

超音波洗浄と気泡

1. はじめに

超音波洗浄は、洗浄液に浸した被洗浄体の表面に付着した汚れ（油、微細粒子）の除去に利用され、半導体・光学部品の製造過程において極めて重要なプロセスである。超音波照射による圧力こう配および音響流が、分子間力（ファンデルワールス力など）により固体表面に付着した汚れ粒子に作用し除去を促すと考えられてきた。一方、最近の研究⁽¹⁾から、超音波照射下の洗浄液中で発生する気泡の運動による液相流動が粒子除去の主要因であると示唆されている。本稿では、液相への超音波照射による気泡発生メカニズムを解説した後、気泡運動による超音波洗浄の実験例を紹介する。

2. 超音波キャビテーション

洗浄液として使用される水の中には μm 径の微細ガス気泡が浮遊している。疎水性の被洗浄面では発泡が生じ、微細気泡が付着する。超音波照射下において、これら微細気泡は体積的に振動する。バネ・質点系として捉えると、高圧縮性の気泡（バネ）を取り囲む水（質量）を、超音波により加振する問題と言い換えることができる。球形気泡の非線形体積振動は、レイリー・プリセットの運動方程式⁽²⁾により記述される。高音圧の 50 kHz 超音波照射下の水（20℃）における球形空気気泡（平衡半径 $10\ \mu\text{m}$ ）の運動（粘性、熱伝導および音響放射による散逸効果を考慮⁽³⁾）に関する計算例を図 1 に示す。超音波の負圧サイクル時に、気泡界面において急激な蒸発が生じ、気泡は初期径の数十倍にまで膨張している。このように、ガス気泡核を起点とし、液圧低下に伴い発生する蒸気気泡をキャビテーション気泡と呼ぶ。キャビテーション気泡の内部は蒸気が支配的であるが、収縮および崩壊時、（不凝縮の）ガスが断熱圧縮により局所的な高温高圧部を形成することから、周囲に衝撃

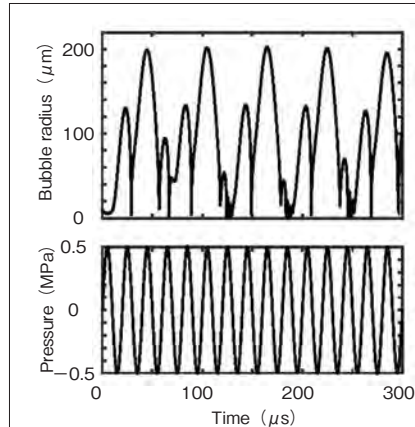


図1 水中超音波（振幅 0.5 MPa, 周波数 50 kHz）照射下における空気気泡核（半径 $10\ \mu\text{m}$ ）を起点としたキャビテーション気泡の振動

波を放射する。気泡崩壊が激しい場合、固体表面を洗浄するどころか壊食（エロージョン）を引き起こす恐れがある。

3. 気泡運動と洗浄

キャビテーション気泡は、超音波加振による体積振動を繰り返す間、整流物質拡散⁽²⁾により溶存ガス（空気）が気泡へ流入するため、平衡半径が増大する。平衡半径が共振半径（ミナート半径⁽²⁾、50 kHz 超音波照射下の水中気泡に対し $66\ \mu\text{m}$ と計算される）に近づくと、体積振動の振幅は増大し、気泡周囲の液相流動が促進される。すなわち、超音波キャビテーションによる洗浄効果は、共振半径近傍の気泡の運動による寄与が主たるものと予想される。

一方、共振下の気泡の非線形振動は激しい崩壊に伴う衝撃波放射により、被洗浄面のエロージョンを引き起こす可能性が高い。そこで、キャビテーション気泡の運動による洗浄効率を維持しつつ、エロージョンを低減する方法として、（加圧ガス溶解もしくは気泡^ぼ蒸気により生成される）ガス過飽和水の洗浄液としての利用が提案されている⁽⁴⁾。ガス過飽和水中では、低音圧超音波によるキャビテーションの発生が可能であり、激しい気泡崩壊を伴わない穏やかな体積振動の駆動が期待さ

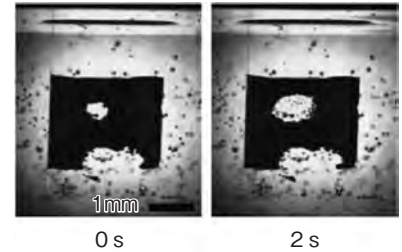


図2 酸素過飽和水を洗浄液とする超音波（65 kHz）キャビテーション洗浄による油性インクの除去⁽⁴⁾

れる。

振幅が大気圧未満の超音波による洗浄実験⁽⁴⁾を図 2 に示す。ここでは、油性インクを塗布したスライドガラスを、酸素過飽和水もしくは飽和水に浸し、超音波照射を行った。飽和水の場合、キャビテーションは生じず、洗浄効果は確認されなかった。一方、酸素過飽和水では、キャビテーションが発生し、気泡運動によりインク粒子の除去が観察された。

4. おわりに

超音波キャビテーション現象を時空間に解像する可視化実験は困難であり、気泡運動による付着粒子除去の詳細メカニズムは未解明である。被洗浄面近傍の気泡運動が誘起する液相せん断流れと付着粒子の干渉に関する詳細な解析が、超音波キャビテーションの洗浄メカニズムの解明において不可欠と言える。

（原稿受付 2016 年 1 月 22 日）

〔安藤景太 慶應義塾大学〕

●文 献

- (1) Kim, W., ほか, Mechanism of particle removal by megasonic waves. *Appl. Phys. Lett.*, **94** (2009), 081908.
- (2) Brennen, C.E., *Cavitation and Bubble Dynamics*, Chap.2, (1995), Oxford University Press.
- (3) Preston, A.T., Colonius, T. and Brennen, C.E., A reduced-order model of diffusive effects on the dynamics of bubbles, *Phys. Fluids*, **19** (2007), 123302.
- (4) 安藤景太, マイクロバブル（ファインバブル）のメカニズム・特性制御と実際応用のポイント, (2015), 75-83, 情報機構.