

平成 30 年 9 月 12 日現在

機関番号：33111

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K12712

研究課題名(和文)水中運動時の末梢および中枢循環応答の解明 - 心血管系イベントのリスク管理指標作成 -

研究課題名(英文) Investigation into the peripheral and central circulation responses during exercise in water. -development of specific indicator for risk management of cardiovascular events

研究代表者

佐藤 大輔 (Sato, Daisuke)

新潟医療福祉大学・健康科学部・准教授

研究者番号：60544393

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、水中環境における脳循環および体循環を検証する実験設定を構築し、それぞれの関連性を明らかにするとともに、水温による影響を検証することを目的とした。実験1では、水中環境における脳循環および体循環を検証する実験設定を確立できた。また、浸水によって脳酸素化ヘモグロビン濃度の上昇が見られ、その活動には脳部位特性があることが示された。実験2の結果から、水中環境における脳酸素動態は、水温および水位によって異なることが明らかとなった。これらの結果から、水中環境における運動中の脳循環応答を考慮した安全基準の作成には、体循環、自律神経活動、体温上昇による影響を考慮することが必要であることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：The aims of present study were 1) to develop the experimental setup to examine central and peripheral circulation during water immersion (WI), 2) to explore the relationship between both circulation system, and 3) to examine whether water temperature affect this relationship. In experiment 1, we developed the experimental setup to examine central and peripheral circulation during WI. Using this setup, we found increased oxy-hemoglobin concentrations during WI, and these activities depends on brain area. The results of experiment 2 showed oxy-hemoglobin concentration during WI depends on water temperature and water level. Based on these results, we should consider the effect of peripheral circulation activity, autonomic activity and heating during WI on cerebral circulation activity to develop new criteria for aquatic exercise in safe.

研究分野：神経生理学

キーワード：水中環境 脳循環 体循環

### 1. 研究開始当初の背景

日本における水泳・水中運動愛好家は、年々増加しており、現在では4,000万人に上る(日本水泳連盟,2014)。また、水泳・水中運動は高齢者の健康づくりやリハビリテーションへの利用も増加しており、スポーツ体育分野のみならず、医学・リハビリテーション分野への応用も進んでいる。一方、水に入ること(浸水)による刺激と運動刺激が相まって、心血管系への負荷が増加するため、重大事故に繋がるという危険性をはらんでいる。これは、水泳・水中運動時に見られる重大事故の50%は、脳血管疾患・循環系疾患であることから十分に理解できる(武藤,2009)。

しかし、水中運動を安全に実施する基準については、明確な基準がなく、陸上運動の基準を用いると、客観的な脳酸素動態の評価が含まれていない、浸水刺激に対する脳循環・体循環の評価が含まれていないという問題点がある。応募者のこれまでの研究で、浸水自体が体循環変動だけでなく脳血流動態を変化させることが分かっている(Sato et al.2012,佐藤ら,2014)。従って、脳血流動態を含めた心血管系イベントのリスク管理基準の作成は、直ちに取り組むべき課題である。

### 2. 研究の目的

本研究では、(1)水中環境における脳循環および体循環を検証する実験設定を構築し、(2)それぞれの関連性を明らかにする。また、(3)水温による影響を検証することで、運動環境による違いを明らかにし、水中運動のリスク管理基準の作成への足掛かりとする。

### 3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、2つの実験を実施した。

(実験1)水中環境における脳循環・体循環計測の実験設定と関連性の検証

1)対象者:健常成人男女9名

2)実験プロトコル:測定は、浸水用水槽(SAKAI medical)内にて、33分間の安静座位であった。プロトコルは、(非浸水)陸上安静条件3分、腋下までの注水条件15分、浸水安静条件5分、排水条件5分、陸上安静条件5分とした(図1)。



図1. 実験の様子

### 3)計測内容:

#### 脳酸素動態

近赤外線分光装置(fNIRS, OMM-3000, 島津製作所)を用いて、大脳皮質における酸素化ヘモグロビン(oxyHb)、脱酸素化ヘモグロビン(deoxyHb)、総ヘモグロビン(totalHb)の濃度を計測した。計測領域については、対象者の磁気共鳴画像をもとに、前補足運動野、補足運動野、一次運動野、一次体性感覚野、頭頂連合野を同定した。

#### 頭皮血流量

脳酸素動態の変化には、頭皮血流が多大な影響を及ぼすことが指摘されているため、光ファイバー式レーザー血流計(OMEGAFL0 FLO-C1, ウェーブ)を用いて、前額部の頭皮血流速度を測定した。

#### 下肢筋酸素動態

局所筋酸素動態は、レーザー式組織血液酸素モニター(OMEGAMONITOR BOM-L1TRW, ウェーブ)を用いて、外側広筋のoxyHb, deoxyHb, totalHb濃度を計測した。

#### 酸素摂取量および換気量

全身の酸素動態は、呼気ガス分析器(エアロモニタ AE-310S, MINATO)を用いて、酸素摂取量( $\dot{V}O_2$ )、換気量、呼気終末二酸化炭素分圧( $ET_{CO_2}$ )を計測した。

#### 体循環動態

連続指動脈血圧測定装置(Finometer MDI, Finapres Medical Systems)の測定用カフを左第三指に巻き、指動脈血圧波形から心拍動毎の収縮期血圧、拡張期血圧および心拍数を測定した。平均血圧は(収縮期血圧-拡張期血圧)/3+拡張期血圧の近似式より算出した。

#### 自律神経活動

自律神経活動について、GSRを用いて、皮膚交感神経反応を計測した。

#### 皮膚温

下腿部、大腿部、腹部、胸部および上腕部の皮膚温をハンディタイプ温度計(LT-8, Gram社)にて計測した。

### 4)環境設定

室温 $28 \pm 1$ 、水温 $35 \pm 1$ に設定した。

### 5)実験結果

#### 脳循環について

安静時と比較して、浸水条件において高いoxyHb濃度を示した。注水条件では、水位の上昇とともに増大し、水位が心臓に達した後、大きく増大した。排水条件では、水位の下降とともに、減少した。TotalHbについては、oxyHbと同様の変化を示し、deoxyHbについては、有意な変化は観察されなかった。

脳部位毎に分析すると、一次体性感覚野、頭頂連合野、一次運動野、補足運動野ではoxyHbの増大が認められた。一方で、前補足運動野では有意な変化は認められなかった(図2)。

前額部の頭皮血流についても、oxyHbと同様の変化を示した。

#### 体循環・交感神経活動について

心拍数は、水位の上昇とともに、徐々に低

下する一方で、平均血圧はわずかに低下した。筋酸素動態については、水位の上昇とともに oxyHb 濃度が上昇した。皮膚交感神経活動も、浸水条件において、有意に低下した。

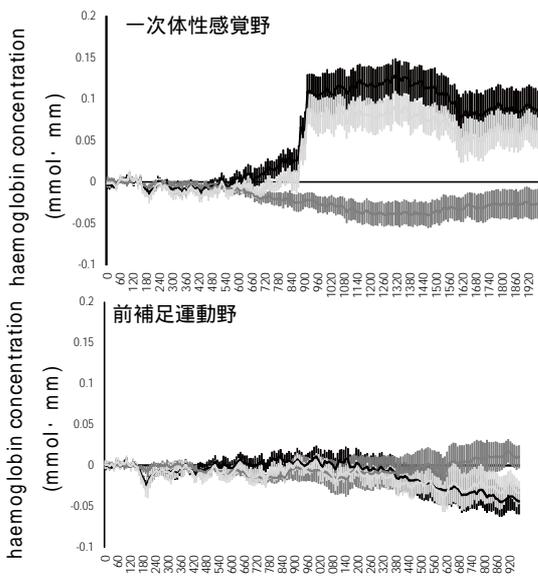


図2．一次体性感覚野および前補足運動野におけるヘモグロビン濃度の変化

(実験2) 水温による脳循環・体循環への影響の検証

1) 対象者: 健康成人男女10名

2) 実験プロトコル: 実験1の結果を踏まえ、水位による変化および温度による変化を抽出できるように、(非浸水)陸上安静3分、腹部までの注水5分、腹部浸水安静5分、腋下までの注水5分、腋下浸水安静5分、排水条件10分、陸上安静条件5分とした。

3) 計測内容

脳酸素動態の計測部位は、実験1において、領域特異性が確認されたため、より広範囲の活動を計測するために、前頭前野を関心領域に加えた。

4) 環境設定

水温は、 $28 \pm 1$  (低温条件)、 $35 \pm 1$  (中立条件)、 $42 \pm 1$  (高温条件)の3条件を設定した。室温は  $28 \pm 1$  とした。3条件は、5日以上の間隔を空けて、別日に実施した。順番は、被験者毎にランダム順とした。

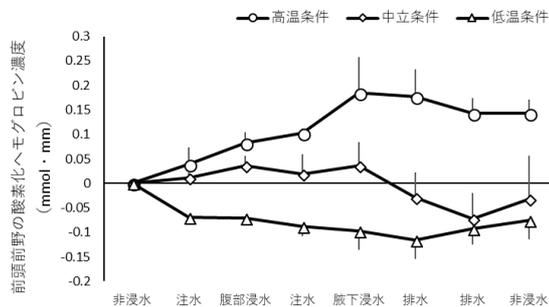
5) 実験結果

中立条件および高温条件において、水位の上昇に伴って、前頭前野領域における oxyHb が有意に増大した。特に、高温条件において、著しい増大が認められた。一方で、低温条件では、低下が認められなかった(図3)。

4. 研究成果

水中環境における運動中の脳循環応答を考慮した安全基準の作成には、浸水による体性感覚入力によって生じる酸素動態の変化、自律神経活動の変化によって生じる血管拡張の影響、運動時の体温上昇によって生じる酸素動態の変化といった複数の要因を別々に検証する必要があると考えられる。

図3．前頭前野の酸素化ヘモグロビン濃度の



変化

5. 主な発表論文等  
(研究代表者は下線)

(雑誌論文)(計8件)

Sato D, Yamazaki Y, Takahashi A, Uetake Y, Nakano S, Iguchi K, Baba Y, Nara R, Shimoyama Y. Water immersion decreases sympathetic skin response during color-word Stroop test. *PLoS One*. 2017;12(7):e0180765.

Sato D, Yamashiro K, Yamazaki Y, Tsubaki A, Onishi H, Takehara N, Maruyama A. Site Specificity of Changes in Cortical Oxyhaemoglobin Concentration Induced by Water Immersion. *Adv Exp Med Biol*. 2017;977:233-240.

Tsubaki A, Takehara N, Sato D, Morishita S, Tokunaga Y, Sugawara K, Kojima S, Tamaki H, Yamazaki Y, Onishi H. Cortical Oxyhemoglobin Elevation Persists After Moderate-Intensity Cycling Exercise: A Near-Infrared Spectroscopy Study. *Adv Exp Med Biol*. 2017;977:261-268.

Takehara N, Tsubaki A, Yamazaki Y, Kanaya C, Sato D, Morishita S, Onishi H. Changes in Oxyhemoglobin Concentration in the Prefrontal Cortex and Primary Motor Cortex During Low- and Moderate-Intensity Exercise on a Cycle Ergometer. *Adv Exp Med Biol*. 2017;977:241-247.

Yamazaki Y, Sato D, Yamashiro K, Tsubaki A, Yamaguchi Y, Takehara N, Maruyama A. Inter-individual Differences in Exercise-Induced Spatial Working Memory Improvement: A Near-Infrared Spectroscopy Study. *Adv Exp Med Biol*. 2017;977:81-88.

Tsubaki A, Takai H, Oyanagi K, Kojima S, Tokunaga Y, Miyaguchi S, Sugawara K, Sato D, Tamaki H, Onishi H. Correlation Between the Cerebral Oxyhaemoglobin Signal and Physiological Signals During Cycling

Exercise: A Near-Infrared Spectroscopy Study. Adv Exp Med Biol. 2016;923:159-166.

Tsubaki A, Takai H, Kojima S, Miyaguchi S, Sugawara K, Sato D, Tamaki H, Onishi H. Changes in Cortical Oxyhaemoglobin Signal During Low-Intensity Cycle Ergometer Activity: A Near-Infrared Spectroscopy Study. Adv Exp Med Biol. 2016;876:79-85.

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. 2015 Nov 23;10(11):e0142581.

〔学会発表〕(計 1 1 件)

Sato D, Yamazaki Y, Yamashiro K, Uetake Y, Nakano S, Onishi H, Tsubaki A, Shimoyama Y, Maruyama A. Whole-hand water immersion does not change corticospinal excitability in humans. 22th annual congress of European College of Sport Science (Germany), 2017.7.5-8.

Yamazaki Y, Sato D, Yamashiro K, Uetake Y, Nakano S, Maruyama A. The effect of acute low-intensity aerobic exercise on inhibitory and excitatory circuits in the primary motor cortex. 22th annual congress of European College of Sport Science (Germany), 2017.7.5-8.

Yamashiro K, Sato D, Onishi H, Sugawara K, Otsuru N, Nakazawa S, Yamazaki Y, Kameyama S and Maruyama A. Memory-based M100 component in the somatosensory cortex: An MEG study. Society for Neuroscience ( USA ), 2017.11.11~11.15.

佐藤大輔, 山崎雄大, 山代幸哉, 中野沙紀, 上竹好仁, 井口華穂, 椿淳裕, 大西秀明, 丸山敦夫. 浸水が安静時脳活動に及ぼす影響. 第 72 回日本体力医学会, 愛媛, 2017.9.16-18.

山崎雄大, 佐藤大輔, 山代幸哉, 中野沙紀, 丸山敦夫. 低強度有酸素性運動が一次運動野の抑制・興奮機能に与える影響. 第 72 回日本体力医学会, 愛媛, 2017.9.16-18.

山崎雄大, 佐藤大輔, 山代幸哉, 中野沙紀, 大西秀明, 丸山敦夫. 一過性の低強度有酸素性運動による一次運動野の上肢および下肢領域の抑制機能の変化. 第 47 回日本臨床神経生理学会, 横浜, 2017.11.29-12.1.

Sato D, Yamashiro K, Yamazaki Y,

Tsubaki A, Onishi H, Uetake Y, Nakano S, Shimoyama Y, Maruyama A. Priming effects of water immersion on paired associative stimulation induced neural plasticity in the primary motor cortex. 21th annual congress of European College of Sport Science. (Vienna, Austria), 2016.7.6-9.

佐藤大輔, 丸山敦夫. 「水」と一次運動野の可塑性. 第 10 回日本作業療法研究学会学術大会(新潟), 2016.5.21-22.

佐藤大輔, 山崎雄大, 山代幸哉, 丸山敦夫. 系列的運動学習における個人差に関する研究. 第 67 回日本体育学会(大阪), 2016.8.24-26.

佐藤大輔, 山代幸哉, 山崎雄大, 大西秀明, 椿淳裕, 中野沙紀, 上竹好仁, 下門洋文, 下山好充, 丸山敦夫. 連合性ペア刺激に対する一次運動野の可塑性の個人差. 第 71 回日本体力医学会(岩手), 2016.9.23-25.

佐藤大輔, 山代幸哉, 山崎雄大, 大西秀明, 椿淳裕, 丸山敦夫. 事前浸水による PAS25 の可塑性強化の神経基盤. 第 46 回日本臨床神経生理学会(福島), 2016.10.27-29.

〔図書〕(計 4 件)

佐藤大輔; 征矢英昭, 本山貢, 石井好二郎編. 水中運動は介護予防・寝たきり予防に効果があるの? . もっとなっとく使えるスポーツサイエンス. 1 版. 東京: 講談社サイエンティフィック; 2017: 116-118.

佐藤大輔; 佐藤進, 池本幸雄, 野口智博, 滝瀬定文編. 水泳・水中運動が身体にもたらす効果. 中高年期における水泳・水中運動. 1 版. 東京: 杏林書院; 2016: 69-78.

佐藤大輔; 佐藤進, 池本幸雄, 野口智博, 滝瀬定文編. 水中運動. 水泳・水中運動が身体にもたらす効果. 水中運動と陸上運動の効果の比較. 1 版. 東京: 杏林書院; 2016: 93-100.

佐藤大輔; 佐藤進, 池本幸雄, 野口智博, 滝瀬定文編. 目的別運動処方の実際. 水泳・水中運動による転倒・寝たきり予防. 1 版. 東京: 杏林書院; 2016: 151-156.

〔その他〕

ホームページ等  
新潟医療福祉大学運動機能医科学研究所  
<http://www.ihms.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 大輔 (SATO, Daisuke)

新潟医療福祉大学・健康科学部健康スポーツ学科・准教授

研究者番号: 60544393

(2)研究分担者

山代 幸哉 (YAMASHIRO, Koya)

新潟医療福祉大学・健康科学部健康スポーツ学科・講師

研究者番号：20570782

椿 淳裕 (TSUBAKI, Atsuhiko)

新潟医療福祉大学・医療技術学部理学療法学科・准教授

研究者番号：50410262