
原 著

二酸化炭素泉による末梢血流量増加の2次元的可視化について

¹法政大学工学部, ²(株)インテグラル, ³健康保養地医学研究所
大河内正一¹, 竹崎大輔¹, 大波英幸¹, 首藤祐樹¹
池田茂男¹, 見城由紀夫², 阿岸祐幸³

(平成13年11月28日受付, 平成14年2月6日受理)

Cutaneous Blood Flow Increased by CO₂ Water Foot Bathing Visualized with Laser Doppler Imaging

Shoichi OKOUCHI¹, Daisuke TAKEZAKI¹, Hideyuki OHNAMI¹, Yuhki SHYUTOH¹
Shigeo IKEDA¹, Yukio KENJO², and Yuhkoh AGISHI³

¹ Faculty of Engineering, Hosei University

² Integral Co., LTD

³ Research Institute for Health Resort Medicine

Abstract

Artificial CO₂ spring water (CO₂ concentration of 1,000 ppm) and tap water were prepared in the temperature range of 34°C to 42°C for foot bathing. Laser doppler imaging of cutaneous blood flow in the foot immersed for foot bathing made it possible to visualize the two-dimensional spatial variation of the perfusion while being not only noninvasive but also non-touch. Therefore, it reduced the risk of influence on skin perfusion mechanically, being different from the method used so far. This method revealed that the cutaneous blood flows by CO₂ water foot bathing were increased from nearly two to four times in comparison with those by tap water foot bathing.

In Japan, natural CO₂ spring waters are rare. However, we proposed that development of a co-generation system with hydrogen cell evolved exothermic heat, and hydrogen and carbon dioxide gases makes it possible to prepare and perform easily artificial CO₂ bathing therapy, with a reductive characteristic analogous to natural spring water, at home and elsewhere.

Key words : CO₂ thermal spring water, Laser doppler imaging, Cutaneous blood flow, Visualization, Fuel cell.

キーワード : 二酸化炭素泉, レーザードップラーイメージング, 皮膚血流量, 可視化, 燃料電池

1. はじめに

二酸化炭素泉は末梢血管拡張作用, 皮膚血流量増加作用および温感持続作用等が確認(下沖ら,

1999 ; Schmid, 1998 ; Hartmann *et al.*, 1998 ; 白倉ら, 1995 ; 萬, 1987, 萬ら, 1984a, 1984b ; 石田, 1936 ; 海老原, 1935) され, それ故泉浴により血圧を下げ, 疲労回復の促進等の生理学的効能が明らかにされている. 二酸化炭素泉の多いヨーロッパ, 特にドイツでは“心臓の湯”として, 末梢血管障害, 高血圧症, 心臓病等の循環器系治療に適用されてきた. 一方, 二酸化炭素泉の少ない我国でも, 最近二酸化炭素を 1,000 ppm のオーダーの高濃度で温水に溶解した人工二酸化炭素泉 (内田, 1998) が可能となり, 閉塞性動脈硬化症や糖尿病患者の虚血に対する血流量改善効果, さらには褥そうの治療効果等の各種効果 (鏑木ら, 2000 ; 横家ら, 2000 ; 前田 2002) が確認されてきている.

これまで末梢血流の測定は, ドップラー法により血管の一部にセンサーを固定し, 観測されてきた. そして, 二酸化炭素泉による血流量増加効果が明らかにされてきた. 今回, ドップラーイメージング (Fullerton *et al.*, 1995 ; Wardell *et al.*, 1993) により, 生体に非接触, 無侵襲で, 血流量の 2 次元的可視化を人工の二酸化炭素泉で試みた. このことにより, 虚血部位や血流改善効果が 2 次元的に明らかとなり, より詳細な治療, リハビリテーションが可能となると同時に, 可視化されることにて, 二酸化炭素泉が感覚的により多くの人々に理解され, 受入れ易くなると考えられる.

さらに, 燃料電池システムの普及により, 人工二酸化炭素泉が身近に, 容易に利用できる可能性についても検討を加えた.

2. 実 験

実験としては, 温度一定 (34~42°C) に加温した水道水 (さら湯) および, その加温した水道水をガスポンペより供給される二酸化炭素と一緒に, 多層複合中空糸膜 (三菱レイヨン・エンジニアリング社製) に通して二酸化炭素を高濃度で溶解した人工二酸化炭素泉 (CO₂ 濃度 1,000 ppm) を準備した. そして, さら湯および人工二酸化炭素泉に被験者の足先を浸した状態のまま, 足先皮膚表面の 2 次元ドップラーを測定し, 両者の比較を行った.

2 次元ドップラーの測定はレーザー血流量画像化装置 (PIM II, Lisca 社製) を用いた. この装置の原理は波長 670 nm のレーザー光を皮膚表面に照射し, 真皮乳頭内毛細血管中の赤血球の動きにより変化する反射レーザー光の周波数変化をスキャンさせながら観測することで, 2 次元的に血流量を測定する. そのため, これまでのドップラー測定と異なり, 非接触, 無侵襲で測定可能という大きな特徴を有している. その血流量の分布を相対的に 6 段階のカラーコードで表示することにより, 可視化画像とした. なお, 測定は被験者 (21~24 才の健常男女学生各 2 名) が室温 25°C, 湿度 60% の部屋で 1 時間安静にした後に行われた.

3. 結果および考察

3.1 血流量増加効果の可視化

図 1 に, 代表的な天然二酸化炭素泉 (大分県長湯温泉, 二酸化炭素濃度 1,300 ppm, 浴槽温度 34°C) に浴用した結果を示す. 二酸化炭素泉の特徴である気泡の身体への付着や, 体温より低い 34°C の浴槽温度にもかかわらず浴槽に浸った部分の皮膚血流量の増加を示す鮮明な皮膚潮紅が観測された.

そこで, 皮膚潮紅の原因となる血流量増加効果を具体的に観察するため, 天然二酸化炭素泉と同様の気泡の付着や皮膚潮紅が十分確認できる高濃度人工二酸化炭素泉 (二酸化炭素濃度 1,000 ppm) を用いて検討した. 図 2 は 2 次元ドップラーイメージングによる足先の可視化画像を示す. 青色~緑色~黄色~赤色になる程, 血流量が相対的に大きいことを示している. 今回の測定で, 図 2 の四

角く囲ってある部分の血流量を比較対象として検討した。この部位では、指間のひれ状の部分が一般的に毛細血管が少なく、そのため温度による血流変化が起こり難いことから、二酸化炭素による他の部位の末梢血管の血流量変化の確認が可能となる。

図3に浴槽温度ごとに10分間足先をさら湯および炭酸泉に浸した結果の一例を示す。これらの図から明らかなように、さら湯も二酸化炭素泉も浴槽温度の上昇にともない画像の明度は増し、いずれの温度も二酸化炭素泉の方が、さら湯より血流量が増加する結果が得られた。図4は、図3の結果を、出力結果(V)として示したものである。浴槽温度が体温より低い34℃でも、二酸化炭素泉は42℃のさら湯に匹敵する血流増加効果を示した。被験者による個人差はあるものの平均2~4倍、人工二酸化炭素泉の方がさら湯と比較して血流量が大きくなる結果が得られた。これらの結果は、足背部の皮膚血流量を固定式ドップラーで測定した下沖ら(1999)の結果ともよく一致した。

図5に、二酸化炭素泉(34℃)による血流量が増加する時間変化を可視化画像で示した。図6はそれらを数値化した結果である。これらの図から明らかなように、炭酸泉では約3分の泉浴で血流は急に上昇し、その後はほぼ一定を保った。循環障害者では、この一定になる時間が遅れることが指摘されているが、二酸化炭素泉による血流量の速やかな上昇およびその増加割合は血流改善薬より速効性および増加効果が大いことを示した(Gschwandtner *et al.*; 1996)。さら湯でも高温浴により血流は増加するが、心臓の負担が大きくなることや血液が凝固しやすくなるという問題が生じる。このことから、二酸化炭素泉は心臓に負担をかけずに血流量改善がはかれる非常に有効な泉質と思われる。

3.2 還元系二酸化炭素泉

日本では、ヨーロッパと異なり火山が比較的若いことから、天然の二酸化炭素泉は数が非常に少ない(金原, 1992)。しかし現在、自動車用燃料電池だけでなく、燃料電池を利用した家庭用コージェネレーションシステムの開発が、具体的に2004~5年の発売を目指して行われている。このシステムの燃料電池は、都市ガスを改質して生成した水素を、空気中の酸素と反応させて電気エネルギーとして利用すると同時に、合わせて生成される熱の有効利用をはかるものである。その際、都市ガスの改質で、水素だけでなく二酸化炭素が副生される(図7)。ここで生成される地球温暖化ガスとしての二酸化炭素の排出量は、エネルギー効率の観点から、都市ガスを直接燃焼させるより約20%

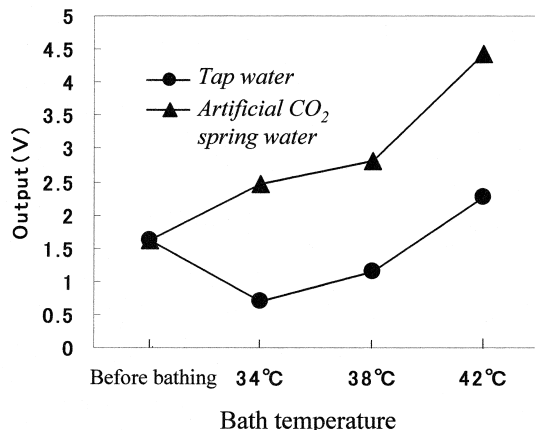


Fig. 4 Cutaneous blood flows of foot by CO₂ bathing (CO₂ concentration of 1,000 ppm) and tap water bathing for a 23 years old female.

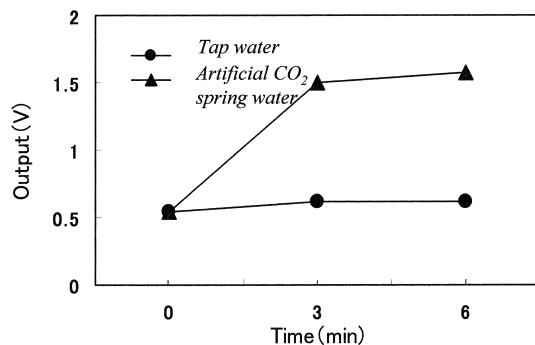


Fig. 6 Cutaneous blood flows of foot by CO₂ bathing (CO₂ concentration of 1,000 ppm) and tap water bathing at 34°C for a 23 years old female.

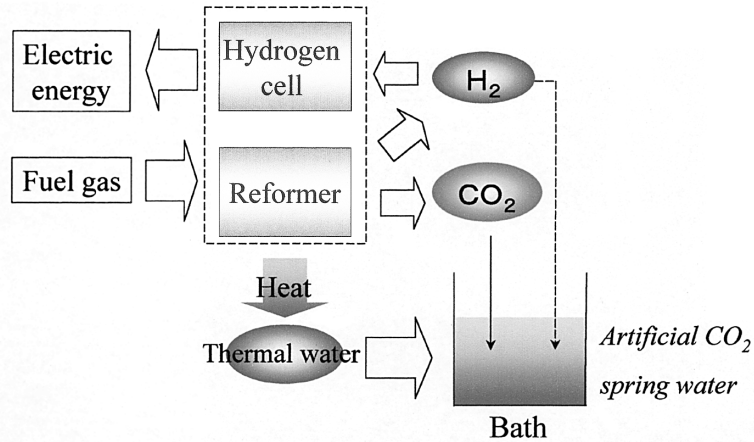
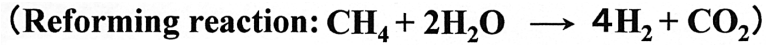


Fig. 7 Schematic diagram of co-generation system of hydrogen cell with evolving exothermic heat and hydrogen and carbon dioxide gases.

減少可能とされている。そこで、回収した熱を浴槽に利用すると同時に、二酸化炭素を浴槽に溶解することで、すなわち廃熱と廃二酸化炭素を有効利用することで、二酸化炭素泉が家庭で容易に楽しめることになる。図 7 に、それらの模式図を示す。図 7 では、さらに二酸化炭素に加えて水素も浴槽に溶解させるシステムとしても描いている。これは浴槽水を温泉源泉と同様の還元系にするためである。天然二酸化炭素泉と二酸化炭素を温水(水道水)に溶解させた人工二酸化炭素泉の違いについて、すでに著者らが ORP (酸化還元電位)-pH 関係に基づき報告 (大河内ら, 2000) しているように、前者は還元系で、後

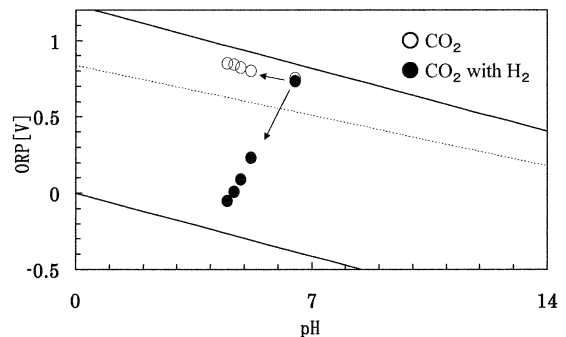


Fig. 9 Relationship between ORP and pH in artificial CO_2 spring waters dissolved CO_2 and CO_2 with 2 vol% H_2 using multi layered composite membrane hollow fiber at 40°C .

者はその逆の酸化系である。図 8 に天然と人工二酸化炭素泉、および我々の皮膚の ORP-pH の関係を示す。図から明らかなように、天然二酸化炭素泉は還元系にある我々の皮膚と類似した特性を示す。それ故、人工二酸化炭素泉を還元系にすることで、より天然泉に近づけられる。そこで、図 9 に二酸化炭素と二酸化炭素に爆発限界以下の濃度 (2%) に調整した水素との混合ガスを、 40°C に加温した水道水の浴槽に、それぞれ溶解させた結果を示す。水道水に含まれる塩素のため、酸化系となっている浴槽水 (●印) にそれぞれのガスを複合中空糸膜を通して溶解させた結果、二酸化炭素の溶解により pH はその濃度の上昇にともない、いづれも酸性側にシフトするが、前者 (○印) は酸化系、一方後者 (●印) は水素により天然二酸化炭素泉と同様の還元系となった。それ故、家庭用燃料電池システムの普及により、図 8 で模式的に矢印で示すように水道水を天然二酸化炭素泉と同様の還元系人工二酸化炭素泉に変えることができ、二酸化炭素泉を家庭でより身近に利用できる

可能性が示唆できた。

4. ま と め

体温より低い34℃でも二酸化炭素泉は、さら湯と比較して約3倍を超える血流量の増加が観察でき、それら血流量増加効果を明らかな画像として可視化することができた。それ故、二酸化炭素泉に2次元ドップラーイメージングを応用することにより、末梢血流の虚血部位およびそれらの改善効果がより詳細に検討可能となった。二酸化炭素泉は、今後益々高齢化し、シルバー社会を迎える日本社会にとって、血圧の上昇を抑制し、血流改善を含めた浴槽水として、健康、美容およびリハビリ面から大いに期待されるべき泉質と思われる。

さらに、日本では数が少ない天然二酸化炭素泉であるが、燃料電池に基づく家庭用コジェネレーションシステムが、現在急ピッチで開発されている。その際、都市ガスの改質で、燃料電池に必要な水素だけでなく二酸化炭素も同時に生成されることから、この二酸化炭素およびシステムからの排熱回収を利用して、多くの家庭で二酸化炭素泉の普及の可能性を提案した。さらに、その際水素も合わせて浴槽に応用することで、天然の二酸化炭素泉と同様の還元系となる。これにより、天然温泉の特性を有し、末梢血流増加効果とともに皮膚の酸化または老化抑制効果の可能性が期待できる浴槽水となる。現在都市ガスの他に、燃料電池の水素源として、生ゴミや排水処理等のバイオガスの利用も進められている。そこで、これらの施設を利用した二酸化炭素泉の新たな地域的利用も期待できる。

文 献

- 石田昭三 (1936) : 炭酸泉の心臓拍出量並びに基礎代謝に及ぼす影響について, 日温気物医誌, **2**, 296-325.
- 内田 誠 (1998) : 多層複合中空糸膜 (MHF) の開発と応用, 人工炭酸泉, **1**, 17-20.
- 海老原隆佐 (1935) : 人工炭酸浴の血圧および脈拍におよぼす影響について, 日温気物医誌, **1**, 219-253.
- 鏑木 誠, 東 佑二, 下沖 晋, 松本哲郎, 藤元登四郎, 遠藤宏和, 森反俊幸, 辻 隆之 (2000) : 高濃度炭酸泉の全身温浴による褥ソウ治癒効果の検討, 人工炭酸泉, **3**, 15-20.
- 大河内正一, 菅野こゆき, 鈴木雅樹, 甘露寺泰雄 (2000) : 二酸化炭素泉の ORP と pH の関係, 温泉科学, **50**, 94-101.
- 大河内正一, 菅野こゆき, 勝本雅之, 鈴木雅樹, 甘露寺泰雄, 漆畑修 (1999) : 温泉水および皮膚の ORP (酸化還元電位) と pH の関係, 温泉科学, **49**, 59-64.
- 大河内正一, 水野 博, 草深耕太, 石原義正, 甘露寺泰雄 (1998) : 温泉水のエージング指標としての酸化還元電位, 温泉科学, **48**, 29-35.
- Gschwandtner, M.E., Koppensteiner, R., Maca, T., Minar, E., Schneider, B. and Schnurer, G. (1996) : Spontaneous laser doppler flux distribution in ischemic ulcers and the effect of prostaglandins; A crossover study comparing the acute action of prostaglandin E₁ and iloprost vs saline, **51**, 29-38.
- 金原啓司 (1992) : 日本温泉・鉱泉分布図及び一覽, 通商産業省地質調査所, 茨城.
- Schmid, K.L. (訳: 入来正躬) (1998) : 炭酸浴 (炭酸泉), 人工炭酸泉, **1**, 5-9.
- 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 (1999) : 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,

人工炭酸泉, **2**, 4-8.

白倉卓夫, 田村耕成 (1995): 直接接触熱交換式潜熱回収温水加熱機を用いた人工二酸化炭素水浴の血行動態におよぼす影響, 日温気物医誌, **58**, 121-126.

Hartmann, B., Pittler, M. and Drews, B. (訳: 入來正躬, 1998): 小動脈閉塞性疾患の患者の CO₂ 温泉療養: 生理と臨床, 人工炭酸泉, **1**, 10-16.

Fullerton, A., Serup, J. (1995): Laser doppler image scanning for assessment of skin irritation., Elsner, P., Maibach HI (eds), Irritant Dermatitis. New Clinical and Experimental Aspects. Current Problems in Dermatology, **23**, 159-168, S. Karger, Basel, Switzerland.

前田真治 (2002): 炭酸ガス・温水の生体への影響に関する研究, 平成 12, 13 年度科研費, 基盤研究 (C2) 研究成果報告書.

萬 秀憲 (1987): 炭酸ガス浴剤の進歩と課題, フレグランス ジャーナル, 臨時増刊 No. 8, 23-30.

萬 秀憲, 久保裕一郎, 江口泰輝, 河本知二, 砂川 満, 古元嘉昭 (1984): 人工炭酸浴に関する研究 (第 1 報) 炭酸泉の有効炭酸濃度について, 日温気物医誌, **47**, 123-129.

萬 秀憲, 久保裕一郎, 江口泰輝, 河本知二, 砂川 満, 古元嘉昭 (1984): 人工炭酸浴に関する研究 (第 2 報) 炭酸ガス浴剤の皮膚血流増加作用, 日温気物医誌, **7**, 130-136.

横家雅樹, 烏山高伸, 西田佳雄, 川尻健司, 佐野圭司, 川原弘久 (2000): 人工炭酸泉療法が有効であった下腿動脈完全閉鎖を有する閉塞性動脈硬化症, 第 5 回人工炭酸泉研究会, 演題 8.

Wardell, K., Jakobsson, A. and Nilsson G. E. (1993): Laser doppler perfusion imaging by dynamic light scattering, IEEE Trans. Biomed. Eng., **40**, 309-316.

古賀昭人 (1990): 温泉の化学, 日本温泉気候物理医学会編「温泉医学」, 69-73, 日本温泉気候物理医学会, 東京.



Fig. 1 CO₂ bubbles on human skin and human skin turned into red by natural CO₂ bathing (temperature : 34°C and CO₂ concentration : 1,300 ppm)

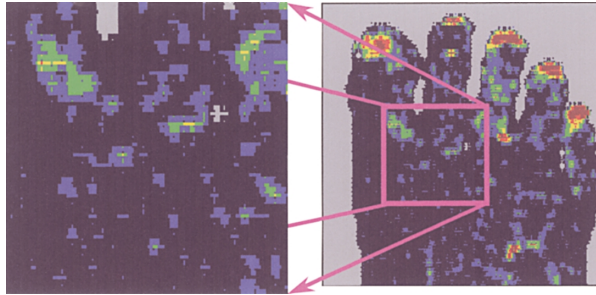


Fig. 2 Laser doppler imaging of cutaneous blood flow of foot measured in air.

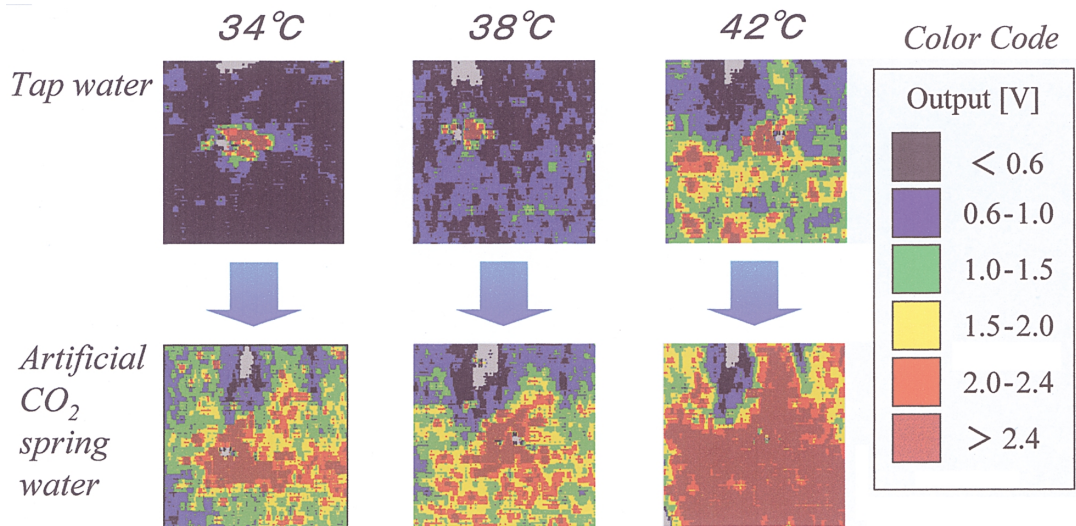


Fig. 3 Laser doppler imaging of cutaneous blood flow of foot after CO₂ bathing (CO₂ concentration of 1,000 ppm) and tap water bathing of ten minutes for a 23 year old female.

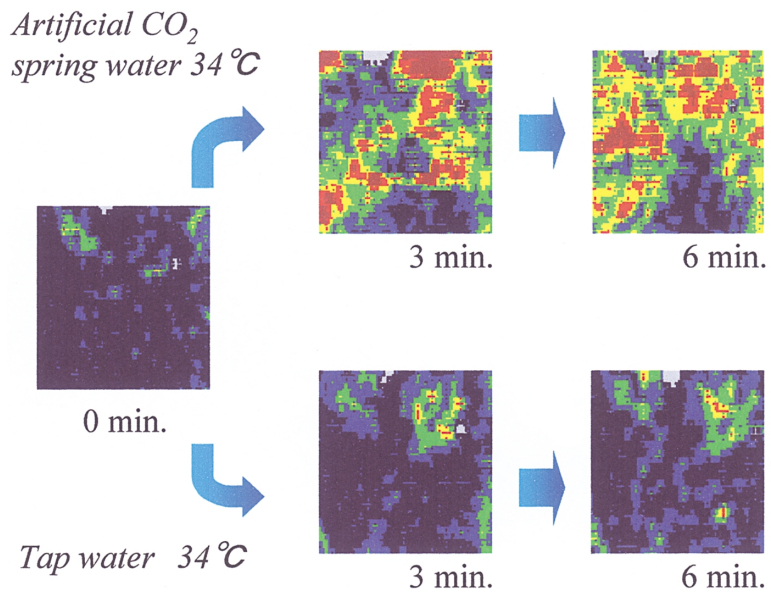


Fig. 5 Laser doppler imaging of cutaneous blood flow of foot by CO₂ bathing (CO₂ concentration of 1,000 ppm) and tap water bathing at 34°C for a 23 year old female.

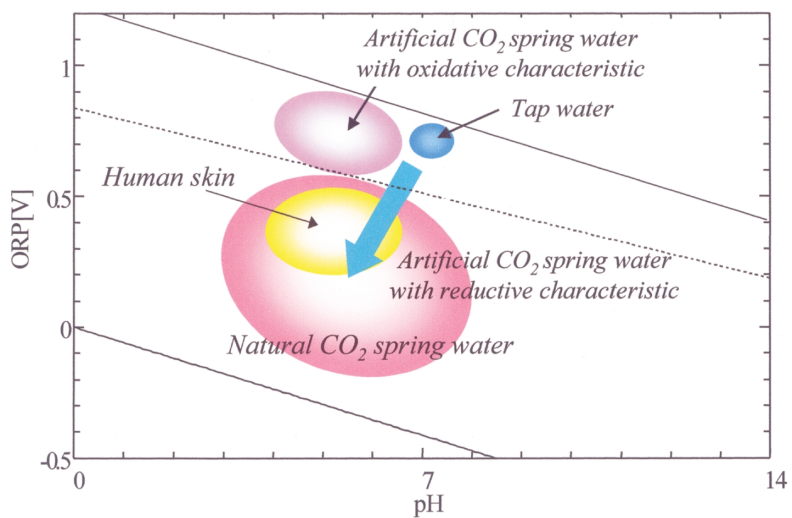


Fig. 8 Diagrammatic representation of relationships between ORP and pH in natural and artificial CO₂ spring water, in human skin, and in tap water.