

1. 小さな泡の大きな可能性

「泡を使って自然と調和した生活を送ろう」と言ったら驚かれるであろうか？ 泡は我々になじみの深い存在である。ビールのうま味を閉じ込めたり、金魚に酸素を与えたりする。また工学の場においては、表面に固体粒子などを付着させてこれを選別したり、除去したりする。確かに有効ではあるが「まあ、その程度」というのが泡に対しての認識であった。ところが近年、この泡を小さくすることで驚くべき効果が現れることが明らかになってきた。

泡は水の中を急速に浮上して表面で破裂して消えるものである（図1参照）。ところがこの泡を目に見えないほど小さくすると通常の泡とは異なった特徴が表れる。髪の毛の太さの半分よりも小さな泡を水の中で発生させると、この泡はゆっくりと浮上しながら縮小していき、ついには水中で消滅する。この水の中で消える(もしくは消えるように見える)小さな気泡をマイクロバブルと呼んでいる。実は水の中で小さくなって消えるという現象に大変に重要な意味があることが分かってきた。消える直前には内部の気体はもの凄い高圧力となる。また、気泡自体はイオンの塊となる。気体の種類を変えるなどの工夫をすると、有害な化学物質を分解したり、菌やウイルスを不活化させたり、はたまた植物や動物を元気にしたりする効果が現れる。何とも不思議な世界である。

さて、ここでは工学分野で重要な役割を担いつつあり、また医療や農業分野などでも利用が期待され始めている、小さな泡の魅力について紹介したい。

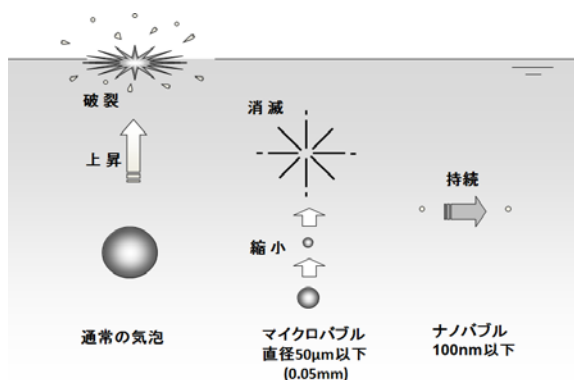


図1 マイクロバブルとナノバブルの特徴

2. 小さな気泡の意外な実力

「アワに何が出来る」と一部の専門家から冷淡な扱いを受けてきたマイクロバブルやナノバブル。ではまずその実力の一端をお見せしましょう。

まずはマイクロバブルの実力。図2に示す写真は半導体ウエハの洗浄に使った事例である。集積回路製造時における有機物の除去にはSPM（硫酸+過酸化水素）を始めとした強力な薬液が利用されている。しかし、高濃度のイオン種や塩素・フッ素系のガスとの反応生成物が形成されるとこれら薬液単独での除去は難しい。ところがオゾンを含んだマイクロバブル水を掛け流してやると、アッシングという前処理をしなくてもこれらが綺麗に除去できる。しかも5分以内での処理が望まれる中において、2分程度で洗浄が出来る。

続いてナノバブルの実力。図3に示すデータは大腸の内部を洗浄した後の菌の増殖を示す。医療の分野において、内視鏡の発達が開腹すること無く高度な手術を可能にしているが、大腸を介した処置の場合、除菌を如何に行うかが大きな問題であった。図は生理食塩水、医療用の滅菌剤の一種（AAC）およびオゾンナノバブルの比較データを示す。驚いたことにオゾンナノバブルの場合、洗浄から8時間経過しても大腸菌類の出現が抑えられている。実はオゾンナノバブルはウイルスを含めて極めて広い殺菌スペクトルを持つ。それでありながら人体への細胞毒性がほぼ皆無である。でもどうして8時間も経過しているのに菌が出現しないのか？ そのメカニズムが明らかになりつつある。組織を調べたところオゾンナノバブル処理をすると粘膜上皮内にリンパ球の介在が多数観察された。これは細菌抵抗性が大きく向上していることを示しており、免疫力に関連したこの作用は潰瘍性大腸炎などの治療にも使える可能性が指摘されている。

これらの事例はほんの一部である。水の中にマイクロバブルを入れることで、水環境を綺麗にしたり、野菜を洗浄したりできる。また空気や酸素のナノバブルを入れることで、医療分野における臓器の保存、農業やバイオ分野では収穫の大幅な増加に繋がりは始めている。また、燃料に入れた場合の燃費の向上など、思いもよらぬ効果も次々と報告されている。

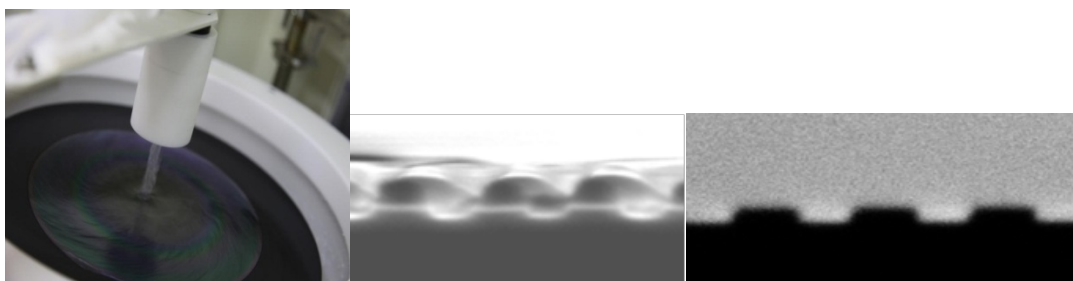


図2 半導体ウエハの洗浄(左)、洗浄前(中)と洗浄後(右)のラインパターンの写真

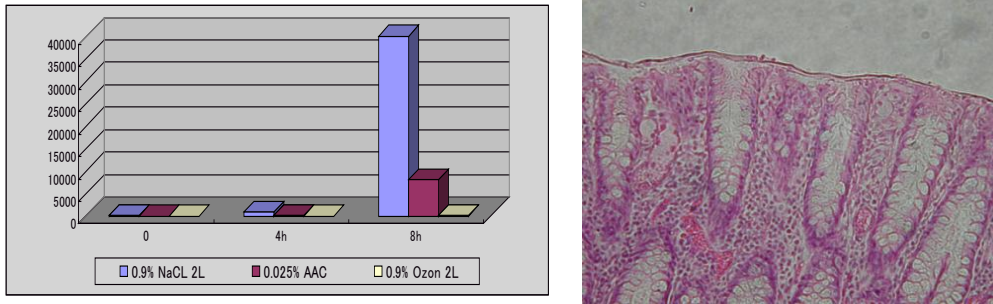


図3 洗浄後の大腸内での菌の増殖(左)と組織の断層写真(右)リンパ球の出現が認められる

3. マイクロバブルの発生方法とその特徴

小さな気泡を作ることは意外に難しい。水は表面張力が大きいため、小さな穴から気体を水中に押し出すことは容易ではない。また押し出せたとしても風船が膨らむようにして穴から離れるため、小さな気泡にはなり難い。ところが20年ほど前から微小な気泡を効率的に作る方法が開発され始めた。マイクロバブルを作るには主に2つの方法が利用されている。ひとつは二相流旋回方式であり、他のひとつが加圧溶解方式である。二相流旋回方式は、ポンプの駆動力などを利用して水流を起こして渦を発生させ、渦内に気体(大きな気泡)を巻き込み、この渦を崩壊させたときに気泡がバラバラに細分化する現象を利用している。渦の中で気泡は捩られながら引き延ばされることで微細化する。一方、加圧溶解方式のマイクロバブル発生装置は、酸素などの気体を4気圧程度に加圧して水中に溶解させ、その後大気圧に開放することで過飽和条件を作り出し、再気泡化する手法を利用している。ビールの泡の発生に似ているが、圧力開放の条件を工夫することで多量のマイクロバブルを発生できる。この方式は蒸留水中でも非常に高濃度のマイクロバブルを発生でき、見た目は牛乳のようになる。光遮断型の液中パーティクルカウンターを利用して気泡の粒径を計測すると図4の様な分布になる。高濃度のマイクロバブルの場合、不思議なことに粒径の異なる2つのピークが確認できる。

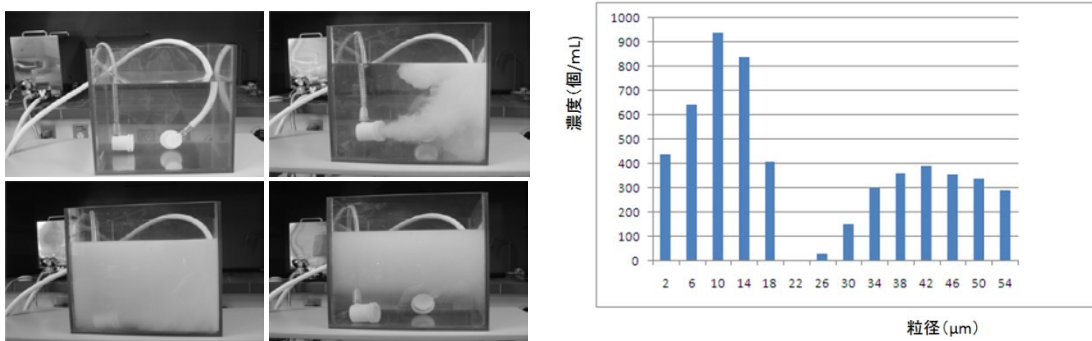


図4 加圧溶解型発生装置によるマイクロバブルの発生状況(左)と粒径分布(右)

ではこの様にして作ったマイクロバブルにはどのような特徴があるのでしょうか？ 重要な特徴は次の二点である。

- ・気泡の内部の圧力が高い
- ・気泡の表面は帯電している

気泡は気液界面により取り囲まれた存在であり、その界面には水の表面張力が作用する。表面張力はその表面を小さくするように作用するため、球形の界面を持つ気泡にとって、表面張力はその内部の気体を圧縮する力として機能する。その効果は気泡の大きさに反比例して現れることが知られており、小さな気泡ほど内部の圧力が高まっている。この値は計算により求めることができ、直径が $10\mu\text{m}$ ($1/100\text{mm}$) では周囲に比べて約 0.3 気圧、 $1\mu\text{m}$ では約 3 気圧、 100nm では約 30 気圧も加圧されている。マイクロバブルは水の中で消滅するが、その瞬間には(計算上は)無限大の圧力となる。

「わあ。凄い」と驚かれるかも知れないが、圧力よりももっと大事な効果をもたらすのが気泡の帯電である。図5は電気泳動槽中でのマイクロバブルの移動軌跡を取ったものである。水の中に電極を配して、プラスとマイナスを交互に切り替えると、それにつれてマイクロバブルはジグザグ運動をしながら上昇する。これは気泡が帯電しているためであるが、そのメカニズムも明らかになっている。実はこれも気液界面、すなわち水の際(きわ)に関連した効果であり、水と気体の境界にイオンが沢山集まっていることを意味している。さらにここで重要なことは、マイクロバブルの場合、このイオンをいっぱい引き連れた「境界」が縮小して消滅することである。この時に思いもよらぬ効果が現れる。

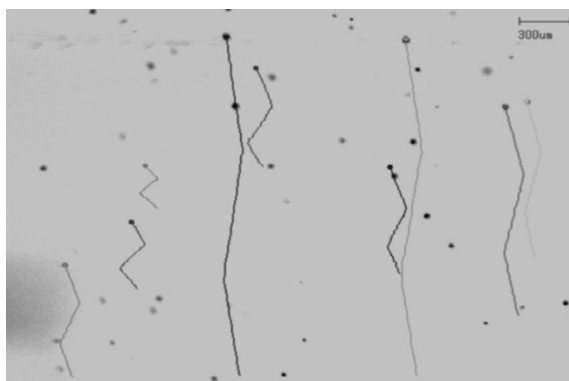


図5 電気泳動セル中でのマイクロバブルの動き

4. マイクロバブル消滅時のフリーラジカルの発生

その一つがフリーラジカル(活性種)の発生である。マイクロバブルの縮小と共にイオン類は狭い範囲に濃縮していくが、気泡が消えた瞬間(=「境界」の消滅)にイオン群は開放される。その時のエネルギーの一部が水などの分子を分解してフリーラジカルを生じる。ある環境条件を与えてやると、水酸基ラジカルが発生する。我々はこれを利用して有害な有害化学物質を分解除去したり、半導体などの洗浄に利用したりしている。

また、このマイクロバブルを含む水をシャワー状に散布してやると気中の有機物や臭気を除去できることも明らかになってきた。これに関連して、我々は面白い取り組みを始めている。それはゴミの資源化である。

5. 炭化装置とマイクロバブル

持続的社会的実現には、家庭ゴミや産業廃棄物を資源化する技術開発が不可欠である。我々も協力している炭化装置は、有機系のゴミを高品質な炭素に変える装置であるが、排ガスが臭いという大きな問題がある。多大なコストを使っても処理では意味が無いが、この排ガス中でマイクロバブル水を噴霧することで臭いを除去できる可能性がある。これが実現すると大都市近郊でゴミから発電用の燃料を作れるようになる。

また、炭化のための材料として注目しているのが、汚泥である。下水処理などの過程で大量に出る汚泥は産業廃棄物の主体を占める難物である。我々は、これを発電原料にするための取り組みをスタートさせた。この場合、最大の問題は汚泥の含水率である。汚泥の主体は微生物の死骸であり、実に7割以上が水である。これをそのまま炭化装置に入れることは、水分の蒸発に大量のエネルギーを取られてしまうためコスト的に合わない。ところがこの汚泥をマイクロバブル処理すると微生物の細胞壁が壊れるため、ギュッと絞れるようになり、水分を1/3程度まで減らすことが出来る。これにより世界中で大量に出る難物をエネルギー資源に変えることが出来る可能性がある。

6. ナノバブルの発生とその効果

マイクロバブルはイオンを表面に濃縮させながら縮小すると述べた。気泡は小さくなるほど内圧が高いため、より縮小の速度が上がる。そのため小さな気泡になるほど直ぐに「消える」。ところが周囲に集まったイオン類は、気体分子が周りの水に溶けることを抑制し始める。気泡が「イオンの殻」に閉じ込められた状況になるが、この時のイオン種や濃度の条件を調整してあげると縮小そのものが止まってしまうことがある。この時の大きさは100nm (1/10,000mm) よりも小さいので我々はこの気泡をナノバブルと呼んでいる。すなわち、ナノバブルとは「中休み」したマイクロバブルである。

ナノバブルの効果は枚挙にいとまがないが、「怪しい水」と言うことで理性ある方々の標的とされたこともある。でもその実体が明らかになるにつれて世の中の認識も変わりつつある。まずは農業への効果。ナノバブルを使うことで生態系を変えることが出来る可能性がある。農薬や肥料を使わなくても米が取れる。イチゴの収穫が増える。立派なガーベラの花が咲く。まだメカニズムは分からないが、田圃にはカブトエビが出現して雑草の種を食べてくれる。植物の根が驚くほど張って病気にも強くなる。医療や衛生の分野においては、オゾンという気体をナノバブルにすることで、人や動物は平気なのに、菌やウイルスを除去することが出来る。

ナノバブルは実に不思議な世界を我々に見せてくれる。土木や建設の業界でも注目が集

まりつつあり、様々な目的に使えないかと問い合わせが急増している。老朽化したものを再度に若返らせるようなそんな取り組みもスタートしている。

7. 今後の展開

マイクロバブルやナノバブルはまだまだ幼少期の技術である。我々は素材としてこれを手にしたが、今後はこれをどの様に使いこなしていくかが重要である。そのためにはメカニズムの解明や評価方法の確立が不可欠である。産総研では大変に多くの共同研究相手と共に、世界に目を向けた実用化のための技術開発を進めている。