

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：14602

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03166

研究課題名(和文) 暑熱環境下運動時の中枢性および末梢性疲労による筋出力調節および循環調節への影響

研究課題名(英文) Effects of central and peripheral fatigue on muscle output regulation and circulatory regulation during exercise in a hot environment

研究代表者

芝崎 学 (Shibasaki, Manabu)

奈良女子大学・工学系・教授

研究者番号：00314526

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、暑熱環境下運動時に誘発される中枢性疲労と末梢性疲労に注目し、脳波事象関連電位、近赤外線分光法、中大脳動脈血流速度を脳活動指標として筋出力調節と循環調節に対する2つの疲労の影響を統合的に評価した。また、疲労時の巧緻性に着目し、上肢と下肢運動の連動性について検討した。高体温による中枢性疲労の結果から、運動始動時のセントラルモーターコマンドが運動形態によって変化することが示された。また、末梢性疲労が脳活動であるセントラルモーターコマンドの出力にも影響することが示された。筋出力調節においても筋疲労によって「力の抜き方」が難しくなることを数値的に表現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高いレベルで運動パフォーマンスを発揮するためには疲労のマネジメントが重要である。しかし、疲労時のモーターコントロールが何によってどのように影響を受けるのかは不明な点が多い。特に夏季オリンピックのように真夏に実施されるハイレベルの大会では末梢性の筋疲労だけでなく、体温上昇や長時間運動による中枢性疲労の影響も検討する必要がある。これらの数値化によって、疲労による事故回避の指標を構築できる可能性を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：We investigated the effects of central and peripheral fatigues on motor control and cardiovascular responses during exercise in a hot environment using electroencephalographic event-related potentials, near-infrared spectroscopy, and middle cerebral artery blood velocity. In addition, to investigate the motor skill with muscle fatigue, we examined the interlocking of upper and lower limbs movements. The results of hyperthermia-induced central fatigue showed that the mode of exercise is capable of modulating the central motor command. Also, the peripheral fatigue affects the output of the central motor command, which is brain activity. Finally, "how to relax" due to muscle fatigue was numerically presented.

研究分野：運動生理学

キーワード：運動 中枢性疲労 末梢性疲労 認知機能 運動関連電位

1. 研究開始当初の背景

持続的に高いパフォーマンスを発揮するためには、疲労を踏まえた筋出力調節や全身持久力を踏まえたペース配分、すなわち疲労のマネジメントが競技成績を左右する。暑熱環境下では運動パフォーマンスが低下することはよく知られている。暑熱環境下における運動時には、体温が過剰に上昇しやすいため、筋の末梢性疲労だけでなく、高体温による中枢性疲労が最大筋力発揮を低下させる。

運動パフォーマンスは最大筋力発揮だけでなく、巧緻性や柔軟性のような筋出力調節や、状況判断力や集中力のような認知処理機能も重要である。これらの要素は高次機能によって調整されているため、中枢性疲労に影響される可能性がある。これまでに我々は、暑熱環境下での認知処理機能に関する研究に取り組んだ。本研究では、新たに筋出力調節および循環調節と高次機能の連関を評価することを試みる。

2. 研究の目的

本研究では、生理学的視点とバイオメカニクスの視点を融合し、筋出力調節および循環調節に対する高次機能の関与を客観的に評価する方法の確立を試みることである。中枢性疲労、末梢性疲労、筋出力調節、および循環調節に連関する脳活動指標を時間的および空間的に評価し、効果的な疲労マネジメント方法を構築することを目的とした。

3. 研究の方法

(中枢性疲労) 中枢性疲労を誘発する方法として、暑熱負荷による高体温と長時間の高強度運動がある。後者は研究期間後半に予定していたが COVID-19 の影響もあり、感染リスクを避けるために断念した。研究期間前半に計画した高体温による中枢性疲労は予定通り実施され、水循環服を用いて深部体温を 1.5°C 程度上昇させる実験を実施した。セントラルコマンドを誘発する自発的運動と外部刺激始動性運動の比較、経頭蓋磁気刺激法による皮質脊髄路の興奮性などを評価した。

(末梢性疲労) 高強度や長時間の運動によって末梢性疲労が生じるとスポーツパフォーマンスが低下すると考えられる。その詳細なメカニズムとして、末梢の代謝受容器からの信号が中枢神経系に伝わり、運動準備、認知・判断、集中などの高次脳機能が影響を受けるためであると推察されるが、末梢性疲労時の運動制御メカニズムの詳細には不明な点が多い。中枢性疲労実験の結果より、運動制御の1つである運動準備に着目し、脳波事象関連電位、近赤外線分光法(NIRS)、中大脳動脈血流速度(MCAV) などから末梢性疲労の脳活動への影響を検討した。また、末梢におけるパフォーマンスを巧緻性から評価した。

(四肢運動の連動性) 上肢の巧緻性を必要とする競技では下肢の不安定さがパフォーマンスに影響することから野球のピッチャーは持久性トレーニングを重要視している。一方で上肢と下肢で独立した運動を実施する際に筋の状態がどのように作用するのかを明らかにするため、上肢の両側で変化量が異なるグレーディング課題などから評価した。

4. 研究成果

(中枢性疲労)

運動を伴わない中枢性疲労を誘発するために、水循環服を用いて深部体温(食道温)を約 1.5°C上昇させる受動的温熱負荷を利用した。運動刺激は 20%の最大掌握運動とし、暑熱負荷前および暑熱中に実施した。刺激呈示方法は運動予期を含む随伴陰性変動(CNV)を誘発する方法(外部刺激始動性運動)と、運動関連電位(MRCP)のみを誘発する方法(自発的運動)の2種類を別日に実施した。CNV の平均振幅は暑熱負荷によって低下したが、MRCP のパラメータは暑熱負荷による影響を受けなかった。MRCP は随意運動に関連する補足運動野・運動前野から一次運動野領域の神経活動を反映し、CNV は運動関連領域の神経活動に加え、2つ目の反応刺激に対する注意・予期等の神経活動も反映する。これらのことから、運動準備に伴う運動関連領域の神経活動には高体温の影響は小さく、運動遂行するまでの準備段階における注意力や集中力などに影響してパフォーマンスを低下させる可能性が示唆された。

高体温による皮質脊髄路の興奮性への影響は経頭蓋磁気刺激法(TMS)によって評価した。安静時運動閾値は高体温の影響を受けなかったが、運動誘発電位の振幅は刺激強度 120 %および 130%において体温上昇によって有意に低下した。経頭蓋磁気刺激による一次運動野への刺激では、刺激強度の増加により動員されるニューロンが多くなると想定される。これらの結果から、暑熱負荷中では運動ニューロンが多く動員されるような高強度の筋収縮時の方が、低強度の筋収縮よりも影響を受けやすいことが示唆された。

(末梢性疲労)

中枢性疲労実験より、自発的運動よりも外部始動性運動の方が疲労の影響を反映しやすいと判断し、CNV に対する末梢性疲労の影響を検討した。CNV の平均振幅は、正中・左右電極において Post の方が Pre よりも有意に増加した。CNV の発生源には前頭前野、運動前野、補足運動野など複数の脳領域が関わっているとされていることより、末梢性疲労の影響は広範な脳領域に及ぶことが示唆された。

の結果を受けて、CNV では運動準備までしか評価できないため、運動中の脳活動を評価するため、MCAV と NIRS を利用した。MCAV でグローバルな変化を、NIRS で局所的な変化を評価した。MCAV では外部刺激始動性運動で呈示される予告刺激に対する微増も観察することができ、疲労によって予告信号に対する反応性が増加することが認められた。NIRS の実験では、疲労の影響に加えて、運動強度および課題難易度の影響についても検討した。NIRS のパラメータの1つである OxyHb は運動強度による差が認められたが、予告刺激の有無は高強度においてのみ差が認められた。また、OxyHb においても課題難易度による差は認められなかった。局所的な相違についてはいくつかの検討課題が残された。これらの結果は、エフォートを必要とする運動強度が強いほど運動開始に伴う脳活動が循環応答の促進に貢献している可能性が示された。

恒常誤差は、減少局面において有意に大きくなり、後半になるにつれて誤差が大きくなった。末梢性疲労が力を抜く筋弛緩時に、特に影響が見られることが示された。また、尺骨手根屈筋の筋放電量は増加局面で有意に増加した。同筋の中央周波数は増加局面、減少局面ともに有意に減少した。これらより、掌握運動課題によって末梢性疲労が起き、増加局面では動員する運動単位数・タイプを変化させながらパフォーマンスの正確性を維持し、減少局面では動員する運動単位数や運動単位タイプを変化させることができず、パフォーマンスを維持できなかったことが示唆された。

(四肢運動の連動性)

上肢(等尺性肘関節屈曲動作)と下肢(等尺性膝関節伸展動作)の出力調節特性について、次の3つの要因、体肢(上肢・下肢)、出力方向(増加・減少)、出力変化量(20、40、60%)について同時に検討することを目的とし、上肢と下肢のパフォーマンス特性の違い(正確性・素早さ・方略)について明らかにした。正確性は上肢・下肢ともに減少方向で難しく、変化量が小さいほど誤差が大きくなった。下肢よりも上肢の方が増加方向において変動性が高くなり、減少方向で恒常誤差が大きくなった。素早さは上肢・下肢ともに増加方向で減少方向よりも反応時間および調節時間が遅延した。ともに変化量が大い場合に反応時間は短縮し、調節時間は延長した。調節速度からみた方略では上肢・下肢で同様の傾向がみられたが、増減時でそれぞれ異なる方略が認められた。

上肢の両側で変化量が異なるグレーディング課題を伴った両側同時力発揮時の運動制御特性について明らかにすることを目的とし、等尺性肘関節屈曲動作を運動課題として、最大随意発揮張力の10%から30%に変化させる10-30課題と10%から50%に変化させる10-50課題を行った。また、条件として、一側条件と両側条件の2つを設定した。張力を指標として、反応時間や調節時間、全体調節時間をみることで素早さを、目標発揮出力と実際の出力との誤差をみることで正確性を評価した。正確性を反映する恒常誤差、絶対誤差、変動誤差においても一側条件と両側条件のどちらにおいても強度差が大きいとプラス方向に大きくなった。一方、素早さを示す反応時間は強度差が小さい方が有意に長く、逆に調節時間は10-30課題の方が10-50課題よりも有意に短かった。全体調節時間において、一側条件の課題間で有意差がみられたが両側条件の課題間にはみられなかった。正確性と素早さの関係は、調節時間と恒常誤差に正の相関が認められ、調節時間が短いほど恒常誤差が小さく、両側条件において、調節時間と絶対誤差に正の相関が認められ、調節時間が短いほど絶対誤差が小さくなることが示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Shibasaki Manabu, Namba Mari, Kamijo Yoshi-Ichiro, Ito Tomoyuki, Kakigi Ryusuke, Nakata Hiroki	4. 巻 7
2. 論文標題 Effects of repetitive exercise and thermal stress on human cognitive processing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physiological Reports	6. 最初と最後の頁 e14003 ~ e14003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14814/phy2.14003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Shibasaki Manabu, Sato Kohei, Hirasawa Ai, Sadamoto Tomoko, Crandall Craig G., Ogoh Shigehiko	4. 巻 70
2. 論文標題 An assessment of hypercapnia-induced elevations in regional cerebral perfusion during combined orthostatic and heat stresses	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physiological Sciences	6. 最初と最後の頁 25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s12576-020-00751-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Yokoyama Naoko, Ohtaka Chiaki, Kato Kouki, Kubo Hiroko, Nakata Hiroki	4. 巻 14
2. 論文標題 The difference in hemodynamic responses between dominant and non-dominant hands during muscle contraction and relaxation: An fNIRS study	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0220100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0220100	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nakata Hiroki, Domoto Ryo, Mizuguchi Nobuaki, Sakamoto Kiwako, Kanosue Kazuyuki	4. 巻 14
2. 論文標題 Negative BOLD responses during hand and foot movements: An fMRI study	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0215736
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0215736	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shironouchi Fuka, Ohtaka Chiaki, Mizuguchi Nobuaki, Kato Kouki, Kakigi Ryusuke, Nakata Hiroki	4. 巻 707
2. 論文標題 Remote effects on corticospinal excitability during motor execution and motor imagery	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Neuroscience Letters	6. 最初と最後の頁 134284 ~ 134284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neulet.2019.134284	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ohtaka Chiaki, Fujiwara Motoko	4. 巻 8
2. 論文標題 Effect of switching force control direction on consecutive compared to discrete adjustment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine	6. 最初と最後の頁 173 ~ 180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7600/jpfsm.8.173	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 中田 大貴、芝崎 学	4. 巻 56
2. 論文標題 認知機能と環境ストレス	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本生気象学会雑誌	6. 最初と最後の頁 3 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11227/seikisho.56.3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shibasaki Manabu, Namba Mari, Kamijo Yoshi-Ichiro, Ito Tomoyuki, Kakigi Ryusuke, Nakata Hiroki	4. 巻 7
2. 論文標題 Effects of repetitive exercise and thermal stress on human cognitive processing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physiological Reports	6. 最初と最後の頁 e14003 ~ e14003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14814/phy2.14003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 芝崎 学	4. 巻 68
2. 論文標題 暑熱環境下の循環調節とトレーニング適応	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 体育の科学	6. 最初と最後の頁 519-525
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 芝崎学
2. 発表標題 暑熱環境下の認知機能と運動パフォーマンス
3. 学会等名 第27回 日本運動生理学会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石倉慶子, 小林史乃, 中田大貴, 芝崎 学
2. 発表標題 暑熱環境下における運動準備に伴う脳活動の変化
3. 学会等名 第58回日本生気象学会 (相模原)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林史乃, 中田大貴, 上條義一郎, 芝崎 学
2. 発表標題 認知課題および寒冷負荷による動的脳血流自動調節能への影響
3. 学会等名 第58回日本生気象学会 (相模原)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nagamatsu A, Watanabe H, Kitajima K, Kiyoe R, Fukue M, Kobayashi F, Nakata H, Shibasaki M
2. 発表標題 The effect of adjunctive cooling gels on core temperature and cognitive function during cooling process in mild hyperthermic individuals
3. 学会等名 Comfort and Samrt Textile International Symposium 2019. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kobayashi F, Nakata H, Shibasaki M
2. 発表標題 Neural activity and network during Go/No-go tasks in heat-stressed individuals
3. 学会等名 Comfort and Samrt Textile International Symposium 2019. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永松彰, 渡辺寛和, 北島幸太郎, 清江龍一, 福江昌幸, 小林史乃, 中田大貴, 芝崎学
2. 発表標題 冷却シートによる暑熱時の認知機能と深部体温への影響
3. 学会等名 日本繊維製品消費科学会2019年次大会(奈良)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shibasaki M, Sato K, Crandall CG, Ogoh S.
2. 発表標題 The dynamics of cerebral blood flow leading up to pre-syncope in heat stressed humans.
3. 学会等名 Experimental Biology 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kobayashi F, Nakata H, Shibasaki M.
2. 発表標題 Neural activity and network during cognitive tasks in heat stressed individuals.
3. 学会等名 Experimental Biology 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Manabu Shibasaki
2. 発表標題 Peripheral mechanisms of cutaneous vasoconstriction –A microdialysis study in cervical spinal cord injured individuals-
3. 学会等名 International Symposium of Sports Medical Science for Persons with Impairments in Wakayama 2018 ~A scholarly legacy to post 2020 Tokyo~ (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Manabu Shibasaki and Hiroki Nakata
2. 発表標題 Neural network during cognitive tasks during whole body heat stress
3. 学会等名 FAOPS2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 全国柔道整復学校協会、彼末 一之	4. 発行年 2020年
2. 出版社 南江堂	5. 総ページ数 262
3. 書名 生理学 (改訂第4版)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中田 大貴 (Nakata Hiroki) (40571732)	奈良女子大学・工学系・准教授 (14602)	
研究分担者	大高 千明 (Ohtaka Chiaki) (00783929)	奈良女子大学・工学系・助教 (14602)	
研究分担者	藤原 素子 (Fujiwara Motoko) (30220198)	奈良女子大学・その他部局等・副学長 (14602)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関