

スロッシングによる気泡生成メカニズムの解明

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。

先行研究においては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、スロッシングによって気泡がどのようにして生成されるかを明らかにするため、気泡の挙動の観察実験を行った。

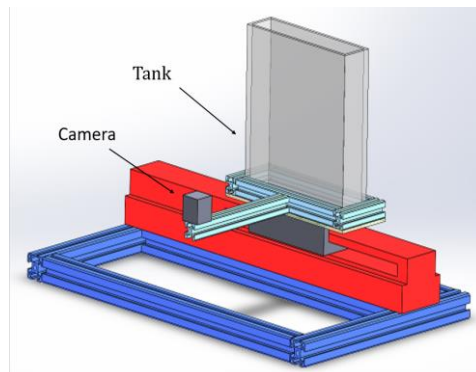


Fig.1 実験装置概要

2. 実験装置と方法

2.1 スロッシングの固有振動数

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。タンクの横幅を a [m]、タンクの奥行きを b [m]、底面からの水位を h [m]、スロッシングによる振動のモード数を n としたとき、固有角振動数 ω_{nm} および波長 λ_{nm} は以下のようになる²⁾。

$$\omega_{nm}^2 = g\lambda_{nm} \tanh \lambda_{nm} h \quad (1)$$

$$\lambda_{nm}^2 = \left\{ \frac{(2n-1)\pi}{a} \right\}^2 + \left\{ \frac{(2m-1)\pi}{b} \right\}^2 \quad (2)$$

本実験では、 x 平面の一次元振動におけるスロッシングの観察実験を行うため右辺第 2 項は無視する。このとき、タンクの固有振動数 f_n は以下の式で求めることができる。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(2n-1) \cdot \pi \cdot g}{a} \cdot \tanh \frac{(2n-1) \cdot \pi \cdot h}{a}} \quad (3)$$

2.2 実験装置及び実験方法

本実験で使用する実験装置の概略図を Fig.1 に示す。タンクは幅190mm、奥行き40mmのものを使用し、水位は $h = 70$ mm, 100 mmの2パターンとした。観察実験は最大波高が最も高くなる1次モードで加振するため、式 (3)より、固有

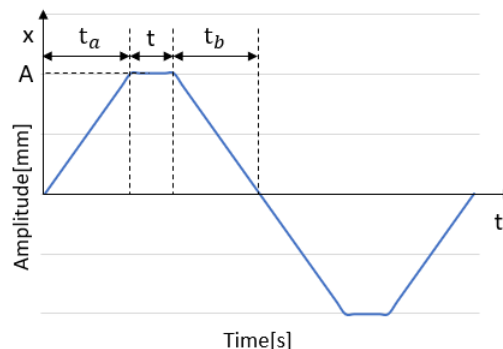


Fig.2 加振時の波形

振動数と周期は $h = 70$ mm のとき, $f_n = 1.84\text{Hz}$, $h = 100\text{mm}$ のとき, $f_n = 1.95\text{Hz}$ となる。また、本実験では実験装置の都合上、加振時の波形を単振動にすることは難しく、Fig.2 のような波形で固有振動数とは別で加振を行った。このとき、加振時の振動数を f とする。Fig.2 のグラフに示す移動時間と停止時間をそれぞれ t_a , t_b , t としたとき、各パラメーターを以下の表 1 に示す。

表 1 加振時の各パラメーター

h [mm]	t_a [s]	t [s]	t_b [s]	振動数 [Hz]
70	0.11	0.05	0.11	$f_n : 1.84$
70	0.14	0.05	0.14	$f : 1.50$
100	0.10	0.05	0.10	$f_n : 1.95$
100	0.13	0.05	0.13	$f : 1.63$

2.3 PIV 計測

Fig.3 のように流速場の可視化と解析を目的として、粒子画像流速計測（以後 PIV 計測）を行った。計測のため、OpenPIV というオープンソースのソフトウェアパッケージを利用し解析を行った。ソースコードは OpenPIV tutorial³⁾のものを参考にした。また、PIV 計測で使用したトレーサ粒子（FLUOSTAR）とレーザー光源（DPGL-1W）を使用した。

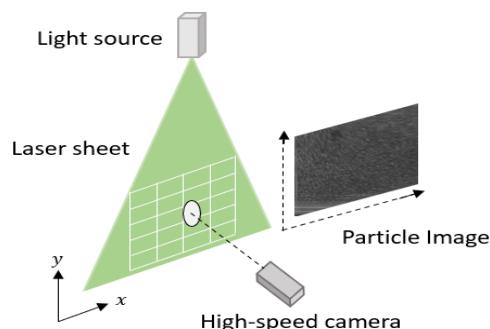


Fig.3 PIV 計測 2 次元 2 成分

3. 結果と考察

3.1 気泡の生成について

Fig.4 はスロッシング現象による気泡の生成過程の様子である。スロッシングにより液体がタンクの壁に衝突し、その衝撃によって飛沫となり①のように空気中に細かく液滴が飛び散る。これらの液滴が液面に触れると、そのエネルギーによって②のように液面が一時的に凹み、液体が下方方向に押し込まれる。液面が表面張力の作用で元の水平な状態に戻ろうとするときクレーターが内側に収縮し、その過程で、液体が中心に向かって集まる。液体が閉じる瞬間に空気が閉じ込められ、この部分に空気が小さな気泡として④のように液中に取り込まれた。

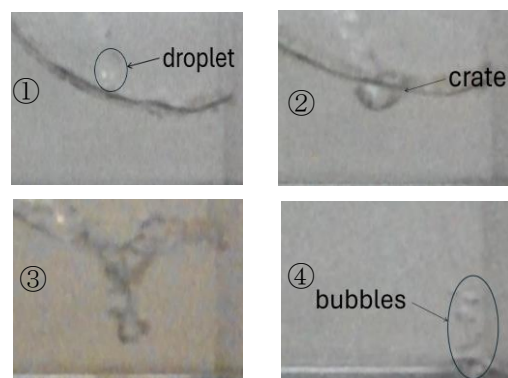


Fig.4 気泡の生成

3.2 気泡の生成比較

気泡が生成されるプロセス自体には変化は見られなかったが、生成される気泡の数に顕著な違いが観察された。 $h = 70\text{mm}$ と $h = 100\text{mm}$ 比較したところ、 $h = 100\text{mm}$ のほうが気泡の発生数が多いことが確認された。これは液体の総量が気泡の生成に関与しているためと考えられる。波が飛沫となる際に生成される液滴の大きさが増大し、その結果、エネルギーが増加する。このエネルギーの増加により、液面に生成されるクレーターが大きくなり、取り込まれる空気の量も増えることが考えられる。また Fig.5 に示すように、 $h = 70\text{mm}$ のように波の谷部分に液体が十分に存在せず、生成されるクレーターの深さが浅くなるため、気泡の生成が抑制されたと考えられる。

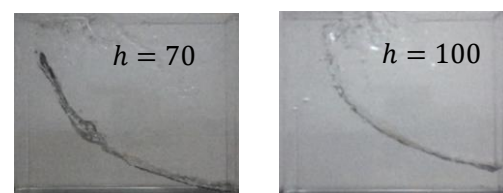


Fig.5 スロッシング時の最大波高

瞬間に、液体の収縮によって空気が閉じ込められ、小さな気泡として液中に取り込まれる過程が確認された。

今後は実験装置を単振動で加振させるための改良や、流体解析を用いたシミュレーションと実験結果の比較を行い、実験データとの整合性を検証する。

参考文献

- 1) 則竹一輝 他, 短形貯槽におけるスロッシング挙動とその抑制方法に対する検討, 土木学会論文集, I_785-I_794, 2012.
- 2) 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
- 3) OpenPIV, <http://www.openpiv.net/>, 2024/10/14

4. まとめ

スロッシング現象を引き起こし、気泡が発生する様子を観察した。気泡発生主な原因として、液滴が液面に衝突する際に液面が一時的に凹み、液体が下方方向に押し込まれ、液体が戻る