

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：43807

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11384

研究課題名（和文）低温炭酸泉を用いた実践的な身体冷却方法の開発

研究課題名（英文）Development of a practical body cooling method using a low-temperature carbonated spring

研究代表者

林 恵嗣（Hayashi, Keiji）

静岡県立大学短期大学部・短期大学部・教授

研究者番号：00431677

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、まず基礎的なデータ収集を目的とし、炭酸泉の水温や濃度、皮膚温の違いによって皮膚血流量がどのように変わるかを検討し、水温を低下させすぎると皮膚血管拡張が起こらないことや水温が低くても皮膚温が高い状態で浸漬させた場合には皮膚血管拡張が維持されることが明らかとなった。また、実際の現場で実施しやすい冷却方法として下肢浸漬の効果を検討した結果、冷却面積を大きくしないと炭酸泉による冷却効果が期待できないことが明らかとなった。これらのことから、炭酸泉による身体冷却効果を得るためには、皮膚温が高い状態で冷却を開始し、冷却面積を大きくすることが重要であることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

通常、炭酸泉は温浴効果を高めることを目的として使用される。これを、高体温状態からの素早い回復を目的とした身体冷却を目的として使用する点で独創的な研究である。研究の結果、炭酸泉が水道水よりも高い冷却効率を示すには、炭酸泉の水温や濃度、冷却開始時の皮膚温の状態などが影響し、冷却面積をある程度確保しておかないと効果がみられないことも明らかとなった。これらは、炭酸泉を用いて身体冷却を行う際に抑えておくべきポイントであり、これらの条件を満たすことで、低温炭酸泉浸漬が新しい身体冷却方法として提案できるものと期待できる。

研究成果の概要（英文）：The objective of this research project was to collect basic data and examine how skin blood flow changes depending on the water temperature, concentration, and skin temperature of the CO₂-rich water. The results also showed that cutaneous vasodilation was maintained when the skin temperature was maintained relatively high during immersion even the water temperature was low. In addition, the effect of immersion in the lower limbs was examined as a cooling method, and it became clear that the cooling effect of the CO₂-rich water cannot be expected unless the cooling area is large. These findings suggest that in order to obtain the body cooling effect of CO₂-rich water, it is important to start cooling at high skin temperature and to increase the cooling area.

研究分野：運動生理学、環境生理学

キーワード：皮膚血管拡張 皮膚血流量 二酸化炭素

1. 研究開始当初の背景

暑熱環境下(夏季)での運動時には、体温が過度に上昇することがある。この過度な体温上昇は直接的もしくは間接的に運動パフォーマンスの低下を引き起こしたり、熱中症を引き起こしたりする。最近では、健康志向の高まりもあり、老若男女問わず運動やスポーツ活動が盛んに行われているが、近年では夏季の気温上昇が大きく、熱中症発生件数は増加しており、競技者でなくとも暑熱下での各種スポーツ活動時における安全確保は非常に重要である。さらに、競技者においては、暑熱下においても高いパフォーマンスを発揮せねばならないこともある。したがって、暑熱下において運動能力を高める、もしくは運動能力の低下を抑制する方法を明らかにすることも、健康・スポーツ科学分野において非常に重要であると言える。このように、効果的な暑さ対策を構築することは重要な課題であると言える。

これまで暑さ対策としては、あらかじめ暑さに馴れることで熱放散反応(皮膚血管拡張反応および発汗反応)を高めるといった暑熱順化や、事前に身体を冷却して体温を低下させておくプレクーリング等についての研究が行われ、また実際に行われてもきた。暑さ対策としては、熱放散能力を高める方法と効果的に身体を冷却させる方法が考えられてきたが、身体冷却については、冷水に身体を浸漬することから、冷たい・寒いという不快感があることや、皮膚血管が収縮することで急激な血圧上昇が生じるといった欠点があるのも事実である。特に、プレクーリングの場合には、運動前に体温を低下させることから、冷却時間が長くなってしまふという欠点もある。したがって、不快感を生じさせず効果的に行える身体冷却方法を構築することは、暑さ対策を追及する上で重要な課題の一つと言える。

そこで研究代表者は、水道水ではなく、炭酸泉を用いる身体冷却方法について検討をしてきた。炭酸泉に浸漬すると、炭酸泉に含まれる二酸化炭素(CO_2)が皮下組織へ浸透し、これにより皮膚血管拡張が起こる。皮膚血管拡張が起こると、熱移動が起こりやすくなることから、低温の炭酸泉を用いることで効果的に身体冷却を行うことができると期待できる。実際に、これまでの研究で、体温が上昇した状態から30分の炭酸泉へ全身を浸漬させると、同じ温度の水道水と比較して1.7倍速く体温が低下することを明らかにした。また、炭酸泉浸漬は、皮膚血管拡張によって生じる皮膚血流量の増加や温度受容器の活性化等により、同じ温度の水道水よりも暖かく感じられる。このことによって、温度感覚や快適感覚についても、炭酸泉に浸漬した場合には、同温度の水道水と比較した場合よりも、暖かく感じられ、より快適に感じられることを明らかにした。このように、低温の炭酸泉浸漬は、同温度の水道水への浸漬と比較すると、冷却効果が高いだけでなく、不快感も軽減できる身体冷却方法であると言える。しかしながら、これまでの研究では全身冷却を行っており、現場において容易に実践できる方法とは言えない点が課題であった。また、どの程度の水温まで効果が見られるのか、どの程度の濃度が必要なのか、といった基本的な情報も明らかとなっていない。このような課題が残されているが、次のステップとして、現場でも実践可能な冷却方法を確立することが重要と考えた。

2. 研究の目的

本研究課題では、1)低温炭酸泉を用いた現場でも実践可能な冷却方法について検討するとともに、2)炭酸泉の濃度や水温等の違いによって皮膚血管拡張反応がどのように変わるかを検討することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究課題では、1)体温が上昇した状態から、低温の炭酸泉浸漬と CO_2 を含まない水への下半身浸漬を行い、体温が元の温度に戻るのにどのくらいの差があるかを検討し(実験1)、2)炭酸泉の濃度や水温等の違いによって皮膚血管拡張反応がどのように変わるかを検討した(実験2)。

【実験1】

実験1では、体温を1℃程度上昇させた状態から、下半身を低温の炭酸泉浸漬と CO_2 を含まない水(水道水)への浸漬を行い、体温が元の温度(加温前)まで戻るのに要する時間および冷却速度(冷却時間と体温変化から算出)を比較して、炭酸泉浸漬の有効性を検討した。この実験では、炭酸泉と水道水の温度を25℃とした。

【実験2】

実験2では、前腕を水道水に5分間浸漬させた後、水道水に CO_2 を加えて炭酸濃度を上昇させた。水温は25℃もしくは40℃に設定した。水温の違いと炭酸濃度の違いによって皮膚血流量がどのように変わるかを検討した(実験2-1)。また、低温炭酸泉浸漬開始時の皮膚温の違いが炭酸泉浸漬中の皮膚血流量へ及ぼす影響についても検討した(実験2-2)。実験2-2では、

25、32、40 に設定した水道水に前腕を 10 分間浸漬させて皮膚温を変化させた後、25 の炭酸泉に前腕を浸漬させ、皮膚血流量が 3 条件間でどのように違うかを評価した。

【本研究で用いた炭酸泉】

本研究では、人工炭酸泉製造装置を利用し、炭酸濃度が最大で 1,300 ppm の炭酸泉を生成して用いた。皮下組織へ浸透した CO₂ は、呼気として排出される。炭酸飲料の濃度 (約 3,000 ppm) よりも低く、今回用いた濃度では、人体への影響はほとんどないと考えられる。

4. 研究成果

【実験】

健康な男性 10 名を対象とし、40 に設定した水道水に 15 分間、肩まで浸かり体温を上昇させた後、25 に設定した水道水もしくは炭酸泉へ移動して下半身の冷却を行った。冷却時間および冷却速度から冷却効果について評価した。冷却時の炭酸泉および水道水への浸漬時間は、体温が入浴前のレベルにまで戻るか、被験者が測定中止を求めるまでとした。炭酸泉と水道水への浸漬の順番はランダムにして行った。測定項目は、舌下温、皮膚温、心拍数、大腿部皮膚血流量、快適感覚、温熱感覚であった。

図 1A に舌下温の変化を示す。40 の湯への入浴により、舌下温は 1.3~1.4 上昇した。炭酸泉に浸漬していた時間は 10 ± 3 分で、水道水に浸漬していた時間は 11 ± 4 分であった (P = 0.44)。冷却速度は、炭酸泉条件で 0.13 ± 0.07 /分、水道水条件で 0.16 ± 0.07 /分であった (P = 0.26)。図 1B に大腿部皮膚血流量を示す。大腿部皮膚血流量は、1 名で測定できなかったため、9 名のデータとなる。大腿部皮膚血流量は、冷却中炭酸泉条件で有意に高い値を示した (P < 0.01)。このことから、炭酸泉による皮膚血管拡張は起こっていたと考えられる。また、平均皮膚温は炭酸泉条件で有意に高値を示したが、これは冷却部位での皮膚温の高さによって生じていた。これは皮膚血流量の増加によると考えられる。一方で、温熱感覚や快適感覚に条件間で差はみられなかった。

全身冷却を行った先行研究では、炭酸泉は水道水の 1.7 倍の冷却効果があったことから、冷却面積が小さくなることで炭酸泉による冷却効果が小さくなると考えられる。炭酸泉を用いる場合には冷却面積を大きくすることが重要であることが示唆された。

【実験 - 1】

被験者は健康な男性 14 名であった。椅坐位にて安静を保ち、左前腕を水に浸漬させていない状態でベースライン値を測定した後、左前腕を水道水に浸漬させた。その後、水道水に二酸化炭素を加えて炭酸濃度を上昇させた。水温は 25 もしくは 40 に設定し、被験者は両条件での測定を行った。測定の順番はランダムに行い、測定間は 30 分以上空けるようにした。測定項目は、舌下温、左前腕部皮膚温、心拍数、左前腕部皮膚血流量であった。皮膚血流量はレーザー血流量計

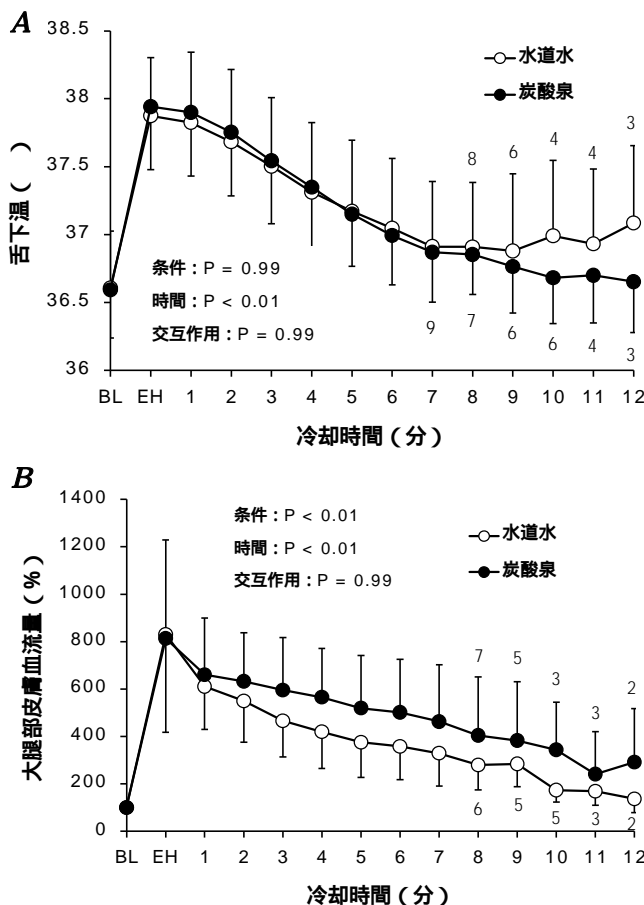


図 1 . 実験中の舌下温 (A) と大腿部皮膚血流量 (B) の変化 .

図中の数字は冷却中の被験者数を示す。BL はベースライン、EH は加温終了を示す。

を用いて測定し、安静時の値を 100% とした相対値で評価した。

浸漬中は、炭酸泉濃度に関係なく皮膚血流量が水温 40 条件で水温 25 条件よりも有意に高い値を示した (図 2A)。水温 25 条件では、炭酸泉濃度は約 1400 ppm まで上昇したが、水温 40 条件では約 1100 ppm までの上昇であった。二酸化炭素濃度に対して皮膚血流量をプロットし、直線回帰分析を行った結果、回帰直線の傾きは水温 40 条件で $0.277 \pm 0.210 \%$ /ppm、水温 25 条件で $0.046 \pm 0.039 \%$ /ppm であり、条件間で有意差が認められた (図 2B)。

以上のように、水温の違いによって、炭酸泉濃度の変化に対する皮膚血流量の増加割合は大きく異なる。水温を低くすることによって、皮膚血管拡張の度合いが小さくなることから、水温を下げすぎると炭酸泉による皮膚血管拡張のメリットが見られなく可能性があると考えられる。

【実験 - 2】

健康な男性 12 名を対象とし、25、32、40 に設定した水道水に前腕を 10 分間浸漬させて皮膚温を変化させた後、25 の炭酸泉に前腕を浸漬させ、皮膚血流量が 3 条件間でどのように違うかを評価した。測定項目は、舌下温、前腕部皮膚温、前腕部皮膚血流量であった。皮膚血流量はレーザー血流計を用いて測定し、安静時の値を 100% とした相対値で評価した。

炭酸泉へ浸漬させる直前の皮膚温は、25 条件で 26.3 ± 0.4 、32 条件で 32.6 ± 0.2 、40 条件で 39.7 ± 0.2 であった。炭酸泉浸漬中の皮膚血流量は 40 条件で最も高く、25 と 32 の両条件よりも有意に高い値を示したが、25 条件と 32 条件では、条件間に有意差は見られなかった (図 3)。このことから、浸漬開始時の皮膚温が通常体温時よりも高い状態であれば、低温の炭酸泉であっても皮膚血管拡張がある程度維持されると考えられる。

以上の実験結果から、低温の炭酸泉を身体冷却へ用い場合には、冷却面積を大きくすることが重要であり、水温よりも皮膚温が影響することが明らかとなった。体温上昇時には皮膚温も高くなっていることから、冷却を行う場合には皮膚温が下がってしまう前に速やかに冷却作業を始めることも必要と考えられる。皮膚温が高いと、皮膚血管が拡張している状態であることから、この状態を維持することが重要と考えられる。

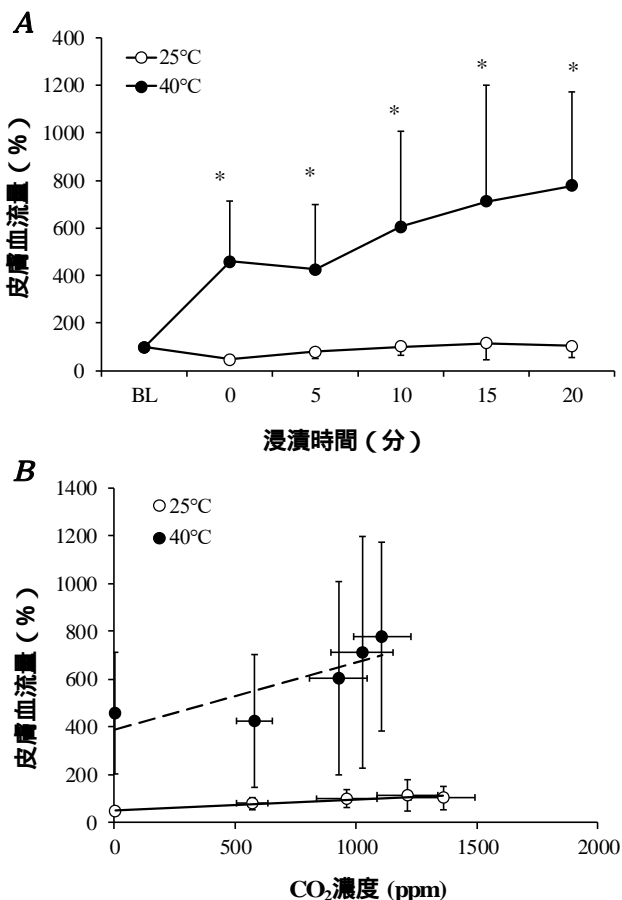


図 2 . 浸漬時間に対する皮膚血流量の変化 (A) と CO₂ 濃度に対する皮膚血流量の変化 (B)。

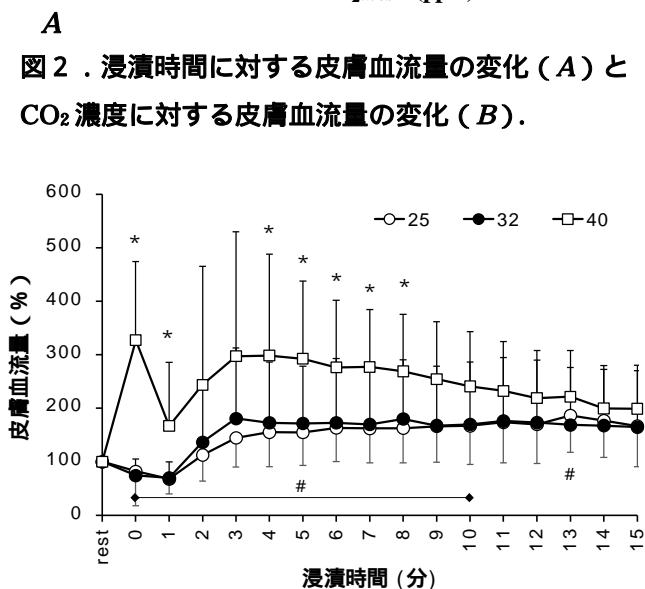


図 3 . 浸漬時間に対する皮膚血流量の変化。

* : P < 0.05、 40 vs. 25

: P < 0.05、 40 vs. 32

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Hayashi Keiji	4. 巻 40
2. 論文標題 Comparison of low-concentration carbon dioxide-enriched and tap water immersion on body temperature after passive heating	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physiological Anthropology	6. 最初と最後の頁 20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40101-021-00271-z	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 林 恵嗣
2. 発表標題 炭酸泉による下肢浸漬の身体冷却効果に関する検討
3. 学会等名 第31回日本運動生理学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 林 恵嗣
2. 発表標題 水温の違いが炭酸泉浸漬による皮膚血管拡張反応へ及ぼす影響
3. 学会等名 第77回日本体力医学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林 恵嗣
2. 発表標題 低温炭酸泉が身体冷却時の体温変化に及ぼす影響
3. 学会等名 第76回日本体力医学会大会
4. 発表年 2021年

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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