

原 著

足背部皮膚血流量計測による人工炭酸泉足浴時の 至適炭酸濃度および湯温の検討

下沖 晋, 辻 隆之*, 遠藤宏和**, 森反俊幸**, 榊原巨規***,
大坪弘明****, 松尾 汎*, 中野寿彦, 藤元登四郎*****

1. はじめに

経皮的に体内に吸収された二酸化炭素ガス(以下 CO₂)には,末梢血管拡張作用,皮膚血流量増加作用,温感持続作用があり^{1,2)},欧州では古くより高濃度天然炭酸泉が,末梢血管障害,高血圧症,心臓病などの治療に用いられてきた^{3,4)}.しかし日本には CO₂を泉源とする天然泉が少なく,欧州ほど広く治療に応用されることはなかった.1983年に,重曹,炭酸ソーダ,コハク酸を主原料とし,温浴中で CO₂を発生・溶解させる入浴錠剤(花王パブ)が発売され人工炭酸泉が簡単に作製できるようになった.しかし天然炭酸泉は,泉水1kg中に遊離炭酸1000mg(1000ppm)以上を有するものと規定されており⁵⁾,通常50gの入浴錠剤1個を家庭用浴槽(約150リットル)に溶解させて得られる CO₂濃度は約100ppmと限界があり⁶⁾,1000ppm以上の高濃度人工炭酸泉を作製することは容易でない.他に機械的には CO₂を直接水中にバブリングする方法⁷⁾,ガスタンクの中に霧状の液体を噴霧する方法⁸⁾があるが,CO₂を均一に溶解させることが難しく,飽和濃度まで達するには装置を大型化する必要があり実用的とはいえない.そこでわれわれは,人工肺膜として開発した多層複合中空糸膜(multi layered composite hollow fiber membrane: MHF)を応用し,溶解効率が高く,CO₂濃度,湯温のコントロールが可能な高濃度人工炭酸泉製造装置を開発した⁹⁾.

炭酸泉を治療泉として用いる場合,その入浴方法は全身浴と部分浴とに大別され,人工炭酸泉の各種疾患への適応については本邦でも多くの研究

がある^{7,8,10,11,12,13,14)}.しかしその殆どは低濃度の人工炭酸泉についてのものであり,高濃度人工炭酸泉に関する研究は少ない.

今回われわれは,足趾における虚血性障害の治療および予防システムの開発を目的に,健常者および特別養護老人ホーム(特養)に入所中の高齢者に対し人工炭酸泉および加温水道水を用いた足浴を施行し,足背部皮膚血流量をレーザドップラ血流計を用いて計測することにより,人工炭酸泉足浴時の至適炭酸濃度および湯温について検討した.

2. 人工炭酸泉製造装置

高濃度の CO₂を水中に溶解させるためには,CO₂と水との接触面積を大きくする必要があり,人工肺膜として開発したMHFを応用した.

Fig. 1にMHFの構造を示した.中間の非多孔質層は,厚さ約0.5mmのウレタン系樹脂で構成されており,薄膜であるため水を通さず,ガス/液相の交換速度が高い.更に中間層を挟んだ内外層膜はポリオレフィンで構成され,薄膜層の表面を保護する構造となっている.またポリオレフィンは機械的強度が強く,長期的に安定した使用が可能である¹⁵⁾.1気圧におけるCO₂の水に対する溶解度は,水温30~40°Cの範囲では約1000~1300ppmであり¹⁶⁾,通常入浴に用いられる程度の温湯中に,1300ppm以上のCO₂を,長時間安定的に溶解させることは理論的に不可能である.MHFを応用した人工炭酸泉製造装置(MRE-SPA)は,清浄なCO₂

社団法人八日会大悟病院 〒889-1994 宮崎県北諸県郡三股町大字長田1270,

* 国立循環器病センター 〒565-8565 大阪府吹田市藤白台5-7-1,

** 鈴鹿医療科学大学 〒510-0293 三重県鈴鹿市岸岡町1001-1,

*** 三菱レイヨン株式会社 〒108-8506 東京都港区港南1-6-41,

**** 社会福祉法人常緑会特別養護老人ホーム中郷園 〒885-0043 宮崎県都城市豊満町2647,

***** 社団法人八日会藤元病院 〒885-0055 宮崎県都城市早鈴町17-4

(受付 1999年2月17日/受理 1999年3月20日)

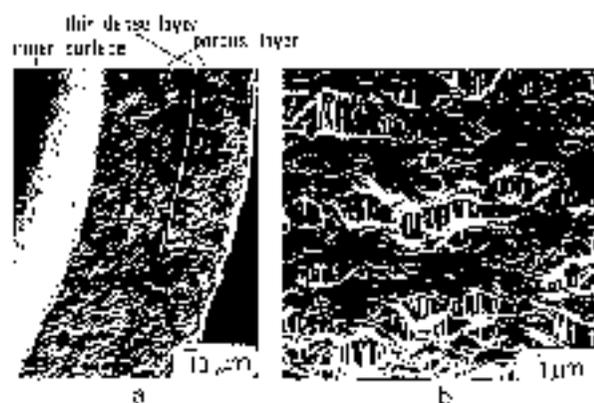


Fig. 1: Photographs of the hollow fiber membrane.
(a) horizontal cross section, (b) inner surface

だけを溶解できること、温湯とCO₂との接触面積が大きく溶解効率が高いため、長時間安定的な高濃度人工炭酸泉が作製できること、CO₂濃度をガス圧力の制御だけで容易にコントロールできることを特徴としている。また膜モジュールハウジングは、直径72mm、長さ215mmと小さく、装置全体をコンパクトに設計できるため、既存の病院や施設の浴室など、狭いスペースでの設置も可能である。

3. 対象

健常者 (young subjects) 7名 (男性4名, 女性3名), 特養入所中の高齢者 (old subjects) 5名 (男性2名, 女性3名) を対象とした。Table.1に被験者の年齢・身体平均を示した。また対象とした高齢者は車椅子での自力移動が可能で、5名中4名は平行棒内での歩行が可能であった。

4. 方法

CO₂濃度 500, 700, 1000 ppm, 湯温 30, 34, 38, 42°C の人工炭酸泉は MRE-SPA を用いて作製した。室温 25 ± 2°C, 相対湿度 60 ± 5% に空調された室内で、被験者を肘付きの椅子に座らせリラックスできる姿勢を保たせた。右足足背部の、足背動脈の走行がなく¹⁷⁾、表皮に肉眼で観察される静脈のないほぼ中央に、Advance社製C型レーザプローブ (直径10mm, 厚さ3mm, レーザ照射面積2mm², 測定深度1mm) を、皮膚を圧迫しないように発泡スチロールで約2mmの隙間を作り接着テープで固定した。大気中での足背部皮膚血流量が安定するのをまった後、30 ~ 42°C の加温水道水を満たした、

Table 1 Subject characteristics

	n	Age (year)		Height (cm)		Weight (Kg)	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Young subjects	7	27.6	7.5	163	4	51.1	3.4
Old subjects	5	80.2	4.6	144	7	42.2	9.5

長さ25cm, 幅16cm, 深さ14cmの発泡スチロール製の足浴槽 (約5リットル) に各々3 ~ 5分間足浴させた。その後直ちに同じ温度に調整したCO₂濃度500, 700, 1000 ppmの炭酸泉に各々3 ~ 5分間足浴させた。足背部皮膚血流量をAdvance社製レーザドップラ血流計ALF21Dを用いて計測し、UNIQUEデスクトップレコーダUR1000-2Pで記録した。アナログ記録された出力値を読み取り、加温水道水足浴時と炭酸泉足浴時とで比較した。また健常者と高齢者とで、同じCO₂濃度、湯温の炭酸泉での皮膚血流量の変化を比較した。統計学的検定にはStudent's t testを用いp値0.05以下を有意と判定した。また使用したレーザドップラ血流計: Advance社製ALF21Dは、イヌ腸管を用いた実験に基づいて、出力値: Vを補正しml / min / 100gの単位で表示するように設計されている。しかし今回計測を行ったヒト足背部と、イヌ腸管組織との血流量の相関が定かでないこと、また相対的な変化を観察することを目的としたため、血流量は出力値をそのままボルト (V) で表示した。

5. 結果

Fig. 2は、23歳女性の湯温30 ~ 42°Cでの足背部皮膚血流量を、加温水道水、CO₂濃度500 ppm, 1000 ppmの炭酸泉とで比較したものである。炭酸泉では、同じ温度の加温水道水に比べ有意な増加を示した。CO₂濃度500 ppmと1000 ppmとでは、湯温34 ~ 42°CでCO₂濃度500 ppmに比べ1000 ppmで有意に増加した。加温水道水では、温度の上昇にともない増加する傾向を示した。

Fig. 3は、36歳男性の湯温30 ~ 42°Cでの足背部皮膚血流量を、加温水道水、CO₂濃度700 ppm, 1000 ppmの炭酸泉とで比較したものである。炭酸泉では、同じ温度の加温水道水に比べ有意な増加を示した。湯温34 ~ 42°CでCO₂濃度700 ppmと1000 ppmとの間に有意な差は認められなかった。加温水道水では、湯温38°Cと42°Cとの間で有意に増加した。

Fig. 4は、21歳女性の湯温30°Cと38°Cでの足背部皮膚血流量を、加温水道水、CO₂濃度

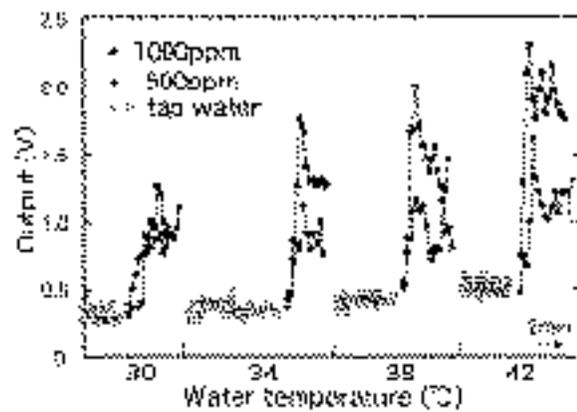


Fig. 2: Cutaneous blood flow in the dorsal site of the foot in water and CO₂ water: 23 yeras old female
CO₂ concentration / 500 ppm, 1000 ppm

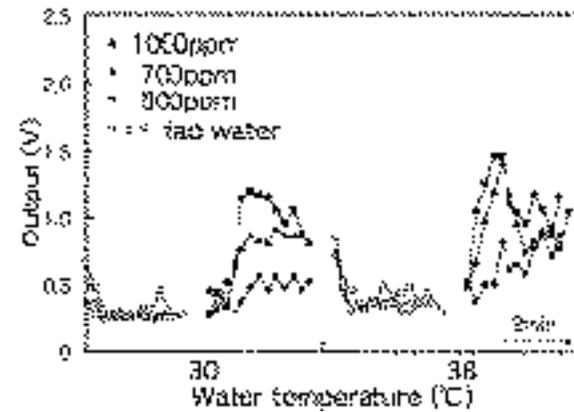


Fig. 4: Cutaneous blood flow in the dorsal site of the foot in water and CO₂ water: 21 yeras old female
CO₂ concentration / 500 ppm, 700 ppm, 1000 ppm

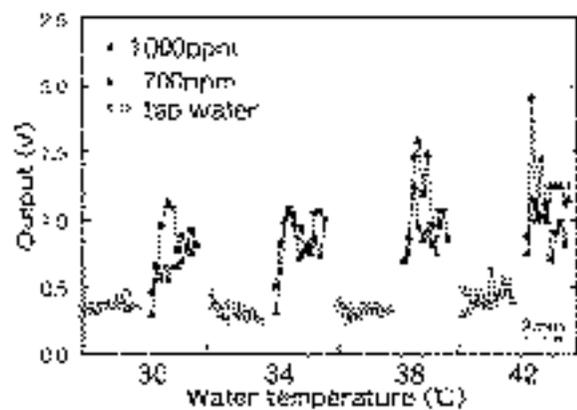


Fig. 3: Cutaneous blood flow in the dorsal site of the foot in water and CO₂ water: 36 yeras old male
CO₂ concentration / 500 ppm, 1000 ppm

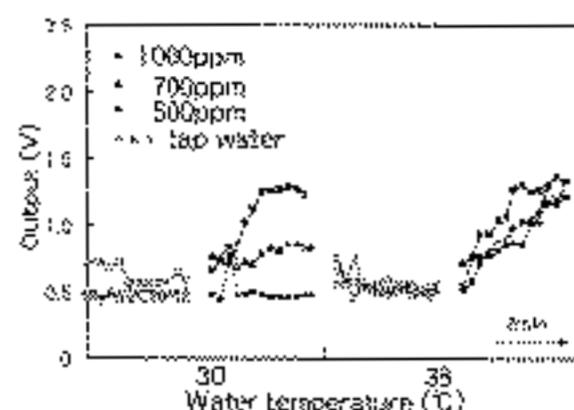


Fig. 5: Cutaneous blood flow in the dorsal site of the foot in water and CO₂ water: 79 yeras old female
CO₂ concentration / 500 ppm, 700 ppm, 1000 ppm

500 ppm, 700 ppm, 1000 ppm の炭酸泉とで比較したものである。炭酸泉では、同じ温度の加温水道水に比べ有意な増加を示した。湯温 30°C, 38°C とともに、CO₂ 濃度 500 ppm と 700 ppm との間では、CO₂ 濃度に依存した有意な増加が見られたが、CO₂ 濃度 700 ppm と 1000 ppm との間では有意差は認められなかった。加温水道水の場合、温度の上昇にともない増加する傾向が見られた。

Fig. 5 は、79 歳女性の湯温 30°C と 38°C での足背部皮膚血流量を、加温水道水、CO₂ 濃度 500 ppm, 700 ppm, 1000 ppm の炭酸泉とで比較したものである。湯温 30°C では、CO₂ 濃度 500 ppm の炭酸泉は加温水道水と差はなく、CO₂ 濃度 700 ppm, 1000 ppm では CO₂ 濃度に依存した有意な増加を認めた。湯温 38°C では、全ての炭酸泉で有意な増加を示したが、CO₂ 濃度間での差は認められなかった。

Fig. 6 は、73 歳男性の湯温 34°C と 38°C での足背部皮膚血流量を、加温水道水、CO₂ 濃度

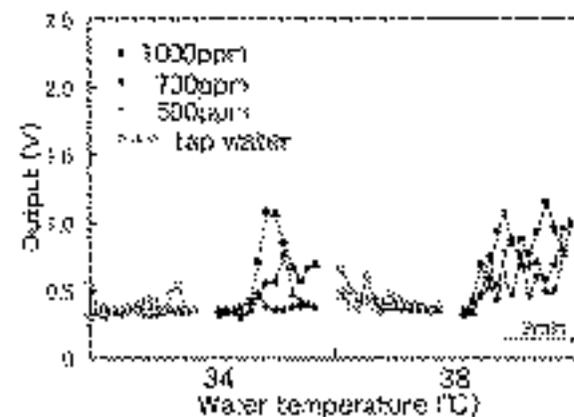


Fig. 6: Cutaneous blood flow in the dorsal site of the foot in water and CO₂ water: 73 yeras old male
CO₂ concentration / 500 ppm, 700 ppm, 1000 ppm

500 ppm, 700 ppm, 1000 ppm の炭酸泉とで比較したものである。湯温 34°C では、CO₂ 濃度 500 ppm の炭酸泉は加温水道水と差はなく、CO₂ 濃度 700 ppm, 1000 ppm の炭酸泉では加温水道水に比

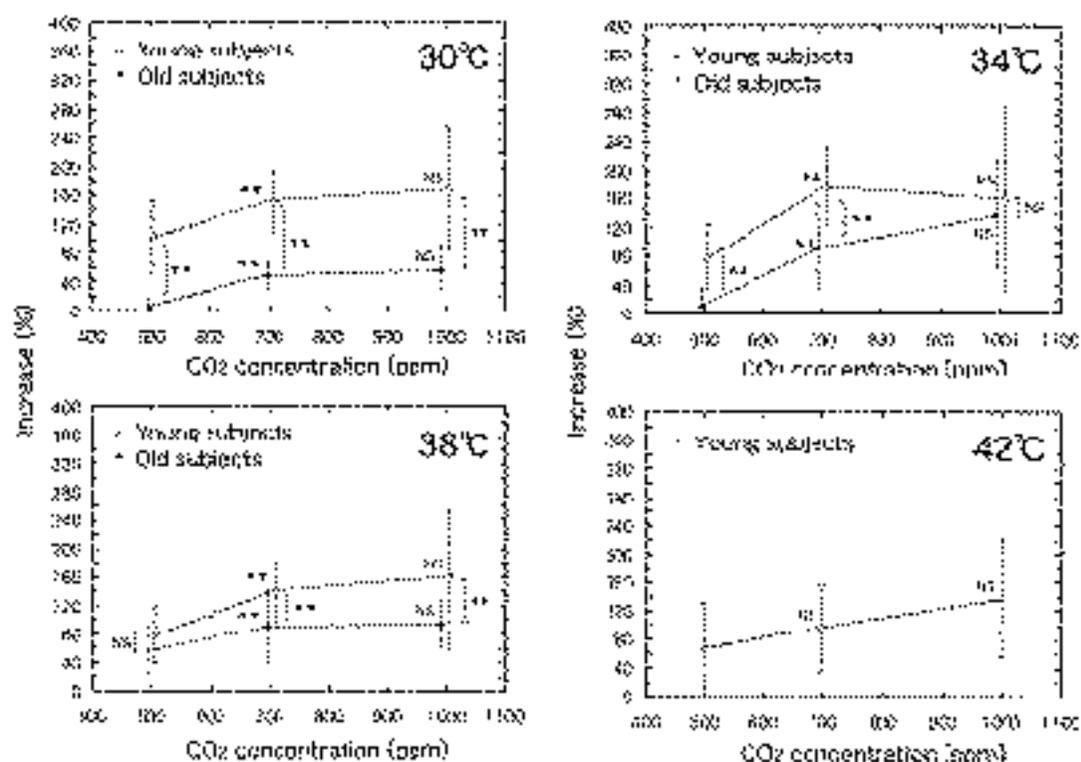


Fig. 7: CO₂ concentration dependence of the cutaneous blood flow in the CO₂ foot bath

べ有意に増加した。湯温 38°C では、全ての炭酸泉で有意な増加を示した。

Fig. 7 は炭酸泉足浴時の足背部皮膚血流量を、加温水道水足浴時の足背部皮膚血流量に対する増加率とし、各湯温ごとに示したものである。湯温 30°C, 34°C, 38°C では、健常者に比べ高齢者の皮膚血流量は低下した。また健常者、高齢者ともに、CO₂ 濃度 500 ppm と 700 ppm との間では有意な増加が認められたが、CO₂ 濃度 700 ppm と 1000 ppm との間では有意差は認められなかった。高齢者の湯温 30°C, CO₂ 濃度 500 ppm の炭酸泉での増加率は約 5%、湯温 34°C, CO₂ 濃度 500 ppm の炭酸泉での増加率は約 11% で、加温水道水での皮膚血流量と差はなかった。

6. 考 察

今回われわれは、高濃度人工炭酸泉を用いた足浴を健常者と高齢者に対して施行した。健常者の足背部皮膚血流量は、高齢者に比べて高かった。健常者では CO₂ 濃度 500 ppm, 湯温 30°C 以上の人工炭酸泉足浴で、加温水道水に比べ有意に増加した。しかし高齢者では CO₂ 濃度 500 ppm, 湯温 34°C 以下の人工炭酸泉では有意な増加は認められなかった。

Inoue らは、標準的なヒートストレス（室温 35°C, 相対湿度 45% にコントロールされた環境下で、下肢を 42°C の温水浴に 60 分間浸漬）を健常者と高齢者に対して行い、高齢者群は健常者群に比べ、胸部、大腿部で皮膚血流量の低下、背部、大腿部で発汗量が低下し、加齢による、局所的な発汗機能の低下を伴った皮膚血管拡張の減少を示した¹⁸⁾。

Sagawa らは、全身の高温ストレスでの高齢者の前腕部では、正常な発汗であるにもかかわらず健常者に比べ血流量が低下していると報告している¹⁹⁾。また Richardson は、40°C の温湯に前腕を浸けた場合、高齢者と中高年者では年齢に応じた皮膚血流量の減少があることを報告している²⁰⁾。今回われわれが測定した足背部でも、健常者に比べ高齢者では皮膚血流量が低下し、Inoue, Sagawa, Richardson らの報告と一致した。

Schnitzer らは、健常者に対し、CO₂ 濃度と温度を変えた人工炭酸水を肩甲骨上の限られた範囲の皮膚に与え、レーザドップラ血流計を用いて皮膚血流量の測定を行った。その結果、皮膚血流量に効果を及ぼす最低 CO₂ 濃度は 400 ~ 600 ppm であり、CO₂ 濃度 600 ppm ~ 1400 ppm の間では、血流量は CO₂ 濃度と直線的な関係にあること、皮膚循環と血管運動が CO₂ 濃度と温度に強く依存していることから、温泉治療学で通常用いられている

CO₂濃度 1000 ppm, 湯温 34 °C の条件は, コントロールされた条件での検討で将来的に変更されるべきであると述べている²¹⁾。

今回のわれわれの検討では, 加温水道水の場合でも, 温度が高くなると皮膚血流量は増加する傾向を示し, 局所加温による皮膚血流量の増加が認められた。健常者の場合, CO₂濃度 500 ppm, 湯温 30 °C の炭酸泉でも加温水道水に比べ皮膚血流量は有意に増加したが, 高齢者では増加しなかった。健常者では, 30 °C 程度の低温でも CO₂ の作用により血管拡張が促進されるものと思われる。しかし高齢者では CO₂ 濃度 500 ppm, 湯温 34 °C の炭酸泉でも皮膚血流量の増加はなく, 高齢者の場合 500 ppm 程度の CO₂ 濃度では, 低下した皮膚血管の応答性を高めることはできないものと思われる。

7. 結 論

一般に組織温が高い方が, CO₂ 含量の多寡にかかわらず血管拡張を来し末梢血液循環は増加する。しかし組織温が高いと組織酸素消費量も増加するので, 虚血性潰瘍の治療では, 組織の酸素需要バランスが供給側になるように, できるだけ低温を維持しつつ血管を拡張させることが望まれる。今回われわれの検討から, 高濃度人工炭酸泉足浴を用いた足趾潰瘍治療システムでは, CO₂ 濃度 700 ppm 以上, 湯温 34 °C 程度が有効であると思われる。

文 献

- 1) 萬 秀憲, 久保裕一郎, 江口泰輝, 河本知二, 砂川 満, 吉元嘉昭: 人工炭酸泉に関する研究 (第1報) 炭酸泉の有効炭酸濃度について。日温気物医誌 1984; 47: 123-129.
- 2) 萬 秀憲, 久保裕一郎, 江口泰輝, 河本知二, 砂川 満, 吉元嘉昭: 人工炭酸泉に関する研究 (第2報) 炭酸ガス浴剤の皮膚血流量増加作用と保温作用。日温気物医誌 1984; 47: 130-136.
- 3) Winternitz. R. Zur Lehre vor der Hautseorption. Arch. f. exper. Path. unt Pharmacol. 1891; **28**: 405-422.
- 4) Müller. O. Ueber den Einfluss von Bädern und Douchen auf den Blutdruck beim Menschen. Deutch Arch. f. klin. Med. 1902; **74**: 316-347.
- 5) 環境庁保護局, 日温気物医誌 1982; 46: 105-114.
- 6) 萬 秀憲, 久保裕一郎, 江口泰輝, 河本知二, 砂川 満, 吉元嘉昭: 人工炭酸浴に関する研究 (第3報) 人工炭酸泉調整の基礎的問題と飛散炭酸ガス濃度の影響について。日温気物医誌 1985; 48: 79-85.
- 7) 白倉卓夫, 田村耕成, 武 仁, 他: 高濃度人工炭酸泉の治療抵抗性高血圧症, とくに夜間非降下型患者の日内血圧変動におよぼす効果。日温気物医誌 1993; 56(2): 119-125
- 8) 八田 秋: 心疾患への炭酸ガス浴の効果。温研紀要 1980; 32(3): 171-182
- 9) 内田 誠: 多層複合中空系膜 (MHF) の開発と応用。炭酸泉誌 1998; 1(1): 17-20.
- 10) 薄井泰子, 古元順子, 砂川 満, 河本知二, 吉元嘉昭: 内科疾患例に使用した人工炭酸浴剤浴の効果。環境病態研究報告 1986; 57: 12-17.
- 11) 田中信行, 日吉俊紀, 川平和美, 竹迫賢一: 人工炭酸泉浴 (花王バブ浴) による本態性高血圧症の血圧, 循環機能の変化。日温気物医誌 1987; 50(2): 87-93.
- 12) 田原 亨, 安田正之, 延永 正: 人工炭酸浴の慢性間接リウマチに対する効果。日温気物医誌 1991; 54(4): 224-230.
- 13) 前田真治, 正木かつら, 頼住孝二, 糠沢達志, 松岡正敬, 横山 巖: 脳血管障害患者における人工炭酸泉吸入および連浴による脳循環の変化。日温気物医誌 1997; 60(2): 75-81.
- 14) 寺内雅美: 末梢循環不全に対する炭酸泉浴の効用。形成外科 1993; 36(9): 1015-1021.
- 15) Kamo. J, Uchida. M, Hirai. T, Yoshida. H, Kamada. K, Takamura. T. A New Multilayered Composite Hollow Fiber Membrane for Artificial Lung. Artificial Organs 1990; **14**(5): 369-372.
- 16) 日本化学会編. 化学便覧. 3版: 東京: 丸善, 1984.
- 17) 越智淳三. 解剖学アトラス. 東京: 文光堂, 1979.
- 18) Inoue. Y, Shibahara. M Regional difference in age-related decrements of the cutaneous vascular and sweating responses to passive heating. Eur Appl Physiol 1996; **74**: 78-84
- 19) Sagawa S, Shiraki K, Yousef MK, Miki K. Sweating and cardiovascular responses of aged men to heat exposure. J Gerontol 1988; **43**: M1-8
- 20) Richardson D. Effects of age on cutaneous circulatory response to direct heat on the forearm. J Gerontol 1989; **44**: M189-194
- 21) Schnizer. W, Erdl. R, Schops. P, Seichert. N. The effect of external CO₂ application on human skin microcirculation investigated by laser Doppler flowmetry. Int Microcirc Clin Exp 1985; **4**: 343-350.

Investigation of the Optimum Free Carbon Dioxide Concentration and Water Temperature in an Artificial CO₂ Foot Bath

Susumu SHIMOOKI, Takayuki TSUJI*, Hirokazu ENDOH**, Toshiyuki MORITAN**, Hiroki SAKAKIBARA***,
Hiroaki OHTSUBO****, Hiroshi MATSUO*, Toshihiko NAKANO, Toshiro FUJIMOTO*****

Daigo Hospital,

1270, Nagata, Mimata, Miyazaki 889-1994 Japan

**Research Institute of National Cardiovascular Center,*

5-7-1, Fujishirodai, Suita, Osaka 565-8565 Japan

*** University of Suzuka Medical Science,*

1001-1, Kishioka-cho, Suzuka, Mie 510-0293 Japan

****Mitsubishi Rayon CO.LTD,*

16-141, Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8506 Japan

*****Nakagoen,*

2647, Toyomitsu-cho, Miyakonojyo, Miyazaki 885-0043 Japan

******Fujimoto Hospital,*

17-4, Hayasuzu-cho, Miyakonojyo, Miyazaki 885-0055 Japan

Abstract. An MRE-SPA artificial CO₂ bathing instrument (Mitsubishi Rayon Engineering CO.,LTD.) with a multi layered composite membrane hollow fiber (MHF) as an artificial lung made it possible to use highly concentrated CO₂ thermal spring water (above 1000ppm at 25 °C) easily compared with a tablet consisting of carbonate and organic acid. Artificial CO₂ thermal spring water with CO₂ concentrations of 500, 700 or 1000 ppm, and water temperatures of 30, 34, 38 or 42 °C was prepared by MRE-SPA. We studied human cutaneous blood flow in the dorsal site of the foot (CBFDF) by means of a laser doppler flowmeter to investigate the most effective free carbon dioxide concentration and water temperature for treating peripheral ischemic ulcers using an artificially highly concentrated CO₂ foot bath. Five old subjects (aged 73 to 84) and seven young subjects (aged 21 to 37) were immersed these feet in the artificial CO₂ foot bath and/or the tap water foot bath. In an artificial CO₂ foot bath at various CO₂ concentrations and water temperatures, the CBFDF in young subjects was increased, compared with that in a tap water foot bath at the same temperature. In an artificial CO₂ foot bath at a CO₂ concentration of 500ppm and water temperature of 34 °C, the CBFDF in old subjects did not differ between the artificial CO₂ foot bath and the tap water foot bath. These result suggested that the optimum conditions for artificial CO₂ foot bath for treating peripheral ischemic ulcers are CO₂ concentration above 700 ppm and water temperature at nearly 34 °C.

Keywords: Artificial CO₂ thermal spring, Foot Bath, Cutaneous Blood Flow, Laser Doppler Flowmeter