

# 暑熱環境下における聴覚情報処理および 高次認知機能の評価

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

## Auditory and Cognitive Functions during Heat Stress

by

Manabu Shibasaki, Mari Namba, Hiroki Nakata  
*Nara Women's University*

### ABSTRACT

Excessive elevation of internal body temperature causes a significant strain on either the brain function or the locomotive system. Although hyperthermia impairs psychological and working memory performances, the effect of hyperthermia on cognitive processing remains unknown. We hypothesized that a passive heat stress impaired the cognitive function when the internal temperature was excessively increased. sixteen healthy males performed an auditory oddball paradigm before and after heat stress (Pre and Post) and when esophageal temperature was increased by 0.8 °C and 2.0 °C (Mild and Severe). The reaction time and event-related potentials (ERPs) were recorded in these four sessions. As a countermeasure, subjects performed the same sessions without heat stress (i.e. normothermic condition). The reaction time was shortened while esophageal temperature was elevated relative to the Pre but did not change in the normothermic trial. However the peak latency and amplitude of N100 component did not change throughout the experiment. Although the latency of P300 component was unaffected due to heat stress, the amplitude of P300 was significantly reduced at the Severe and Post relative to at the Pre. These results suggest

that excessive elevation of internal temperature impairs cognitive processing but not auditory processing.

## 要 旨

高体温は身体的・心理的パフォーマンスに影響すると言われているが、客観的な評価はほとんどなく、特に脳機能への影響は不明である。本研究では脳波事象関連電位を用いて、暑熱負荷時の認知機能を客観的に評価した。16名の被験者が参加し、2条件（暑熱負荷および常温負荷）で聴覚オドボールテストを暑熱負荷前、食道温が0.8℃および2.0℃上昇した時、暑熱負荷終了時に実施し、反応時間および脳波事象関連電位を測定した。すべての実験を通して脳波が正確に測定できた13名のデータを解析対象とした。反応時間は常温負荷条件では変化しなかったが、暑熱負荷条件では短縮し、同様にP300成分の潜時も短縮した。しかし、認知処理系の活動を反映するP300の振幅は高体温時に低下した。聴覚機能を反映するN100は潜時および振幅とも両条件ともに変化は見られなかった。これらの結果から、高体温は聴覚機能には影響しないが、反応実行系を促進するものの、認知処理系は低下させる可能性が示唆された。

## 緒 言

2019年にはラグビーワールドカップが、2020年には東京オリンピック・パラリンピックが日本で開催される。いずれも9月～10月、7月～8月と気温が高い時期に開催予定で、暑熱環境下でのハイパフォーマンス発揮が要求される。そのことは同時に、気温が上昇する時期にパフォーマンスを最大限に引き出すための効果的なトレーニングプログラムが必要となる。過度の体温上昇は心肺機能の負荷を増加させることから、暑熱環境に

おける運動パフォーマンスは低下する<sup>1)</sup>。実際、暑熱環境条件下での持続的な運動や作業は、快適温度環境条件下と比較すると、自覚的な負荷は高くなる<sup>2)</sup>。また、末梢性の筋疲労だけでなく、高体温に起因する中枢性疲労が自発的な力発揮や神経筋機能を低下させる<sup>3,4)</sup>。つまり、高体温そのものが運動パフォーマンスの低下の一因となっていると示唆されている。

これらの機能低下だけでなく、大脳皮質の機能低下もスポーツパフォーマンスに影響を与えている可能性がある。実際に、ラグビーの現場では暑い中での練習中、選手からは「ボーっとする」「ボールへの反応が遅れた」といったコメントがよく聞かれる。また、指導側からは比較的不注意に起因すると考えられるケガや記憶と判断が必要なサインプレー等のミスも増加しているとの意見もある。このような判断力や記憶力は、一般的には意思決定課題やワーキングメモリー課題によって評価されることが多い。先行研究では、高体温時に複雑な認知課題を課すと認知機能を低下するが、単純な認知課題ではそのような低下は見られないという報告がある<sup>5,6,7)</sup>。しかし、現在のところ、これらの理由に関する詳細な認知メカニズムについては、未だ明らかにされていない<sup>8)</sup>。さらに、これらの評価は主観的な要素も含まれており、反応自体はスキルレベルや被験者のモチベーションに左右される可能性がある。実験方法論も含め、これらの問題が解決しないことには、高体温における認知機能について客観的に明らかにすることは難しい。

客観的な生理指標として、脳波(electroencephalography: EEG)を記録し、覚醒レベルや聴覚に関する感覚情報自動処理過程は暑熱ストレスによって低下す

ることが報告されている<sup>9, 10)</sup>。しかし、これらの研究では、意思決定課題やワーキングメモリー課題を被験者に課しているわけではなく、認知処理に関する脳機能については明らかにされていない。脳波の事象関連電位 (event-related potentials: ERPs) は、刺激の呈示時間を基準とし、脳波波形を加算平均することによって得られる脳電位であり、外的あるいは内的な事象に関連した認知過程評価を反映する<sup>11-14)</sup>。事象関連電位研究では、標的刺激が明示されるとカウントする計数課題、またはボタン押しをする反応課題のように、単純な課題が用いられることが一般的である。実際、睡眠不足、咀嚼、運動といった様々な実験条件で課題を行い、その電位動態の特性から認知機能が明らかにされている<sup>15-19)</sup>。しかし、これまでに暑熱ストレス中に事象関連電位を記録し、認知機能を評価した研究は報告されていない。以上の研究背景を踏まえ、本研究における我々の目的は、客観的な生理指標としての事象関連電位を記録し、認知機能が暑熱ストレスによってどのように影響を受けるのかを明らかにすることである。

## 1. 研究方法

16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  $20.8 \pm 0.9$  歳、 $83.6 \pm 8.1$ kg、 $173.2 \pm 6.5$ 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

実験は温度調節された ( $26 \pm 1^\circ\text{C}$ ) 実験室で2つの条件 (暑熱負荷条件と常温負荷条件) を少なくとも3日あけて実施した。実験当日、被験者は実験室に到着する2時間前までには軽食を摂取す

るよう指示された。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させた。実験室に入室後、食道温測定用の温度センサー (T型熱電対) を被験者の身長1/4の距離まで鼻腔を通して入れ、皮膚温を測定するために6箇所 (胸、腹部、背中上部、腰、大腿、下腿) にT型熱電対を貼付した。心拍数と血圧は、それぞれNEC社製心電図計 (Biomulti 1000) とコーリン社製の上腕動脈の聴診法による自動血圧計 (STBP-780) によって測定された。被験者は、アンダーウェアとショートパンツを着たまま、Med-Eng社製水循環スーツを着用した。水循環スーツは頭、顔、手首より遠位、足首より遠位を除く全身を覆った。被験者は平常体温状態を維持するために、 $33^\circ\text{C}$ の水をスーツに循環させ、半仰臥位の姿勢で約30分間、安静にした。その間、脳波電極を取り付け、被験者は聴覚オドボール課題の説明を受け、課題の練習を行った。暑熱負荷条件において、最初の事象関連電位の測定 (第1セッション) は平常体温状態で行った。次に、受動的な暑熱負荷として、水循環スーツ内に  $50^\circ\text{C}$  の温水を循環させ、食道温が暑熱負荷前のベースラインから  $\sim 0.8^\circ\text{C}$  と  $2.0^\circ\text{C}$  上昇した時点で、第2セッション、第3セッションを実施した。第3セッション終了後、 $25^\circ\text{C}$ の冷水を直ちにスーツへ循環させ、全身を冷却した。全身冷却開始3分後に、第4セッションの測定を行った。同じ実験手順によって、常温負荷条件も行った。 $33^\circ\text{C}$ の水をスーツに循環させ、全く同じプロトコルで測定をおこなった。常温負荷セッションに対するセッション間のインターバル時間は熱負荷状態から決定した (常温負荷条件)。

### 1. 2 聴覚オドボール課題

聴覚刺激は純音 (刺激強度 55 dB, 刺激時間 500 ms, rise/fall time 10 ms) を用い、ヘッドフォンを通して両耳に与えられた。1セッションにつき、標的刺激 (2000 Hz; 20%) 30回、標準刺激 (1000

Hz；80%）120回をランダムに呈示した。刺激間隔は2秒とした。被験者は、標的刺激後にできるだけ早く右手の親指でボタン押しをするように指示され、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された。

### 1. 3 脳波記録

脳波は国際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5kΩ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（electrooculogram: EOG）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100μVを試行は加算から除外した。

### 1. 4 認知処理と聴覚処理の評価

事象関連電位の研究において、P300成分（P3b成分）は刺激呈示後250-600msに記録される陽性電位で、頭頂部付近の電極で最大振幅が記録される。刺激に対する評価、判断、選択的注意、文脈更新に関係しているとされている<sup>11-13</sup>）。P300の振幅は課題に関する注意処理資源の量を反映し、潜時は刺激の弁別速度・刺激評価時間と考えられ、一般的に反応選択過程とは無関係であるとされている。またP300に加えて、P300の出現前に記録される陰性電位N100成分（N1）も解析対象とした。N100は聴覚刺激後約100msで検出され、前頭部付近の電極で最大振幅が記録される。聴覚の刺激過程に関連した神経活動を反映しているとされている。

### 1. 5 データ収集と分析

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。N100とP300の最大振幅と潜時は、70-130ms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。食道温と心拍数は、BIOPACK社製MP150を用いてサンプリング周波数20Hzで連続して測定した。血圧はオドボール課題の前後で測定した。皮膚温は横河社製DA100を用いて1秒で取得し測定された。平均皮膚温は6点の平均荷重から計算した20）。平均体温は以下のように計算した。

$$\text{平均体温} = 0.9 \times \text{食道温} + 0.1 \times \text{平均体温}$$

血圧以外のデータは聴覚オドボール課題の前後60秒間の平均値を算出した。常温負荷条件の際に4名の被験者で食道温を計測できなかったため、暑熱負荷に対する体温変化について、セッション（第1～4）を要因とし、一元配置分散分析によって解析した。行動指標（反応時間ならびにエラー率）については、条件（暑熱負荷 vs. 常温負荷）とセッション（第1～4）を要因とし、二元配置分散分析を行った。N100とP300の最大振幅と潜時について、条件、セッション、電極位置（Fz, Cz, Pz, C3, C4）を要因とした三元配置分散分析を用いた。分散分析を行う際、要因が2以上の場合、モークリー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、Student Newman Keuls testを用い、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. 21）を使い、統計的な有意差は $p < 0.05$ とした。

## 2. 研究結果

全身加温中（第2～3セッション）、食道温、平均皮膚温、平均体温、心拍数は上昇し、平均血圧は変化しなかった（表1）。その後、全身冷却中（第4セッション）では平均皮膚温、平均体温、心拍

表1 暑熱および常温負荷条件時の体温と循環パラメータ

|            |        | 第1           | 第2            | 第3             | 第4              | Condition | Time    | Interaction |
|------------|--------|--------------|---------------|----------------|-----------------|-----------|---------|-------------|
| 食堂温, °C    | 暑熱負荷条件 | 36.88 ± 0.24 | 37.72 ± 0.23* | 38.82 ± 0.21*† | 38.00 ± 0.39*†‡ | P<0.001   | P<0.001 | P<0.001     |
|            | 常温負荷条件 | 36.64 ± 0.32 | 36.60 ± 0.30  | 36.66 ± 0.19   | 36.68 ± 0.20    |           |         |             |
| 平均皮膚温, °C  | 暑熱負荷条件 | 33.62 ± 0.60 | 38.43 ± 0.31* | 39.44 ± 0.24*† | 35.85 ± 0.63*†‡ | P<0.001   | P<0.001 | P<0.001     |
|            | 常温負荷条件 | 34.22 ± 0.44 | 34.34 ± 0.46  | 34.36 ± 0.40   | 34.37 ± 0.40    |           |         |             |
| 平均体温, °C   | 暑熱負荷条件 | 36.55 ± 0.25 | 37.79 ± 0.23* | 38.88 ± 0.20*† | 37.78 ± 0.36*†  | P<0.001   | P<0.001 | P<0.001     |
|            | 常温負荷条件 | 36.40 ± 0.29 | 36.37 ± 0.27  | 36.43 ± 0.19   | 36.45 ± 0.19    |           |         |             |
| 心拍数, bpm   | 暑熱負荷条件 | 58.3 ± 8.1   | 88.9 ± 10.1*  | 114.7 ± 13.7*† | 92.4 ± 10.7*†‡  | P<0.001   | P<0.001 | P<0.001     |
|            | 常温負荷条件 | 57.9 ± 6.2   | 57.6 ± 5.5    | 56.5 ± 5.5     | 56.6 ± 5.6      |           |         |             |
| 平均血圧, mmHg | 暑熱負荷条件 | 94.9 ± 9.5   | 96.7 ± 13.1   | 94.0 ± 10.1    | 95.4 ± 15.0     | P=0.808   | P=0.631 | P=0.637     |
|            | 常温負荷条件 | 92.7 ± 10.6  | 95.1 ± 10.0   | 96.3 ± 8.8     | 95.7 ± 11.5     |           |         |             |

P<0.05, \*, 第1セッションと比較, †; 第2セッションと比較, ‡; 第3セッションと比較

数は減少し、皮膚温・体温は第2セッションのレベルに近い値まで回復したが、食道温は上昇したままであった。一方、常温負荷条件ではこれらの変化は実験を通して見られなかった。また、暑熱負荷条件において、第2、第3セッションの間、それぞれのオドボール課題中に食道温はわずかに上昇した（第2セッション：37.67 ± 0.22 °Cから37.76 ± 0.25 °C；第3セッション：38.79 ± 0.22 °Cから38.84 ± 0.22 °C）。

反応時間は常温負荷条件ではセッション間に差は認められなかったが、暑熱負荷条件の反応時間は、セッションの繰り返しによって異なることが示された。暑熱負荷条件における平均反応時間は、第3セッション・第4セッションの方が第1セッションよりも有意に短縮した（図1A）。また、平均反応時間は第3セッションと第4セッションにおいて、暑熱負荷条件の方が常温負荷条件より有意に短かった。エラー率に関しては、有意な主効果や交互作用は認められなかった（図1B）。

図2は全被験者の事象関連電位平均波形を示している。P300とN100成分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。図3Aは暑熱負荷条件の第1セッションのPz波形を基準として各セッションと比較したものである。P300の振幅は第1セッションよりも第3セッション・第4セッションの方が明瞭に低下していることを示している。しかし、常温負荷条件では平均波形にセッション間の差は見られなかった。

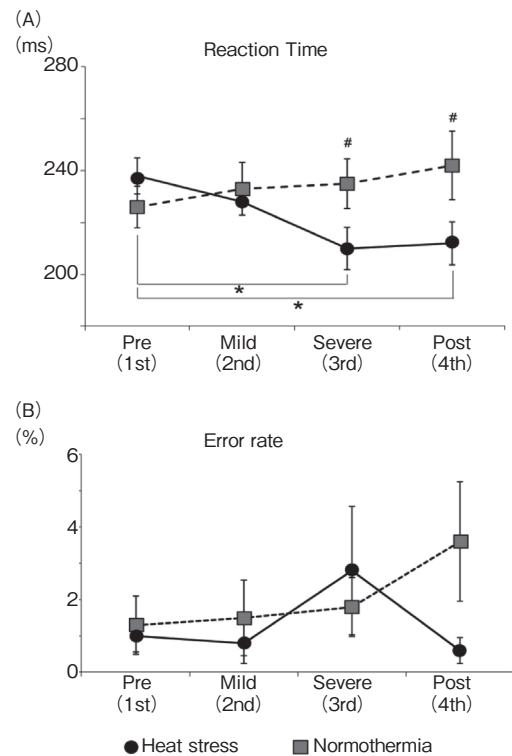


図1 反応時間(Reaction time, A)とエラー率(Error rate) 常温負荷条件(■)では反応時間はほとんど変化しなかったが、暑熱負荷条件(●)では第3および第4セッションで第1セッションよりも短縮した。しかし、エラー率に統計的な有意差は認められなかった。

P300の最大振幅に関する分散分析では、セッションや電極の主効果が認められた。また、条件 × セッション × 電極の有意な交互作用が認められた。下位検定として、各電極・各セッションにおいて、条件の主効果を分析すると、第3セッションのCz, Pz, C3, C4, 第4セッションのC3において、暑熱負荷条件の方が常温負荷条件よりも



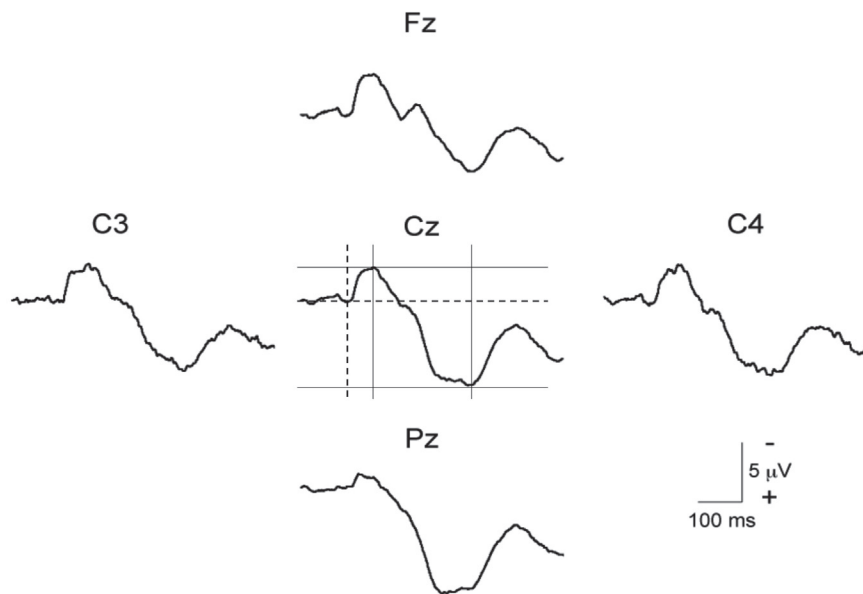


図2 全被験者の脳波事象関連電位平均波形

標的的刺激時に測定した5部位（Fz, Cz, Pz, C3, C4）の脳波の全被験者の平均波形を示す。点線で示す刺激前 60 ms の平均をベースラインとして約 100 ms および約 300 ms のピークとの差を振幅とし、刺激時からそのピークまでの時間を潜時とした。

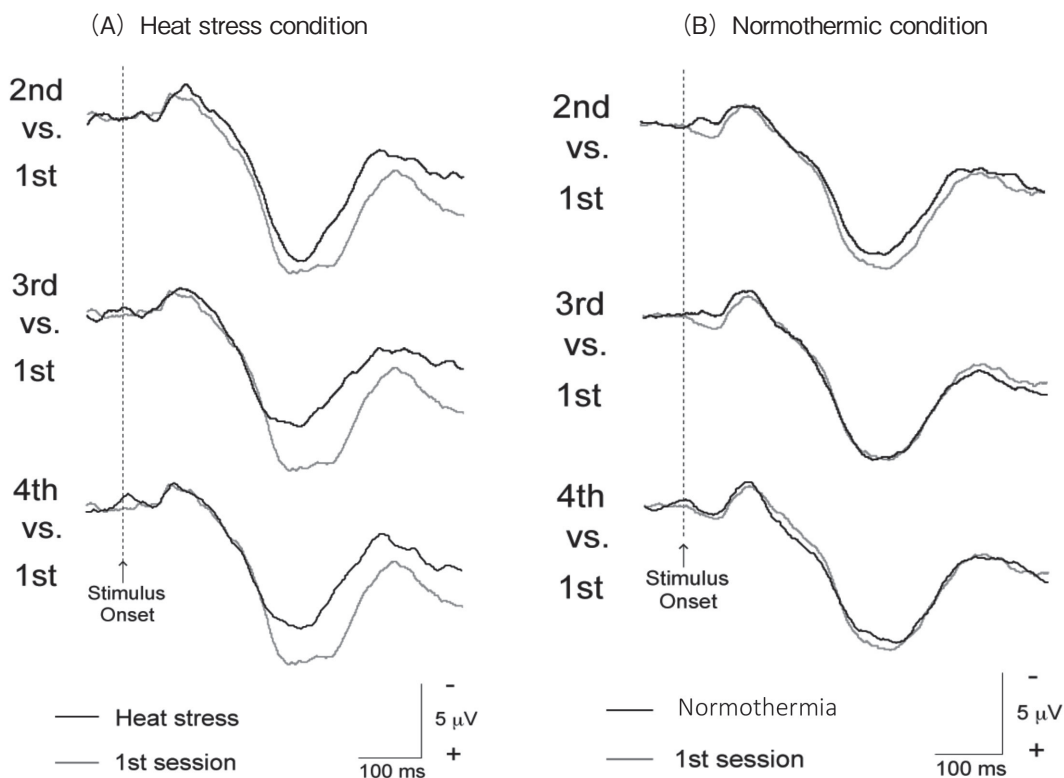


図3 暑熱負荷条件（Heat stress condition）と常温負荷条件（Normothermic condition）の

それぞれの第1セッションにおけるPzの波形に対する各セッションとの比較

常温負荷条件では各セッションとも第1セッションの波形とほとんどなかったが、暑熱負荷条件では第3および第4セッションで第1セッション（グレー）よりもP300の振幅が小さくなった。

有意に P300 の振幅が低下していることが示された。第 1 セッションと第 2 セッション中の暑熱負荷条件と常温負荷条件の間には、P300 の振幅に有意な差は認められなかった。さらに各条件・各電極において、それぞれセッションに関する主効果を分析したところ、暑熱負荷条件における Cz, Pz, C3, C で有意差が認められた。常温負荷条件における有意差は、各電極全てにおいて認められなかった。電極の要因を排除したセッションの要因に関する post-hoc テストでは、P300 の振幅は第 1 セッションよりも第 3・第 4 セッションの方が有意に低下したことを示した。常温負荷条件において、電極に関する post-hoc テストでは、P300 の振幅が第 3 セッションで Cz と Pz よりも Fz の方が有意に小さく、第 4 セッションでは Pz よりも Fz の方が有意に小さいことを示した。暑熱負荷条件において、電極に関する post-hoc テストでは、第 2・第 3・第 4 セッションにおいて有意差が認められなかったが、第 1 セッションにおいては Pz より Fz と C3 の方が有意に小さかった。これらの post-hoc テストは、暑熱負荷条件と常温負荷条件の間で、P300 の電位分布が異なることを示唆している。P300 の潜時は 5 電極の平均として比較した。常温負荷条件では P300 の潜時に有意差は認められなかったが、暑熱負荷条件では第 1 セッションよりも他のセッションで明らかに短縮した。N100 の最大振幅と潜時に関する分散分析においても、電極の主効果のみが認められたが、それ以外に差は認められなかった。

### 3. 考 察

暑熱負荷時の認知機能に関する実験はいくつか報告されているが、主観的な方法による実験がほとんどであり、課題依存性にその結果は異なるようである<sup>5-8, 21)</sup>。しかし、同じ高体温状態であるにもかかわらず、ある認知処理では向上し、別の認知処理では低下するようなことがあるのだろう

か。複雑な課題になると、被験者のモチベーションやスキルが影響することが考えられるため、客観的な評価が必要である。本研究ではあえて単純課題を用いることでこの不一致の原因を検討することとした。本研究の主な成果は、認知過程の指標となる P300 の振幅は核心体温が過度に上昇した時に減少した。さらに、この振幅の減少はその後の皮膚温が低下しているが核心体温が上昇したままの間も持続した。一方、刺激の分類や評価時間の指標となる P300 の潜時は暑熱負荷条件で短縮した。脳波事象関連電位と主観的な心理学指標との関係を考察するために、いくつかのモデルが提唱されている<sup>22)</sup>。刺激が入力されると活動する刺激処理系、そこから行動に移る運動処理系または反応実行系、それらを制御や理解する組織制御系または認知処理系のように複数のシステムが脳波事象関連電位に反映される。それぞれの系が互いに影響し合うが、反応実行系と認知処理系が一致しないことも起こりうる可能性は考えられる。本研究の結果は、高体温によって反応実行系は亢進し、認知処理系が抑制されたと解釈できる。

反応時間は、パフォーマンスの指標であり、本研究では暑熱負荷の上昇とともに短縮した。P300 の潜時は反応時間と相関関係にあり<sup>23, 24)</sup>、本研究においても先行研究と同様に P300 の潜時は短縮した。最近、我々は体温の上昇が神経の伝達速度を上昇させ、体性感覚刺激に対する脳波の潜時も短縮することを報告した<sup>25)</sup>。上行性と下行性の違いはあるが、神経の伝達速度が反応時間の短縮に関与した可能性がある。反応時間の短縮はエラー率の増加を招くことがあるが<sup>23, 24)</sup>、本研究ではエラー率に統計的な差は認められなかったこと、常温負荷では反応時間にも P300 の潜時にも変化が見られなかったことから、被験者のモチベーションではなく、温度依存性の影響と考えられる。

高体温時には換気が亢進し、血中二酸化炭素分

圧が低下することによって脳血流が低下することが報告されている<sup>26,27)</sup>。本研究では脳血流を測定していないが、本研究と同様の受動的暑熱刺激によって食道温を $1.2^{\circ}\text{C}$ 以上上昇させると、脳へ血液を供給する内頸動脈血流量が低下することを報告している<sup>28)</sup>。これらのことから、脳血流量の低下が認知処理系の低下に影響した可能性が示唆されるが、今後の検討が必要である。

本研究において、注目される点は暑熱負荷後の冷却時の反応である。食道温が $2.0^{\circ}\text{C}$ まで上昇した状態で認知課題を実施したのち、水循環スーツに $15^{\circ}\text{C}$ の冷水を循環させ、急速に体温を低下させた。温冷感覚は測定していないものの、被験者は口頭で、急速冷却によって快適に感じるようになったことを申告しており、被験者は温熱的な快適を感じた状態で第4セッションの試行を実施した。体温調節の研究では平均体温を体温の指標とすることから、平均皮膚温を大幅に低下させることによって、平均体温は第2セッションのマイルドな温度負荷条件と同程度まで低下させた。一方で、核心温度である食道温は暑熱負荷前よりも $1^{\circ}\text{C}$ 以上高いレベルを維持させた。5部位のP300の振幅の平均(図4)で比較すると、第2セッションではP300の振幅に明らかな低下は認められていなかったが、第4セッションでは未だ暑熱負荷前よりも低値を示していた。この結果は、身体内部の温度が認知処理系に影響している可能性を暗示しているのかもしれない。

#### まとめ

高温環境下でのクラブ活動においては熱中症予防に十分注意しているが、それでも毎年クラブ活動時に熱中症が発症したことが報道等で発表されている。本研究の結果では、反応時間はむしろ体温が上昇することで短縮するため、パフォーマンスは上昇したと表面上は判断されるが、認知処理の指標であるP300の振幅は低下していることか

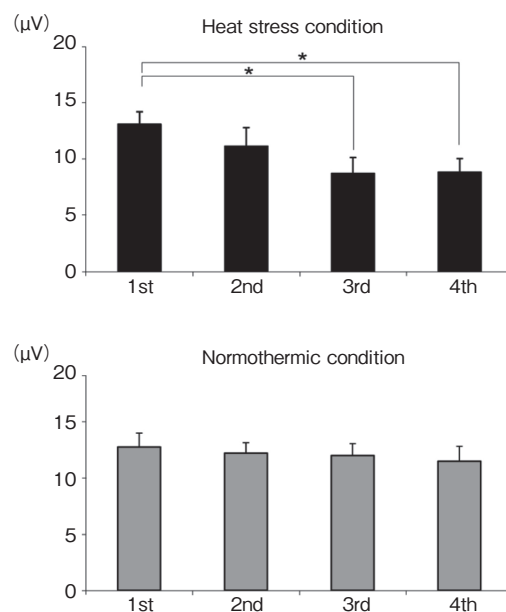


図4 5部位平均P300振幅

標的的刺激時に測定した5部位(Fz, Cz, Pz, C3, C4)のP300を平均し、各セッションと比較した。常温負荷条件では振幅に変化は見られなかったが、暑熱負荷条件で第3および第4セッションで第1セッションで明らかに低値を示した。

ら脳活動は高体温によって明らかに低下していると考えられる。また、冷却によって皮膚温を下げたのちに実施した試行においてもP300の振幅は低下したままであった。この時の食道温はまだ常温体温よりも $1.2^{\circ}\text{C}$ 高かったことから、身体内部の体温が十分に低下していないと判断され、その場合は認知機能も実質的に低下していることが示唆された。

#### 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いたします。また、被験者としてご協力いただきました天理大学ラグビー部の皆様、計測にご協力を頂きました大城岬さん、岸本陽さん、福谷綾那さん、吉岡友希さんに深く感謝いたします。



# 文 献

- 1) Crandall C.G., Gonzalez-Alonso J., Cardiovascular function in the heat-stressed human. *Acta. Physiol.*, **199**(4) :407-23(2010)
- 2) Rasmussen P., Nybo L., Volianitis S., Moller K., Secher N.H., Gjedde A., Cerebral oxygenation is reduced during hyperthermic exercise in humans. *Acta. Physiol.*, **199**(1) :63-70(2010)
- 3) Nybo L., Nielsen B., Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise in humans. *J. Appl. Physiol.*, **91**(3) :1055-60(2001)
- 4) Periard J.D., Caillaud C., Thompson M.W., Central and peripheral fatigue during passive and exercise-induced hyperthermia. *Med. Sci. Sports Exerc.*, **43**(9) :1657-65(2011)
- 5) Hancock P.A., Vasmatazidis I., Effects of heat stress on cognitive performance: the current state of knowledge. *Int. J. Hyperthermia.*, **19**(3) :355-72(2003)
- 6) Kazama A., Takatsu S., Hasegawa H., Effect of increase in body temperature on cognitive function during prolonged exercise. *Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med.*, **61**(5) :459-67(2012)
- 7) Racinais S., Gaoua N., Grantham J., Hyperthermia impairs short-term memory and peripheral motor drive transmission. *J. Physiol.*, **586**(Pt 19) :4751-62(2008)
- 8) Gaoua N., Cognitive function in hot environments: a question of methodology. *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, **20** Suppl 3:60-70(2010)
- 9) Nielsen B., Hyldig T., Bidstrup F., Gonzalez-Alonso J., Christoffersen G.R., Brain activity and fatigue during prolonged exercise in the heat. *Pflugers. Archiv.*, **442**(1) :41-8(2001)
- 10) Sun G., Li L., Li M., Jiang Q., Hyperthermia impaired pre-attentive processing: an auditory MMN study. *Neurosci. Lett.*, **502**(2) :94-8(2011)
- 11) Bledowski C., Prvulovic D., Hoechstetter K. et al., Localizing P300 generators in visual target and distractor processing: a combined event-related potential and functional magnetic resonance imaging study. *J. Neurosci.*, **24**(42) :9353-60(2004)
- 12) Donchin E., Coles M.G., Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behav. Brain Sci.*, **11**(3) :357-74(1988)
- 13) Kok A., On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiology.*, **38**(3) :557-77(2001)
- 14) Nakata H., Sakamoto K., Honda Y., Kakigi R., Somato-motor inhibitory processing in humans: evidence from neurophysiology and neuroimaging. *J. Physiol. Sci.*, **64**(4) :233-52(2014)
- 15) Fullagar H.H., Skorski S., Duffield R., Hammes D., Coutts A.J., Meyer T., Sleep and athletic performance: the effects of sleep loss on exercise performance, and physiological and cognitive responses to exercise. *Sports Med.*, **45**(2) :161-86(2015)
- 16) Gosselin A., De Koninck J., Campbell K.B., Total sleep deprivation and novelty processing: implications for frontal lobe functioning. *Clin. Neurophysiol.*, **116**(1) :211-22(2005)
- 17) Kamijo K., Nishihira Y., Hatta A et al., Differential influences of exercise intensity on information processing in the central nervous system. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **92**(3) :305-11(2004)
- 18) Lambourne K., Tomporowski P., The effect of exercise-induced arousal on cognitive task performance: a meta-regression analysis. *Brain Res.*, **1341**:12-24(2010)
- 19) Sakamoto K., Nakata H., Kakigi R., The effect of mastication on human cognitive processing: a study using event-related potentials. *Clin. Neurophysiol.*, **120**(1) :41-50(2009)
- 20) Taylor WF, Johnson JM, Kosiba WA, Kwan CM. Cutaneous vascular responses to isometric handgrip exercise. *J. Appl. Physiol.*, **66**(4) :1586-92(1989)
- 21) Hocking C., Silberstein R.B., Lau W.M., Stough C., Roberts W., Evaluation of cognitive performance in the heat by functional brain imaging and psychometric testing. *Comp. Biochem. Physiol. A Mol. Integr. Physiol.*, **128**(4) :719-34(2001)
- 22) 心理学のための事象関連電位ガイドブック. 入野宏著. 北大路書房(2005)
- 23) Kutas M., McCarthy G., Donchin E., Augmenting mental chronometry: the P300 as a measure of stimulus evaluation time. *Science.*, **197**(4305) :792-5(1977)
- 24) McCarthy G., Donchin E., A metric for thought: a comparison of P300 latency and reaction time. *Science.*, **211**(4477) :77-80(1981)
- 25) Nakata H., Oshiro M., Namba M., Shibasaki M., Effects of passive heat stress on human

- somatosensory processing. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, in print (2015)
- 26) Brothers R.M., Ganio M.S., Hubing K.A., Hastings J.L., Crandall C.G., End-tidal carbon dioxide tension reflects arterial carbon dioxide tension in the heat-stressed human with and without simulated hemorrhage. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, **300**: R978–83 (2011)
- 27) Fujii N., Honda Y., Hayashi K., Kondo N., Koga S., Nishiyasu T., Effects of chemoreflexes on hyperthermic hyperventilation and cerebral blood velocity in resting heated humans. *Exp. Physiol.*, **93**: 994–1001 (2008)
- 28) Ogoh S., Sato K., Okazaki K., Miyamoto T., Hirasawa A., Morimoto K., Shibasaki M., Blood flow distribution during heat stress: cerebral and systemic blood flow. *J. Cereb. Blood Flow Metab.*, **33**, 1915–1920 (2013)