

自由液面のスワリング現象の数値解析

電中研 正会員 牛島 省

1. はじめに

スロッシング現象に代表される、大規模な自由液面の変動を伴う流動現象を数値解析するため、3次元移動座標系を用いて液面形状を表現する計算手法をこれまでに提案した[1]。本報告では、この計算手法を用いて、円筒容器内で発生する自由液面のスワリング現象を数値解析した結果を示す。

スワリング現象は、軸対称の容器内で流体が水平方向に加振されているにもかかわらず、ある条件下では液面が鉛直軸回りに回転運動を起こす現象である。この現象に対しては、これまでに実験的な検討や理論解析などが行われている[2]、[3]、[4]、[5]。しかしながら、スワリング現象に対して数値解析を行った報告は数少ない。田中・中山[6]は、ポテンシャルモデルを用いた3次元境界要素法解析により、加振初期に加振方向と垂直方向にトリガーを与えた場合に液面変動がスワリング現象へ移行する過程をシミュレートしている。また、荒井ら[7]は、初期条件として微小な液面勾配を与えて、MAC法により方形および円筒容器内に生ずるスワリング現象の数値解析を行っている。ここでは、田中・中山[6]と同様の条件を既報[1]の数値解析手法に用いることにより、(1,1)モードの非線形スロッシング現象がスワリング現象へ移行する状態を数値解析する。

2. 計算条件と解析結果

田中・中山[6]は、ポテンシャルモデルを用いているため、流体の粘性等起因する効果を、減衰係数を0.1として計算した。本報の数値解析では、基礎式としてナビエ・ストークス方程式を用いているため、このような人工的な係数を設定する必要はなく、動粘性係数を与えて計算を行うことが可能である。スワリング現象を解析するための田中・中山[6]の入力加速度は、以下の式で与えられる。

$$a(t) = A \sin(2\pi f t) \quad (1)$$

$$b(t) = \begin{cases} B \sin(2\pi f t) & [0 \leq t \leq 3] \\ 0 & [3 < t] \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $a(t)$ と $b(t)$ は、それぞれ図1において、 x_1 および x_2 方向に加えられる水平加速度であり、加振開始から3秒間入力される $b(t)$ が、スワリングのトリガーに相当する。これらの入力加速度の振幅は次式で与えられる。

$$A = -0.0178g \quad (3) \quad B = A \sin\left(\frac{\pi}{6}t\right) \quad (4)$$

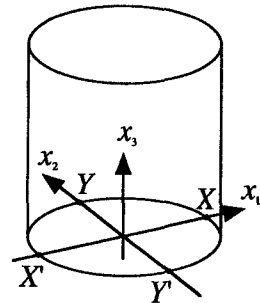


図1 円筒容器と座標系

本研究では、田中・中山[6]と同様に、周波数 f を、0.940Hzおよび0.796Hzとした2ケースの計算を行った。また、円筒容器の形状は、直径が1.0mであり、静止時の液深が0.6mである。なお、この条件下における(1,1)モードの固有周波数は0.944Hzである。

図2と図3は、周波数が0.940Hzの場合の液面変動の時系列を示すものである。点 X および X' における液面変動を見ると、入力周波数が固有周波数に近い場合、大きい液面応答が発達してゆく。一方、 Y および Y' では、加振後10秒程度までは変動の大きさはほぼ一定であるが、その後急激に変動が増大し、スワリング現象へ移行する。しかしながら、図4、図5に示すように、入力周波数を0.796Hzとした場合には、 Y および Y' における液面変動は発達せず、スワリング現象への移行は生じないものとなった。

図6には、入力周波数が0.940Hzの場合におけるスワリング現象発生時の液面形状の時間的な変化を示した。

キーワード：自由液面、スワリング、境界適合座標、ALE法、3次元数値解析

連絡先：〒270-11 我孫子市我孫子1646 (財)電力中央研究所 水理部、E-mail: ushijima@criepi.denken.or.jp

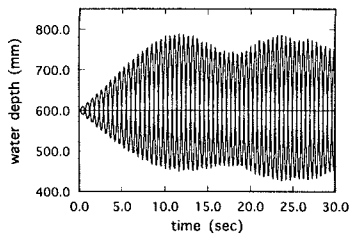
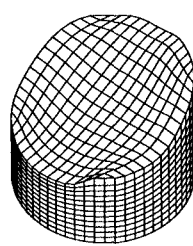
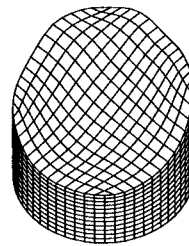


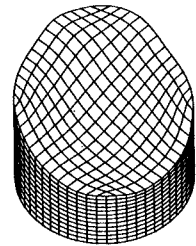
図2 液面変動の時系列
($f = 0.940$ Hz、点XとX')



$t = 24.7(\text{sec})$



$t = 24.8(\text{sec})$



$t = 24.9(\text{sec})$

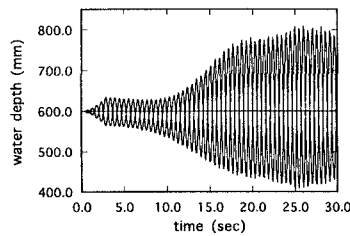
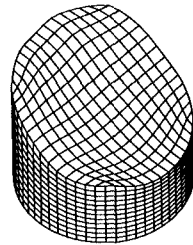
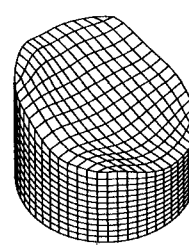


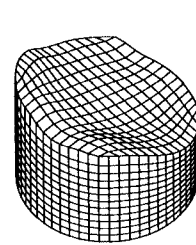
図3 液面変動の時系列
($f = 0.940$ Hz、点YとY')



$t = 25.0(\text{sec})$



$t = 25.1(\text{sec})$



$t = 25.2(\text{sec})$

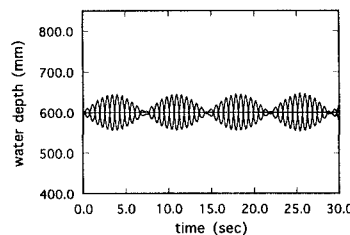
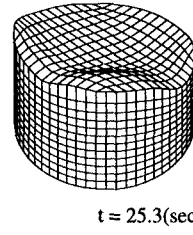
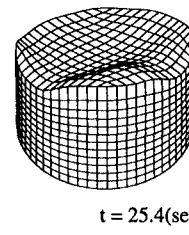


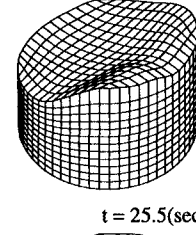
図4 液面変動の時系列
($f = 0.796$ Hz、点XとX')



$t = 25.3(\text{sec})$



$t = 25.4(\text{sec})$



$t = 25.5(\text{sec})$

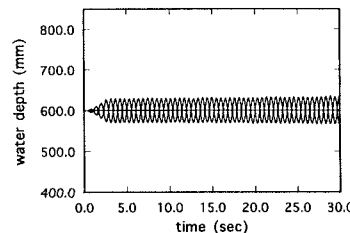
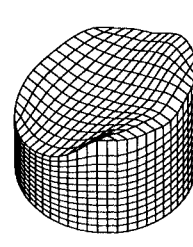
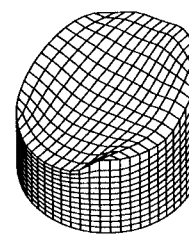


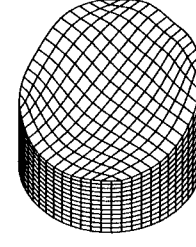
図5 液面変動の時系列
($f = 0.796$ Hz、点YとY')



$t = 25.6(\text{sec})$



$t = 25.7(\text{sec})$



$t = 25.8(\text{sec})$

図6 スワリング現象発生時の液面形状
の時間的な変化 ($f = 0.940$ Hz)

3. おわりに

本報告では、トリガーとなる入力加速度を初期に与えた場合に、(1,1)モードのスロッシングがスワリング現象へと移行する過程を数値解析した。ここで扱った液面変動は、実際のスワリング現象とは必ずしも一致しないが、既報[1]の数値解析手法により、複雑な液面変動を数値的に評価できることが確認できた。

【参考文献】 [1] 牛島 省, 水工学論文集, 1997. [2] 田中宏明・中山司, 日本機械学会論文集B, Vol.57, No.538, 1991. [3] 木村憲明・大橋弘隆, 日本機械学会論文集, Vol.44, No.386, 1978. [4] R. E. Hutton, NASA Technical Note, D-1870, 1963. [5] J. W. Miles, J. Fluid Mechanics, Vol.75, 1976. [6] 大森博司・松井徹哉・加藤啓一・藤原健, 日本建築学会構造系論文報告集, 第385号, 1988. [7] 荒井誠・L. Y. Chen・井上義行, 関西造船協会誌, 第219号, 1993.