第 II 部門　　振動円柱群による誘起液面揺動に関する研究

大阪市立大学大学院工学研究科　学会員　○松本　弘史
大阪市立大学大学院工学研究科　正会員　重松　孝昌

1. 研究背景・目的

工業分野においては撹拌は重要な作業工程の一つであるが，撹拌条件によっては液面が大きく揺動するスロッシング現象を引き起こし，液体の溢流や撹拌槽の破損が生じる場合もある．

スロッシングに関する研究は様々な分野で行われており，その多くは容器内に液体のみが存在する場合を対象としたものである [1]．また，回転翼を用いた撹拌時のスロッシング現象に関する研究は散見される [2] が，大量の液体を対象とした研究例はほとんどない．

そこで，本研究では，円柱群を振動させて液体を撹拌する際に生じる液面揺動についての知見を得ることを目的として，実験を行った．

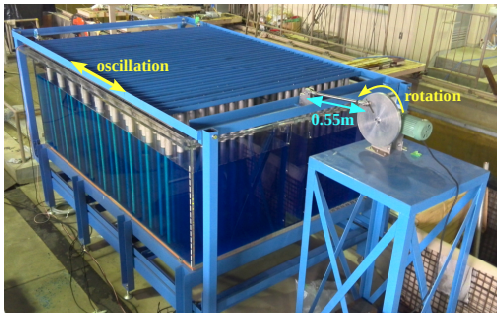
2. 実験概要

実験は長さ 2.80m，幅 1.95m，高さ 1.00m のアクリル水槽内に着色した水を入れて，水深 h を 0.2，0.4，0.6，0.75m と変化させて行った (**図-1**)．水槽内には厚さ 0.025m，高さ 0.9m，幅 0.85m のパーティションが二つ固定されている．水槽上部には，パーティション両側に，直径 d=0.049m，長さ l=1.3m のステンレス製円柱を y 方向に延びる平板にそれぞれ 9 本ずつ固定 (円柱の中心軸間距離 D_y は 0.09m) して，単一円柱列を作成した (各円柱底面と水槽底面との距離は 0.014m)．この円柱列を x 方向に伸びるスライダーに 10 列固定 (円柱列間距離 D_x は 0.136m) して、千鳥配列円柱群を構成した．スライダーは，長さ 0.55m のシリンダー棒を介して，モーターに取り付けられた円盤と接続されており，これを回転させることで，x 方向に円柱群を水平振動運動させることができる．本研究では振動振幅を 0.13m として，周期 T(振動数 f=1/T) を**表-1** に示すように変化させて実験を行った．

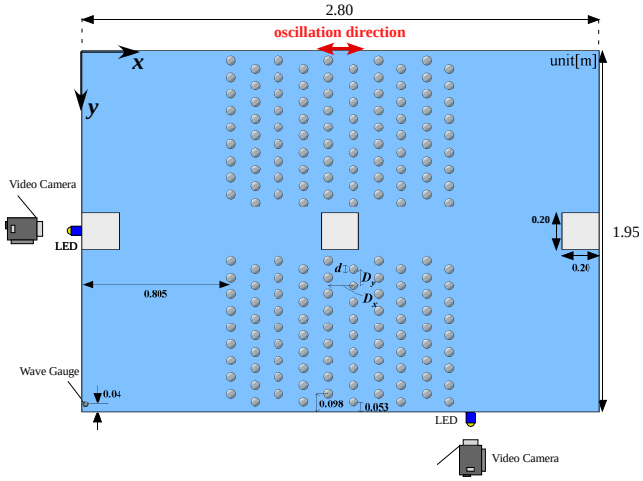
円柱群の運動と液面変動量を計測するために，水槽上部スライダーに加速度計を取り付け，水槽側壁 ($x \simeq 0.03$m，y=1.91m) に超音波式変位センサ (キーエンス製，UD-320) を固定した．両者は同期させて，サンプリング周波数は 200Hz とした．ローパスフィルターを用いて，液面変動の計測データのノイズを排除した．また，2 台のビデオカメラ (SONY 製，HDR-TD10 と HDR-CX520) を用いて，xz および yz 平面の液面揺動を 30fps で撮影し，静止画像として保存した画像から液面形状を求めた．撮影にあたり，加速度

表–1 実験条件

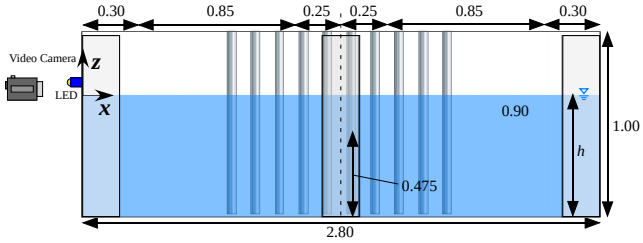
h[m]	T[s]	f[Hz]	f_1[Hz]
0.20	2.6～10	0.100～0.385	0.248
0.40	2.6～10	0.100～0.385	0.343
0.60	2.4～10	0.100～0.417	0.405
0.75	2.7～14	0.071～0.370	0.438



図–1 実験装置



(a) 平面図



(b) 断面図

図–2 実験装置の構造

Hiroshi MATSUMOTO，Takaaki SHIGEMATSU
shige@urban.eng.osaka-cu.ac.jp

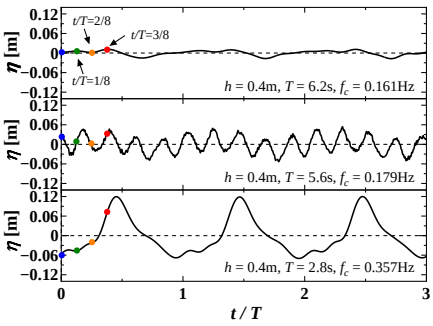


図-4 液面変動量 η の時間変化

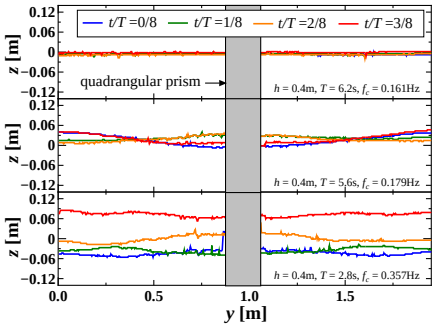


図-5 液面形状 (yz 断面)

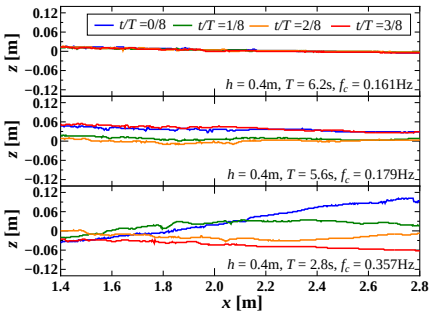


図-6 液面形状 (xz 断面)

計および超音波式変位センサと同期を取るよう工夫した．

矩形容器内の一次振動モードのスロッシング固有振動数 f_n は，速度ポテンシャル理論により，水深 h と水槽長さ L の関数として次式で求められる [1)]．

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{n\pi g}{L}\tanh\left(\frac{n\pi h}{L}\right)} \qquad (1)$$

ここに，n は液体の振動モード，g は重力加速度である．各実験条件における f を**表-1** に示す．

3. 実験結果

図-3 は円柱群の振動数 f と平均波高 $\overline{H}$ との関係を示したものである．図中縦軸は h で無次元化しており，横軸は f を f_1 で無次元化して表している．$\overline{H}$ はゼロアップクロス法で定義された波群の波高の平均値である．同図より，いずれの h においても，f を大きくしていくと $\overline{H}/h$ は概ね次のような傾向を示す．すなわち，(i) 先ず緩やかに上昇し，(ii) 次に大きく上昇して最初のピークを示し，(iii) 再び大きく上昇して $f \simeq f_1$ で最大値 ($\overline{H}/h \simeq 0.43$) をとる．

$\overline{H}$ が上述のような変動傾向を示した原因を明らかにするために，代表として h=0.4m の場合を取り上げる．**図-4** には液面変動量 η の時間変化を示し，横軸は時間 t を T で無次元表記している．このときの yz および xz 断面における液面形状の時刻歴を**図-5**，**6** に示す．各図ともに，上から f=0.161Hz((i))，f=0.179Hz((ii))，f=0.357Hz((iii)) の場合を表している．先ず，f=0.161，0.179Hz の場合の η の時間変化に着目すると，後者の方が明らかに液面が短い時間で大きく変動していることがわかる．両者の液面形状をみてみると，前者の場合は，各断面ともにほぼ一様な分布を示しているのに対して，後者の場合は，x 方向にほぼ一様な分布を示し，y 方向に二次振動モードを示していることが見て取れる．このことから，(ii) において $\overline{H}$ が急激に上昇するのは，スロッシングが発

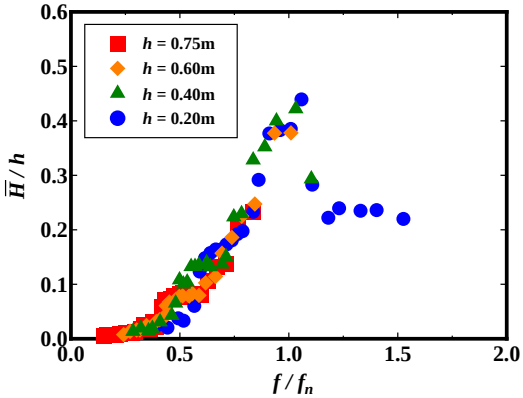


図-3 円柱群の振動数 f と平均波高 $\overline{H}$ の関係

現したためであることがわかる．次に，f=0.357Hz の場合の η の時間変化に着目すると，孤立波が通過したように，一周期ごとに液面が大きく変動していることがわかる．このときの液面形状に着目すると，xz 断面では，x = 1.4m 付近が節となり x=2.8m が腹となるような分布を示しているのに対して，yz 断面では，節や腹がみられない．また，xz 断面で液面が低下すると，yz 断面では液面が上昇していることがわかる．つまり，x 方向に一次振動モードを示していると推察され，(iii) において $\overline{H}$ が大きく上昇して最大値を示すのは，スロッシングが原因であると考えられる．

4. 結論

本研究によって，円柱群の振動数 f が式 (1) で求められる矩形容器内の固有振動数 f_1 とほぼ等しくなったときに，スロッシングの影響により平均波高 $\overline{H}$ が最大となることが明らかとなった．したがって，矩形水槽に振動外力が加わる場合に一般的に用いられている式 (1) を，円柱群が振動する際の液面揺動に関しても適用できることがわかった．また，本実験結果から，$\overline{H}/h$ の最大値はおよそ 0.43 となることがわかった．

参考文献

1) 酒井理哉・東貞成・佐藤清隆・田中伸和 (2007) : 溢流を伴う矩形水槽の非線形スロッシング評価，構造工学論文集 A，Vol.53A，pp.597–604.
2) 出口雅紀・新井和吉・伴康隆・岩原光男・長松昭男 (2007): 溢流を伴う矩形水槽の非線形スロッシング評価，化学工学論文集，33(4)，pp.300–305.