

運動後における高濃度人工炭酸泉下腿浴の身体冷却効果に関する研究

田中 佑季*¹・藤森 加奈恵*¹・長野 央歩*²・田井村 明博*²BODY COOLING EFFECTS OF IMMERSION IN HIGH-CONCENTRATION
ARTIFICIAL CARBONIC ACID WATER

Yuuki TANAKA, Kanae FUJIMORI, Hisaho NAGANO, Akihiro TAIMURA

Abstract

This study examines the body cooling effects of immersion in high-concentration artificial carbonic acid water. The subjects' core (tympanic) temperature was increased by a pedaling ergometer. They then immersed their lower legs in carbonic acid water or tap water. The decrease in tympanic temperature was observed. The tympanic temperature significantly decreased more during immersion in stirred 25 / 30°C CO₂ water than in tap water. The results suggest that immersing the lower legs in stirred 25 / 30°C carbonic acid water can suppress skin vascular constriction and reduce core temperature elevated by heat stress / exercise more effectively than stirred tap water of the same water temperature.

キーワード: 身体冷却, 核心温, 高濃度人工炭酸泉, 運動

Key words: *Body cooling, Core temperature, Artificial carbonic acid water, Exercise*

1. 緒 言

総務省消防庁によると日本における夏季の熱中症救急搬送者数は過去8年連続4万人を超えており¹⁾、深刻な問題となっている。熱中症対策には様々あるが、中でも身体の冷却は過度の体温上昇を防ぐために重要である²⁾。

身体冷却の方法に関して、過去にいくつかの研究が行われている。筒井ら(2005)は暑熱環境下での下肢運動を行う際の下肢冷却服の冷却効果を検討している。その効果が下肢を衣服で覆わない場合の放熱効果とほぼ同じであることから、障害防止のためにズボンの着用が要求される作業において下肢冷却服を着用することは暑熱対策として有効であると報告している³⁾。

Onitsuka *et al.* (2015) は、温暖環境下における休息

間のアイススラリー摂取が、その後の間欠的運動能力に及ぼす影響について検討しており、アイススラリー条件は後半の運動開始直後において最大パワーを低下させることなく直腸温を有意に低下させたことを報告している⁴⁾。

中野ら(2013)は運動後の入浴が身体に及ぼす影響を検討しており、運動後、水温30°C、35°C、38°Cの水に半坐位全身浴を行う条件と無入浴条件で核心温や温度快適感を比較している。30°Cの水浴において、核心温が効率よく低下する傾向があると報告している⁵⁾。同様に、時澤ら(2015)も水浴による身体冷却方法を検討し、水浴が冷却服よりも身体冷却効果が大きいことを報告している⁶⁾。

同じ水浴でも大森ら(2000)は低温の高濃度人工炭酸泉浴に着目し、運動後、水温15°Cの人工炭酸泉に前腕を浸漬させ、同温の真水浴よりも浸漬部の皮膚血流量を高く維持することから深部熱を皮膚表面に循環させ熱放散を促進する可能性を報告している⁷⁾。

これまで、我々は皮膚温より低温の高濃度人工炭酸泉浴における水温、浸漬部位の違いが体温調節反応に及ぼす影響について検討してきた。暑熱環境下において運動により核心温を上昇させた後に、高濃度人工炭

*¹長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科・環境科学専攻

Master's Program Environmental Science, Graduate School of Fisheries and Environmental Sciences, Nagasaki University

*²長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科

Graduate School of Fisheries and Environmental Sciences, Nagasaki University

酸泉浴を行った結果、水温20℃の場合、両前腕を浸漬させると運動によって上昇した皮膚温と水温の差が大きいため身体が耐寒反応を起こし核心部に熱が蓄積する可能性を報告した⁸⁾。さらに、より皮膚温に近い水温33℃の検討では核心温は低下せず、温度が高すぎて浸漬部位が不快に感じる結果となった⁹⁾。さらに、浸漬部位に関して両前腕よりも表面積の大きい両下腿の浸漬がより核心温が低下する結果となった^{8,10)}。水温に関して、20℃や皮膚温と同程度の33℃において検討を行ってきたが、これらの水温の中間領域においての詳細な検討はなされていない。

本研究では、真水より浸漬部の皮膚血流量を高く維持しつつ、耐寒反応も抑制し、より効率の良い身体冷却が可能と考えられる30℃と25℃の高濃度人工炭酸泉浴が体温調節反応に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

2. 方 法

2.1 被験者

被験者は健康な男子学生、実験1：9名(年齢：22.9 ± 1.1歳)、実験2：6名(年齢：21.5 ± 1.4歳)、実験3：8名(年齢：22.5 ± 1.3歳)であった。

全ての被験者に対し、事前に実験の詳細を書面と口頭にて説明し、書面にて実験参加への同意を得た。実験直前に被験者の健康状態を確認した後、実験を開始した。本研究は長崎大学環境科学部・環境保全設計学系倫理委員会の承認を得て行った。

2.2 実験条件

実験は真水浴または高濃度人工炭酸泉(以後、炭酸泉と表記)浴において、水流条件(静水または渦流)、水温の異なる3つの実験を行った。いずれも運動により核心温を上昇させ、実験1と2は水温30℃、実験3は25℃の真水または炭酸泉に両下腿部を浸漬させ、核心温を観察するプロトコルとした。実験1は静水、実験2と3は浴槽内に渦流を起こす条件で行った。

全ての実験は室温30℃、相対湿度70%に設定した人工気象室内で行った。被験者には、半袖Tシャツと半ズボンを着用させた。また、測定前日の飲酒と激しい運動を禁止し、当日の測定開始2時間前からは、絶飲食状態とした。

実験は温熱的に身体に負担が少ない春季または秋季に実施した。

2.3 実験方法

実験前に自転車エルゴメーター(エアロバイク75XL, Combi社製)によって、各被験者の最大酸素摂

取量($\dot{V}O_2\max$)を推定した。

被験者は炭酸泉浴を1回、実験対照として真水浴を1回の計2回の実験を1日以上(最長13日)の間隔をおいて行った。各実験において被験者を、炭酸泉浴を先に行う群と真水浴を先に行う群にわけるとクロスオーバーデザインとした。

2.4 実験手順

人工気象室の環境に慣れるために、被験者には少なくとも実験開始30分前までに入室してもらい、測定開始までの間に各測定部位に血流計プローブ及びサーミスタセンサ、赤外線センサ、心拍計を装着した。各測定値が安定したのを確認後、測定を開始した。

5分間の安静後、自転車エルゴメーターによって20分間のペダリング運動を行わせた。運動負荷はペダリング運動を始めて5分後に各被験者別に推定した最大酸素摂取量の50%の仕事率(PWC50% $\dot{V}O_2\max$)になるよう設定した。ペダリング運動後1分間クールダウンとして軽くペダリング運動をした後に2分間で自転車エルゴメーターから椅子へと移動し着座させた。その後、両下腿を真水または炭酸泉へ20分間浸漬させた。出浴後は浸漬した両下腿部をタオルで拭き、浸漬終了後10分までの経過を測定した(Fig. 1)。

炭酸泉は人工炭酸泉製造装置(CARBO THERA mini, 三菱レイヨン・エンジニアリング社製)により、1000ppm以上(pH < 5.0)に調整した。

全ての実験において水温の管理は両下腿浸漬の直前まで行った。実験2、3は水槽内に渦流を起こした。渦流は恒温水槽(TR2, 井内盛栄堂株式会社製)に付属しているヒーターの攪拌ポンプ(噴流攪拌式 最大吐出量：10L/min 最大揚程：1.4m)に依存した。

2.5 測定項目

2.5.1 皮膚血流量

レーザー・ドップラー血流計(ALF21D, アドバンス社製)を用いて左下腿部と左大腿部の2箇所を、5秒ごと(実験2：2秒ごと)に測定した。

2.5.2 皮膚温

サーミスタセンサ(RXK67, TECHNO SEVEN社製)を用いて左下腿部を5秒ごと(実験2：2秒ごと)に測定した。

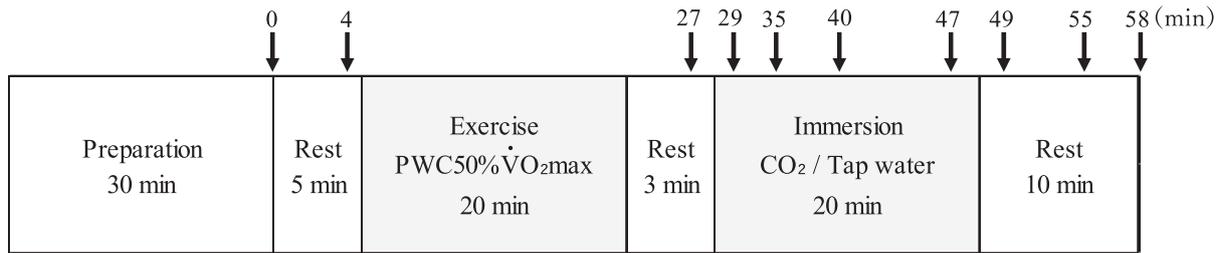
2.5.3 心拍数

ハートレートモニター(ポラール社製)を用いて1分ごとに測定した。

2.5.4 核心温(鼓膜温)

実験1：鼓膜温度計(ミミツピH, TERUMO社製)を用い、実験開始直後から0、4、27、29、35、40、47、49、55、58分後にそれぞれ1回ずつ測定した。

実験2、3：耳栓型温度サーミスタセンサ(耳栓型セ



Continuous measurement : Skin blood flow, Tympanic temperature (Exp.2 and 3)

↓ : Thermal sensation and thermal comfort
 ↓ : Tympanic temperature (Exp.1)

Fig. 1 Experimental protocol

ンサ, Gram 社製)と耳赤外線体温計(CE サーモ, ニプロ社製)を用いて鼓膜温または耳内温を2秒ごと(実験3:5秒ごと)に測定した。

2. 5. 5 水温

サーミスタセンサ(RXK67, TECHNO SEVEN 社製)を用いて5秒ごと(実験2:2秒ごと)に測定した。

2. 5. 6 温度感覚

「左下腿部」について、実験開始直後から0、4、27、29、35、40、47、49、55、58分後の計10回聞き取りを行った。0.0「耐えられないほど冷たい」から4.0「普通」、8.0「耐えられないほど暑い」の17段階で評価した。

2. 5. 7 温度快適性

「左下腿部」について、実験開始直後から0、4、27、29、35、40、47、49、55、58分後の計10回聞き取りを行った。1.0「心地よい」から3.0「普通」、5.0「不快」の9段階で評価した。

2. 6 分析方法

まず、被験者ごとの測定値について、データロガー(LS200及びLT 8, Gram 社製)を介してパソコンに保存した皮膚血流量、鼓膜温及び皮膚温のデータは1分ごとに平均値を求めた。皮膚血流量と心拍数は安静時5分間の平均値を100%とした1分毎の相対値に変換し、運動後半5分間(20~24分)及び浸漬後半5分間(43~47分)の平均値を求めた。皮膚温は浸漬後半5分間(43~47分)の平均値を求めた。鼓膜温の変化量は運動直前(4分)と運動終了時(24分)の差及び浸漬直前(27分)と浸漬終了時(実験1:終了直前)(47分)の差を求めた。水温の変化量は浸漬直前(27分)と浸漬終了時(47分)の差によって求めた。以上のデータについて、条件ごとの平均値と標準偏差を求めた。条件間の差の検定はウィルコクソン符号付順位和検定を用い、危険率5%未満を有意とした。

3. 結 果

3. 1 実験1

3. 1. 1 被験者の身体的特徴

身長:171.2 ± 4.7 cm、体重:63.5 ± 8.0 kg、体脂肪率:17.8 ± 2.8 %、BMI:21.6 ± 1.8、 $\dot{V}O_{2max}$:43.7 ± 7.3 ml/min/kg、PWC50 % $\dot{V}O_{2max}$:112.4 ± 22.4 Wであった。

3. 1. 2 皮膚血流量

左下腿部は運動により真水条件で1320.35 ± 756.32 %、炭酸泉条件で1642.23 ± 835.95 %上昇した。条件間に有意差は認められなかった。浸漬中、炭酸泉条件の方が高く推移し、浸漬後半5分間は真水条件が156.80 ± 63.94 %、炭酸泉条件が384.36 ± 157.40 %で炭酸泉条件が約2.5倍の値を示し有意に高かった($P < 0.05$) (Fig. 2)。

左大腿部は運動により真水条件では1371.93 ± 567.78 %、炭酸泉条件では1532.97 ± 725.63 %上昇し、浸漬後半5分間は真水条件が176.44 ± 95.15 %、炭酸泉条件が191.09 ± 141.56 %でいずれも両条件間に有意差は認められなかった。

3. 1. 3 皮膚温

安静時の左下腿部の皮膚温は真水条件が33.46 ± 0.46 °C、炭酸泉条件が33.56 ± 0.48 °Cであった。運動により真水条件では1.23 ± 1.04 °C、炭酸条件では0.98 ± 1.06 °C上昇し、その後浸漬により低下した。浸漬後半5分間は真水条件が31.49 ± 0.23 °C、炭酸泉条件が31.60 ± 0.44 °Cで、条件間に有意差は認められなかった。

3. 1. 4 心拍数

安静時の心拍数は真水条件で81.62 ± 12.07 bpm、炭酸泉条件で78.46 ± 9.36 bpmであった。運動終了直前5分間は真水条件が207.79 ± 40.57 %、炭酸泉条件が217.19 ± 40.90 %上昇した。浸漬終了前5分間の平均値は真水条件が116.06 ± 12.65 %、炭酸泉条件が120.38 ± 15.37 %であった。いずれも条件間に有意差

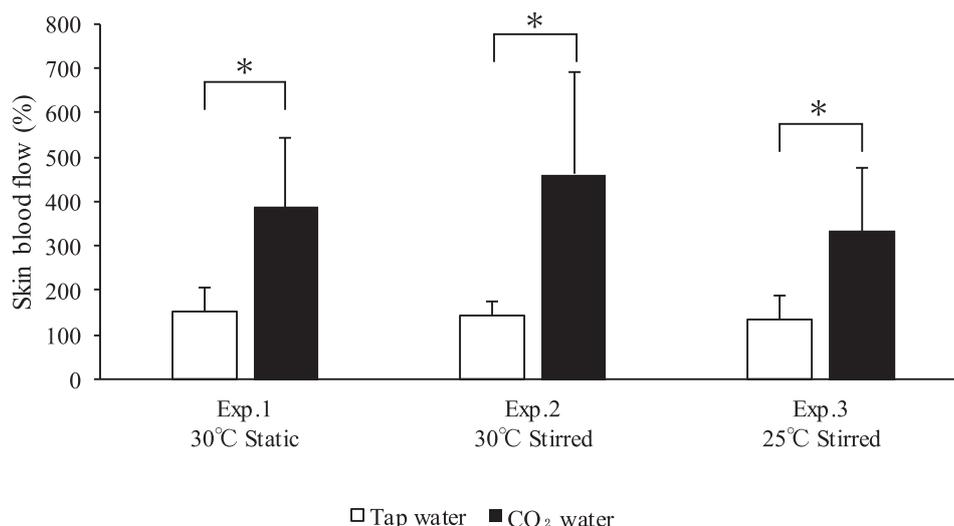


Fig. 2 Skin blood flow relative to resting value for the last 5 minutes during immersion of the left lower leg.

All values are expressed as means \pm standard deviation.

* Significant difference ($P < 0.05$) between tap water and CO₂ water.

は認められなかった。

3. 1. 5 鼓膜温

安静時の鼓膜温は真水条件が 36.71 ± 0.26 °C、炭酸泉条件が 36.72 ± 0.29 °Cであった。運動により真水条件では 0.60 ± 0.38 °C、炭酸泉条件では 0.61 ± 0.39 °C上昇したが、条件間に有意差は認められなかった。浸漬直前と浸漬終了直後の鼓膜温の差は真水条件が -0.47 ± 0.27 °C、炭酸泉条件が -0.49 ± 0.24 °Cと低下したが条件間に有意差は認められなかった (Fig. 3)。

3. 1. 6 水温

浸漬直前の水温は真水条件が 30.29 ± 0.04 °C、炭酸泉条件が 30.22 ± 0.48 °Cであった。浸漬終了時は 30.76 ± 0.19 °C、炭酸泉条件が 30.71 ± 0.52 °Cとなり、それぞれ真水条件が 0.48 ± 0.16 °C、炭酸泉条件が 0.50 ± 0.16 °C上昇した。浸漬前後の水温の上昇程度は条件間で有意差は認められなかった。

3. 1. 7 温度感覚

安静時は真水条件： 4.39 ± 0.64 、炭酸泉条件： 4.06 ± 0.27 であった。運動により両条件ともに上昇し、真水条件： 5.67 ± 0.87 、炭酸泉条件： 5.28 ± 1.28 となった。浸漬12分後(40分)では、炭酸泉条件(4.22 ± 0.85)が真水条件(3.22 ± 0.71)よりも有意にやや温かく感じる結果となった ($P < 0.05$) (Fig. 4)。さらに、浸漬開始19分後(47分)においては、炭酸泉条件(4 ± 0.47)が真水条件(3.33 ± 0.75)よりもやや温かく感じる傾向があった ($P = 0.057$)。

3. 1. 8 温度快適性

安静時は真水条件： 3.28 ± 0.51 、炭酸泉条件： 3.08 ± 0.31 であったが、運動により真水条件： 3.56 ± 0.63 、

炭酸泉条件： 3.56 ± 0.88 でやや不快となった。浸漬開始12分後(40分)において真水条件： 2.67 ± 0.24 、炭酸泉条件： 2.94 ± 0.37 で真水条件の方がやや快適に感じ (Fig. 5)、浸漬開始19分後(47分)においても真水条件： 2.72 ± 0.34 、炭酸泉条件： 2.94 ± 0.28 で真水の方がやや快適に感じていたが、条件間に有意差はなかった。

3. 2 実験2

3. 2. 1 被験者の身体的特徴

被験者の身体的特徴は、身長： 171.4 ± 8.2 cm、体重： 60.9 ± 6.2 kg、体脂肪率： 8.9 ± 2.1 %、BMI： 20.7 ± 1.6 、 $\dot{V}O_2\max$ ： 50.5 ± 6.8 ml/min/kg、PWC50 % $\dot{V}O_2\max$ ： 131.2 ± 24.7 Wであった。

3. 2. 2 皮膚血流量

左下腿部では運動により真水条件で 1283.47 ± 766.50 %、炭酸条件で 1322.61 ± 527.98 %上昇した。条件間に有意差は認められなかった。浸漬中、炭酸泉条件の方が高く推移しており、浸漬後半5分間は真水条件が 142.50 ± 32.62 %、炭酸泉条件が 461.14 ± 228.44 %で炭酸泉条件が約3.2倍の値を示し有意に高かった ($P < 0.05$) (Fig. 2)。

左大腿部では運動により真水条件で 1431.01 ± 194.60 %、炭酸泉条件で 1607.91 ± 380.42 %上昇し、浸漬後半5分間は真水条件が 227.58 ± 198.48 %、炭酸泉条件が 202.30 ± 51.18 %で、いずれも条件間に有意差は認められなかった。

3. 2. 3 皮膚温

安静時の左下腿部の皮膚温は真水条件が 34.21 ± 0.35 °C、炭酸泉条件が 33.88 ± 0.27 °Cであった。運

動により真水条件では 1.37 ± 0.91 °C、炭酸条件では 1.43 ± 1.09 °C上昇し、浸漬後半5分間は真水条件が 31.47 ± 0.19 °C、炭酸泉条件が 31.58 ± 0.20 °Cで、条件間に有意差は認められなかった。

3. 2. 4 心拍数

安静時の心拍数は真水条件で 81.44 ± 9.00 bpm、炭酸泉条件で 81.87 ± 7.91 bpmであった。運動終了直前5分間は真水条件が 205.05 ± 27.07 %、炭酸泉条件が 204.60 ± 25.33 %上昇した。浸漬終了前5分間は真水条件が 115.62 ± 11.05 %、炭酸泉条件が 118.28 ± 10.90 %であった。いずれも条件間に有意差は認められなかった。

3. 2. 5 鼓膜温

安静時は真水条件が 36.67 ± 0.19 °C、炭酸泉条件が 36.56 ± 0.14 °Cであった。運動により真水条件では 0.73 ± 0.30 °C、炭酸泉条件では 0.71 ± 0.39 °C上昇したが条件間に有意差は認められなかった。浸漬直前と浸漬終了直後の鼓膜温の差は真水条件が -0.55 ± 0.15 °C、炭酸泉条件が -0.62 ± 0.19 °Cで、炭酸泉条件の方が低下し、条件間に有意差が認められた ($P < 0.05$) (Fig. 3)。

3. 2. 6 水温

浸漬直前の水温は真水条件が 30.29 ± 0.02 °C、炭酸泉条件が 30.31 ± 0.02 °Cであった。浸漬終了時は

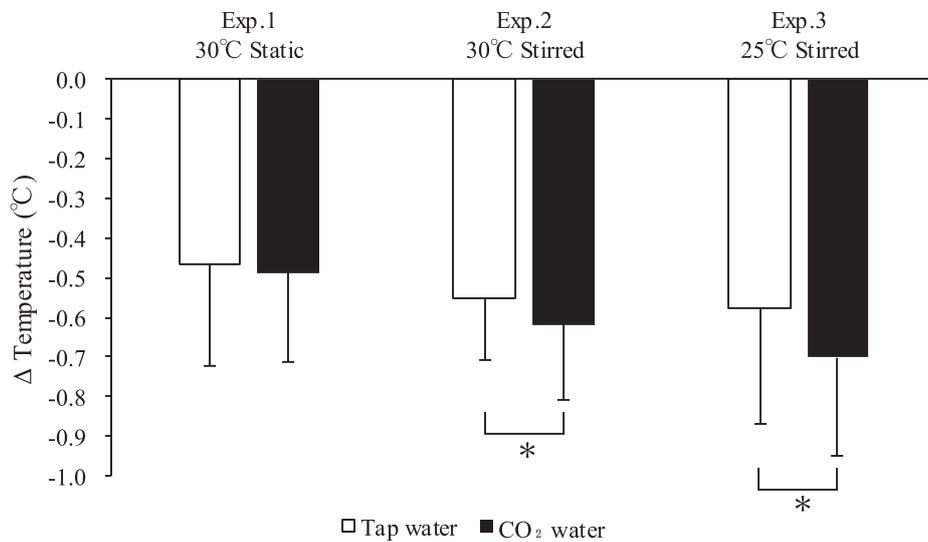


Fig. 3 The change of tympanic temperature before and after immersion.

All values are expressed as means \pm standard deviation.

*Significant difference ($P < 0.05$) between tap water and CO₂ water.

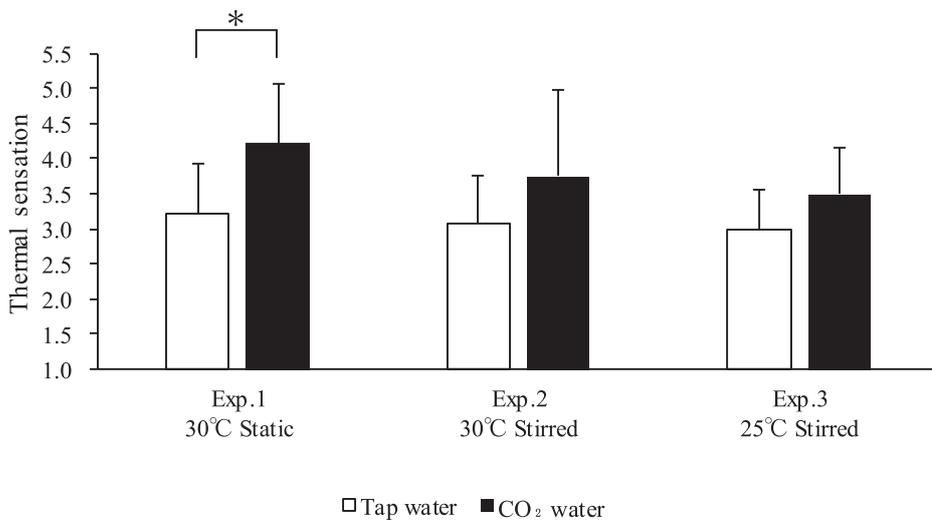


Fig. 4 Thermal sensation of the left lower leg at the 12th minute after immersion started.

All values are expressed as means \pm standard deviation.

Thermal sensation scale (0: Extremely cold, 1: Very cold, 2: Cold, 3: Cool, 4: Normal, 5: Warm, 6: Hot, 7: Very hot, 8: Extremely hot)

*Significant difference ($P < 0.05$) between tap water and CO₂ water.

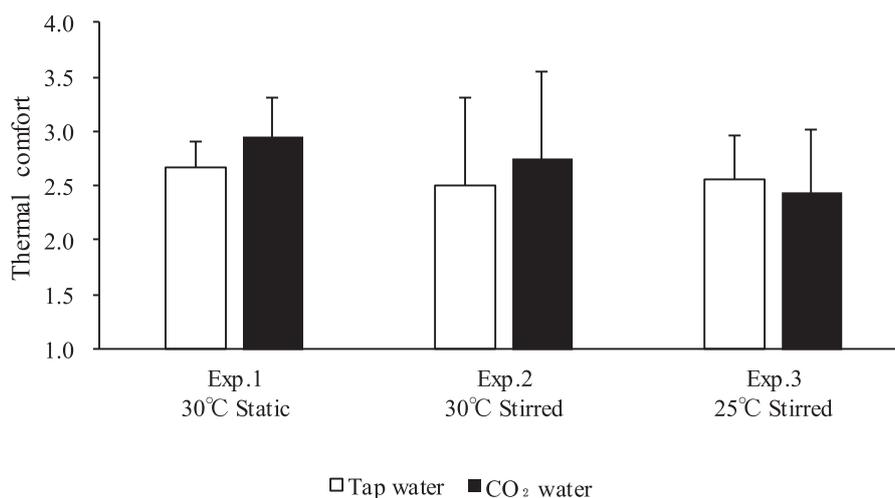


Fig. 5 Thermal comfort of the left lower leg at the 12th minute after immersion started.

All values are expressed as means \pm standard deviation.

Thermal comfort scale (1: Comfortable, 3: Normal, 5: Uncomfortable)

真水条件が 30.86 ± 0.20 °C、炭酸泉条件が 30.87 ± 0.24 °Cとなり、それぞれ 0.57 ± 0.19 °C、 0.56 ± 0.23 °C上昇した。浸漬前後の水温の上昇程度は条件間で有意差は認められなかった。

3. 2. 7 温度感覚

安静時は真水条件： 4.71 ± 0.89 、炭酸泉条件： 4.54 ± 0.70 であった。運動により両条件ともに上昇し、真水条件： 5.50 ± 1.22 、炭酸泉条件： 5.67 ± 1.46 となった。浸漬12分後(40分)、炭酸泉条件(3.75 ± 1.22)は真水条件(3.08 ± 0.67)よりもやや温かく感じる結果となったが有意差は認められなかった(Fig. 4)。浸漬開始19分後(47分)において、炭酸泉条件(3.25 ± 0.90)、真水条件(3.25 ± 0.69)は同じ温度感覚であった。

3. 2. 8 温度快適性

安静時は真水条件： 3.42 ± 0.45 、炭酸泉条件： 3.38 ± 0.38 であったが、運動により真水条件 3.50 ± 0.41 、炭酸泉条件 3.67 ± 0.69 でやや不快となった。浸漬開始12分後(40分)において真水条件： 2.5 ± 0.82 、炭酸泉条件： 2.75 ± 0.80 で炭酸泉条件の方がやや高く、真水条件の方が快適に感じ(Fig. 5)、浸漬開始19分後(47分)において、真水条件： 2.67 ± 0.37 、炭酸泉条件： 2.42 ± 0.73 と変化した。いずれも条件間に有意差は認められなかった。

3. 3 実験3

3. 3. 1 被験者の身体的特徴

被験者の身体的特徴は、身長： 171.5 ± 4.8 cm、体重： 62.6 ± 4.8 kg、体脂肪率： 12.8 ± 3.2 %、BMI： 21.3 ± 1.9 、 VO_{2max} ： 45.4 ± 4.1 ml/min/kg、PWC50 % VO_{2max} ： 118.3 ± 18.6 Wであった。

3. 3. 2 皮膚血流量

左下腿部では運動により真水条件で 1002.07 ± 337.56 %、炭酸泉条件で 1172.90 ± 374.87 %上昇した。条件間に有意差は認められなかった。浸漬中、炭酸泉条件の方が高く推移しており、浸漬後半5分間は炭酸泉条件(333.80 ± 141.57 %)の方が真水条件(136.26 ± 52.95 %)よりも約2.4倍高い値を示し、有意に高かった($P < 0.05$) (Fig. 2)。

左大腿部では運動により真水条件で 1394.17 ± 585.19 %、炭酸泉条件で 2140.64 ± 1121.549 %上昇し、浸漬後半5分間は真水条件が 263.46 ± 173.26 %、炭酸泉条件が 372.10 ± 272.79 %となり、いずれも炭酸泉条件が高かったが条件間に有意差は認められなかった。

3. 3. 3 皮膚温

安静時の左下腿部の皮膚温は真水条件が 33.90 ± 0.32 °C、炭酸泉条件が 33.93 ± 0.37 °Cであった。運動により真水条件では 1.19 ± 0.99 °C、炭酸泉条件では 1.07 ± 0.90 °C上昇し、その後浸漬により低下し、浸漬後半5分間は真水条件が 27.25 ± 0.30 °C、炭酸泉条件が 27.63 ± 0.66 °Cで炭酸泉条件が有意に高くなる結果となった($P < 0.05$)。

3. 3. 4 心拍数

安静時の心拍数は真水条件で 82.71 ± 6.13 bpm、炭酸泉条件で 85.86 ± 10.14 bpmであった。運動終了直前5分は真水条件が 194.36 ± 12.44 %、炭酸泉条件が 191.81 ± 20.55 %上昇した。浸漬終了前5分間は真水が条件 110.59 ± 8.56 %、炭酸泉条件が 107.28 ± 8.34 %であった。いずれも条件間に有意差は認められなかった。

3. 3. 5 鼓膜温 (n = 7)

安静時の鼓膜温は真水条件が 37.58 ± 0.29 °C、炭酸泉条件が 37.56 ± 0.26 °C であった。運動により真水条件では 0.68 ± 0.38 °C、炭酸条件では 0.74 ± 0.33 °C 上昇したが、条件間に有意差は認められなかった。浸漬直前と浸漬終了直後の鼓膜温の差は真水条件が -0.58 ± 0.29 °C、炭酸泉条件が -0.70 ± 0.25 °C で、炭酸泉条件の方が低下し、条件間に有意差が認められた ($P < 0.05$) (Fig. 3)。

3. 3. 6 水温

浸漬直前の水温は真水条件が 25.23 ± 0.14 °C、炭酸泉条件が 25.34 ± 0.25 °C であった。浸漬終了時は真水条件が 26.52 ± 0.20 °C、炭酸泉条件が 26.57 ± 0.21 °C となり、それぞれ 1.29 ± 0.23 °C、 1.24 ± 0.28 °C 上昇した。浸漬前後の水温の上昇程度は両条件間で有意差は認められなかった。

3. 3. 7 温度感覚

安静時は真水条件： 4.41 ± 0.56 、炭酸泉条件： 4.5 ± 0.75 であった。運動により、真水条件： 5.81 ± 1.14 、炭酸泉条件： 6.19 ± 1.17 となった。浸漬12分後(40分)では、炭酸泉条件 (3.5 ± 0.66) が真水条件 (3 ± 0.56) よりもやや温かく感じる結果となり (Fig. 4)、浸漬開始19分後(47分)では、炭酸泉条件 (3.5 ± 0.79) が真水条件 (2.94 ± 0.68) よりもやや温かく感じる結果となったが、いずれも条件間に有意差は認められなかった。

3. 3. 8 温度快適性

安静時は真水条件： 3.16 ± 0.21 、炭酸泉条件： 3.13 ± 0.33 であったが、運動により真水条件 3.9 ± 0.74 、炭酸条件 4.00 ± 0.83 とやや不快となった。浸漬開始12分後(40分)において、真水条件： 2.56 ± 0.39 、炭酸泉条件： 2.43 ± 0.58 (Fig. 5)、浸漬開始19分後(47分)において、真水条件： 2.81 ± 0.24 、炭酸泉条件： 2.44 ± 0.53 となり炭酸泉がやや快適に感じていたが、いずれも条件間で有意差は認められなかった。

4. 考 察

4. 1 実験1

浸漬部である左下腿部の皮膚血流量は運動によって上昇し、浸漬開始後、真水浴では緩やかに減少し浸漬終了時は安静時とほぼ同じ値となった。一方で炭酸泉浴ではそのまま皮膚血流量を維持し浸漬後半は浸漬終了まで安静時の約2.5倍の値を示し、炭酸泉浴の方が有意に高い値となった。このことは先行研究^{7, 8, 10, 11, 12, 13, 14})の結果を支持し、30 °Cの炭酸泉下腿浴が同温の真水浴と比較して深部熱を皮膚表面に循環させ熱放散を促進する可能性が示唆された。

運動によって上昇した鼓膜温は浸漬により真水浴と炭酸泉浴のどちらも低下した。浸漬前と比較して浸漬後は炭酸泉浴の方が僅かに低下したが有意な差は認められなかった。

浸漬部の温度感覚は浸漬中、炭酸泉浴の方が温かく、浸漬後半の測定の平均値は炭酸泉浴の方が有意に温かかった。この結果は先行研究^{8, 9, 11, 12, 13, 14})の結果を支持し、左下腿部の30 °C炭酸泉浴において冷感抑制作用が確認できた。

しかし、炭酸泉浴において浸漬部の血流量が真水浴と比較して有意に上昇しているにも関わらず核心温の低下の程度については真水浴との有意な差は認められなかった。そこで、実験2では、浴槽内に渦流を起こすことによって、皮膚温と水温の温度勾配を保つことで、血流量が高く維持された炭酸泉浴でさらに熱放散が促され、効率的に核心温を低下させられるという仮説の下、実験1と同様のプロトコルで渦流を起こした炭酸泉浴と真水浴の核心温低下の比較検討を行った。

4. 2 実験2

浸漬部である左下腿部の皮膚血流量は運動によって上昇し、実験1と同様に浸漬開始後、真水浴では緩やかに減少し浸漬終了時は安静時とほぼ同じ値となった。一方で炭酸泉浴ではそのまま皮膚血流量を維持し浸漬後半5分間は浸漬終了まで安静時の約3.2倍の値を示し、炭酸泉浴の方が有意に高い値となった。このことは炭酸泉浴の皮膚血管収縮抑制効果を報告している先行研究^{7, 8, 10, 11, 12, 13, 14})の結果を支持した。実験1と同様に30 °Cの炭酸泉下腿浴が同温の真水浴と比較して深部熱を皮膚表面に循環させ熱放散を促進する可能性が示唆された。

浸漬部の皮膚温について、炭酸泉浴で有意ではないが僅かに高くなる結果となった。これは皮膚血流量が高い炭酸泉中で、高い皮膚温を保てていると考えられ、炭酸泉と皮膚の間の温度差が大きいことを示している。その結果として、皮膚血流量が多くなる炭酸泉浴中でより皮膚温と水温の温度勾配を保てたことから、渦流の効果が炭酸泉条件でより大きくなったと考えられる。

運動によって上昇した鼓膜温は、両条件どちらにおいても浸漬によって低下したが、真水浴では時間の経過とともにその程度が緩やかになっている。一方、炭酸泉浴ではその程度はあまり変わらずに低下し続けた。この理由として、実験1で行った静水浴の場合、浸漬時により血流量の多い炭酸泉浴では、多くの熱移動が行われる。そのため皮膚表面の水温と皮膚温が熱平衡状態になるのが早くなると考えられる。実験2のように水槽内に渦流を起こした場合、皮膚温と水温の

温度勾配を保つことが出来るため、血流量の多い炭酸泉浴の方がより核心温を下げることができ、真水浴と有意な差が出たと推察された。

浸漬後半の温度感覚は有意差が認められなかった。渦流を起こしたことによって冷感抑制効果が認められなくなったのは、静水浴時は皮膚温と皮膚表面の水温の差が小さくなるのに対して、渦流時はその差が維持され温度差を常に感じるため炭酸泉の冷感抑制効果が作用しにくくなったと考えられる。

浸漬後半の温度快適性は真水浴と炭酸泉浴で差はみられなかった。先行研究において33℃の炭酸泉浴にて温度が高すぎるにより不快を感じる⁹⁾、と報告されている。今回の実験1と実験2で30℃の炭酸泉下腿浴では浸漬中の測定平均値が3.0(何も感じない)を大きく上回らなかったことから温度による不快感を抑制できたと考えられる。

実験2では、30℃の炭酸泉渦流浴は同温の真水渦流浴と比較して皮膚血流量を高く維持し熱放散量を増加させることで効率的に身体冷却を行うことができる可能性が示唆された。そこで、実験3では、より効率良く快適な身体冷却の可能性について、水温を下げ25℃の炭酸泉浴と真水浴を比較した。

4.3 実験3

浸漬部である左下腿部の皮膚血流量は運動によって上昇し、実験1, 2と同様に浸漬開始後、真水浴では緩やかに減少し浸漬終了時は安静時とほぼ同じ値となった。一方で炭酸泉浴ではそのまま皮膚血流量を維持し浸漬後半5分間は浸漬終了まで安静時の約2.4倍の値を示し炭酸泉浴の方が有意に高い値となった。これは炭酸泉浴の皮膚血管収縮抑制効果を報告している先行研究^{7, 8, 10, 11, 12, 13, 14)}の結果を支持した。皮膚温よりも約10℃低い25℃の炭酸泉下腿浴においても同温の真水浴と比較して深部熱を皮膚表面に循環させ熱放散を促進する可能性が示唆された。

浸漬部の皮膚温について、浸漬後半5分の平均値が炭酸泉浴で有意に高く、熱放散量が多いと考えられた炭酸泉浴で水温(25℃)との差が維持できたことが示され、渦流によって皮膚温と皮膚表面の水温の温度差が保てていることが確認できた。

運動によって上昇した鼓膜温は、両条件どちらにおいても浸漬によって低下したが、実験2と同様に真水浴では時間の経過とともにその程度が緩やかであった。一方、炭酸泉浴ではその程度はあまり変わらずに低下し続けた。浸漬直前と浸漬終了時の鼓膜温の差を比較すると有意差が認められた。

浸漬部の温度感覚は浸漬開始12分後、有意差は認められていないが炭酸泉浴の方がやや温かいと感じて

おり、先行研究^{8, 9, 11, 12, 13, 14)}の結果を支持した。水温25℃においても炭酸泉浴が冷却刺激を軽減し適度な温度感覚を保てる可能性が示唆された。

以上より、運動によって上昇した核心温の低下の程度について、実験1(30℃・静水浴)では炭酸泉浴と真水浴との間に有意な差は認められなかったが、実験2(30℃)及び実験3(25℃)の浴槽内に水流を起こす条件(渦流浴)では、炭酸泉浴は真水浴より有意に核心温が低下した。本研究では、3つの実験を独立したものとして実施している。よって、それぞれを直接比較することはできないが、実験1(静水浴)と実験2, 3(渦流浴)の違いが、浸漬部の皮膚温の結果で表れた。実験1では浸漬中の浸漬部(下腿部)皮膚温に有意差は認められなかったが、実験3では炭酸泉浴で浸漬部皮膚温が有意に高く、このことは渦流によって水温と皮膚温の温度勾配を保つことが出来たため、渦流による熱放散が促進された結果によるものと推測される。さらに、浸漬中の下腿部からの熱放散以外にも、非浸漬部からの熱放散も考慮する必要があるが、いずれの実験においても、本研究では大腿部以外の皮膚血流量、皮膚温及び発汗量の測定は行っていない。しかし、測定した非浸漬部である大腿部の皮膚血流量では炭酸泉と真水の条件間で有意な差は認められていないことから、非浸漬部からの熱放散は同じであったと推測される。一方、実験2, 3では炭酸泉浴で核心温低下が有意に大きかったにも関わらず、浸漬中の水温の変化量は炭酸泉で大きかったが、いずれも有意な差は認められなかった。水面と室内の熱移動量に影響された可能性も考えられるが、閉鎖系で浸漬を行う実験装置の開発などを含め、より詳細な検討も必要と思われる。

5. 結 論

皮膚温より低温の高濃度人工炭酸泉浴は、同温の真水浴と比較して浸漬部の皮膚血流量を高く維持できることから、深部熱を皮膚表面に循環させ熱放散を促進し、暑熱環境暴露や運動により上昇した核心温を低下させる可能性が示唆された。

本研究の結果から、夏季における運動や労働での休憩時間に高濃度人工炭酸泉浴を用いて身体冷却を行うことで、同温度の真水浴よりも効果的な熱中症対策になりうることを期待される。

《謝 辞》

お忙しい中、快く協力して下さった被験者の皆様のおかげで本実験を行うことができましたこと、心より感謝申し上げます。また、研究室のメンバーを含む

本研究に関わり支えてくださった全ての方に厚く御礼申し上げます。

《引用文献》

- 1) 総務省消防庁. 過去の全国における熱中症傷病者救急搬送に関わる報道発表一覧.
http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/fieldList9_2_1.html
- 2) 環境省. 熱中症予防情報サイト.
<http://www.wbgt.env.go.jp/>
- 3) 筒井隆夫, 井戸田望, 永野千景, 堀江正知, 曾我部靖博, 門司幸一. 暑熱環境下での下肢運動における下肢冷却服の体温上昇抑制効果. 産業医科大学雑誌, 27: 63-71, 2005
- 4) Onitsuka, S, Zheng X, Hasegawa H. Ice slurry ingestion reduces both core and facial skin temperatures in a warm environment. *J Therm Biol*, 5: 105-109, 2015
- 5) 中野匡隆. 運動後の疲労回復の方法としての入浴が身体に及ぼす影響. 東邦学誌, 42: 97-107, 2013
- 6) 時澤健, 岡龍雄, 安田彰典, 田井鉄男, ソンスヨン, 澤田晋一. 暑熱負担を軽減する作業前の実用的かつ簡便な身体冷却方法. 労働安全衛生研究, 8: 79-82, 2015
- 7) 大森圭, 宮下智, 古川順光, 吉野直美, 村井真由美, 内田勝雄. 高濃度人工炭酸泉によるクーリングダウン効果. 山形保健医療研究, 3: 43-47, 2000
- 8) 長野央歩, Khatun A, 藤森加奈恵, 國分休, 田井村明博. 低温の人工炭酸泉浴における水温、浸漬部位の違いが体温調節反応に及ぼす影響. 体力・

栄養・免疫学雑誌, 26: 133-135, 2016

- 9) Taimura A, Matsunami M, Nakagaichi M, Sugawara M. Effects of Highly Concentrated Artificial Carbonic Acid Forearm-Bathing on a Core Temperature Cooling for Hyperthermia, *Med Sci Sports Exerc*, 42: s542, 2010
- 10) 長野央歩, 田井村明博, 藤森加奈恵. 運動後の人工炭酸泉浴における浸漬部位の違いが生体に及ぼす影響. 日本生理人類学会誌, 21: 54, 2016
- 11) 西村直記, 菅屋潤壹, 松本孝朗, 加藤雅子, 犬飼洋子, 西山哲成, 緒方昭広, 佐藤麻紀, 谷口裕美子, 米澤弘恵. 人工炭酸泉(1000ppm)全身浴時の体温、皮膚血流量、発汗量および主観的感覚に及ぼす水温の影響. 人工炭酸泉研究会雑誌, 4: 49-56, 2003
- 12) 入来正躬. (人工)高濃度炭酸泉の基礎と臨床. 人工炭酸泉研究会雑誌, 4: 39-48, 2003
- 13) Schmid KL. 炭酸浴(炭酸泉). 入来正躬(訳). 人工炭酸泉研究会雑誌, 1: 5-9, 1998
- 14) 田井村明博, 林谷ちひろ, 樋口健吾, 松波勝, 菅原正志. 高濃度人工炭酸泉が手部末梢循環に及ぼす影響. 体力・栄養・免疫学雑誌, 15: 116-117, 2005

《連絡先》

田中 佑季

〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14

長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科(環境科学領域)環境生理学研究室

E-mail: bb53618005@ms.nagasaki-u.ac.jp

(2018年11月7日受付, 2019年3月12日採用決定, 討論受付期限2020年5月末日)