

簡易脳波計による学習時の思考と記憶の比較分析

平井章康^{†1} 吉田幸二^{†2} 宮地功^{†3}

近年、登場してきた簡易脳波計は携帯可能な大きさであり、装着が簡単で、装着者の行動を制限しない。このため、日常的な使用が可能で、比較的安価で入手し易い利点がある。そこでこの簡易脳波計を用いて脳波情報を取り入れた遠隔教育における指導支援にフィードバックできるシステムの構築を検討している。本論文では簡易脳波計の特性や脳波状況について論じ、脳波計測において学生の学習行為中の思考や記憶に関して脳波データの相関関係を実験により比較分析した。その結果、 β/α 値はストレスや思考する集中度合いを測る指標として、 $Low_γ$ は記憶作業に反応を示す事が判明し、記憶の度合いを測る指標として有効であると結果が出た。

Comparison analysis of the thought and the memory at the learning time by the simple electroencephalograph

FUMIYASU HIRAI^{†1} KOUJI YOSHIDA^{†2} ISAO MIYAJI^{†3}

1. はじめに

生体情報として脳波は、脳の情報処理過程の評価指標として広く用いられており、脳波の特性の中でもその周波数特性が学習、言語、知覚などの認知過程と密接に関連することが示されている¹⁾。近年、従来のような高価で大掛かりな装置だった脳波計から、脳科学分野や技術の発展により、携帯可能な程の大きさになり、装着が容易で装着者の行動を制限せず、比較的安価で入手し易い簡易脳波計が登場してきた。そこで簡易脳波計の利点に注目し、遠隔教育に脳波情報をフィードバックさせたシステムの構築を検討している。

遠隔学習システムは学習の進捗状況や結果を即座にフィードバックして確認できるという利点がある。しかし、実際に学習している様子を確認できない点や、学習状況や進捗情報などの情報だけではサポートに限界が生じるといった欠点も存在する。そこで学生の状態を把握しながら、フォローする為にユーザの思考や精神状態を脳波の生体情報を用いて確認する事で欠点を改善し、指導支援及び学生の学習を助長するシステムに繋がると考える。

本論文では簡易脳波計の特性や脳波状況について論じ、脳波計測において脳波情報を思考状態の外面的指標として利用できるかを、学生の学習行為中の思考や記憶に関して脳波データとの相関関係を実験と脳波の周波数特性により比較分析した。

2. 脳波

脳波は人の情報処理過程の一つの指標として捉えることができる。例えば、医療などでは脳の統合的な機能評価に用いられ、癲癇や血管障害などの脳障害を調べるために利用される。脳内の神経細胞の発火やシナプスの神経伝達の際に電気信号が生じる。この生体信号は脳内での電位変化として現れるため、頭皮上に置いた電極などを用いて記録することが出来き、これを脳波と呼ぶ²⁾。脳波にはいくつか種類があり、周波数の大きさから5つに分類できる。以下に名前、周波数範囲、とくに出現が見られる心理状況を挙げる。

- ・ δ 波(デルタ波), 1 ~ 4 Hz, 睡眠時
- ・ θ 波(シータ波), 4 ~ 8 Hz, 睡眠時・注意時
- ・ α 波(アルファ波), 8 ~ 12 Hz, リラックス・閉眼時
- ・ β 波(ベータ波), 15 ~ 20 Hz, 集中・運動時
- ・ γ 波(ガンマ波), 30 ~ Hz, 記憶・視覚処理時

これらの周波数は得られた原脳波データに対してフーリエ解析することでそれぞれのパワースペクトルを求めることができる。

しかし、脳波は個人差によって大きく同一人物でも時間帯・状況によって脳波と思考状態の関係は変化し、巷で言われているような α 波が見られればリラックスしているというものではない。したがって何度も測定を重ねて各個人の様々な状況における脳波と比較することが必要となってくる。

3. 簡易脳波計

脳波を測定するには脳波計を用いる。従来の脳心理学研

[†] 湘南工科大学 工学研究科 博士前期課程 電気情報工学専攻

^{††} 湘南工科大学 工学部 情報工学科

^{†††} 岡山理科大学 総合情報学部 情報科学科

究では大掛かりな装置を用いて実験を行っていた。しかし、この脳波計は日常使用に向いておらず大量に電極が付いた医療型では装着に手間がかかる上に被験者の行動が制限されるという問題点があり、ユーザにストレスを与えてしまう。これでは本研究の目的とした学習を助長させることも難しくなる。脳波データの取得に関して医療レベルの精度を求められる場合には、脳波装置を使用すべきであるが、簡易的な脳波入力インタフェースや日常使用を想定したアプリケーションに脳波情報を適用することを考えた場合、出来るだけ小型で手軽に利用できる携帯の物のほうが理想である。

そのため本研究のような教育への導入を考慮した場合には医療用の脳波計よりも簡易脳波計を使用の方が簡便的で効果的だと考えられる。よって本研究では簡易脳波計と呼ばれる比較的安価で装着性の良い NeuroSky 社の MindSet という脳波計を使用する³⁾。MindSet は脳波の数値データを PC に送信する。額のセンサーと耳の電極の2点間の電位差を測り、イヤパッドに内蔵されているオンボードチップにより取得した脳波を解析し、通信用 PC へ無線通信方式の一つである Bluetooth を用いて送信を行われる。図1は MindSet 本体と PC との通信を示す。

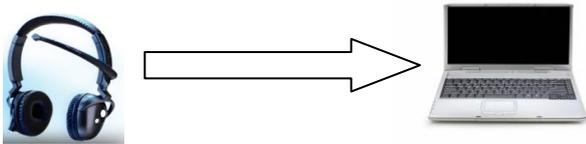


図1. MindSet 本体と通信

MindSet の特徴を以下に列挙する。

- ・測定箇所：前頭葉(国際 10/20 法(Fp1))の一点のセンサー
- ・耳朶に基準点を設けている
- ・ドライセンサー型 EEG モジュール
- ・センシングから解析までイヤパッド内チップで行う
- ・ほとんどのプロセッサや D P S で動作可能
- ・PC へのデータ転送は Bluetooth 通信を用いる
- ・512Hz でサンプリング
- ・1 秒ごとに FFT(高速フーリエ変換)をかけて各周波数成分を抽出

サンプリング周波数 512Hz であるため一秒間に 512 個の原脳波データを得る。このデータに FFT をかけて周波数成分を抽出し、データをデジタル信号化して PC にデータを送信する。これ以外にも送信されるデータがあり、poor_sig_lev(ノイズの強さ)・e-sense メーター(NeuroSky 社独自の指標)である attention(集中度)と meditation(瞑想度)もデータとして受け取ることが可能である。FFT の際の各周波数成分範囲は表 1 のとおりである。

表 1. 周波数成分値域

タイプ	測定可能データ (Hz)	心理状態
δ 波	0.5 - 2.75	夢を見ない深い睡眠, ノンレム睡眠, 無意識
θ 波	3.5 - 6.75	直感的, 創造的, 想起, 空想, 幻想, 夢
Low α 波	7.5 - 9.25	リラックス, ただし気だるくはない, 平穏, 意識的
High α 波	10 - 11.75	旧 SMR (感覚運動リズム), リラックスしているが集中している, 統合的
Low β 波	13 - 16.75	思考, 自己および環境の認識
High β 波	18 - 29.75	警戒, 動揺
Low γ 波	31 - 39.75	記憶, 高次精神活動
Mid γ 波	41 - 49.75	視覚情報処理

NeuroSky 社の簡易脳波計に対応したライブラリやアプリケーションがあり、研究や開発をすることがしやすい環境になっている。本研究のシステム環境には NeuroSky 社提供のアプリケーションを利用して脳波データの取得を行う。

4. 脳波状況と学習状態

脳波の波形は関連事象と共に観察すると精神状態の指標として用いることが出来るということは従来からの心理学や脳科学の研究結果から経験的にわかっている。人間の精神状態を観察するために、得られた脳波に対して離散フーリエ変換することで得られた α 波や β 波のパワースペクトルや、α 波や β 波の脳波全体に対する割合、および α と β 波の比率を測ることが有効とされている⁴⁾⁵⁾。一般的に α 波は安静時・覚醒時共に見られる波形だが、リラックス状態時には α 波の振幅が大きくなり、反対に緊張時には α 波の振幅が小さくなり β 波の出現が見られるなどの特徴がある。

特に β 波(13-30Hz)が思考状態と関連性が高いとして、知的作業と脳波の関係を調べた研究報告もいくつか存在している。中でも Giannitrapani らは知的作業と脳波の関係を調査し、知能テストを受けている最中の健常者の脳波を測定した⁶⁾。その結果 β 波の低周波成分が読解テスト・数学テスト・図形整理テスト中に優勢となり、それ以外のテスト中には優勢でなくなることがわかった。これは β 波が思考状態を推定する指標としてある程度有効であることを示している。

γ 波(31Hz-)は主に高次精神活動に関連しているとされ、認知処理の分散行列を生むメカニズムであるとして考えられている。知覚のような同期的で協奏的な認知活動を可能

にする。また γ 波は筋肉や眼球の動きによって影響を受けやすいので識別するための慎重な信号の分離が必要不可欠となる。

5. 脳波取得システム

本研究でも脳波を観察し実験を行うが、その前に脳波を記録する脳波取得システムの構築をする必要があった。MindSetのAPIは脳波データを取得するだけで記録はできない。そこで脳波データを記録するWindows用プログラムをJavaで作成・実装した。図2にシステム概略図を示す。

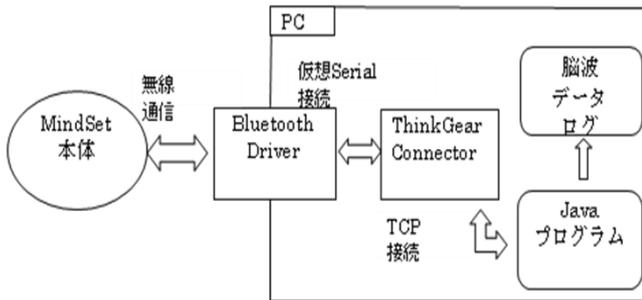


図2. システム概略図

MindSetはBluetoothDriverを介してPCにデータを送信する。PC内部からデータを取り出すにはNeuroSky社が提供するサーバプログラム(ThinkGearConnector)に対してTCPでアクセスする。自作したJavaプログラムはサーバプログラムに対してソケット通信を行い、データの受信を行う。一秒おきにパケットが送信され、取得したパケットを解析することで、各周波数帯の数値データ、集中度、リラクセス度、センサー感度を取り出すことができる。受信データはピックエンディアン方式のため、本システムで扱うことができるようにリトルエンディアン方式の浮動小数点形式でテキストファイルにログデータの書き込みを行う。

6. 脳波計測実験

この実験の目的は、簡易脳波計装着時の認知作業における脳波と学習状態時の思考及び記憶の関係性を分析することである。よって認知プロセス中の脳波を測定し、採取した脳波と思考との関係や周波数特性を観察し、学習状態と脳波の相関関係を検討する。脳波計測は本研究室の学生数名に被験者として協力をお願いした。計測場所はゼミ室で行い、また十分な休憩時間を設けることで集中力を損なうことに配慮する。

実験では各周波数帯パワースペクトルとセンサー感度を記録する。解析する際の前提条件としてセンサー感度が一番良好の時のみしか解析を行わない。さらに5 Hz未満の δ 波と θ 波にノイズが発生しやすいため、解析は省くようにしている。また筋肉や眼球の動きに大きく影響を受けるMid- γ (41-49.75)も同様に省いている。 β 波に近い為か γ 波の中でもLow- γ 波(31-39.75)は影響は少ない為、解析する。他にもまれにセンサー感度が一番良好の時でも、連

続した安定したデータの中に明らかに数値がおかしい場合がある。これもノイズが発生していると判断して解析は省いている。

6.1 実験概要

- ・被験者：二十代男性3名(理系大学生)
- ・計測時間：最大3分間
- ・認知課題
(実験1)音楽鑑賞
(実験2)算術的課題学習(flash暗算)
- ・補足：実験後の調査

6.2 実験手順

被験者がPCと向かい合った状態で椅子に座り、簡易脳波計を装着した状態で指定の認知課題を行う。そのときの脳波を脳波取得システムにより逐次記録していく。その後、表計算ソフトにより各周波数パラメータの分散、各パワースペクトル量を比較分析する。なお、音楽鑑賞ではジャンルの好み、自由計算時には計算方法が各自によって異なる為、実験後に被験者から調査を行うこと不明瞭な部分を補足する。調査項目は以下の通りである、

- ・音楽鑑賞3種からのジャンルの好み
- ・自由計算時の取り組み方法
- ・計算と記憶の得意・不得意

6.3 実験1—音楽鑑賞

3分間指定されたジャンルの音楽を鑑賞する。計測は開眼状態で行う。鑑賞するジャンルは以下の通りである。

- ・音楽鑑賞(electronic)
- ・音楽鑑賞(classical)
- ・音楽鑑賞(jazz)

(1)実験結果

実験後の調査の結果を踏まえ、音楽鑑賞の結果を表2に記載する。表には各被験者のジャンルの好みの順位と α 成分、 β 成分のスペクトル平均、 β/α の平均を記載する。図3には各被験者のジャンルの好みの順位と β/α の平均のグラフを示す。

表2. 音楽鑑賞の結果

	音楽鑑賞	好みの順位	α 平均	β 平均	β/α 平均
被験者A	electronic	1	3.35895	1.74865	0.65167
	classical	3	2.36037	1.39479	0.78461
	Jazz	2	3.25979	1.77580	0.67513
被験者B	electronic	3	2.21645	1.32405	0.82492
	classical	1	2.67938	1.56875	0.72554
	Jazz	2	2.39551	1.45120	0.79272
被験者C	electronic	2	2.69348	1.59780	0.76520
	classical	3	2.38589	1.40642	0.80344
	Jazz	1	2.82039	1.61367	0.74251

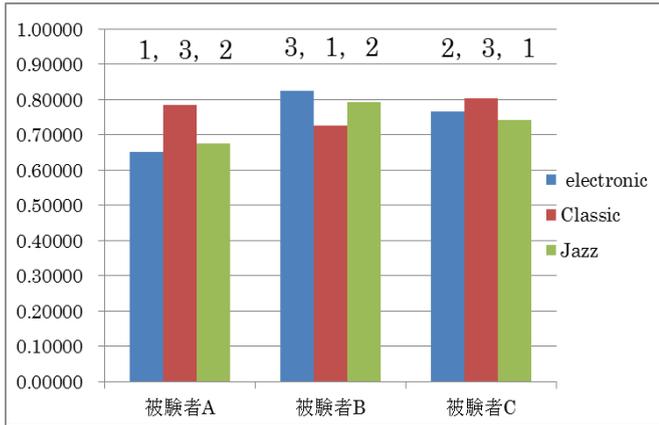


図3. ジャンル順位と β/α 平均グラフ

(2)実験結果分析

実験結果を見てみると音楽鑑賞では、それぞれのジャンルを比較してみると嫌いなジャンルでは β/α 値は増加し、好きなジャンルになるほど β/α 値は低くなる事が判明した。被験者によって β/α 値の変化が異なり、規則性が無いように見えたが、 β/α 値を低い順に並べてみると、好みのジャンルの順位順と同様の並びをしていた。

6.4 実験2—算術的課題

1問あたり 0.5秒間隔で連続して表示される数字5つを加算する問題を10問連続して解く。3秒間のインターバルを挟み、次の問題へ移る。また課題は以下の指示の下、行う。

- ・自由計算(指示を与えず、各自自由に問題に取り組む)
- ・計算重視(覚えずに表示された瞬間に順次計算する)
- ・記憶重視(先に表示された5つの数字を覚えてから計算する)

(1)実験結果

自由計算時にどのような手法で取り組んでいたのか調査した所、細かい部分は異なるが概ね全ての被験者は計算するか記憶するかを状況によって使い分けて取り組むという手法をとっていた。

被験者 A：基本的に計算重視、計算が間に合わない時のみ記憶して計算する。

被験者 B：2, 3番目の数字までは計算し、残りは記憶して計算する。

被験者 C：計算が簡単な数字のみを計算して、難しいと判断したら記憶して計算する。

また記憶と計算の得意不得意についても調査し、これを考慮に入れて実験の結果をそれぞれ表3_1, 3_2, 3_3に示す。表には実験1の結果も参考にし、【音楽鑑賞(electronic)が好み、計算が得意】な被験者 A, 【音楽鑑賞(classical)が好み、記憶が得意】な被験者 B, 【音楽鑑賞(jazz)が好み、どちらも同じ位】な被験者 C の3名による $\beta/\alpha \cdot low_\gamma$ の平均, 分散をそれぞれ記載する。図4, 図5には

各被験者の $\beta/\alpha, low_\gamma$ の平均を比較したグラフを示す。

表3_1. 被験者 A 「音楽鑑賞が好み、計算が得意」

被験者 A	認知作業	β/α 平均	β/α 分散	Low_γ 平均	Low_γ 分散
音楽鑑賞	音楽鑑賞 (electronic)	0.65167	0.23039	0.28196	0.05579
	音楽鑑賞 (classical)	0.78461	0.25888	0.30471	0.09386
	音楽鑑賞 (jazz)	0.67513	0.20000	0.22446	0.04573
算術的課題	自由計算	0.70166	0.22966	0.24043	0.07013
	計算重視	1.57748	1.74876	0.27906	0.04940
	記憶重視	0.86462	0.22815	0.77958	0.69460

表3_2. 被験者 B 「音楽鑑賞が好み、記憶が得意」

被験者 B	認知作業	β/α 平均	β/α 分散	Low_γ 平均	Low_γ 分散
音楽鑑賞	音楽鑑賞 (electronic)	0.82492	0.26036	0.25213	0.02883
	音楽鑑賞 (classical)	0.72554	0.27589	0.24604	0.03976
	音楽鑑賞 (jazz)	0.79272	0.21514	0.21514	0.06640
算術的課題	自由計算	0.92881	0.74894	0.53062	0.39876
	計算重視	1.09457	1.18760	0.40270	0.14323
	記憶重視	0.74728	0.24607	0.80152	0.74628

表3_3. 被験者 C 「音楽鑑賞が好み、両方とも同じ位」

被験者 C	認知作業	β/α 平均	β/α 分散	Low_γ 平均	Low_γ 分散
音楽鑑賞	音楽鑑賞 (electronic)	0.76704	0.28385	0.30986	0.05646
	音楽鑑賞 (classical)	0.80344	0.33070	0.28253	0.05584
	音楽鑑賞 (jazz)	0.74251	0.31665	0.30328	0.04828
算術的課題	自由計算	1.18927	0.99259	0.37377	0.09034
	計算重視	1.37995	1.62096	0.40329	0.08138
	記憶重視	0.84637	0.37325	0.62736	0.59020

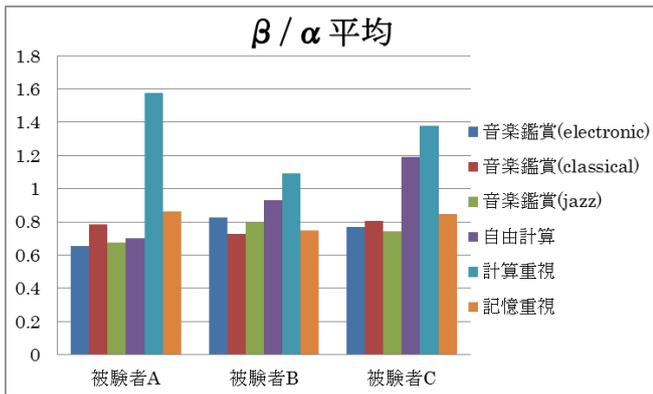


図 4. β/α 平均グラフ

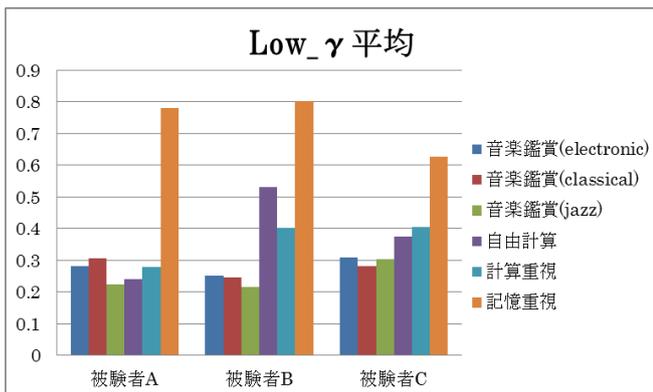


図 5. Low_γ 平均グラフ

(2) 実験結果分析

実験結果を見ると、算術的課題は音楽鑑賞と比べて β/α 値は大きく増加していた。表 3 と図 4 を見るとその中でも計算重視では 3 者全員が β/α 値の平均値が 1 以上になるほどに増加傾向が顕著に表れている。

また β/α 値は被験者の得意不得意によって集中する度合いも変わってきているのが見られる。計算重視では計算が得意と答えた被験者 A の変化が一番大きく、続いて C, B の順に大きく、計算の得意順と同様の順位だった。記憶重視においては β/α 値の変化量は音楽鑑賞と同じ位の値だった。これによって、実験課題の難易度を変更していないのに方法によっては β/α 値が大きく変化する事が判明した。

次に Low_γ 成分について注目してみる。表 3 と図 5 を見てみると記憶重視において β/α 値の変化が少ない代わりに Low_γ 成分の増加が見られた。変化量は計算重視から自由計算、記憶重視の順に Low_γ 成分の平均・分散が増加している。特に記憶重視の Low_γ 成分の分散は大きく変化していた。

記憶が得意な被験者 B に注目してみる。図 6_1, 6_2, 6_3 には被験者 B の算術的課題の Low_γ 成分の推移を表すグラフをそれぞれ示す。計算重視のグラフから自由計算のグラフ、記憶重視のグラフの順に Low_γ 成分は大きく変化しているのが見られる。 Low_γ 成分の最大値が計算重

視の値に対して、記憶重視では 2 倍以上の値を出しているのが解った。さらに記憶重視のグラフは変化が激しく、問題が出題される度に Low_γ 成分値が増加している反応が見られる。

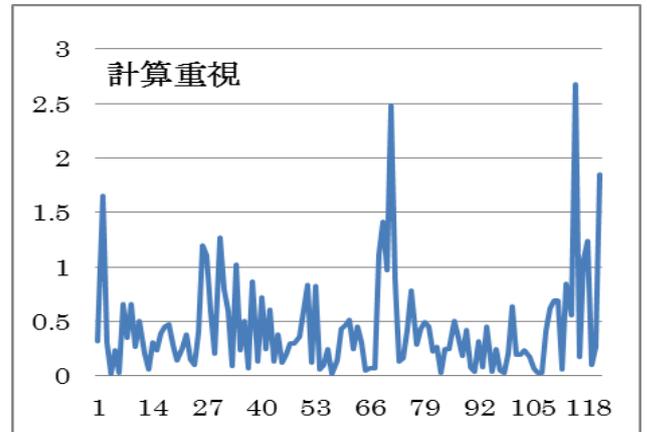


図 6_1. 被験者 B Low_γ グラフ (計算重視)

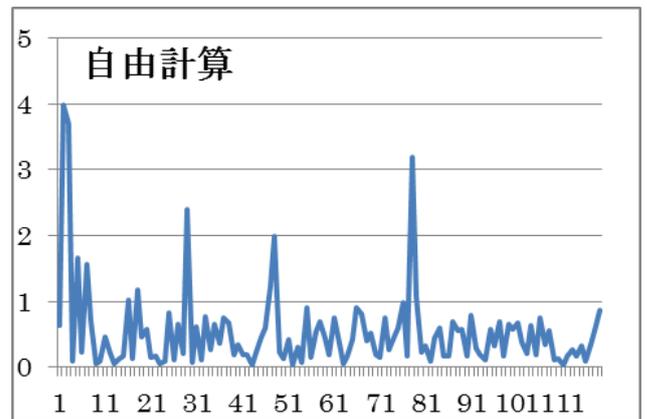


図 6_2. 被験者 B Low_γ グラフ (自由計算)

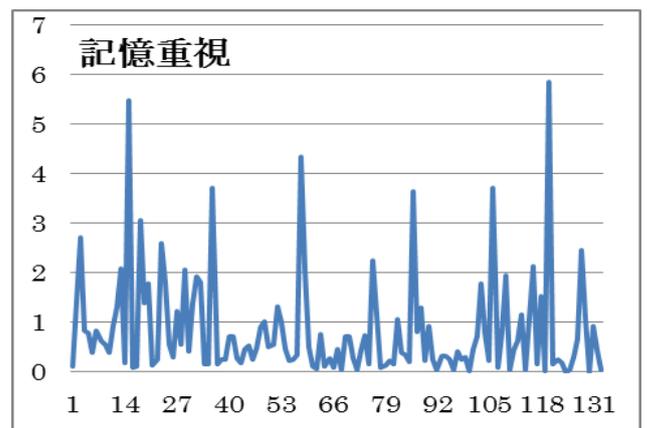


図 6_3. 被験者 B Low_γ グラフ (記憶重視)

7. 総合評価と考察

(1) 音楽鑑賞

実験の結果、音楽鑑賞では、ジャンルの好み調査と各

ジャンルの α 波、 β/α を比較分析すると、変化量は少ないが、嫌いなジャンルだと β/α 波が増加し、好みのジャンルだと減少している事が判明した。これは好みの音楽ジャンルだと落ち着いて聞いている為減少したと考えられる。このことから β/α は個人の好みによって変化する快感・不快感を表すストレスの度合いを調べるのに有効ではないかと考えられる。

(2) 算術的課題

算術的課題では音楽鑑賞と比べて思考を必要とするので β/α 値が増加傾向にあった。計算重視、自由計算、記憶重視を比べたところ、一番思考と集中が必要とされる計算重視の β/α 値が大きく増加している。このことから思考と集中が必要な時ほど増加して、脳が活性していると考えられる。

また計算の得意不得意について被験者を比べて見ると β/α の変化に影響がある事が判明した。計算重視の時は、計算が得意な場合 β/α 値も大きく、不得意な場合は低く変化している。一方、記憶重視においては β/α 値の変化が少ないのは記憶する事で瞬時に計算する必要が無くなり、余裕があった為、変化が少なかった事を示していると考えられる。

上記と実験課題の難易度を変更していない事を考慮に入れると、瞬間的(flash 暗算)な思考を必要とした時ほど脳は集中して β/α 値の変化は大きく、余裕がある時ほど β/α 値は変化が少なくなると考えられる。したがって β/α 値は瞬間的な思考をするための集中度を測る指標として有効であると考えられる。

Low $_{\gamma}$ 成分に注目すると、記憶重視、自由計算、計算重視の順に記憶が必要なほどLow $_{\gamma}$ 成分が増加することが判明した。このことからLow $_{\gamma}$ 成分は記憶する作業の際に反応を示す事が判明し、記憶しているのか度合いを測る判断基準として有効であると考えられる。また実験上、瞬間的な記憶が必要だった事から、認知心理学による短期記憶に当てはまるのではないかと考えられる。よって今後は記憶する内容の量や難易度による変化についての実験を検討する必要がある。

8. まとめ

本論文では簡易脳波計を用いた学習状態中における思考、及び記憶の相関分析のため、複数の認知プロセス中の α 波・ β 波・low $_{\gamma}$ 波のパワースペクトルおよび β/α を実験により比較分析した。実験の結果、 β/α 成分を観察することによってストレスの度合いや、瞬間的な思考をするための集中度を測る指標となると考えられる。またLow $_{\gamma}$ においては記憶しているのか度合いを測る判断基準として有効であると考えられる。

被験者は脳波計という普段見慣れない不慣れなデバイスを装着しての実験のため、日常的な落ち着きという状況

になかなか至らなかった。その為にはまず、計測する回数を増やしたりして、簡易脳波計というものに慣れるプロセスを踏む必要があると感じた。これらを踏まえ、より詳細に分析することにより、脳の集中度や記憶に更に効果ある指標となると考えられる。したがって、これらを使うことにより遠隔教育システムへのフィードバック情報に使えると思われるので詳細にこれら进行分析し、応用する研究を進めて行く。尚、本研究は科学研究費補助金「24501219」の補助を受けている。

参考文献

- 1)坂本佑太,吉田幸二,宮地功,“簡易脳波計による学習状態の思考比較分析”,マルチメディア,分散,協調とモバイル(DICOMO)2012シンポジウム論文集, pp. 724 - 729,2012
- 2)北城圭一, 山口陽子, “脳波位相同期解析による視知覚の研究”,Vision 19,No.4,pp193-200,2007
- 3)Neuro Sky, Inc. <http://www.neurosky.com/>
- 4)上田, 石田, 松田, 福嶋, 中道, 大平, 松本, 岡田:”脳波を利用したソフトウェアユーザビリティの評価” ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 10, No. 2, pp. 233-242, (2008)
- 5)K. Yoshida, Y. Sakamoto, I. Miyaji, K. Yamada: “Analysis comparison of brain waves at the learning status by simple electroencephalography”, KES'2012, Proceedings, Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, pp.1817-1826 (2012).
- 6)D.Giannitrapani: “The role of 13-hz activity in mentation” ,The EEG of Mental Activities,pp.149-152,1988.