

# 円筒タンクに生じるスロッシング現象に関する実験的研究\*

原 要一郎\*\*, 森田 英俊\*\*

Experimental Study of Liquid Sloshing in a Circular Tank

Yoichiro Hara, Hidetoshi Morita

## Abstracts

The liquid sloshing is occurred by the severe vibration of the free surface of liquid in cargo tanks, and there are some cases where fatigue cracks result from the impact of liquid on the upper part of tank. On the first stage to design cargo ships, the sloshing is the important matter to investigate. To control the impact pressure due to the liquid sloshing, internal structures, such as baffle plates and support rings, are fitted in the tank. But the effect of internal structures have been unknown.

In this paper, to investigate the effect of internal structures, the experiments of a circular tank model for some internal structures, water levels, forced vibration periods and angular amplitudes, are performed, and the effects of their parameters are shown by some graphs and are discussed.

**Key Words** : Sloshing, Liquid Cargo Tank, Internal Structure, Circular Tank, Baffle Plate

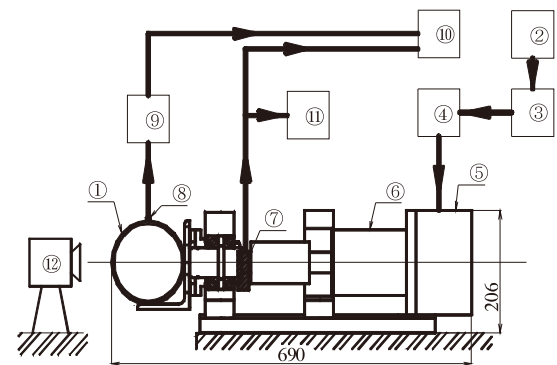
## 1. 緒 論

液体貨物運搬船のタンク内液体の自由表面の激しい動揺によりスロッシングが発生し、タンク上端部への液体の衝撃により疲労亀裂が生じることがあり、設計初期段階での重要な検討項目となっている<sup>(1)</sup>。スロッシングによる衝撃圧を抑制するため、タンク内に内部構造物として制止板やサポートリングを設置している<sup>(1)~(3)</sup>。サポートリングはフランス船級協会によると開口度約50%で制止板の役割を果たすとしているが、その根拠は明確ではない<sup>(4)</sup>。また、内部構造物が複雑であるので、数値解析法の適用も困難である。

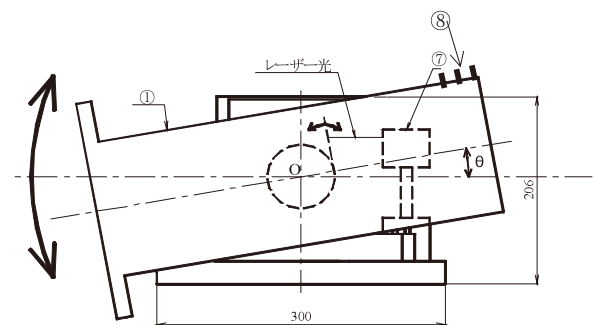
そこで、タンク内に設置した内部構造物の影響を調べるため、水位、振動周期、内部構造物を変えて実験を行い検討したので、ここに報告する。

## 2. 実験装置および実験方法

図1に実験装置の概略を示す。(a)は全体図、(b)は角振動部である。周期、振幅を設定した正弦波を発信器で発生させ、微分増幅回路、サーボアンプ、サーボモータ、減速機を介して、水を入れた円筒タンクを角振動させる。円筒タンクの角振幅はサーボモータの回転数により設定した。円筒タンクの振動角



(a) Experimental Apparatus



(b) Angular Vibration Part

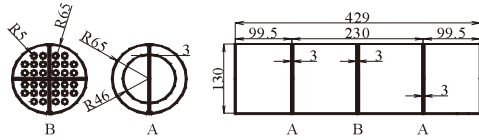
①円筒タンク ②発信器 ③微分増幅回路 ④サーボアンプ ⑤サーボモータ ⑥減速機 ⑦レーザ変位計 ⑧圧力センサ ⑨DC ストレンアンプ ⑩データアキュイジション ⑪メモリレコーダ ⑫ビデオカメラ

Fig. 1 Experimental Apparatus

\* 原稿受付 平成19年9月28日

\*\* 佐世保工業高等専門学校 機械工学科

はレーザ変位計で、衝撃圧はタンク上端部の端面から 10、30、50mm の位置に取り付けた圧力センサで、また水の流動状態はビデオカメラで測定した。模型タンクは厚さ 4.5mm、直径 130mm、長さ 429mm の透



A : Support Ring                      B : Water Control Plate

Fig.2 Internal Structures

Table 1 Experimental Conditions

Internal Structures	No Internal Structure	Support Ring	Support Ring + Water Control Plate
Forced Period $T(\text{sec})$	0.4~2.0sec, Interval=0.1sec		
Angular Amplitude $\theta_0(\text{deg})$	3.5, 7.0, 10.5 deg		
Water Level $\eta(\%)$	20, 40, 60, 80 %		

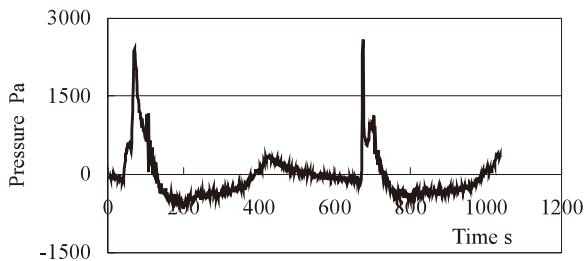


Fig.3.1 An Example of Experimental Pressure Result

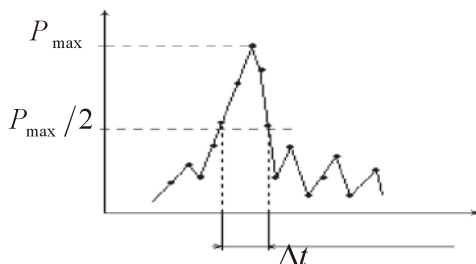


Fig.3.2 Pattern of Recorded Wave

明アクリル製で、実物の約 1/100 である。図 2 にタンク内部に取り付ける内部構造物を示す。サポートリング A と制水板 B の開口率は、それぞれ 50%、20% である。

### 3. 実験結果および考察

実験条件を表 1 に、実験で得られた圧力の時間変動の例を図 3.1 に示す。図から分かるように、結果は衝撃波形特有の形を表しているので、ここでは、図 3.2 のように、衝撃の大きさを、最大圧力  $P_{\max}$  と  $P_{\max}/2$  の圧力が作用している時間  $\Delta t$  の積  $P_{\max} \Delta t$  (力積と呼ぶ: 単位面積当たりの力積) で表し整理する。

#### 3. 1 加振振動周期と力積の関係

##### (1) 内部構造物がない場合

図 3.3 に振動周期 1.7s、角振幅 7.0deg、水位 60% の場合の実験結果を示す。図は、上から順に振動角、

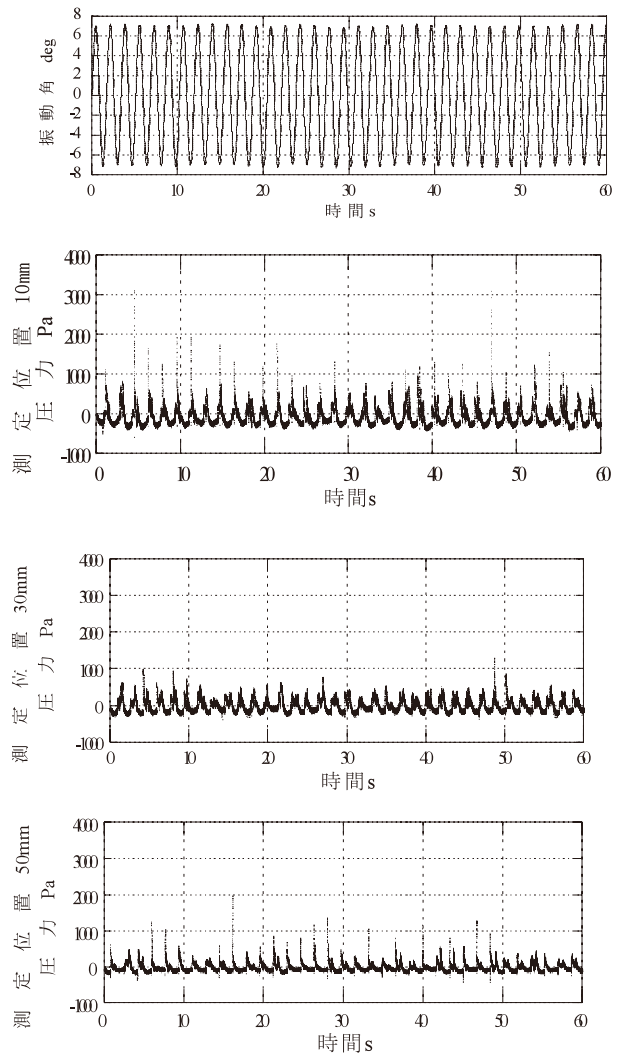


Fig.3.3 No Internal Structure ( $T=1.7\text{s}$ ,  $\theta_0=7.0\text{deg}$ ,  $\eta=60\%$ )

円筒タンクに生じるスロッシング現象に関する実験的研究

測定位置 10、30、50mm の位置での圧力の時間変化を表している。振動は一定角振幅で正弦波状に変化し、圧力は一定時間間隔で衝撃波状に現れている様子が分かる。

図 3.4.1 と 3.4.2 に水位一定で、加振周期を変えた場合の力積の変化を示している。図 3.4.1 が水位 80%、図 3.4.2 が水位 40% の場合である。また、(a) が角振

幅 10.5 度、(b)7 度、(c)3.5 度の場合である。図中右上の FT\_10、FT\_30、... は、圧力センサの位置を、1 次、2 次、... は荒井<sup>(2)</sup>による次式で求めた周期の振動モードの次数を表している。

$$T_m = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{m\pi g}{L} \tanh\left(\frac{m\pi h}{L}\right)}}$$

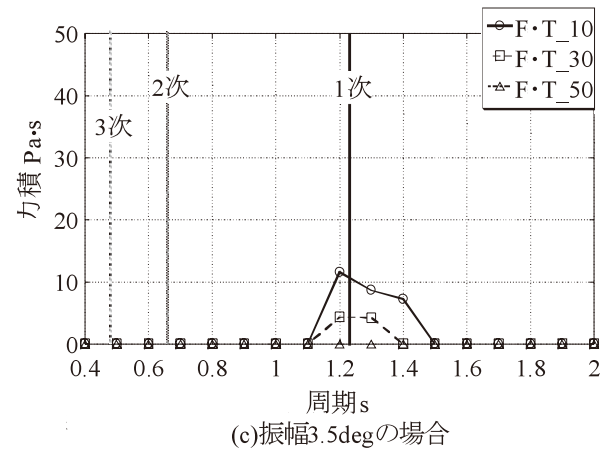
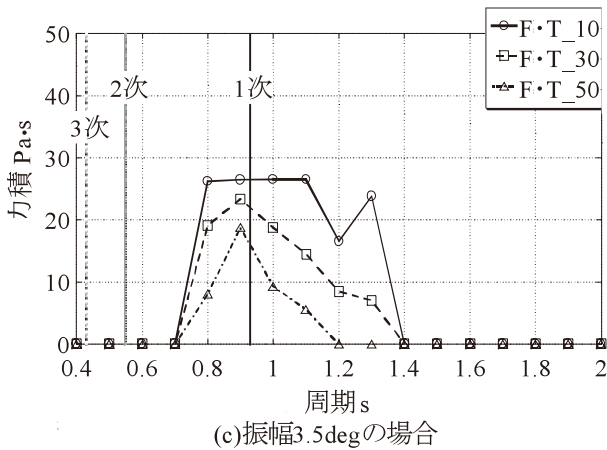
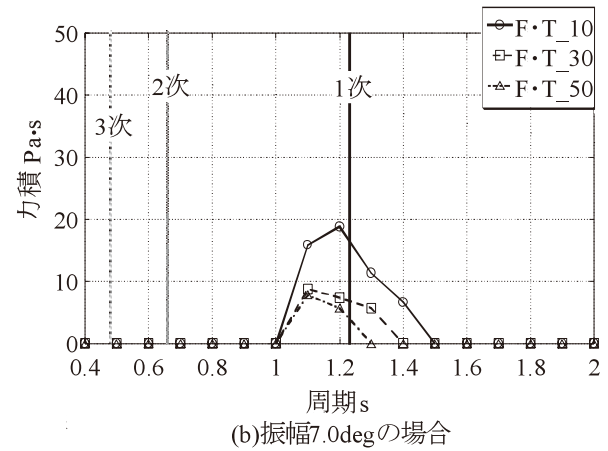
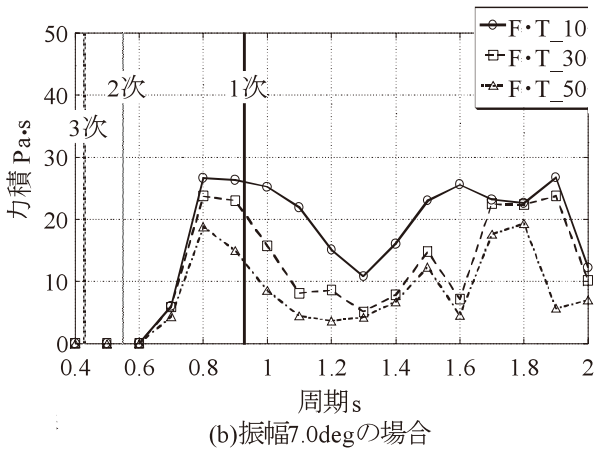
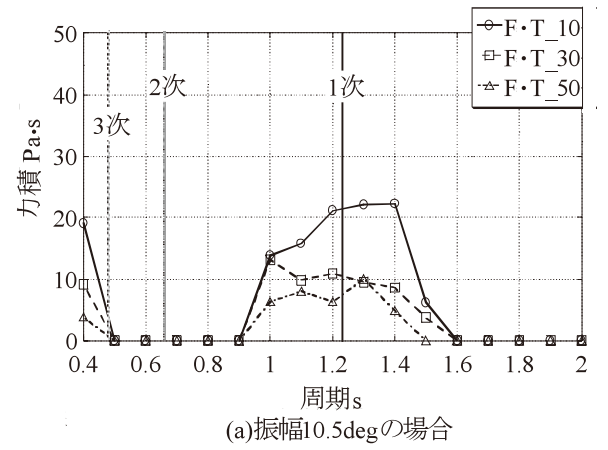
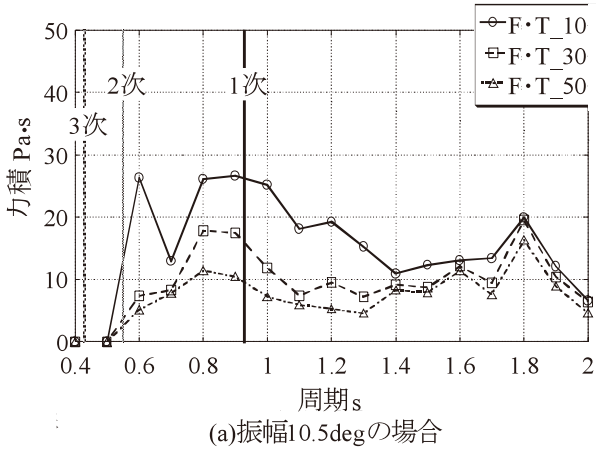


Fig.3.4.1 No Internal Structure  $\eta=80\%$

Fig.3.4.2 No Internal Structure  $\eta=40\%$

ここで、 $T_m$  :  $m$  次の周期、 $L$  : タンク長さ、

$H$  : タンク高さ、 $m$  : モード次数

図から力積は、水位に関係なく 10mm の位置の圧力が一番大きく、30、50 mm とタンク中央に近くなるほど小さくなっていることが分かる。振動の角振幅が大きいほど力積が発生している加振周期の範囲が広がっているが、力積の大きさにはあまり影響していない。水位が小さくなると力積の大きさ、発生加振周期範囲とも小さくなっているが、これは、加振により振動する水量が少ないためと考えられる。また、1 次振動モードに近い周期で最大力積が発生している。これは、1 次振動モード近くで共振状態が現れ、水が大きく振動しているためと考えられる。

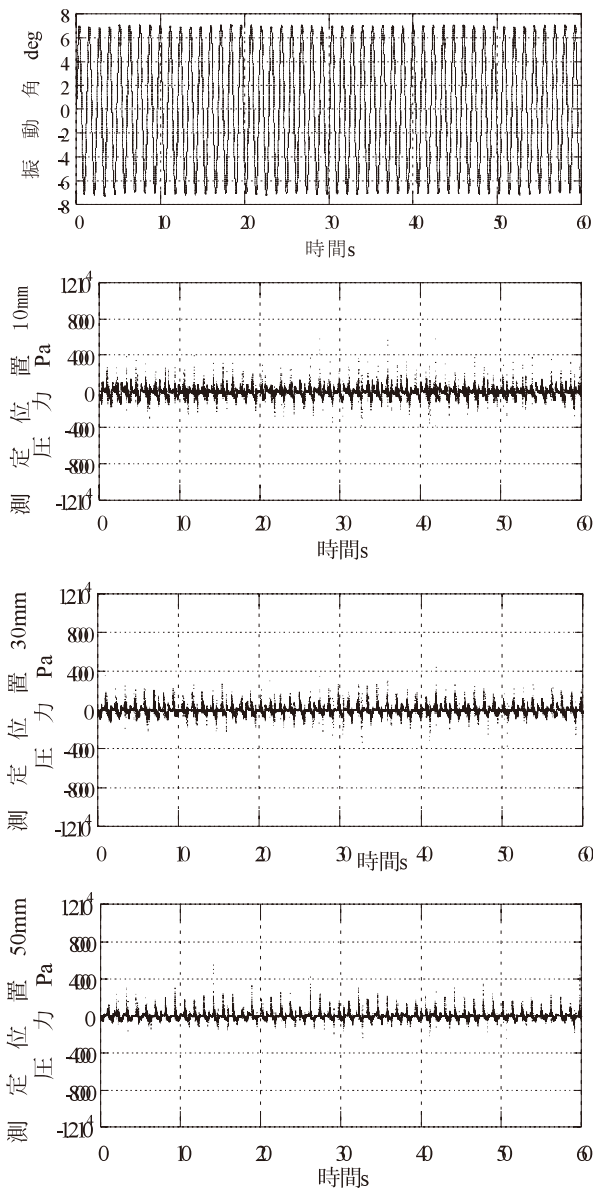
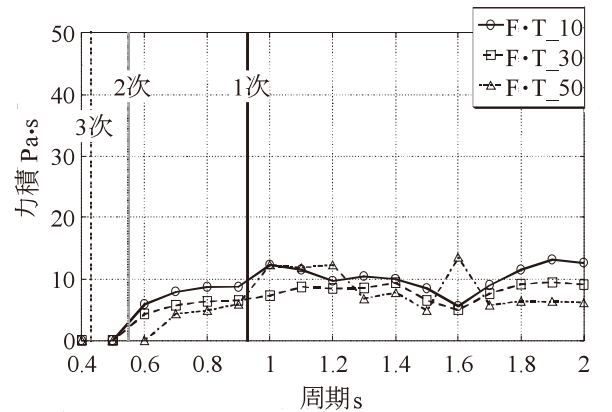


Fig.3.5 Support Ring( $T=1.7s$ ,  $\theta_0=7deg$ ,  $\eta=60\%$ )

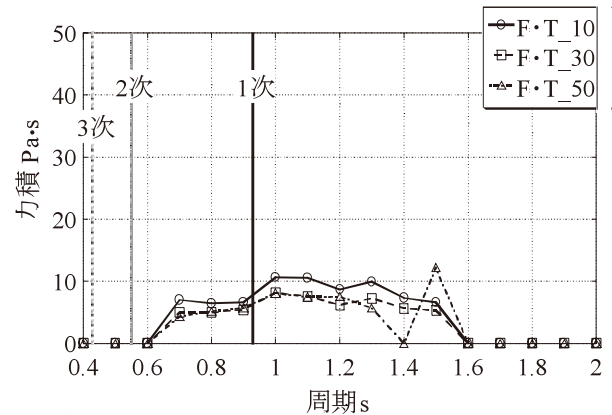
水位 20%の場合、水の量が少なく圧力センサの位置まで水が達せず、圧力が測定されなかった。

(2) サポートリングを付けた場合

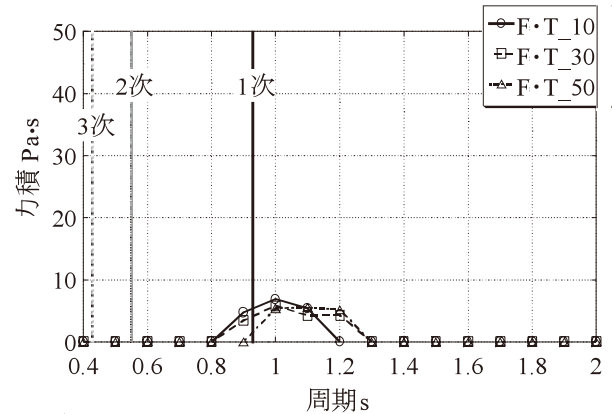
この場合得られた時間波形を図 3.5 に示す。内部構造物が無い場合と同様の波形である。これを力積で処理した結果を図3.6.1と図3.6.2に示す。この場合、水位 60%、角振幅 3.5 度および水位 40%以下では圧



(a)振幅10.5degの場合



(b)振幅7.0degの場合



(c)振幅3.5degの場合

Fig.3.6.1 Support Ring  $\eta=80\%$

## 円筒タンクに生じるスロッシング現象に関する実験的研究

力が測定されなかった。内部構造物が無い場合と同様に1次モード近くで最大力積が発生しているが、その最大値は内部構造物がない場合に比べて小さく、発生加振周期範囲も狭くなっている。これらは、サポートリングによるスロッシングへの抑制効果と考えられる。

## (3) サポートリングと制水板を付けた場合

この場合得られた時間波形を図3.7に示す。(1)、(2)の場合と比べ圧力が小さくなっている。また、力積で処理した結果を図3.8に示す。この場合、水位80%、角振幅3.5度および60%以下の水位では圧力が測定されなかった。この場合も1次モード近くで最大力積が発生しているが、(1)、(2)の場合と比べて、力積最大を示す加振周期と計算値との差が大きくなっており、荒井<sup>(2)</sup>による計算と合わなくなっている。サポートリングだけの場合の図3.6.1と比べると、振幅10.5、7度の場合とも力積発生の加振周期範囲が狭くなるとともに、振幅7度の場合は10mmの位置での圧力だけが測定され、30、50mmの位置では測

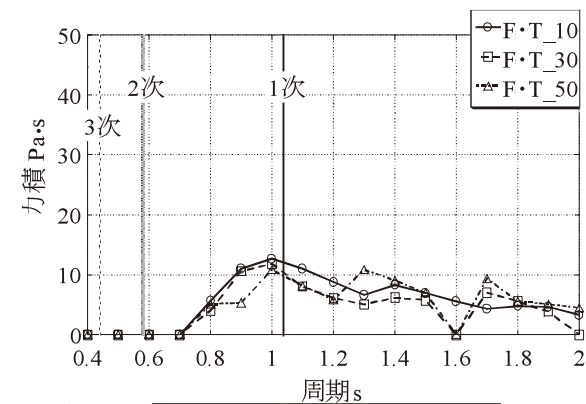
定されていない。これらは、制水板によるさらなるスロッシングの抑制効果と考えられる。

## 3. 2 角振幅、水位、内部構造物と力積発生加振周期範囲、同調周期、固有振動周期の関係

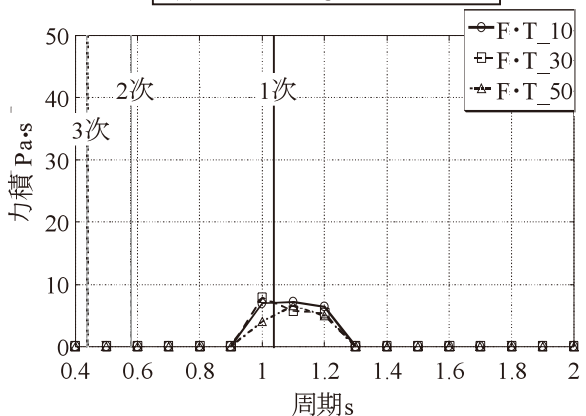
図3.9、3.10、3.11に角振幅、水位、内部構造物に対する力積発生加振周期範囲、同調周期、固有振動周期の関係を示す。固有振動周期は、荒井の式<sup>(2)</sup>により計算した値である。ここで、次を定義する。

力積発生加振周期範囲：力積が発生した最長周期と最短周期の差

同調周期：1次固有振動周期近傍で、3ヶ所の圧力測定位置における力積合計が最大となる



(a) 振幅 10.5deg の場合



(b) 振幅 7.0deg の場合

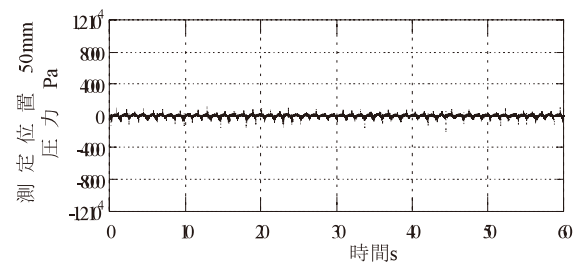
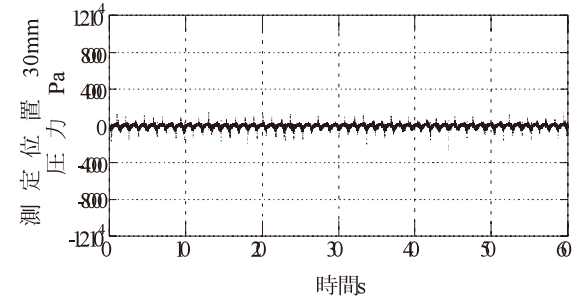
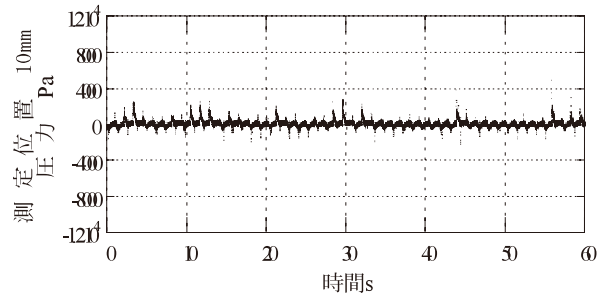
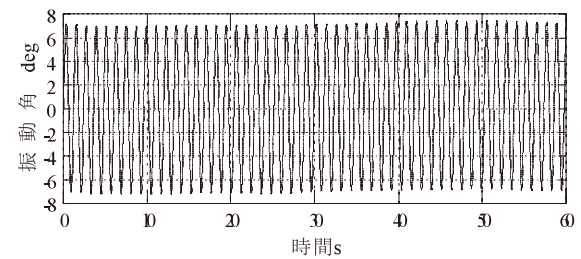
Fig.3.6.2 Support Ring  $\eta=60\%$ 

Fig.3.7 Support Ring + Water Control Plate

(T=1.7s,  $\theta_0=7\text{deg}$ ,  $\eta=60\%$ )



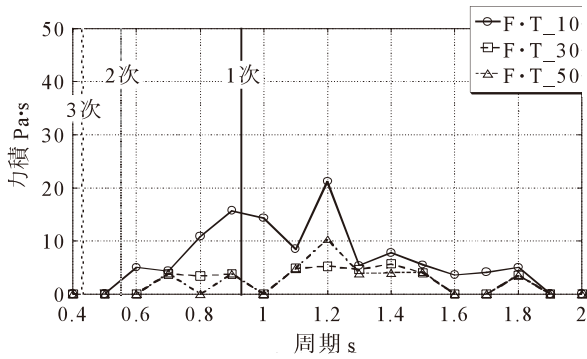
加振周期

(1)角振幅に対する変化

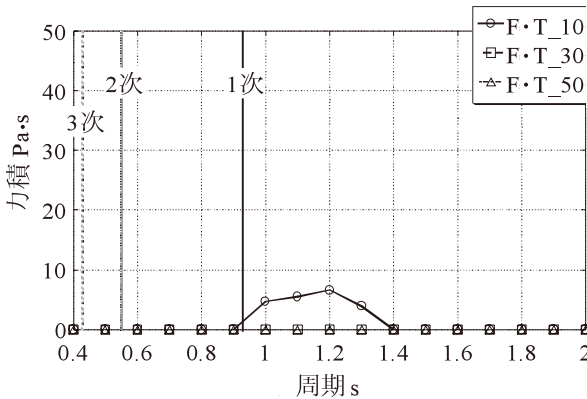
図 3.9 に、角振幅に対する力積発生加振周期範囲、同調周期、固有振動周期の関係を、水位  $\eta$  をパラメータとして示す。(a)、(b)、(c) は内部構造物が異なる場合の結果である。

図で▲が力積発生加振周期範囲を表している。力積発生加振周期範囲は角振幅とともにほぼ直線的に大きくなっており、水位が大きくなるとともにその範囲は広がっている。また、内部構造物が無く、水位 80% の場合、角振幅が大きくなると一定になる傾向がある。これから、この場合、力積発生加振周期範囲が一定となる水位に対する限界の角振幅があると考えられる。内部構造物が変わると力積発生加振周期範囲は狭くなり、内部構造物の力積発生への影響が現れている。

図で●が同調周期の結果を表している。(a) の内部構造物がない場合だけ、角振幅の増加とともに同調周期は減少しているが、内部構造物がある場合は、同調周期は一定である。このことは、内部構造物がない場合、角振幅に対する非線形性が存在すると考

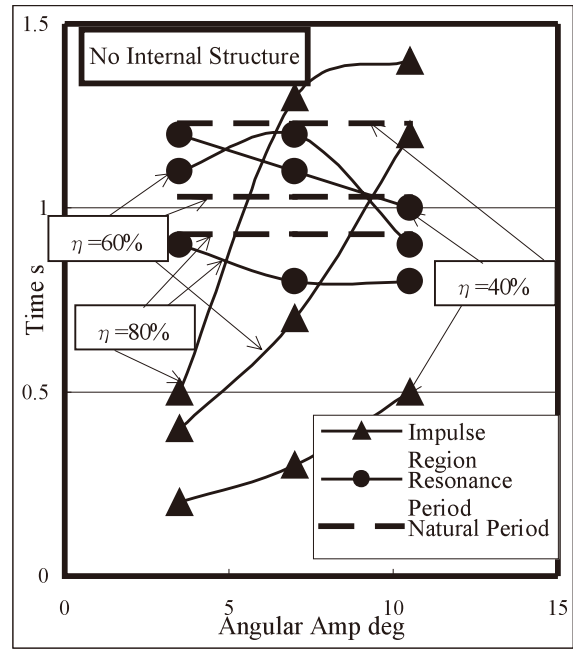


(a) 振幅 10.5deg の場合

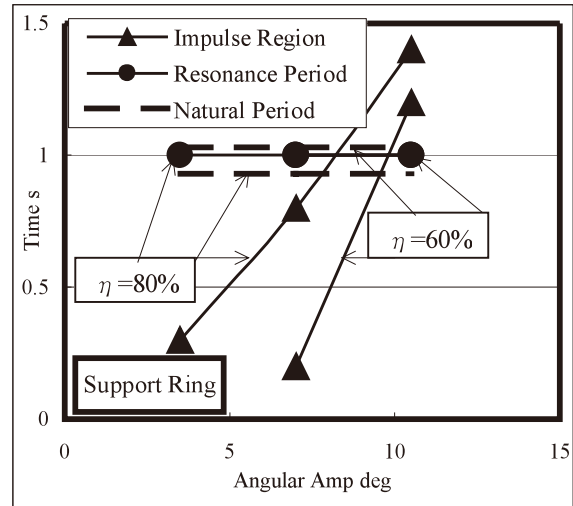


(b) 振幅 7.0deg の場合

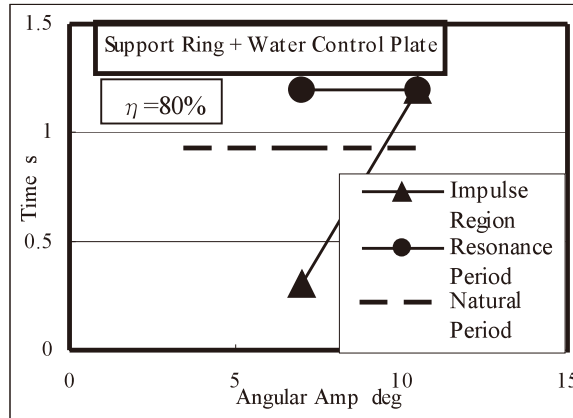
Fig.3.8 Support Ring+Water Control Plate  $\eta=80\%$



(a) No Internal Structure



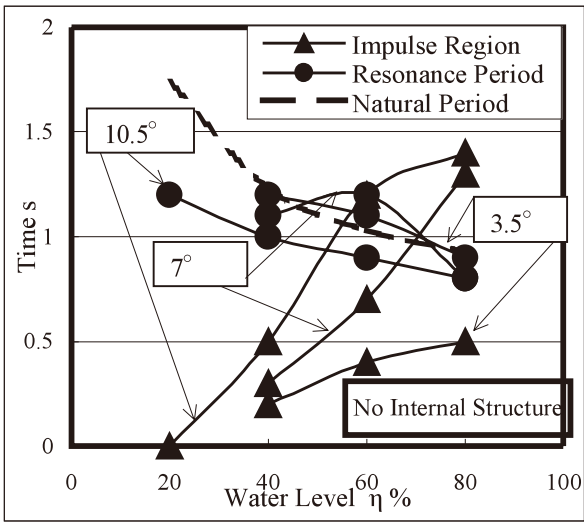
(b) Support Ring



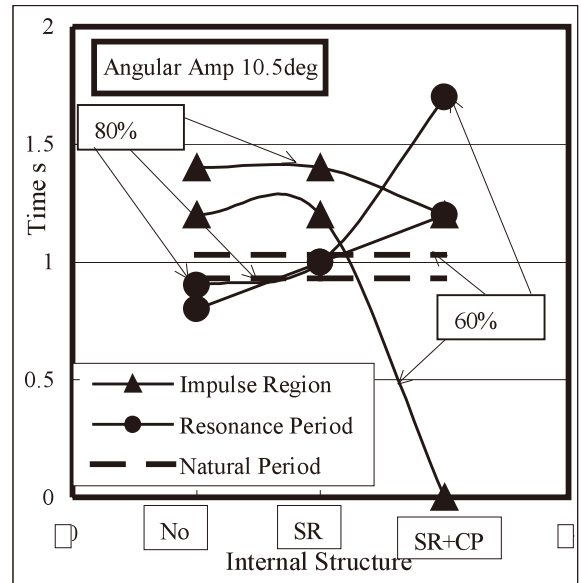
(c) Support Ring + Water Control Plate

Fig.3.9 Relation between Impulse Region, Resonance Period, Natural Period and Angular Amplitude

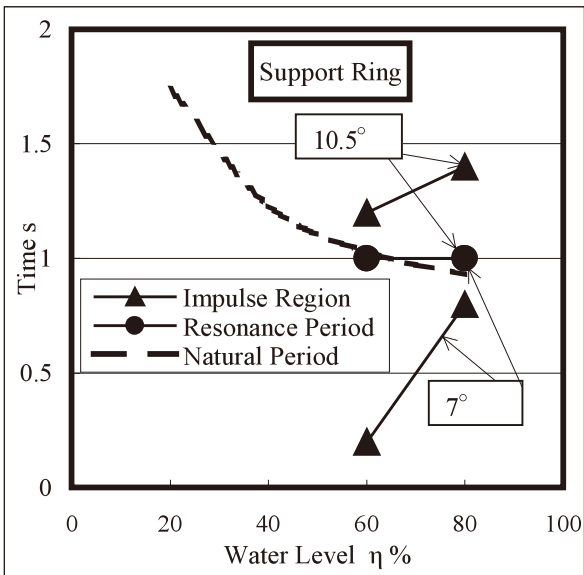
円筒タンクに生じるスロッシング現象に関する実験的研究



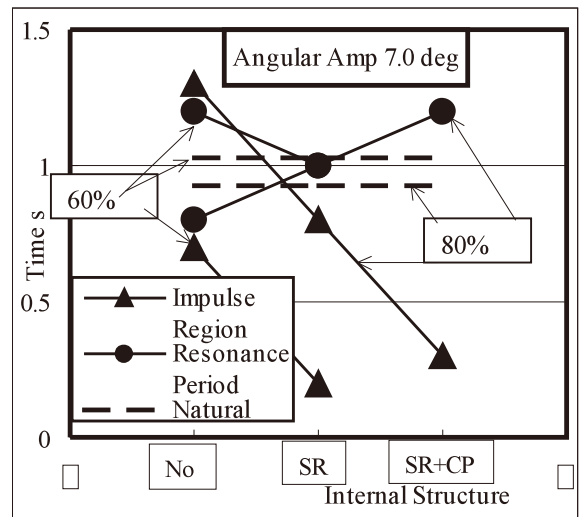
(a) No Internal Structure



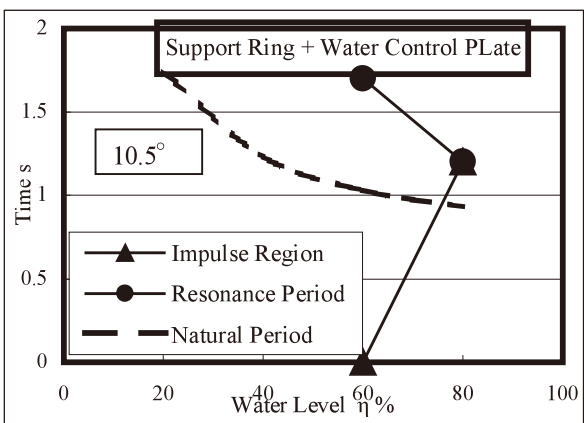
(a) Angular Amp 10.5 deg



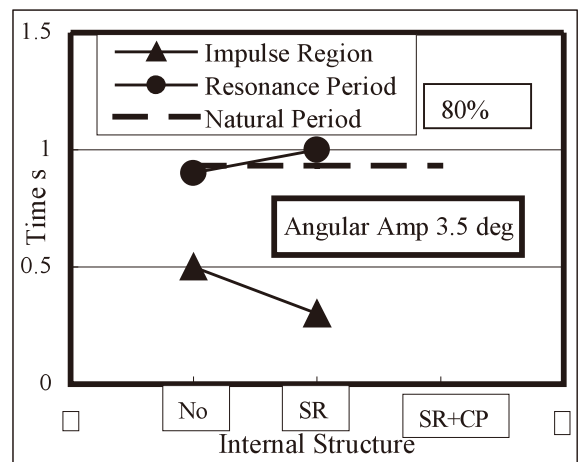
(b) Support Ring



(b) Angular Amp 7 deg



(c) Support Ring + Water Control Plate



(c) Angular Amp 3.5 deg

Fig.3.10 Relation between Impulse Region, Resonance Period, Natural Period and Water Level

Fig.3.11 Relation between Impulse Region, Resonance Period, Natural Period and Internal Structure

えられる。

図で破線は、荒井の式<sup>(2)</sup>による固有振動周期であるが、水位によって変化し、水位が大きくなるとともに小さくなっている。式からも分かるように、これは水位の増加は水の質量増加すなわち慣性増加となるためである。

#### (2)水位に対する変化

図 3.9 の場合と同様に、図 3.10 に水位に対する力積発生加振周期範囲、同調周期、固有振動周期の関係を、角振幅をパラメータとして示す。(a)、(b)、(c) は内部構造物による違いの結果である。

力積発生周期範囲は、水位の増加とともに増加しており、その変化は、特に内部構造物が無い場合、角振幅が大きいほど顕著で、内部構造物の影響が現れている。

同調周期は、構造物が無い場合とサポートリング+制水板の場合は、水位の増加とともに減少しているが、サポートリングの場合一定である。理由として、制水板により水の慣性が増加するようになることが考えられる。

固有振動周期は式の通り、水位の増加とともに曲線的に減少している。

#### (3)内部構造物に対する変化

図 3.11 に内部構造物に対する変化を水位をパラメータとして表し、(a)角振幅 10.5 度、(b)7 度、(c)3.5 の場合である。図中、横軸の「No」は内部構造物が無い場合、「SR」はサポートリングの場合、「SR+CP」はサポートリング+制水板の場合を表している。

力積発生周期範囲は、内部構造物があると狭くなっている。角振幅 10.5 度の場合、水位 80% のときより 60% のときがその効果は顕著である。しかし、角振幅 7 度の場合、水位 80% のときが 60% のときより顕著に現れている。角振幅が 3.5 度と小さくなると、その効果は小さくなる。これから、水位に対し、最適な開口度の内部構造物あると考えられる。

同調周期に対する影響は、角振幅 10.5 度と大きいときも、水位 80% の場合より 60% の場合が大きくなっている。水位が大きく水量が多いほど同調周期の変化は小さくなっている。水の慣性の方が内部構造物よりも影響が大きいと考えられる。

タンク内の液体によるスロッシングによる衝撃圧を抑制する目的で設置されているサポートリングや制水板の影響を調べるため実験を行い、次のことが得られた。

(1) サポートリングを付けた場合、内部構造物が無い場合に比べ、力積最大値は小さくなるとともに、力積発生に加振周期範囲は狭くなり、サポートリングによる抑制効果が見られた。

(2) サポートリングと制水板を付けると、サポートリングだけを付けた場合よりさらに抑制効果が顕著になる。

(3) スロッシングによる最大力積は、1 次固有振動数近傍で発生する。

おわりに、本研究に協力していただいた、卒研生小宮、竹本君および ST ソリューションズに加藤瞭氏に感謝いたします。

#### 参 考 文 献

- (1) 加藤ほか3名、構造内力としてのスロッシング圧の初期推定法、西部造船会会報、98(1999)、89.
- (2) 荒井誠、内構材をもつタンクのスロッシング、石川島播磨技報、25、6(1985)、360.
- (3) 竹本ほか5名、二重船殻中型タンカーのスロッシング模型実験、日本造船学会論文集、176(1994)、399.
- (4) 加藤瞭(ST ソリューションズ)による書簡、(2004).