

暑熱環境下の運動による脱水が 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) 和歌山県立医科大学	上 條 義一郎
京都府立医科大学大学院	伊 藤 倫 之
奈良女子大学	大 高 千 明
同	芝 崎 学

Effects of Aerobic Exercise Under Dehydrate Conditions on Human Cognitive Functions

by

Hiroki Nakata, Chiaki Ohtaka, Manabu Shibasaki

*Department of Health Sciences, Faculty of Human Life and Environment,
Nara Women's University*

Yoshi-ichiro Kamijo

*Department of Rehabilitation Medicine,
Wakayama Medical University*

Tomoyuki Ito

*Department of Rehabilitation Medicine,
Kyoto Prefectural University of Medicine*

ABSTRACT

In the present study, we investigated the effects of aerobic exercise under dehydrated and euhydrated conditions on human cognitive processing. Fifteen healthy males performed 4×15 -min bouts of cycling exercise, and event-related potentials (ERPs)

were recorded in three sessions during somatosensory Go/No-go paradigms (Pre- and Post exercise and Recovery). As thermoregulatory and hemodynamic variables and blood tests, the esophageal temperature, mean skin temperature, heart rate, mean arterial blood pressure, plasma osmolality, hematocrit, and hemoglobin were recorded. The reaction time was earlier at Post than Pre under dehydrated and euhydrated conditions. The peak amplitude of the N140 component, which was mainly related to somatosensory processing, was significantly reduced at Post and Recovery than at Pre under dehydrated conditions, but not under euhydrated conditions. The peak amplitude of the P300 component, which was linked to the cognitive processes of context updating, context closure, and event-categorization, was not affected by aerobic exercise under dehydrated or euhydrated conditions. These results suggest that aerobic exercise under dehydrated conditions affects neural activity for somatosensory processing, while the executive function, which was based on reaction times and error rates, and higher cognitive processing reflected by P300 would not be affected by aerobic exercise under dehydrated or euhydrated conditions.

要 旨

本研究では脳波事象関連電位を用い、暑熱環境下で自転車エルゴメータによる有酸素運動を行い、脱水・飲水が運動遂行過程・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を目的とした。実験には15名の成人男性被験者が参加した。脱水条件および飲水条件において、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 (Pre)、15 分間 × 4 セットの運動セッション後 (Post)、1 時間の冷却後 (Recovery) に事象関連電位を計測した。生理指標・血液データとして、食道温、平均皮膚温、心拍数、平均血圧、血漿浸透圧、ヘマトクリット値、ヘモグロビン濃度を解析対象とした。実験の結果、行動指標の反応時間に関し、脱水条件・飲水条件ともに Pre よりも Post の方が有意に短くなった。体性感覚認知処理過程を反映する N140 成分の振幅は、脱水条件では Pre よりも Post, Recovery において振幅が有意に低下したが、飲水条件で

はそのような差は認められなかった。高次認知機能に関与する P300 成分の振幅は、脱水条件ならびに飲水条件においても、条件やセッションの主効果・交互作用が認められず、Pre, Post, Recovery 間でも振幅に有意差は認められなかった。これらの結果から、飲水の効果は体性感覚認知処理過程に関わる神経活動に見られ、反応時間などで示される反応実行系や、P300 成分として反映される認知処理系には関与しない可能性が示唆された。

緒 言

暑熱環境下における運動パフォーマンスの低下は、活動筋における末梢性疲労のみが原因ではなく、脳の中枢性疲労にも起因することが報告されている。近年、我々の研究グループは脳波事象関連電位 (Event-related potential: ERP) を用い、暑熱負荷が集中力や判断力といった高次認知機能に及ぼす影響を検討している^{9, 10)}。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

の電位変動のことであり、その最大の特徴は非侵襲的かつ、ミリ秒単位の高い時間分解能を有し、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⁷⁾。我々は事象関連電位の P300 成分に着目し、高体温時に振幅が低下したことを明らかにした⁹⁾。身体内部の体温上昇がある程度（～1.2℃）を越えると高次認知にも影響することを明らかにした。暑熱環境下では中枢性疲労により判断力が低下することから、より安全にスポーツや運動を実施するためには、中枢性疲労を起こさせない対策が必要である。特に 2020 年の真夏に開催される東京オリンピック・パラリンピックに向けて、夏場のスポーツ現場における熱中症対策は喫緊の課題であり、スポーツ科学にとって学術的に非常に大きな意味を持つ。

暑熱環境下で運動を行うと、体温が上昇しやすく発汗が促進されるため、適切な冷却や適切な飲水などの行動が必要となる。我々は、上述の暑熱負荷時に認知機能が低下することを明らかにし、次の研究において冷却に着目し、暑熱負荷後に顔・頭部冷却を行い、事象関連電位 P300 成分の電位動態を検討した。しかし、顔・頭部冷却によって快適感を得ることはできたが、P300 成分の振幅は回復しなかった。つまり、認知機能の低下は回復せず、全身冷却など積極的に体温を下げる方がより効果的であることと考えられた¹⁰⁾。さらに実際のスポーツ現場を想定した場合、受動的な暑熱負荷ではなく、暑熱環境下での運動実験を行う必要がある。運動実験を行った我々の先行研究では、20℃と 35℃の暑熱環境下で同じ運動負荷強度で自転車エルゴメータを使った有酸素運動を行い、事象関連電位を計測した⁶⁾。実験の結果、35℃の暑熱環境下での運動の方が 20℃の環境下での運動よりも P300 成分の振幅が低下することが示された。

本研究では飲水行動に注目し、脱水と飲水の影

響に着目する。また実際の夏場の暑熱環境下での運動を想定し、さらに運動能力の低下が示唆される体重の約 2% を超える程度の脱水を想定し、暑熱環境下での運動時におけるヒト高次認知機能について検討する。認知機能を客観的に評価するために、本研究では我々の先行研究と同様の事象関連電位を計測する。

1. 方 法

15 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 ± 1 歳、 67.8 ± 9.9 kg、 174.3 ± 5.0 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研究倫理審査委員会によって承認されている。(16-45 号)

1. 1 実験手順

被験者には本実験の運動強度を決定するために、まず最大酸素摂取量の測定を行った。測定には本実験で使用する自転車エルゴメータ (HEALTH GUARD active 10 II, 竹井機器工業株式会社製) を使用し、メトロノームを用いて 60rpm の回転速度を維持するように指示した。最大酸素摂取量の測定には、呼気ガス分析装置 (Arco-2000, アルコシステム社製) を用いた。まずウォーミングアップとして 50W の運動を 1 分間してもらい、2 分間の休憩を挟んで本計測を 75W から始めた。3 分ごとに運動強度を 50W ずつ上げ、175W 以降は 1 分ごとに 25W ずつ負荷を上げ、心拍数が 200bpm 以上、もしくは 1 分間に 60rpm の運動が保てなくなった時点をその被験者の最大運動強度とした。

実験は環境制御室で室温を 35℃に設定し、2 つの条件 (脱水条件と飲水条件) 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、被験者は入室直前に食道温プローブを鼻腔から身長約4分の1挿入した。その後、Tシャツ、ショートパンツ、アンダーウェア、靴下を着用し、室温が35℃の環境制御室に入室した。心電図用電極、皮膚温測定用熱電対（胸部、肩甲骨下部、腹部、背部、大腿、下腿部の6か所）をそれぞれ貼り付け、医師により左肘正中皮静脈にカテーテルを留置した。全ての測定装置を装着後、再度体重を測定し、自転車後方に設置したリクライニングシートで安静を保持した。血圧測定用カフを右上腕部に装着し、環境制御室に入室から30分後に採血した。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（Pre）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、自転車の回転速度は60rpm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。運動強度は最大酸素摂取量の55%とした。15分間の運動終了後に体重を測定し、座位にて採血を行った。運動は4セット実施し、合計1時間の自転車運動とした。各セット運動間のインターバルは10分間とし、その間に体重を測定した。なお、飲水条件では、被験者

には1セット目の運動前と4セット目運動終了後の体重が変わらないように、運動中に自発的に飲水するように指示した。

運動終了後に椅子に座り、運動後（Post）の事象関連電位を測定した。また、暑熱環境下で運動すると体温および心拍数が上昇するが、その程度は飲水の有無によって異なることが予測されたため、運動後の事象関連電位を測定後に25℃の水を還流させた水循環服を着用し、安静状態で体温が運動前と同程度になるまで最大1時間冷却した。また、運動終了後1時間後の時点で採血を行った。冷却後体温が低下したことを確認した後、事象関連電位を測定した（Recovery）。その後、採尿、体重を測定し実験を終了とした（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にある固子点を見るように指示した。

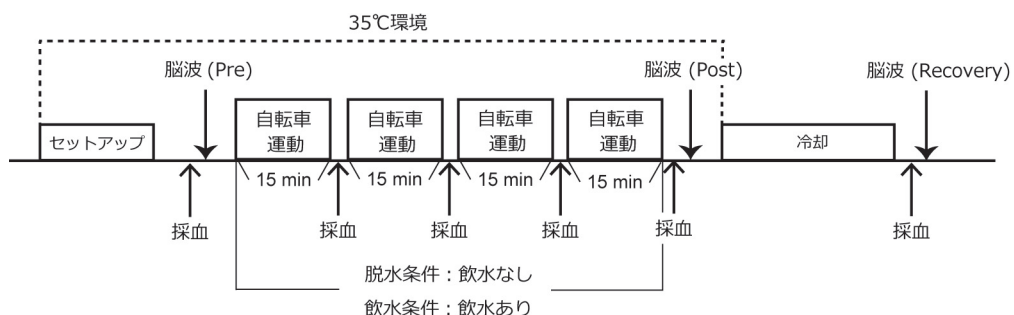


図1 実験プロトコル

1. 3 脳波記録

自転車エルゴメータ横約 1.5m 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 Ω 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 2cm と右眼外側端 2cm に配置し、双極導出した。また脳波と眼電図が 100 μ V を超える試行は加算から除外した。

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、食道温、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、血圧、血漿浸透圧、ヘマトクリット値、ヘモグロビン濃度である。心電図計（NEC 社製、BIOMULTI1000）で心電図を計測し、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、安静時から運動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、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¹²⁾。

平均皮膚温

$$= \text{胸部} \times 0.22 + \text{肩甲骨下部} \times 0.21 + \text{背部} \times 0.19 \\ + \text{腹部} \times 0.14 + \text{大腿部} \times 0.14 + \text{下腿部} \times 0.10$$

血漿浸透圧は、室温で 8,000rpm で 5 分遠心分離（himac CR5DL）をした血液の血漿と、尿を浸透圧計（GONOTEC 社製、OSMOMAT030 CRYOSCOPIC OSMOMETER）で測定した。ヘマトクリット値に関し、採血した血液をヘマトクリット毛細管に移し、ヘマトクリット遠心分離機（KUBOTA 社製、3110）で 12,000rpm で 5 分間遠心した後、測定板を用いて測定した。ヘモグロビン濃度は和光純薬工業株式会社ヘモグロビン B-テストワコーを用いて測定した。その際、紫外可視分光光度計（Thermo GENESYS IOS UV-VIS）を使用した。

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 60ms 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 0.1-50Hz とし、サンプリング周波数は 1000Hz 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 110-210ms と 250-500ms 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。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 $\pm$ 標準誤差で表記した。食道温、平均皮膚温、心拍数、平均血圧のデータに関し、条件（脱水 vs. 飲水）とセッション（運動前、運動 1 回目終了後～運動 4 回目終了後）を要因とした二元配置分散分析（Analyses of variance: ANOVA）を用いて統計解析を行った。

表1 生理指標の結果

	条件	Pre(運動前)	運動1回目 終了後	運動2回目 終了後	運動3回目 終了後	運動4回目 終了後	条件主効果	セッション 主効果	交互作用
食道温(℃)	脱水	36.5(0.1)	37.3(0.1)***	37.6(0.1)***	37.7(0.1)***	37.9(0.2)***	n.s.	p < 0.001	n.s.
	飲水	36.5(0.1)	37.3(0.1)***	37.4(0.1)***	37.4(0.1)***	37.7(0.1)***			
平均皮膚温(℃)	脱水	35.5(0.1)	35.9(0.1)**	35.7(0.1)	35.8(0.1)	35.8(0.2)	n.s.	p < 0.01	n.s.
	飲水	35.4(0.1)	35.8(0.1)*	35.5(0.2)	35.5(0.2)	35.4(0.1)			
心拍数(bpm)	脱水	69.7(2.8)	151.2(3.3)***	161.3(3.0)***	167.9(2.6)***	173.0(2.7)***	n.s.	p < 0.001	p < 0.001
	飲水	71.5(2.4)	155.3(2.6)***	161.6(2.2)***	163.0(2.5)***	168.1(2.3)***			
平均血圧(mmHg)	脱水	91.8(6.3)	114.4(8.5)***	112.7(8.3)***	106.5(7.5)***	105.4(7.6)***	n.s.	p < 0.001	n.s.
	飲水	94.3(6.8)	111.9(7.8)***	105.5(7.3)***	108.4(8.3)***	106.2(7.4)***			

()は標準誤差

Pre vs. 他セッション: * p < 0.05; ** p < 0.01; *** p < 0.001

血液検査データ（血漿浸透圧、ヘマトクリット値、ヘモグロビン濃度）については、条件とセッション（運動前、運動1回目終了後～運動4回目終了後、冷却1時間後）を要因とした二元配置分散分析を用いた。反応時間、エラー率のデータに関し、条件とセッション（Pre, Post, Recovery）を要因とした二元配置分散分析を行った。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, C3, C4）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Bonferroni法を用い、条件・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

食道温は、運動セッションを繰り返すごとに、脱水条件、飲水条件ともに上昇し、また運動実施前から運動終了時に至るまでの上昇度に有意差が認められた（表1）。平均皮膚温は運動1回目の終了時点で、運動実施前より有意に高かった。心拍数は運動セッションを繰り返すごとに、脱水条件、飲水条件ともに増加した。平均血圧に関しても、運動セッションの主効果が認められた。

血液検査の結果、血漿浸透圧は脱水条件において運動1回目の終了から冷却時まで、Preと比較し有意に上昇していたが、飲水条件では有意な上昇は見られなかった。また運動4回目終了時点で脱水条件の方が飲水条件よりも有意に高い値を示した（p < 0.01）。ヘマトクリット値とヘモグロビン濃度は、脱水条件・飲水条件ともに運動1回目の終了から4回目の終了までPreと比較し有意に上昇していた。体重減少率は脱水条件においては $1.71 \pm 0.24\%$ 、飲水条件においては $0.05 \pm 0.32\%$

表2 血液検査データの結果

	条件	Pre(運動前)	運動1回目 終了後	運動2回目 終了後	運動3回目 終了後	運動4回目 終了後(Post)	冷却 1時間後	条件 主効果	セッション 主効果	交互作用
血漿浸透圧 (mOsm/L)	脱水	286.9(1.2)	290.1(1.5)*	291.3(1.3)***	293.0(1.5)***	295.3(1.6)***	292.3(1.6)***	n.s.	p < 0.01	p < 0.001
	飲水	289.7(1.1)	291.5(1.0)	290.1(1.4)	288.7(1.5)	288.9(1.6)##	289.7(1.8)			
ヘマトクリット値 (%)	脱水	46.5(0.8)	48.5(0.9)***	49.0(0.8)***	48.9(0.8)***	48.6(0.9)***	46.4(0.9)	n.s.	p < 0.001	n.s.
	飲水	47.2(0.7)	49.4(0.7)***	49.4(0.7)***	49.2(0.6)***	49.2(0.7)***	47.0(0.6)			
ヘモグロビン濃度 (g/dL)	脱水	16.5(0.6)	17.7(0.5)***	17.9(0.5)***	18.0(0.4)***	18.1(0.4)***	17.1(0.5)	n.s.	p < 0.001	n.s.
	飲水	16.8(0.4)	17.7(0.4)***	17.7(0.4)***	17.7(0.4)***	17.7(0.4)***	16.9(0.4)			

()は標準誤差

Pre vs. 他セッション: * p < 0.05; ** p < 0.01; *** p < 0.001

条件: ## p < 0.01

であった。

行動指標に関する分散分析の結果、反応時間において有意なセッションの主効果が認められた ($F(2, 28) = 11.275, p < 0.001$)。Post-hoc テストの結果、脱水条件・飲水条件ともに Pre セッションよりも Post セッションの方が有意に短くなった (それぞれ $p < 0.05$, $p < 0.01$)。反応時間のばらつき、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)。

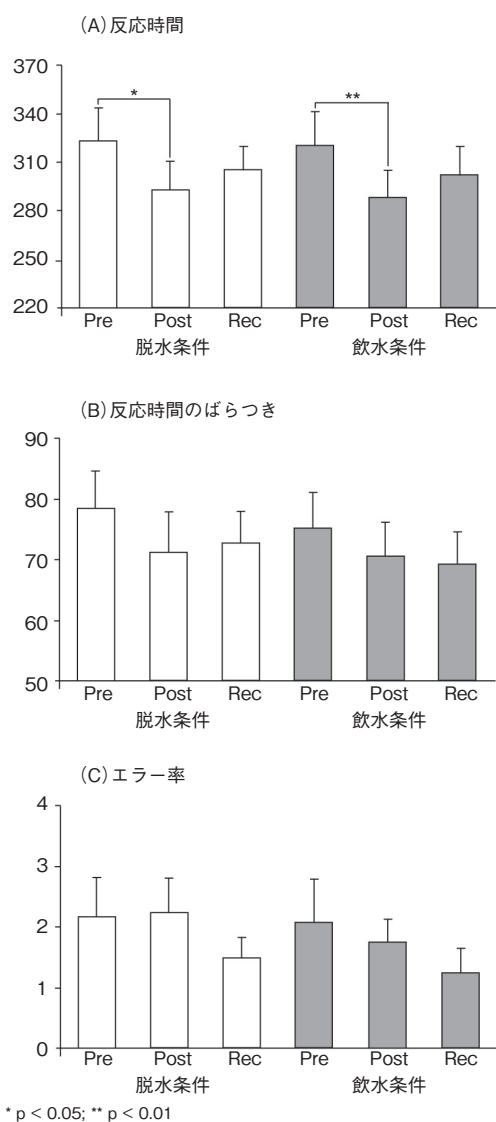


図2 行動指標の結果

図 3, 4 はそれぞれ、脱水条件と飲水条件における全被験者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 ($F(2, 26) = 7.433, p < 0.01$; $F(1, 13) = 22.056, p < 0.001$; $F(4, 52) = 12.433, p < 0.001$) が認められた。また条件-セッション-電極、条件-刺激-電極の交互作用 ($F(8, 104) = 2.079, p < 0.05$; $F(4, 52) = 2.864, p < 0.05$) 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、脱水条件では Go-N140 の振幅は Pz において、Pre セッションの方が Post セッションよりも有意に振幅が大きく ($p < 0.05$)、Go-N140 の振幅は Cz, Pz において、Pre セッションの方が Recovery セッションよりも有意に振幅が大きかった (それぞれ $p < 0.01$)。同様に No-goN140 の振幅は C3 において、Pre セッションの方が Post セッションよりも有意に振幅が大きかった ($p < 0.05$)。飲水条件ではこのような違いは認められなかった。刺激に関する下位検定の結果、脱水条件における No-go-N140 の振幅は Fz, Cz, Pz, C4 において Go-N140 よりも有意に大きかった ($F(1, 13) = 25.838, p < 0.001$; $F(1, 13) = 22.861, p < 0.001$; $F(1, 13) = 24.113, p < 0.001$; $F(1, 13) = 18.333, p < 0.001$)。飲水条件では No-go-N140 の振幅は Fz において Go-N140 よりも有意に大きかった ($F(1, 13) = 5.265, p < 0.05$)。

N140 の潜時に関する分散分析では、電極の主効果 (Greenhouse-Geisser 補正 $F(2.272, 29.535) = 6.533, p < 0.01$, $\epsilon = 0.568$) が認められた。

P300 の振幅に関する分散分析の結果、電極の主効果 ($F(4, 56) = 22.150, p < 0.001$)、刺激-電極、セッション-刺激-電極の交互作用 ($F(4, 56) = 34.744, p < 0.001$; $F(8, 112) = 2.391, p < 0.05$) が認められた。刺激に関する下位検定の結果、Go-P300 の振幅は Pre セッションにおける Pz で、

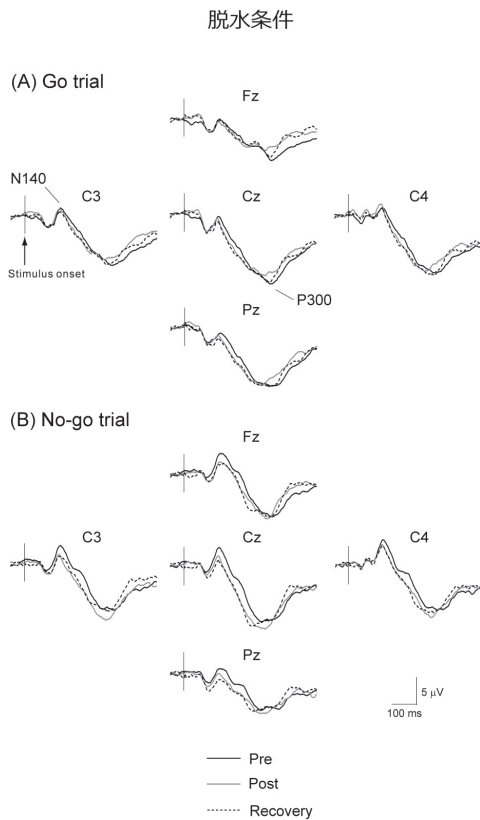


図3 脱水条件における全被験者の事象関連電位平均波形

PostセッションにおけるPzで、RecoveryセッションにおけるPz、C4でNo-go-P300よりも有意に大きかった ($F(1, 14) = 28.197, p < 0.001$; $F(1, 14) = 14.482, p < 0.01$; $F(1, 14) = 38.842, p < 0.001$; $F(1, 14) = 12.118, p < 0.01$). またNo-go-P300の振幅はPostセッションにおけるFz、C3で、RecoveryセッションにおけるFzでGo-P300より

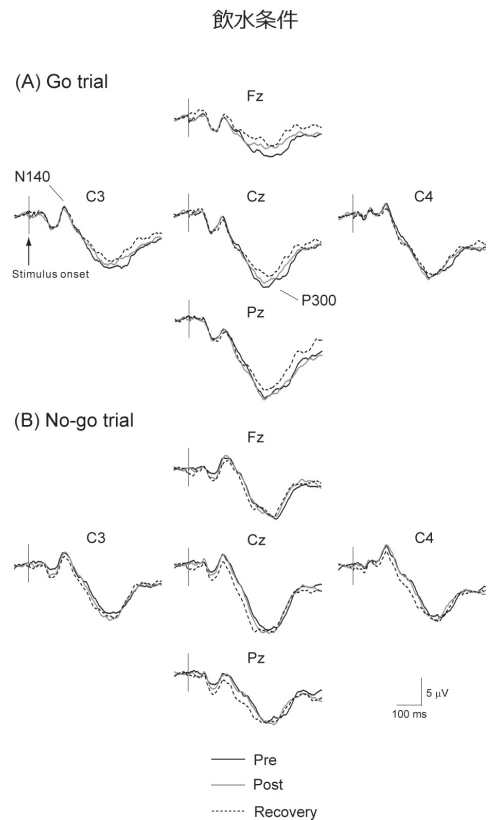


図4 飲水条件における全被験者の事象関連電位平均波形

も有意に大きかった ($F(1, 14) = 5.826, p < 0.05$; $F(1, 14) = 6.918, p < 0.05$; $F(1, 14) = 18.112, p < 0.01$).

P300の潜時に関する分散分析では、有意な主効果と交互作用は認められなかった。

表3 各条件、各刺激におけるN140成分の平均振幅

	Go					No-go				
(μV)	Fz	Cz	Pz	C3	C4	Fz	Cz	Pz	C3	C4
脱水条件										
Pre	-2.5(0.9)	-1.9(0.8)	-0.7(0.5)	-3.2(0.6)	-3.0(0.5)	-5.4(0.8)	-5.4(1.1)	-3.0(0.6)	-4.7(0.8)	-5.6(1.0)
Post	-1.5(0.6)	-0.5(0.8)	1.0(0.6)*	-3.0(0.4)	-2.9(0.5)	-4.0(0.7)	-3.5(0.9)	-1.5(0.8)	-2.6(0.8)*	-4.8(0.7)
Recovery	-1.2(0.9)	0.6(0.9)**	1.5(0.6)**	-2.1(0.5)	-2.0(0.5)	-4.3(0.9)	-2.9(1.1)	-0.6(0.8)	-3.2(0.9)	-4.6(0.7)
飲水条件										
Pre	-2.3(0.8)	-1.3(0.8)	0.3(0.6)	-2.8(0.7)	-3.3(0.6)	-3.7(1.0)	-3.2(0.8)	-1.9(0.5)	-3.8(0.8)	-4.4(0.8)
Post	-1.3(0.7)	-0.9(0.8)	1.2(0.9)	-2.1(0.6)	-2.6(0.7)	-3.3(0.6)	-3.3(0.8)	-1.1(0.9)	-3.2(0.8)	-4.1(0.7)
Recovery	-2.2(0.9)	-0.4(1.0)	0.6(0.6)	-2.3(0.7)	-2.2(0.8)	-3.3(0.9)	-2.4(0.9)	-0.8(0.7)	-3.0(0.7)	-3.7(0.7)

()は標準誤差

Pre vs. 他セッション: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$

表4 各条件, 各刺激におけるN140成分の平均潜時

(μ V)	Go Fz	Cz	Pz	C3	C4	No-go Fz	Cz	Pz	C3	C4
脱水条件										
Pre	166(7)	152(7)	149(6)	153(5)	148(8)	166(7)	151(6)	156(6)	154(6)	143(5)
Post	161(8)	144(5)	147(6)	149(5)	142(5)	164(7)	155(7)	157(6)	155(6)	143(6)
Recovery	154(5)	148(5)	148(4)	149(4)	141(3)	165(5)	155(6)	157(6)	157(6)	142(5)
飲水条件										
Pre	164(8)	154(7)	162(7)	159(6)	141(3)	162(7)	154(7)	158(6)	139(10)	144(4)
Post	160(7)	155(7)	154(7)	156(6)	142(3)	163(7)	160(7)	165(7)	155(6)	143(5)
Recovery	166(7)	151(6)	150(4)	155(6)	139(3)	166(7)	159(6)	165(7)	162(7)	149(6)

()は標準誤差

表5 各条件, 各刺激におけるP300成分の平均振幅

(mV)	Go Fz	Cz	Pz	C3	C4	No-go Fz	Cz	Pz	C3	C4
脱水条件										
Pre	9.2(1.1)	14.5(1.6)	14.7(1.4)	10.5(1.2)	12.2(1.2)	10.1(1.8)	13.4(2.0)	10.1(1.4)	10.6(1.7)	10.6(1.3)
Post	8.2(1.1)	14.3(1.6)	14.5(1.5)	9.4(1.4)	11.7(1.5)	10.5(1.9)	14.8(1.9)	12.5(1.8)	12.8(1.7)	12.1(1.8)
Recovery	8.4(1.1)	14.7(1.5)	14.8(1.6)	10.5(1.1)	12.7(1.3)	10.0(1.1)	14.0(1.6)	10.1(1.3)	10.6(1.3)	10.9(1.3)
飲水条件										
Pre	8.7(1.4)	15.0(1.7)	15.2(1.5)	11.0(1.3)	12.3(1.2)	9.8(1.6)	13.4(1.7)	10.2(1.3)	9.6(1.5)	10.6(1.4)
Post	7.7(1.1)	13.5(1.7)	16.3(1.6)	10.7(1.4)	12.6(1.4)	9.9(1.4)	13.8(1.8)	11.4(1.6)	11.5(1.5)	10.5(1.4)
Recovery	7.0(0.9)	12.6(1.5)	14.1(1.3)	9.6(1.0)	11.6(1.1)	9.6(1.1)	13.7(1.4)	10.5(1.3)	10.4(1.0)	10.8(1.0)

()は標準誤差

表6 各条件, 各刺激におけるP300成分の平均潜時

(ms)	Go Fz	Cz	Pz	C3	C4	No-go Fz	Cz	Pz	C3	C4
脱水条件										
Pre	359(13)	348(8)	370(11)	375(9)	359(8)	341(14)	326(12)	334(12)	343(12)	350(10)
Post	331(14)	330(15)	321(12)	327(10)	320(10)	338(8)	310(8)	326(12)	325(11)	340(8)
Recovery	351(11)	351(11)	337(14)	339(10)	337(11)	323(10)	308(10)	306(10)	320(9)	326(10)
飲水条件										
Pre	325(13)	340(13)	322(12)	352(13)	341(11)	341(10)	326(11)	334(9)	340(11)	348(8)
Post	330(15)	325(10)	328(9)	321(9)	313(9)	332(9)	323(8)	336(7)	338(6)	340(9)
Recovery	328(13)	308(11)	313(10)	322(10)	322(8)	341(10)	307(11)	311(11)	340(11)	344(9)

()は標準誤差

3. 考 察

本研究では暑熱環境下で自転車エルゴメータによる有酸素運動を行い、脱水・飲水が運動遂行過程・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。

体性感覚 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^{1,2)}。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⁴⁾。本実験の結果、Go-N140 成分ならびに No-go-N140 成分の振幅に関し、脱水条件では Pre よりも Post, Recovery において振幅が有意に低下したが、飲水条件ではそのよう

な差は認められなかった(表3)。我々の先行研究において、何回も同じ課題を繰り返して行うことによってN140成分の振幅が低下していくことを報告しているが⁵⁾、本実験の振幅の低下は脱水条件のみであり、飲水条件では見られなかったことから、異なる神経メカニズムが考えられる。つまり、脱水条件ではN140成分の発生に関わる二次体性感覚野、島皮質、帯状回の神経活動に影響が及ぶが、飲水条件ではそのような影響は受けにくいと考えられる。一般成人女性を対象とした最近の研究では、脱水条件と比較し、飲水条件では記憶課題におけるワーキングメモリーや実行機能が回復するとしている¹¹⁾。脱水もしくは飲水が脳の認知機能に与える生理的メカニズムは、現在のところ詳細には明らかになっていないが、飲水は認知機能に少なくとも効果があると考えられる。

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、脱水条件ならびに飲水条件においても、条件やセッションの主効果・交互作用が認められず、Pre, Post, RecoveryにおけるP300成分の振幅に有意差は認められなかった。この結果は、20℃と35℃の暑熱環境下で有酸素運動を行った我々の先行研究と結果は一致しなかった⁶⁾。その理由として3つの理由が考えられる。1つ目に運動強度の設定がある。本実験では最大酸素摂取量55%の運動強度で有酸素運動を行ったが、我々の先行研究での運動負荷は、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130~140bpmになるように設定した。そのため運動強度の設定法に違いがあった。実際に、35℃の暑熱環境下で本実験の脱水条件を行ったが、体重減少率は $1.71 \pm 0.24\%$ であったのに対し、同様の暑熱環境下で行った我々の先行研究では $2.24 \pm 0.41\%$ であった。2つ目に被験者の違いが

ある。本実験に参加してもらった被験者にスポーツの競技歴を報告してもらったところ、陸上競技(長距離、短距離)、野球、特に行っていないなど、様々であった。しかし、我々の先行研究に参加してもらった被験者は全員大学のラグビー部に所属していた。先行研究においても、スポーツを経験している競技特性に応じてGo/No-go課題中の事象関連電位の電位動態が異なることが報告されており^{3, 13)}、被験者の特性が反映された可能性がある。3つ目に繰り返し効果の影響である。上記のように同じ課題を繰り返して行うと事象関連電位の振幅が小さくなることが報告されている⁵⁾。我々の先行研究では15分間の有酸素運動を行う毎に事象関連電位を測定していたため、電位の変動に繰り返し効果がある程度含まれている可能性がある。本実験では事象関連電位を3回のみ計測しており、また計測時間の間隔も長いことから、繰り返し効果の影響は少ないものと考えられる。以上の点は今後の検討課題とされる。

事象関連電位とは対照的に、行動指標の反応時間はPreよりもPostにおいて有意に短縮した(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⁷⁾、核心体温の上昇とともにそれぞれの神経システムにおける影響が異なると考えられる。Olsonら⁸⁾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短くなっているが、反対にP300の振幅は徐々に低下している。運動の繰り返しによって核心体温は上昇することから、いわゆるウォーミングアップ効果により反応時間が短くなったと考えられる。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。

脳波事象関連電位を用いた本研究から、暑熱環

境下における有酸素運動時の飲水効果は、体性感覚認知処理過程に関わる神経活動に見られ、反応時間などで示される反応実行系や、P300成分として反映される認知処理系には関与しない可能性が示唆された。

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皆様、計測にご協力を頂きました安倍史恵さん、瓜本成美さん、高原佑華さん、松下奈央さんに深く感謝致します。

文 献

- 1) 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)
- 2) 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)
- 3) Nakamoto H., Mori S., Effects of stimulus-response compatibility in mediating expert performance in baseball players. *Brain Res.*, **1189**: 179-188 (2008)
- 4) 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)
- 5) 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)
- 6) 中田大貴, 大城岬, 難波真里, 芝崎学, 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, デサントスポーツ科学, **38**: 17-27 (2017)
- 7) 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)
- 8) 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)
- 9) Shibasaki M., Namba M., Oshiro M., Crandall C., Nakata H., The effect of elevations in internal temperature on event-related potentials during a simple cognitive task in humans. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, **311**: R33-38 (2016)
- 10) Shibasaki M., Namba M., Oshiro M., Kakigi R., Nakata H., Suppression of cognitive function in hyperthermia; From the viewpoint of executive and inhibitive cognitive processing. *Sci. Rep.*, **7**: 43528 (2017)
- 11) Stachenfeld N.S., Leone C.A., Mitchell E.S., Freese E., Harkness L., Water intake reverses dehydration associated impaired executive function in healthy young women. *Physiol. Behav.*, **185**: 103-111 (2018)
- 12) 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)
- 13) Yamashiro K., Sato D., Onishi H., Sugawara K., Nakazawa S., Shimojo H., Akatsuka K., Nakata H., Maruyama A., Skill-Specific Changes in Somatosensory Nogo Potentials in Baseball Players. *PLoS One*, **10**: e0142581 (2015)