

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、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。

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

金属加工業等の洗浄現場では、通常、アルカリ、酸、有機溶媒等の薬品による洗浄を行う。これらの薬品洗浄と比べると、気泡洗浄はマイルドな洗浄であり、洗浄効率だけ考えると薬品洗浄の方が高い。しかしながら、産業洗浄は、洗浄効率だけではなく、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し、工程設計することが望ましい。気泡洗浄は、基本成分が空気と水なので廃液がクリーンであり、洗浄に使用する薬品量の低減や作業の安全性に寄与する。また、腐食発生の要因となる薬品残渣の問題がなく、品質向上にもつながる。一方、これらのメリットが製造コストや製品品質と見合わなければ、

洗浄現場での利用価値は低いものとなる。

そこで、本研究では、洗浄現場での適用を目指し、簡易な気泡の管理方法の提案及び気泡の照射方法等の工夫による洗浄効率の向上を目指す。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、理論計算の結果及び実証試験について報告している^[1]。また、効率の良い洗浄方法について検討を行い、円形の水槽内で水流による渦を形成させ、ポンプ内への汚れや異物の吸引防止する手法について報告している^[2]。本報では、これまでの結果を補足しまとめた内容について報告を行う。

2. 実験方法

2. 1 簡易計測手法の開発

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。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。疑似試料の異なる粒子径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 気泡による洗浄効果の検証

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

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 疑似試料による異なる粒子径の散乱挙動

性状が不安定な気泡を実試料に用いた散乱性検証は極めて困難であるため、ポリスチレン（PS）粒子を用いた疑似試料による散乱挙動により解析した。ポリスチレン粒子の個数密度調整により微細気泡の散乱光を概ね再現できる。図1に疑似試料にレーザー光を照射した散乱光画像およびスムージング・二値化処理した画像を示す。この際、粒子の総体積は一定にしている。同一体積において200nmの粒子径の粒子は、レイリー散乱により最も強く散乱する。粒子径が200nmを超えて、数 μm 程度になると、散乱強度は減少し、さらに、まだらな散乱挙動を示すようになる。

気泡数の散乱光を目視で観察する手法は、現場の気

泡管理において有効であるが、水道水には、鉄サビ、凝集物、原虫、アルミニウム等の数 μm 程度の粒子が含まれることがあり、コンタミ粒子と気泡の区別はしにくく、しばしばその誤認が問題となる。不純物粒子有無の識別のため、図1の二値化した画像からレーザー光軸にそってラインプロファイルを取得し、ライン上のピクセルの黒白比を算出した結果を図2に示す。粒子径が大きくなると、まだらな散乱挙動となるため、黒白比は大きくなり、コンタミ粒子の有無の判定として利用できる。

3. 2 二色光の散乱性に基づく粒子径補正の検討

理論計算により求めた等価散乱係数と、レーザー光を照射し得られた散乱画像を画像処理し、ピクセルカウントした結果を比較したものを図3に示す。理論計算により得られた散乱係数と得られた画像のピクセルカウントは概ね一致しており、理論計算に基づき散乱挙動を予測し、解析できることを示している。

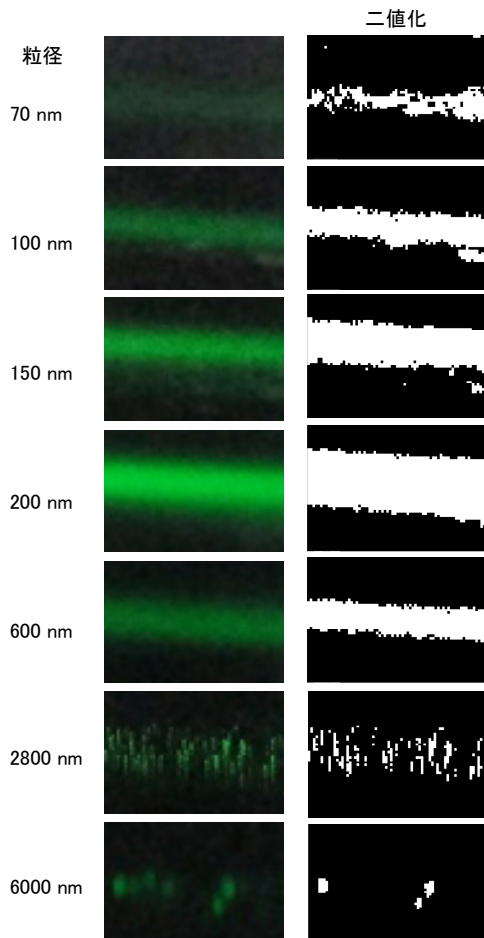


図1 疑似試料の散乱光画像

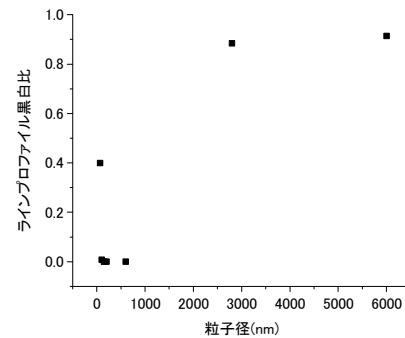


図2 レーザー光軸上のラインプロファイルにおける黒白比

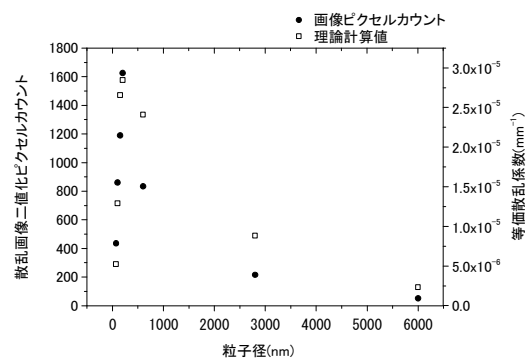


図3 理論計算による等価散乱係と取得画像からの散乱光強度の比較

実際の微細気泡の気泡径は、気泡の粒子計測装置の一つであるナノサイトを用いて計測した結果により、中心波長はおおよそ 100nm 程度で、50 nm～300 nm のブロードな範囲で分布していることを確認している。前述したとおり、散乱強度における粒子径の影響は大きく、簡易計測法の精度向上には、粒子径の大きさを補正する手法の確立が有効と考えられる。

そこで赤色と青色の散乱性の違いに着目し、粒子径の識別が可能か理論検証を行った。光源として安価で入手が容易な半導体レーザーの利用を想定し、計算における波長は 515 nm 及び 635 nm とした。図 4 に、異なる粒子径 (70 nm, 100 nm, 150 nm, 200 nm, 600 nm, 2,800nm, 6,000nm)、における角度分布の極座標を計算

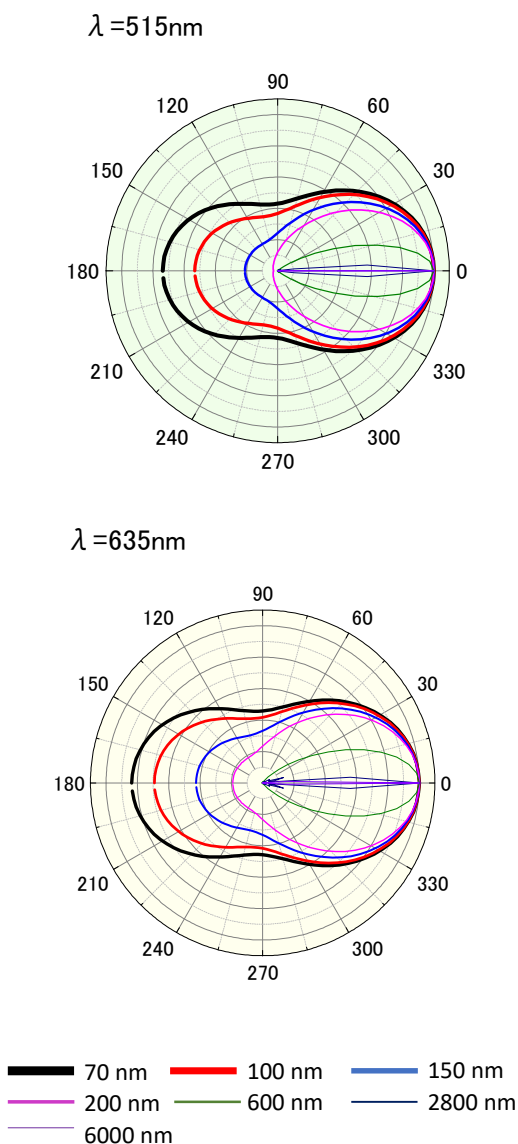


図4 波長 515 nm 及び 635 nm における散乱光の角度分布の極座標

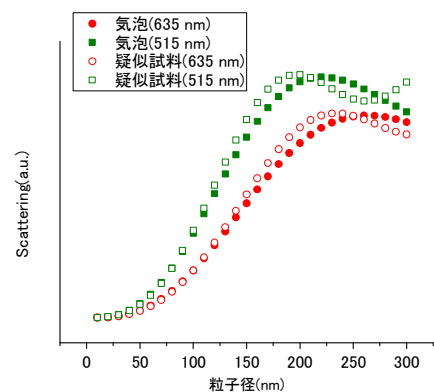


図5 微細気泡と疑似試料 (PS 粒子) の散乱光強度計算

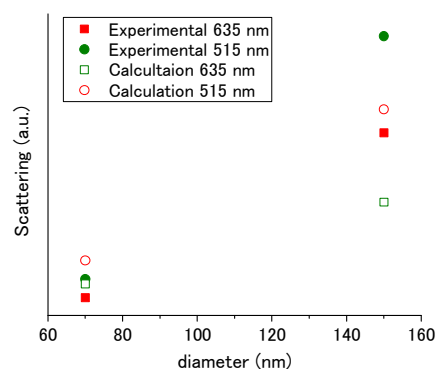


図6 二色光による散乱光強度の測定

した結果を示す。これらの計算結果をもとに、二色光による粒子径補正の検討を行った。

微細気泡の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^[3]。図 5 に気泡と疑似試料の散乱光強度を計算した結果を示す。微細気泡と疑似試料の散乱光強度は概ね一致している。波長 515nm と 635nm の散乱光強度の差は、粒子径 160nm において最大となっており、2 色比を求めることで粒子径の情報が得られることがわかる。

これらの結果をもとに実験的に散乱光強度を測定し、理論値と比較を行った。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, 150nm) における相対的な強度を求めた (図 6)。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した。理論計算値とのずれは、光源出力の安定性やビーム質によるものと考えている。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. 3 円形洗浄槽による洗浄試験

次に気泡洗浄効率の向上の取り組みについて述べる。洗浄槽をいくつか構築し洗浄試験を行ったが、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わかった。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ョ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とも懸念される。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。

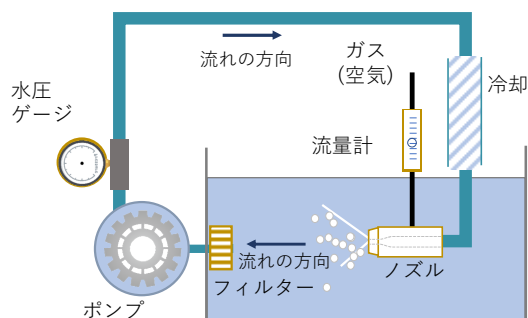


図7 洗浄装置概略

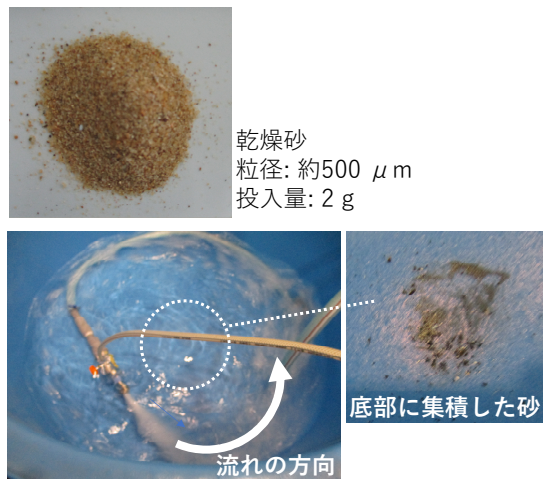


図8 洗浄の様子と異物（砂）の回収試験

図7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8）。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、投入量95%以上回収できた。また、サクショ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。

構築した洗浄槽において、洗浄物を水槽壁面に配置し、洗浄性を検証した。配置場所によって汚れの取れ方が異なり、気泡水の照射口に近い洗浄物については、水流も強く、汚れはとれやすい。金属プレートに格子状にグリースを付着させ、洗浄サンプルとし、60分洗浄した洗浄前後の洗浄物の写真を示す。洗浄後に、プレートに付着した汚れがとれているのがわかる。また、表1に気泡有り、無しにおける一定時間（10分）の汚れの除去率の結果を示す。気泡無しの洗浄においては、ノズルを取り外すので、完全に洗浄条件を同一にするのは難しく、微細気泡のみの効果というよりも、水流の影響も含まれると考えているが、同一ポンプ能力において、トータルとしては除去効果が得られたと考えている。

洗浄前



洗浄後

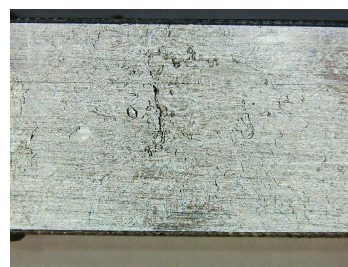


図9 洗浄前後の洗浄物

表2 グリース除去率の比較

	グリース除去率 (%) N=3
気泡洗浄	54±12
水のみ	40±1

なお、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、洗浄対象ごとに試験片の配置や水流の強さ、照射角度などを最適化することも重要である。

3. 4 超音波活用による隙間洗浄の検討

超音波利用による隙間洗浄への活用を試みた。微細気泡水には通常の水よりも多量の空気が含まれているため、キャビテーション促進による洗浄効果の向上が期待される。微細気泡の効果的な活用には、複数の手法との組み合わせや、気泡の特徴を活かした用途、目的に限定した取り組みも有効である。

金属 (SUS) ブロックに直径 1 mm、2 mm、3 mm の円形の穴 (深さ 1 mm) を空け、穴の中まで埋まるようにグリースを均一に塗布し、微細気泡水をビーカーに満たし、超音波プローブを用いて上部から超音波を照射した。この結果、図 10 に示すとおり、汚れが取れにくい穴径 1 mm 内のグリースを除去することができた。3 mm の穴径のグリースは、大半残っており、気泡洗浄については、多量の汚れを落とすよりも、隙間洗浄の有効性が期待される結果となった。洗浄メカニズムとして気泡が穴内で急速に成長し、金属の隙間において空気層を形成し、穴内の汚れ全体を剥がす

ように除去されたと推定している。隙間洗浄については、超音波の照射位置・強度、水温、汚れの状態などにも影響すると考えられ、今後、更なる検証を進めたい。

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。さらに隙間洗浄についての検討を行い、超音波洗浄との組み合わせにより、隙間洗浄において有効であることを示唆した。

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] 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. 53, pp. 56-59, 2024.
- [3] A. Sonoda: J. Soc. Powder Technol., 54, pp. 590-595, 2017.

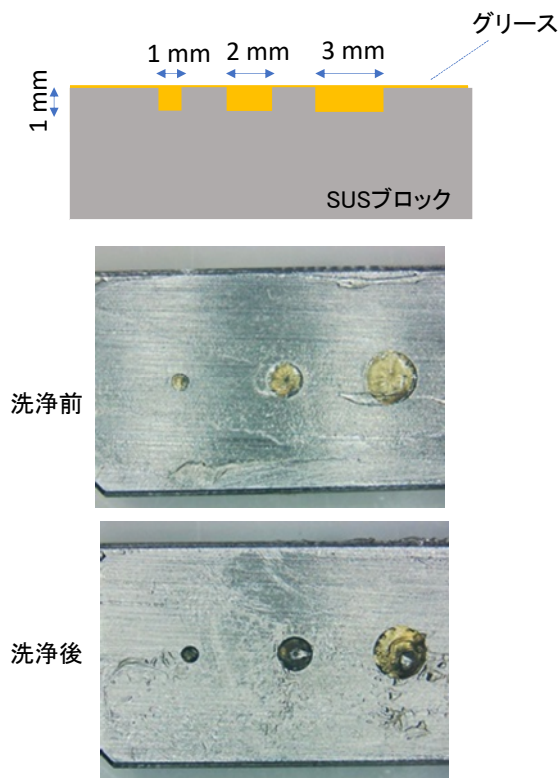


図 10 超音波洗浄による穴内グリースの除去