

## 暑熱環境の違いが運動時のヒト脳認知機能に及ぼす影響

奈良女子大学 中田大貴  
(共同研究者) 同 大城 岬  
同 難波真理  
同 芝崎 学

### **Human Cognitive Functions During Exercise under Different Thermal Conditions**

by

Hiroki Nakata, Manabu Shibasaki  
*Department of Health Sciences,  
Nara Women's University*  
Misaki Oshiro, Mari Namba,  
*Faculty of Human Life and Environment,  
Nara Women's University*

#### ABSTRACT

In the present study, we investigated the effects of exercise on human cognitive processing under different thermal conditions (20 °C and 35 °C conditions). Eleven healthy males performed 4 × 15-min bouts of cycling exercise. Event-related potentials (ERPs) were recorded in five sessions during somatosensory Go/No-go paradigms (i.e., pre, post-1st exercise bout, post-2nd exercise bout, post-3rd exercise bout, and post-4th exercise bout). As thermoregulatory and hemodynamic variables, the external ear canal temperature, mean skin temperature, heart rate, and mean arterial

blood pressure were recorded. The reaction time and error rates were not affected by the repetition of aerobic exercise or different thermal conditions. However, the peak amplitude of the N140 component, which was mainly related to somatosensory processing, was significantly reduced with the repetition of cycling exercise, and the decrease was marked in No-go trials under 35 °C condition. Moreover, the peak amplitude of P300, which was linked to the cognitive processes of context updating, context closure, and event-categorization, was significantly smaller in the post-3rd and post-4th exercise bouts under 35 °C than under 20 °C condition. These results suggest that executive function, which was based on reaction time and error rates, would not be affected by the repetition of aerobic exercise and different thermal conditions, but aerobic exercise under higher thermal conditions may impair human cognitive processing.

## 要 旨

本研究では脳波事象関連電位を用い、異なる温度環境下での運動が認知機能に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。実験には11名の成人男性被験者が参加した。20℃条件、および35℃条件において、体性感覚刺激Go/No-go課題を行い、自転車エルゴメータによる運動前（1回目）、15分間×4セットの運動セッションの直後（2~5回目）に、脳波事象関連電位を計測した。実験の結果、行動指標である反応時間とエラー率に運動の繰り返しの効果や異なる温度環境の効果は認められなかった。体性感覚刺激処理過程を反映するN140成分の振幅は、セッションの主効果が認められ、運動の繰り返しによって徐々に振幅が低下していることが示された。さらに、その低下は35℃条件のNo-go刺激時において、顕著であった。認知処理過程を反映するP300成分の振幅は、第3セッション、第4セッションにおいて、35℃条件の方が20℃条件よりも有意に振幅が低下した。これらの結果から、反応時間などで示される反応実行系には運動の繰り返しや温度環境の効果は認められないが、高温環境下における運動

は認知処理系に係る神経活動を低下させる可能性が示唆された。

## 緒 言

2020年の東京オリンピック・パラリンピックは、7月24日～8月9日、8月25日～9月6日に実施が予定されている。この時期は最高気温が35℃前後の気温になる日が多く、WBGTが31℃を超えて運動の原則中止を喚起することが多くなる時期でもある。スポーツイベントは、行う選手だけでなく、それを支えるスタッフや観客等によって成り立っている。夏場のスポーツに関わる全ての人には熱中症に罹るリスクがあり、そのリスクを少しでも軽減できる対処法に関する科学的エビデンスの提供、ならびにその普及は、スポーツ科学において大変重要なテーマである。

熱中症は、発症原因により、熱失神、熱痙攣、熱疲労、および熱射病に分類されるが、症状は複合的であるため、救急搬送においては重症度（I, II, III）で評価される。重症度Iでは「頭がぼーっとする」「集中力の低下」などといった症状が報告されているが、これは、高温時にはヒト脳の認知機能が低下しているものと考えられる。先行

研究において、有酸素運動は運動開始の初期には認知機能を向上させ、運動継続に伴って末梢性や中枢性の疲労が発生し、認知機能が低下することが報告されている。例えば、Gregoら<sup>5)</sup>は、運動開始から2時間を超えると地図認識テストで評価された認知機能の顕著な低下、ならびにフリッカーテストで評価された精神性疲労の誘発が観察されたことを報告している。また風間ら<sup>8)</sup>は、運動時に温熱負荷を加えて体温を上昇させながらストループ課題を行った結果、中程度の体温上昇時には実行機能が向上した一方、体温が過度に上昇した際には認知課題における反応時間が遅延したことを報告した。しかし、これらの課題で用いた反応時間や誤答率といった行動指標だけでは主観的な反応に依存しているため、被験者の技術やモチベーションに影響される可能性があり、さらに生理学的なエビデンスに欠けており、暑熱環境下における運動が認知機能に影響を及ぼすことを明確に示すことはできない。そのために、我々は客観的にヒト脳認知機能を評価するために、脳波事象関連電位 (Event-related potentials: ERPs) に着目した。

脳波事象関連電位とは、内的または外的な事象に関連して生じる脳の電位変動である。その最大の特徴は、非侵襲的であることに加えて、ミリ秒単位の時間分解能を有し、ヒトの知覚、認知、判断の過程を担う脳の神経活動を電位変動として記録できることである<sup>15)</sup>。また、脳波事象関連電位を記録する際に、Go/No-go課題を用いることによって、運動遂行過程、運動抑制過程に関わる神経活動を検討することができる。Go/No-go課題とは、Go刺激とNo-go刺激の2種類の刺激を50%:50%の割合で被験者にランダムに呈示し、Go刺激が呈示された時のみ素早く反応し、No-go刺激が呈示された時には反応しない、という課題である。Go刺激が呈示されて反応を実行した時には、運動遂行過程の脳活動、No-go刺激

が呈示されて反応しなかった時には、運動抑制過程の脳活動が記録される。Go/No-go課題で得られた事象関連電位について、No-go試行中に前頭部分の電極で、刺激呈示後約140～300msに陰性電位 (N2成分)、刺激呈示後約300～600msに陽性電位 (P3成分) がGo試行と比較して大きな振幅で記録されることが報告されている<sup>3)</sup>。この電位成分は「No-go電位」と呼ばれ、その信号源は前頭前野や前帯状回であり、抑制過程における脳活動を直接的に表していると考えられている<sup>2,14)</sup>。

これまでの先行研究においても、有酸素運動後に脳波事象関連電位を記録し、電位動態として潜時の短縮や振幅の増大が数多く報告されている<sup>1, 4, 7, 16, 18)</sup>。しかし、これらの研究では、運動強度や運動時間に着目したものがほとんどで、異なる温度環境下の運動後の効果については未だ検討されていない。本研究では以上の研究背景を踏まえ、脳波事象関連電位を用い、環境温度の違いによってヒト脳の認知機能、特に運動遂行過程・運動抑制過程が、どのような影響を受けるのかを明らかにすることを目的とした。

## 1. 方法

11名の男性被験者が実験に参加した。被験者の年齢、体組成、身長は $21.2 \pm 4.4$ 歳、 $72.6 \pm 9.8$  kg、 $171.3 \pm 4.4$  cmであった。神経生理学的あるいは精神的既往歴があるものはいなかった。実験開始前に、被験者に実験のプロトコールと危険性について説明し、その後インフォームドコンセントを得た。本研究は奈良女子大学倫理委員会によって承認されている。

### 1.1 実験手順

実験は環境制御室で実施し、室温は20℃または35℃に設定し、2つの条件 (20℃条件と35℃条件) を少なくとも3日あけて実施した。実験当

日、被験者には実験室に到着する2時間前までには軽食を摂取するように指示した。実験前に実験概要を説明した後、排尿後に裸体体重を測定し、Tシャツ、ショートパンツ、アンダーウェア、靴下を着用した。その後、室温が20℃または35℃の環境制御室に入室した。実験1日目に運動負荷を決定するため、短時間の運動強度確認テストを行った。運動負荷は室温20℃で中強度の運動負荷にするため、1回目の運動15分終了後に心拍数が130~140 bpmになるように設定した。心電図用電極を貼り付け、自転車エルゴメータに乗った状態で安静時の心拍数を確認後、1 kpmの負荷を60 rpmの回転速度で行った。確認テスト開始2分目から心拍数の上昇程度を確認しながら、負荷の重量を調節した。疲労の影響を考え、約5分以内に運動負荷重量を決定した。環境温度は被験者によりランダムになるように設定したため、1日目が35℃環境下の被験者は、確認テストの際、心拍数の上昇から実験者が運動負荷重量を経験的に推定して設定した。その後、皮膚温測定用熱電対を胸部、肩甲骨下部、腹部、背部、大腿、下腿部の6か所にそれぞれ貼り付けた。さらに外耳道温測定用プローブを左右いずれかの耳に、血圧測定用カフを右上腕部に装着した。

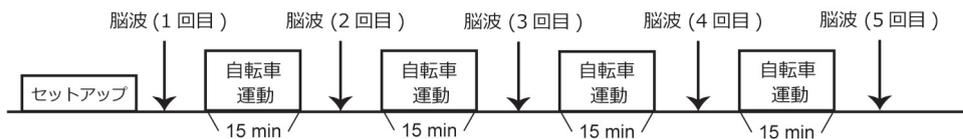
その後、脳波電極を貼り、Go/No-go 課題について説明し、約10試行の課題練習を行った。そ

して安静時の事象関連電位を測定した。測定終了後、自転車エルゴメータ移動前に血圧を測定し、運動前の血圧値とした。エルゴメータ移動後、自転車の回転速度が60 rpmになるよう、被験者はメトロノーム (BOSS社製, Dr. Beat DB-66) の音に合わせて運動するように指示された。15分間の運動終了直後に椅子へ戻り、血圧測定中に脳波電極の貼り付けを行い、血圧測定終了後に事象関連電位を測定した。全部で自転車運動を4セッション行い、各セッションの運動終了直後に事象関連電位を計測した (計5回測定)。実験終了後、実験開始前と同様の条件で再び体重を測定した。20℃条件および35℃条件は同じ手順で実験を実施した。しかし運動強度確認テストは1日目のみ行った (図1)。

## 1.2 体性感覚刺激 Go/No-go 課題

左手の第II、第V指にリング電極を通じて体性感覚刺激が呈示され、第II指をGo刺激、第V指をNo-go刺激とし、Go刺激が呈示された際にはできるだけ速く右手の第I指でボタン押しをするように指示した。Go刺激、No-go刺激の呈示確率は50%:50%、刺激時間間隔は2秒とし、Go刺激40試行、No-go刺激40試行、計80試行を1セッションとした。また計測中は、前方の約1mにある固視点を見るように指示した。

### (1) 20℃条件



### (2) 35℃条件



図1 実験プロトコール

### 1.3 脳波記録

自転車エルゴメータ横約 1.5 m 離れた位置に設置した Go/No-go 課題用の椅子に着座して安静にし、国際 10-20 法に従い、Fz, Cz, Pz, C3, C4 から Ag/AgCl 電極を用いて両耳朶を基準電極として記録し、抵抗値を 5k $\Omega$  以下とした。アース電極は Fpz とした。眼球運動によるノイズを除去するために、眼電図用電極を右眼窩上端上 2 cm と右眼外側端 2 cm に配置し、双極導出した。また脳波と眼電図が 100  $\mu$ V を超える試行は加算から除外した。脳波測定用の電極ペーストは水に溶けやすいため、運動による体温上昇や発汗によって電極が外れる可能性がある。そのため各セッションの前に毎回ペーストを付け直し、抵抗値を確認した後、記録を開始した。

### 1.4 データ収集と分析

測定項目は、脳波事象関連電位、反応時間、エラー率、外耳道温、皮膚温（胸部、肩甲骨下部、腹部、背部下部、大腿部、下腿部）、心拍数、および血圧である。外耳道温は連続測定型耳式体温計（ニプロ社製、ニプロ CE サーモ）を用いて左右いずれかの耳に装着した。

心電図計（NEC 社製、BIOMULTI1000）で心電図を計測し、外耳道温とともにデータロガーを介してパーソナルコンピュータに取り込み、安静時から実験終了まで連続測定した。血圧は自動血圧測定装置（COLIN 社製、STDP-780）を用いて右上腕部で測定した。心電図計からの心電図波形を自動血圧測定装置（COLIN 社製、STDP-780）に入力して、コロトコフ音から拡張期血圧（diastolic blood pressure: DBP）と収縮期血圧（systolic blood pressure: SBP）を測定した。血圧は、実験中に安静時および運動負荷前後で測定し、以下の式を用いて平均血圧（mean blood pressure: MBP）を算出した。

$$MBP = DBP + (SBP - DBP) / 3$$

皮膚温は、T型熱電対を用いて、皮膚温測定用アンプ（YOKOGAWA 社製、DA100）で安静時から実験終了まで連続測定し、パーソナルコンピュータに取り組んだ。平均皮膚温は以下の式より算出した<sup>17)</sup>。

$$\begin{aligned} \text{平均皮膚温} = & \text{胸部} \times 0.22 + \text{肩甲骨下部} \times 0.21 \\ & + \text{背部} \times 0.19 + \text{腹部} \times 0.14 \\ & + \text{大腿部} \times 0.14 + \text{下腿部} \times 0.10 \end{aligned}$$

脳波は日本光電社製脳波計（Neuropack MEB-2200）を用いて記録した。事象関連電位の記録期間は、刺激前 60ms から刺激後 540ms とし、刺激が呈示されるまでの 60 ms をベースライン区間として設定した。バンドパスフィルターは 0.1-50 Hz とし、サンプリング周波数は 1000 Hz とした。事象関連電位 N140 成分と P300 成分の最大振幅と潜時は、刺激後 110-210 ms と 250-500 ms でそれぞれ測定し、最大振幅は baseline-to-peak 法を用いて測定した。

外耳道温、平均皮膚温、心拍数は運動負荷前の安静時、および各運動終了直前の 1 分間のデータを利用した。収縮期血圧と拡張期血圧は運動負荷前の安静時、および各運動負荷前のデータを利用した。全てのデータは平均  $\pm$  標準偏差で表記した。外耳道温、平均皮膚温、心拍数、収縮期血圧、拡張期血圧、反応時間、エラー率のデータに関し、条件（20 $^{\circ}$ C vs. 35 $^{\circ}$ C）とセッション（第 1~第 5）を要因とした二元配置分散分析（analysis of variance: ANOVA）を用いて統計解析を行った。N140 および P300 の最大振幅と潜時に関しては、条件、セッション、刺激（Go 刺激 vs. No-go 刺激）、電極（Fz, Cz, Pz）を要因とした四元配置分散分析を行った。分散分析を行う際、Mauchly の球面性の仮定を検討し、仮定が有意な場合には Greenhouse-Geisser の補正を用いた。セッション

表1 生理指標の結果

	条件	1回目 (運動前)	2回目 (運動直後)	3回目 (運動直後)	4回目 (運動直後)	5回目 (運動直後)	ANOVA		
							条件 主効果	セッション 主効果	交互 作用
外耳道温(℃)	20℃	36.2(0.3)	36.6(0.2) <sup>***</sup>	36.6(0.2) <sup>***</sup>	36.7(0.1) <sup>***</sup>	36.7(0.2) <sup>**</sup>	p < 0.01	p < 0.001	p < 0.05
	35℃	36.4(0.2) <sup>#</sup>	36.8(0.3) <sup>##</sup>	37.0(0.3) <sup>###</sup>	37.2(0.3) <sup>###</sup>	37.3(0.2) <sup>#####</sup>			
平均皮膚温(℃)	20℃	34.1(0.5)	34.1(0.8)	34.2(1.1)	34.3(1.1)	34.3(1.1)	p < 0.001	n.s.	n.s.
	35℃	35.7(0.5) <sup>###</sup>	36.0(0.4) <sup>###</sup>	36.1(0.4) <sup>##</sup>	36.5(0.6) <sup>###</sup>	36.6(0.7) <sup>###</sup>			
心拍数(bpm)	20℃	76.6(9.6)	133.8(10.0) <sup>***</sup>	139.9(14.2) <sup>***</sup>	143.0(12.1) <sup>***</sup>	149.2(15.7) <sup>***</sup>	p < 0.001	p < 0.001	p < 0.001
	35℃	74.0(12.9)	150.6(16.2) <sup>####</sup>	161.7(17.7) <sup>####</sup>	170.3(15.5) <sup>#####</sup>	176.5(13.3) <sup>#####</sup>			
平均血圧(mmHg)	20℃	98.8(13.7)	98.7(11.7)	100.2(9.9)	99.5(8.8)	101.5(9.9)	n.s.	n.s.	n.s.
	35℃	95.7(8.8)	96.8(6.3)	96.5(5.0)	98.9(8.5)	98.5(13.7)			

( )は標準偏差, 20℃条件 vs. 35℃条件: <sup>#</sup> p < 0.05; <sup>##</sup> p < 0.01; <sup>###</sup> p < 0.001, 1回目 vs. 他セッション: <sup>\*</sup> p < 0.05; <sup>\*\*</sup> p < 0.01; <sup>\*\*\*</sup> p < 0.001

に関する有意な主効果が認められた時には, post-hoc テストとして the Student-Newman-Keuls テスト検定を用い, 条件間・セッション間の特定の違いを明らかにした. 統計分析は SPSS (Ver. 22) を使い, 統計的な有意差は p < 0.05 とした.

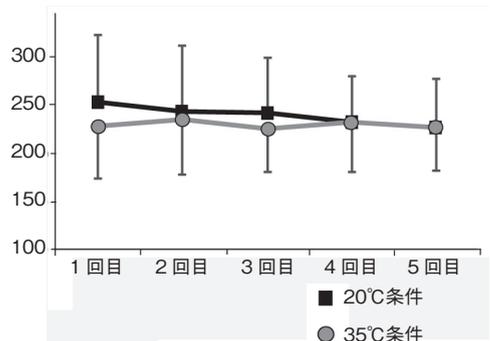
## 2. 結果

外耳道温は, 運動セッションを繰り返すごとに, 20℃条件, 35℃条件ともに上昇し, また運動実施前から5回目の計測に至るまでの上昇度に有意差が認められた(表1). 平均皮膚温は全てのセッションにおいて, 35℃条件の方が20℃条件よりも明らかに高かった. 心拍数は, 運動セッションを繰り返すごとに, 20℃条件, 35℃条件ともに増加し, また運動実施前を除き, 5回目の計測に至るまでの増加度に有意差が認められた. 平均血圧に関しては, 条件, セッションの主効果, 条件-セッションの交互作用は認められなかった.

行動指標に関し, 反応時間ならびエラー率に関して, 条件, セッションの主効果, 条件-セッションの交互作用は認められなかった(図2).

図3は全被験者の第4セッションの事象関連電位平均波形を示している. N140とP300は全ての被験者から全セッションにおいて潜時と振幅を計測した. N140の最大振幅に関する分散分析の結果, セッション, 刺激, 電極の主効果 (F(4, 40) = 6.442, p < 0.001; F(1, 10) = 31.709, p <

(A) 反応時間



(B) エラー率

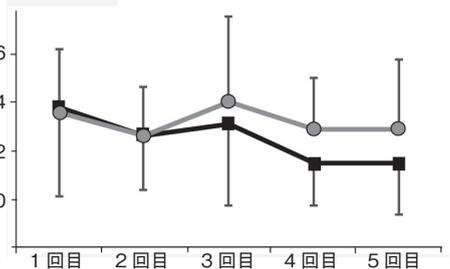


図2 行動指標の結果

0.001; Greenhouse-Geisser 補正 F(1.321, 13.214) = 22.455, p < 0.001,  $\epsilon = 0.661$ ) が認められた. またセッション-電極, 条件-刺激-電極の交互作用 (F(8, 80) = 2.769, p < 0.01; F(2, 20) = 6.043, p < 0.01) が認められた. セッションの差に関し, post-hoc テストを行った結果, 20℃条件では Go 刺激時の Cz, No-go 刺激時の Fz, Cz, Pz において, 第5セッションの方が第1セッションよりも有意に振幅が低下した(それぞれ p < 0.05). また No-go 刺激時の Cz において, 第4セッション

の方が第1セッションよりも有意に振幅が低下した ( $p < 0.05$ ). 35°C 条件では No-go 刺激時の Cz において, 第3, 4, 5セッションの方が第1セッションよりも有意に振幅が低下した (それぞれ  $p < 0.01, p < 0.05, p < 0.05$ ). また, No-go 刺激時の Pz において, 第2, 3, 5セッションの方が第1セッションよりも有意に振幅が低下した (それぞれ  $p < 0.05, p < 0.001, p < 0.05$ ).

N140 の潜時に関する分散分析では, 電極の主効果 (Greenhouse-Geisser 補正  $F(1.333, 13.334) = 11.288, p < 0.01, \epsilon = 0.667$ ) が認められた.

P300 の最大振幅に関する分散分析の結果, 条件ならびに電極の主効果 ( $F(1, 10) = 5.905, p < 0.05; F(2, 20) = 31.063, p < 0.001$ ) が認められた. また刺激—電極の交互作用 ( $F(2, 20) = 20.503, p < 0.001$ ) が認められた. 条件の差に関し, Post-hoc テストを行った結果, 第3セッションの Go 刺激時の電極 Pz において, 第4セッションの Go 刺激時の電極 Pz において, 第4セッションの No-go 刺激時の電極 Fz において, 第4セッションの No-go 刺激時の電極 Cz において, 35°C 条件の方が20°C 条件よりも有意に振幅が低下した (それぞれ  $p < 0.05$ ).

P300 の潜時に関する分散分析では, 電極の主

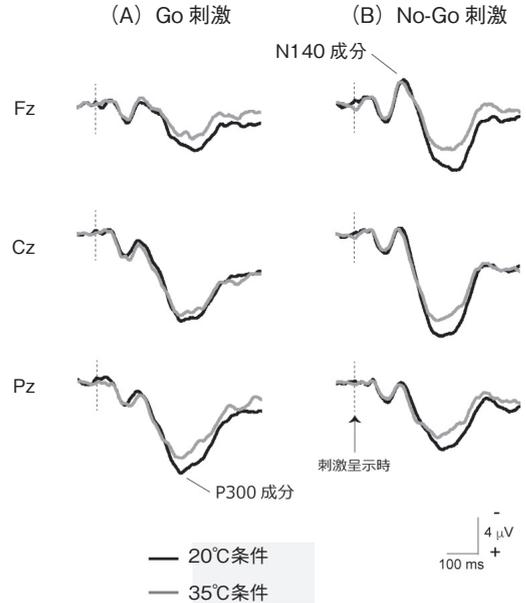


図3 全被験者の事象関連電位平均波形(第4セッション)

効果 ( $F(2, 20) = 15.379, p < 0.001$ ) が認められた. また刺激—電極の交互作用 ( $F(2, 20) = 5.209, p < 0.05$ ) が認められた.

### 3. 考察

本研究では異なる環境温度における自転車エルゴメータ運動が, 運動遂行過程・運動抑制過程に関わる認知機能に及ぼす影響を明らかにすること

表2 各条件, 各刺激における N140 成分の平均振幅

( $\mu V$ )	Go 刺激			No-go 刺激		
	Fz	Cz	Pz	Fz	Cz	Pz
< 1 回目 >						
20°C 条件	-1.2 (2.6)	-1.0 (2.9)	0.2 (2.5)	-5.8 (2.1)	-4.6 (3.0)	-2.6 (2.9)
35°C 条件	-2.4 (3.3)	-0.4 (3.6)	-0.2 (2.7)	-5.8 (2.9)	-5.0 (3.3)	-3.1 (2.4)
< 2 回目 >						
20°C 条件	-1.7 (2.2)	-1.5 (2.5)	-0.3 (3.0)	-4.8 (2.2)	-3.4 (2.2)	-1.6 (2.2)
35°C 条件	-2.7 (2.8)	-0.7 (4.6)	0.0 (4.4)	-5.0 (4.5)	-3.6 (3.1)	-1.3 (3.8) *
< 3 回目 >						
20°C 条件	-2.2 (2.2)	-0.7 (2.6)	1.1 (2.6)	-5.2 (2.9)	-3.5 (2.3)	-1.6 (2.1)
35°C 条件	-2.6 (2.7)	0.1 (3.3)	0.5 (4.1)	-4.8 (2.7)	-2.3 (2.6) **	-1.0 (2.3) ***
< 4 回目 >						
20°C 条件	-1.8 (2.9)	-0.6 (3.1)	-0.3 (2.5)	-4.8 (2.1)	-2.2 (1.9) *	-0.9 (2.3)
35°C 条件	-2.9 (1.8)	0.3 (3.3)	0.8 (2.9)	-5.2 (2.9)	-2.8 (1.9) *	-1.3 (2.1)
< 5 回目 >						
20°C 条件	-1.6 (1.6)	0.3 (2.2) *	0.7 (2.8) *	-3.9 (1.3) *	-1.2 (1.6) *	-0.5 (1.7)
35°C 条件	-1.9 (2.4)	0.8 (2.7)	1.1 (3.0)	-4.3 (2.4)	-1.2 (3.4) *	-0.3 (3.5) *

( ) は標準偏差, 1 回目 vs. 他セッション : \*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; \*\*\*  $p < 0.001$

表3 各条件, 各刺激における N140 成分の平均潜時

(ms)	Go 刺激			No-go 刺激		
	Fz	Cz	Pz	Fz	Cz	Pz
< 1 回目 >						
20℃ 条件	154 (15)	148 (16)	149 (16)	161 (14)	147 (17)	149 (13)
35℃ 条件	161 (18)	149 (15)	149 (14)	155 (10)	144 (9)	149 (14)
< 2 回目 >						
20℃ 条件	160 (25)	147 (20)	149 (18)	159 (15)	145 (12)	150 (18)
35℃ 条件	154 (21)	148 (14)	148 (14)	160 (19)	146 (13)	145 (12)
< 3 回目 >						
20℃ 条件	166 (23)	159 (28)	150 (17)	167 (16)	151 (20)	140 (14)
35℃ 条件	156 (20)	141 (11)	138 (13)	154 (22)	141 (14)	143 (16)
< 4 回目 >						
20℃ 条件	154 (21)	145 (20)	146 (17)	157 (13)	149 (19)	150 (17)
35℃ 条件	158 (27)	140 (15)	143 (8)	153 (17)	141 (15)	145 (17)
< 5 回目 >						
20℃ 条件	153 (26)	148 (26)	142 (18)	159 (19)	140 (15)	144 (11)
35℃ 条件	124 (20)	140 (14)	136 (11)	159 (18)	138 (12)	148 (14)

( ) は標準偏差

表4 各条件, 各刺激における P300 成分の平均振幅

(μV)	Go 刺激			No-go 刺激		
	Fz	Cz	Pz	Fz	Cz	Pz
< 1 回目 >						
20℃ 条件	10.3 (3.6)	16.4 (7.8)	15.6 (6.0)	15.4 (7.3)	20.8 (9.0)	13.2 (6.2)
35℃ 条件	9.6 (5.1)	16.0 (8.1)	14.6 (6.6)	14.7 (6.6)	19.6 (7.4)	13.3 (5.3)
< 2 回目 >						
20℃ 条件	9.3 (3.9)	16.2 (6.8)	15.2 (5.6)	13.9 (4.9)	20.1 (6.3)	13.8 (2.8)
35℃ 条件	9.5 (4.3)	15.5 (9.2)	14.9 (7.5)	13.3 (5.6)	19.4 (8.1)	14.1 (5.4)
< 3 回目 >						
20℃ 条件	10.3 (5.0)	15.4 (8.0)	16.6 (6.3)	12.6 (8.9)	17.9 (6.5)	12.6 (5.5)
35℃ 条件	7.8 (3.0)	14.7 (5.8)	13.0 (5.9) #	12.4 (6.7)	18.9 (7.1)	12.8 (4.2)
< 4 回目 >						
20℃ 条件	8.8 (5.2)	16.3 (8.6)	15.4 (6.6)	14.0 (6.1)	20.0 (8.1)	13.2 (5.7)
35℃ 条件	7.8 (5.3)	15.8 (9.0)	13.3 (6.4) #	10.5 (6.9) #	17.1 (8.9) #	11.1 (6.3)
< 5 回目 >						
20℃ 条件	9.7 (2.6)	17.1 (7.1)	15.5 (5.8)	12.4 (5.7)	18.9 (7.5)	12.7 (4.6)
35℃ 条件	7.7 (4.3)	14.6 (7.0)	13.8 (5.8)	10.8 (5.2)	16.9 (7.2)	11.8 (5.2)

( ) は標準偏差, 20℃ 条件 vs. 35℃ 条件: # p < 0.05

表5 各条件, 各刺激における P300 成分の平均潜時

(ms)	Go 刺激			No-go 刺激		
	Fz	Cz	Pz	Fz	Cz	Pz
< 1 回目 >						
20℃ 条件	332 (22)	326 (38)	303 (31)	327 (29)	310 (35)	305 (36)
35℃ 条件	325 (36)	324 (58)	305 (41)	315 (37)	293 (32)	290 (20)
< 2 回目 >						
20℃ 条件	332 (28)	323 (33)	295 (37)	330 (33)	305 (39)	302 (41)
35℃ 条件	317 (42)	311 (43)	300 (38)	294 (36)	281 (34)	293 (33)
< 3 回目 >						
20℃ 条件	329 (32)	320 (41)	289 (25)	329 (35)	297 (39)	294 (30)
35℃ 条件	326 (48)	306 (47)	293 (40)	310 (46)	292 (43)	297 (43)
< 4 回目 >						
20℃ 条件	332 (48)	332 (43)	302 (24)	324 (39)	304 (42)	290 (34)
35℃ 条件	311 (59)	319 (58)	291 (40)	301 (34)	283 (39)	300 (56)
< 5 回目 >						
20℃ 条件	316 (48)	309 (49)	297 (40)	328 (40)	295 (38)	308 (38)
35℃ 条件	319 (46)	303 (37)	303 (31)	292 (38)	280 (25)	291 (35)

( ) は標準偏差

を目的とした。行動指標として、反応時間とエラー率、脳内情報処理過程の指標とされる事象関連電位の構成成分である体性感覚 N140 成分と P300 成分に着目し、認知機能評価を行った。

N140 成分は、刺激に対する準備状態を反映する内因性成分と、単に刺激が脳に入力されたために自動的に起こった外因性成分とを合わせ持った成分である。N140 の主たる発生源は二次体性感覚野、島皮質、帯状回であると考えられている<sup>6, 9)</sup>。Go/No-go 課題を行った場合、No-go 刺激時には運動抑制過程に関係した前頭前野の神経活動も重畳するが、Go 刺激時には前頭前野の活動は認められない<sup>12)</sup>。本実験の結果、N140 成分の振幅に関し、セッションの主効果が認められ、運動の繰り返しによって徐々に振幅が低下していることが示された(表 2)。さらに、その低下は 35℃ 条件の No-go 刺激時において、顕著であった。我々の先行研究において、課題の繰り返し効果によって、N140 成分の振幅が低下していることを報告している<sup>13)</sup>。しかし、この場合の振幅の低下は、Go 刺激、No-go 刺激ともに見られており、本研究の結果のように特に 35℃ 条件の No-go 刺激の際に顕著であることは、異なるメカニズムによって振幅が低下したものと考えられる。つまり、高温環境下において運動を行なった場合、特に運動抑制に関わる神経活動が影響を受けやすい、と考えられる。Akatsuka ら<sup>1)</sup>の先行研究では、本実験の同様の体性感覚刺激 Go/No-go 課題を行い、最大酸素摂取量 50% の強度でトレッドミルランニング 20 分間の前後で N140 成分の電位動態を検討している。実験の結果、ランニング直後に N140 成分の振幅増大が認められている。この結果は本結果とは対照的な結果であるが、その理由として運動強度、運動方法の設定の問題や、体温上昇の要因が考えられる。本実験では、1 回目の自転車エルゴメータ運動直後には、心拍数が 20℃ 条件では平均 134 bpm、35℃ 条件では平均

151 bpm であったことから、Akatsuka らが設定した運動強度よりも高いと思われる。また高強度の自転車エルゴメータ運動直後では脳波事象関連電位の P300 成分の振幅が低下することから<sup>7)</sup>、本研究での振幅低下は、高温環境下における高負荷運動によるものであると考えられる。

P300 成分は情報処理過程において刺激の認知を反映する内因性成分と考えられ、刺激の評価および文脈更新を反映するとされている。本実験の結果、第 3 セッション、第 4 セッションにおいて、35℃ 条件の方が 20℃ 条件よりも有意に振幅が低下した(表 4)。よって、高温環境下における運動では、運動遂行ならびに運動抑制の認知処理に関わる神経活動が影響を受けることが示された。機能的磁気共鳴画像法 (functional magnetic resonance imaging: fMRI) を用い、運動遂行過程、運動抑制過程に関係する脳活動部位を明らかにした我々の先行研究では、運動遂行過程には背外側前頭前野、腹外側前頭前野、補足運動野、後頭頂葉、下頭頂小葉、島皮質、上側頭回に活動が見られ<sup>10)</sup>、運動抑制過程には背外側前頭前野、腹外側前頭前野、前補足運動野、下頭頂小葉、島皮質、側頭頭頂連合部、前帯状回といった部位が活動することがわかった<sup>11)</sup>。脳波事象関連電位を用いた本研究では、P300 成分の振幅が低下したことは明らかにしたが、脳波では脳のどの部位の神経活動が関係し、振幅低下を引き起こしているのかは明らかにすることができない。よって、責任部位の同定については、今後の検討課題である。また最近の Olson ら<sup>16)</sup>の研究では、自転車エルゴメータ運動の開始 5 分後では P300 成分の振幅が増大し、開始 15 分後、開始 25 分後では徐々に振幅が低下している。Grego ら<sup>4)</sup>は 12 名の自転車競技選手を対象とし、3 時間の自転車エルゴメータ運動の合間に P300 成分を測定している。統計的に有意ではなかったものの、Grego らのデータにおいても、運動時間の後半から、徐々に P300

の振幅が低下している。Olson らや Grego らの実験では体温を測定しておらず、中枢性疲労や覚醒による影響である、と考察している。しかし、本実験のデータを考慮すると、運動に伴う体温上昇も P300 振幅低下の要因の 1 つであると推察される。

事象関連電位とは対照的に、行動指標の反応時間ならびエラー率には運動の繰り返しおよび環境温度の違いによる影響は見られなかった (図 2)。これは事象関連電位として検出される神経活動と、実際の行動指標として記録されるものが必ずしも一致していないためである、と考えられる。つまり、反応時間やエラー率は反応実行系、N140 成分や P300 成分は認知処理系を反映しており<sup>15)</sup>、高温環境下における運動では、反応実行系は影響を受けないが、認知処理系では影響を受けると考えられる。Olson ら<sup>16)</sup>のデータにおいても、運動の繰り返しにより反応時間が徐々に速くなっているが、反対に P300 の振幅は徐々に低下している。彼らのデータからも反応実行系と認知処理系が必ずしも一致しないことが示されている。

## 謝 辞

本研究に対して助成を賜りました公益財団法人 石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深く感謝致します。また、被験者としてご協力いただきました天理大学の皆様、計測にご協力を頂きました山科友理恵さん、今泉琴絵さん、野口朝子さん、金丸櫻子さん、野間あゆみさんに深く感謝致します。

## 文 献

1) Akatsuka K., Yamashiro K., Nakazawa S., Mitsuzono R., Maruyama A., Acute aerobic exercise influences the inhibitory process in the go/no-go task in humans. *Neurosci. Lett.*, 600: 80-84 (2015)

- 2) Bokura H., Yamaguchi S., Kobayashi S., Electrophysiological correlates for response inhibition in a Go/Nogo task. *Clin. Neurophysiol.*, 112: 2224-2232 (2001)
- 3) Falkenstein M., Hoormann J., Hohnsbein J., ERP components in Go/Nogo tasks and their relation to inhibition. *Acta Psychologica.*, 101: 267-291 (1999)
- 4) Grego F., Vallier J.M., Collardeau M., Bermon S., Ferrari P., Candito M., Bayer P., Magnié M.N., Brisswalter J., Effects of long duration exercise on cognitive function, blood glucose, and counterregulatory hormones in male cyclists. *Neurosci. Lett.*, 364: 76-80 (2004)
- 5) Grego F., Vallier J.M., Collardeau M., Rousseau C., Cremieux J., Brisswalter J., Influence of exercise duration and hydration status on cognitive function during prolonged cycling exercise. *Int. J. Sports Med.*, 26: 27-33 (2005)
- 6) Inui K., Tran T.D., Qiu Y., Wang X., Hoshiyama M., Kakigi R., A comparative magnetoencephalographic study of cortical activations evoked by noxious and innocuous somatosensory stimulations. *Neuroscience*, 120: 235-248 (2003)
- 7) Kamiyo K., Nishihira Y., Hatta A., Kaneda T., Wasaka T., Kida T., Kuroiwa K., Differential influences of exercise intensity on information processing in the central nervous system. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 92: 305-311 (2004)
- 8) 風間彬, 高津理美, 長谷川博. 体温上昇が持久的運動時における認知機能に及ぼす影響. *体力科学*, 61: 459-467 (2012)
- 9) Kida T., Wasaka T., Inui K., Akatsuka K., Nakata H., Kakigi R., Centrifugal regulation of human cortical responses to a task-relevant somatosensory signal triggering voluntary movement. *NeuroImage*, 32: 1355-1364 (2006)
- 10) Nakata H., Sakamoto K., Ferretti A., Perrucci G.M., Del Gratta C., Kakigi R., Romani G.L., Executive functions with different motor outputs in somatosensory Go/Nogo tasks: an event-related functional MRI study. *Brain Res. Bull.*, 77: 197-205 (2008)
- 11) Nakata H., Sakamoto K., Ferretti A., Perrucci G.M., Del Gratta C., Kakigi R., Romani G.L., Somato-motor inhibitory processing in humans: An event-related functional MRI study. *NeuroImage*, 39, 1858-1866 (2008)

- 12) Nakata H., Sakamoto K., Honda Y., Kakigi R., Temporal dynamics of neural activity in motor execution and inhibition processing. *Eur. J. Neurosci.*, **41**: 1448-1458 (2015)
- 13) Nakata H., Sakamoto K., Kakigi R., Effects of task repetition on event-related potentials in somatosensory Go/No-go paradigm. *Neurosci. Lett.*, **594**: 82-86 (2015)
- 14) Nieuwenhuis S., Yeung N., van den Wildenberg W., Ridderinkhof K.R., Electrophysiological correlates of anterior cingulate function in a go/no-go task: effects of response conflict and trial type frequency. *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.*, **3**: 17-26 (2003)
- 15) 丹羽真一, 鶴紀子, 事象関連電位 – 事象関連電位と神経情報科学の発展 – 新興医学出版社 (1997)
- 16) Olson R.L., Chang Y.K., Brush C.J., Kwok A.N., Gordon V.X., Alderman B.L., Neurophysiological and behavioral correlates of cognitive control during low and moderate intensity exercise. *NeuroImage*, **131**: 171-80 (2016)
- 17) Taylor W.F., Johnson J.M., Kosiba W.A., Kwan C.M., Cutaneous vascular responses to isometric handgrip exercise. *J. Appl. Physiol.* (1985) **66**: 1586-92 (1989)
- 18) Yagi Y., Coburn K.L., Estes K.M., Arruda J.E., Effects of aerobic exercise and gender on visual and auditory P300, reaction time, and accuracy. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, **80**: 402-8 (1999)