

ハニカム構造による ウルトラファインバブル (UFB) の開発 (後編)

野田 尚昭, 田中 洋征

研究経緯

前報において、ハニカム構造によるウルトラファインバブル (UFB) 水の生成に優れた直列5ユニットハニカム構造型 UFB 生成装置を紹介した。水1リットル (L)、ガス流量 0.2 L/min を10分間連続運転してファインバブル密度数 UFB を14.4億個/mLと世界最高レベルを生成できることを説明した。これまでに開発された生成装置は多数あるが、ほとんどがマイクロレベルであり、既存技術では本格的にナノレベルの UFB を生成することが困難な状況にある。気泡を超微細化するためには一様なせん断力が連続的に発生することが望ましい。ハニカム構造を用いる本開発技術は、その狭い空間内で連続的に水流の変化を起こす。このような一様なせん断力場が100桁以上連続的に発生する機構は世界に例をみない斬新なものである。

ここで再度ナノレベルの UFB (ウルトラファインバブル) について述べておきたい。UFB は一般に直径 1 μm 以下の微細なバブルを指し、通常のバブルと異なる。UFB は以下のような特性を持つ。

- (1) 水中での滞在時間が長く、直径 1 mm のバブルは1分間に数 m 上昇するが、直径 1 μm 以下の UFB の場合、1カ月以上も溶解状態で水中に存在する。
- (2) 自己加圧効果があり、直径 1 μm で約3気圧、直径 0.1 μm では約30気圧に達する。
- (3) 気体の溶解効果が優れている。比表面積が大きく、自己加圧効果を持つため、直径 10 μm の

マイクロバブルでも、直径 1 mm のバブルに比べて約2,000万倍の酸素や窒素などの気体溶解能を有する。

UFB のこうした特性を利用し、様々な分野への応用が進んでいる。その一つは、溶存酸素量 DO (Dissolved Oxygen) を向上させることによる、水質改善であり、化学的酸素要求量 COD (Chemical Oxygen Demand)・生物化学的酸素要求量 BOD (Biochemical Oxygen Demand)・浮遊物質量を低減させることで効率的な改善がなされるとされる。また、医療分野へ応用として、超音波と合わせて用いることで造影剤として利用されているほか、結石の破壊などにも適用されている。化学工業や食品工業分野における UFB バブルの有効性も明らかになってきている。最近では、炭酸浴も注目されているので、その応用についてはあとで詳細に述べる。

本報では、5年程前 (2017年頃) に開発した並列型ハニカム構造を用いる UFB 生成装置について紹介する。図1に1000L水槽用大型 UFB 生成装置を示す。また、図2に100L水槽用小型 UFB 生成装置を示す。この研究では、まず、鮮魚の保存、流通に UFB バブル水を使用することにより、酸化や腐敗を伴う劣化の進行を遅らせること^{1)~3)}に成功した。さらに製造コストの低下と機能の向上および簡素化を目的として、経済産業省の H26 年度戦略的基盤技術高度化支援事業 (サポイン事業) 助成を得て開発研究を実施した。その研究プロジェクト名は「生鮮魚介類を長期保存するハニカム構造体を用いたナノバブル生成装置の開発」である。

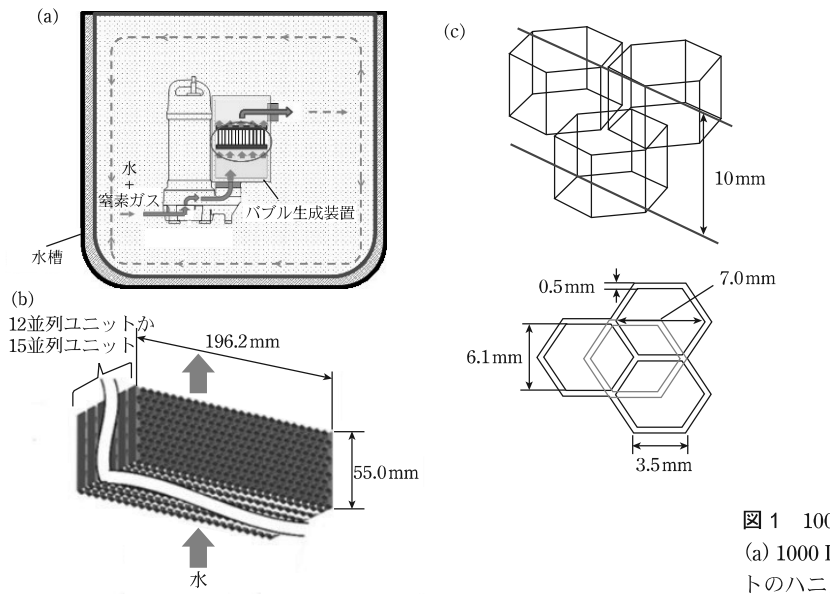


図1 1000 L水槽用大型UFB生成装置.
(a) 1000 L水槽, (b) 12または15ユニットのハニカム構造, (c) ハニカム寸法.

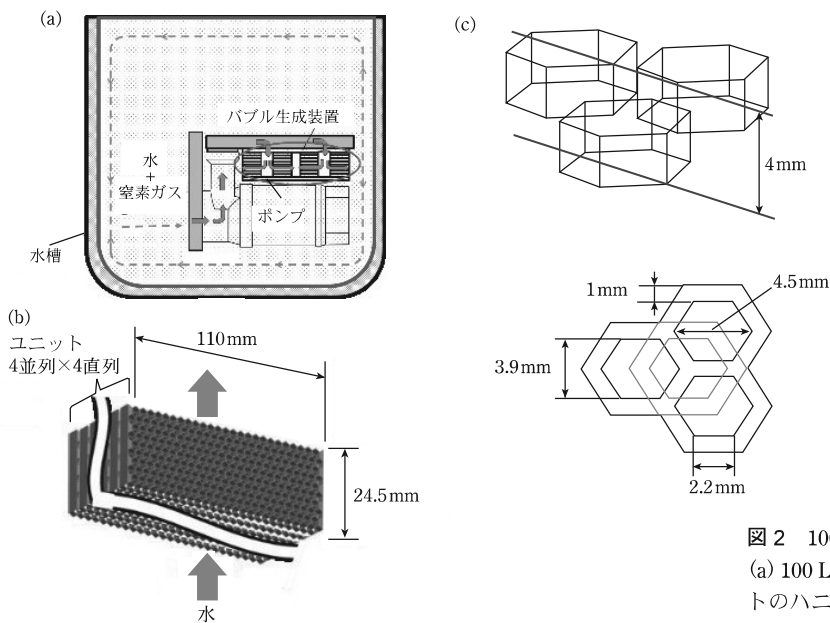


図2 100 L水槽用小型UFB生成装置.
(a) 100 L水槽, (b) 4並列×4直列ユニットのハニカム構造, (c) ハニカム寸法.

現状のUFB生成装置の問題点とその改善策

図3に前報で紹介した直列5ユニットハニカム構造体によるUFB生成装置を示す。これまでに開発したUFBを生成するハニカム構造式は、ステンレス鋼(SUS)の鋳造で製作されている。このた

め軽量化やコストの低減化は簡単ではない。また、図3では、UFBの密度数を増やすためハニカムユニットを5直列につないでいるがその分、圧損があり、温度の上昇とコストが高い。さらに、金属製の生成装置は、半導体等の洗浄に使えないという課題もあり、用途が限定的ともいえる。

抜本的改良として、ハニカムユニットを並列化し、材料をSUSから樹脂(ABS)製に変更すること

H 22年 経産省地域イノベーション研究開発事業でハニカム構造による革新的ナノバブル生成装置を開発

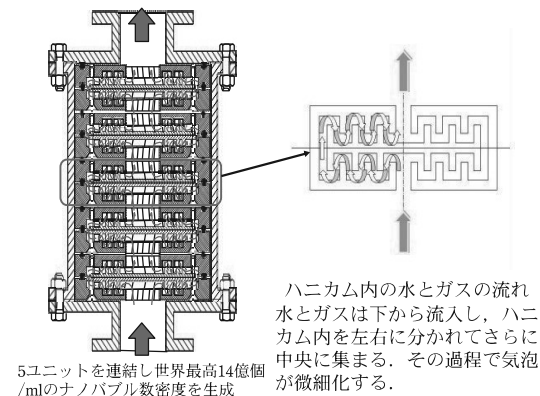


図3 直列5ユニットハニカム構造体によるUFB生成装置。

で上に述べた課題も解決し、機能性が広がることになる。

並列型ハニカム構造を使用するUFB生成装置

ハニカム式UFB生成装置を開発した際のポイントは、以下の通りである。

- ① UFBの生成効率に優れた並列型ハニカム構造体を金属ではなくプラスチックで製作する。
- ② 並列型ハニカム構造体のUFBの生成メカニズムを解析する。
- ③ 構造解析に基づいて最適形状を追求する。
- ④ ナノ粒子解析装置によるUFB生成能力等を評価する技術を明らかにする。

図4にハニカム構造1ユニットの詳細とその流れを示す。先行研究では³⁾、ハニカム型混合器の内部を模した直列型管路に、水と空気の気液二相流を流入させる可視化実験が行われた。その結果、セル結合部断面を通過するまでに、気泡周囲圧力が気泡内圧より小さくなり、気泡の変形が起りやすくなり、細長く変形した気泡にせん断応力が作用して気泡の分裂が起こる、との見解が得られている。

そこで本研究^{4)~7)}では、圧損や温度上昇の対策として並列型ハニカム構造を並列に配置することによるUFB生成能力をナノ粒子解析装置により測

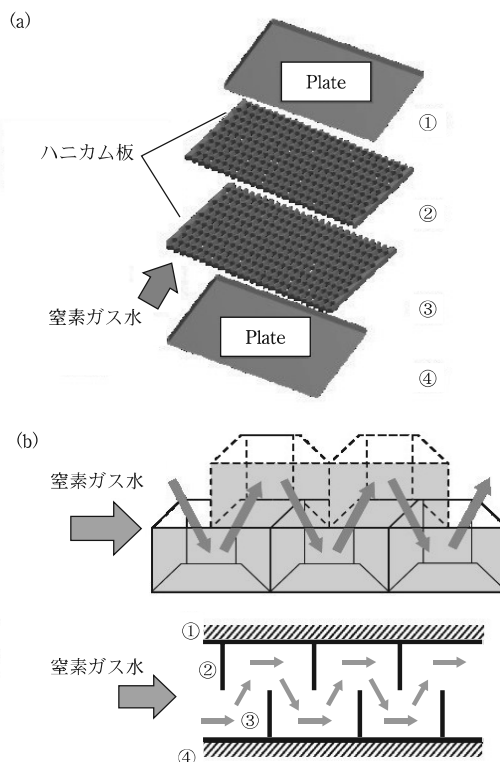


図4 ハニカム構造1ユニットの詳細とその流れ。(a) ハニカム構造1ユニットの詳細、(b) ハニカム構造1ユニットの流れ。

定する。また、流体解析やCFD-PBM解析により実験との関連を考察した。そして、この計測データをもとに、UFB粒径が微細かつ高密度に生成される条件を見出し、従前のもより大容量かつUFB生成効率の高いナノバブル生成技術の確立を目的とする。

大型UFB生成装置と小型UFB生成装置の詳細⁶⁾

図1(a)に1000L水槽と大型装置の概略を示す。また、図2(a)に100L水槽と小型装置の概略を示す。図1(b)、図2(b)にそれぞれの装置に装着されているハニカムユニットを示す。UFB生成装置のポンプ入口にチューブを挿入し、ガスを流入する。水とガスは同時にポンプ内を通過する。UFB生成装置に入る水(ガスを含む)はハニカムユニット面

に対して平行に流入・流出する。図 1 (c), 図 2 (c) に大型装置と小型装置のハニカムセルの各寸法を示す。小型装置のハニカムサイズは大型装置に対して横は 0.64 倍, 高さは 0.4 倍である。小型装置は, 持ち運びに便利な実用上の観点から設計されており, 大型装置に比べ流路内の圧力やせん断応力が増加するため, セルの壁面を厚くしている。より正確には, 大型装置開発時に流れを良くするためセルの厚さを従来の 1 mm から 0.5 mm に減少させたが, 小型装置では 1 mm に戻した。

図 4 にハニカム構造 1 ユニットの詳細を示す。図 4 (a) に示すように, 一對のハニカムプレートとその両端を密閉する上下プレートを 1 ユニットとする。大型装置は合計 12 並列または 15 並列ユニット, 小型装置は合計 16 ユニット (4 並列×4 直列) を装着している。また, 図 4 (b) の上部に解析モデルの模式図を, 下部に窒素ガスを含む混合流体がハニカム構造を流れる状態の 2 次元的模式図を示す。各ハニカムユニット間で, ハニカムを流れ方向に 1/2 セルずらして装備させるため, ハニカムの重なりで複雑な流路が構成され, そこへ気液混合流体を通過させることにより気泡が微細化される。バブル生成装置を出た水はコンテナ (水 100 L) 内で再び装置内を通る。このような循環を繰り返すたび, 微細化効果が連続的に進行する¹⁾。

大型 UFB 生成装置と小 UFB 生成装置の性能比較

実験および流体解析結果から, 両装置の性能について比較検討を行った。表 1 に両装置の実験結

表 1 並列型ハニカム構造を有する大型 UFB 生成装置 (図 1) と小型 UFB 生成装置 (図 2) の実験結果の比較。

項目		大型装置	小型装置
実験条件	出力 P_w (kW)	3.7 (60 Hz)	0.4 (60 Hz)
	流量 Q (L/min)	550	103
	水槽水量 V (L)	1000	100
	実験時間 t (min)	30	30
実験結果	30 分後の UFB 密度	$N_d^{\text{large}}=1.7 \times 10^8$ (particle/mL)	$N_d^{\text{small}}=4.3 \times 10^8$ (particle/mL)

果を示す。両装置の能力をみると, 30 分後における UFB 密度は大型装置が $N_d^{\text{large}} = 1.7 \times 10^8$ particle/mL, 小型装置は $N_d^{\text{small}} = 4.3 \times 10^8$ particle/mL となり, 小型装置のほうが優れている。ここで, N_d^{large} と N_d^{small} は, 直径 10 nm~1000 nm (Nano sight の測定可能範囲) のバブルを UFB (ナノバブル) として UFB 密度を測定したものである。

表 2 に大型・小型装置の両セルの実験結果を示す。セルの能力をみると, 1 セル 1 サイクル当たりの生成能力は大型装置では $\rho_d^{\text{large}} = 3.13 \times 10^3$ particle/mL, 小型装置では $\rho_d^{\text{small}} = 7.61 \times 10^3$ particle/mL となった。小型装置は大型装置に対して $\rho_d^{\text{small}}/\rho_d^{\text{large}} = 2.4$ であることがわかった。すなわち, 1 セル 1 サイクル当たりの生成能力は小型装置が大型装置の 2 倍以上大きい。

次に, 両セルにおけるせん断応力の違いを比較するために, 入口圧力 p_{in} を等しく, すなわち大型・小型両装置の圧力損失を同一にして解析を行った。表 3 に大型・小型装置の入口圧力 p_{in} を等しくした

表 2 大型 UFB 生成装置 (図 1) と小型 UFB 生成装置 (図 2) の 1 セル 1 サイクル当たりの UFB 密度の実験結果の比較。

項目		大型装置	小型装置
実験条件	セル開口幅 w (mm)	6.1	3.9
	セル高さ h (mm)	10	4
	セル数 N_{cell}	3510	1840
	流量 Q (L/min)	550	103
	水槽水量 V (L)	1000	100
	実験時間 t (min)	30	30
	循環回数 N_{cycle}	33	31
実験結果	1 セル 1 サイクル当たりの UFB 密度	$\rho_d^{\text{large}}=3.13 \times 10^3$ (particle/mL)	$\rho_d^{\text{small}}=7.61 \times 10^3$ (particle/mL)

表 3 大型 UFB 生成装置 (図 1) と小型 UFB 生成装置 (図 2) の入口圧力 p_{in} を等しくした場合の両ユニットセルの解析結果の比較。

項目		大型装置	小型装置
解析条件	入口圧力 p_{in} (MPa)	0.45	0.45
	平均流速	$v_{\text{large}}^{0.45} = 0.71$ (m/s)	$v_{\text{small}}^{0.45} = 0.95$ (m/s)
解析結果	圧力低下量 Δp	$\Delta p_{\text{large}}^{0.45} = 0.03$ (MPa)	$\Delta p_{\text{small}}^{0.45} = 0.07$ (MPa)
	最大せん断応力 τ_{max}	$\tau_{\text{max large}}^{0.45} = 24$ (Pa)	$\tau_{\text{max small}}^{0.45} = 56$ (Pa)

場合の両セルの解析結果を示す。同一入口圧力での小型装置のせん断応力 τ_{\max} は、大型装置に対して $\tau_{\max \text{ small}}^{0.45} / \tau_{\max \text{ large}}^{0.45} = 2.3$ となる。この最大せん断応力の違いが、1セル1サイクル当たりの生成能力の違いとなって表れているものと考えられる。

なお、圧力低下 Δp は大型装置では $\Delta p_{\text{large}}^{0.45} = 0.03$ MPa、小型装置では $\Delta p_{\text{small}}^{0.45} = 0.07$ MPa であり、 $\Delta p_{\text{small}}^{0.45} / \Delta p_{\text{large}}^{0.45} = 2.3$ であることがわかった。このように、圧力変動も小型装置が大型装置より大きい。これらの圧力変動 $\Delta p_{\text{large}}^{0.45} = 0.03$ MPa や $\Delta p_{\text{small}}^{0.16} = 0.01$ MPa は、他の研究の圧力変動と比べると小さい。すなわち、本装置の圧力変動は、ベンチュリ管等を用いた UFB やマイクロバブルの生成装置の圧力の変動の 1/10 程度であり、その UFB 生成への影響は小さいものと考えられる⁶⁾。

以上の大型装置と小型装置の性能比較と考察により、せん断応力が UFB 生成能力に大きく関係していることがより明確に示された。

バブル直径 x を変化させたときの UFB 密度分布 $N_d^{\text{exp}}(x)$ について

新しいハニカム並列配列によって、どのように UFB が生成されるかを調べることは重要である。図 5 に、レーザー回折・散乱法を用いたナノ粒子解析装置「Nano Sight LM10-HS」による 30 分間に生成された UFB 密度の測定結果 $N_d^{\text{exp}}(x) =$

$N_d^{\text{exp}}(x)|_{t=30} - N_d^{\text{exp}}(x)|_{t=0}$ を示す。その原理は、サンプル液に紫色のレーザー光を水平方向に照射し、ナノ粒子からの側方散乱光を対物レンズで可視化し、粒子の移動速度から粒径を算出する。レーザー回折・散乱法は粒子トラッキング法と比較し UFB 測定に有効であることが示されている⁸⁾。実験開始前にすでに UFB 密度 $N_d^{\text{exp}}(x)|_{t=0}$ が存在しているため、実験 30 分間で生成された 1 ml あたりの UFB 密度 $N_d^{\text{exp}}(x) = N_d^{\text{exp}}(x)|_{t=30} - N_d^{\text{exp}}(x)|_{t=0}$ を定義し、図 5 に $N_d^{\text{exp}}(x)$ として示す。なお、図 5 には、比較のため、気液二層流中のバブルの分裂を、Population balance model (PBM)⁹⁾¹⁰⁾ を用いてシミュレーションすることで得られた結果 $N_d(x)$ も示している。図 5 に示すように大型装置・小型装置ともに生成された UFB 密度 $N_d^{\text{exp}}(x)$ は、バブル直径

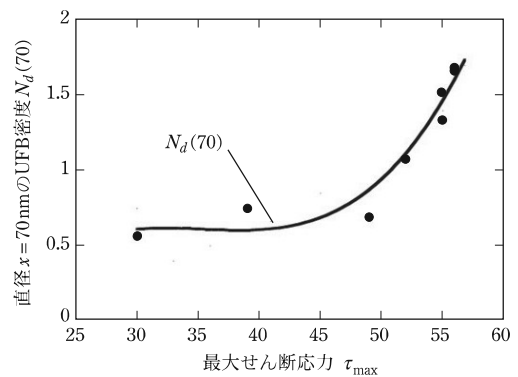


図 6 小型 UFB 生成装置における直径 $x = 70$ nm における UFB 密度の最大値 $N_d(70)$ と最大せん断応力 τ_{\max} の関係。

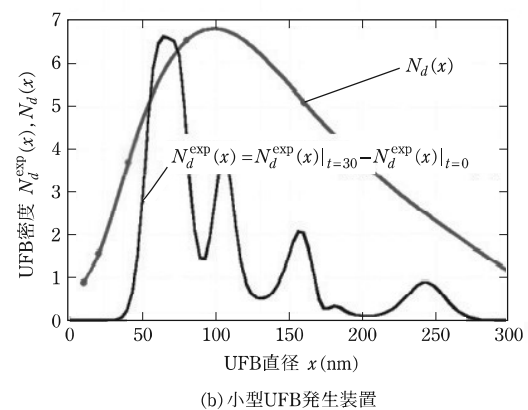
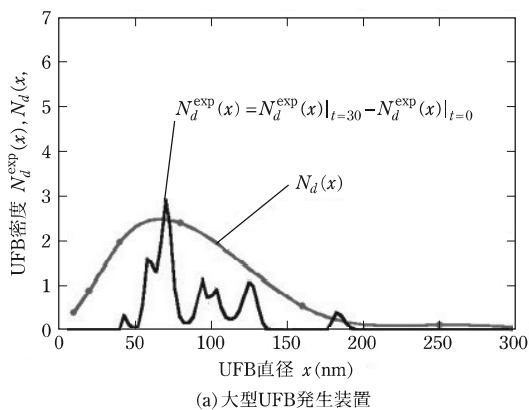


図 5 レーザー回折・散乱法を用いたナノ粒子解析装置「Nano Sight LM10-HS」による UFB 密度の測定結果 $N_d^{\text{exp}}(x) = N_d^{\text{exp}}(x)|_{t=30} - N_d^{\text{exp}}(x)|_{t=0}$ (30 分間の増加量) と PBM 解析により求めた UFB 密度 $N_d(x)$ の予測値。

$x = 70 \text{ nm}$ で最大になっている。

図6に小型UFB生成装置における最大せん断応力 τ_{\max} と $x = 70 \text{ nm}$ でのUFB密度の最大値 $N_d(70)$ との関係を示す。ここで $N_d(70)$ はUFB密度の代表値として用いる。最大せん断応力 τ_{\max} が大きくなると、UFB密度 $N_d(70)$ も増加していく。このことから、最大せん断応力 τ_{\max} からUFB密度 $N_d(70)$ を予測できることが示唆された。これより、生成効率に優れたナノバブル装置を効率よく設計できる指針が示された。

微細気泡 UFB の応用分野について

最近の微細気泡の研究の応用分野を鳥瞰すれば、多種多様な分野でなされている。例えば、環境分野、産業分野、工業分野、食品・水産・農業分野、医療分野等である。具体的内容は環境分野では水処理、水質浄化であり、産業・工業分野では部品・洗浄（工業分野は気泡による油性分除去）、機械・加工機の加工部の洗浄・冷却性能及び加工効率の向上及び燃費低減である。さらに食品・水産・農業分野では、カット野菜等の洗浄、養殖では水質浄化・成長促進、魚介類の鮮度保持、水耕栽培、畜産における環境保全等である。医療分野では、医療器具の滅菌、抗炎症作用や血流促進による生理活性効果等である。しかし、これらの分野での成果は、マイクロバブルでも十分な効果があり、UFBを使う必要性は少ないようである。

そこで、以下では、まだほとんど知られていない医療分野での応用について、特にUFBであることでより効果的になることを中心に述べる。

各種 UFB 液の医療分野への応用について

UFB液には、殺菌作用があることは前編で報告した。酸素や空気ナノ液でも殺菌効果があり、酸素ナノ液は、オゾン・ナノ液と同じくらい強い殺菌性がある。

東京医科歯科大学の眞野喜洋名誉教授は、口内

炎の発症時に酸素ナノ液で1日2回うがいをさせたとところ1~2回で疼痛が消滅し、潰瘍性病変が2~3日で消失、修復が促進したとしている。また、歯周病への効果として、朝夕2回のオゾン・ナノ液によるうがいで、1週間後には歯牙の部位に無関係に万遍なくポケットが有意に浅くなるばかりか、出血も著しく改善することを報告している。さらにナノ液はその種類と混合比を対象の症状に合わせることで、基本的には生体の有するhomeostasis効果を高め生物学的に正常な平衡を維持するように働くようであり、高血圧、高血糖、高コレステロール等の性状を改善するような機能を有しているとしている。従って、長期にナノ液を飲用し適度の運動療法とくみあわせることで、メタボリック・シンドローム等の改善予防や生活習慣病の予防にも利用できると説明し、ナノ液を1~5年以上飲用し続けているほとんどのモニターからは、「個体免疫力が高まった」、「体調が良い」、「風を引かない」、「胃腸障害が生じない」、「食用が出た」、「体力がついた」、「熟睡吸いできる」などの報告がきていと述べている。また皮膚疾患であるアトピー性皮膚炎や尋常性乾癬にもナノ効果は大きく、難治性皮膚炎でも完治するケースがあり、これらも自己免疫能が回復した結果であると推量している¹¹⁾。

UFB炭酸浴の医療への応用について

炭酸温泉はヨーロッパでは古くから健康維持や治療目的に利用されている。特に、ドイツの温泉療養地の「バートナウハイム」は有名で、炭酸泉の効能・効果を楽しもうと世界各地から、毎年多くの人が炭酸泉浴に訪れている。また、ドイツでは高濃度炭酸泉は「療養泉」として、医療機関から生理活性効果があることが認められ健康保険も適用されている。日本では、天然の炭酸温泉は少ないことや炭酸ガスが気化しやすいため、炭酸泉を運んだものでは効能が期待できず、炭酸泉が湧き出す一部の地域のみ利用されている。

近年は、市販の炭酸ガス入浴剤や人工炭酸泉

がスーパー銭湯で使用されており、その有効性が知られてきているが、気化しやすいこと、毎日利用できないこと等から効果は限定的で長続きしていない。一方、今回開発した人工炭酸泉は飽和溶解度を超える 1,450 ppm を溶解させた 5 日後でも 1,000 ppm 未満の高濃度を維持する人工炭酸泉を世界で初めて実現することに成功している。これは、当該グループの装置が、浮力なしのナノレベルの気泡を大量に作れるメカニズムをもっているのに対し、他社製品は、主にマイクロレベルであるため、浮力があり時間とともに気化するからである。

ここで、炭酸泉は以下のように定義される。源泉で 25℃以上、お湯 1 L に 250 mg (250 ppm) 以上溶解したものをいう。大分県長湯温泉(ラムネの湯)は、400~800 ppm 程度、市販の炭酸ガス入剤: 40℃で 50 ppm 程度、炭酸飲料(ビール、サイダー等)は、3,000~4,000 ppm 程度、天然炭酸泉は、溶解濃度は 1,000 ppm 程度が限界値であり、飽和溶解後 1 時間に 5~20% 程度気化するので高濃度を維持できないという欠点がある。お湯 1 L に 1 g (1,000 ppm) 以上溶解したものは、高濃度炭酸泉と呼ばれる。

人工炭酸泉は天然の炭酸泉にくらべ、鉄分や硫黄などのミネラルは溶け込んでいないが 1,000 ppm 程度の濃度があると、天然炭酸泉と同じ生理活性効果があることが最近の研究により明らかにされてきた。

病気(ASOの重症化)の原因は老化現象であること

医学教育の基礎を築いたウィリアム・オスラー博士(1849~1919)は「人は血管とともに老いる」という名言を残している。閉鎖性動脈硬化症(ASO)の重症化の原因は老化現象である。

『血管年齢が若返る「炭酸浴」』の著者¹²⁾である名古屋市にある偕行会の会長で、循環器系専門医でもある川原弘久医師によれば、「血管が老化すると、血管がもろくなり、血圧の上昇などをきっかけにして詰まったり、破れたりする。」と説いており、さらに、「心筋梗塞、脳出血、脳梗塞はいずれも血管の老化によっておこる病であるため、血流が悪くなると、酸素や栄養がいきわたらないので、細胞や臓器の機能が徐々に低下するし脳にいきわたらなくなると、認知症にもなりやすくなる。」としている。

では、血管年齢を若返りさせるにはどうすればよいか、川原医師は、1995年透析学会において、重症の閉塞性動脈硬化症(ASO)の患者が炭酸浴治療で劇的に改善したとの研究が発表されたことにヒントを得た。そして、炭酸浴設備を導入し、透析患者や脳血管障害に多発するASOの治療・研究に従事し、足の切断を宣告された患者、脳血管障害に苦しむ重篤患者の命を救うなど目覚ましい治療効果を報告している。さらに著書のなかで、1日15~20分の高濃度炭酸浴(足湯)で血管年齢が若返り「健康寿命を延ばすことが可能」であるとしており、図7に示すように、動脈硬化症患者の治療を始めて3カ月で著しい改善効果があることを報告している。これは炭酸泉に入浴すると、炭酸ガスが皮膚の毛穴を通じて毛細血管に吸収されて末梢血管を拡張させ、血流を促進することで改善されるためである。炭酸泉は普通のお湯(風呂または足湯)に比べ約3倍の



図7 ASO患者の高濃度炭酸浴の治療効果(文献12)より抜粋。

血流をもたらすと説明している。

さらに最近の研究¹³⁾でわかってきたことを以下に記す。

1. 血流促進による効能：血液の循環がよくなることにより動脈硬化や心臓病など循環器系疾患の症状の緩和と糖尿病、神経痛・リウマチの疼痛緩和、冷え性・高血圧・肩凝りや血行障害の改善など、幅広い効能が報告されている。
2. 褥瘡(床ずれ)治療に有効：床ずれは血行不良などが原因であることから血行促進により改善されることでも注目を集めている。
3. 心臓に負担をかけない：心臓に負担をかけずに血液の循環をよくすることができることからドイツでは炭酸泉は「心臓の湯」とも呼ばれている。もともと温泉療法が体によいということは広く知られているが、さら湯の場合は入浴直後に血圧が急上昇し、その後やや下がるものの、入浴後に高めに推移する。そのため高血圧の人は注意が必要である。

炭酸ガスの安全性について

炭酸ガスは皮膚から吸収されて血流により肺に運ばれ、呼吸により吐出する。炭酸泉浴による炭酸ガスの吸収量は、50 mL/分、安静時の肺からのCO₂排出量は200 mL/分、激しい運動時の炭酸ガスの体内生産量は1,500 mL/分であるから、炭酸泉浴は極めて安全である。また、炭酸ガス濃度は空気中で5,000 ppmに達すると人体に危険となる。通常は400 ppm程度であり、換気扇をつければさらに安全である。

参考文献

- 1) 野田尚昭, 任飛, 山本弥, 上田鷹彦, 佐野義一, 陳玳珩, 高瀬康, 米澤裕二: ハニカム構造体を用いたナノバブル生成装置の設計とその性能, 設計工学, **53** (1) (2018), 111-126.
- 2) 株式会社ナノクス, (online), available from <<http://www.nano-x.co.jp>>, (accessed 2015-09-18).
- 3) 平木講備: 窒素ナノバブルを用いた魚介類の長期保存技術, 微細気泡の最新技術, **2** (2014), 177-183.
- 4) 野田尚昭, 高田翔, 川野凌, 翟洪方, 佐野義一, 高瀬康, 米澤裕二, 梅景俊彦, 田中洋征: ハニカム構造

体を用いるナノバブル生成法におけるバブル生成密度の考察, 設計工学, (2020), 1-16.

- 5) F. Ren, N.-A. Noda, T. Ueda, Y. Sano, Y. Takase, T. Umekage, Y. Yonezawa and H. Tanaka: CFD-PBM Approach for the Gas-Liquid Flow in a Nanobubble Generator with Honeycomb Structure, *Journal of Dispersion Science and Technology*, **40** (2) (2019), 306-317.
- 6) 野田尚昭, 高田翔, 川野凌, 佐野義一, 高瀬康, 翟洪方, 任飛, 上田鷹彦, 米澤裕二, 梅景俊彦, 田中洋征: ハニカム構造体からなるナノバブル生成装置の生成能力に及ぼす異なるセルサイズと流れ特性の影響, *混相流*, **35** (2) (2021), 269.
- 7) N.-A. Noda, H. Zhai, K. Takata, Y. Sano, Y. Takase, F. Ren, R. Kawano, T. Umekage, Y. Yonezawa and H. Tanaka: Flow Characteristics in a Honeycomb Structure to Design Nanobubble Generating Apparatus, *Chemical Engineering and Technology*, **43** (6) (2020), 1176-1185.
- 8) S. Maeda, M. Kobayashi, J. Tokuda, T. Fujita, K. Terasaka and S. Kuwabara: Measurement of Nano-Bubble Generated by Nano GALF Using Three Types of Particle Size Measuring Equipment, *The Japanese Society for Multiphase Flow Annual Meeting 2011*, (2011).
- 9) T. F. Wang, J. F. Wang and Y. Jin: Population Balance Model for Gas-Liquid Flows: Influence of Bubble Coalescence and Breakup Models, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **44** (2005), 7540.
- 10) L. M. Li, Z. Q. Liu, B. K. Li, H. Matsuura and F. Tsukihashi: Water Model and CFD-PBM Coupled Model of Gas-Liquid-Slag Three-Phase Flow in Ladle Metallurgy, *ISIJ International*, **55** (2015), 1337.
- 11) S. Uesawa, A. Kaneko, Y. Nomura and Y. Abe: Bubble Behavior and Flow Structure on Bubble Collapse Phenomena in a Venturi Tube., *The Japanese Society for Multiphase Flow*, **26** (5) (2013), 567-575 (doi: <https://doi.org/10.3811/jjmf.26.567>).
- 12) 川原弘久著 監修, 山田哲也, 森山善文: 血管年齢が若返る「炭酸浴」, 幻冬舎出版, (2014).
- 13) 真野喜洋: マイクロバブル・ナノバブルの最新技術 II, シーエムシー出版, (2010), 237-245.

のだ・なおあき NODA Nao-Aki

1984 九州大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程修了。九州工業大学工学部講師・助教授・教授を経て、2022.4より名誉教授。焼嵌め式ローラや特殊ボルト等の産学連携に関する研究に従事。日本設計工学会論文賞受賞、日本機械学会フェロー、自動車技術会フェロー。2019-2021 日本材料学会九州支部長。

たなか・ひろゆき TANAKA Hiroyuki

1995 福岡県工業技術センターインテリア研究所長, 2001 九州工業大学地域共同研究センター次長, 2004 地域共同研究センター長, 2005 文部科学省派遣産学連携コーディネータ, 2008 九州工業大学および福岡大学客員教授, この間コーディネーターとして, 外部資金を主に経済産業省等から20億円ほど獲得している。