

ノロウイルスの不活化に成功

マイクロバブルの工学的な利用技術の確立

産総研環境管理研究部門は、マイクロバブル（超微小気泡）の工学的な利用技術の確立を進めている。今回、その応用の一つとして、カキなど貝類の食中毒の原因物質として多くの被害を出しているノロウイルスを不活化することに成功した。

マイクロバブルのユニークな特性

水の中で浮遊する気泡を限りなく小さくすると、その特性が大きく変化する境界に出会う。気泡径が $50\mu\text{m}$ 程度を一つの目安として、これよりも小さな気泡をマイクロバブルと呼んでいる。通常の気泡は水の中を急速に浮上して表面でパンとはじけ散る。これに対してマイクロバブルは、水中を漂いながら気泡径をさらに小さくしていき、ついには消滅する（もしくは消滅するように見える）。実はこの現象の中に非常にユニークな特性が隠されている。また、その特性を利用することで多くの工学的な応用が可能となる。

ユニークな特性としては、まず帯電作用があげられる。マイクロバブルを電場の中におくと電位勾配に従って横方向に移動を始める。図2に示すのは約3秒間におけるマイクロバブルの移動軌跡である。電位勾配を左右で切り替えると、マイクロバブルも左右に振られながら緩やかに上昇する。この時の横軸方向の移

動速度を元に表面電位（ゼータ電位）を求めることが可能である。不思議なことに、蒸留水中の気泡であっても界面は $-30\sim-40\text{mV}$ に帯電している。この帯電は水のpHに大きく依存しており、アルカリ性ではより強い負の帯電を示すとともに、強酸性では正に帯電している。また、マイクロバブルは自己加圧効果を持っている。通常の気泡では問題にならないが、直径が $10\mu\text{m}$ のマイクロバブルでは約0.3気圧、 $1\mu\text{m}$ では約3気圧、環境圧に対して内部の気体が加圧されている。また、マイクロバブルの大きな特徴として、物理的な刺激を与えることでこれを圧壊することができる。圧壊とは瞬時に気泡がつぶれる現象であり、断熱圧縮に近い変化が気泡内で起こる結果、超高压で超高温な領域（ホットスポット）を形成する。このマイクロバブルの圧壊現象を利用して、全体環境としては常温常圧でありながら多量のフリーラジカルを発生させることが可能であり、水中の有害化学物質の分解や素材合成などに利用できる。

図1 通常の気泡とは異なり、マイクロバブルは水中で縮小し、ついには消滅する。

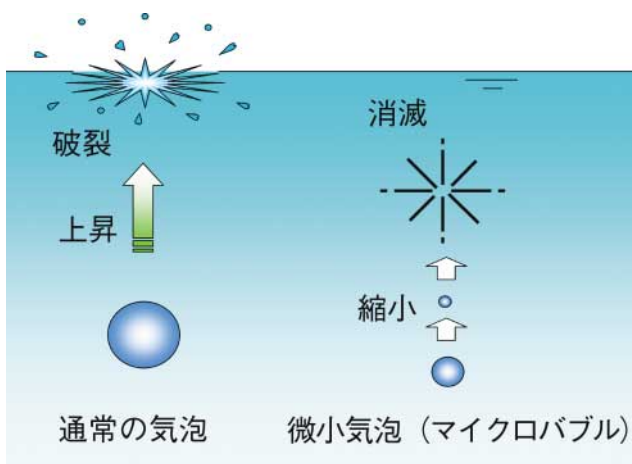
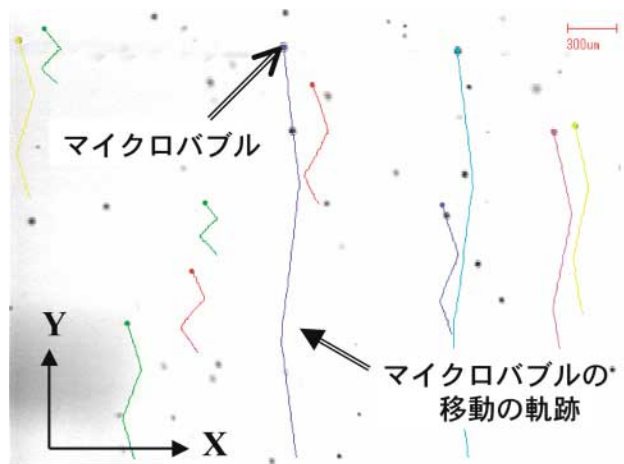


図2 マイクロバブルは帯電しており、電場の中において電位勾配を左右で切り替えるとそれに併せて左右に移動しながら上昇する。



貝類に取り込まれるノロウイルス

重厚長大型の産業が過去のものになる一方において、河川や湖畔、海洋は深刻な水環境汚染に直面している。酸性雨などによる森林の破壊、ダム建設、家庭や事業所などからの排水、各種消毒剤の使用、養殖場における飼料の大量供与、船舶バラスト水の問題など、水系全般にわたって環境汚染の原因は多種多様を極めている。この様に水環境が汚染された中において、如何に水環境を改善していくか、また安全な食材を提供するかは、我々が解決すべき大きな課題である。このような状況において、マイクロバブルが水環境改善のための最大の切り札になる可能性が高い。

ノロウイルスも水環境の汚染物質として捉えることが可能である。ノロウイルスはヒトの腸管でのみ増殖する。このため、下水処理における対策が不十分である場合には、河川を通して海洋を汚染する。海洋に至ったノロウイルスは貝類などに取り込まれるため、これらを不十分な加熱処理で食べた場合には食中毒の原因となる。

ノロウイルスは生ガキにおいて特に問題である。カキは冬季の低温下で濾水が低下したときに、主に中腸腺にノロウイルスを蓄積する。このウイルスは塩素系殺菌剤などに対してある程度の耐性を持っており、また60℃程度の加熱では不活化が難しい。さらに微量であっても食中毒を起こす可能性があるため、汚染されたカキを食した場合のみでなく、調理器具を介して他の食品からも被害を広めることがある。この様なノロウイルスの被害を食い止めるためには、ヒト→下水→

海洋→カキ→ヒトの循環をどこかで切断する必要がある。下水処理場における対応には合理性があり、水環境自体を浄化する観点からもその研究開発は重要である。しかし、個別浄化槽などへの対応も必要であるため、連鎖をここで完全に断ち切ることは不可能に近い。そこで対処療法的な対策であるが、汚染されたカキを浄化する技術が望まれていた。

ノロウイルスの不活化

食品に関係した殺菌法としては一般に塩素系薬剤が利用される。ノロウイルスは塩素系薬剤にある程度の耐性を持っているため、この方法で不活化を行うためには高濃度での適応が必要である。しかし、高濃度の塩素はカキの商品価値を著しく低下させるのみでなく、塩素の使用そのものが水環境を傷つける要因ともなる。一方、環境に優しい殺菌技術としてオゾンの適応が検討されているが、気体であるオゾン在水中のバクテリアやウイルスに処方するためには、効果的な溶解技術の確立が不可欠であった。マイクロバブルは、比表面積が大きく、上昇速度が緩やかであり、また表面張力による自己加圧効果があるため、通常の気泡に比べて桁違いに大きな気体の溶解効率を持っている。この点でマイクロバブルによるオゾンの使用は大きな効果が期待できた。

オゾンは塩素に比べて10倍近い殺菌効果を持っているが、高濃度条件での使用は多くの弊害を伴う。すなわち、廃オゾン処理の問題やオキシダントなどの2次生成物の問題である。そのため可能な限り低い濃度のオゾンで処理を行う必要がある。今回の研究では水中

図3 マイクロバブルを利用してガスハイドレートを生成すると、マイクロバブルの持つ自己加圧効果のためにハイドレートの核形成が有利となり、さほど強くない過冷却条件でもガスハイドレートを製造できる

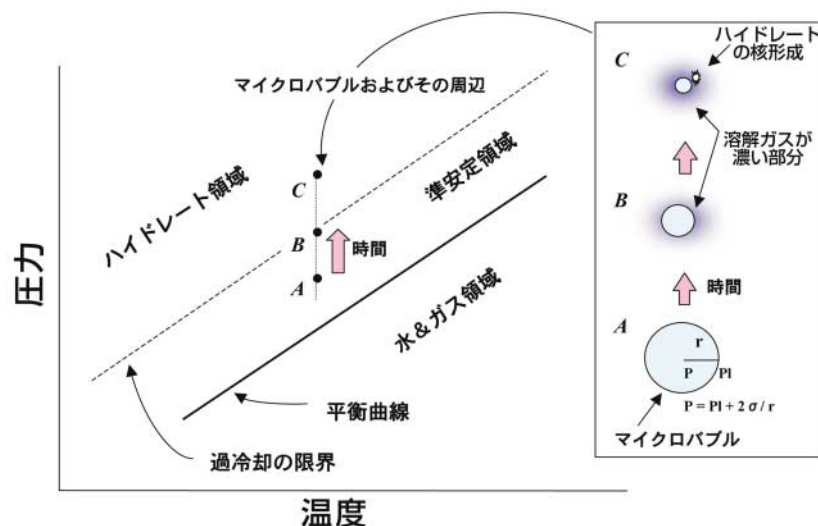
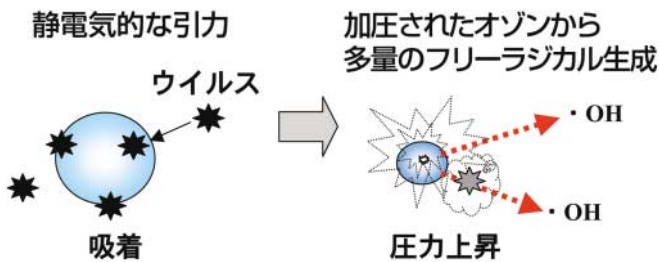


図4 マイクロバブルには静電的な作用や自己加圧効果があるため低い濃度のオゾンであってもノロウイルスを不活化することができる。



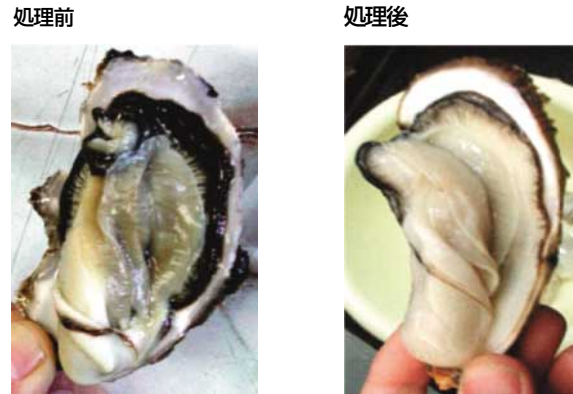
のオゾン濃度が1mg/L程度の低い値でノロウイルスの不活化を実現することができた。その詳細なメカニズムは検討中であるが、マイクロバブルの2つの特性が関与した可能性が高い。すなわち、表面電荷効果と自己加圧効果である。ある種のバクテリアは正帯電しているが、ウイルスにも同様の帯電性や疎水的な性質が存在する場合にはマイクロバブルに引きつけられて表面に捕らえられる。また、供給時のオゾン濃度が低い条件であっても、マイクロバブルは浮遊しながら縮小するため、気泡内のオゾン分圧は気泡径に反比例して急激に増加する。オゾン分解時には殺菌効果を持つフリーラジカルが発生するため、マイクロバブルの周囲に集められたウイルスが、自己加圧効果に伴って濃縮したオゾンの分解により効率的に不活化されたと考えられる。なお、ノロウイルスの不活化は、共同研究相手の東京都健康安全研究センターにおいてRT-PCR法により確認された。RT-PCR法とは複製過程を利用した遺伝子の発現解析法であり、ウイルス不活化の確認において信頼性が高い手法である。

実用化技術としての水環境改善法を考える場合に、費用対効果が重要な検討因子となる。桁違いに大きなガスの溶解能力などマイクロバブルは非常に有利な特性を持っており、また今回のノロウイルスの不活化においてはマイクロバブル自体のもつ特殊な効果も確認された。応用の対象に対して個々にノウハウを確立していく必要はあるが、マイクロバブルを水環境改善の中心技術として発展させることには技術的な利点が多い。

今後の展開

今回の研究では、蓄養水中に浮遊しているノロウイ

図5 オゾンを含んだマイクロバブル処理によりカキは白くて綺麗になるとともに、えぐみのない美味しい食品となる。



ルスの不活化に成功した。しかし、重要なのはカキの体内に存在するウイルスを不活化することであり、現在も研究を進めている。対象としては殻付きカキやむき身ガキであるが、前者は生きた状態での適応となるため、オゾンを含んだマイクロバブル存在下でカキが生存できることが重要である。実際にカキを蓄養槽に一晩入れて確認したところ、カキは元気に濾水を行っていた。また、オゾンにより体内が浄化されたためか、内部が非常に綺麗になっており、えぐみも無く味覚が優れたものであった。今後はノロウイルスをカキの体内に取り込ませた上で、同様の方法で不活化の確認を行っていく予定である。

今回の研究においても証明された事実であるが、マイクロバブルを利用した場合には、従来技術をベースに予測される効果とは異なった結果をもたらすことが多い。これはマイクロバブルが通常の気泡とは異なる特性を持つことに起因している。またその優れた効果を引き出すためには、単に従来技術の代替として利用するのではなく、マイクロバブルに見合った使用法を確立することが重要である。これにより農漁業から水処理、環境対策、化学工業、医療福祉までの非常に広範囲な分野に及ぶ新しい技術体系を確立することができる。

● 問い合わせ

独立行政法人 産業技術総合研究所
環境管理研究部門
環境流体工学研究グループ 高橋 正好
E-mail : m.taka@aist.go.jp