

運動強度と身体活動量が認知・脳機能に与える影響

紙 上 敬 太^{1,2)} 西 平 賀 昭¹⁾ 東 浦 拓 郎¹⁾

EFFECTS OF EXERCISE INTENSITY AND PHYSICAL ACTIVITY LEVELS ON THE BRAIN AND COGNITION

KEITA KAMIJO, YOSHIKI NISHIHARA, and TAKURO HIGASHIURA

Abstract

The interactive effects of exercise intensity and physical activity level on the brain and cognition of young adults were investigated using the electromyographic reaction time (EMG-RT), the P3, and the NoGo P3, as well as the contingent negative variation (CNV) of event-related brain potentials. Participants ($n=26$; 24.0 ± 0.7 years) were divided on the basis of their regular physical activity level into active and inactive groups. Then, they performed a Go/NoGo reaction time task in the no exercise, control condition; as well as after light, moderate, and hard cycling exercises. Results indicated that increases in P3 and NoGo P3 amplitude following moderate exercise were larger in the inactive group, suggesting that inactive individuals were more sensitive to exercise intensity than active individuals. Active individuals might be better able to sustain their attention during the Go/NoGo reaction time task, despite the exercise intensity. These findings are suggestive of a differential effect of exercise intensity on cognitive function that might be dependent on the level of regular physical activity. The effects of exercise intensity on EMG-RTs were observed across groups. However, the P3 latency was not affected by exercise intensity. These contradictory results are possible related to the nature of the cognitive task, such as its difficulty. Moreover, increases in CNV amplitudes following moderate exercise were larger than in other exercise conditions across groups, suggesting that motor preparation process is also facilitated by moderate, acute exercise. These findings provide additional evidence for the beneficial effects of acute aerobic exercise on the brain and cognition of young adults.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 2009, 58 : 63~72)

key word : exercise intensity, physical activity level, cognitive function, event-related brain potentials (ERPs), young adults

I. 緒 言

ここ数十年間で、一過性運動が呼吸・循環器系や筋・骨格筋系のみでなく、中枢神経系、特に認知・脳機能に対しても影響を与えることが明らかにされつつある。一過性運動と認知・脳機能の関係を検討した研究では、古くから認知課題を行った際の反応時間 (reaction time : RT) や正答率などの行動指標が用いられてきた。行動指標は簡易に計測できるという利点がある反面、反応に要した時間と正答率から、脳内で進行する処理過程を推測しているに過ぎない。このため、認知処理過程の要因と反応処理過

程の要因を明確に分離することができず、研究間の矛盾する見解に繋がっていた。この問題点を解決するため、近年では一過性運動と認知・脳機能の関係を検討する研究においても、事象関連脳電位 (event-related brain potentials : ERPs) を用いた研究、いわば認知・脳機能を直接評価する研究が行われている。

ヒトが随意的に身体運動を行う時には、生体内外の感覚情報を受容器で捉え、その情報を脳内の処理機構に伝達し、知覚、識別、認知、判断という処理を行う。それとともに、その結果を身体の各器官に伝え、環境や状況に応じた反応を起こす。この一連

¹⁾ 筑波大学大学院 人間総合科学研究科
〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1

Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574, JAPAN

²⁾ 現所属：早稲田大学スポーツ科学学術院
〒359-1192 埼玉県所沢市三ヶ島2-579-15

Faculty of Sports Sciences, Waseda University
2-579-15 Mikajima, Tokorozawa, Saitama 359-1192, JAPAN

の処理過程を反映する指標がERPsである。ERPsを用いることによって、RTなどの行動指標のみでは推測することが難しい「身体運動が脳内のどの処理過程に影響を及ぼすのか」を明らかにすることができる。

ERPsを用いて一過性運動の影響を調べた研究では、そのほとんどが刺激提示の約300–800 ms後に生じる陽性成分であるP3成分を指標に用いている。P3成分はさまざまな心理学的要因によって影響を受ける内因性成分であり、その振幅は刺激や認知課題に対してどのくらいの注意を分配したのかといった注意処理資源量を反映し^{1,2)}、その潜時は刺激評価時間を反映すると考えられている^{3,4)}。P3成分を指標とした先行研究では、一過性運動が認知機能を向上させるとした見解と認知機能に変化をもたらさないとした見解に分かれており、一貫した知見が得られていない⁵⁾。この見解の相違には①認知課題の性質、②参加者の体力、③運動の強度や時間、④認知課題を行わせるタイミングといった方法論的要因の違いが関連していると考えられている⁶⁾。つまり、これらの方法論的要因を個別に検討することによって、一過性運動が認知・脳機能に及ぼす影響を明らかにする必要があると考える。

我々はこれらの方法論的要因の中から一過性運動の強度に焦点を絞って検討を行い、中等度強度の運動後にはP3振幅は増大するが、高い強度の運動後にはP3振幅が低下することを示した⁷⁾。換言すれば、P3成分の反映する認知機能は適度な中強度運動後には向上し、疲労をもたらすような高強度運動後には低下すると考えられる。一方で、Magniéたち⁸⁾は、自転車競技選手と運動習慣のない者を対象に比較的高い強度の運動後にP3成分を計測したところ、身体活動量もしくは有酸素能（最大酸素摂取量）に関係なく、運動後にはP3振幅の増大ならびに潜時の短縮が認められたことを示した^{*1)}。この見解は、日常的な身体活動量や有酸素能の違いが、一過性運動のP3成分に対する影響に関係していないことを示唆するものである。しかしながら、Magniéたち⁸⁾は高強度運動のみ一種類しか用いておらず、その影響に関しては未だ不明な点が多い。言い換えれば、上述の4つの方法論的要因は独立して作用するのではなく、それぞれが関連して相互に作用する可能性が考えられる。つまり、疲労をもた

らすような強度の高い運動は身体活動量や有酸素能に関係なく認知機能に影響を及ぼすのかもしれないが、それよりも低い強度の運動が同様であるかどうかは定かでない。そこで本研究では、認知機能に与える一過性の有酸素運動の影響が、運動強度と身体活動量の違いによってどのように異なるのか、その相互作用をP3成分によって検討することを目的とした。

本研究では、予告刺激（S1）と命令刺激（S2）からなるGo/NoGo反応時間課題を用い、P3成分に加えて随伴陰性変動（contingent negative variation : CNV）を計測した。CNVは発生源や出現の特性上、早期成分と後期成分の2つに分けられる。特に、S2に対して反応動作が求められる場合、後期成分には動作に対する準備を反映する成分、すなわち運動準備電位が重畳していると考えられている^{9,10)}。対照的に、P3潜時は刺激評価時間を反映する指標であり、反応処理過程からは比較的独立していると考えられている^{3,4)}。つまり、RTが一過性運動後に短縮した場合、P3成分とCNVを同時に評価することで、一過性運動が刺激評価過程に影響を与えたのか、反応準備過程に影響を与えたのかをある程度区分して考えることが可能となる。さらに、Go/NoGo反応時間課題のNoGo（反応しない）時には、前頭葉における抑制過程を反映すると考えられている^{11,12)}。NoGo P3成分が出現するため、この成分の変化に関しても加えて検討した。

以上のことから、本研究では、認知・脳機能に与える一過性の有酸素運動の影響が運動強度と身体活動量の違いによってどのように異なるのかを行動指標（筋電図反応時間：electromyographic RT : EMG-RT）に加え、ERPsを用いて検討することを目的とした。行動指標のみを用いて一過性運動と認知機能の関係を調べた研究では見解は一致していないが、Tomprowski¹³⁾はそれらの研究を総説にまとめ、有酸素能の高い者は低い者に比べ、強度の高い運動がもたらすネガティブな影響（疲労）に対する抵抗力が高いことを示唆している。この見解に従い、本研究においては身体活動量が多い（有酸素能が高い）者は身体活動量が少ない（有酸素能が低い）者に比べ、より高い強度の運動後でもEMG-RTが短縮することが予想された。同様に、身体活動量の多い者はより高い強度の運動後にP3振幅の増大、

潜時の短縮が生じることが予想された。RTは(P3潜時が反映する)刺激評価過程だけではなく反応選択過程や反応準備過程などすべてを含んだ最終的な出力結果である¹⁴⁾。ゆえに、一過性運動後に変化が予想されるEMG-RTには、刺激評価過程の変化だけではなく、反応処理過程の変化も関係する可能性が考えられる。より短いRTの前にはより大きなCNV振幅が観察されることが報告されており^{15,16,17)}、本研究においても一過性運動後にはEMG-RTの短縮とともに、CNV振幅が増大することが予想された。

II. 方 法

A. 参加者

26名の健康成人男性(24.0±0.7歳)が本実験に参加した。参加者は、実験に先立ち国際標準化身体活動質問表(international physical activity questionnaire: IPAQ)日本語版 Short Version¹⁸⁾に回答した。IPAQは、世界各国における身体活動量の現状を把握し、国際比較をするために開発された質問表であり、従来の質問表と比較して、信頼性、妥当性の面で同等以上であることが確認されている¹⁸⁾。IPAQの結果から、各参加者の1日のエネルギー消費量を算出し、参加者を運動群(13名)と非運動群(13名)に分類した。各群の参加者の身体的、生理的特徴を表1に示す。神経疾患、精神疾患の既往歴のある参加者はいなかった。すべての参加者に対して、事前に実験方法を詳細に説明し、インフォームドコンセントを得た。本実験のプロトコルは筑波大学体育科学系研究倫理委員会の承認を得た。

B. 実験手順

本実験はコントロール条件(運動なし、脳波計測のみ)と3つの運動条件(低・中・高強度運動)からなり、すべては異なる日に行われた(平均8.0±0.5日間隔)。それぞれの条件を行う順序は、Go/NoGo反応時間課題に対する慣れや学習の影響を避ける(順序効果を相殺する)ために参加者間でカウンターバランスされた。また、日内変動の影響を避けるため、脳波を計測する時間帯は各参加者内で統一した。

コントロール条件では、脳波計測の準備終了後、参加者はGo/NoGo反応時間課題の説明を受け、20試行の練習を行った。練習試行の後、参加者は安静状態でGo/NoGo反応時間課題を80試行(Go:NoGo=40:40)行い、課題遂行時のEMG-RTとERPsを記録した。運動条件では、参加者はコントロール条件と同様に脳波計測の準備と練習試行を終えた後、それぞれの運動強度で20分間のサイクリング運動を行い、運動終了直後にコントロール条件と同じGo/NoGo反応時間課題を行った。運動中には1分毎に自覚的運動強度(rating of perceived exertion: RPE)¹⁹⁾、心拍数(heart rate: HR)、仕事率(work rate: WR)を記録した。

C. 運動負荷方法

実験に先立ち、運動条件における負荷設定と参加者の有酸素能を評価する(最大酸素摂取量を計測する)ために、1分毎にWRを15ワットずつ高める多段階漸増負荷法を疲労困憊に至るまで行わせた。各負荷ステージの最後にRPEとHRを記録し、その関係を最小2乗法によって1次回帰し、RPEが11「楽である」、13「ややきつい」、15「きつい」に相

Table 1. Group means for participant characteristics.

	Active	Inactive
Age (yrs)	24.4 ± 1.1	23.5 ± 0.9
Height (cm)*	171.8 ± 1.6	176.0 ± 1.1
Weight (kg)	70.1 ± 1.4	73.0 ± 8.8
IPAQ (kcal/day)*	548.1 ± 129.3	105.4 ± 20.4
$\dot{V}O_{2max}$ (ml/kg/min)*	50.4 ± 1.3	46.3 ± 1.1

Values are mean ± SE. Significant difference, unpaired Student's *t*-test between groups: **p*<0.05.

当する HR を求めた。

求められた HR をそれぞれの目標 HR とし、その目標 HR が維持されるように負荷を機械的に自動制御した (STB-2400, コンビ社製)。運動条件では、参加者は無負荷での 2 分間のウォーミングアップを行った後、それぞれの目標 HR で 20 分間のサイクリング運動を行った。ペダルの回転数は 60 回転/分で一定とした。

D. Go/NoGo 反応時間課題

参加者は、シールドルーム内の安楽椅子に座位姿勢を維持した状態で、ヘッドホンを装着した。参加者の 1 メートル前方には、視覚刺激を提示するための LED を設置した。Go/NoGo 反応時間課題には、予告刺激 (S1) に聴覚刺激 (持続時間: 50 ms, 強度: 60 dB SPL, 周波数: 2000 Hz) を、命令刺激 (S2) に視覚刺激 (持続時間: 200 ms) を用いた。ヘッドホンから提示される S1 の 2 s 後、S2 として緑と赤の LED を 5 : 5 の確率でランダムに提示し、参加者は緑の LED を標的として弁別し、できる限り速く右手の母指でボタン押し反応を行うように指示された。試行間間隔 (S1-S1 間隔) は 10 s とした。課題遂行時間は約 13 分間であった。

E. 記録と解析

脳波は国際 10-20 法に基づき、Fz, C3, Cz, C4, Pz 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 (EEG-1100, 日本光電)。電極間抵抗は 5 k Ω 以下とし、運動条件においては、運動後に抵抗値が上昇していないことを確認した。眼電図も同時記録し、眼球運動や瞬きをモニターした。P3 成分、NoGo P3 成分、CNV に関しては時定数 5 s、広域遮断周波数 120 Hz で増幅記録した。EMG は右手の短母指屈筋に表面電極を装着し、時定数 0.03 s、広域遮断周波数 120 Hz で増幅記録した。過剰な眼球運動、瞬き、反応エラーを含む試行は加算から除外した。データは 500 Hz でサンプリングされた。

P3 成分、NoGo P3 成分の基線算出には、加算平均した波形の S2 前 100 ms の平均電位を用いた。P3 成分、NoGo P3 成分の同定は、S2 後 250 ms から 500 ms 間の最大陽性成分とした。基線から最大陽性成分の頂点までを P3, NoGo P3 振幅とした。また、

S2 刺激提示より頂点までの時間を P3, NoGo P3 潜時とした。CNV の基線算出には、加算平均した波形の S1 前 500 ms の平均電位を用いた。CNV は S2 前の成分であり、反応時も非反応時も同じであることが考えられるため、両試行を区別せずに加算平均した。S2 前 500 ms から S2 起始までの平均電位を CNV 振幅とした。CNV に関しては、瞬きなどのアーチファクトにより加算平均処理ができなかった 4 名 (各群 2 名ずつ) のデータを分析から除外した。よって、CNV の分析は 22 名 (各群 11 名ずつ) のデータを対象に行われた。

F. 統計検定

本研究では、運動群と非運動群の群間要因が含まれる。ERPs は非常に個人差の大きい指標であるため、群間比較を行う際にはコントロール条件の値を用いて補正した。つまり、P3, NoGo P3 の振幅・潜時、CNV 振幅に関しては、各強度の運動後の値からコントロール条件の値を引き算し、それぞれの変化量を Δ (NoGo) P3 振幅、 Δ (NoGo) P3 潜時、 Δ CNV 振幅と定義した。それぞれの優勢部位 (P3 : Pz, NoGo P3 と CNV : Cz) における Δ (NoGo) P3 振幅、 Δ (NoGo) P3 潜時、 Δ CNV を求めた。各優勢部位における ERPs の振幅と潜時、EMG-RT、運動負荷 (20 分間の平均 RPE, HR, WR) の統計検定には、群 (運動群・非運動群) \times 運動強度 (低・中・高) の 2 要因による混合型分散分析を用いた。分散分析に際し、Mauchly の球面性検定を行い、球面性が仮定できなかった時には Greenhouse-Geisser のイプシロン (ϵ) を用いて自由度、有意確率を再計算した。下位検定における平均値の多重比較には Bonferroni 法を用いた。表 1 に示した参加者の身体的、生理的特徴の統計検定には、対応のない t 検定を用いた。有意水準は 5 % とした。各変数の測定結果は、平均値 \pm 標準誤差で示した。

Ⅲ. 結 果

A. 参加者の身体的、生理的特徴

参加者の身体的、生理的特徴を表 1 に示す。IPAQ によって求められた 1 日のエネルギー消費量は非運動群よりも運動群において有意に大きく [t (1, 24) = 3.38, p = 0.002], 最大酸素摂取量も運動群の方が有意に大きかった [t (1, 24) = 2.39, p =

0.025]. また、非運動群の方が運動群よりも有意に身長が高かった [$t(1,24)=2.11, p=0.046$].

B. 運動強度

20分間の平均RPE, HR, WRを表2に示す. これらすべての指標において運動強度の主効果が認められた[RPE: $F(2,48)=339.13, p<0.001$; HR: $F(2,48)=1025.86, p<0.001, \epsilon=0.77$; WR: $F(2,48)=195.37, p<0.001$]. それぞれの指標において運動強度の水準間で多重比較を行った結果, すべての指標, 水準間において運動強度は有意に異なった[RPE: $ts(1,25) \geq 12.01, p<0.001$; HR: $ts(1,25) \geq 23.69, p<0.001$; WR: $ts(1,25) \geq 9.43, p<0.001$]. また, すべての指標において群の主効果, 2要因間の交互作用は認められなかった. これらの結果は, 運動強度がそれぞれの水準間で有意に異なっていたこと, それぞれの運動強度は両群において同程度であったことを示している.

C. EMG-RT

EMG-RTに関して分散分析を行った結果, 運動強度の主効果が認められた [$F(3,72)=3.17, p=0.029$]. 運動強度の水準間で多重比較を行った結果, 両群においてコントロール条件 (平均 216.6 ± 8.9 ms) に比べ中強度運動後 (平均 200.7 ± 8.8 ms) のEMG-RTが有意に短かった [$t(1,25)=2.96, p=0.018$]. 群の主効果, 2要因間の交互作用は認められなかった.

D. P3成分

優勢部位におけるP3成分 (P_z), NoGo P3成分 (C_z) の総加算波形を図1に示す. $\Delta P3$ 振幅に関して分散分析を行った結果, 群 \times 運動強度の交互作用が認められた [$F(2,48)=3.71, p=0.042, \epsilon=$

0.81]. 下位検定の結果, 非運動群においてのみ運動強度の主効果に有意傾向が認められた [$F(2,24)=4.07, p=0.061, \epsilon=0.56$]. Δ NoGo P3 振幅に関して分散分析を行った結果, 群 \times 運動強度の交互作用が認められた [$F(2,48)=4.40, p=0.018$]. 下位検定の結果, 運動強度の主効果は非運動群においてのみ認められた [$F(2,24)=11.28, p<0.001$]. 非運動群において運動強度の水準間で多重比較を行った結果, 中強度運動の Δ NoGo P3 振幅は低強度運動, 高強度運動よりも有意に大きかった [$ts(1,12) \geq 3.45, p \leq 0.003$] (図2). このような運動強度の主効果は運動群には認められなかった.

$\Delta P3$ 潜時, Δ NoGo P3 潜時に関して分散分析を行った結果, すべての要因, 要因間において主効果ならびに交互作用は認められなかった.

E. CNV

優勢部位におけるCNV (C_z) の総加算波形を図3に示す. Δ CNV 振幅に関して分散分析を行った結果, 運動強度の主効果が認められた [$F(2,40)=7.82, p=0.003, \epsilon=0.78$]. 運動強度の水準間で多重比較を行った結果, 両群において中強度運動の Δ CNV 振幅は低強度運動, 高強度運動よりも大きかった [$ts(1,21) \geq 3.50, p \leq 0.021$]. 群の主効果, 2要因間の交互作用は認められなかった.

IV. 考 察

A. 参加者の身体的, 生理的特徴

最大酸素摂取量によって評価された参加者の有酸素能は運動群で有意に高かったが, その差は比較的小さい (表1). 本研究では, 競技レベルで活動する運動選手ではなく一般健康成人に対する一過性運動の影響をみたかったため, 参加者には運動選手は含まれていない. 運動選手を除く一般健康成人の中

Table 2. Mean RPE, HR, and WR for 20 min at each intensity exercise in both groups.

	Light		Moderate		Hard	
	Active	Inactive	Active	Inactive	Active	Inactive
RPE value ^{*#}	10.5 \pm 0.2	10.8 \pm 0.3	12.6 \pm 0.2	12.8 \pm 0.3	14.7 \pm 0.2	14.6 \pm 0.3
HR (bpm) ^{*#}	107.7 \pm 3.6	110.9 \pm 2.8	123.5 \pm 3.1	128.4 \pm 2.9	140.5 \pm 2.9	146.1 \pm 3.3
WR (W) ^{*#}	99.9 \pm 5.8	87.1 \pm 5.3	122.0 \pm 6.5	112.6 \pm 5.5	150.7 \pm 7.5	133.5 \pm 6.0

Values are mean \pm SE. Significant difference by Bonferroni post hoc analysis, ^{*} $p<0.05$: Light vs. Moderate, [#] $p<0.05$: Light vs. Hard, ^{\$} $p<0.05$: Moderate vs. Hard. No significant interaction involving Group factor was observed.

Grand Averaged P3 Waveforms

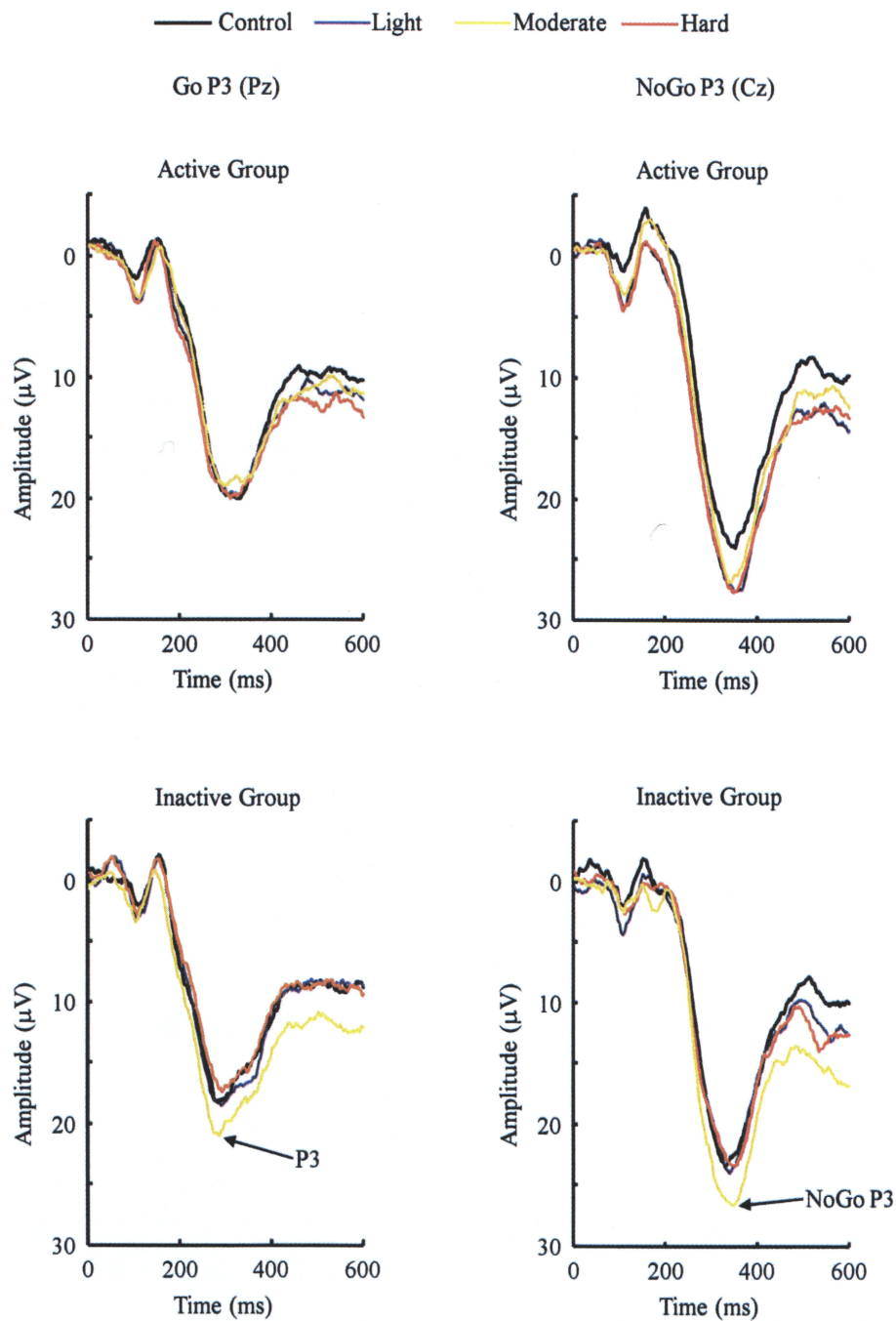


Fig. 1. Grand averaged Go (Pz; left) and NoGo (Cz; right) ERP waveforms at all conditions in the active (top; $n=13$) and inactive (bottom; $n=13$) groups.

で最大酸素摂取量に大きな差が生じることは考えにくく、この結果は妥当であると考えられる。但し、身体活動量と最大酸素摂取量は群間で有意に異なることに留意されたい。

B. EMG-RT, P3 と NoGo P3

両群において中強度運動後の EMG-RT はコント

ロール条件よりも短かった。この結果は、中強度運動が認知・脳機能を促進させること、身体活動量(有酸素能)の違いが一過性運動の影響に関係ないことを示唆するものである。

一方で、 $\Delta P3$ 、 $\Delta \text{NoGo P3}$ 振幅は非運動群においてのみ運動強度の違いによって異なる変化を示した：非運動群における中強度運動の $\Delta \text{NoGo P3}$ 振幅

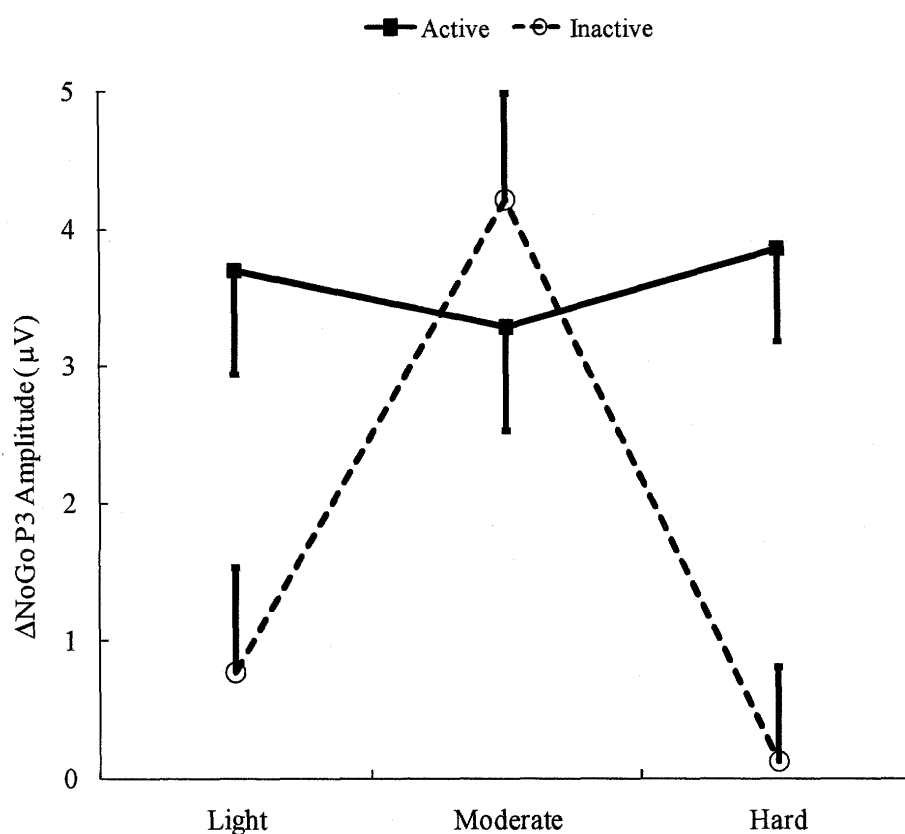


Fig. 2. Mean Δ NoGo P3 amplitude at all exercise conditions from Cz in the active and inactive groups.

は低強度運動, 高強度運動よりも大きく (図2), (有意傾向しか認められなかったものの) Δ P3 振幅も中強度運動が最も高振幅を示した (図1). P3 振幅は認知課題に対してどのくらいの注意を分配したのかといった注意の量的な側面 (注意処理資源) を反映すると考えられている^{1,2)}. つまり, 非運動群においては, 中強度運動後により多くの注意処理資源量が認知課題に分配されたことが考えられる. この結果は, 中等度強度の運動後には P3 振幅は増大するが, 高い強度の運動後には P3 振幅が低下することを示した我々の先行研究⁷⁾を支持するものである.

また, 本研究では, 各運動条件において異なる強度の運動を同時に行わせているため, 運動強度だけではなく運動量も異なる. 我々は低・中・高強度, 短・中・長時間それぞれの組み合わせの運動を用い, 運動強度と時間の相互関係を検討した^{20,21)}. その結果, 低強度運動では時間に関係なく認知機能の促進効果は認められず, 強度が中等度以上の場合には, 比較的短時間の運動であっても促進効果が現れ始めるが, 時間が延長するにつれ疲労とともにその

促進効果は打ち消されることが示唆された. 本研究においても, 中強度運動の場合は20分間が認知機能に促進をもたらす適度な時間であったが, 高強度運動の場合には長すぎたため一過性運動の促進効果が認められなかったのかもしれない.

非運動群とは異なり, 運動群においては運動強度の違いによって Δ P3, Δ NoGo P3 振幅の変化が認められなかった. これは, 運動群が一過性運動の影響を受けにくいことを示唆するものである. しかし, 統計的には有意でないものの低強度運動と高強度運動の Δ NoGo P3 振幅は非運動群に比べ運動群の方が大きい (図1, 2). つまり, 運動群は運動強度に関係なく, Go/NoGo 反応時間課題に対して注意を維持できているのかもしれない.

この P3 振幅の結果は EMG-RT の結果に反する. P3 成分は RT などの行動指標よりも習慣的運動の効果 (身体活動量の違い) の検出に敏感であることが示唆されている²²⁾. つまり, 習慣的運動の効果が行動指標には反映されず, P3 成分においてのみ認められる場合がある^{22,23)}. また, この傾向 (P3 成分の方が身体運動の影響を受けやすいという傾

Grand Averaged CNV Waveforms

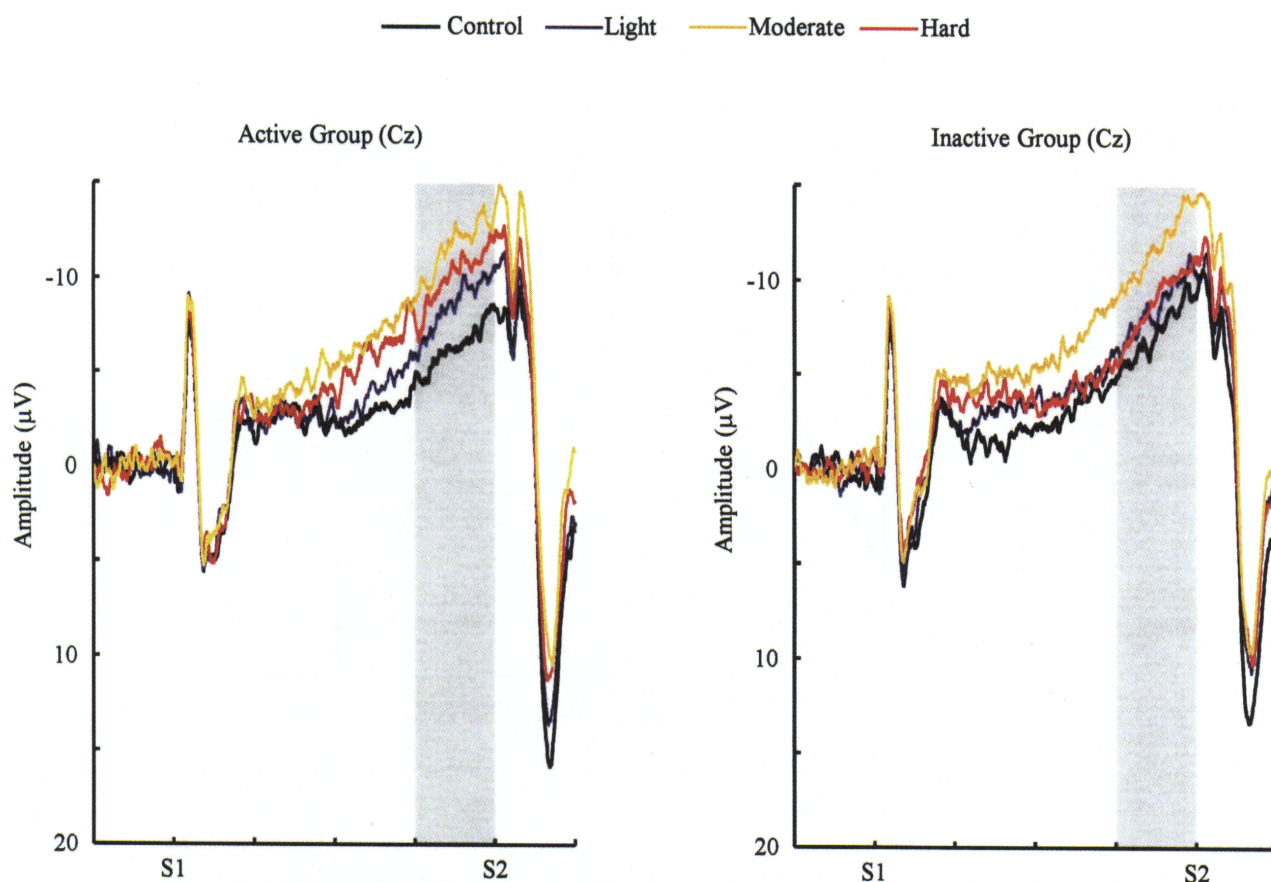


Fig. 3. Grand averaged CNV waveforms at all conditions in the active (left; $n=11$) and inactive (right; $n=11$) groups. The CNV amplitude was defined as the mean value over the time period of 500 ms immediately before S2 (gray zones).

向)は、一過性運動の影響に関しても当てはまる^{7,20,21,24}。いわば、刺激の入力から反応の出力までのすべての過程を含んだ最終的な出力結果であるEMG-RTよりも、感覚入力過程や反応処理過程からは比較的独立した認知機能を反映すると考えられるP3成分が一過性運動、習慣的運動の影響を反映しやすいことが考えられる。よって、本研究においても身体活動量(習慣的運動)と運動強度(一過性運動)の相互作用がP3成分にのみ認められたと考えられる。

C. 実行機能

非運動群において、運動強度の違いによる Δ P3振幅の変化はGo条件よりもNoGo条件で顕著であった(Go条件では有意傾向のみ)。認知課題の性質に注目した先行研究では、一過性運動の影響が、主に前頭前野の働きに関する実行機能(executive

function)において顕著に生じることが示されている^{24,25}。実行機能とは、目的を持った一連の活動を有効に成し遂げるために必要な機能である。実行機能には、作業記憶(ワーキングメモリ)、注意の制御(注意の切り替えなど)、必要な情報への注意と不必要な情報の抑制(干渉制御: interference control)、不必要な行動の抑制などが含まれる²⁶。Hillmanたち²⁴とKamijoたち²⁵は、認知的葛藤課題を用い、実行機能のひとつである「必要な情報への注意と不必要な情報の抑制」(干渉制御)が一過性運動の影響を受けやすいことを示した。NoGo P3成分は前頭葉における抑制過程を反映すると考えられているため^{11,12}、NoGo条件では実行機能のひとつである「不必要な行動の抑制」を要すると考えられる。つまり、本研究結果は、干渉制御か反応抑制かといった種類にかかわらず、実行機能が一過性運動の影響を受けやすいとする見解を支持するもの

である。

D. 反応準備過程

両群において中強度運動の Δ CNV振幅は低強度運動、高強度運動よりも大きかった。CNVは反応の準備過程を反映すると考えられており^{9,10)}、より短いRTの前にはより大きなCNV振幅が観察されることが報告されている^{15,16,17)}。つまり、本研究では両群において中強度運動が反応準備過程を促進させ、その結果身体活動量とは無関係にEMG-RTが短縮したと考えられる。CNVとは対照的に、刺激評価時間を反映するP3潜時は、反応処理過程から比較的独立していると考えられている^{3,4)}。よって、本研究において認められた中強度運動後のEMG-RTの短縮には、刺激評価過程ではなく、反応準備過程の促進が貢献していると考えるのが妥当である。しかしながら、先行研究では一過性運動後にP3潜時の短縮が認められたことが示されており^{24,25)}、本研究結果に反する。これらの見解の相違には、おそらく課題の難易度が関係していると考えられる。我々は先行研究において課題の難易度に注目して一過性運動の影響を検討し、より難しい課題でのみP3潜時の変化が認められたことを報告した²⁵⁾。本研究におけるP3潜時は約300-350 ms (Go : 315.4 ± 6.2 ms, NoGo : 349.8 ± 3.8 ms)、先行研究では約400 msと明らかに本研究の方が短い。つまり、刺激の評価に比較的時間を要さない課題を用いた場合、P3潜時に対する一過性運動の影響が生じにくいと考えられる。よって、本研究結果は、一過性の有酸素運動がこれまで報告されてきた刺激評価過程だけではなく、反応準備過程にも影響を与えることを示唆するものである。

V. ま と め

本研究は、認知・脳機能に与える一過性の有酸素運動の影響が運動強度と身体活動量の違いによってどのように異なるのかをEMG-RT、P3成分、NoGoP3成分、CNVを用いて検討した。EMG-RTとCNVが、身体活動量に関係なく運動強度の影響を受けたことから、身体活動量の違いが一過性運動の影響に関係ないことが示唆された。しかしながら、P3、NoGoP3振幅に対する運動強度の影響が、非運動群においてのみ認められたことから、習慣的に運動を行っ

ていない者は運動強度の変化に敏感に反応すること、逆に言えば運動習慣者は運動強度に関係なく認知機能を維持できる可能性が考えられた。本研究はP3成分が身体運動の影響に敏感であるとする見解を支持するものであるが、今後は本研究における各指標の異なる変化の要因に関してより詳細に検討する必要がある。

謝 辞

本研究は文部科学省21世紀COEプログラム「健康・スポーツ科学の推進」の助成により行われた。

(受理日 平成20年9月29日)

参 考 文 献

- 1) Kramer, A. F., and Strayer, D. L. Assessing the development of automatic processing : an application of dual-track and event-related brain potential methodologies. *Biol. Psychol.*, (1988), **26**, 231-267.
- 2) Wickens, C. D., Kramer, A. F., Vanasse, L., and Donchin, E. Performance of concurrent tasks: a psychophysiological analysis of the reciprocity of information processing resources. *Science*, (1983), **221**, 1080-1082.
- 3) Kutas, M., McCarthy, G., and Donchin, E. Augmenting mental chronometry : the P3 as a measure of stimulus evaluation time. *Science*, (1977), **197**, 792-795.
- 4) McCarthy, G., and Donchin, E. A metric for thought: a comparison of P300 latency and reaction time. *Science*, (1981), **211**, 77-80.
- 5) Kamijo, K. Effects of acute exercise on event-related brain potentials. In., W Chodzko-Zajko, W. and Krmer A. F., *Active Living, Cognitive Functioning, and Aging* Volume III. Human Kinetics, Champaign, IL, (*in press*).
- 6) Collardeau, M., Brisswalter, J., Vercruyssen, F., Audifren, M., and Goubault, C. Single and choice reaction time during prolonged exercise in trained subjects : influence of carbohydrate availability. *Eur. J. Appl. Physiol.*, (2001), **86**, 150-156.
- 7) Kamijo, K., Nishihira, Y., Hatta, A., Kaneda, T., Wasaka, T., Kida, T., and Kuroiwa K. Differential influences of exercise intensity on information processing in the central nervous system. *Eur. J. Appl. Physiol.*, (2004), **92**, 305-311.
- 8) Magnié, M. N., Bermon, S., Martin, F., Madany-Lounis, M., Suisse, G., Muhammad, W., and Dolisi, C. P300, N400, aerobic fitness, and maximal aerobic exercise. *Psychophysiology*, (2000), **37**, 369-377.
- 9) Brunia, C. H., and van Boxtel, G. J. Wait and see. *Int. J. Psychophysiol.*, (2001), **43**, 59-75.
- 10) van Boxtel, G. J., and Brunia, C. H. Motor and

- non-motor aspects of slow brain potentials. *Biol. Psychol.*, (1994), **38**, 37-51.
- 11) Bruin, K. J., and Wijers, A. A., Inhibition, response mode, and stimulus probability: a comparative event-related potential study. *Clin. Neurophysiol.*, (2002), **113**, 1172-1182.
 - 12) Burle, B., Vidal, F., and Bonnet, M. Electroencephalographic nogo potentials in a no-movement context: the case of motor imagery in humans. *Neurosci. Lett.*, (2004), **360**, 77-80.
 - 13) Tomporowski, P. D. Effects of acute bouts of exercise on cognition. *Acta. Psychol. (Amst.)*, (2003), **112**, 297-324.
 - 14) Doucet, C., and Stelmack, R. M. The effect of response execution on P3 latency, reaction time, and movement time. *Psychophysiology*, (1999), **36**, 351-363.
 - 15) Haagh, S. A., and Brunia, C. H. Anticipatory response-relevant muscle activity, CNV amplitude and simple reaction time. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, (1985), **61**, 30-39.
 - 16) Hiruma, T., Yabe, H., Sato, Y., Sutoh, T., and Kaneko, S. Differential effects of the hiba odor on CNV and MMN. *Biol. Psychol.*, (2002), **61**, 321-331.
 - 17) Smith, J. L., Johnstone, S. J., and Barry, R. J. Effects of pre-stimulus processing on subsequent events in a warned Go/NoGo paradigm: response preparation, execution and inhibition. *Int. J. Psychophysiol.*, (2006), **61**, 121-133.
 - 18) 村瀬訓生, 勝村俊仁, 上田千穂子, 井上茂, 下光輝一. 身体活動量の国際標準化 —IPAQ日本語版の信頼性, 妥当性の評価—, 厚生省の指標, (2002), **49**, 1-9.
 - 19) Borg, G. A. Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scand. J. Rehabil. Med.*, (1970), **2**, 92-98.
 - 20) 東浦拓郎, 西平賀昭, 八田有洋, 黒岩一雄, 紙上敬太. 運動時間の違いによるP300の変動, 臨床神経生理学, (2006), **34**, 82-88.
 - 21) Higashiura, T., Nishihira, Y., Kamijo, K., Hatta, A., Kim, S., Hayashi, K., Kaneda, T., and Kuroiwa, K. The interactive effects of exercise intensity and duration on cognitive processing in the central nervous system. *Adv. Exerc. Sports Physiol.*, (2006), **12**, 15-21.
 - 22) Hillman, C. H., Kramer, A. F., Belopolsky, A. V., and Smith, D. P. A cross-sectional examination of age and physical activity on performance and event-related brain potentials in a task switching paradigm. *Int. J. Psychophysiol.*, (2006), **59**, 30-39.
 - 23) Polich, J., and Lardon, M. T. P300 and long-term physical exercise. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, (1997), **103**, 493-498.
 - 24) Hillman, C. H., Snook, E. M., and Jerome, G. J. Acute cardiovascular exercise and executive control function. *Int. J. Psychophysiol.*, (2003), **48**, 307-314.
 - 25) Kamijo, K., Nishihira, Y., Higashiura, T., and Kuroiwa, K. The interactive effect of exercise intensity and task difficulty on human cognitive processing. *Int. J. Psychophysiol.*, (2007), **65**, 114-121.
 - 26) Funahashi, S. Neuronal mechanisms of executive control by the prefrontal cortex. *Neurosci. Res.*, (2001), **39**, 147-165.

脚 注

*1: Magnié たち⁸⁾の研究では, 運動の約1時間後にP3成分を計測している. これは運動によって変化する体温や心拍数が脳波に与える影響を考慮したためである. しかしながら, その回復までの時間の過ごし方の違いによって, 覚醒水準や課題に対する動機付け等が変化し, 運動以外の要因がERPsに影響を与える可能性が大きい. 運動直後にERPsを計測するのか, 体温や心拍数の回復を待ってERPsを計測するのか, どちらの方法を選択しても問題点が残ることは否めず, いわばERPsの指標としての限界である. また, 高強度運動後にはP3振幅が低下するとした我々の先行研究⁷⁾とMagnié たち⁸⁾の見解が異なるのは, ここに示したようにERPs計測のタイミングの違いによるものであると考えられる.