

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K11649

研究課題名(和文) ヒトは水中環境で自身の身体動作をどの程度再現できるのか？単関節動作による検討

研究課題名(英文) How much human can reproduce their motion in water environment - an investigation with single joint -

研究代表者

金田 晃一 (Kaneda, Koichi)

千葉工業大学・先進工学部・教授

研究者番号：10534589

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)：本研究は、自身がイメージした動作を水中環境でどの程度再現できるのかを明らかにすることを目的とした。実験1では自身がイメージした肘関節屈曲角度の再現課題、実験2では陸上環境で直前に記憶した肘関節屈曲角度の再現課題を、水中環境と陸上環境で実施した。その結果、水中環境では自身がイメージした肘関節屈曲角度をやや小さく見積もり、主動筋の筋活動量の減少と主動筋と拮抗筋のバランスが変化することが原因として考えられた。また、陸上環境で直前に記憶した肘関節屈曲角度は水中環境ではやや小さく見積もる傾向も見られた。以上より、水中環境での運動では自身のイメージより大きな身体動作を意識することが重要であると考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水中環境での運動は健康増進やリハビリテーションでも用いられるが、身体機能や身体動作の維持・改善や再獲得を目的とする際は、目的とする身体動作を水中環境でどの程度再現できるのかが重要な要素の1つである。本研究では、水中環境では自身の身体動作イメージや陸上環境で記憶した身体動作をやや小さく見積もる傾向が見られた。従って、水中環境で運動を行う場合は身体動作を意識的に大きく行うことが重要であると考えられる。また、身体動作の制御では筋の協調が重要な要素の1つである。本研究では、水中環境で特異な主動筋と拮抗筋の協調作用が認められた。従って、身体動作の制御機能を解明するための一助となることが考えられる。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to reveal the motion reproducibility of self-imagined in the water environment. The two experiments were set. 1- Reproduce self-imagined motion, 2 - Reproduce pre-memorized motion with land environment. The reproduction of the both experiments were conducted with and without water immersion of single arm. During session, elbow joint angle and upper limb muscle activity was measured. As results, the self-imagined elbow joint angle estimated smaller in the water environment than the land environment. The reduced muscle activity mainly in agonist muscle and changed agonist-antagonist activity balance in the water environment were considered to be affected the results. In addition, the pre-memorized elbow joint angle estimated smaller in the water environment than the land environment. Therefore, acting with larger motion when exercising in the water environment regardless of self-imagined or pre-memorized was important for gaining the effect of the exercise.

研究分野：応用健康科学

キーワード：水中環境 再現性 動作 姿勢 筋活動

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、健康増進やリハビリテーションに対する効果的な取り組みが多く紹介されている。この中で、水中環境を用いたものもその一つである(Becker, 2009)。その理由は、水の物理的特性である浮力・抵抗・水圧・水温が、それぞれヒトの呼吸・循環機能や筋・骨格系に対して影響を及ぼすためである。特に浮力や抵抗は、身体を動作させる際に直接的に影響する。

先行研究では、歩行を中心に水中環境での動作や筋活動、床半力などが調査され、陸上環境との違いについて報告されている(Barela et al., 2006; Kaneda et al., 2012a)。水中環境で運動を行う利点として、①日常生活で実施が困難となった身体動作を水中環境では行うことができること、②目的となる身体動作そのものを水中環境で実施しながらトレーニングを行うことができること、といった点が挙げられる(Sato et al., 2011)。Kaneda et al. (2012b)は、水中環境と陸上環境における歩行動作がどの程度似ているのかについて、音声信号などの波形解析で用いられる動的時間伸縮法による動作パターンの評価を行い、両環境間での動作の類似部分と非類似部分を明らかにした。また、Sato et al. (2015)は、水中環境では身体動作の発現に関わる脳の活性が高まることを発見し、水の刺激入力が身体動作とその制御機能に影響を及ぼす可能性を報告した。以上より、水中環境では陸上環境での身体動作をある程度再現することができ、身体動作を発現する際に必要な脳の活性も高めることができるため、水中環境での運動は身体機能や身体動作の維持・改善や動作の再獲得を目的とした健康増進やリハビリテーションとして効果的であると考えられる。

しかし、ヒトは自らがイメージした身体動作を水中環境でどの程度再現できるのか、については明らかにされていない。水の密度は空気の約 800 倍であり、水中環境では身体に浮力が働き、身体動作に伴い身体が受ける抵抗力は動作速度の 2 乗に比例して大きくなる(Becker, 2009)。従って、水の抵抗力や浮力はヒトが身体動作を行う際に筋や関節の感覚受容器に対して影響を及ぼすため、水中環境での筋や関節の感覚は陸上環境と異なるはずである。健康増進やリハビリテーションでは、どの程度目的の動作に似ているかについてその再現の程度を把握し、身体動作の修正と反復を繰り返すことでトレーニング効果を高めていく。そのため、水中環境で身体動作のトレーニングを行う際には、水中環境では陸上環境の動作をどの程度再現することができるのか、について知見を得ておく必要がある。このような情報を元に運動の指導や実践を行うことが重要であると考えられる。

身体動作は関節を中心に発現し、その関節をまたぐ筋の収縮を伴う。身体動作に関する情報は筋や関節にある感覚受容器から脳へ伝達されて知覚される(速水, 2018)。身体動作と感覚受容器に関する研究では、主に肘関節の動作が用いられることが多い(Brockett et al., 1997; Walsh et al., 2004)。水中環境でも肘関節の動作と感覚受容器に関する研究が行われている(Bock, 1994; 森井ら, 2009)。金田ら(2010)は、水泳競技者を対象に肘関節の屈曲動作を計測し、陸上環境と比較して水中環境は約 10 度、屈曲角度を過小評価すると報告した。水中環境では水の刺激による影響のために身体に意識を置く必要があると考えられ、体操選手など身体に意識を置いてトレーニングを行なう者は身体感覚が優れていることから(Niespodzinski et al., 2018)、水中環境でトレーニングを行なう水泳競技者と一般者では身体感覚が異なると考えられる。従って、得られた知見を健康増進やリハビリテーションに応用するには、一般者を対象にした調査も必要であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、一般者を対象に水中環境で自身の身体動作をどの程度再現できるのかを明らかにすることである。そのため、肘関節の屈曲動作を水中環境と陸上環境で行い、肘関節の動作や姿勢と筋活動を両環境間で比較した。

3. 研究の方法

(1) 実験 1 <イメージした姿勢の再現実験>

① 対象者

日常的に水泳などの水中環境でトレーニングを実施していない健康な男性 16 名を対象とした。対象者の年齢、身長、体重、BMI は、それぞれ 21.1 ± 1.1 歳、 170.8 ± 6.7 cm、 62.0 ± 8.0 kg、 21.2 ± 2.1 kg/m²であった。全ての対象者は肘関節の動作に支障なかった。本実験は千葉工業大学の人を対象とする研究倫理審査委員会の承認を得て実施した。

② 試技

対象者は陸上環境と水中環境において肘関節の屈曲動作を実施した。小型の実験用水槽(特注、株式会社ジャパンアクアテック製)を用い、水無し(陸上環境)および上腕部まで水が浸かるよう水槽に注水した水中環境の両環境で、対象者はアイマスクとヘッドホンを装着し、着座で右腕を実験用水槽に入れ、肘関節を下方へ伸展し、手掌を正面へ向けた姿勢(初期姿勢)から、実験者の指示により 30 度、60 度、90 度の角度分の肘関節の屈曲動作

を実施した。屈曲動作は実験者の合図の後に対象者の任意のタイミングと速度で実施し、対象者の主観による判断で指示された角度分の屈曲を終えた時点でLEDライトに繋がれたボタンを左手で押して合図を出した。その後、実験者の合図(約5秒間)があるまでその姿勢を保持した。これを各角度5回ずつ、合計15回ランダムに実施した。また、陸上環境と水中環境での試技は対象者毎にランダムに設定し、1週間以上空けた2日間で実施した。実験時の様子を図1に、肘関節の屈曲イメージを図2に、試技の手順を図3に示した。



図1. 実験時の様子

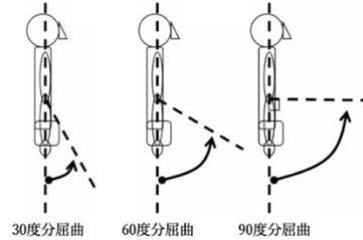


図2. 各角度の屈曲イメージ

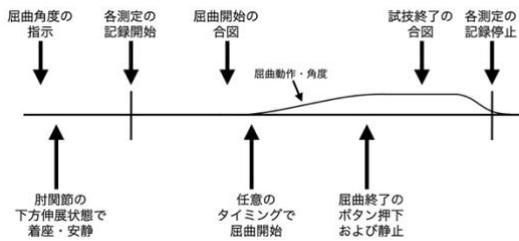


図3. 実験1の試技の手順

③ 環境

実験は、室温25℃、湿度50%に設定した環境制御室内で実施した。また、水中環境の際は水温約34℃に設定した。実際の実験時の室温、湿度、水温はそれぞれ、 $24.9 \pm 0.3^\circ\text{C}$ 、 $48.9 \pm 6.4\%$ 、 $33.9 \pm 0.3^\circ\text{C}$ であった。

④ 測定および分析

<肘関節の角度>肘関節の角度は光学式モーションキャプチャーシステム(VENUS3D R, 株式会社ノビテック社製)を用い、対象者の右腕の肩峰、肘関節中心、橈骨遠位端外側踝に自発光のLEDマーカー(煌, 株式会社ノビテック社製)を貼り付け、対象者の右側方から矢状面方向の各マーカーの位置座標を測定した。測定したマーカーの位置座標から肘関節の角度を算出し、対象者がボタンを押した時点から0.2秒間の平均値を実際の屈曲角度とした。また、180度から実際の屈曲角度との差分を計算した。

<右腕の筋活動>対象者の右腕の上腕二頭筋、上腕三頭筋、三角筋前部、橈側手根屈筋の筋活動を、筋電図センサ(DL-142, 有限会社エスアンドエムイー製)を用いて測定した。測定した筋活動は、各実験日それぞれにおいて測定した各筋の最大努力での筋収縮時の値を100%として規格化し、対象者がボタンを押した時点から0.2秒間の平均値を筋活動量として算出した。また、肘関節の屈筋と伸筋のバランスを評価するため、上腕二頭筋と上腕三頭筋の合計の筋活動量に対する上腕二頭筋の筋活動量を算出した。

<上腕と前腕の皮膚表面温度、心拍数>浸水部分(前腕)と非浸水部分(上腕)の皮膚表面温度を、体表用温度(DL-240, 有限会社エスアンドエムイー製)を用いて測定した。また、対象者の心拍数を把握するため、心電心拍センサ(DL-310, 有限会社エスアンドエムイー製)を用いて心電図を測定した。

(2) 実験2<直前に記憶した姿勢の再現実験>

① 対象者

日常的に水泳などの水中環境でトレーニングを実施していない健康な男性17名を対象とした。対象者の年齢、身長、体重、BMIは、それぞれ 21.9 ± 1.0 歳、 $171.9 \pm 5.0\text{cm}$ 、 $63.0 \pm 6.3\text{kg}$ 、 $21.3 \pm 1.9\text{kg}/\text{m}^2$ であった。全ての対象者は肘関節の動作に支障なかった。本実験は千葉工業大学の人を対象とする研究倫理審査委員会の承認を得て実施した。

② 試技

対象者は陸上環境で直前に記憶した肘関節の屈曲角度を、陸上環境と水中環境それぞれで再現した。実験1と同様の小型の実験用水槽を用い、水無し(陸上環境)の状態アイマスクとヘッドホン装着し、初期姿勢から、実験者の指示により肘関節の屈曲動作を開始した。その後、実験者の合図により屈曲を停止し、左手でLEDライトに繋がれたボタンを押し、実験者の合図(約5秒間)があるまで姿勢を保持し、その姿勢を記憶した。その後、初期姿勢に戻り、水無し(陸上環境)および水中環境の両環境で、記憶した姿勢を再現した。再現動作は実験者の合図の後に対象者の任意のタイミングと速度で実施し、対象者の

主観による判断で姿勢を再現した時点でボタンを左手で押して合図を出した。その後、実験者の合図(約5秒間)があるまでその姿勢を保持した。これを30度、60度、90度の各角度を5回ずつ、合計15回ランダムに実施した。また、陸上環境と水中環境での試技は対象者毎にランダムに設定し、1日で実験を実施した。試技の手順を図4に示した。

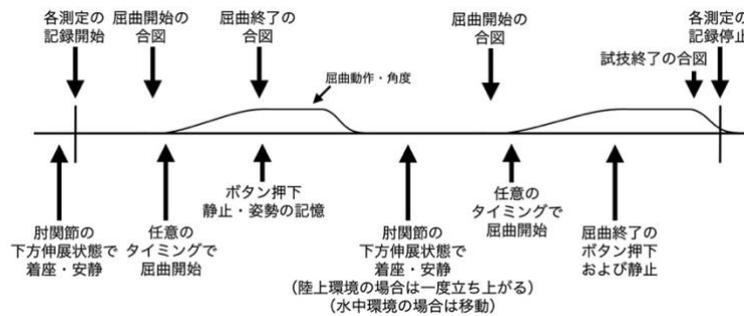


図4. 実験2の試技の手順

③ 環境・測定および分析

環境は、実験1と同様であり、実際の実験時の室温、湿度、水温はそれぞれ、 $25.1 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 、 $50.1 \pm 0.4\%$ 、 $33.9 \pm 0.1^\circ\text{C}$ であった。

測定および分析項目は実験1と同様であった。

4. 研究成果

(1) 実験1

実際の肘関節の屈曲角度を図5に示した。いずれの指定角度でも、陸上環境と比較して水中環境の方が屈曲角度は小さく、実際の屈曲角度の陸上環境と水中環境の差分は、30度で5.2度、60度で8.3度、90度で8.3度であった。各筋の筋活動量を図6に示した。いずれの指定角度でも、全ての筋の筋活動量は陸上環境と比較して水中環境の方が小さくなる傾向が見られた。上腕二頭筋と上腕三頭筋の合計の筋活動量に対する上腕二頭筋の筋活動量の割合を図7に示した。いずれの指定角度でも、陸上環境と比較して水中環境の方が小さかった。試技中の皮膚温は、陸上環境の上腕で $31.7 \pm 0.8^\circ\text{C}$ 、前腕で $31.7 \pm 0.8^\circ\text{C}$ であり、水中環境の上腕で $32.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、前腕で $33.2 \pm 0.3^\circ\text{C}$ であった。

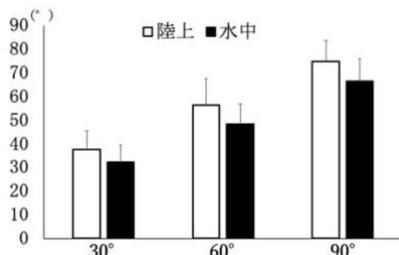


図5. 肘関節の屈曲角度

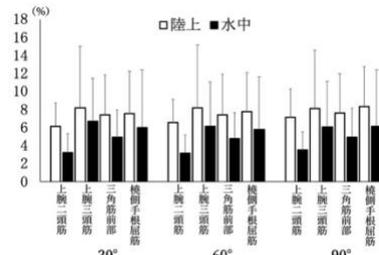


図6. 各筋の筋活動量

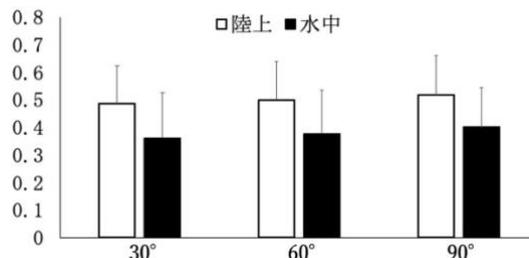


図7. 上腕部全体の筋活動量に対する上腕二頭筋の筋活動量の割合

実験1の結果より、水中環境においてヒトは自身の身体動作を小さく見積もる傾向があり、特に大きな身体動作を行う際には約10近くまで小さく見積もる傾向があることが明らかとなった。また、水中環境に浸水することで身体動作に関する筋活動量は小さくなる傾向があり、特にそれは身体動作に直接的に関わる主動筋への影響が大きくなる。その結果として、姿勢を制御するための主動筋と拮抗筋のバランスが陸上環境と比較して変化してしまい、このことが水中環境で自身の身体動作を陸上環境と比較して過小に見積もる原因として考えられた。今後、皮膚温との関連や心電図の解析による結果を踏まえた詳細な検討を進めていく。

(2) 実験 2

解析を行った 12 名分について、実際の肘関節の屈曲角度を図 8 に、指定角度と再現角度の差分を図 9 に示した。陸上環境では指定角度に対して再現角度は同程度かやや大きくなり、水中環境では指定角度に対して再現角度は同程度かやや小さくなった。また、陸上環境と水中環境の差分は指定角度が大きくなるほど拡大した。

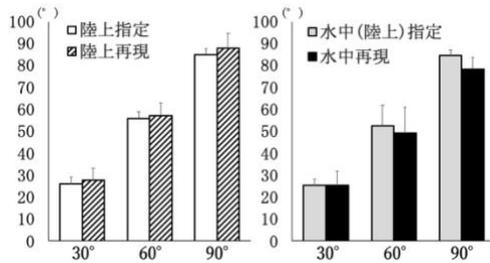


図 8. 指定角度と再現角度

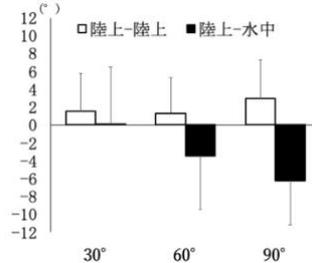


図 9. 指定角度と再現角度の差分

実験 2 の結果より、直前に陸上環境で記憶した姿勢を、陸上環境では同程度かそれ以上に、水中環境ではやや小さく見積もる傾向があり、さらにその傾向は動作範囲が大きくなるほど拡大すると考えられた。今後、未解析の対象者のデータおよび筋活動や皮膚温、心電図の解析を行い、より詳細な検討を進めていく。

以上より、健康増進やリハビリテーションにおける身体動作のトレーニングとして水中環境を用いる場合、より大きく身体動作を行うように指導したり、あるいは運動者自身がより大きく動作することを意識したりすること、さらには大きな身体動作を行う場合はより一層その動作を強調したりすることなどが、効果を高める上で重要である可能性が考えられた。

<引用文献>

- ① Barela AM, et al. Biomechanical characteristics of adults walking in shallow water and on land. *J Electromyogr Kinesiol*, 16(3): 250-56, 2009.
- ② Becker BE. Aquatic therapy: scientific foundations and clinical rehabilitation applications. *PM R*, 1(9): 859-72, 2009.
- ③ Bock O. Joint position sense in simulated changed-gravity environments. *Aviat Space Environ Med*. 65(7), 621-6, 1994.
- ④ Brockett C, et al. A comparison of the effects of concentric versus eccentric exercise on force and position sense at the human elbow joint. *Brain Res*, 771(2), 251-258, 1997.
- ⑤ 速水達也. 運動感覚からみた力を抜くことの困難さ. *バイオメカニクス研究*, 22(1), 19-25, 2018.
- ⑥ Kaneda K, et al. A comparison of lower limb joints angular displacement between land and water-walking using dynamic time warping. *Scientific Proceedings of the 30th International Conference on Biomechanics in Sports*, 7, 331-334, 2012b.
- ⑦ Kaneda K, et al. Walking and running kinesiology in water: a review of the literature. *Journal of Fitness Research*, 1(1), 1-11, 2012a.
- ⑧ 金田晃一ら. 肘関節屈曲動作を用いた大学男子競泳選手の水中での関節位置覚. 2010 年日本水泳・水中運動学会年次大会, 11, 2010.
- ⑨ 森井和枝ら. 水中環境が体性感覚に及ぼす影響. *理学療法*, 35(Supplement 2), 454, 2009.
- ⑩ Niespodzinski B, et al. Relationship between joint position sense, force sense, and muscle strength and the impact of gymnastic training on proprioception. *Biomed Res Int* 2018, Article ID 5353242, 2018.
- ⑪ Sato D, et al. Comparison of once and twice weekly water exercise on various bodily functions in community-dwelling frail elderly requiring nursing care. *Archives of Gerontology and Geriatric*, 52, 331-335, 2011.
- ⑫ Sato D, et al. 2015. Whole-hand water flow stimulation increases motor cortical excitability: A study of transcranial magnetic stimulation and movement-related cortical potentials. *Journal of Neurophysiology*, 113(3), 822-833, 2015.
- ⑬ Walsh LD, et al. Effect of eccentric exercise on position sense at the human forearm in different postures. *J Appl Physiol*, 100(4): 1109-16, 2005.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Koichi KANEDA, Tatsuya HAYAMI, Daisuke SATO	4. 巻 22
2. 論文標題 How much human can simulate the target motion when immersed in water environment: a research protocol.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Science and Medicine in Sport	6. 最初と最後の頁 S89
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jsams.2019.08.104	査読の有無 無
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

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Koichi KANEDA, Tatsuya HAYAMI, Daisuke SATO.
2. 発表標題 How much human can simulate the target motion when immersed in water environment: a research protocol.
3. 学会等名 The Asics Conference of Science and Medicine in Sport 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔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	速水 達也 (Hayami Tatsuya) (50551123)	信州大学・学術研究院総合人間科学系・准教授 (13601)	
研究分担者	佐藤 大輔 (Sato Daisuke) (60544393)	新潟医療福祉大学・健康科学部・教授 (33111)	

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