

局所的筋疲労に伴う脳電位成分の変動

黒岩一雄*・西平賀昭**・中島 剛***・八田有洋**・麓 正樹****

Change of the Brain Potential Component Following Local Muscle Fatigue

Kazuo KUROIWA*, Yoshiaki NISHIHIRA **, Tsuyoshi NAKAJIMA ***,
Arihiro HATTA ** and Masaki FUMOTO****

Summary

How exercise affects respiration, circulation and muscle system has been well reported. However, there are few studies investigating the influence of exercise on cognitive functions and information processing by the central nervous system (CNS). In this study, the effect of sustained muscle contraction on cognitive function and information processing in the CNS was investigated using event-related potentials. As a result, P300 and N2 latencies post-exercise were significantly prolonged when muscle fatigue was elicited. Moreover, P300 amplitude post-exercise was significantly decreased. From these results, it may be concluded that sustained muscle contraction affects not only the peripheral muscle, but also stimulus information processing and reactions at select stages.

Key words: event-related potentials (ERPs), P300, N2, fatigue, exercise

I. 緒言

運動場面において高いパフォーマンスを維持するためには筋力や持久力の他に敏捷性やスキルなどが特に重要であり、神経系が重要な役割を果たしていると考えられる。また骨格筋や心臓、血管などの各器官を支配しているのは神経系であり、その中心で

ある中枢神経系を研究することは人間の行動に関する研究に必要であって、その機能の解明は重要な課題であると考えられる。運動の神経系への影響を調べた研究は、末梢神経系での研究から中枢神経系での研究へと発展しており、さらに近年では運動が脳皮質の認知機能に及ぼす影響を調べた研究^{1,3,11,16,32,34)}

* 筑波大学体育科学研究科 (〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1)

Doctoral Program in Health and Sports Sciences, University of Tsukuba

** 筑波大学体育科学系 (〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1)

Division of Physiology, Institute of Health and Sports Sciences, University of Tsukuba

*** 東京学芸大学大学院連合学校 教育学研究科 健康・スポーツ系教育講座 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33 (千葉大学教育学部内))

Division of Health and Sports Education, The United Graduate School of Education Tokyo Gakugei University

**** 東邦大学医学部生理学第一講座 (〒143-8540 東京都大田区大森西5-21-16)

Department of Physiology, Toho University School of Medicine

も多く行なわれている。それらの研究は、自省報告や、短期記憶テスト、簡単な計算テストのような心理学テストを用いて評価したものから、脳波や筋電図といった生理学的な指標を用いて客観的に評価した研究まで多岐にわたっている。

特に中枢神経系の重要な機能の一つである認知機能はスポーツの状況判断、運動の実行、技術習得などの様々な場面で重要な役割を果たしていると考えられるが、これに関する研究は他の器官の研究と比較して少ないように思われる。

近年、大脳皮質における運動と認知機能、運動と情報処理能力との関係を調査する研究においては、事象関連電位 (event-related potentials: ERPs), 背景脳波周波数解析, 筋電図反応時間 (Electromyogram reaction time: EMG-RT) のような電気生理学的技術を用いており、体育科学・スポーツ関係領域での研究は急速に発展した^{11, 19, 20, 34)}。ERPs は、心理学的課題を課した時に知覚, 認知, 判断といった一連の情報処理過程で生じる脳電位であり, P300成分は認知機能を客観的に評価する指標として心理学的, 臨床的に広く利用されている²⁰⁾。最近の研究において, 大脳皮質の認知機能および情報処理過程への運動の影響は, 運動の強度と運動時間また運動経験年数等により異なるとしている^{3, 11, 24, 34)}。しかしながら, 運動タイプの違いによる中枢神経系への影響に関してはまだはっきりしていない。

Nishihira ら²⁰⁾の先行研究においては, 運動課題に一過性の高強度全身性運動を用いており, 中枢神経系に影響を与えたとしている。この先行研究では, 運動による中枢神経系への影響を認知機能及び情報処理過程を反映するとされる ERPs を指標として用いたもので, 研究方法的に優れたものである。

また最大あるいは最大下の筋力維持に伴う筋疲労について調べた研究^{8, 33)}では, そのような疲労の要因の大部分は末梢にあるとしているが, より上位の中枢が関係する可能性も同時に呈示されている。よって全身性運動だけでなく, 局所的な筋運動を行うことによっても中枢神経系への影響がみられると考える。そこで本研究は運動負荷に局所運動である把持運動を用いた。

Bigland-Ritchie ら²⁾や矢部が³³⁾がいうように局所筋運動による疲労が末梢だけでなく中枢神経系にも現れるとするならば, 中枢神経系の最も重要な機能の一つである認知機能, 情報処理過程にも変化が見ら

れる可能性が考えられる。

そこで本研究は, 日常生活により近い断続的な局所運動が中枢神経系の情報処理過程に与える影響を局所的な変化と共に検討した。また本研究は情報処理過程を評価する指標として P300成分だけでなく, 刺激評価時間をより直接的に反映する N2成分に関しても加えて検討を行った。そして精神性疲労を簡易に測定することのできるフリッカー値や自覚的な疲労感を探ることのできる自覚症状しらべ, また血中成分として乳酸値の測定も行い, あわせて検討した。

II. 実験方法

A. 被検者

被検者は, 右利きの健康な成人男性 (24.3 ± 2.56 歳) で最近 2 年は習慣的に運動を行っていない者であった。

本実験は 3 試行より構成されており, 各試行の被検者数は以下の通りである。

1. コントロール試行: 15名
2. テスト試行: 15名
3. 運動負荷評価試行: 15名

B. 手続き

被検者には, 実験に先立ち, 実験の目的・方法などを詳細に説明し, 実験参加の承諾を得た。

被検者には通常と変化のない食事をするように指示し, 実験前日はアルコールを控え, よく睡眠をとるように指示した。また実験当日は激しい運動をしないように指示した。

実験は運動の前後に ERPs・EMG-RT を, 運動負荷評価として EMG・血中乳酸値・自覚症状しらべ・フリッカー値 (詳細は後述) を測定した。

本実験はコントロール試行・テスト試行・運動負荷評価試行の 3 試行からなり, 全ては異なる日に行われた (Fig. 1)。異なる日に実験を行うということは, 体調に大きな差が現れ, それ自身が結果に影響することが考えられる。そこで, 握力数値, フリッカーテスト, 自覚症状しらべ, 被検者の自省報告を用いて, 体調に大きな差が認められない日に, 実験を実施した。また電極位置は国際 10-20 法を用い, 抵抗は 5 k Ω 以下とし, 実験日が異なってもほぼ同じような状況が保たれるように, 細心の注意を払った。そしてコントロール試行とテスト試行に関

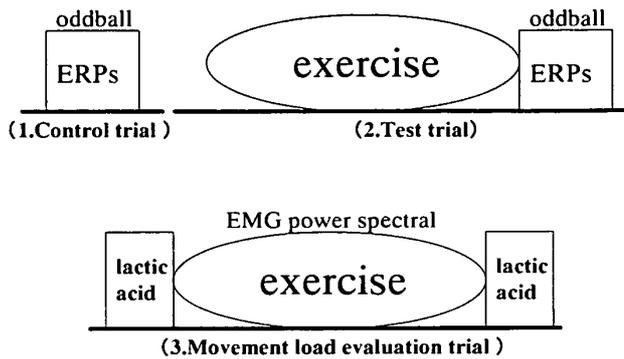


Fig. 1 experimental protocol

しては oddball 課題に対する habituation の影響を避けるために、Kaseda ら⁷⁾の先行研究にしたがい、4 日以上期間を空けた。運動負荷評価試行を別に行ったことは運動の強度および運動による末梢の疲労を評価するためと評価に用いたテスト自体が実験に影響（疲労、時間、痛みなど）を与えないようにするためである。

コントロール試行は、視覚刺激の oddball 課題（詳細は後述）によって ERPs を誘発し記録した。また oddball 課題の前後にフリッカーテスト・自覚症状しらべを行った。テスト試行は局所的な運動負荷（詳細は後述）を与え、運動終了直後にコントロール試行と同じ視覚刺激による oddball 課題によって ERPs を記録した。また運動負荷の前にフリッカーテスト・自覚症状調べを行った。運動負荷評価試行は、テスト試行において課した運動負荷の強度を評価するために実施した。まず運動負荷の前にフリッカーテスト・自覚症状調べを行い、血中乳酸の分析のために指先から少量の血液を採取した。その後、局所的な筋運動を負荷し、運動終了直後・1 分後に少量の血液を採取し、フリッカーテスト・自覚症状調べを行った。

C. 運動負荷方法及び oddball 課題

被検者は、安楽椅子に座位姿勢を維持した状態で、左手を肘掛に親指が上に向くようにしっかりと固定し、歪み計が内蔵された握力計を握るという把持運動を行ってもらった。運動の種類は、先行研究²⁰⁾では全身性の運動が用いられているが、末梢の局所的な運動に関しては研究されていないこと、末梢の運動でも中枢神経系に影響を与えるだろうという先行研究^{8,30)}の見解より、本研究では、それらを追

究するために、把持運動を採用した。把持運動の構成は、最初に MVC を測定し、十分に時間をとった後に 40% MVC の力で 6 秒間把持運動をし、その後 4 秒間の休憩を取ることを繰り返し、40% MVC が 2 度続けて維持できなくなるまで行うものである。40% MVC に関しては運動前に測定した MVC をもとに、眼前 1 m ~ 2 m のところにあるオシロスコープ上にラインを設け、基準とした。また収縮実施時間である 6 秒間は、オシロスコープの上にセットした青の LED を点灯させることで被検者に示した。よって本実験の運動負荷は断続的な等尺性収縮運動である。また、運動による疲労度を確認するために 2 分に 1 度、6 秒収縮の後半 3 秒に MVC を測定した。運動負荷強度・時間の構成に関しては、予備実験・先行研究⁹⁾からより日常的な運動形式で、ある程度の運動時間・運動量が確保できるものを検討し、決定した。

oddball 課題の視覚刺激は、AUDITORY/LED VISUAL STIMULATOR (NEC) によって発生させた 2 つのトリガー信号を ELECTRONIC STIMULATOR (日本電気三栄株式会社) によって増幅させ、2 色の LED につなげ刺激とした。刺激の duration は 50ms であった。

oddball 課題は、青と赤の LED を 20% と 80% の確率で刺激間隔約 3 s でランダムに呈示し、被検者は 20% の低頻度刺激である青の LED を標的として弁別し、歪み計が内蔵された握力計を 10% MVC で把持する課題を課した。10% MVC に関しては、運動負荷時と同様にオシロスコープを設け、基準とした。本課題はマッチング課題ではないので被検者には 10% MVC のラインに正確に合わせるというよりも、できるだけすばやく反応動作を行うよう指示した。また oddball 課題は、標的刺激が 90 回にいたるまで連続して行われた。これは Kaseda ら⁷⁾によって考案された方法である。事象関連電位の 90 回連続記録により P300 成分の habituation 現象を引き起こし、それを疲労の評価に利用したものである。また中野と橋本¹⁷⁾は、P300 の habituation 現象を利用することは、疲労を感知する感度を上げることでありとしている。

D. 脳波の記録と処理

被検者は暗くしたシールドルーム内の安楽椅子に座位姿勢を維持し、開眼状態で課題を行った。

脳波は国際10-20法に基づき、Fz, Cz, Pz, C3, C4の頭皮上5部位より両耳朶連結を基準としてAg/AgCl 皿電極を用いて単極導出した。また電気抵抗はすべて5 k Ω 以下とした。脳波は多用途脳波計(日本電気株式会社EE1000A)を用いて、時定数0.3s, 広域遮断周波数60Hzで増幅記録すると同時に、データレコーダー(SONY PC200AX)を用いて磁気テープに記録した。

脳波記録に影響を与える眼瞼運動及び眼球運動を検出するために眼電図を左眼窩上部及び外側部の皮膚上より導出し、時定数0.3秒, 広域遮断周波数60Hzで増幅記録すると同時に、データレコーダーを用いて磁気テープに記録した。

oddball課題及び運動負荷時の筋電図は、尺側手根屈筋, 尺側手根伸筋, 上腕二頭筋, 上腕三頭筋・外側頭, 三角筋・中部の5部位より表面双極導出すると同時に、データレコーダーを用いて、磁気テープに記録した。

実験終了後、誘発電位研究用プログラムEPLYZER(キッセイコムテック株式会社)を内蔵したコンピューター(NEC PC9821Xa7)を用いて、ERPsのP300成分, N2成分についてoff-line解析を行った。解析は、データレコーダーで磁気記録しておいたデータをサンプリング周波数250HzでA/D変換してコンピューターに取り込んで行った。被検者1人ごと、頭皮上の5部位より記録された脳波を各部位ごとに、眼電図などのアーチファクトが混入した試行を取り除いて加算平均した。加算することのできた、きれいなデータは90回のうちの約60回ほどであった。加算区間は標的信号及び非標的信号の呈示200msec前から800msec後までとした。

P300成分の同定は、刺激呈示後250msecから500msecの間の最大陽性成分とした。P300成分の測定は加算平均した波形の刺激呈示前200msecの平均電位を基線として行った。P300振幅の測定は基線から最大陽性成分の頂点間距離とした。また、P300潜時の測定は刺激呈示より頂点までの時間とした。

N2成分の同定に関しては、第一にN1からN2帯域にかけて複数の内因性陰性電位が重畳していることが知られていることから、P300成分同様に基線を算出した後に、標的刺激時(青のLED提示)の波形から非標的刺激時(赤のLED提示)の波形を引いた引き算波形を用いた。そして引き算波形における刺激呈示後180msecから360msecの間の最大陰性成

分をN2成分とした。

N2振幅の測定はN2成分の立ち上がり(N2 onset)から頂点までの頂点間距離とした。そしてN2潜時の測定は刺激呈示より頂点までの時間とした。またN2 onsetから頂点までの潜時に関しても測定した。

E. 血中乳酸の分析

血中乳酸濃度は運動負荷評価試行の運動前後に指先から少量の血液を採取し、簡易血中乳酸測定器(Lactate Pro, アークレイ株式会社)を用いて測定した。

F. 自覚症状しらべ・フリッカーテストの記録と分析

運動負荷による自覚的疲労感への影響、または実験当日の体調は、運動負荷前後、試行前に日本産業衛生学会産業疲労研究会の自覚症状調べ30項目を点数化(疲労感をなし:0, 軽度:1, 中程度:2, 高度:3)したものをを用いて評価した^{17,18)}。また自覚症状しらべと共に、中枢性の疲労を簡単に評価するものとして、フリッカーテスト(セフター式ちらつき値測定装置)を用いた。フリッカーテストによって得られるフリッカー値とは、点滅する光の点滅回数をしだいに早くするとそのうち連続光に見え、この点滅光と見えるか、連続光と見えるかの境界における点滅回数のことである。フリッカー値の低下は覚醒水準の減衰に起因する知覚機能の低下を反映し、視覚系を含む知覚連合皮質における視覚情報処理能力の減少を表現しているものと解釈されている¹⁹⁾。

G. EMGの記録と解析

EMGは、時定数0.03秒, 広域遮断周波数1.5KHzで増幅記録すると同時に、データレコーダーを用いて磁気テープに記録した。EMGを記録した5部位のうち最も大きな値を示したのは尺側手根屈筋であり、EMG-RTは、oddball課題時の尺側手根屈筋より記録した。また運動負荷評価試行時の尺側手根屈筋におけるEMGより筋電図周波数解析を行った。運動の始めと運動の終わりの40% MVC収縮時における安定した2sを対象に分析し、中心周波数(Median Frequency:MF)を求めて統計処理を行った。なお詳しい分析設定に関しては、Okadaら²⁰⁾やMoritaniら^{14,15)}の先行研究を参考とした。またEMG-

局所的筋疲労に伴う脳電位成分の変動

RTは、刺激呈示から筋電図の立ち上がりまでを測定した。

H. 統計処理

各変数の測定結果は、平均値±標準偏差で示した。事象関連電位のP300成分とN2成分の測定結果は、運動負荷の影響(運動負荷前・運動負荷後)と導出部位(Fz・Cz・Pz・C3・C4)について繰り返しありの分散分析を行い、主効果が得られたときには線形比較検定のScheffe法を用いて多重比較検定を行った。EMG-RT, MF, 血中乳酸値, 自覚症状調べ, フリッカーテストの測定結果は一元配置の分散分析を行った。分散分析を実施する際にはGreenhouse-Geisser法による自由度の修正を行った。有意水準は $p < 0.05$ とした。

Ⅲ. 結果

A. 運動負荷試行

本研究における断続的な把持運動は、40% MVCを維持できなくなるまで続けるというものであり、被検者からは「かなりきびしい」「非常にきつい」との声が聴かれた。15人の被検者において運動時間は異なっており、平均 21.60 ± 10.56 分(最大46分, 最小10分)の運動であった。

2分に1度MVCを測定しており、すべての被検者で、試行回数は異なるものの、試行回数が進むにつれて% MVCは減少しており、最終的には40% MVCまで減少した。

血中乳酸値においては、運動前が 1.37 ± 0.45 mmol/L, 運動後が 5.01 ± 3.82 mmol/Lであり、運動後の血中乳酸値は有意に増加した [$F = 14.42$; $p < 0.01$] (Table 1)。

MFにおいては、運動開始時が 72.41 ± 16.72 Hz, 運動後は 58.46 ± 16.08 Hzであり、運動後のMFは有意に低下した [$F = 20.8$; $p < 0.001$] (Table 1)。

自覚症状調べにおいては、運動前が 5.20 ± 7.49 点, 運動後が 6.73 ± 7.97 点であり、わずかに増加しているが有意差は認められなかった (Table 2)。フリッカー値においては、運動前は 38.26 ± 2.64 点, 運動後は 37.50 ± 2.41 点であり、運動後のフリッカー値はわずかに低下する傾向にあったが有意差は認められなかった (Table 2)。

B. ERPsのP300成分, N2成分およびEMG-RT

運動の前後におけるERP波形はほぼ同形でP300成分及びN2成分を同定することができた (Fig. 2)。

P300振幅においては、運動前が 22.27 ± 10.08 μ V, 運動後が 15.92 ± 9.19 μ Vであり、運動後のP300振幅は有意に低下した [$F = 23.37$; $p < 0.001$] (Table 3)。P300潜時においては、運動前が 362.57 ± 33.55 msec, 運動後が 376.57 ± 32.28 msecであり、運動後のP300潜時は有意に延長した [$F = 6.47$; $p < 0.05$] (Table 3)。

N2振幅においては、運動前が 13.3 ± 7.26 μ V, 運動後が 14.97 ± 6.61 μ Vであり、有意差はなかった (Table 4)。

Table 1 Changes of Lactate and MF at pre- and post-exercise.

Index	pre-exercise	post-exercise	F	P
Lactate (mmol/L)	1.37 ± 0.45	$5.01 \pm 3.82^{**}$	14.42	0.002
MF (Hz)	72.41 ± 16.72	$58.46 \pm 16.08^{***}$	20.8	<0.001

Values are means \pm SD

*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$,

significant difference between pre-exercise and post-exercise.

Table 2 Changes of the a simple test at pre- and post-exercise.

Index	pre-exercise	post-exercise	F	P
Flicker value	38.26 ± 2.64	37.50 ± 2.41	4.58	0.050
Subjective symptom test	5.20 ± 7.49	6.73 ± 7.97	2.25	0.156

Values are means \pm SD

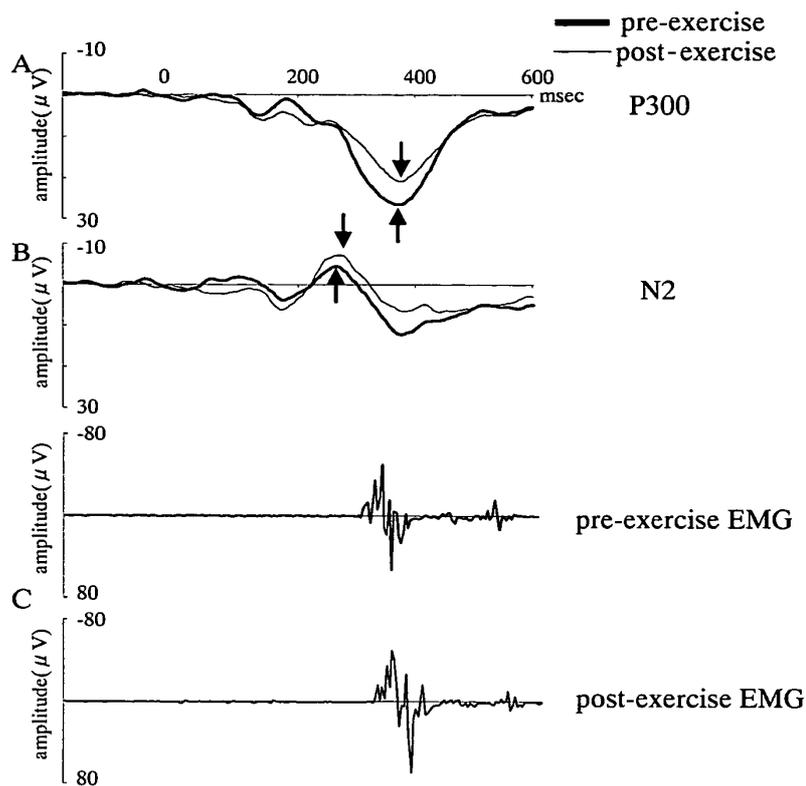


Fig. 2 A: Grand average waveform across 15 subjects of ERPs (Pz) recorded at pre- and post-exercise.
 B: Grand average of difference waveform across 15 subjects of ERPs (Cz) recorded at pre- and post-exercise.
 C: EMG waveform at pre- and post-exercise in flexor carpi radialis.

Table 3 Changes of the P300 component at pre- and post-exercise.

Index	pre-exercise	post-exercise	F	P
P300 amplitude (μV)	22.27 \pm 10.08	15.92 \pm 9.19***	23.37	<0.001
P300 latency (msec)	362.57 \pm 33.55	376.57 \pm 32.28*	6.47	0.025

Values are means \pm SD

***p < 0.001, *p < 0.05,

significant difference between pre-exercise and post-exercise.

Table 4 Changes of the N2 component at pre- and post-exercise.

Index	pre-exercise	post-exercise	F	P
N2 amplitude (μV)	13.30 \pm 7.26	14.97 \pm 6.61	1.37	n.s.
N2 latency (msec)	268.66 \pm 29.00	283.20 \pm 35.86**	11.56	0.005
N2 onset (msec)	203.69 \pm 29.34	194.26 \pm 34.31	2.9	n.s.
N2onset-N2peak (msec)	64.97 \pm 23.75	88.94 \pm 32.96**	10.81	0.006

Values are means \pm SD

**p < 0.01,

significant difference between pre-exercise and post-exercise.

局所的筋疲労に伴う脳電位成分の変動

Table 5 Changes of the EMG-RT and RT at pre- and post-exercise.

Index	pre-exercise	post-exercise	F	P
EMG-RT (msec)	299.00±54.27	314.40±68.12	1.78	0.204
RT (msec)	334.63±54.08	351.55±71.48	2.05	0.174

Values are means±SD

N2潜時においては、運動前が268.66±29.00 msec, 運動後が283.20±35.86msecであり、運動後のN2潜時は有意に延長した [F=11.56; p<0.01] (Table 4).

N2 onset 潜時においては、運動前が203.69±29.34msec, 運動後が194.26±34.31msecであり、有意差はなかった (Table 4).

N2 onset から頂点までの持続時間においては、運動前が64.97±23.75msec, 運動後が88.94±32.96msecであり、運動後のN2 onset から頂点までの潜時は有意に延長した [F=10.81; p<0.01] (Table 4).

EMG-RT においては、運動前が299.72±54.27 msec, 運動後が314.40±68.12msecであり、有意差はなかった (Table 5).

全ての被検者で、運動負荷前後のEMG-RTは、P300潜時より先行していた。

IV. 考察

最近の研究では運動が大脳皮質の認知機能及び情報処理過程へ影響を与えるという報告がある^{1,3,11,16,32,34}。しかしそれらの結果は一致した見解を示しておらず、運動の強度と運動時間、または運動経験年数といった様々なタイプにより影響の現れ方が異なることを示している^{3,11,24,34}。そして運動タイプの違いによる運動の中枢神経系への影響に関してはまだはっきりしていない。本研究は、疲労を伴う一過性の断続的な局所運動が中枢神経系に与える影響を大脳皮質の認知機能及び情報処理過程を反映するとされる ERPs を用いて検討した。

A. 断続的な筋運動に伴う局所的な変化

局所的な運動により、運動後の乳酸値は、運動前に比べて有意に増加した。またEMGの周波数解析の結果、MFは運動後が運動前に比べて有意に低周波化した。このことは、あくまでも推定の域は出ないが、運動により筋では、経時的に高周波数帯域の

motor units (MUs) が参加しなくなり、徐々に低周波数帯域のMUs中心に、筋収縮に参加したことが考えられる。また、Tesch³¹がいうようにST線維MUsよりもFT線維MUsの収縮能力の方が疲労しやすいという事と、ST線維は燃料として乳酸をかなり使用することができる¹⁵といった先行研究をあわせて考えると、運動による疲労によって筋では、経時的にFT線維MUsが参加しなくなり、徐々にST線維MUs中心に、筋収縮に参加したことが考えられる。これらの結果は、疲労時のEMGパワースペクトルを示しているMoritaniら¹⁵と三好ら¹³の先行研究と同様の結果を示しており、本研究で用いた断続的な運動は、局所的な筋疲労を起こしたと考えられる。

B. 局所的な筋疲労に伴うP300成分の変化

ERPsのP300成分は、刺激の感覚モダリティに関係なく頭頂部優位な頭皮上分布を示し、課題関連刺激がもたらす情報量によって左右される陽性電位で、被検者の刺激の評価や意思決定を反映するものである。本研究におけるERPsにおいても、頭頂部有意なP300成分を得ることができた。また運動後のP300振幅は運動前に比べて有意に減少し、運動後のP300潜時は運動前に比べ有意に延長した。

P300振幅は呈示された刺激に対する評価・判断の確実性及び被検者の確信度、注意力に依存して変化する²⁸といわれている。具体的には、刺激出現頻度、課題関連性、主観的頻度、課題の難易度、確信度などが関係している⁹。刺激出現頻度が高くなったり、刺激間隔が大きくなったり、反応する特異な刺激を判断することが難しくなるような状況ではP300振幅は低下し⁹、また区別する刺激の類似性が高まるなど、課題の困難度が増すとP300振幅は低下する²⁸と報告されている。またP300潜時は刺激評価または認知過程に要する時間を反映する³⁵と考えられ、弁別の困難な課題ほどP300潜時が延長するという一致した結果が得られている^{5,12}。課題関連刺激と

課題無関連刺激の類似性が増すと、それに伴って課題の困難度が増し、P300に影響を与える。そして一般的に両刺激の類似度が高ければ高いほど、P300潜時は延長するといった報告²⁹⁾がある。よって本研究は運動の前後で oddball 課題を操作していないことから、運動による疲労によって P300 振幅が低下し、P300 潜時が延長したということは、一過性の断続的な局所運動が中枢神経系の情報処理課程に影響を与え、機能を低下させたことが考えられる。

また疲労と事象関連電位の P300 成分をあつかった最近の研究では、Kaseda ら⁷⁾は、6 時間の計算課題後に P300 潜時が漸増的に延長すると報告し、木村ら⁹⁾は 2 回連続のクレペリン作業負荷後に P300 潜時は有意に延長するとしている。これらの結果は、精神的な疲労を与えた時に P300 潜時が延長するといった結果を支持するものであり、断眠や午睡の研究⁹⁾そして夜勤業務を精神負荷として用いた研究³⁰⁾などでは P300 潜時の延長だけでなく P300 振幅の低下がおこると報告している。また中野と橋本の研究¹⁷⁾では VDT データ入力作業を精神負荷とし、精神性疲労が事象関連電位に与える影響について検討しているが、P300 潜時には有意な差は認められなかった。彼らはこの結果に関して、精神負荷の強度が小さかったためにこのような結果が生じたとし、強度によっては、Kaseda ら⁷⁾や木村ら⁹⁾をはじめとする精神性疲労は事象関連電位に影響を与え、P300 潜時を延長させるといった結果を支持するとしている。これらの結果は計算課題や断眠といった精神課題によって、注意集中力の減退が起こり、それにより P300 成分に影響を与えたとし、Kaseda ら⁷⁾は健常者の疲労状態において、P300 成分を変化させる要因として注意の減退は重要な機構であると提唱している。また本研究においても、類似した結果が得られたことから P300 成分の変動要因に運動による精神性疲労を考慮に入れる必要があるのかもしれない。

しかしながら、本研究における自覚症状調べ、及びフリッカーテストに関しては有意な差は認められなかった。これらのことより本実験で実施したタイプ・強度の運動では精神性疲労は生じなかったことが考えられる。つまり、本実験の結果は、運動による局所性筋疲労が情報処理過程に影響を与え、機能の低下を生じさせたことが考えられる。

疲労が事象関連電位に与える影響としては、精神性疲労だけでなく運動による疲労の影響に関しても

研究されている。Nishihira ら²⁰⁾は一過性の高強度有酸素運動を課した後では P300 潜時の有意な延長と P300 振幅の有意な低下が起こるとしている。本研究の結果は、これらの先行研究を支持する結果が出ており、運動による疲労は中枢神経系、特に情報処理過程に影響を与え、機能を低下させたことが示唆された。

C. 局所的な筋疲労に伴う N2 成分の変化

P300 成分は標的検出反応時間 (EMG-RT) よりも遅れて出現することがあり、そうした知見から、P300 成分は刺激評価過程自体を反映するというよりもむしろ課題遂行に関わる最終的な意思決定後の心的活動を反映する²⁰⁾と考えられる。それに比べて N2 成分は刺激評価時間をより直接的に反映する ERPs 指標として用いられている。また N2 は逸脱刺激にのみ惹起されるという先行研究から N2 成分は被検者の予期と異なる刺激を分類する過程に関わる電位、すなわち刺激分類処理の実行中に表出する電位と推定されている^{10,26,27)}。また Ritter ら²⁸⁾は、記号と言葉の 2 種類の刺激弁別を用いて、弁別が困難になるにつれて N2 潜時と N2 onset から頂点までの持続時間が延長すると報告している。本研究において、運動後の N2 潜時は運動前に比べて有意に延長した。また N2 onset から頂点までの持続時間は有意に延長した。これらの結果も P300 成分の変化同様、本研究では運動の前後で oddball 課題を操作していないことから、運動による局所性の疲労によって中枢神経系における刺激評価過程での困難度が増したことが考えられる。

しかしながら、N2 成分は刺激処理過程のみを反映する成分ではなく選択反応過程をも反映する可能性が示唆される。選択反応過程を反映するとされているものに reaction time (RT) があるが、N2 成分は P300 成分と異なり常にこの RT より早い潜時を持つとされている²⁸⁾。また Ritter ら²⁸⁾や忠井ら²⁹⁾によれば N2 潜時と RT との相関は高い値を示しており、同一被検者で比較した場合、P300 と RT との相関よりも高い相関を示す場合が多いとされている³⁰⁾。これらのことから N2 成分は選択反応の初期過程を反映するものと考えられる。本研究においては運動前後における EMG-RT に有意な差は見られなかった。つまり運動出力で見た場合、中枢神経系内の選択反応過程に対する運動効果は認められなかったことに

なる。しかしながらN2成分はEMG-RTより早い潜時を持つこと、また選択反応初期過程を反映していることを考え合わせれば、断続的な局所運動が選択反応過程の初期過程に対して影響を与えたことが考えられる。

D. 局所的な筋疲労に伴うEMG-RTの変化

人間の情報処理は何かの刺激に注目を向けたとき、「それが何であるか」と評価する刺激評価過程と、「何をすべきか」と反応を行う選択反応過程の両方が同時に賦活することが考えられる²⁰⁾。人間の情報処理過程はこれらの刺激評価過程と選択反応過程が並列的に働いていることが考えられ、特にP300・N2は刺激評価過程を反映する指標であり、その一方の選択反応処理過程の指標としてのEMG-RTは、その運動出力の結果である。本研究でのEMG-RTに関しては、有意な変化は認められなかったのだが、これは本研究で用いたタイプ・強度の運動では、中枢神経系内の選択反応過程に対する運動効果は見られなかったということである。Nishihiraら²⁰⁾の先行研究では運動課題に高強度の全身性運動を用いており、EMG-RTに遅延が見られたとしている。これらのことから運動の強度やタイプによって選択反応過程に対する運動効果が異なるということが考えられた。

V. 結論

本研究では、断続的な局所運動が脳皮質の認知機能及び情報処理過程へ与える影響を局所的な変化と共に多角的に検討し、以下の結果を得た。

1. 本研究における運動負荷は、持続的な局所運動であり、被検者によって運動時間・運動回数は異なるが40% MVCが維持できなくなるまで継続する運動であり、被検者全てに同様の負荷が与えられた。
2. 運動負荷後に、握力の低下・乳酸値の増加・MFの低周波化等の変化がみられたことより、断続的な運動により局所的な筋疲労が起きたと考えられる。
3. 運動負荷後のP300振幅は有意に低下した。また運動負荷後のP300潜時・N2潜時は有意に延長した。

以上のことから、全身性の運動による疲労だけでなく、局所的な運動による疲労でも中枢神経系に影

響を及ぼすことが示唆され、本研究においては、中枢神経系の中でも特に情報処理過程の刺激評価過程及び選択反応過程の初期に影響を与え、機能を低下させたことが示唆された。

文献

- 1) 秋山幸代, 西平賀昭, 八田有洋, 麓 正樹, 金田健史, 時任真一郎, 下田政博 (2000) 長期的な運動経験が事象関連電位に及ぼす影響. 体力科学 49: 267-276
- 2) Bigland-Ritchie B, Furbush F and Woods J J (1986) Fatigue of intermittent submaximal voluntary contractions: central and peripheral factors. J Appl Physiol 61: 421-429
- 3) Fery Y-A, Ferry A, Vem Hofe A and Rieu M (1997) Effect of Physical Exhaustion on Cognitive Functioning. Percept Mot Skills 84: 291-298
- 4) Fujimoto T and Nishizono H (1993) Involvement of membrane excitation failure in fatigue induced by intermittent submaximal voluntary contraction of the first dorsal interosseous muscle. J Sports Med Phys Fitness 33: 107-117
- 5) 亀山知道, 平松謙一, 斎藤 治 (1986) 認知機能に関する事象関連電位 (特にP300) と精神科領域におけるその測定の価値—第一回. 精神医学 28: 364-378
- 6) 金田健史, 西平賀昭, 八田有洋, 下田政博, 麓 正樹, 竹宮 隆 (1999) 中枢内情報処理に及ぼす断眠の影響—事象関連電位 (P300) を用いての検討—. 体力科学 48: 477-484
- 7) Kaseda Y, Jiang C, Kurokawa K, Mimori Y and Nakamura S (1998) Objective evaluation of fatigue by event-related potentials. J Neurol Sci 158: 96-100
- 8) 川初清典, 矢部京之助, 山本高司 (1974) 疲労による誘発筋電図 (M波) の変化. 体育学研究 19: 33-39
- 9) 木村真人, 鈴木博子, 森 隆夫, 葉田道雄, 今井理子, 館野 周, 遠藤俊吉 (1997) 精神作業負荷前後における精神生理学的変化について—脳波パワーと事象関連電位を用いた検討—. 脳波と筋電図 25: 120
- 10) 黒岩義之, Gastone GC (1989) 視覚誘発電位 その正常波形と臨床応用. 西村書店 新潟
- 11) Magnie M N, Bermon S, Martin F, Madany-Lounis M, Suisse G, Muhammad W and Dolisi C (2000) P300, N400, aerobic fitness, and maximal aerobic exercise. Psychophysiology 37: 369-377

- 12) McCarthy G and Donchin E (1981) A metric for thought: A comparison of P300 latency and reaction time. *Science* 211: 77-80
- 13) 三好正堂, 真野行生 (1975) 臨床筋電図 — 神経筋疾患の電気診断法. 医歯薬出版株式会社 東京
- 14) Moritani T and Muro M (1987) Motor unit activity and surface electromyogram power spectrum during increasing force of contraction. *Eur J Appl Physiol* 56: 260-265
- 15) Moritani T, Nagata A and Muro M (1982) Electromyographic manifestations of muscular fatigue. *Med sci sports exerc* 14: 198-202
- 16) Nakamura Y, Nishimoto K, Akamatu M, Takahashi M and Maruyama A (1999) The Effect of Jogging on P300 Event Related Potentials. *Electromyogr clin Neurophysiol* 39: 71-74
- 17) 中野修治, 橋本 勲 (1998) 視覚疲労が各種 P300 に与える影響 — Visual display terminal (VDT) データ入力作業での検討 —. *臨床脳波* 40: 645-648
- 18) 日本産業衛生学会・産業疲労研究会編集委員会編 (1995) 産業疲労ハンドブック 労働基準調査会 東京
- 19) Nishihira Y, LEE C M, Funase K, Imanaka K, Araki H, Shimoda M and Takemiya T (1995) Changes in Power Spectral Analysis of EEG-Alpha Bands During a Sustained, Voluntary Contraction to Fatigue. *Advances Exerc Sports Physiol* 1: 39-43
- 20) Nishihira Y, Ohno T, Hatta A, Fumoto M, Kaneda T, Tokitou S, Imanaka K and Funase K (1999) P300 Before and After Transient Hard Exercise. *Advances Exerc Sports Physiol* 5: 49-54
- 21) Okada M (1987) Effect of muscle length on surface EMG wave forms in isometric contractions. *Eur J Appl Physiol* 56: 482-486
- 22) 音成龍司, Geoff Barrett, 柴崎 浩 (1986) 大脳誘発電位後期陽性成分 (P300) の正常所見および加齢の影響. *脳波と筋電図* 14: 177-183
- 23) 音成龍司 (1991) 事象関連電位 (P300) 臨床神経生理学 島村宗夫, 柴崎 浩編 真興交易医書出版部 東京
- 24) Polich J and Lardon MT (1997) P300 and long-term physical exercise. *Electroenceph Clin Neurophysiol* 103: 493-498
- 25) Ritter W, Simson R and Vaughan HG (1979) A brain event related to the making of a sensory discrimination. *Science* 203: 1358-1361
- 26) Ritter W (1983) Event-Related Potential Correlates of Two Stages of Information Processing in Physical and Semantic Discrimination Tasks. *Psychophysiology* 20: 168-179
- 27) 下河内稔, 投石保広 (1991) 事象関連電位が反映する脳の情報処理過程. *医学のあゆみ* 158: 103-106
- 28) 下河内稔, 投石保広, 楊井一彦, 小山幸子 (1988) P300の基礎. *神経進歩* 32: 149-162
- 29) 忠井俊明, 福井義久, 上月清司 (1987) 分裂病の情報処理障害 — 事象関連電位による情報処理モデルからの検討 —. *精神医学* 29: 817-828
- 30) 丹羽真一, 鶴 紀子 (1997) 事象関連電位 — 事象関連電位と神経情報科学の発展 —. 新興医学出版 東京
- 31) Tesch P (1980) Muscle fatigue in man. With special reference to lactate accumulation during short term intense exercise. *Acta Physiol Scand Suppl* 48: 1-40
- 32) Tomporowski PD and Ellis NR (1986) Effects of exercise on cognitive processes: a review. *Psychol Bull* 99: 338-346
- 33) 矢部京之助 (1990) 筋疲労の神経機構. *体育の科学* 40: 365-371
- 34) Yagi Y, Coburn KL, Estes KM and Arruda JE (1999) Effects of aerobic exercise and gender on visual auditory P300, reaction time, and accuracy. *Eur J Appl Physiol* 80: 402-408
- 35) Yasukouchi H, Wada S, Urasaki E and Yokota A (1995) Effects of Night Work on the Cognitive Function in Young and Elderly Subjects with Specific Reference to the Auditory P300. *Journal of UOED* 17: 229-246
(平成13年 5月 1日受付, 平成13年10月29日訂正,
平成13年11月14日受理)