

令和 5 年 5 月 15 日現在

機関番号：33111

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K19564

研究課題名(和文)低温環境下におけるふるえ発生メカニズムの解明-皮膚温度受容器の役割に着目して-

研究課題名(英文)The mechanism of shivering in cold environments - focusing on the role of skin thermoreceptors.

研究代表者

藤本 知臣 (Fujimoto, Tomomi)

新潟医療福祉大学・健康科学部・講師

研究者番号：70847798

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、冷水環境下で生じるふるえや温度感覚の悪化に対する皮膚温度受容器(TRPM8およびTRPV1)や皮膚温度感受性がどのように関連しているか、また、それらが寒冷に対する順化によってどのように適応するかを検討した。

その成果として、1)冷水環境下での運動時の温度感覚には皮膚の冷感受性(冷たさに対する敏感さ)が関与しており、冷たさに対して敏感なほど冷水環境下での運動後に寒さを感じる、2)皮膚の冷感受性は一般健康人よりも寒冷に順化していると考えられるオープンウォータースイミング選手において鈍化している傾向が明らかとなった。一方、皮膚温度受容器に関しては更なる検討が必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

寒冷環境下での運動中には体温低下に伴うふるえや温度感覚の悪化が運動パフォーマンスの低下や競技の中断につながる。本研究より、冷水環境下での運動中には深部体温にかかわらず強く寒さを感じる場合があり、それには皮膚の冷感受性の高さ(皮膚の冷たさに対する敏感さ)が影響していることが示唆された。また、健康人よりも寒冷に適応していると考えられるオープンウォータースイミング選手では皮膚の冷感受性が鈍化傾向にあったことから、寒冷環境下での運動時のパフォーマンスの改善や競技中断を減らすためには、寒冷順化が有効な方策となりうるかもしれない。今後は、寒冷順化に伴う皮膚温度受容器の関連を詳細に調べていく必要がある。

研究成果の概要(英文)：The present study investigated how skin thermoreceptors (TRPM8 and TRPV1) and skin thermal sensitivity are related to the shivering and deteriorated thermal sensation in cold water and how they adapt through acclimation to cold.

The results showed that 1) cold sensitivity of the skin is involved in whole-body thermal sensation during exercise in cold water, and the more sensitive the skin is to cold, the colder it feels after exercise in cold water, and 2) cold sensitivity of the skin was found to be blunted in open-water swimmers, who are thought to be more cold-acclimatized, than general healthy subjects. On the other hand, further studies about skin thermoreceptors are needed.

研究分野：運動生理学、環境生理学

キーワード：運動時低体温症 ふるえ 温度感覚 TRPM8 TRPV1 オープンウォータースイミング 皮膚温度感受性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、競技人口が増加しているトライアスロンにおけるスイムやオープンウォータースイミング (OWS) などの屋外水中スポーツは幅広い水温帯で行われる。特に、低水温下での競技時には、運動によって筋において多量の熱を産生しているにもかかわらず、体温が低下し低体温症に陥ることや (Castro et al. 2009)、強い寒さ感覚によって競技の継続が困難になり (Drigny et al. 2021)、時には命を落とす危険さえある。そのため、低水温環境下における屋外水中スポーツ競技の安全性および運動パフォーマンス向上のためには、運動時低体温症の発症を防ぐことが非常に重要である。

ヒトの体温は産熱と放熱のバランスによって調節されており、寒冷に暴露されることで体温が低下すると、体温調節反応であるふるえなどが生じることで熱を産生し、体温を維持する。近年、申請者らの研究グループは、水中運動時において深部体温が低下する独自の実験モデルを用いて、体温が低下した際に生じるふるえの特性や温度感覚について検討し、安静時と比較して運動時には体温低下時にふるえの開始が遅れること (ふるえの体温閾値が変化する) 温度感覚が鈍化することを明らかにし、これらが運動時にも関わらず生じる低体温症の発症要因の 1 つである可能性を示した (Fujimoto et al. 2019, 2021)。寒冷環境下での運動時の体温調節反応の開始や温度感覚の変化には皮膚の温度受容器が関与している可能性があるが (Botonis et al. 2018)、それらが体温低下時の体温調節反応や温度感覚にどのように関与しているか、また、寒さに対する慣れによってどのように変化するかは明らかではない。そこで本研究では、実際の OWS 競技が冷水環境下で行われた場合の体温や温度感覚、それに対する皮膚温度感受性や温度感覚受容器の関連を検討し、運動時低体温症の発症メカニズムの解明と予防法の開発につながる知見を得ることを目指した。

2. 研究の目的

本研究では、冷水環境下での体温や温度感覚、それらに対する皮膚温度感受性の影響を明らかにするために、以下の課題を設定し、検討した。

- (1) 冷水環境下における OWS 時の深部体温変動、温度感覚と皮膚温度感受性の関連
・冷水環境下における 10 kmOWS 時のエリート選手の深部体温変動や温度感覚について検討し、それらに対して皮膚温度感受性がどのように関連しているかを明らかにする。
- (2) エリート OWS 選手の皮膚温度感受性
・一般健常人と日頃の競技やトレーニング参加によって一般健常人よりも寒さに慣れていると考えられるエリート OWS 選手の皮膚温度感受性を比較し、エリート OWS 選手の皮膚温度感受性特性を明らかにする。

3. 研究の方法

- (1) 冷水環境下における OWS 時の深部体温変動、温度感覚と皮膚温度感受性の関連
9名のエリート OWS 選手 (日本代表レベル、男性 5 名、女性 4 名) を対象に、水温 22 の冷水環境下における 10 kmOWS レース時の深部体温変動、温度感覚を測定した。深部体温の指標として消化器温を測定し (体温測定用ピルを服用)、レース中の泳速度、レース前後の温度感覚 (-20~20 のスケール、0 が中立) なども測定した。また、別日に 9 名中 6 名の選手を対象に、局所皮膚温度感受性を測定した。局所皮膚温度感受性は、ペルチェ素子でできた皮膚温冷覚測定装置を用いて、温かさおよび冷たさを感じ始めた時点の皮膚温度と測定開始時の皮膚温度の差分を局所皮膚温度感覚の指標として用いた。さらに、OWS 時の深部体温、温度感覚、皮膚温度感受性との関連について相関分析を用いて検討した。

- (2) エリート OWS 選手の皮膚温度感受性特性

17名の健康な成人 (男性 7 名、女性 10 名) および 7 名のエリート OWS 選手 (日本代表レベル、男性 6 名、女性 4 名) を対象に、気温 25、湿度 50% の常温環境下において前腕部の局所皮膚温度感受性測定を行った。局所皮膚温度感受性は、ペルチェ素子でできた皮膚温冷覚測定装置を用いて、温かさおよび冷たさを感じ始めた時点の皮膚温度と測定開始時の皮膚温度の差分を局所皮膚温度感覚の指標として用いた。

4. 研究成果

- (1) 冷水環境下における OWS 時の深部体温変動、温度感覚と皮膚温度感受性の関連
エリート OWS 選手が水温 22 の冷水環境下で 10 kmOWS を行った場合に、OWS 中の体温は徐々に上昇した。また、OWS 前と比較して 9 名中 8 名の深部体温が上昇し、その平均は 0.8 であった (図 1A)。一方、OWS 後の全身の温度感覚は選手によって「暑い」から「寒い」まで様々であり、大きな個人差が見られた (図 1B)。

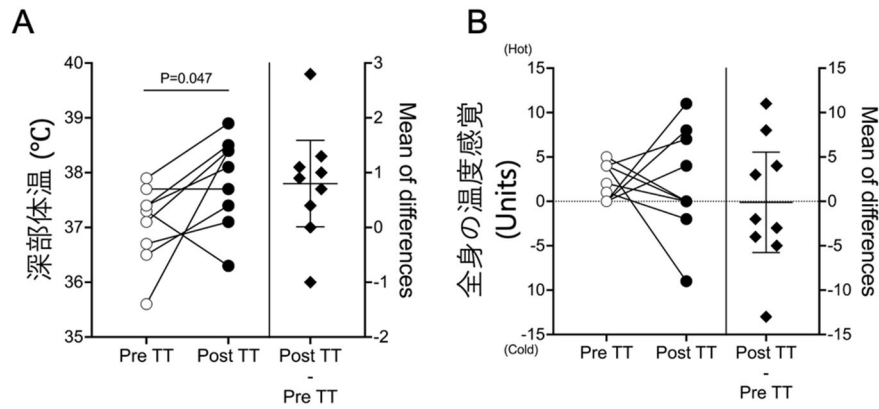


図 1. 10 kmOWS 前後の深部体温 (A) および全身の温度感覚 (B)

OWS とは別日に 9 名中 6 名の選手で測定した局所皮膚温度感受性は、温感受性が 3.2 [95% 信頼区間: 1.7 - 7.4]、冷感受性が -2.4 [95% 信頼区間: -3.3 - -1.4] であった。また、10 kmOWS 後の温度感覚、深部体温、および皮膚温度感受性との関連を相関分析により検討した。その結果、10 kmOWS 後の温度感覚と深部体温、皮膚温度感受性との間には関係が見られなかった (図 2A, B)。これは、エリート OWS 選手が冷水環境下で運動をした時の温度感覚には深部体温や皮膚の温かさに対する感受性は関与しない可能性を示している。一方、10 kmOWS 後の温度感覚と皮膚冷感受性との間に負の相関関係が見られた (図 2C)。これは、エリート OWS 選手が冷水環境下で運動をした時の温度感覚に深部体温よりも皮膚の冷たさに対する感受性が重要である可能性を示している。

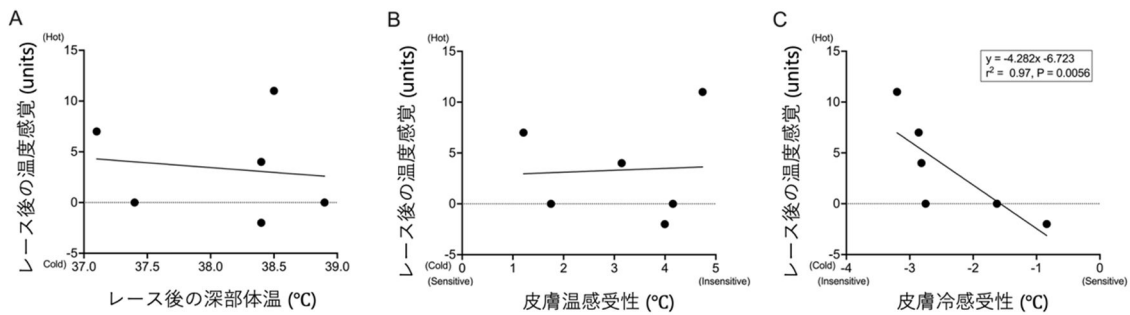


図 2. 10 kmOWS 後の全身の温度感覚と深部体温 (A)、皮膚温度感受性 (B)、および皮膚冷感受性 (C) との関係

(2) エリート OWS 選手の皮膚温度感受性特性

本研究では、健常成人の皮膚温度感受性は 2.4 [95% 信頼区間: 1.9 - 2.8]、冷感受性は -1.7 [95% 信頼区間: -2.1 - -1.3] であった。また、エリート OWS 選手の皮膚温度感受性は 3.3 [95% 信頼区間: 2.1 - 4.5]、冷感受性は -2.5 [95% 信頼区間: -3.5 - -1.6] であった。本研究では、今後エリート OWS 選手の追加測定を行うため統計解析は行っていないが、健常成人

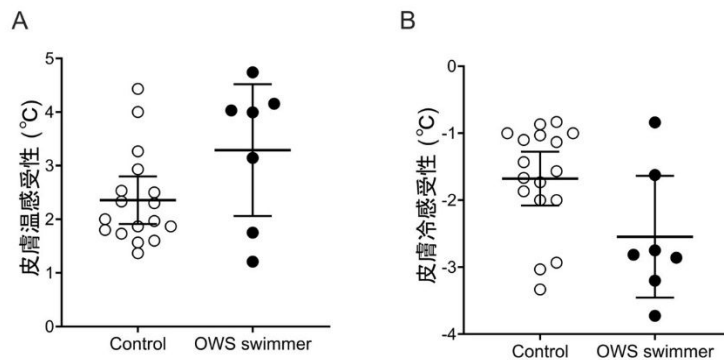


図 3. 健常成人および OWS 選手の皮膚温度感受性 (A) および皮膚冷感受性 (B) よりもエリート OWS 選手で皮膚温度感受性および冷感受性は鈍い傾向にあった。

<得られた成果の国内外における位置づけとインパクト>

本研究では、実際の OWS 競技が冷水環境下で行われた場合の体温や温度感覚、それに対する皮膚温度感受性や温度感覚受容器の関連を検討し、運動時低体温症の発症メカニズムの解明と予防法の開発につながる知見を得ることを目指し、2つの研究課題に取り組んだ。研究課題(1)で得られた成果は、冷水環境下(水温 22℃)における OWS 中には、エリート OWS 選手の体温が低下しないことを示している。これまで、10 kmOWS 中に低体温症が生じることを報告しているが(Castro et al. 2009)、この先行研究では寒冷下での運動後の深部体温測定に不向きである鼓膜温を深部体温の指標として使用している。25 kmOWS 中に低体温による競技リタイアが生じることを報告した先行研究は、本研究よりも低速度かつ長時間の運動であったため(Drigny et al. 2021)、実際にはエリート OWS 選手が水温 20℃程度の冷水環境下で 10 kmOWS を行う際には、低体温症は起こりにくい可能性が考えられる。また、本研究の参加者の多くが 10 kmOWS により深部体温が上昇したにもかかわらず、レース後の全身の温度感覚は様々であり、この個人差には皮膚冷感受性が関連していた。ヒトの全身の温度感覚は身体深部と皮膚からの温度入力によって調節される。水の熱伝導率は空気約 25 倍であることから(Pendergast et al. 2015)、水中運動時には深部体温よりも皮膚の冷感受性が重要であるのかもしれない。さらに、皮膚の冷感受性は健康成人よりも寒冷に適応していると考えられる OWS 選手において鈍い傾向にあった。これは、寒冷環境への順化が皮膚冷感受性を鈍化させ、OWS 中の全身の温度感覚を改善できる可能性を示した研究であり、冷水環境下で行われるスポーツやレジャー活動の安全性やパフォーマンスの向上につながると考えられる。なお、研究課題(1)の成果については、当該分野におけるトップジャーナルに投稿・レビュー中である。

<今後の展望>

本研究では、冷水環境下で競技を行っている OWS 選手において、競技中の体温、温度感覚や OWS 選手の皮膚温度感受性などについて検討した。今後は、実際に寒冷順化が寒冷に適応していない人の皮膚温度感覚に及ぼす影響や、OWS のパフォーマンスに及ぼす影響を検討していくことで、冷水環境下で行われるスポーツやレジャー活動の安全性やパフォーマンスの向上につなげる。また、本研究では、皮膚温度感覚に関連していると考えられるヒトの皮膚温度感受性についての検討まで行うことができなかった。近年、温度を感知して活性化される温度感受性 TRP チャネルがノーベル賞を受賞したことで脚光を浴びていることから、今後はヒトの TRP チャネルがヒトの寒冷環境下での運動中の体温や体温調節反応、温度感覚に温度感受性 TRP チャネルがどのように貢献しているか、また、寒冷順化により温度感受性 TRP チャネルの働きがどのように変化するかを明らかにすることで、寒冷環境下での運動時の安全性や運動パフォーマンスの向上につながる方策を検討していく必要がある。

<引用文献>

1. Castro RR, Mendes FS, Nobrega AC. Risk of hypothermia in a new Olympic event: the 10-km marathon swim. *Clinics (Sao Paulo)*.64:351-356. 2009
2. Drigny J, Rolland M, Pla R, et al. Risk Factors and Predictors of Hypothermia and Dropouts During Open-Water Swimming Competitions. *Int J Sports Physiol Perform*. 16(11):1692-1699.2021
3. Fujimoto T, Tsuji B, Sasaki Y, Dobashi K, Sengoku Y, Fujii N, Nishiyasu T. Low-intensity exercise delays the shivering response to core cooling. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*. 316:R535-R542. 2019
4. Fujimoto T, Fujii N, Dobashi K, Cao Y, Matsutake R, Takayanagi M, Kondo N, Nishiyasu T. Effects of low-intensity exercise on local skin and whole-body thermal sensation in hypothermic young males. *Physiol Behav*. 240:113531. 2021
5. Botonis PG, Kounalakis SN, Cherouveim ED, Koskolou MD, Geladas ND. Effects of menthol application on the skin during prolonged immersion in cool and cold water. *Scand J Med Sci Sports*. 28, 1193-1200. 2018
6. Pendergast DR, Moon RE, Krasney JJ, Held HE, Zamparo P. Human Physiology in an Aquatic Environment. *Compr Physiol*. 5(4):1705-1750. 2015

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Ikarashi Koyuki, Sato Daisuke, Fujimoto Tomomi, Edama Mitsuaki, Baba Yasuhiro, Yamashiro Koya	4. 巻 32
2. 論文標題 Response Inhibitory Control Varies with Different Sensory Modalities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Cerebral Cortex	6. 最初と最後の頁 275 ~ 285
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/cercor/bhab207	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 Fujimoto Tomomi, Fujii Naoto, Dobashi Kohei, Cao Yinhang, Matsutake Ryoko, Takayanagi Masataka, Kondo Narihiko, Nishiyasu Takeshi	4. 巻 240
2. 論文標題 Effects of low-intensity exercise on local skin and whole-body thermal sensation in hypothermic young males	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physiology & Behavior	6. 最初と最後の頁 113531 ~ 113531
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physbeh.2021.113531	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 Baba Yasuhiro, Sato Daisuke, Otsuru Naofumi, Ikarashi Koyuki, Fujimoto Tomomi, Yamashiro Koya	4. 巻 18
2. 論文標題 Does Long-Term Training in a Water Immersion Environment Change Interoception?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Environmental Research and Public Health	6. 最初と最後の頁 10259 ~ 10259
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/ijerph181910259	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 成田 健造, 藤本 知臣, 仙石 泰雄	4. 巻 13
2. 論文標題 競泳競技のインターバルトレーニングにおける運動強度とその実施順序の違いが生理的応答に及ぼす影響に関する事例研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 スポーツパフォーマンス研究	6. 最初と最後の頁 462-471
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 有
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 -

1. 著者名 Fujimoto Tomomi, Dobashi Kohei, Fujii Naoto, Matsutake Ryoko, Nishiyasu Takeshi	4. 巻 324
2. 論文標題 Hypocapnia attenuates local skin thermal perception to innocuous warm and cool stimuli in normothermic resting humans	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology	6. 最初と最後の頁 R120 ~ R127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1152/ajpregu.00126.2022	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 -

[学会発表] 計13件(うち招待講演 1件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Tomomi Fujimoto, Yufuko Kataoka, Koichi Watanabe, Takeshi Nishiyasu, Naoto Fujii.
2. 発表標題 Role of temperature sensitive TRPM8 on cutaneous vasoconstriction to cold stress in humans.
3. 学会等名 ARIHHP International Forum 2022 "For the Cutting edge Collaborative Research in Human High Performance".
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤本 知臣
2. 発表標題 ヒトの寒冷暴露時の皮膚血管収縮反応の新規メカニズムの解明-温度感受性TRPM8チャネルの役割-
3. 学会等名 ARIHHP International Forum 2022 "For the Cutting edge Collaborative Research in Human High Performance". (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤本 知臣, 土橋 康平, 松竹 涼子, 藤井 直人, 西保 岳
2. 発表標題 動脈血二酸化炭素分圧低下が常体温時の局所皮膚温度感覚に及ぼす影響
3. 学会等名 第76回 日本体力医学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 五十嵐 小雪, 佐藤 大輔, 藤本 知臣, 江玉 睦明, 馬場 康博, 山代 幸哉
2. 発表標題 感覚モダリティによる反応抑制の違い-性差に着目して-
3. 学会等名 第76回 日本体力医学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 若林 斉, 三浦 愛子, 北 樹乃, 藤本 知臣, 前田 享史, 亀谷 俊満, 松下 真美, 斉藤 昌之
2. 発表標題 温熱的中立環境におけるメンソール溶液塗布による代謝亢進と褐色脂肪細胞活性の関係
3. 学会等名 第76回 日本体力医学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小島 淳平, 片桐 陽, 土橋 康平, 藤本 知臣, 西保 岳, 藤井 直人
2. 発表標題 TRPV1およびTRPM8活性が局所温変化時の皮膚血流および温度感覚に及ぼす影響
3. 学会等名 第76回 日本体力医学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三柳 泉水, 一之瀬 真志, 藤本 知臣, 松竹 涼子, 藤井 直人, 西保 岳
2. 発表標題 間欠的息止めを伴う高強度運動中の呼吸頻度の違いが呼吸循環応答に及ぼす影響
3. 学会等名 第76回 日本体力医学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 越智 元太, 藤本 知臣, 佐藤 大輔
2. 発表標題 仮想現実環境 (VR) は運動時の気分を高めるか: VRヘッドセットを用いた予備的検討
3. 学会等名 第76回 日本体力医学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三浦 愛子, 若林 斉, 北 樹乃, 藤本 知臣, 前田 享史, 亀谷 俊満, 松下 真美, 斉藤 昌之
2. 発表標題 ヒト褐色脂肪細胞活性とメンソール溶液塗布による代謝亢進の関係.
3. 学会等名 温熱生理研究会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomomi Fujimoto, Yufuko Kataoka, Glen P. Kenny, Alex B. Lloyd, Josh T. Arnold, Stephen J. Bailey, Tatsuro Amano, Koichi Watanabe, Takeshi Nishiyasu, Naoto Fujii
2. 発表標題 TRPM8 contributes to cutaneous vasoconstriction during local, but not whole-body cooling in humans
3. 学会等名 International Conference on Environmental Ergonomics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年~2023年

1. 発表者名 Tomomi Fujimoto, Aiko Miura, Juno Kita, Mami Matsushita, Takafumi Maeda, Toshimitsu Kameya, Masayuki Saito, Hitoshi Wakabayashi
2. 発表標題 Relationship between human brown adipose tissue activity and thermogenesis induced by menthol skin application
3. 学会等名 International Conference on Environmental Ergonomics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年~2023年

1. 発表者名 藤本 知臣, 山代 幸哉, 穴澤 沙也可, 巻瀨 泰輝, 五十嵐 小雪, 越智 元太, 佐藤 大輔
2. 発表標題 皮膚へのメントール塗布が温度刺激時の感覚処理に及ぼす影響
3. 学会等名 第77回 日本体力医学会大会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 藤本 知臣, 松浦 由生子, 馬場 康博, 原 怜来
2. 発表標題 ウェットスーツ着用がオープンウォータースイミングのトレーニング中の体温動態に及ぼす影響 ~ウェットスーツを用いたトレーニングの安全性検証~
3. 学会等名 水泳水中運動学会 2022年次大会
4. 発表年 2022年～2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 越中 敬一	4. 発行年 2023年
2. 出版社 みらい	5. 総ページ数 216
3. 書名 運動生理学	

〔産業財産権〕

〔その他〕

健康スポーツ学科 藤本知臣講師がスポーツ中の低体温症の発生要因解明に取り組みました https://www.nuhw.ac.jp/n/topics/3537/
--

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------