

# 微細気泡を活用した浄化・洗浄システムに関する研究

食品・環境科 主任研究員 三木伸一

ナノメートルからマイクロメートルサイズの微細な泡はファインバブルと呼ばれ、従来の泡の概念を変える吸着、溶解、分解、生理活性など様々な効果があることから、応用分野の広がりが大きいプロセス技術として期待されている。そのアプリケーションの一つが、本研究のターゲットの洗浄である。微細気泡を用いた洗浄では、水温や水中の含有成分が微細気泡の状態に影響を与え、また、洗浄物の材質、汚れの種類など洗浄対象の性状によっても洗浄効果が異なる。そのため、洗浄案件別に条件を調整し、適切な洗浄ができるようきめ細かな対応が求められる。このとき、単位体積あたりの気泡数（個数密度）の把握は、洗浄プロセスの管理において重要な項目の一つである。しかしながら、微細気泡の個数密度の正確な計測は、高額な計測機器及び測定者の技術の習熟が不可欠であり、産業洗浄の現場では、コストや手間をかけて正確な値を求めるよりも、およその量がわかれば良いとするケースが多い。そこで本研究では、ポリスチレン粒子を標準試料とした微細気泡の個数密度の簡易計測手法に関する検討及び解析を行った。

## 1. 緒言

気泡の産業利用は古くから行われている。たとえば、金属加工業における部品洗浄としての利用や、水産業におけるカキの養殖への活用などがある。気泡の活用が進むなか、気泡を微細化する取り組みも盛んに行われるようになった。気泡の微細化により、気体の溶解力が向上し、気泡の浮遊時間を長くできる。数マイクロメートル程度まで気泡サイズを小さくすると、肉眼では泡と認識できず白濁した溶液に見え、浮遊速度は1分間で数ミリメートルと非常に遅い。また水との接触面積、接触時間が増えることから、水に溶解しやすくなる。2000年以降、さらに小さい数百ナノメートルサイズの気泡の存在が知られるようになった。この数百ナノメートルの気泡は、可視光の回折限界を超えており、目視では透明に見える。また浮力が無視できるため、水中でブラウン運動により振動する。一方、コンタミネーションとの区別が難しく、その真偽が議論されてきたが、計測器の進歩に伴い、その存在が証明された。今日では、ISOの国際規格化が進み、泡のサイズ等によって名称が明確に定義されるに至っている（表1）。

この非常に微細な気泡は、従来の気泡にはない様々な特徴を持っている。とりわけ、泡のサイズが数十ナノメートルから1マイクロメートルのウルトラファインバブルは、大きな刺激がなければ、数か月にわたって安定であることが知られており<sup>1)</sup>、これまでの泡のイメージとは全く異なった様相を示す。また、ラジカルの発生や内部圧力の急速な増大などの化学的及び物

表1 気泡の名称と分類

	ファインバブル（微細気泡）		
名称	ウルトラファインバブル	マイクロバブル	ミリバブル / サブミリバブル
直径	数 10 nm ~1 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$ ~100 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$ ~
溶液外観	透明	白濁	泡状
性状	ブラウン運動 数週間~数か 月残存	ゆっくり上昇 水中消滅	速く上昇 水面破裂

理的な作用は、排水処理や殺菌など幅広い応用が期待されている<sup>2)</sup>。

微細気泡をより効果的に活用するには、洗浄対象ごとに最適な洗浄条件を見出し、その条件を管理することが大事である。微細気泡の個数密度は、洗浄管理において重要な項目の一つであるが、正確な計測は難しく、計測機器も高額である。そのため、専門機関への分析依頼も選択肢に挙がるが、その都度分析依頼を行うのはコストや手間がかかり、また、輸送時や保管時の温度変化や振動によって個数密度が変化する。微細気泡のおよその個数密度を現場で把握することは、現実的な取り組みとして必要である。

微細気泡の有無の簡易的な確認方法として、レーザーポインターを利用して散乱光を観察することが行われる。しかしながら、光量や照射条件などによっても散乱の様子が変わるため、散乱光の観察だけではどのぐらいの量が含まれているかは不明である。また、微

細気泡の散乱に関する理論的な考察もほとんど行われていない。

そこで、本研究では微細気泡の散乱に関する理論解析を行うとともに、屈折率や粒子径が既知で性状が安定なポリスチレン粒子を標準試料とする微細気泡の個数密度の簡易計測法についての検討を行った。

## 2. 理論計算及び実験方法

### 2.1 微細気泡の散乱性の理論計算

粒子の散乱については、ミー理論に基づく散乱係数の算出により理論的に求めることができる。性状が不安定な微細気泡の個数密度を実験的手段のみで定量しようとする、予期せぬ誤差や偶然の相関が含まれるおそれがある。また、隠れた因子の発見や得られたデータの背後にあるメカニズムの解釈においても、理論的背景の理解は欠かせない。散乱係数は、単位距離あたりの光の内部減衰を示す物理量であり、同一の照射条件では、散乱係数が大きいほど光は強く散乱する。本研究では、散乱光強度を検出していることから、散乱係数の理論解析が重要である。

理論計算に必要なパラメータの一つとして粒子径がある。ウルトラファインバブル領域の微細気泡の平均径はおよそ100 nmで安定しており、大きくは変化しないが、サイズの影響について考察するため、100 nmから500 nmの範囲で計算を行った。このとき、実際の微細気泡の粒子径は、ある程度の分布の広がりを持つが、代表値で表すことができ、考慮しないものとする。また、光の波長は、400 nmから633 nmの範囲とし、微細気泡の屈折率については、文献値を参考に1.25とした<sup>[3]</sup>。

### 2.2 標準試料の調整

通常、定量分析では物性が既知の標準試料を用いて、検量線作成や校正を行う。しかしながら、性状が不安定な微細気泡は、個数密度が恒久的に維持されないことから、そのものを標準試料として使えない。したがって、性状が安定で、屈折率及び粒子径が既知なポリスチレン粒子を標準試料に適用した。平均粒子径が100 nmのThermo Fisher Scientific社製ポリスチレン粒子を所定の個数密度に調整し、防腐剤としてアジ化ナトリウムを加え、分光分析用のガラスセルに充填して使用した。

### 2.3 微細気泡水の調整と散乱光検出

定量評価に用いる微細気泡は、久留米工業大学において生成いただいた。気体としては空気を用いた。微

細気泡の粒子径及び個数密度は Malvern Panalytical 製ナノ粒子解析システム NanoSight (ナノサイト) を用いて計測し、取水後、ブチルゴムパッキンを付けたガラス瓶で保管した。

散乱光の計測に用いる光源は、波長633 nmのヘリウムネオンレーザーを用いた。レーザー照射により生じた散乱光は、ホーザン株式会社製のCMOSカメラを用いて検出した。検出した散乱光データは画像としてパソコンに取り込み、散乱光の強度を数値化した。

## 3. 結果

### 3.1 微細気泡の散乱性の理論計算

図1 (A) に横軸を波長として、粒子径100 nmの微細気泡の散乱係数を計算した結果を示す。個数密度は1,000万個/ml、1億個/ml及び10億個/mlとした。一般的に微細気泡は1,000万個/mlから10億個/mlの範囲で使用される。また、図1 (B) は、気泡径を変化させたときの計算結果を示す。このとき、粒子径の変化により気体の総体積は変化しないものとし、粒子径が100 nm、個数密度1億個/mlにおける気泡の総

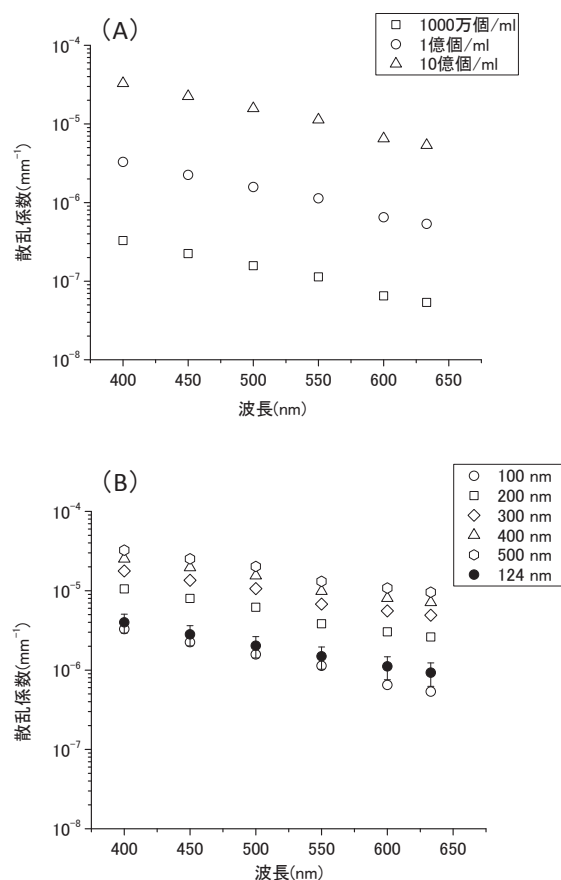


図1 微細気泡の散乱係数の理論計算

(A) 個数密度変化 (粒子径固定100 nm)  
(B) 粒子径変化 (粒子体積固定)

体積を基準とした。

理論解析の結果、波長は短いほど、個数密度及び粒子径は大きくなるほど、散乱係数は大きくなるのがわかる。このことは、同じ測定系において散乱光強度が変化した場合、個数密度、粒子径のどちらに起因しているか判別しにくいことを意味する。ただし、同一条件で生成した気泡の粒子径は大きくは変化しない。このことから、想定より強く散乱している場合は、大きな粒子のコンタミネーションの可能性はある。異なる日に調整した微細気泡水の粒子径データを無作為に抽出したところ (n=5)、平均粒子径は124 nm、標準偏差は18 nmであった。図1 (B) に、粒子径124 nmの微細気泡の理論計算値を標準偏差のエラーバーを付して併せてプロットしている。この結果から、気泡の粒子径のばらつきが散乱に及ぼす影響は限定的であり、理論上、1億個/ml程度の精度で定量的な分析が可能である。

### 3. 2 ポリスチレン粒子の個数密度

標準試料として、粒子径が100 nmのポリスチレン粒子を用い、検量線作成や校正のための試料を調整した。理論上、吸収がなく、粒子径が同じであれば、個数密度を調整することにより、異なる物質においても散乱パターンはほぼ等しくなる。しかしながら、単純にポリスチレン粒子の個数密度と微細気泡の個数密度を同じにすればよいものではない。なぜなら、散乱は異なる屈折率を有する媒質の境界面を光波が通過するときに生じる現象であり、屈折率が異なると散乱の大きさが変化するからである。そこで、微細気泡の個数密度に相当するポリスチレン粒子の個数密度を、理論計算により求めた。波長633 nmにおいては、ポリスチレン微粒子の個数密度に0.095の係数を掛けたものが、同じ散乱係数を示す微細気泡の個数密度となった。なお、波長によってこの係数の値が異なることに留意する必要がある。

### 3. 3 散乱光の検出と定量性評価

個数密度の異なるポリスチレン粒子溶液を調整し、レーザー光を照射した。図2にレーザー光を照射したときの散乱の様子を示す。このとき得られたデータを画像解析し、散乱光の強度を数値化した。図3に横軸を微細気泡の個数密度に換算した検量プロットを示す。この検量線の定量性を評価するため、あらかじめ、ナノ粒子解析システムで個数密度を測定した微細気泡の散乱光の測定を行った。この結果、ナノ粒子解析システムの計測値を真値として、8,000万個/ml程度の標準

偏差で計測できることがわかった。本手法の定量下限は2億個/mlであり、ある程度個数密度が高い微細気泡については、定量可能であるといえる。より簡易的には、個数密度が異なる複数のポリスチレン粒子の標準試料とサンプルの分光セルを一行に並べてレーザー光を照射すれば、微細気泡のおよその濃度範囲を肉眼でも判断可能である。

## 4. 結 言



図2 微粒子の散乱の様子

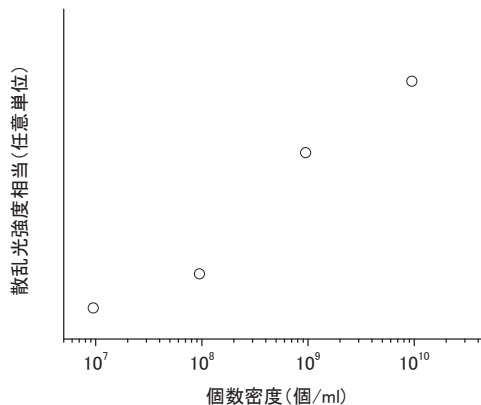


図3 ポリスチレン粒子による検量プロット

本研究では、微細気泡を活用した洗浄や浄化システムに関する研究の一環として、微細気泡の個数密度の簡易計測方法に関する理論解析及び標準試料にポリスチレン粒子を用いた定量試験を行った。この結果、個数密度が2億個/ml以上であれば簡易的に計測できることがわかった。

## 参考文献

- [1] 寺坂宏一, 氷室昭三, 安藤景太, 秦 隆志: 入門, p.34, 日刊工業新聞社 (2016).
- [2] 高橋正好: 微細気泡の最新技術 - 進展するマイクロ・ナノバブルの基礎研究と広がる産業応用 Vol. 2, pp. 273-288, エヌ・ティー・エス (2014).
- [3] A.Sonoda: 54, pp. 590-595, J. Soc. Powder Technol. (2017).