

タンクスロッシングによる流れ場と気泡挙動および生成について

日大生産工(院) ○山中 俊広 日大生産工 沖田 浩平

1. まえがき

建設機械において、タンク容器内の液体が機械の振動により液体表面が揺動するスロッシングが生じる。スロッシングにより、作動油に気泡が生成され、気泡を含む作動油がポンプなどの油圧機器でキャビテーションが発生しやすくなる。このキャビテーションによる材料損傷が問題となっている。

スロッシングによる気泡の生成や挙動に着目した先行研究は見受けられなかった。そこで本研究では、スロッシングによる気泡生成のメカニズム解明を目的に、スロッシング現象を再現する基礎実験装置を作成し、PIV(Particle Image Velocimetry)解析と気泡の可視化によって、スロッシングによる流れ場と気泡生成の関係性について検討した。

2. 実験装置と方法

Fig.1は実験装置の概略図である。装置には位置決め制御機能を備えた単軸ロボット(RSH3)を用いた。水槽は単軸ロボットのステージ上に固定され、制御に応じて水平振動を行う構成とした。流れ場の可視化には粒径15μmのトレーサー粒子(FLUOSTAR)を用いて、水槽底面からグリーンレーザーをシート状に照射した。また、気泡の可視化には、水槽の背面からLED光源を照射することで、気泡輪郭を捉えた。各振幅条件下での液体の流れ場を可視化するため、PIV解析を実施した²⁾。

スロッシングの発生条件は、外部の振動と振動を受けるタンク内液面の変動の固有振動数が一致することである。加振周期は式(1)から固有振動数 f_n を算出し¹⁾、これに近しい値を満たす周期で加振した。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(2n-1) \cdot \pi \cdot g}{a} \cdot \tanh \frac{(2n-1) \cdot \pi \cdot h}{a}} \quad (1)$$

a : 水槽横幅 [m] h : 底面からの水位 [m]

g : 重力加速度 [m/s²] n : モード数 [-]

ここで、水槽の寸法は144×144×34mmであり、水位は $h = 85\text{ mm}$ した。以上より、本実験の理論固有振動数は $f_n = 1.95\text{ Hz}$ である。

Fig.2に加振振幅 $A = 10\text{ mm}$ の条件での変

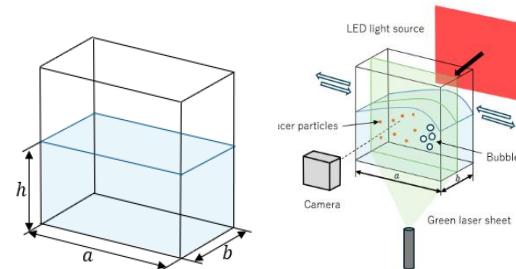


Fig.1 Experiment Equipment

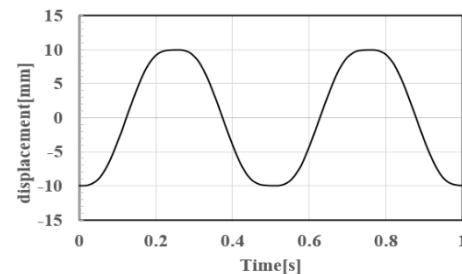


Fig.2 Transition of displacement

位の時間変化を示す。単軸ロボットの加速度特性から、加速後、速度一定で移動し、最大振幅に至る前で減速していることがわかる。加振振動数は $f = 2.05\text{ Hz}$ であり、理論固有振動数 $f_n = 1.95\text{ Hz}$ に近い値であることを確認した。

3. 結果と考察

Fig.3に気泡の生成過程の一例を示す。スロッシングにより液体が水槽の側壁に衝突した後、一部が飛沫となり、Fig.3(a)のように空気中に細かく液滴が飛び散る。これらの液滴が再び液面に接触すると、Fig.3(b)のように液面が陥没し、液体が下方に押し込まれる。液面が平衡状態へと復元しようとする過程(Fig.3(c))で、陥没部分が内側に向かって収縮し、液面が閉じて空気が閉じ込められる(Fig.3(d))。

図は割愛するが、加振振幅 $A = 5\text{ mm}$ の場合、スロッシングによって気泡は生成されなかった。一方、加振振幅 $A = 15\text{ mm}$ の場合、 $A = 10\text{ mm}$ と比べて、気泡の生成過程に明確な差異は見られなかった。また、一度生成された気泡は形状を保ちつつ上昇する傾向が強く、途中で分裂する事例は少なかった。しかし、まれに分裂する場合には、気泡の一部が流れによって引

き伸びられ、複数の小さな気泡へと分裂する様子が観察された。

Fig. 4(a)はPIV計測により流れ場を可視化した結果である。液滴の衝突によって液体が局所的に下方に押し込まれ、それに伴って気泡周りの流れ場も下向きに変化していることが確認された。気泡周りの流れ場は気泡に押し出されるように下方へ移動し、液面付近や壁面付近で流れが複雑に変化している様子も確認できた。また、スロッシングによって発生した流れの中で、おおむね流れ場に追従するように移動するのに対して、浮力によって界面方向に移動する場合に限って、移動方向とは逆向きの流れ場が気泡周囲に観られた。Fig. 4(b), (c), (d)は気泡が分裂する際のPIV解析の結果である。液面付近の流速は底面付近と比較して大きいことが確認された。この流速差によって、液中に取り込まれた気泡が引き伸ばされながら変形し、最終的に分裂する様子が観察された。

Fig.5は気泡径分布についてのグラフである。同一周期では、振幅が大きいほど気泡の発生数が増加した。特に直径1mm以下の微細気泡は、振幅A=20mmのとき最も多く生成された。振幅が大きくなるほど液面変動が激しくなり、液滴の飛散や液面の陥没が促進されて空気が巻き込まれやすくなり、その結果、微細気泡の生成が活発化し、浮上速度の遅い微細気泡が液中に長く滞留するため、気泡数が増加したと考えられる。

4. まとめ

液滴の衝突によって気液界面が局所的に下方へ押し込まれ、気泡が生成される過程を確認した。また、PIV解析の結果から、気泡周囲の流速差によって気泡が引き伸ばされ、分裂する様子が観察された。同一周期では、振幅が大きくなるほど液面変動が激しくなり、空気の巻き込みが促進された結果、気泡の発生数が増加した。

今後は、水位や作動流体の種類などの条件を変化させ、流れ場と気泡生成の関係をさらに詳細に検討していく予定である。

参考文献

- 1) 小松敬治, スロッシング 液面揺動とタンクの振動, 森北出版株式会社, 2015/5/1.
- 2) OpenPIV, <http://www.openpiv.net/>, 2024/10/14

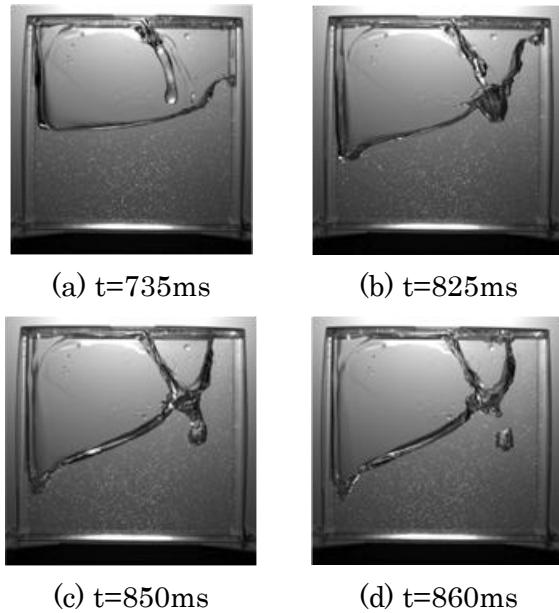


Fig. 3 Time evolution of flow field during bubble generation.

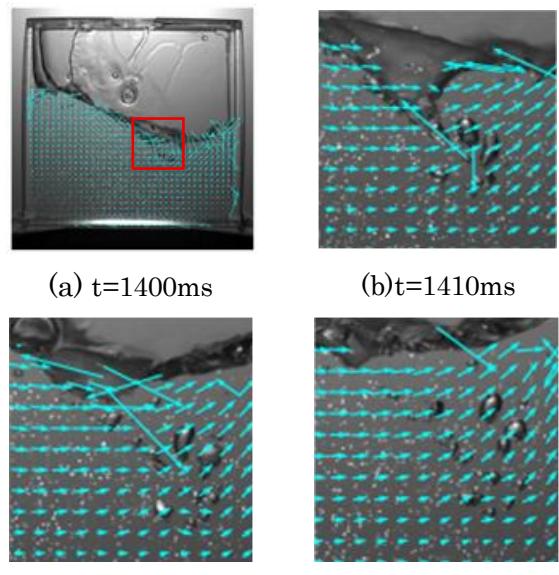


Fig. 4 PIV during bubble splitting

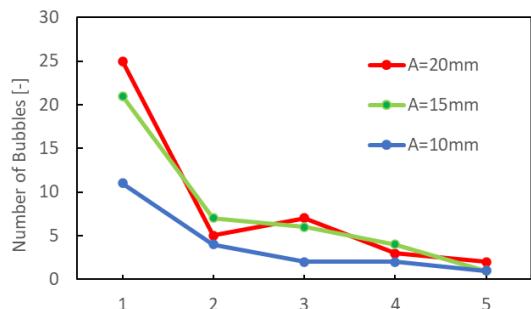


Fig. 5 Relationship between bubble generation and amplitude