超音波微細気泡を用いた表面洗浄様相の微視的様相観察

Micro-scale observations in surface cleaning using ultrasonic microbubble

○学 太田 慎一郎 (金沢工大・院) 正 杉本 康弘 (金沢工大) 正 佐藤 恵一 (金沢工大)

Shinnichiro Ohta, Yasuhiro Sugimoto and Keiichi Sato

Kanazawa Institute of Technology, 7-1 Oogigaoka, Nonoichi, Ishikawa

Key Words: Micro bubble, Ultrasonic wave, High-speed video observation, Stain removal, Bubble behavior

1. 諸言

超音波によって駆動される気泡は古くから超音波洗浄に用いられている。近年、医療に関連した分野において積極的に利用されてきており⁽¹⁾、結石破碎などでは、工夫された超音波周波数制御によってキャビテーション気泡を生成後、生成された気泡の共振周波数に対応した超音波照射によって激しく微細気泡群を崩壊させている⁽²⁾。この際付加する超音波の出力は非常に大きなもので、大規模な試験装置を要する。産業分野において用いられる超音波洗浄は比較的低出力であり、製造工程において効果的に用いられている。しかし、洗浄のある1工程で大まかな洗浄を行う過程で用いられており、さらに後工程でも複数回の洗浄過程が必要である。より効果的な洗浄を行うためには、気泡挙動および壁面への衝撃作用のメカニズムを明らかにする必要がある。

本研究では比較的低出力の超音波を用いた気泡による洗浄技術の開発を目的としている。その第1歩として特に、超音波によって駆動される気泡挙動と汚れ除去様相を詳細に観察すると同時に、周囲音圧を計測した結果について示す。

2. 実験装置

実験装置の概略図を図1に示す。超音波発生装置として電歪型振動子(日本アレックス, NEOSONIC NH300)を使用した。出力Pは100Wで振動周波数は40kHzである。高速度ビデオカメラ(Photron, SA5, 撮影速度Fs=210K~420K[fps])に長距離顕微鏡(日本レーザー, ズームレンズ)を用いて撮影を行った。メタルハイドランプ(Photron, HVC-UL)を高速度ビデオカメラと同軸上に配置し、バックライトでの撮影を行った。超音波発生装置から水面までの高さH=130mmとし、超音波発生装置から観察領域までの高さh=65mmとした。また、音圧の計測には2種類のハイドロフォン(B&K, 8103 and Muller, Platte Needleprobe)を図1のように配置し、映像と同時に計測した。ここで試料水には水道水を用い、水温Tw=293-295K, 溶存酸素量βは7-8mg/L程度で行った。

3. 実験結果

図2に壁面上に付着した油污れの洗浄様相を示す。高速度ビデオカメラによって40kfpsで撮影した。微細気泡は音場中で音響流や音響キャビテーション流の効果⁽³⁾などを受けると考えられ、振動しながらオイル内に入り、振動し続ける。その後、オイルの塊から、オイルの微細粒子がはじき出されるように放出される。

さらに図3に壁面上に付着したレジスト膜が除去される様相観察の結果を示す。ここで試験壁面はシリコンウエハを用いている。図中の $t_0(\mu s)$ は基準となる撮影画像からの経過時間を示している。 $t_0=7.04\mu s$ から $t_0=114.14\mu s$ のよう

に気泡が壁面近傍で振動している様相が見られる。また、 $t_0=114.14\mu s$ で気泡が崩壊をした後である $t_0=116.52\mu s$ においてレジストの塊が浮遊し、 $t_0=142.70\mu s$ のように移動している様相が見られた(図3(a)矢印A)。さらに $t_0=237.90\mu s$ から $t_0=245.04\mu s$ のように気泡が壁面近傍で成長と崩壊を繰り返しており、 $t_0=247.42\mu s$ においてはレジストの塊は壁面近傍に見られなくなった。

図4に壁面近傍の気泡挙動を高速度観察した結果およびハイドロフォン出力を示す。ここに試験壁面はシリコンウエハ上にレジスト膜を付けたものである。図4(a)に示されるように、気泡は壁面近傍で周期的に振動している。図4(b)に気泡径の変化とハイドロフォンによって計測された音圧変動の実測値を示す。気泡の振動周波数は音圧変動とほぼ対応している。ここに、気泡の成長より崩壊時のほうが、急速であることは注目される。

図5に気泡崩壊時の様相を示す。気泡は壁面方向へ非球形的に崩壊する様子が確認できる。このような壁面方向への気泡崩壊は壁面壊食を引き起こす高衝撃性の崩壊挙動として指摘されている⁽⁴⁻⁵⁾。

高速度ビデオカメラの時間および空間分解能の都合上、気泡の変形挙動の残像が映りこんでいる。本撮影時間分解能(420kfps)の範囲で気泡は図5において27-30 μm 程度変形していることから、気泡の壁面方向への崩壊速度は少なくとも10-20m/s程度であると評価できる。しかしながら、時間分解能は十分ではないため、さらに高速な崩壊速度現象の存在が推察される。

4. 結言

超音波照射下における壁面近傍の微細気泡挙動を高速度観察した。気泡の振動周波数はほぼ照射周波数に対応した。この気泡の振動によって固体壁面上の汚れが除去される様相が観察された。気泡が壁面方向への非球形的な高速変形

Fig.1 Experimental setup

する挙動を観察した。今後、気泡変形と発生衝撃の対応付けを詳細な計測とともに行う必要がある。

参考文献

- (1) C. E. Brennen, 2003, Cavitation in biological and bioengineering contexts, 5rd Int. Symp. On Cavi., Cav2003, IL-1.
- (2) T.Ikeda et al, 2003, Cloud cavitation control for a therapeutic ultrasound application, 5rd Int. Symp. On Cavi., Cav2003, OS-2-1-008.

- (3) S. Nomura et al., 2000, Streaming induced by ultrasonic vibration in a water vessel, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.39, Part 1, No. 6A, 3636-3640.
- (4) Y.Tomita and A.Shima, 1986, Mechanisms of impulsive pressure generation and damage pit formation by bubble collapse, J. Fluid Mech, vol.169, 535-564.
- (5) A.Vogel et al., Optical and acoustic investigations of the dynamics of laser-produced cavitation bubbles near a solid boundary, 1989, J. Fluid. Mech,vol.206, 299-338.

$T_w=292K$, $\beta=7.0mg/L$, $F_s=40kfps$,
 $f=40kHz$, $P=100W$

Fig.2 Behavior of bubble and oil stain removal

$T_w=292K$, $\beta=7.0mg/L$, $F_s=420kfps$, $f=40kHz$, $P=100W$

Fig.4 Behavior of bubble and sound pressure

$T_w: 293K$, $\beta: 7.0mg/L$, $F_s=420kfps$, $f=40kHz$, $P=100W$

Fig.3 Resist removal observation

$T_w=292K$, $\beta=7.0mg/L$, $F_s=420kfps$,
 $f=40kHz$, $P=100W$

Fig.5 Detailed behavior of bubble collapse