

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 科 長 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見込まれる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・簡便に測定する装置の開発、効率よく洗浄するための手法について検討したので報告する。

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。これまでに、気泡の個数密度の安価な管理手法について検討し、理論計算の結果等について報告している^[1]。本報告では、理論計算の結果等を踏まえ、簡易測定装置を試作し、性能評価を行ったのでその結果について述べる。

さらに、気泡洗浄においては、洗浄物から外れた汚れの再付着や、外れた汚れに気泡が消費されることにより洗浄効率が下がることが懸念される。また、コスト上、洗浄水は循環して使用するため、汚水の程度によってはサクシオンフィルターやポンプの目詰まりを生じ、頻繁なメンテナンスが必要となる。これらの問題を解決するために、円形の水槽内で渦を形成させ、汚れや異物のポンプ内への吸引の防止を試みたので、併せて報告する。

2. 実験方法

2. 1 散乱光の検証

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。これまでの研究において性状が

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

既知なポリスチレン粒子を疑似気泡として適用できることを明らかにしている^[1]。本研究では、安価なレーザー光源を用いた簡易計測の実用性を検証した。レーザー光源には、市販のグリーンレーザーポインター（エステーシー株式会社製 SPG1）及び赤色ダイオードレーザー（エステーシー株式会社製 KMP635-3）を用いた。撮影には USB カメラ（ホーザン株式会社製 L-835）を用いた。疑似試料の70 nm、100 nm及び150 nmのポリスチレン粒子（サーモフィッシャーサイエンス社製）は、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。

2. 2 気泡洗浄

洗浄水の循環用ポンプには、高揚程のマグネットポンプ（三相電機株式会社製 PMH-1511B2M）を用いた。洗浄槽として、外径約1 m、深さ約60 cmの円形のタンクを用い、タンク側面から水槽内に通した排水パイプの先端に100メッシュのサクシオンフィルター（大生工業株式会社製 SFG-02-100W）を取り付けた。

3. 結果及び考察

3. 1 二色光の散乱性に基づく粒子径補正の検討

図1に疑似試料にレーザー光を照射した際、得られ

た散乱光の画像を示す。得られた画像をトリミング、スムージング、RGB 分割、二値化処理し、ピクセルカウントにより散乱光強度を求めた。また、理論計算を実施し、理論計算に用いる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]。図2に解析結果を示す。散乱光強度は光源の強さで変わるので、100 nm 粒子径の散乱光強度を基準とし、異なる粒子径 (70 nm, 150 nm) における相対的な強度を求めた。これらの結果、理論計算値とのずれはあるものの、散乱傾向は等しく、二色光で粒子径を補正できる可能性を示唆した。理論計算値とのずれは、光源出力の安定性等のビーム質にも影響されていると考えられる。高品質の光源を用いれば改善されるが、光源のコストはかかるため、定量精度とのトレードオフの関係にある。

3. 2 円形洗浄槽の評価

図3に洗浄装置の概略を示す。図に示すとおり、洗浄水（気泡水）は洗浄槽内で循環させる。このとき、洗浄液の汚れやコンタミ成分は洗浄効率を下げるともに、フィルターの目詰まりやポンプの負担を大きくし、故障の一因となる。そこで、円形のタンクを洗浄槽に用い、壁面に沿って流れを形成させた。この結果、洗浄槽中央付近で渦が形成され、汚れが中心底部に集まった。効果検証のため、意図的に乾燥砂を水槽内に投入し、洗浄水を30分循環させたところ、中央付近に砂の堆積が目視で確認できた（図4）。この堆積した砂を回収し、ろ過、乾燥させ重量を測定した結果、投入

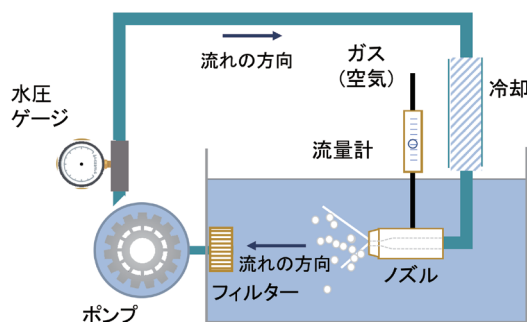


図3 洗浄装置概略

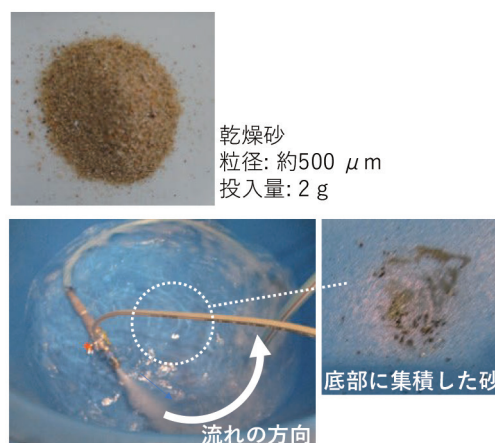


図4 洗浄の様子と異物（砂）の回収試験

量95%以上回収できた。また、サクシオンフィルターの内部を確認したが、砂の混入は見られなかった。なお、洗浄物を壁面に配置し、洗浄性を検証し、配置場所によって汚れの取れ方が異なることを確認している。ただし、洗浄については、洗浄物の性質によって求められる要件が異なるため、今後、データの蓄積を進め、汚れの種類や気泡水の照射方法などとの関係性についての検証を深める。

4. 結言

簡易な二色のレーザー光を用いてレーザー光の散乱と粒子径との関係について調べ、粒子径を補正できることを示唆した。また、円形の洗浄槽を用いて汚れや異物を渦の中央付近に集めることにより、装置のダメージが少なく、効率よく洗浄できることを示した。

参考文献

- [1] 三木：産業洗浄における微細気泡の効果的活用に関する研究、長崎県工業技術センター研究報告、No. 52, pp. 45-46, 2023.
- [2] A. Sonoda: J. Soc. Powder Technol., 54, pp. 590-595, 2017.

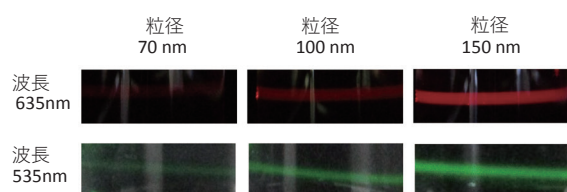


図1 レーザー照射による散乱光画像

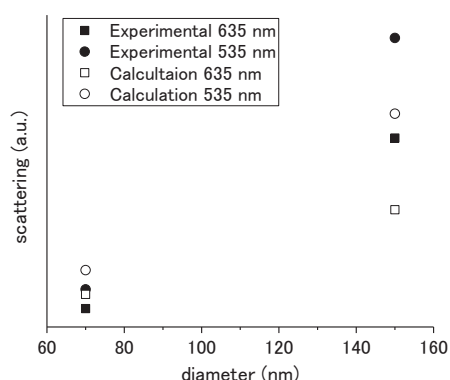


図2 二色光の散乱強度解析結果