「芸術としての音楽」を自然科学的なアプローチをもって研究する、すなわち「科学する」ことは果たして可能であろうか。本研究の遂行に当たって、このことは常に付き纏う大きな課題であった。音楽が芸術であればこそ、人間に対して効果的なメディアとなりうるとすれば、そのメカニズムの

解明に繋がる基礎的研究は今後とも必要不可欠であろう。我々は、これまでの様々な試行錯誤を通じて「音楽を科学する」ためのひとつの試みとして、精神生理学的なアプローチをもって、音楽が生体に与える影響、あるいは音楽に対する生体の反応様式を知ろうとする試みは有効であると考えている。本稿では、音楽鑑賞時の生体の反応様式を客観的に知るための具体的な方策のひとつとして、藤森法を応用した脳波分析の有効性を示した。今後、藤森法を応用したデータの蓄積を図っていくことで、これまで明らかにすることが困難であった音楽に対する生体の反応様式を、今後明らかにできる可能性は充分にある。これら基礎的研究から得られた新たな所見を、さらに実践的研究へと積極的に繋げ、現場で活かしていくことで、将来的な子どもの発達支援に向けて音楽の活用はさらに有効な手段となりうると考える。

参考文献

- 1) 青木繁伸、川田智之、竹内一夫、小川正行、鈴木庄亮：「第1報マイクロコンピュータによる睡眠ポリグラフィ解析システムの開発」日衛誌 Vol.43. 第6号 p.1092-1100. 1989.
- 2) 藤森周一：「脳波の臨床的簡易分析法としてのヒストグラム法とその臨床応用」若林、藤森編、「脳波の分析とその応用」、医学書院、p.101-119.1957.
- 3) 五十嵐由紀、緒方茂樹：「知的障害特殊学級における音楽を活用した取り組み - 自閉的傾向を伴う知的障害児の事例を通して -」琉球大学教育学部 障害児教育実践センター紀要第3号： p.109-123 2001.
- 4) 井上勝裕、藤尾光彦、前田誠、山口朋成：「ウェーブレット手法の脳波解析への応用」Journal of Systems, Control and Information Engineers Vol.53, No.1: p.34-40. 2009.
- 5) 岩城達也、緒方茂樹、林光緒、堀忠雄：「音楽が覚醒水準に及ぼす影響」脳波と筋電図 第23巻 第1号： p.10-16 1995.
- 6) 柿沼日和、古閑永之助、緒方茂樹：「音楽鑑賞の精神生理学的研究 - 一曲想と脳波変動の関係 -」東京学芸大学紀要 第1部門 教育科学 第41集： p.47-56 1990.
- 7) 古閑永之助、谷口あづさ、緒方茂樹：「音楽鑑賞と心拍数 - 健康高校生及び知的障害をもつ高等部生

- 徒について」東京学芸大学紀要 第 1 部門 教育科学 第 38 集: p.161-168 1987.
- 8) 古和田正悦、佐藤成和、平賀旗夫、友野啓康、八幡邦雄: 「臨床脳波のパターン自動認知」: 臨床脳波 Vol.13. No.9. p.647-651. 1971.
 - 9) 桑原啓郎、稲永和豊、田中正敏、水木泰、磯崎宏: 「Interval Histogram 法による睡眠脳波の自動解析」: 臨床脳波 Vol.28. No.12. p.855-861. 1986.
 - 10) 丸山貴司、中川匡弘: 「脳波のマルチフラクタル次元を用いた感性解析」 Journal of JACT vol.16, No.3: p.97-104. 2011.
 - 11) 松井紀和: 「発達障害への音楽療法の適用」: 発達障害研究 11: p.98-101, 1989.
 - 12) 松浦雅人、大久保善朗、上杉秀二、小島卓也、高橋良、山本敏世、福沢等、島藺安雄、中村仁平: 「波形認識法を用いた脳波定量分析の臨床応用に関する研究(第 1 報) -脳波基礎活動自動判定のための年齢別正常値の設定と分析装置の作成について-」臨床精神医学第 15 巻第 9 号 p.1565-1577. 1986.
 - 13) 緒方茂樹、谷口あづさ、古閑永之助: 「音楽鑑賞と脳波」: 臨床脳波 第 28 巻 第 8 号: p.548-553 1986.
 - 14) 緒方茂樹: 「音楽鑑賞時の脳波変動」 脳波と筋電図 第 17 巻: 第 1 号 p.20-28 1989.
 - 15) 緒方茂樹、柿沼日和、古閑永之助: 「音楽鑑賞の精神生理学的研究-楽曲の音圧レベルの定量化とシミュレーションの試み-」東京学芸大学紀要 第 1 部門教育科学 第 42 集: p.1-10 1991.
 - 16) 緒方茂樹: 「音楽のもつ音圧変動が脳波に及ぼす影響とその心理学的意義」 脳波と筋電図 第 20 巻 第 4 号: p.337-346 1992.
 - 17) S. Ogata: "Human EEG responses to classical music and simulated white noise Perceptual and Motor Skills vol.80: p.779-790 1995.
 - 18) 緒方茂樹: 「受動的音楽鑑賞時の脳波変動に関する研究」 広島大学大学院生物圏科学研究科 博士論文 1995.
 - 19) 緒方茂樹: 「障害児教育における音楽を活用した取り組み (I) -データベースからみた特殊教育緒学校の現状-」 琉球大学教育学部 障害児教育実践センター紀要第 2 号: p.63-98, 2000.
 - 20) 緒方茂樹: 「障害児教育における音楽を活用した取り組み (II) -教育実践場面における活用を目指したデータベースシステムの構築-」 琉球大学教育学部 障害児教育実践センター紀要 第 5 号: p.77-98 2003.
 - 21) 緒方茂樹、相川直幸: 「精神生理学的な研究アプローチを実際の教育分野へ応用するために -脳波 artifacts 除去の新たな方策-」 琉球大学教育学部紀要第 64 集: p.341-359 2004.
 - 22) 大久保善朗、松浦雅人、小島卓也、一瀬邦弘、島藺安雄: 「入眠期の脳波と眼球運動の数量的研究 -波形認識法による分析装置を用いて-」 脳波と筋電図 第 13 巻、第 2 号、p.159-168. 1985.
 - 23) 大城典子、比嘉絵美、緒方茂樹: 「子どもの音楽における発達と評価に関する研究 -教育実践場面における活用をめざして-」 琉球大学教育学部 障害児教育実践センター紀要第 13 号: 投稿中
 - 24) Rechtschaffen, A., & Kales, H. A manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep of human subjects. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1968.
 - 25) 村村憲之、古田敏: 「波形認識法による脳波の定量的分析」 山梨大学教育学部研究報告第 39 号、p.195-207. 1988.
 - 26) 前明子、緒方茂樹: 「音楽を活用した教育実践のための基礎的研究 -音楽鑑賞に関わる心理的「構え」と脳波変動-」 琉球大学教育学部 障害児教育実践センター紀要 第 8 号: p.59-84 2006.
 - 27) 鈴木明文、安井信之、吉岡喜美雄、竹之内保、西牟田啓: 「波形認識法による脳波周波数二次元表示」 臨床脳波 Vol.26, No.10. p.652-658 1984.
 - 28) 當真綾子、緒方茂樹: 「音楽を活用した教育実践に向けた基礎的研究 -脳波からみた音楽鑑賞時の意識変動と心理的「構え」-」 琉球大学教育学部 障害児教育実践センター紀要 第 6 号: p.41-54. 2004.
 - 29) 遠山文吉: 「障害児教育と音楽療法」: 脳性マヒ児の教育 74: p.32-37, 1989.
 - 30) S. Uchida, M. Matsuura, S. Ogata, T. Yamamoto, N. Aikawa: "Computerization of Fujimori's method of waveform recognition: a review and methodological considerations for its application to all-night sleep EEG." Journal of Neuroscience Method Vol.64: p.1-12 1996

- 31) 梅本堯夫：「音楽心理学」：誠信書房、1966.
- 32) 與座亜希子、玉城葉月、上原方希、緒方茂樹：「音楽を活用した子どもの発達と評価に関する方法論的研究-アセスメントツールと実践ツールの開発-」琉球大学教育学部障害児教育実践センター紀要第7号：p.59-84. 2005.
- 33) 山本鉦世：「臨床脳波の各種コンピュータ解析」神経進歩 第19巻、第6号、p.1075-1089. 1975.
- 34) 山本鉦世：「波形認識法を用いたコンピュータ解析による健康成人脳波諸要素の正常値に関する研究」精神神経学雑誌 第79巻、第7号、p.309-347. 1977.