

急性運動後の脳波 β 波指数スペクトル

Exponential Spectra in EEG Beta Wave after Acute Exercise

佐々木 浩 子 高 橋 光 彦*
Hiroko SASAKI Mitsuhiro TAKAHASHI

I は じ め に

生体時系列データのゆらぎに関する研究については、武者¹⁾によりヒトの心拍変動における $1/f$ スペクトルの存在が報告されて以来、ネコの中樞神経系のニューロン活動に関する報告²⁾、除脳ネコにおける横隔膜神経の $1/f$ スペクトルと血中CO濃度との関連³⁾、ヒトの血圧変動における $1/f$ スペクトルの報告⁴⁾などで、 $1/f$ スペクトルの存在が多数認められている。

脳波のゆらぎに関する研究については、覚醒時の脳波データに周波数スペクトル解析を適用した結果、 $1/f^b$ 型のスペクトルの特徴から、脳波スペクトルは δ 波および θ 波、 α 波、そして β 波の3帯域により大きく異なり、 α 波よりも低周波数帯域の δ 波および θ 波におけるスペクトルの傾きは個人差が小さく作業ストレスの影響を受けにくいこと⁵⁾が報告されている。また、 β 波には安静状態で $1/f$ スペクトルもしくは $1/f^3$ スペクトルの個人差が存在し、運動作業後はどちらの型も $1/f^2$ スペクトルへシフトする現象が認められること⁶⁾も報告されている。これらの現象を生み出すメカニズムの解明に向けたアプローチとして、心拍変動データや脳波データを条件間で比較し、 $1/f^b$ 型のスペクトルの特徴の差異を抽出する方法が用いられている⁷⁾。

これに対し、 $1/f^b$ 型スペクトルとは異なる解析として、カオス時系列を生み出すLorenz model, Rossler modelなどの理論データで確認された指数スペクトルを用いた解析がある。指数スペクトルとは、周波数の増加に伴い指数関数的に減少するスペクトルを指し、非線形事象に普遍的な特性であること⁸⁾が報告されている。数学的には、 f :周波数、 $P(f)$:パワー値とすると、指数スペクトルは $P(f) \sim \exp(xf)$ で表され、両辺の対数をとると $\log P(f) \sim xf$ となる。左辺を対数、右辺を10進数表示 (Semi-log scale) にすると、 x は直線の傾きを示し、スペクトルの減衰の程度を表す比例係数とみなすことができる。これは、両対数表示での $1/f^b$ 型のスペクトルと異なり、カオス特性を備えた理論モデルの特徴を抽出していることから、生体時系列データのカオス特性を検討する上で重要な知見と考えられる。しかし、生体時系列データに具体的に指数スペクトルを確認し論及した報告は、血圧⁹⁾、入眠期脳波¹⁰⁾データなどあるが、乏しい。

*北海道大学医療技術短期大学部

一方、急性運動後の脳波の周波数スペクトル解析については、これまで、パワー積分値 (power spectral density: PSD), 全パワー積分値に対する各周波数帯域の占める比率 (power time percent: Time%), ピーク値の分布などが指標として用いられ、運動後のα波PSDの増加^{11,12)}, α波Time%の増加^{13,14)}などが報告されている。しかし、α波に比べβ波に関する報告は少なく、高強度運動後でのβ波Time%の増加¹⁵⁾, ゆらぎの $1/f^2$ スペクトルへのシフト⁶⁾などわずかである。

そこで本研究では、心拍数の急激な変動を伴う比較的高強度の運動後の脳波のβ波帯域に着目し、運動後の変化および指数スペクトル存在の確認とそれらの関連を明らかにすることを目的とした。

II 対象および方法

1. 対象

対象は、20歳から26歳の右利きの健康成人男子11名で、年齢は平均22歳 (SD=1.48), 身長は平均171.43cm (SD=5.18), 体重は平均64.27kg (SD=7.82)であった。

2. 実験手順

実験は、気温 22 ± 2 °C, 湿度50~60%に制御した防音室内で、午前8時から正午の時間帯に行った。実験室へ入室後、被験者のその日の体調を疲労自覚症状調べ (日本産業衛生学会産業疲労研究会編) の記入と、簡易乳酸測定器 (ベーリンガー・マンハイム社, アクスポーツ) による血中乳酸濃度の測定にて確認し、疲労訴え数の多い者および安静空腹時血中乳酸濃度参考値 $0.4-2.1$ mmol/l¹⁶⁾を参考に、血中乳酸濃度の高い者には実験を中止させた。疲労自覚症状調べは各実験条件終了後にも記入させた。被験者には予め実験の主旨、体調不良の場合は途中で中止できることを説明し、同意を得た。

個々の被験者に対する運動強度は、予備実験として呼気ガス分析器 (Sanei, Aerobics processor 371) を使用し、自転車エルゴメーター (Monark, Elgomedic 818) で座位にて、 0.2 kp/minのランプ負荷法によって測定した呼気ガスからV-slope法¹⁷⁾でVT (ventilatory threshold) を算出し、VT時点の強度 (kp) を決定した。その後、VTよりも20%多い強度を計算によって求め、個々の運動強度とした。

実験条件は、15分間安静閉眼座位 (pre exercise) の後、自転車エルゴメーターで毎分50回転20分間の運動を行い (exercise), 再び15分間安静閉眼座位 (post exercise) を行った。前後15分間の安静閉眼座位状態に脳波の測定を行い、同時に心電図も測定した。

3. 脳波の測定および解析

脳波は、国際規格10-20法に従い両耳朶を不関電極とし、単極誘導でPzより導出し、脳波計 (Sanei, IA92) を用いてポリグラフ的に眼球運動、胸部双極誘導による心電図、呼吸曲線を同時に紙記録し、これらをアナログデータレコーダー (TEAC, XR70) に磁気録音した。脳波測定は電極インピーダンス値を 5 k Ω 以下に抑え、時定数 0.3 秒、 30 Hzのフィルター処理

で行った。磁気録音された脳波は、A/D変換ボード（カノープス社製，RH98/H）を用いて Wave master 2（WM 2）で100HzのsamplingでA/D変換し、変換後、10秒間（1000点）を1エポックとして、各条件の直前（pre）と終了直後（post）各5分間30エポックについて、最大エントロピー法（Maximum Entropy Method: MEM）による周波数スペクトル解析を行った。周波数スペクトル解析は、MEMスペクトル解析（諏訪トラスト，MemCalcSystem）を用いてラグ値400で、全周波数（0.5–30Hz）と、 δ （0.5–4 Hz）、 θ （4–8 Hz）、 $\alpha 1$ （8–11Hz）、 $\alpha 2$ （11–14Hz）、 $\beta 1$ （14–20Hz）、 $\beta 2$ （20–30Hz）波のパワースペクトル積分値（power spectral density: PSD）および各帯域の全パワー積分値に対する比率（power time percent: Time%）を求め、それぞれpreに対する変化率を算出し検討した。また、同時に全周波数および β 帯域の指数スペクトルの傾き x を算出した。MEMスペクトル解析は、最大エントロピー法を組み込んだソフトウェアで、与えられた領域外のデータを仮定せず、短いデータでも分解能が高く安定度の大きいスペクトルが得られるなどの特徴を備えている¹⁸⁾。さらに、指数スペクトルは、MEMスペクトル解析によって得られる周波数の増加に伴い指数関数的に減少するスペクトルで、その傾き X は、Y軸を対数、X軸を10進表示にすると、比例係数となり、これは生体時系列のカオス性の特徴を示すとされている⁸⁾。

4. 統計処理

結果の統計学的処理は、preとpostについては5分間の平均値を用いて行った。脳波の変化率については、11人分の平均値をpreとpostにて対応のあるt検定を用い、指数スペクトルについては個人別に直線の傾きの検定を用いて行った。心拍数については条件間で分散分析を行った。

III 結果および考察

1. 心拍数の変化

各被験者の運動前、運動中および運動後の平均心拍数はTable 1に示すとおりで、運動前には66.9bpm (beats per minute) (SD=10.8)、運動中には129.4bpm (SD=11.4)、運動後には92.6bpm (SD=11.7) となり、分散分析の結果、条件間で有意差 ($p<0.0001$) が認められた。これらより、各被験者に対する運動強度は十分であったと考えられた。

2. 脳波各帯域のPSDおよびTime%の変化率

各帯域ごとのPSDおよびTime%の5分間の変化率の平均は、Fig. 1に示すとおりである。pre値とpost値の比較の結果、PSDについては δ および $\alpha 1$ ($p<0.05$)、全周波数 ($p<0.01$) 帯域で有意差が認められた。Time%についてはどの帯域でも有意差は認められなかった。

全周波数帯域のPSDで有意差が認められたことは、急性運動後にPSDそのものが増加したことを示すと考えられた。その一方で、PSDでpre値と有意差が認められた δ および $\alpha 1$ 帯域でもTime%では有意差は認められず、Time%でpre値よりも増加していたのは α 波帯域のみであった。このことは、 δ および $\alpha 1$ 帯域のTime%のSDが大きいためとも考えられるが、

Table 1. Mean heart rate (bpm) of each subject

subject	conditions		
	pre exercise	during exercise	post exercise
A	59.3	134.7	93.7
B	49.4	96.9	63.4
C	63.9	125.4	84.6
D	76.4	136.1	98.4
E	66.9	137.1	99.4
F	91.7	139.2	104.9
G	69.3	126.1	92.2
H	74.6	135.5	106.4
I	67.4	132.3	99.0
J	59.1	123.9	81.6
K	57.9	136.6	94.6
Mean	66.9	129.4	92.6
SD	10.8	11.4	11.7

significance: $p < 0.0001$ among condition

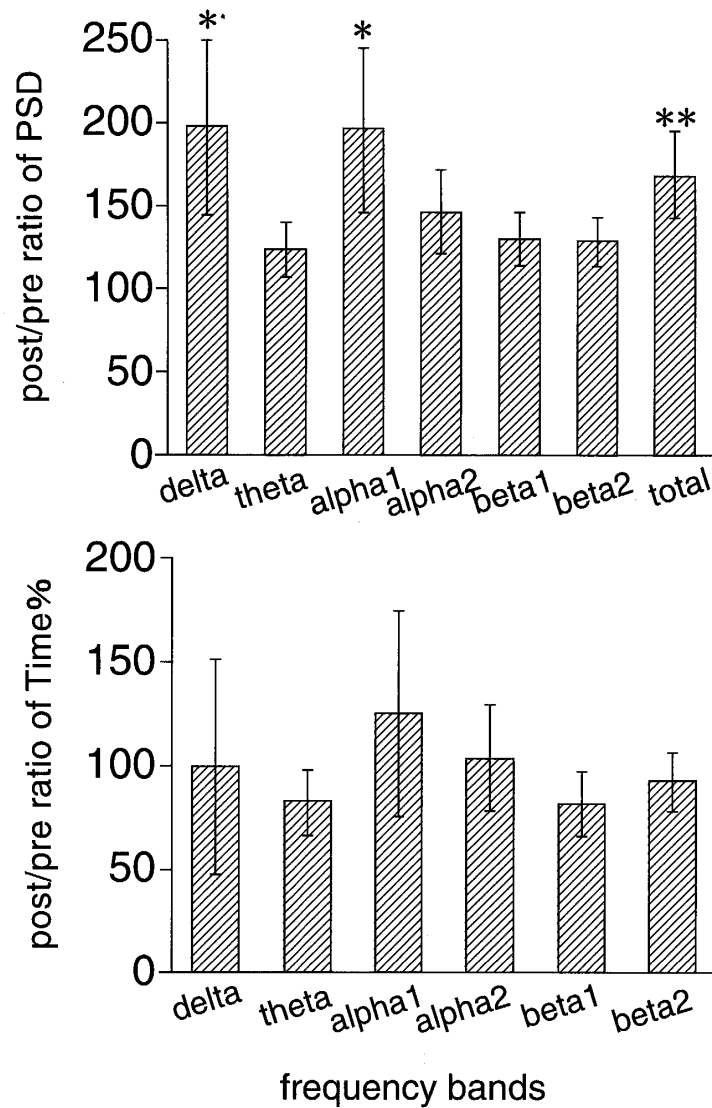


Fig.1 Mean post/pre ratio of PSD (upper) and Time% (bottom) in each frequency band. Values indicate mean \pm SE and baseline is 100%. *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

PSDの値はどの帯域もベースライン値を上回っていることから、PSDの全帯域での増加とTime%の個人差の影響とが複合した結果と考えられた。したがって、Time%の検討には個人差を考慮し、各個人別の検討が必要であると考えられた。

β 波の変化に関しては、急性運動後にPSDは増加しているが、Time%はベースライン値を下回っており、ベースライン値との有意差も認められなかった。これは全帯域でPSDが増加した結果 β 波帯域のPSDも増加したため、 β 波の全帯域に占める割合はむしろ減少したと考えることができる。 β 波の出現は α 波とともに正常脳波の主体をなし¹⁹⁾、中心部、前頭部、側頭部などに優勢に認められる²⁰⁾。本研究にて用いたPzは中心部にあたり、比較的 β 波の優勢な部位である。 β 波のペースメーカーについては十分に解明されていないが²¹⁾、 β 波は緊張や習熟、あるいは短期記憶の固定などとの関連を示すもの^{21,22,23)}とされている。急性運動と β 波に関する研究は少なく、それらの研究と本研究では運動強度の設定が異なるために比較は難しい。しかし、運動習慣の少ない者と多い者に高強度の運動を実施させた結果、運動習慣の少ない者で β 波の出現が増加したことが報告されている¹⁵⁾。これは、運動に対する適応の程度によって生体への負担が異なるために緊張などの精神的負担を伴った結果、 β 波の出現が増加したと考えられ、本研究成績の β 波PSDの増加もこれと一致すると考える。

また、 β 波には安静状態で $1/f$ スペクトルもしくは $1/f^3$ スペクトルの個人差が存在し、運動作業後はどちらの型も $1/f^2$ スペクトルへシフトする現象が認められること⁶⁾も報告されている。これは安静状態では低周波 β 波出現の優位な者と高周波 β 波の出現の優位な者が存在するとも考えられ、Time%の個人差とも関連するものと考えられる。しかし、本研究では β 波帯域を低周波の $\beta 1$ と高周波の $\beta 2$ に分割して解析したものの、それらの帯域でのベースライン値での個人差は考慮していなかった。したがって、本研究成績で β 波のPSDおよびTime%で有意な変化が認められなかったのは、個人差の考慮が不足していたためとも考えられ、今後他の帯域を含めて個人差を考慮した検討が必要と考えられた。

3. β 波指数スペクトル

各被験者の β 波および全周波数帯域の指数スペクトルの傾き x の平均は、Table 2に示すとおりである。pre値とpost値の比較および β 波帯域と全周波数帯域の比較の結果、どの比較においても有意差は認められなかった。また、表には示さなかったが、各被験者の全周波数帯域の指数スペクトルの傾き x と脳波 β 波Time%とには高い相関($p < 0.0001$)が認められた。しかし、 β 波の指数スペクトルの傾き x と脳波 β 波Time%とには相関は認められなかった。

pre値とpost値の指数スペクトルで有意差が認められなかったことは、運動後でも安静状態と比較して安定した指数スペクトルが存在すると考えられ、運動後脳波でのカオス特性の存在が明らかとなった。

また、各被験者の全周波数帯域の指数スペクトルの傾き x と脳波 β 波Time%とに高い相関が認められたことは、入眠期脳波¹⁰⁾で報告されたとおり、比較的高い強度の運動後でも、 β 波帯域のPSDの増減が全周波数帯域における指数スペクトルの傾きに大きく影響していること

Table 2. Mean exponential spectra of beta wave and all frequency bands in pre and post exercise

subjects	beta		all	
	pre exercise	post exercise	pre exercise	post exercise
A	-0.060	-0.058	-0.057	-0.060
B	-0.088	-0.088	-0.098	-0.100
C	-0.080	-0.069	-0.083	-0.084
D	-0.082	-0.075	-0.058	-0.069
E	-0.076	-0.072	-0.096	-0.095
F	-0.064	-0.074	-0.086	-0.079
G	-0.095	-0.105	-0.084	-0.091
H	-0.049	-0.078	-0.072	-0.088
I	-0.054	-0.054	-0.067	-0.054
J	-0.046	-0.038	-0.062	-0.060
K	-0.055	-0.056	-0.049	-0.046
Mean	-0.068	-0.070	-0.074	-0.075
SD	0.016	0.017	0.016	0.017

significance: ns

が示唆された。しかし、 β 波の指数スペクトルの傾き x と脳波 β 波Time%とは相関は認められず、 β 波帯域でのカオス特性の存在は明らかとなったものの、 β 波指数スペクトルと β 波帯域のPSDとの関連は明らかにならなかった。このことは、 β 波のPSDおよびTime%のpost値でpre値に比べて有意な変化が認められなかったことと同様に、個人差の考慮が不足していたためと考えられ、今後指数スペクトルそのもののゆらぎの検討も含めて、さらに詳細な検討が必要と考えられた。

IV 結 語

心拍数の急激な変動を伴う運動後の脳波の β 波帯域に着目して、運動後のパワー積分値と全パワー積分値に対する比率の変化および指数スペクトル存在の確認とそれらの関連を明らかにすることを目的として、VTよりも高い強度で急性運動負荷を行い、運動後の脳波の周波数スペクトル解析をし検討した。その結果、

1. 運動前と比較して、運動後では脳波の δ 、低周波 α 波および全周波数帯域でパワー積分値が有意に増加したが、全パワー積分値に対する各帯域の比率には有意な変化は認められなかった。
2. 着目した β 波のパワー積分値および全パワー積分値に対する比率はどちらも有意な変化は認められなかった。
3. β 波および全周波数帯域の指数スペクトルの運動前と運動後の比較では、有意な差は認められず、運動後も安定した指数スペクトルが存在が確認された。
4. 各被験者の全周波数帯域の指数スペクトルの傾きと β 波の全パワー積分値に対する比率とは高い相関が認められた。
5. 各被験者の β 波の指数スペクトルの傾きと β 波の全パワー積分値に対する比率とは相

関は認められなかった。

以上の結果から、心拍数の急激な変動を伴う高強度の運動後の脳波 β 波帯域にも安静状態と同様の安定した指数スペクトルが存在することが確認され、運動後の脳波でのカオス特性の存在が明らかとなった。また、全周波数帯域の指数スペクトルの傾きと β 波の全パワー積分値に対する比率との高い相関から、運動後脳波の β 波帯域のパワー積分値の増減が全周波数帯域における指数スペクトルの傾きに大きく影響していることが示唆された。しかし、運動前に比較して、運動後の β 波のパワー積分値および全パワー積分値に対する比率はどちらも有意な変化は認められず、 β 波の指数スペクトルの傾きと脳波 β 波の全パワー積分値に対する比率とも相関は認められなかった。これらの結果は、 β 波に存在すると推測される個人差の考慮が不足していたためと考えられ、今後さらに詳細な検討が必要と考えられた。

参 考 文 献

- 1) Kobayashi M. & Musha T: 1/f fluctuation of heartbeat period. IEEE TransBME-29 456 (1982)
- 2) 山本光璋, 中尾光之, 水谷好成, 越川康弘, 生田信之, 本堂毅, 安藤隆一郎, 仁田新一, 山家智之, 勢井宏義: ネコの心拍1/fゆらぎの低周波限界についての一考察. 第8回ゆらぎ現象研究会抄録集1 (1994)
- 3) Kawahara K., Yamauchi Y., Nakazono Y. & Miyamoto Y.: Spectral analysis on low frequency fluctuation in respiratory rhythm in decerebrate cat. Biol. Cybern. 61 265 (1989)
- 4) 佐光興亜, 横井博之, 野上和人: 血圧の低周波ゆらぎのスペクトル解析. 日本ME学会「生体時系列信号とゆらぎ研究会」研究報告集2 57 (1989)
- 5) 神山昭男, 斎藤和雄: 作業ストレスと脳波「生物リズムの構造—MemCalcにおける生物時系列データの解析—」. 三宅浩次監修 高橋延昭, 神山昭男, 大友詔雄編 富士書院 札幌 pp.153-165 (1992)
- 6) Akio Koyama, Kazuo Saito: Effects of Mental and Physical Workloads on EEG Fluctuation. A Recent Advance in Time-Series Analysis by Maximum Entropy Method, Hokkaido University Press pp.345-358 (1994)
- 7) 山本光璋: 生体1/fゆらぎ研究の現状. BME 81 (1994)
- 8) Ohtomo N, Tokiwano K, Tanaka Y, Sumi A, Terachi S, Konno H: Exponential characteristics of power spectral densities caused by chaotic phenomena. J Phys Soc Jpn 64 1104-1113 (1995)
- 9) Ohtomo N., Kamo T., Watanabe M., Yoneyama K., Tanaka Y., & Hayashi R.: Power Spectral Densities of Blood Pressures. Jpn. J. Appl. Phys. 35 195 (1996)
- 10) 神山昭男, 高橋光彦, 佐々木浩子, 王玉萍, 斎藤和雄: 入眠期脳波のMEMスペクトル解析

- (II) - β 波指数スペクトルとストレンジ・アトラクター. 「生体時系列データ解析の新展開」細田嗟一監修, 笠貫宏, 大友詔雄編 北海道大学図書刊行会 札幌 pp.655-665 (1996)
- 11) Stock C, Baum M, Robkopf P, Schober F, Weib M, Lisen H : Electroencephalogram activity, catecholamins, and lymphocyte subpopulations after resistance exercise and during regeneration. *Eur J Appl Physiol* 72 235-241 (1996)
 - 12) Wiese J, Singh M, Yeudall L : Occipital and parietal alpha power before, during and after exercise. *Med Sci Sports Exercise* 15 117 (1983)
 - 13) Youngsted SD, Dishman RK, Cureton KJ, Peacock LJ, : Does body temperature mediate anxiolytic effects of acute exercise?. *J Appl Physiol* 74 825-31 (1993)
 - 14) 見正富美子, 林達也, 柴田真志, 吉武康栄, 西嶋奏史, 森谷敏夫 : 有酸素運動における脳波・血中 β -エンドルフィンの動態. *体力科学* 45 519-526 (1996)
 - 15) Beh HC, Mathers S, Holden J: EEG correlates of exercise dependency. *International Journal of Psychophysiology* 23 121-128 (1996)
 - 16) 鈴木政登, 坂本静男, 須藤美智子, 桜井智野風, 石川和子, 松原茂, 塩田正俊, 浅野次義, 三浦次郎, 元山幹雄, 島田永和, 津田恵次郎, 高橋香代, 武田修, 小林寛道, 北原慎太郎 : スポーツ医・科学の基礎知識の生理. 「スポーツインストラクターのための運動指導マニュアル」鈴木政登編 分光堂 東京 pp.3-125 (1992)
 - 17) Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ : A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol* 60 2020-2027 (1986)
 - 18) 田中幸雄 : 汎用時系列データ解析システム"MemCalc"とその応用. 「生物リズムの構造—MemCalcによる生物時系列データの解析」三宅浩次監修 高橋延昭 神山昭男 大友詔雄編 富士書院 札幌 pp.19-39 (1992)
 - 19) 宮本誠司, 内海庄三郎 : アルファ波の臨床的意義. *臨床脳波* 25 293-303 (1983)
 - 20) 大熊輝男 : 正常脳波. 「臨床脳波学(第3版)」医学書院 東京 pp.74-110 (1983)
 - 21) 堀浩, 内海庄三郎, 齊藤正巳, 門林岩雄, 宮本誠司, 西浦信博, 柴崎浩, 井上健, 大岩稔幸, 中村道彦, 福居義久, 飯田英晴, 西島英利, 宮脇宏司, 篠崎和弘, 佐藤洋子, 石田展弥 : 臨床脳波. 「脳波」門林岩雄, 井上健, 中村道彦編, 金芳堂 京都 pp.2-88 (1983)
 - 22) 時実利彦, 岩瀬善彦, 平尾武久, 浅沼広, 岩間吉也, 藤森聞一, 元木沢文昭, 齊藤陽一 : 大脳皮質の電気現象. 「生理学体系・脳の生理学」時実利彦編 医学書院 東京 pp.25-204 (1967)
 - 23) Krieger D, Dillbeck M : High frequency scalp potentials evoked by reaction time task. *Electroenceph clin Neurophysiol* 67 222-230 (1987)