

原著論文

高濃度人工炭酸泉浴による疲労回復効果
- 睡眠深度および心拍変動を指標として -Effect of bathing on artificial carbon dioxide-rich water on recovery
from fatigue as an index of sleep depth and heart rate variability

西村 直記

Naoki NISHIMURA

日本福祉大学 スポーツ科学部

Faculty of Sport Sciences, Nihon Fukushi University

Abstract : To examine the effects of bathing in artificial carbon dioxide-rich water (CO₂) on recovery from fatigue as an index of sleep depth and heart rate variability, six healthy men were immersed in a CO₂ (1000 ppm) bath at a water temperature of 39 °C up to the shoulder for 10 min. As a control, each subject bathed in fresh water (FR) under the same conditions. After bathing, each subject slept 7 hours in a climatic chamber set at an ambient temperature of 26 °C and relative humidity of 50%. After CO₂ bathing, the rectal temperature declined more rapidly than after FR bathing, especially in the early stages of sleep. The high frequency (HF) component of heart rate variability as an index of parasympathetic nervous activity during sleep was higher after CO₂ bathing than after FR bathing. Sleep latency after CO₂ bathing tended to be faster than after FR bathing, and the subjective interrupted sleep time was also reduced following CO₂ bathing. Furthermore, the subjective evaluation of sleep quality was higher after CO₂ bathing. These results suggest that CO₂ bathing induces greater fatigue recovery effects than FR bathing.

キーワード : 高濃度炭酸泉, 疲労回復, 睡眠深度, 心拍変動, 深部体温

Keywords : carbon dioxide-rich water, recovery from fatigue, sleep depth, heart rate variability, body temperature

1. 緒言

炭酸ガス（二酸化炭素）が豊富に溶け込んでいる高濃度炭酸泉は強力な皮膚血管拡張効果があることが知られている。特にヨーロッパなどでは天然の高濃度炭酸泉が豊富に存在していることから、高血圧症者や末梢循環障害を有する患者などに対する温泉療法として適用されており、その効果についても国内外で多くの報告がみられる¹⁻⁵⁾。日本では、天然の高濃度炭酸泉は数少ないが、現在では入浴剤や人工

的な製造装置を用いることで、自宅でも天然温泉とほぼ等しい高濃度炭酸泉を得ることが可能になった^{6,7)}。

近年、炭酸泉が有する血管拡張効果が皮膚血管（皮膚血流）のみではなく、深部組織（筋血流）をも増加させる可能性が示唆されており⁵⁾、国立スポーツ科学センターを始めとする多くの施設において、筋疲労の回復効果を期待した炭酸泉への入浴が推奨されている。実際に、レジスタンス・トレーニング

後の人工炭酸泉への入浴時には、さら湯への入浴時と比較して筋硬度が24%低下した⁸⁾ことや、5分間の人工炭酸泉への入浴により関節可動域が増加する⁹⁾などの報告がみられる。炭酸泉への入浴による筋疲労の回復効果が広まりつつある中、2012年のロンドン五輪でのマルチサポートハウス内および2016年のリオ五輪でのハイパフォーマンスサポートセンター内には人工炭酸泉を用いた入浴施設が設置され、多くの選手が疲労回復を目的とした炭酸泉への入浴を行っていた¹⁰⁾。しかしながら、これらの施設での疲労回復効果を表す指標としては、主観的評価が主である。

睡眠前の入浴は疲労を回復させる方法の一つであり、研究目的のみならず一般家庭でも日常的な炭酸泉への入浴が行われつつあるが、疲労回復の評価としては、「疲れが取れた気がする」や「ぐっすり眠れる」などの主観的評価が主であり、自律神経機能を指標とした疲労回復効果を検討した報告はみられない。

本研究は、炭酸泉への入浴による疲労回復の生理学的効果を明らかにする目的で、脳波測定による夜間睡眠中の覚醒レベルと睡眠深度、心拍変動から算出した自律神経機能および体温変動を観察し、さら湯浴への入浴後と比較・検討した。

2. 方法

被験者

健康な男子大学生6名(年齢 22.1 ± 4.5 歳, 身長 171.4 ± 4.4 cm, 体重 69.9 ± 3.5 kg)を被験者とした。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、ヘルシンキ宣言に示さ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

すべての被験者には、実験前の数日間は生活リズムを一定にさせ、過度の飲酒を控えさせた。実験当

日、午後10時に実験室に集合させた後、再度、実験内容についての説明を行い、水分摂取を行わせた後に、湯温39℃に設定した高濃度人工炭酸泉(炭酸泉濃度:1000ppm)へ10分間の炭酸泉浴(全身浴)を行わせた。入浴後に水分摂取と排便・排尿を行わせた後、半袖シャツと半ズボンの着用と直腸温センサの装着を行なわせた。午後11時に室温26℃、湿度50%に設定した人工気候室内に移動させ、簡易ベッド上にて心電図電極、脳波電極、および皮膚温センサ(前頭部、前胸部、足背部)を装着した後に消灯・入眠させ、午前6時に起床させた。対照実験として同じ条件下(湯温39℃)でのさら湯浴を行わせ、同一時刻に入眠および起床を行わせた。炭酸泉浴とさら湯浴の順はランダムで行い、両実験は少なくとも2日以上の間隔をあけて実施した。

脳波(Neurofax, 日本光電)の測定は、ペーストを塗布した銀電極を国際10-20法¹¹⁾に基づいて頭部に配置して連続記録した(図1)。得られた脳波データは、高速フーリエ変換(FFT)による周波数スペクトル解析を1分毎に行い、 δ 波(1~3Hz)、 θ 波(4~8Hz)、 α 波(8~13Hz)、 β 波(14Hz以上)の含有率を算出した。また、スペクトル解析で得られた結果から、各睡眠深度(ステージ) : 低電位波と θ 波の減少, ステージ : 紡錘波, K複合波の出現, ステージ : α 波が20~50%, ステージ : α 波が50%以上, Rapid eye move-

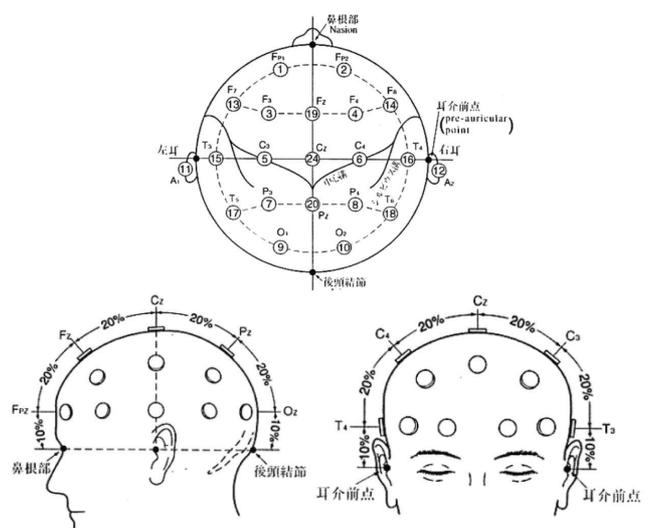


図1 国際10-20法に基づいた脳波電極の配置

ment (REM)： 波と急速眼球運動の出現) を求めた。また、覚醒状態 (波) からステージ に入るまでの所要時間を入眠潜時とした。各睡眠深度心拍変動 (アクティブトレーサー, GMS) の測定は、胸部双極誘導法により得られた心電図波形の心拍数 (R-R 間隔) から解析プログラム (MemCalc, GMS) を用いて LF 成分 (0.04~0.15 Hz), HF 成分 (0.15~0.40 Hz) および LF/HF 成分を算出するとともに、毎分平均心拍数を求めた。直腸温 (ST-25S, センサテクニカ) の測定は、直腸温センサに専用ゴムカバー (日機装サーモ) を装着した後、直腸温センサを肛門から 4~5 cm 挿入して連続記録した。皮膚温の測定は、皮膚温センサを前頭部、前胸部、足背部の皮膚に両面テープで固定して連続記録した。さらに、OSA 睡眠調査票 (一般社団法人日本睡眠改善協議会) を用いた疲労回復 (第 4 因子) および睡眠時間 (第 5 因子) の聞き取りを、起床直後に行った。直腸温および皮膚温については、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 \pm 標準偏差を求めた。平均値の有意差の検定は paired t-test を用い、危険率 5% 未満を有意とした。

3. 結果

図 2 に睡眠中の直腸温 (上段) および前頭部皮膚

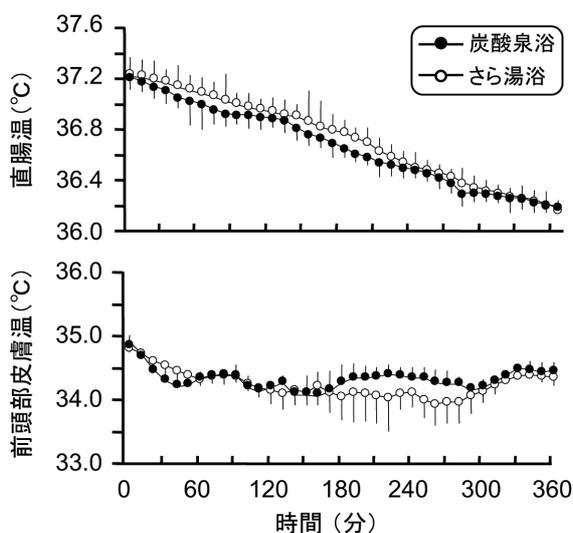


図 2 睡眠中の直腸温 (上段) および前頭部皮膚温 (下段) の変化。平均値 \pm 標準偏差。

温 (下段) の変化を 6 名の平均値で示した。睡眠の開始に伴って直腸温の低下がみられたが、炭酸泉浴後では睡眠初期の低下がさら湯浴後よりも大きい傾向がみられた。同様に、睡眠初期の前頭部皮膚温の低下も炭酸泉浴後がさら湯浴後よりも大きい傾向がみられた。

図 3 に睡眠中の心拍数の変化 (上段) および睡眠開始前 10 分間の平均値に対する変化率 (下段) を 6 名の平均値で示した。心拍数は、睡眠開始約 60 分後まで大きく減少したが、それは炭酸泉浴後がさら湯浴後よりも明らかであった。さら湯浴後では、睡眠開始後約 120 分後以降から起床時まで緩やかな漸減傾向を示したのに対し、炭酸泉浴後ではほぼ定常状態を維持した。

図 4 に睡眠中の心拍変動 HF 成分 (上段) および LF/HF 比 (下段) の変化を 6 名の平均値で示した。副交感神経活動の指標である心拍変動 HF 成分について、炭酸泉浴後ではさら湯浴後と比較して、睡眠中を通して高値を示した。また、交感神経活動の指標である心拍変動 LF/HF 比については、特に睡眠前半 (約 180 分後まで) において、炭酸泉浴後がさら湯浴後よりも低値を示したが、睡眠後半ではむしろ上昇傾向が認められた。

図 5 に脳波波形から算出した夜間睡眠中の入眠潜時、中途覚醒および睡眠深度を 6 名の平均値で示し

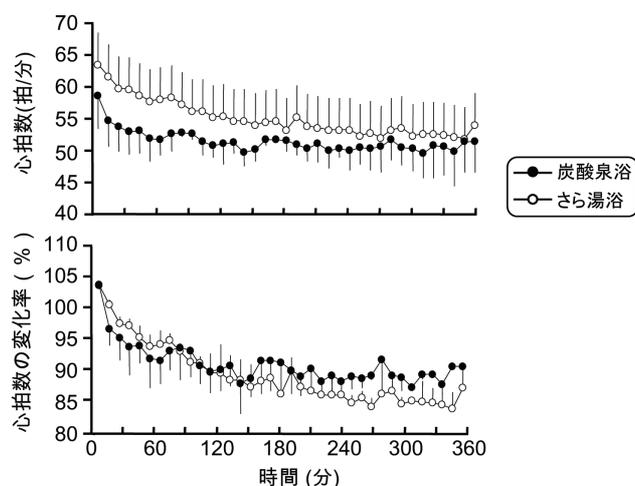


図 3 睡眠中の心拍数の変化 (上段) および睡眠前 10 分間の平均値に対する変化率 (下段)。平均値 \pm 標準偏差。

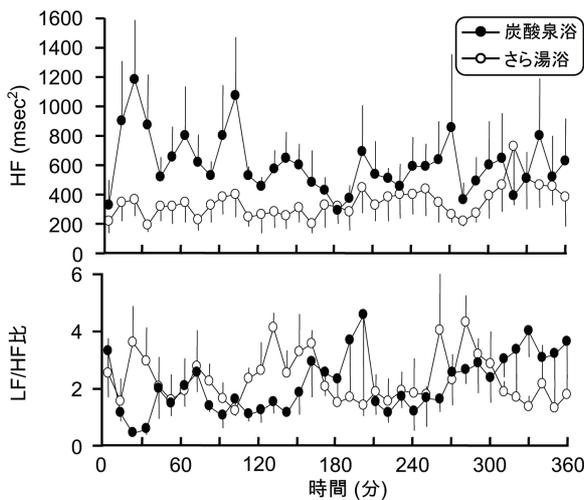


図4 睡眠中の心拍変動 HF 成分 (上段) および LF/HF 比 (下段) の変化. 平均値 ± 標準偏差.

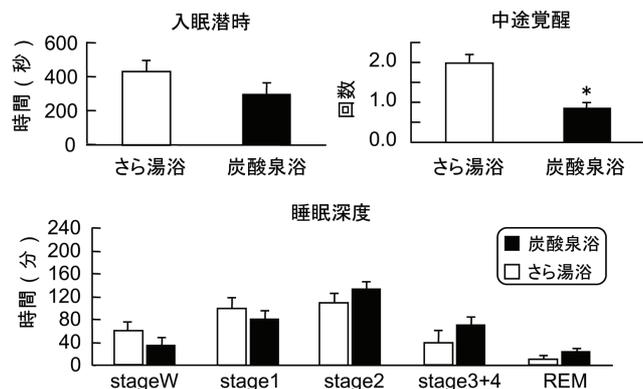


図5 睡眠中の入眠潜時、中途覚醒および睡眠深度. 平均値 ± 標準偏差. *P < 0.05

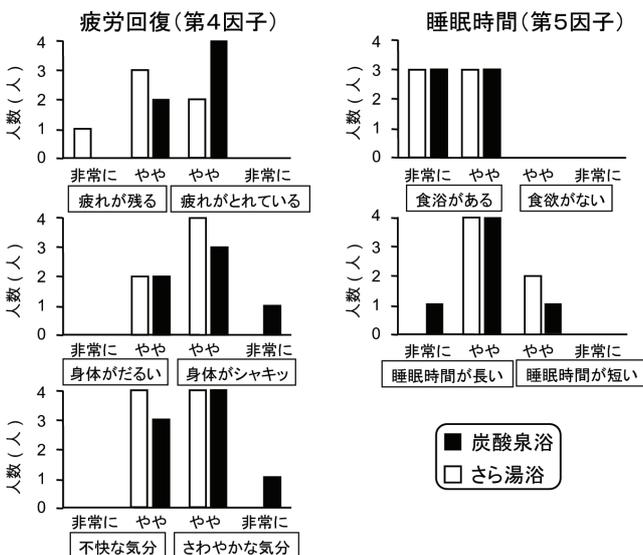


図6 OSA 睡眠調査票を用いた睡眠感の主観的評価.

た. 入眠潜時は炭酸泉浴後がさら湯浴後よりも早い傾向にあり, 中途覚醒についても炭酸泉浴後がさら湯浴後よりも有意に少なかった ($P < 0.05$). また, 炭酸泉浴後ではさら湯浴後よりも, 深い Non-rapid eye movement (NREM) 睡眠ステージであるステージ3と4が多く含まれていた.

図6に起床直後に実施したOSA睡眠調査票を用いた睡眠感の主観的評価を示した. 疲労回復の指標については, 炭酸泉浴後では「疲れがとれている」や「さわやかな気分である」との申告がさら湯浴後よりも多く, また, 自己申告による睡眠時間は, 炭酸泉浴後の方が長いという結果であった.

4. 考察

温泉療法の効果は, 泉質 (薬理作用) 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) による間接的な作用因子が, 複合的に自律神経系や内分泌系などに作用することで得られると考えられる. 炭酸泉が有する皮膚血管拡張効果については, 神経切除を行ったラットの皮膚においても観察される¹²⁾ことや, 浸漬部位のみに明らかな皮膚の紅潮 (皮膚血管拡張) が認められることから, 神経系を介した全身性のもではなく, 経皮的に吸収された CO_2 の薬理的作用を受けた微小循環領域での局所性の効果であると考えられる^{6,7)}.

本研究において, 炭酸泉浴後では睡眠初期の直腸温の低下がさら湯浴後よりも大きい傾向がみられ, わずかではあるが睡眠初期の前頭部皮膚温の低下も炭酸泉浴後でより大きい傾向が認められた (図2). 睡眠時には体温の基準値 (セットポイント) が低下することにより基礎代謝が低下し, 体内での熱産生が少なくなるため体温は低下することが知られている¹³⁾. また NREM 睡眠時や徐波睡眠時などの深い睡眠へと移行する際には全身の発汗量が増加するため, 体温の低下はさらに大きくなる^{14,15)}. つまり, 睡眠時のより大きな体温低下は, より深い睡眠を行っている指標になると考えられる. 更に, 睡眠前の入浴によって体が温められた際には, 末梢 (皮膚) 血管の拡張による体表面からの熱放散が増えるため, 体温がより低下しやすくなる. 本研究では, 入浴中

の深部体温は測定していないが、炭酸泉浴中にみられる皮膚血管拡張は、体内への熱の流入をさらに増加させることが考えられることから、入浴中の深部体温の上昇がさら湯浴よりも大きかった可能性が考えられ、これが睡眠初期の直腸温の低下を大きくしたと推察される。

炭酸泉浴後では、さら湯浴後と比較して睡眠初期での心拍数の減少が多く(図3)、副交感神経活動の指標である心拍変動 HF 成分は、一晩の睡眠を通してさら湯浴後よりも高値を示した(図4)。ヒトの自律神経活動は、間接的ではあるが心電図の R-R interval を解析することにより定量的に分析することができ¹⁶⁾、また睡眠状態については脳波と眼球運動のパターンから把握することが可能である¹⁷⁾。急速眼球運動を伴う REM 睡眠期では、視床での情報伝達が遮断され脊髄レベルで筋肉への情報伝達が遮断されるため、骨格筋が弛緩して身体は休息状態にあるが、脳は活動して覚醒状態にある¹⁸⁾。他方、急速眼球運動を伴わない NREM 睡眠期では、大脳皮質を含めたほとんどの脳の活動が低下し、副交感神経が優位となる¹⁸⁾。NREM 睡眠は、睡眠深度によりステージ 1 から 4 に分類される。睡眠段階と心拍変動の周波数成分のパワー値との関係については、軽睡眠期である NREM 睡眠ステージ 2 の時期に HF 成分のパワー値が最大になることが知られている¹⁹⁾。本研究において、炭酸泉浴後では心拍変動 HF 成分が一晩の睡眠を通してさら湯浴よりも高値を示し(図4)、総睡眠時間に対するステージ 2 や中等度もしくは深睡眠期であるステージ 3 と 4 の割合は、炭酸泉浴がさら湯浴よりも高かった(図5)ことから、炭酸泉浴後はより効果的な睡眠が行われていることが明らかとなった。また、交感神経活動の指標である心拍変動 LF/HF 比については、特に入眠期(睡眠開始約 180 分後まで)において、炭酸泉浴後がさら湯浴後よりも低値を示したが、睡眠後半では上昇傾向が認められた(図4)。LF/HF 成分については、起床時に先立つ早朝の時間帯において REM 睡眠の出現に伴って上昇する²⁰⁾ことが明らかとなっており、炭酸泉浴での睡眠後半での LF/HF 比の上昇と REM 睡眠の発現が一致する結果となっ

た。大崎ら²¹⁾は、湯温 38℃ で 10 分間の炭酸泉浴(260 ppm)を行った際の入浴後の自律神経機能について検討している。その結果、浴後 50 分後においても心拍数は入浴前と比較して有意に低値を示し、また副交感神経活動の 1 指標とされる心電図 R-R 間隔変動係数(CVRR)が上昇(リラックス効果)したことから、炭酸泉浴による疲労回復は、自律神経機能の改善によると報告している。本研究においても、先行研究と同様に炭酸泉浴が自律神経機能に作用した可能性が示唆され、これらが夜間睡眠時の入眠潜時の短縮や中途覚醒の有意な減少につながり(図5)、より深い睡眠が得られたことが、起床後の睡眠感の主観的評価を上昇させた(図6)ものと考えられる。

以上の結果より、夜間睡眠前の炭酸泉浴は入眠時の体温低下を促進させ、自律神経機能に作用することでより質の高い睡眠を取ることが可能となり、積極的な疲労回復効果を促すことができる入浴方法であることが示唆された。

文 献

- 1) Stein ID and Weinstein IW (1942) The value of carbon dioxide baths in the treatment of peripheral vascular disease and allied conditions. *Am Heart J* 23: 349-361.
- 2) Diji A (1959) Local vasodilator action of carbon dioxide on blood vessels of the hand. *J Appl Physiol* 14: 414-416.
- 3) Komoto Y, Kohmoto T, Sunakawa M, Eguchi Y, Yorozu H, Kubo Y (1986) Dermal and subcutaneous tissue perfusion with a CO₂-bathing. *Z Physiother* 38: 103-112.
- 4) Schmidt KL. (1989) Kohlensäurewasser (Sauerlinge). In: *Kompendium der Balneologie und Kurortmedizin*. Steinkopff Verlag Darmstadt, Darmstadt, pp 171-180.
- 5) Hartmann BR, 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.
- 6) Nishimura N, Sugenoja J, Matsumoto T, Kato M, Sakakibara H, Nishiyama T, Sakamoto (Inukai) Y,

- Okagawa T, Ogata A (1992) Effects of repeated carbon dioxide-rich water bathing on core temperature, cutaneous blood flow and thermal sensation. *Eur J Appl Physiol* 87: 337-342.
- 7) 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 (2003) 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觉に及ぼす水温の影響. *炭酸泉誌* 4 (1) : 49-56.
- 8) 山本憲志, 橋本眞明 (2009) レジスタンス・トレーニング後の人工炭酸泉浴が筋硬度回復促進をさせる可能性. *日本生気象学会誌* 46 : 39.
- 9) 水野貴正, 中野匡隆, 松本実, 松本孝朗, 梅村義久 (2011) 人工炭酸泉浴が関節可動域と筋の弾性に与える影響. *日本生気象学会雑誌* 48(1) : 15-22.
- 10) 毎日新聞デジタル版 2016年7月30日.
- 11) 柳沢信夫, 柴崎浩 (2008) 臨床神経生理学, 医学書院, 東京 : 15-37.
- 12) Ito T, Moore JI, Koss MC (1989) Topical application of CO₂ increases skin blood flow. *J Invest Dermatol* 93: 259-262.
- 13) Aschoff J. (1983) Circadian control of body temperature. *J Therm Biol* 8 (1-2): 143-147.
- 14) 小川徳雄 (1966) 睡眠と発汗, *臨床脳波* 8 (4) : 282-290.
- 15) Ogawa T, Satoh T, Takagi, K. (1967) Sweating during night sleep. *Jpn J Physiol* 17: 135-148.
- 16) 清水徹男 (2008) 24時間の自律神経活動リズム. *生体医工学* 46 (2) : 154-159.
- 17) 大熊輝雄, 松岡洋夫, 上埜高志, 齋藤秀光 (2016) 臨床脳波学 (第6版), 第2章 脳波検査法. 医学書院
- 18) 泰羅雅登 (2014) 標準生理学 (第8版) 第24章 統合. 医学書院 : 453-456.
- 19) Vaughn BV, Quint SR, Messenheimer JA, Robertson KR (1995) Heart period variability in sleep. *Electroenceph Clin Neurophysiol*. 94 (3): 155-162.
- 20) Kawano Y, Tochikubo O, Minamisawa K, Miyajima R, Ishii M (1994) Circadian variation of haemodynamics in patients with essential hypertension - comparison between early morning and evening. *J Hypertension*. 12 (12): 1405-1412.
- 21) 大崎紀子, 落合龍史, 時光一郎西條一止 (2000) 人工炭酸泉浴の自律神経機能に及ぼす影響. *日温気物医誌* 63 (2) : 91-95.