

## 原 著

人工炭酸泉(1000 ppm)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

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

## はじめに

温泉療法は, 泉質(薬理・生化学的作用)や湯温(温熱作用)による直接的な作用因子と地形などの環境(心理的作用)による間接的作用因子が, 複合的に自律神経系や内分泌系などに作用することで, その効果が得られると考えられる。現在では, 入浴剤や機器を用いることで人工的な温泉を容易に作成することが可能となり, 自宅でも天然温泉とほぼ等しい組成の温泉水を得ることが出来るようになった。炭酸泉を用いた温泉療法は, 泉質の薬理作用による皮膚血管拡張効果を利用して, 高血圧症や末梢循環障害などを対象に適応されており, その効果についても古くから国内外で確認されている<sup>1-5)</sup>。ヨーロッパなどでは, 中性水温(約34℃)もしくはそれ以下の水温での炭酸泉を温泉療法として用いることが多く, またその入浴スタイルは半身浴もしくは足浴である。これは中性水温での炭酸泉においても十分な皮膚血管拡張効果が得られるとともに, 同水温でのさら湯よりも温感が得られるためであると考えられるが, それ故に高水温での炭酸泉についての報告は僅かである<sup>6,7)</sup>。日本古来からの入浴形態である頸部までお湯に浸漬する全身浴は, 高水温では温熱による末梢循環改善効果が期待できる反面, 大きな熱負荷のため体温調節機能に対する負担が大きい。また循環機能に対しての負担も大きく, 入浴中の心血管機能の異常による事故発生が問題とされている。そこで本研究では, 中性および高水温下での人工炭酸泉へ全身浴を行った時の皮膚血管拡張効果を含む体温調節の様相を, 主観的な温度・快適感覚を含めた温熱生理学的パラメータを測定して同水温でのさら湯浴時と比較することにより検討した。

## 方 法

## 実験対象

種々水温下での人工炭酸泉への全身浴は, 健康成人男性7名(年齢23.9±1.7歳, 身長173.2±3.2 cm, 体重69.0±4.7 kg)を対象に, また同一皮膚部位で異なる深さの血流動態の観測は, 健康成人男性6名, 女性2名(年齢27.9±4.2歳, 身長164.2±3.6 cm, 体重60.1±4.6 kg)を対象に行った。実験を行うにあたり, すべての被験者には実験の目的, 方法, 予測される利益と危険性およびそれに対する安全対策についての十分な説明を行い, 被験者として実験参加の同意を得た。また本研究は, 愛知医科大学医学部倫理委員会の審査を受け, 承認を得た上で, ヘルシンキ宣言にもられたヒトを対象とする医学研究の倫理的原則に従って行った。

## 実験手順

## 実験1. 人工炭酸泉への全身浴

実験は, 室温28℃, 相対湿度40%に設定した人工気候室内にて行った。被験者には水泳パンツのみを着用させ, リクライニングチェア上で30分間の安静を行わせた後, 人工炭酸泉製造装置(MRE-SPA, 三菱レイヨン・エンジニアリング, 東京)により調製した炭酸泉(1000 ppm)を満たした浴槽(150 l)に乳頭の高さまで浸漬し, 20分間の全身浴(炭酸泉浴)を行わせた。出浴後は再びリクライニングチェア上に戻り, 15分間の回復を行わせた。安静時および回復時のそれぞれ15分間は, 浴槽水と同じ水温のさら湯を満たしたプラスチックバケツに一側前腕(皮膚血流量測定部位)のみを浸漬させることで血流測定プローブと皮膚の間の空間

を浴槽水と媒質を同じにし、さらに皮膚血流測定部の皮膚温を入浴時と同じに保たせた(図1)。水温は34℃、37℃および39℃の3条件で行った。また、入浴開始直前と終了直後に浴槽水のCO<sub>2</sub>濃度(pH)の測定を行い、浴槽水のCO<sub>2</sub>濃度が約1000 ppm(pH 4.6)に維持されていることを確認した。後日、対照実験として炭酸泉浴と同じ水温でのさら湯浴を行った。

鼓膜温の測定には、サーミスタ温度計(ST-21S, センサテクニカ, 愛知)を用いて連続記録した。局所発汗量は、前額部および前胸部の2カ所に断面積8 cm<sup>2</sup>のカプセルをコロジオンで装着した後、カプセル内を窒素ガス(1.5 l/分)で換気し、カプセルから流出するガスの湿度変化を高感度容量湿度計(HMI-14, Vaisala, Finland)を用いて連続記録して発汗量に換算した。

皮膚血流量の測定には、レーザードップラー組織血流計(ALF-21, アドバンス, 東京)を用い、前胸部(非浸漬部)には接触型プローブ(S型)を装着し、前腕部(浸漬部)には測定部の皮膚に炭酸水を接触させて測定するために非接触型プローブ(NCP型)を皮膚から約3 mm離れた状態で固定、それぞれ連続記録した。

さらに、温度感覚については、「暑い」「暖かい」「少し暖かい」「中立」「少し涼しい」「涼しい」「寒い」の7段階とし、温熱的快適感覚については

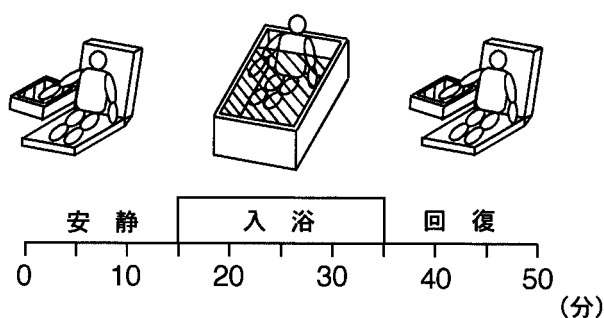


図1 実験方法(実験1)

「非常に不快」「不快」「少し不快」「快適」の4段階とし、それぞれカテゴリーの聞き取りを5分毎に行った。いずれも図6、7に示すように各カテゴリーを7~1と4~1に数値化して演算処理した。

鼓膜温、局所発汗量および皮膚血流量については、1秒毎のデータをパーソナルコンピュータに取り込み、1分毎に平均値±標準誤差を求めた。平均値の差の検定は、paired t-testを用い、危険率5%未満を有意とした。

#### 実験2. 同一皮膚部位で異なる深さの血流量

実験は、室温26℃、相対湿度40%に設定した人工気候室内にて椅座位で行った。被験者の着衣については、Tシャツとズボンを着用させた。被験者に、水温35℃のさら湯を満たしたプラスチックバケツに右前腕のみを10分間浸漬させた後、同水温の人工炭酸泉(1000 ppm)を満たしたプラスチックバケツに速やかに移動させ、同じく10分間浸漬させた(図2a)。同一皮膚部位で異なる深さの血流量の測定は、一つの照射用光ファイバーに対して3つの異なる間隔(0.3 mm, 0.5 mm, 0.9 mm)で受光用光ファイバーが設定してある皮膚血流プローブ(図2b: MLプローブ, オメガウェーブ, 東京)を用い、右前腕部の皮膚から僅かに浮かせた状態(< 1 mm)で固定し、レーザードップラー組織血流計(FLO-NS4, オメガウェーブ, 東京)を用いて連続記録すると同時にパーソナルコンピュータに取り込み、1分毎に平均値±標準誤差を算出した。理論上では、照射用光ファイバーと受光用光ファイバーの間隔が0.3 mm, 0.5 mm, 0.9 mmでは、皮膚表面からそれぞれ深さ0.6 mm, 1.0 mm, 1.8 mmまでの血流量が測定されている<sup>8)</sup>。多群間の差の検定はBonferroni/Dunnで行い、危険率5%未満を有意とした。

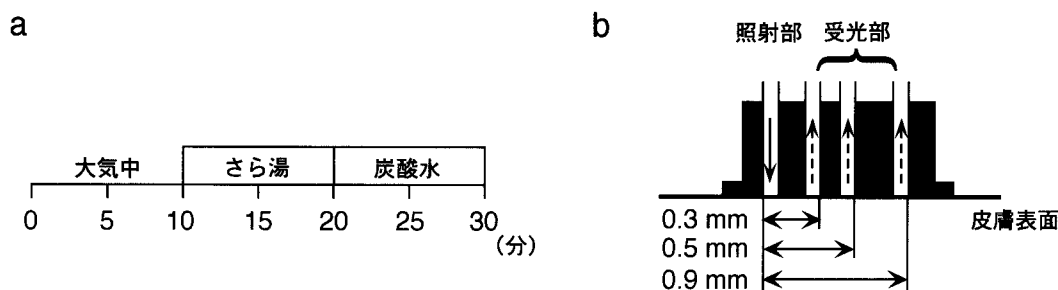


図2 実験方法(a:実験2)と異なるファイバー間隔の血流プローブ(b)

## 結果

炭酸泉浴およびさら湯浴における皮膚血流量の経時変化の平均値を図3に示す。水温34℃の浸漬部では, 炭酸泉浴開始数十秒後から皮膚の紅潮と共に著しい皮膚血流量の増加がみられ, 炭酸泉浴中はさら湯浴中と比較して有意( $p<0.05$ )に高値を示した(図3a)。水温37℃, 39℃の浸漬部では温熱負荷が大きくなるにつれて皮膚血流量の増加は大きくなるが, 入浴中は炭酸泉浴がさら湯浴よりも高値を示した(図3b,c)。39℃では, 入浴終了後には, 炭酸泉浴でより速やかな皮膚血流量の減少が認められた。非浸漬部では水温34℃および37℃ではほとんど増加が見られず(図3a,b), 水温39℃では, 緩やかな増加が入浴中に認められた(図3c)。

炭酸泉浴およびさら湯浴時における鼓膜温の経時変化の平均値を図4に示す。水温34℃では, 炭酸泉浴開始数十秒後から終了時まで鼓膜温が下降し続け, 炭酸泉浴開始5分後以降はさら湯浴よりも有意( $p<0.05$ )に低値を示した(図4a)。炭酸泉浴終了後は, 速やかな回復傾向を示したが, 浴後15分経過しても入浴前安静時のレベルまで戻らなかった。水温37℃では, 炭酸泉浴およびさら湯浴の入浴中と入浴後に大きな変化は認められなかった(図4b)。水温39℃では, 入浴開始直後の5分以内に一過性の低下(初期低下 initial fall)が起こり, とくに炭酸泉浴において顕著であった(図4cには表現されていない)ため, 炭酸泉浴においては鼓膜温の上昇が遅れ, さら湯では入浴開始約3分後から上昇し始めたのに対し, 炭酸泉浴では入浴開始約5分後から上昇へと移行した。特徴的なことは,

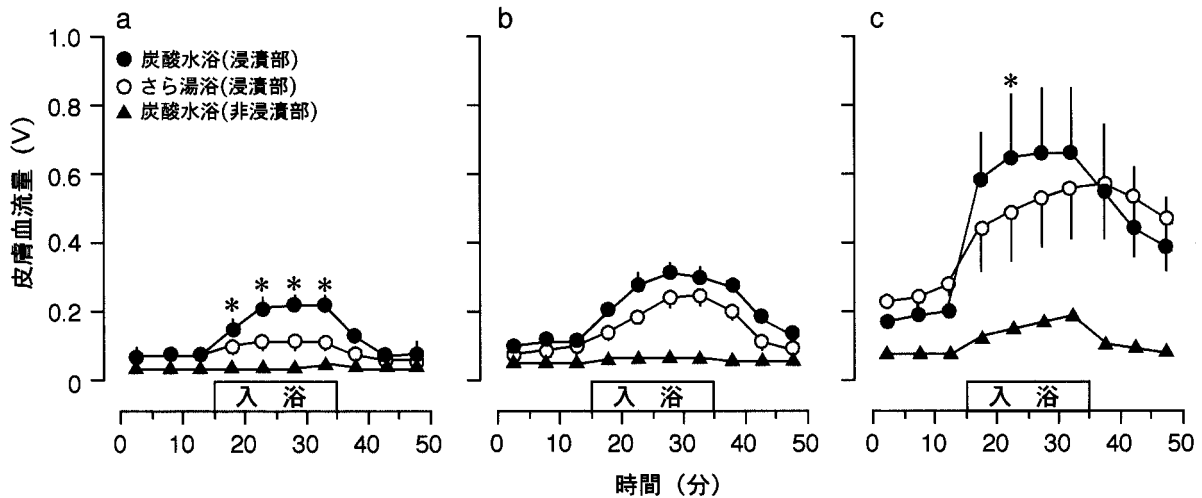


図3 種々水温下 (a : 34℃, b : 37℃, c : 39℃) での炭酸泉浴およびさら湯浴時における皮膚血流量の経時変化。値は5分毎の平均値を表す。平均値±標準誤差。\* :  $p<0.05$  (炭酸泉浴とさら湯浴の比較)

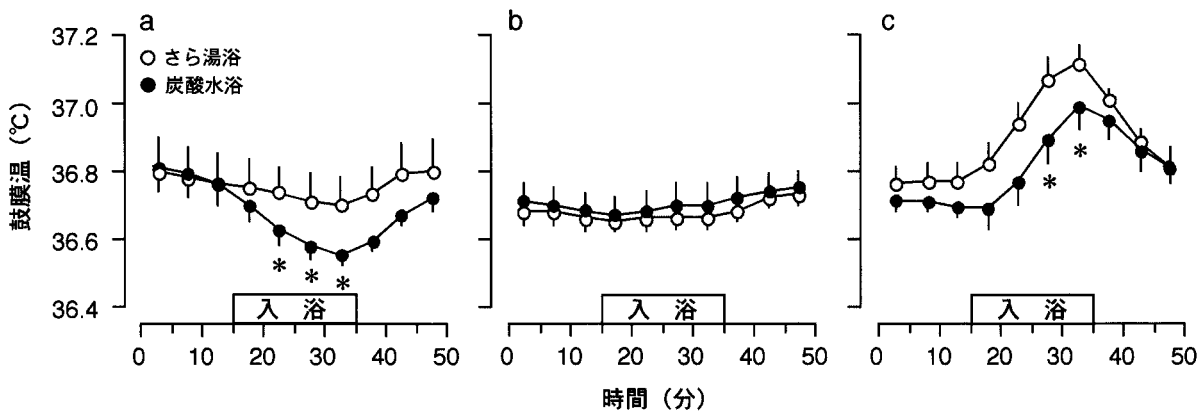


図4 種々水温下 (a : 34℃, b : 37℃, c : 39℃) での炭酸泉浴およびさら湯浴時における鼓膜温の経時変化。値は5分毎の平均値を表す。平均値±標準誤差。\* :  $p<0.05$  (炭酸泉浴とさら湯浴の比較)

入浴中の鼓膜温は炭酸泉浴がさら湯浴よりも低値を示したことであり、入浴終了時では、炭酸泉浴が $36.95 \pm 0.07$ ℃、さら湯浴が $37.10 \pm 0.06$ ℃で両者の間に有意な差が認められた(図4c)。

炭酸泉浴およびさら湯浴時における前胸部発汗量の経時変化の平均値を図5に示す。水温34℃および37℃では、炭酸泉浴およびさら湯浴ともに20分間の入浴中に発汗がほとんど認められなかった(図5a, b)。水温39℃では、炭酸泉浴、さら湯浴とも入浴後急速に増加し、入浴終了時にピークに達した。しかし、炭酸泉浴では発汗発現時間はさら湯浴よりも遅く、ピーク発汗量も有意( $p < 0.05$ )に少なかった(図5c)。前胸部での発汗量の経時変化は、前額部においてもほぼ同じ傾向にあった。

炭酸泉浴およびさら湯浴時における温度感覚および温熱的快適感覚の経時変化の平均値を図6, 7に示す。水温34℃の炭酸泉浴中では、鼓膜温が顕

著に低下(図4a)しているにもかかわらず、ほとんどの被験者が「やや暖かい」と感じているのに対し、さら湯浴中では鼓膜温の低下が緩やかであるが、7名中4名の被験者が「やや涼しい」と感じた(図6a)。また、炭酸泉浴中にはいずれの被験者においても「快適」と申告したが、さら湯浴中では「少し不快」と申告する者がみられた(図7a)。水温37℃では、炭酸泉浴中ではさら湯浴中よりも暖かく感じ(図6b)、入浴中は「快適」と申告する者がほとんどであった(図7b)。水温39℃では、入浴開始10分後まで炭酸泉浴中よりもさら湯浴中よりも暖かく(暑く)感じ、10分以降は炭酸泉浴およびさら湯浴ともに「暑い」と申告する者がほとんどであったが(図6c)、入浴中は炭酸泉浴よりもさら湯浴の方がより不快感を示した(図7c)。水温34℃、37℃および39℃のいずれにおいても、炭酸泉浴およびさら湯浴終了後には「涼しさ」を感じ

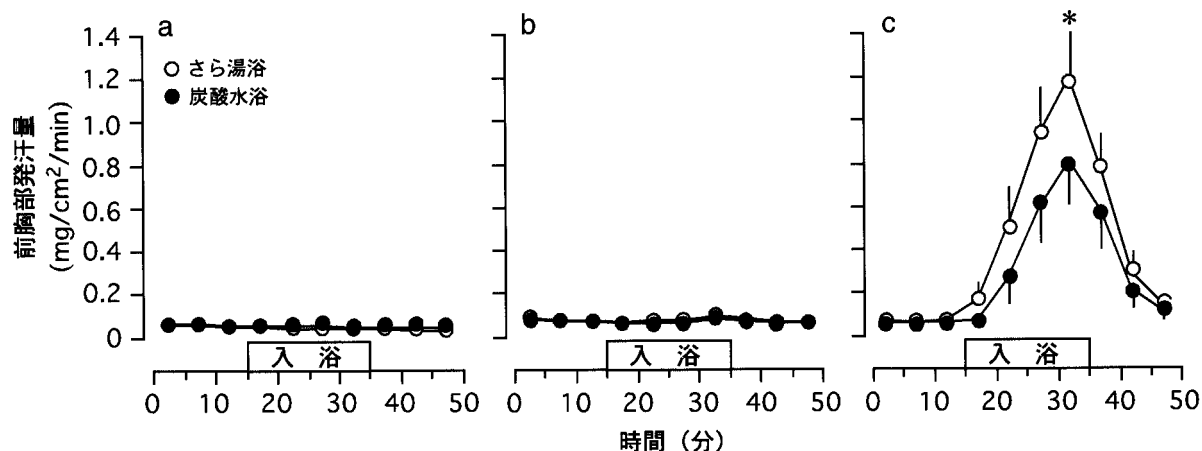


図5 種々水温下 (a : 34℃, b : 37℃, c : 39℃) での炭酸泉浴およびさら湯浴時における前胸部発汗量の経時変化。値は5分毎の平均値を表す。平均値±標準誤差。\* :  $p < 0.05$  (炭酸泉浴とさら湯浴の比較)

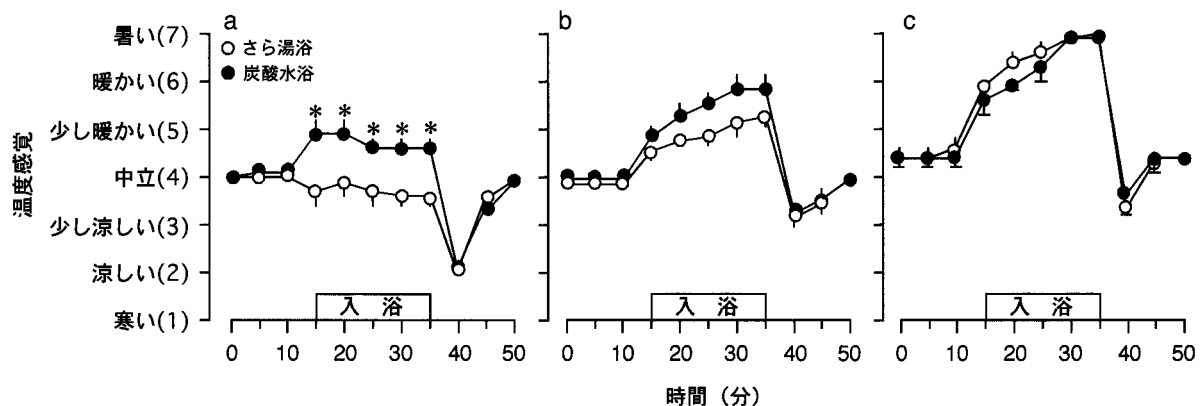


図6 種々水温下 (a : 34℃, b : 37℃, c : 39℃) での炭酸泉浴およびさら湯浴時における温度感覚の変化。平均値±標準誤差。

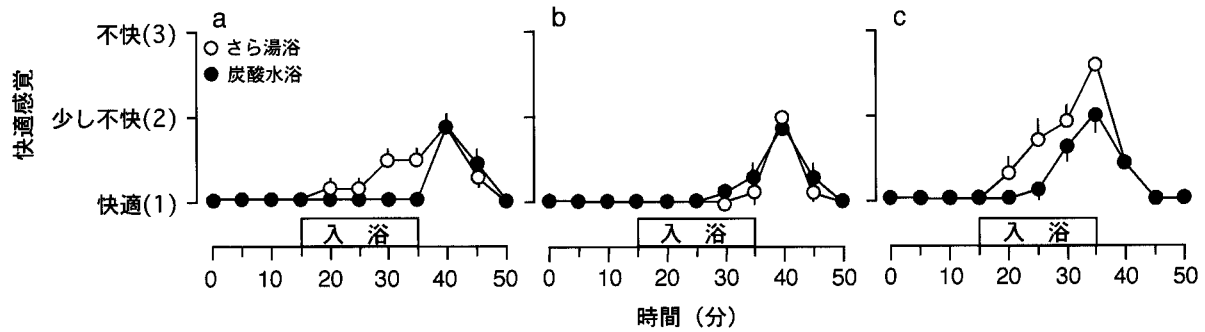


図7 種々水温下 (a : 34℃, b : 37℃, c : 39℃) での炭酸水浴およびさら湯浴時における快適感覚の変化. 平均値±標準誤差.

た. また, 入浴終了後は入浴終了直前に比べて水温 34℃と 37℃では不快感が増したが, 水温 39℃では入浴終了直前に不快感が著しく増したため, 入浴終了後はむしろ不快感が軽減した.

さら湯に対する炭酸水浸漬時の異なる深さでの血流量の変化率を図8に示す. ファイバー間隔が 0.3 mmでは 489.4 ± 90.3%, 0.5 mmでは 390.8 ± 42.7%, 0.9 mmでは 307.6 ± 28.0%の変化を認め, 0.3 mmと 0.9 mmとの間で有意差(p<0.05)が認められた. これは, 皮膚のより浅部での血流量の増加率が著しいことを示している.

### 考 察

炭酸泉浴時には, 皮膚血流量増加 (皮膚血管拡張) による皮膚の紅潮が浸漬部のみに観察され, 非浸漬部との間にはっきりとした境界線ができる<sup>1-5,9,10</sup>. 浸漬部での皮膚血流量の増加は, 水温の上昇に依存してより顕著となるが (図3), 皮膚の紅潮は, 水温 34℃での炭酸泉浴時においても, 皮膚血流量の増加とほぼ同じタイミングではっきりと観察することができる<sup>10</sup>. 先行研究では, 水温 20℃以下であっても皮膚の紅潮が観察されることが知られている<sup>11</sup>. CO<sub>2</sub>は水に比べて非常に皮膚に吸収されやすいため, 炭酸泉浴時には毛細血管領域での局所的な pHの低下<sup>12</sup>や組織 Pco<sub>2</sub>の増加<sup>3</sup>による Bohr 効果<sup>13</sup>が起こるとの報告がある. 一方, 動脈血 CO<sub>2</sub>濃度にはほとんど変化がみられないことから, 呼吸によって取り込まれた CO<sub>2</sub>は素早く体外へ呼出されると考えられる<sup>4</sup>.

水温 34℃および 37℃での炭酸泉浴時では, 非浸漬部位での皮膚血流量の増加がほとんどみられなかった (図3a,b). 神経切除を行ったラットの皮膚においても, 炭酸泉浴時には皮膚血流量の増加が観察される<sup>9</sup>ことから, 炭酸泉浴時の皮膚血流量の

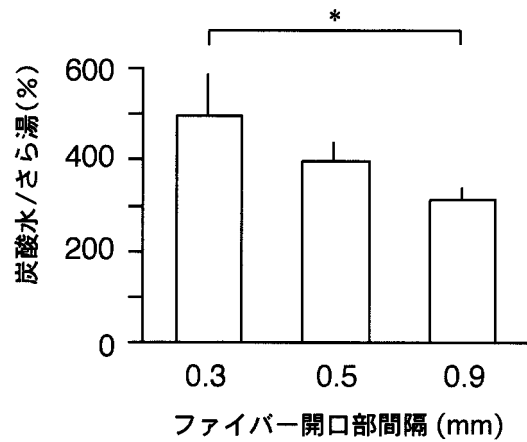


図8 異なるファイバー開口部間隔で測定した同一皮膚部位での皮膚血流量の比較. 炭酸水およびさら湯それぞれ浸漬終了前5分間の平均値により炭酸水/さら湯の比を示す. 平均値±標準誤差. \*: p<0.05 (分散分析による多重比較検定)

増加は神経系を介した全身性のものではなく, CO<sub>2</sub>の薬理的作用をうけた微小循環領域 (細動脈や前毛細管括約筋など) での局所性の血管拡張によると考えられる. また, 炭酸水へ浸漬させた時の皮膚血流量の増加率が, 皮膚表面のより浅い (皮膚表面から約 0.6 mm) 部分で最も大きく (図8), 測定深度に比例して皮膚血流量の増加率が減少したことは, CO<sub>2</sub>が皮膚から吸収されたことを示唆するものである. しかしながら, 経皮的に吸収された CO<sub>2</sub>が皮膚血管を拡張させるメカニズムについては未だ推論の閾を超えない. 現在のところ, アシドーシスが筋小胞体からの Ca<sup>2+</sup>放出や取り込みを減少させ, 血管平滑筋の収縮力を抑制 (血管拡張) することが知られている<sup>14-17</sup>ことから, 経皮的に吸収された CO<sub>2</sub>が carbonic anhydrase の作用で水と反応し, H<sup>+</sup>と HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>を産生するために細胞外がアシドーシスとなり, 血管平滑筋の弛緩を導くとの見解が有力である. さらに, in-vitro での実験においても, わずかな pHの変化 (7.4 ~ 7.0) でラ

ット大動脈平滑筋の収縮力が抑制される<sup>18)</sup>ことが知られているが、これらの実験結果はいずれも皮膚血管を対象としたものではない。また、プロスタグランディンやNOも血管拡張作用があることが知られており、メディエーターとして機能するかもしれない<sup>19-21)</sup>、炭酸泉浴時の血管拡張機序についてはさらなる検討が必要である。

水温34℃での入浴中に鼓膜温の低下が認められたが、低下の程度は炭酸泉浴がさら湯浴よりも有意に大きかった(図4a)。鼓膜温の低下は、CO<sub>2</sub>による皮膚血管拡張により体内からの熱放散が著しく増加したためであると考えられる<sup>10)</sup>。水中では、水の持つ物理的特性(空気よりも熱伝導率が約25倍、比熱が約1000倍も高い)により、水温と皮膚温との差が同じでも多くの熱が水中に失われる。水温39℃の炭酸泉浴時では、鼓膜温はさら湯浴と同様急速に上昇した(図4c)。これは、水温と皮膚温関係が逆転し、水中から体内への熱移動が起こった結果によるものであろう。水温37℃では、鼓膜温の変化を認めなかったが、この条件では熱の正味の移動が起こらなかったことを示している。

水温39℃での炭酸泉浴開始直後にみられた鼓膜温の初期低下は、CO<sub>2</sub>のもつ皮膚血管拡張作用に加え、湯による急激な温熱負荷に対する皮膚血管の反射的拡張に起因するものであり、入浴前(室温28℃、相対湿度40%)に冷やされた皮膚静脈血の体内への灌流が促進されることによると考えられる。いずれにせよ、水温39℃での炭酸泉浴中の鼓膜温がさら湯浴中よりも低値を示したことは、同じ水温ならさら湯浴よりも炭酸泉浴の方が体温調節機能に対する負担が少ないことを示している。また入浴終了後の鼓膜温は炭酸泉浴でよりゆるやかな回復傾向を示した。これは、炭酸泉浴終了後ではより速やかな皮膚血流量の減少(図3c)がみられたことから、皮膚血管収縮がおこることで体内からの熱放散が抑制された結果であると考えられる。よって炭酸泉浴後の保温効果は、さら湯浴後よりも大きいといえる。

水温39℃での炭酸泉浴中では、発汗量がさら湯浴中よりも少なく、また発汗発現時間の遅延(図5c)がみられた。高水温下での入浴時には、通常温熱性発汗が観察される。温熱性発汗を制御する体温調節中枢機構は、視床前野・前視床下部(PO/AH)にあり、体深部(中脳、延髄、脊髄)や皮膚の温度受容器からの温度情報が入力されることで作動する。高水温の入浴のような急激な加温時には、前述したように深部温の初期低下が見られ、これに相応して発汗活動は一過性に抑制される<sup>22)</sup>。水温39℃では、さら湯浴中よりも炭酸泉浴

中で発汗量が少なく、発汗発現時間の遅延がみられたこと(図5c)は、炭酸泉浴開始時の鼓膜温の初期低下により鼓膜温がさら湯浴中よりも低いレベルにあった(図4c)ことに基づく反応とみられる。

CO<sub>2</sub>はまた非温熱性要因として温熱性発汗中枢に影響を及ぼすことが知られている。高濃度CO<sub>2</sub>の吸入時には、温熱性発汗は増加し、深部体温が低下する<sup>23-25)</sup>。これは体温調節中枢のset-pointの低下による中枢性発汗活動の亢進に基づくとの証拠がある<sup>26,27)</sup>。しかしながら、水温39℃での炭酸泉浴時では、さら湯浴時に比べて発汗量の増加が少なく(図5c)、水温37℃では鼓膜温(図4b)や発汗量(図5b)にもほとんど変化がみられなかったことから、本研究における炭酸泉浴時にはCO<sub>2</sub>吸入による影響は無いと考えて良い。

水温34℃での炭酸泉浴時には鼓膜温の著しい低下がみられた(図4a)にもかかわらず、入浴中の温度感覚はほとんどの被験者が「やや暖かい」と感じ(図6a)、快適感覚は「快適」であった(図7a)。温度感覚や快適感覚は、皮膚の温度受容器からの情報と深部の温度受容器の情報が高次で統合されることで決定されると考えられている<sup>28)</sup>。温度感覚については、深部の温度受容器よりもむしろ皮膚の温度受容器に大きく影響されるとの報告もみられる<sup>29)</sup>。CO<sub>2</sub>には、皮膚血管拡張作用と共に皮膚の温度受容器の活動を修飾する作用があり、炭酸泉浴中では皮膚冷受容器活動の抑制と温受容器活動の興奮が起こる<sup>30)</sup>ため、さら湯では約35℃であった不感温度(暑くも寒くもない)が炭酸水では約33℃に低下する<sup>4,7)</sup>。すなわち、水温34℃での炭酸泉浴時において、ほとんどの被験者が「やや暖かい」と申告したことは、CO<sub>2</sub>により皮膚温度受容器の活動が修飾され、中枢への入力に変化したことによると推察される。CO<sub>2</sub>による皮膚温度受容器活動の修飾効果は、水温37℃においても温度感覚に反映され、炭酸泉浴中の方がさら湯浴よりも暖かく感じ(図6b)、いずれも「快適」な水温と評価された(図7b)。水温39℃になると水温の影響が大きくなり、温度感覚にはあまり差がみられなくなる(図6c)。これは水温上昇による温熱効果が大きく、CO<sub>2</sub>による皮膚温度受容器への修飾効果を隠蔽した結果であると推測される。炭酸泉浴の方がさら湯浴より快適感が大きかった(図6c)ことは、炭酸泉浴中の鼓膜温の上昇が小さかったことを反映した結果であると考えられる。また、いずれの水温においても炭酸泉浴およびさら湯浴終了後は、「涼しさ」を感じたが、水温34℃と37℃では不快感が増したのに対して、水温39℃

では不快感が軽減した。これは水温 34℃, 37℃では, 浴槽から出たときに皮膚に付着した水滴の蒸発により一過性に皮膚温が低下したことによると考えられ, 水温 39℃については, この皮膚温の低下と入浴中に上昇した鼓膜温の低下が原因となっているのであろう。

本研究でみられた炭酸泉浴がもたらす皮膚血管拡張効果や皮膚温度受容器活動の修飾は, 高水温下での入浴時において体温調節機能への負担を軽減させるとの結論を得た。高水温での入浴は, 高い血管拡張効果が得られることを考慮すると, 治療応用に際しては大きなメリットになりうることを示している。今後の課題として, CO<sub>2</sub>の皮膚血管拡張の機序解明と長期の連浴効果であり, 人体のみならず動物を用いた検討が期待される。

## 文 献

- Stein, I.D., Weinstein, I.W. (1942) The value of carbon dioxide baths in the treatment of peripheral vascular disease and allied conditions. *Am. Heart J.* 23: 349-361.
- Diji, A. (1959) Local vasodilator action of carbon dioxide on blood vessels of the hand. *J. Appl. Physiol.* 14: 414-416.
- Komoto, Y., Kohmoto, T., Sunakawa, M., Eguchi, Y., Yorozu, H., Kubo, Y., (1986) Dermal and subcutaneous tissue perfusion with a CO<sub>2</sub>-bathing. *Z. Physiother.* 38: 103-112.
- Schmidt, K.L. (1989) Kohlensäurewasser (Säuerlinge). In: *Kompendium der Balneologie und Kurortmedizin.* Steinkopff Verlag Darmstadt, Darmstadt, pp 171-180.
- Hartmann, B.R., Bassenge, E., Pittler, M. (1997) Effect of carbon dioxide-enriched water and fresh water on the cutaneous microcirculation and oxygen tension in the skin of the foot. *Angiology* 48: 337-343.
- Gollwitzer-Meier, K.L. (1937) Beiträge zur Wärmerregulation auf Grund von Bäderwirkungen. *Klin Wochenschrift* 41:1418-1421.
- Jordan, V.H. (1985) CO<sub>2</sub>-Bädetherapie. *Z. Physiother.* 37: 75-98.
- 鹿嶋 進, 後藤田芳宏, 満井頭太郎 (1996) レーザー組織血流計による皮膚毛細血管床血流と細動静脈血管床血流の分離観測法の研究. *医器学* 66: 307-313.
- Ito, T., Moore, J.L., Koss, M.C. (1989) Topical application of CO<sub>2</sub> increases skin blood flow. *J. Invest. Dermatol.* 93: 259-262.
- Nishimura, N., Sugeno, J., Matsumoto, T., Kato, M., Sakakibara, H., Nishiyama, T., Sakamoto, (Inukai), Y., Okagawa, T., Ogata, A. (2002) Effects of repeated carbon dioxide-rich water bathing on core temperature cutaneous blood flow and thermal sensation. *Eur. J. Appl. Physiol.* 87: 337-342.
- Hentschel, H.D. (1967) Über die Hautrötung im kohlen-saurebad. *Allgemeine Therapeutik* 7: 180-186.
- Pratzel, H. (1984) Aufnahme, abgabe, und stoffwechsel von CO<sub>2</sub> beim kohlendioxidbad. *Z. phys. Med. Blan. Med. Klim.* 13: 25-3.
- 白倉卓夫, 田村遵一, 倉林 均, 柳沢 勉, 久保田一雄 (1988) ヘモグロビン酸素解離曲線におよぼす人工炭酸泉の効果. *日温気物医誌* 51 (2) : 83-87.
- Tobian, L., Martin, S., Eilers, W. (1959) Effect of pH on norepinephrine-induced contractions of isolated arterial smooth muscle. *Am. J. Physiol.* 196 (5) : 998-1002.
- Vanhoutte, P., Clement, D. (1968) Effects of pH and Pco<sub>2</sub> changes on the reactivity of isolated venous smooth muscle. *Arch. Int. Physiol. Biochem.* 76:144-146.
- Breemen, C., Farinas, B.R., Gerba, P., McNaughton, E.D.(1972) Excitation-contraction coupling in rabbit aorta studied by the lanthanum method for measuring cellular calcium influx. *Circ. Res.* 30: 44-54.
- Fabiato, A., Fabiato, F. (1978) Effects of pH on the myofilaments and the sarcoplasmic reticulum of skinned cells from cardiac and skeletal muscles. *J. Physiol.* 276: 233-255.
- Loutzenhiser, R., Matsumoto, Y., Okawa, W., Epstein, M. (1990) H<sup>+</sup>-induced vasodilation of rat aorta is mediated by alterations in intracellular calcium sequestration. *Circ. Res.* 67: 426-439.
- Gurevicius, J., Salem, M.R., Metwally, A.A., Silver, J.M., Crystal, G.J. (1995) Contribution of nitric oxide to coronary vasodilation during hypercapnic acidosis. *Am. J. Physiol.* 268: H39-H47.
- Aalkjær, C., Peng, H.-L. (1997) pH and smooth muscle. *Acta Physiol. Scand.* 161: 557-566.
- 橋本真明, 山本憲志 (2002) 皮膚血流に対する人工炭酸泉浴の効果: 血管拡張のメカニズムの解析. 第7回人工炭酸泉研究会抄録集 p.3.
- 小川徳雄, 朝山正巳, 伊藤路子, 吉田勝志 (1977) 下肢温浴による暑熱負荷量の急変に対する発汗反応. *愛知医大誌* 5 (4) : 327-333.
- Bullard, R.W. (1964) Effects of carbon dioxide inhalation on sweating. *J. Appl. Physiol.* 19: 137-141.
- Ogawa, T., Sugeno, J. (1993) Pulsatile sweating and sympathetic sudomotor activity. *Jpn. J. Physiol.* 43: 275-289.
- 菅屋潤壹, 小川徳雄, 朝山正巳, 宮側敏明, 山下由果, 大西範和 (1984) CO<sub>2</sub>吸入時の手掌と一般体表面の発汗反応の比較. *愛知医大誌* 12 (4) : 578-583.
- Matsumura, K., Nakayama, T., Kaminaga, T. (1987) Effects of carbon dioxide on preoptic thermosensitive neurons in vitro. *Pflügers Arch.* 408:120-123.
- Sugeno, J., Ogawa, T. (1985) Characteristics of central sudomotor mechanism estimated by frequency of sweat expulsion. *Jpn. J. Physiol.* 35: 783-794.
- 満洲邦彦 (1995) 人工環境—温熱環境における快適性. 体温調節のしくみ, 入来正躬 (編), 文光堂, 東京, pp.160-177.
- Hensel, H. (1981) Thermal comfort in man. In: *Thermoreception and Temperature regulation.* Academic press, pp 168-184.
- Dotz, E. (1956) Die Aktivität der Thermorezeptoren bei nicht-thermischen Reizen bekannter thermoregulatorischer Wirkung. *Pflügers Arch.* 263: 188-200.

## Effects of Water Temperature on Body Temperature, Cutaneous Blood Flow, Sweat Rate and Subjective Sensation in Artificial Carbon Dioxide Rich-Water Bathing (1000 ppm) in Humans

Naoki NISHIMURA, Junichi SUGENOYA, Takaaki MATSUMOTO, Masako KATO,  
Yoko INUKAI, Tetsunari NISHIYAMA, Akihiro OGATA, Maki SATO, Yumiko TANIGUCHI,  
Hiroe YONEZAWA

*Department of Physiology, School of Medicine, Aichi Medical University  
Nagakute, Aichi 480-1195, Japan*

**Abstract.** In seven healthy males, the effects of whole body bathing with artificial CO<sub>2</sub>-rich water of a high concentration of 1000 ppm on tympanic temperature (T<sub>ty</sub>), cutaneous blood flow (CBF), local sweat rate and thermal sensation were examined at different water temperatures. Each subject was immersed in CO<sub>2</sub>-rich water at a temperature of 34, 37 and 39°C up to the level of the nipples for 20 min. As a control study, bathing in fresh water was carried out under the same conditions. CBF in the immersed forearm skin was higher during CO<sub>2</sub> bathing compared with fresh water bathing, and the CBF value averaged for the last 10 min of CO<sub>2</sub> bathing was  $0.22 \pm 0.01$  V,  $0.32 \pm 0.01$  V and  $0.66 \pm 0.01$  V for 34, 37 and 39°C, respectively. At 34°C, T<sub>ty</sub> was significantly lower during CO<sub>2</sub> bathing than in fresh water bathing. At 37°C, T<sub>ty</sub> was not altered by CO<sub>2</sub> bathing and the T<sub>ty</sub> level was not different between CO<sub>2</sub> bathing and fresh water bathing. At 39°C, however, T<sub>ty</sub> rose rapidly, but the rise of T<sub>ty</sub> occurred later and thus the mean level of T<sub>ty</sub> was lower in CO<sub>2</sub> bathing than in fresh water bathing. At 34 and 37°C, sweating did not occur, but at 39°C profuse sweating appeared both during CO<sub>2</sub> bathing and during fresh water bathing, although the sweat rate was lower during CO<sub>2</sub> bathing than during fresh water bathing. At 34°C, despite the lower T<sub>ty</sub> during CO<sub>2</sub> bathing compared with fresh water bathing, the subjects reported a “slightly warm” sensation during CO<sub>2</sub> bathing, whereas they reported “neutral” sensation during fresh water bathing. At 39°C, the subjects reported “warm” to “hot” sensation, with no difference between CO<sub>2</sub> and fresh water bathing. These results suggest that CO<sub>2</sub> bathing with hot water secures a greater vasodilatation effect in the immersed skin with a smaller elevation of core temperature, when compared with fresh water bathing at the same water temperature.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> bathing, Tympanic temperature, Cutaneous blood flow, Sweat rate, Thermal sensation