

5

期待される放射性物質の除去技術

微細気泡で汚染土壌を浄化

—— ナノバブル水の生成メカニズムとその洗浄効果

上田義勝¹・徳田陽明²¹ 京都大学生存圏研究所・² 京都大学化学研究所

東京電力福島原発災害により、放射性セシウムが環境中に放出された。放射性セシウムの半減期は長いため（約 30 年）、被ばくのおもな要因であることが知られている。

気泡は、われわれにとって身近な存在である。炭酸水は二酸化炭素からなる気泡を含んでいるし、水をかき混ぜて気泡を水中に存在させることもできる。これらの気泡は浮力によって水面へ浮上し、最終的には消滅する。この例における気泡の大きさ（直径）は、数 mm 程度である。

気泡の大きさが 100 μm 程度になると、通常の大気泡とは異なった性質を示すことが明らかとなってきた¹⁾。その特徴を生かし、医療分野や環境浄化分野で用いられている例もある。このような大きさの気泡は、微細気泡（マイクロバブル）と呼ばれる。また、1 μm よりも小さな気泡をナノバブルと呼称することもあるが、マイクロバブルの範疇にあるものと考えてよいだろう。本記事におけるナノバブルという名称は、セシウム汚染土壌の浄化試験に用いた気泡（大きさの実測値が 100 nm 程度）に限定して用いることとする。

気泡が微細化することによって、通常の大気泡とは異なった性質を示し、時として実用上、有用になることがある。しかしながら、微細気泡は、われわれの望みをすべて叶えてくれる魔法の技術ではないことを明記しておく。

筆者らは、事故直後から浄化に関するデータを集めてきた。本稿では、微細気泡を含む水の洗浄効果について紹介する。

うえだ・よしかつ ● 京都大学生存圏研究所助教, 2002 年京都大学大学院情報学研究科博士後期課程単位取得退学, 博士 (情報学), <研究テーマ> 微細気泡を含んだ水の電気化学特性の解析, プロトン導電性材料の開発

とくだ・ようめい ● 京都大学化学研究所准教授, 2001 年京都大学大学院工学研究科博士後期課程研究指導認定, <研究テーマ> 無機固体化学, 物理化学

微細気泡とは

水中の気泡は浮力によって浮上し、水面で破裂して消滅する。この浮力の大きさは、次の式で表すことができる。

$$F = \frac{4\pi r^3}{3} g$$

ここで、水の密度を 1、気泡の半径を r 、重力加速度を g とした。気泡が小さくなると浮力が小さくなるため、浮上速度が遅くなることが知られている¹⁾。たとえば直径 10 μm の微細気泡の上昇速度は 60 $\mu\text{m s}^{-1}$ と遅いため、水中に一時的に滞留できる。滞留する気泡は、①浮上後の破裂、②自己縮小による消滅、③合一および浮上後の破裂、④自然圧壊、のいずれかの過程を経て消滅する。以下に、微細気泡の消滅過程を概説し、微細気泡の特徴を説明しよう。

②自己縮小による消滅

気泡の表面は水と気体の界面であるため、表面張力の影響によって気体を圧縮する圧力が働く。その大きさは、Young-Laplace の式で表すことができる¹⁾。

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{r}$$

ここで、気泡の半径を r 、表面張力を σ とした。Henry の法則により、気体の溶解度は圧力に比例することから、気泡が小さくなればなるほど、気体の水への溶解度が高くなるといえる。微細気泡は、①水への自己溶解によって縮小する、②縮小した結果、圧縮する圧力が高くなるために自己縮小し、③最終的に溶解により消滅する、という過程をたどる。

⑤ 合一および浮上後の破裂

気泡どうしが接触し、一つの気泡となることを合一という。先述のように小さな気泡の浮上速度は遅いが、合一すると気泡は大きくなるので、浮上速度は増加する。表面の負電荷の影響によって気泡どうしが合一する確率が下がり、水中に安定に存在できるとされる¹⁾。

⑥ 自然圧壊

水に超音波を照射すると、音圧変動によりキャビテーション(空洞)気泡が発生する。このキャビテーション気泡が超音波により圧壊されると、ソノケミストリーで知られているように、局所的な OH ラジカルが発生する¹⁾。通常の水や気泡では、このようなラジカルを生成することはない。しかし、微細気泡の場合には、外部刺激がなくてもラジカル生成するとされている。

以上からわかる微細気泡の特徴は、①水中での滞留時間が長い、②内部圧力が高い、③自己消滅する(気体は水へ溶解するため)、④表面が負に帯電している、⑤合一しにくい、⑥ラジカル生成する、ということである。

微細気泡の生成方法²⁾

微細気泡を生成する方式として、細孔をもつパイプへ気体を圧入する細孔式、液体に超音波を照射する超音波式、過飽和状態の気体を析出させる加圧溶解式、気液二相流体を遠心分離してせん断する気液混合せん断方式などが知られている。本研究では、ナノバブル発生装置 BUVITAS HYK-32-D (Ligaric 製) を用いて、気液混合せん断方式による微細気泡の生成を行った(図 1)。また、気泡径の評価は、NanoSight

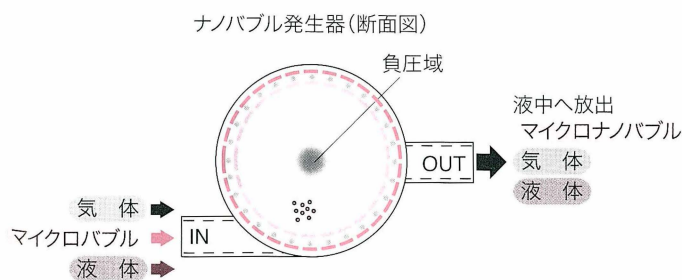


図 1 気液混合せん断方式によるナノバブルの生成

IN 側から気体と液体、それらを混合させて発生させたマイクロバブルを、ポンプ圧力でナノバブル発生装置に送る。遠心力によりマイクロバブルがせん断され、ナノバブルが発生する。株式会社 Ligaric 提供の図を改変。

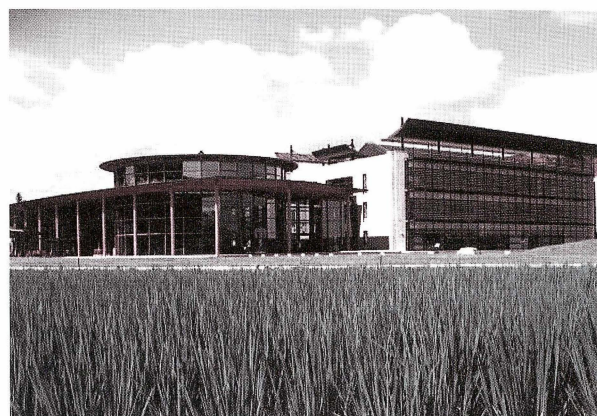


写真 1 福島県農業総合センター

今年も引き続き農作物などの環境放射能モニタリングが続いている。

LM-10 (NanoSight 社製) により行った、BUVITAS により生成した微細気泡水における気泡の最頻直径は図 2 より 100 nm であることがわかり、“ナノ”バブルであることが確認できた。また、7 日経過した後にナノバブルが水中に存在することもわかった。

砂礫の洗浄³⁾

汚染された土壌の除染の一環として、福島県農業総合センター(福島県郡山市、写真 1)にて採取した砂礫をナノバブル水で洗浄することを試みた。まず表面の粘土を除去するために水で前洗浄を行った。洗浄後の砂礫 100 g をさまざまな水(精製水、ナノバブル水、市販の洗剤を 0.15 wt% 添加した水(以下、石けん水)) 500 mL 中にそれぞれ静置し、静置前後の乾燥状態での放射線強度を比較した。図 3 に示すように、ナノバブル発生装置の稼働時間とともに、気泡の最頻

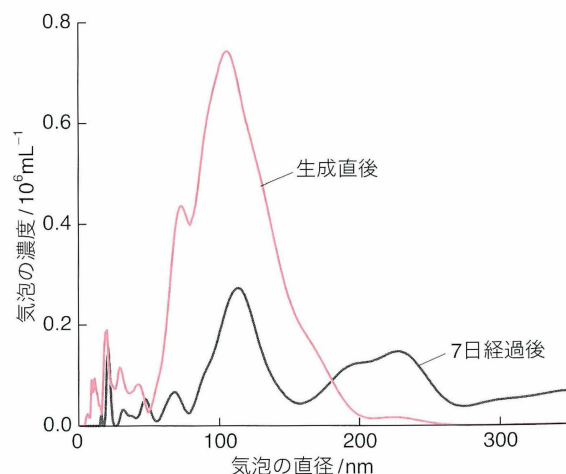


図 2 気泡の直径と濃度の関係

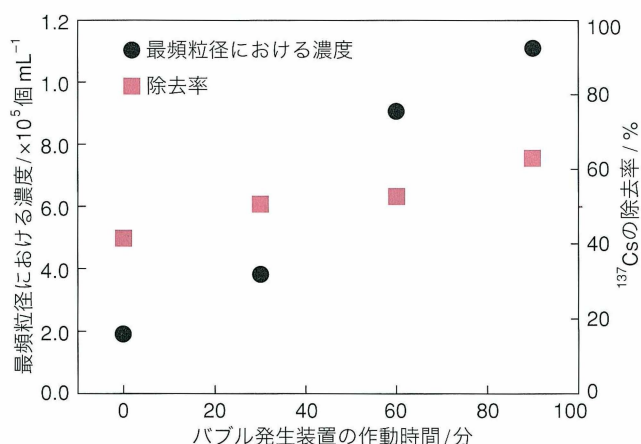


図3 ナノバブル発生装置の稼働時間と最頻粒径における濃度および砂礫からの ^{137}Cs の除去率の関係

濃度(1 mL 中の個数)が増え、 ^{137}Cs の除去率が增加することがわかった。また、精製水、石けん水との比較を行った結果を図4に示す。精製水や石けん水を用いた場合と比較して、ナノバブル水を用いると、洗浄効果が高くなることがわかった。

洗浄のメカニズム

なぜ微細気泡を含む水が洗浄に有効なのか。その要因として、表面吸着や表面電荷の影響、気泡が研磨剤として働く可能性や気泡のもち上げ効果、表面張力の低下による浸み込みなどが考えられている。しかし現時点では、いずれの要因によるものなのか、科学的理解に至っていない。ただし、ナノバブル水により洗浄を行った洗浄液のほうが、そうでないものと比べて濁っていること、また洗浄後の上澄み液からセシウムが検出されなかったことから、砂礫の表面に付着した粘

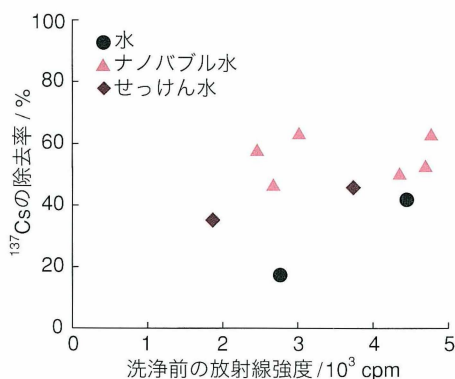


図4 洗浄前の放射線強度に対してプロットした ^{137}Cs の除去率

土質とともにセシウムが除去されたと推察される。

2011年3月の福島原発災害のときにみなさんは何を感じていただろうか。東日本大震災直後から多くの人びとが大変な思いをしており、とくに福島県では本来苦しむはずではなかった人びとまでもが被害に巻き込まれ、現在もその影響は続いている。筆者らは国立大学に所属する科学者であり、このような国難の際には一致団結して解決方法を探求することこそが本来の義務であり、急務であると考えている。また、その一方で、除染技術を構築してこなかった原発業界への憤りも感じている。環境放射能とはまったく無縁の研究者であった筆者らが、「災害復旧に役立ちたい」という使命感のもと、福島県に住む友人たちとも協力して「除染」という未成熟な分野に対する情報収集とさまざまな基礎実験を昼夜問わず行ってきた。その結果として、ようやく見つけた一つの解が微細気泡であった。適用可能かどうかはケースごとに精査していく必要があるが、大気と水のみから生成でき低環境負荷であるので、無限の可能性を秘めていると考えている。この可能性を開花させるのは、われわれ科学者の使命である。

謝辞：福島県農業総合センターには、試験場所・試験体を提供していただいた。サンスター株式会社およびサンスター技研株式会社、株式会社 Ligaric (前株式会社協和機設) にはナノバブル発生に関しての情報提供をしていただいた。京都大学 RI センターでは、放射線強度の測定機会をいただいた。国立大学協会、日本原子力開発機構、京都大学には研究費を支援していただいた。ここにお礼申し上げる。

参考文献

- 1) J. H. Bang, K. S. Suslick, *Adv. Mater.*, **22**, 1039 (2010).
- 2) <http://www.jaea.go.jp/fukushima/decon04/ps11.pdf>; 上田義勝, 徳田陽明, 藤村恵人, 二瓶直登, 日本原子力学会春季年会, I37, 福井 (2012).
- 3) Y. Ueda, Y. Tokuda, S. Fujimura, N. Nihei, T. Oka, *Water Sci. Technol.*, accepted.

実験データを 正しく扱うために

化学同人編集部【編】

A5判・132頁・定価 1575 円 (税込)

化学実験における数値データの扱い方を基本から学べる、学生実験の副読本。卒業研究時に役立つ一冊。

化学同人