

産業洗浄における微細気泡の効果的活用に関する研究

機械加工科 専門研究員 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、応用分野の広がり大きいプロセス技術として期待されている。この技術は、しばしば洗浄用途にも利用されるが、環境負荷が小さいなどの利点はあるものの、洗浄効率は高いとはいえず、気泡発生コストもかかるため、より安価な手法で効率よく洗浄することが産業洗浄現場においては求められる。本研究では、その取り組みの一環として、安価な手法で微細気泡の個数密度管理をより正確・簡便に求める方法について検討を行ったので報告する。

1. 緒言

気泡をマイクロメートル程度まで小さくすると、肉眼では白濁に見え、浮遊速度は1分間で数ミリメートル程度となる。西暦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、目視では透明に見える。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定義され(表1)、洗浄等に利用されている。

本研究は、金属加工業等の洗浄現場において、気泡の照射方法等の工夫により洗浄効率を高めることを目指す。一方、洗浄現場では、洗浄効率の向上だけではなく、作業性・安全性の向上、環境負荷低減、管理コスト削減などトータルメリットを考慮する必要がある。そこで、本報告は気泡の個数密度の安価な管理手法について検討したので述べる。

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。一方、産業洗浄の現場は、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よい。これまでに、微細気泡の光散乱に関する理論解析を実施し、性状が安定なポリスチレン粒子を比較定量の基準試料とする簡易計測法を提案している^[1]。本研究では、更なる取り組みとして、気泡径分布を考慮するとともに、およその粒子径の把握のため、二色光を用いた測定方法について検討した。

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、ミー理論に基づき理論的に求めることができる。これにより微細気泡と同様の散乱を示すポリスチレン粒子の調整条件を求めることがで

表1 気泡の名称と分類

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 μm	1 μm ~100 μm	100 μm~
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

きる。これまでの取り組みでは、気泡径の分布(広がり)は無視できるものとし、散乱係数を計算している。本研究では、計算精度の向上のため粒子径の分布を考慮し、半値幅40 nm、平均粒子径100 nmの正規分布曲線を作成した。なお、半値幅の値については、Malvern Panalytical製ナノ粒子解析システムNanoSight(ナノサイト)を用いた実測値の近似により設定した。また、汎用的なレーザー光源を想定し、計算波長は515 nm及び635 nmとした。また、微細気泡の屈折率については、文献値により $n=1.25$ とした^[2]。

2.2 標準試料の調整

性状が不安定な気泡による計算結果の妥当性検証は、困難であり、検証用の試料としてThermo Fisher Scientific社製ポリスチレン粒子を使用した。粒子径は、70 nm、100 nm、150 nm、200 nm、600 nm、2,800 nm及び6,000 nmである。これらの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で保管した。

3. 結果及び考察

3.1 分布を考慮した微細気泡の散乱性の理論計算

図1に気泡の分布モデルおよび等価散乱係数をプ

ロットしたものを示す。波長は515 nm、粒子の個数密度は 1×10^{-4} 個/ μm^3 とした。分布を考慮した散乱係数は確立密度の積算により求めることができ、得られた計算結果をもとに調整したポリスチレン粒子溶液は、目視確認により微細気泡の散乱性と良い一致を示し、気泡の個数密度の簡易定量に有効であることを示した。

3. 2 二色光による粒子サイズの推定方法の検討

前項の結果は、溶液中に気泡だけ存在することを前提としている。そのため、製造現場等において他の粒子が混入した場合、気泡の個数密度を誤認するおそれがある。そこで、二色光を用いて粒子サイズの推定が可能か検証した。波長515 nm (青色) 及び635 nm (赤色)、粒子径70 nm~6,000 nmの範囲で理論計算を実施した。図2に散乱強度の極座標表示および図3に二色波長の等価散乱係数比を示す。散乱光強度は個数密度、粒子径の両方に依存するため、単色光では区別がつかない。一方、青色光と赤色光の散乱強度比は、粒子径のみに依存するので微細気泡と異なる径の粒子が混入

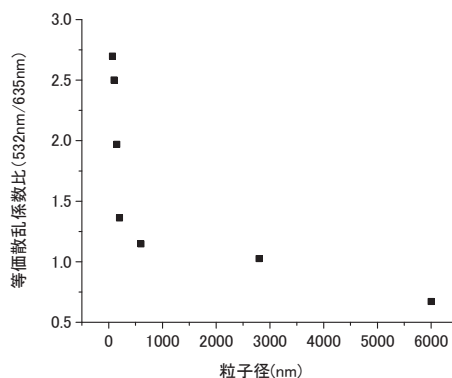


図3 等価散乱係数の二色光の比

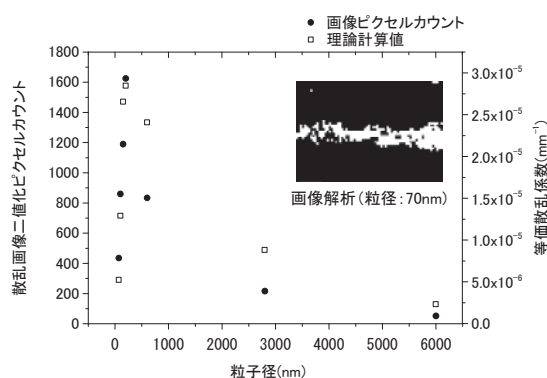


図4 画像データと理論計算値との比較

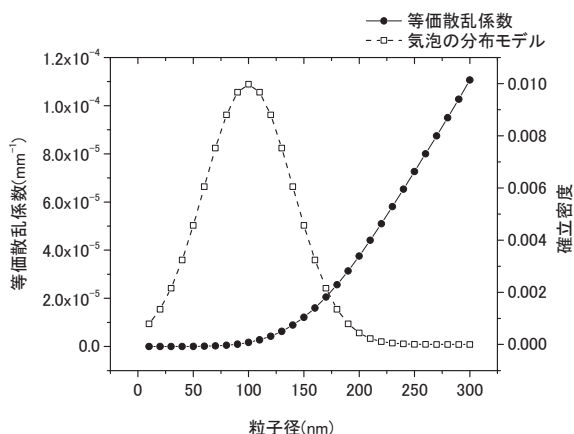


図1 気泡サイズと等価散乱係数

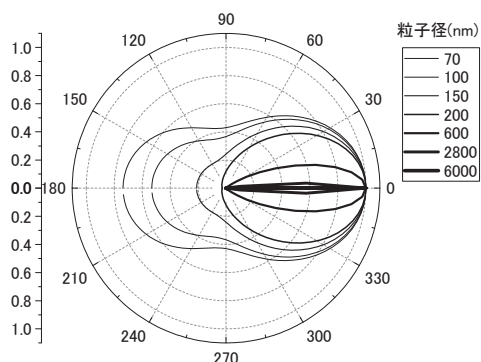


図2 散乱強度の極座標表示

した場合、判別可能であることを示した。

また、目視による比較定量だけではなく、散乱画像の画像処理による個数密度の定量検証も行った。図4は、波長515 nmのレーザー光 (レーザーポインター) をポリスチレン粒子溶液に照射し、デジタルカメラで撮影した画像をスムージング・二値化後にピクセルカウントし、理論計算の値と比較したものである。これらの値は概ね一致し、デジタルカメラによる簡易的な定量が可能であることを示した。

4. 結言

分布を考慮した理論解析に基づく比較定量用ポリスチレン溶液は、微細気泡の散乱とよい一致を示した。二色光の散乱比により、およその粒子径が判別できることを示した。

参考文献

- [1] 三木：微細気泡を活用した浄化・洗浄システムに関する研究、長崎県工業技術センター研究報告、No. 51, pp. 48-52, 2022.
- [2] A. Sonoda: J. Soc. Powder Technol., 54, pp. 590-595, 2017.