

## 矩形断面容器において加振方向角を変化させた場合のスロッシング現象

Research on Sloshing Phenomenon of Changing Direction Angle on Rectangle Section Container

遠田 豊\*・井田 剛史\*\*・平野 廣和\*\*\*・佐藤 尚次\*\*\*\*

Yutaka ENDA, Tsuyoshi IDA, Hirokazu HIRANO and Naotsugu SATO

\*中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

\*\*博士 (工学) (株)十川ゴム 研究開発部 (〒599-8244 大阪府堺市中区上之 516)

\*\*\*工博 中央大学総合政策学部 教授 (〒192-0393 東京都八王子市東中野 742-1)

\*\*\*\*工博 中央大学理工学部土木工学科 教授(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

The sloshing phenomenon caused by long-period earthquake ground motions has been observed repeatedly in recent years. Overflow of liquid in water tanks often takes place. Damages of water tanks by the East Japan Earthquake of 2011 are the most recent example. In contrast to circular tanks, rectangular tanks show direction-dependent response behavior. In this paper, shaking experiment was conducted to make this effect clear by changing vibration direction. Experimental results suggest interaction of vibration modes.

**Key Words :** *sloshing, square section, rectangular section, direction angle*

### 1. はじめに

石油タンク以外の貯槽物, 例えば上水道配水施設, 汚水処理施設, 核燃料貯蔵施設などの大型容器, 特に矩形容器の内容液が地震発生時に溢流したり, 貯槽自体が破壊する被害が報告されている。これらは 2~5 秒のやや長周期地震動の影響で大型容器にスロッシング現象 (液面揺動の励起) が発生したことが一つの原因と考えられている。

2007 年 7 月 16 日に発生した新潟県中越沖地震 (M6.8)での東京電力柏崎刈羽原子力発電所内の縦 13.6m, 横 12.2m, 水深 11.8m の使用済み核燃料プール水が, オペレーティングフロア (管理区域) の全域にわたり溢れ出したものがある<sup>1)</sup>。この状況は, 3 号機に設置されているビデオカメラの映像記録から, 地震発生時に使用済み核燃料プール水が大きく波打ち, 水面とフロアには 40cm の高低差あったが, この高さを越える勢いでプールの水が放射線管理区域外へ溢流した状況が確認されている。さらに, 2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災 (M9.0)において, 東北電力女川原子力発電所内の使用済み核燃料貯蔵プールにおいて溢流事故が発生した<sup>2)</sup>。また, 被災地域内の上水道配水施設での大型矩形鋼製タンクの破損や, 各地での

FRP 製の矩形受水槽の破損被害も多数報告されている。ここでの被害は, 正方形断面容器を組み合わせた形状の受水槽に多く発生している傾向にある。以上の様な被害が実際に発生しており, 各種大型矩形断面容器におけるスロッシング現象の把握, さらにはスロッシング対策の必要性が挙げられている<sup>3)~7)</sup>。このような背景から, 近い将来必ず発生する東海, 東南海, 南海地震, 都市直下型地震に備えて矩形貯槽の動的な挙動を把握することは, 社会的に大きなニーズがあると考えられる。

これまで我々の研究グループでは, 東京電力 (株) 柏崎刈羽原子力発電所内の使用済み核燃料貯蔵プールの縮尺約 1/20 に相当する矩形断面容器を用いて, 長辺方向への一方向の加振ではあるが, スロッシング現象の検討を行ってきた<sup>8)</sup>。この成果の一つのスロッシング対策案として, 容器を 4 等分する形で金網を 3 枚設置すると, 加振中の波高を抑制することができ, かつ減衰も増大することを確認した。具体的には, スロッシング 1 次モードにおいて最大波高は 50%程度の低減が, 減衰定数は最大 3 倍程度の増加である。

しかしながら矩形断面容器には, 長辺方向と短辺方向にそれぞれ異なるスロッシング固有振動数が存在する<sup>9), 10)</sup>。このため, 矩形断面容器の加振

方向角を変えて加振させた場合、この異なるスロッシング振動が相互干渉を引き起こし、スロッシング挙動に影響を与えることが考えられる。また、正方形断面容器の特徴は、矩形断面容器とは異なり断面の辺長比が等しく、各辺のスロッシング固有振動数の値が等しくなることである。このため、正方形断面容器の加振方向角を変えて加振させた場合も液面揺動がどのような変化をするか評価が必要となる。鈴木ら<sup>11)</sup>、則竹ら<sup>12)</sup>及び著者ら<sup>13)</sup>の基礎的な研究によって、矩形断面容器において加振方向角が変化した場合に、スロッシング挙動に大きな変化を生じることが報告されている。

以上のことから本研究の目的は、矩形断面容器とその特別な例である正方形断面容器の2種類に関して、加振方向角を変化させた場合のスロッシング挙動の違いを把握し、正方形断面が特徴ある挙動を示すことを明らかにすることである。具体的には、矩形断面の長辺、短辺それぞれのスロッシングの1次と2次モードの固有振動数付近を入力振動数とし、加振方向を変化させながら加振実験を行い、容器の波高を計測してスロッシング挙動の違いを明らかにすることが目的である。

## 2. 実験概要

### 2.1 矩形断面容器モデル

本実験には、図-1に示す2種類のアクリル製容器を矩形断面容器モデルとして用いる。矩形断面容器モデルの内寸法を表-1に示す。モデル1は、内側部580mm×280mm、高さ330mm、厚み10mmの辺長比が約2:1の矩形断面容器である。また、モデル2は、内側部438mm×438mm、高さ394mm、厚み6mmの正方形断面容器である。これらの矩形断面容器モデルに120mmまで水を満たす。

### 2.2 実験パラメータの設定

実験に使用した小型振動台は、テーブルサイズ：1200mm×1200mm、最大搭載重量：700kg、最大変位：±51mm、振動数範囲0.5~100Hzである。この振動台で設定できるパラメータは、振動数、振幅、Wave count (回数)の3つである。そこで入力波形を詳細に把握することを目的として、一軸加速度計を振動台に設置する。また、水槽と振動台が同調しているかどうかを確認するために、一軸加速度計を水槽側壁にも設置する。ここでのサンプリング周波数は100Hz、計測方向は加振方向、計測時間は加振開始から加振終了までとする。

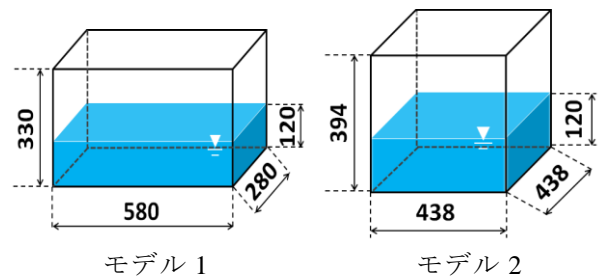


図-1 2種類の矩形断面容器モデル[単位：mm]

表-1 矩形断面容器モデルの内寸法

Model	容器の幅 [mm]	容器の奥行き [mm]	高さ [mm]
1	580	280	330
2	438	438	394

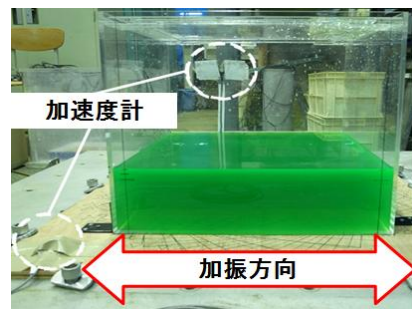


写真-1 加速度計設置状況

表-2 矩形断面容器のスロッシング1次と2次モード振動数理論値

	水深 [m]	容器の幅 [m]	1次モード [Hz]	2次モード [Hz]
長辺方向	0.12	0.58	0.88	1.97
短辺方向	0.12	0.28	1.56	2.89

表-3 矩形断面容器の振動装置の設定条件

	振動数[Hz]	振幅[mm]	起振時間[s]
長辺方向	0.9, 2.0	±3.0	5.0
短辺方向	1.6, 2.9		

表-4 正方形断面容器のスロッシング1次と2次モード振動数理論値

水深 [mm]	容器の幅 [mm]	1次モード [Hz]	2次モード [Hz]
120	438	1.11	2.30

表-5 正方形断面容器の振動装置の設定条件

振動数[Hz]	振幅[mm]	起振時間[s]
1.1, 2.3	±3.0	5.0

写真-1に加速度計設置状況と加振方向を示す。

一般に、矩形水槽のスロッシングn次の固有振動数 $f$  (Hz)は、水深 $H$  (m)と加振方向の幅 $L$  (m)の関係から算出することができ、式(1)の理論式で表される。ここで、 $g$ は重力加速度である。

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{(2n-1) \cdot \pi \cdot g}{L} \cdot \tanh\left(\frac{(2n-1) \cdot \pi \cdot H}{L}\right)} \quad (1)$$

式(1)より、実験で用いる矩形断面容器の長辺方向、短辺方向におけるスロッシング 1 次、2 次モード固有振動数の理論値は、表-2 に示すように 0.88Hz, 1.97Hz と 1.56Hz, 2.89Hz である。矩形断面容器を用いる場合の小型振動台の設定条件を表-3 に示し、長辺方向における入力振動数は、0.9Hz, 2.0Hz とし、短辺方向における加振実験の入力振動数は、1.6Hz, 2.9Hz とする。また、実験で用いる正方形断面容器のスロッシング 1 次、2 次モード振動数の理論値は、表-4 に示すように、それぞれ 1.11Hz, 2.30Hz である。正方形断面容器を実験に用いる場合の小型振動台の設定条件を表-5 に示し、入力振動数は、1.1Hz, 2.3Hz とする。

振幅は容器から溢流させないことを前提にして、片振幅 3mm に固定し、振動装置で設定できる Wave count は振動数に応じて変化させ、どの振動数においても加振時間は 5 秒間に統一する。実験の時間インターバルは、設定振動数ごとに静止した状態から始めることとする。

### 2.3 計測項目

波高計測はデジタルビデオカメラ（以下、DVC）を用いた非接触計測で行う。DVC の設置位置は、水槽から 900mm 離れた所とする。これは、コマ送り機能を用いて応答変位を算出する際、ズーム機能により水槽の一部を詳細に把握するためである。なお、水槽の内側端部が樹脂でコーティングされ、液面の挙動を把握しにくいため、水槽端部から 20mm 内側の波高を計測ポイントとする。その状況を写真-2 に示す。画像処理されたデータより液面挙動に対して応答波高、固有振動数、減衰定数を算出する。また、全体の水面形を把握できるように、水槽から 2400mm 離れた所にも DVC を設置する。DVC 撮影は、加振開始から液面挙動が停止するまで行うものとし、実験全体の状況を写真-3 に示す。

応答波高は、DVC で撮影した映像データをパソコンに取り込み、1 コマ 1/30 秒のコマ送り機能を用いることにより算出する。また、減衰定数の算出方法は、応答波高に固有振動数の±20%の範囲でバンドパスフィルターをかけて算出した減衰波形を用い、式(2)より Simplex 法を用いた非線形最適化により算出する<sup>6)</sup>。

$$\eta(t) = Ae^{-\omega_0 t} \cos(\omega_q t - \theta_0) \quad (2)$$

ここで、 $\omega_q$  は減衰角固有振動数、 $A$  は振幅、 $\theta_0$  は位相差、 $\omega_0$  は固有角振動数である。

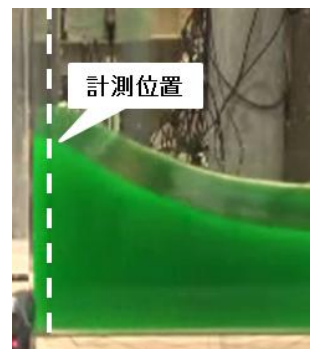


写真-2 応答波高算出ポイント

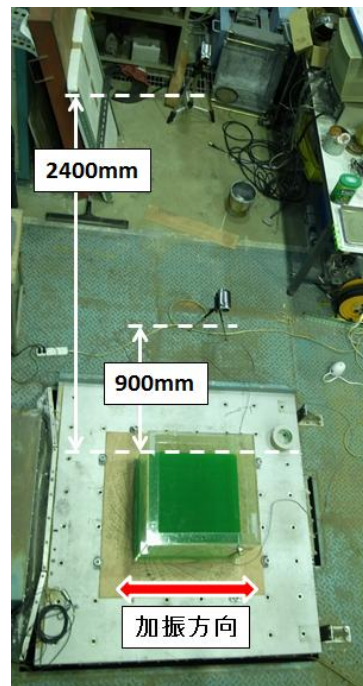


写真-3 実験全体の状況

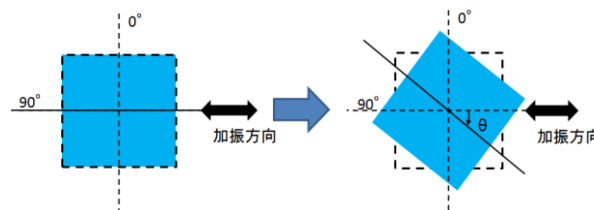


図-2 加振方向角の設定方法

### 2.4 加振方向角の設定方法

正方形断面容器の場合、容器断面の辺長比が等しく、それぞれの辺のスロッシング固有振動数の値が等しくなる。これに対して、矩形断面容器には、表-3 に示すように長辺方向と短辺方向でそれぞれ異なる 2 つの固有振動数が存在する。加振方向角を変化させた場合に、これら異なる振動が相互干渉を引き起こし、液面挙動に影響してくると考えられる。

本研究では、以上のことを踏まえ、矩形断面容器モデルを加振する方向角  $\theta$  を図-2 の様に定義し、

$\theta=0^\circ\sim 90^\circ$ の間で設定する。矩形断面容器の場合には加振方向角を  $15^\circ$  間隔で設定し、正方形断面容器の場合には、加振方向角を  $5^\circ$  間隔で設定する。加振方向角を変化させながら加振実験を行い、最大波高を計測してスロッシング挙動の違いを調べる。

### 3. 実験結果

#### 3.1 矩形断面容器の長辺方向加振の結果

##### (1) 1次モードの検討 (0.9Hz 加振)

図-3に1次モードの各加振方向角における無次元最大波高（以下、最大波高）と減衰定数の関係を示す。ここで各加振方向角における最大波高は、加振方向角  $0^\circ$  の場合の最大の波高で無次元化したものを示す。加振方向角が増加するにつれて、 $0^\circ\sim 30^\circ$  までと  $30^\circ\sim 90^\circ$  までに応答波高がほぼ線形に減少している。これは加振方向角を変えた場合、容器の幅方向の液面挙動と加振方向が同じ方向ではないため、加振時の入力エネルギーが余弦成分のみとなることによる。そのため、加振方向角が特に  $30^\circ$  を超えた所から大きくなるにつれて応答波高が減少すると考えられる。

減衰定数に関しては、加振方向角に関わらず  $0.0025\sim 0.0035$  とほぼ一定の小さい値をとる。

##### (2) 2次モードの検討 (2.0Hz 加振)

図-4に2次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数の関係を示す。1次モードの場合と同様に、加振方向角が増加するにつれて、応答波高が減少している。しかし、加振方向角が  $45^\circ$  の場合に最大波高が  $0.94$  となり、加振方向角が  $0^\circ$  の場合と同等の値となっていることがわかる。これは加振方向角が変化することで長辺方向の振動と短辺方向の振動が相互干渉し、混在モードが発生するためであると考えられる。

図-5の(a)に加振方向角  $0^\circ$  の場合、(b)に加振方向角が  $45^\circ$  の場合の振動数とパワースペクトルの関係を示す。図-5より、加振方向角が  $0^\circ$  の場合では、 $1.95\text{Hz}$  が卓越していることがわかる。長辺方向のスロッシング2次モード固有振動数の理論値が、表-4に示すように  $1.97\text{Hz}$  であるので、加振方向角が  $0^\circ$  の時には、長辺方向の2次モードの挙動を示している。これに対し、加振方向角が  $45^\circ$  の場合には、 $1.95\text{Hz}$  に加え、 $1.54\text{Hz}$  も卓越していることが確認できる。表-4に示すように短辺方向のスロッシング1次モード振動数は、 $1.56\text{Hz}$  である。以上より、加振方向角が変化することにより、長辺

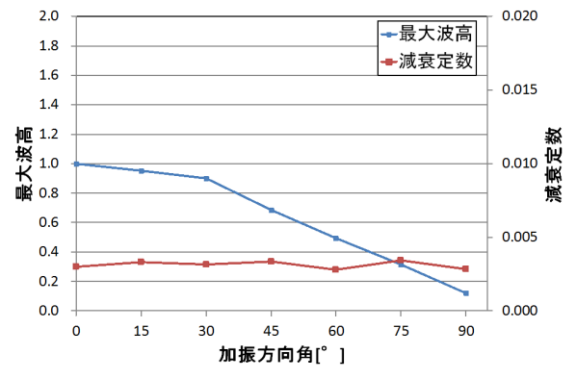


図-3 矩形断面容器長辺方向の1次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数

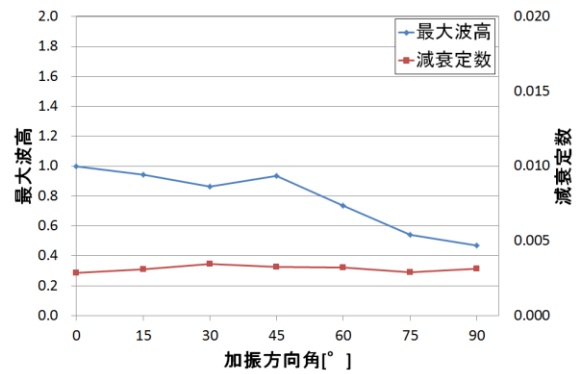
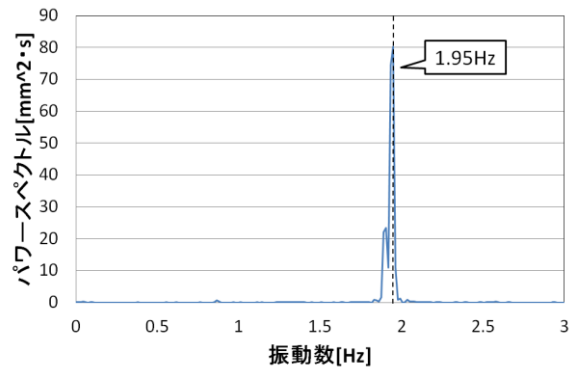
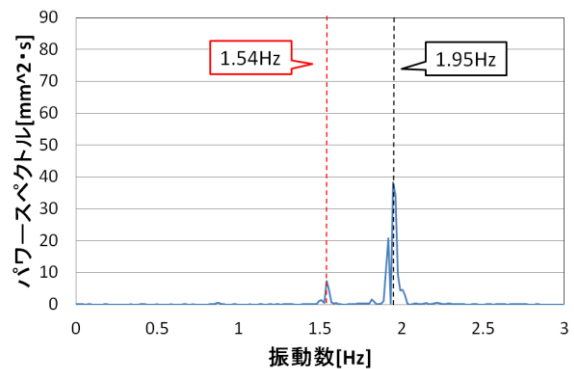


図-4 矩形断面容器長辺方向の2次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数



(a) 加振方向角  $0^\circ$



(b) 加振方向角  $45^\circ$

図-5 矩形断面容器長辺方向2次モードの振動数とパワースペクトルの関係

方向の2次モードと短辺方向の1次モードの2つの振動モードが混在することが明らかになった。さらに、加振方向角が変化したことにより、隅角部に波が集中するので、応答波高が増大した。

減衰定数に関しては、加振方向角に関わらず0.0025~0.0035とほぼ一定の小さい値をとる。

### (3) 長辺方向加振の特徴

長辺方向の加振の特徴は、1次モードでは加振方向角が変化することによって最大波高が減少することがわかる。また、2次モードでは、長辺方向と短辺方向のスロッシング振動が相互干渉を引き起こし、混在モードが発生することで最大波高が増大する可能性が考えられる。

## 3.2 矩形断面容器の短辺方向の結果

### (1) 1次モードの検討 (1.6Hz 加振)

図-6に1次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数の関係を示す。加振方向角が増加するにつれて応答波高が減少している。長辺方向と同様に、30°で勾配が変化している。これは長辺方向の1次モードと同様に加振方向角を変えた場合、容器の幅方向の液面挙動と加振の方向は同じ方向ではないため、加振時の入力エネルギーが余弦成分のみとなる。そのため加振方向角が大きくなるにつれて応答波高が減少すると考えられる。

また、図-7に加振方向角が0°の場合の加振から50秒間の応答波形を示す。図-7より、1次モードの挙動であるにも関わらず、加振方向角が0°の場合に応答波形がビートを打つ挙動を示している。これは加振方向の容器の幅が280mmであるのに対して、奥行き方向の容器の幅が580mmと加振方向に対して約2倍の長さとなることが原因と考えられる。写真-4に加振方向角が0°の場合の加振方向と直交している辺の加振から約20秒後の静止画を示す。写真-4から奥行き方向で容器の中心が節になる挙動を確認できる。

減衰定数に関しては、加振方向角に関わらず0.0025~0.0040と小さい値をとる。

### (2) 2次モードの検討 (2.9Hz 加振)

図-8に2次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数の関係を示す。図-8より、加振方向角が15°の場合に応答波高が1.42と最も大きくなるのがわかる。また、加振方向角が60°の場合にも応答波高が1.36と応答波高が大きくなっていることが確認できる。これは加振方向角が変化したことにより、短辺方向と長辺方向の異なる固有振動数が相互干渉を引き起こし、液面挙動に影響を与えたことが原因と推測される。

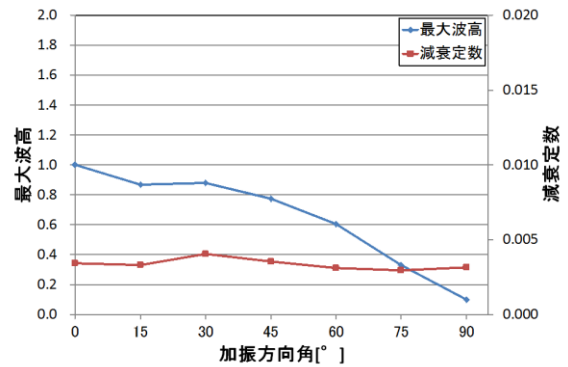


図-6 矩形断面容器短辺方向の1次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数

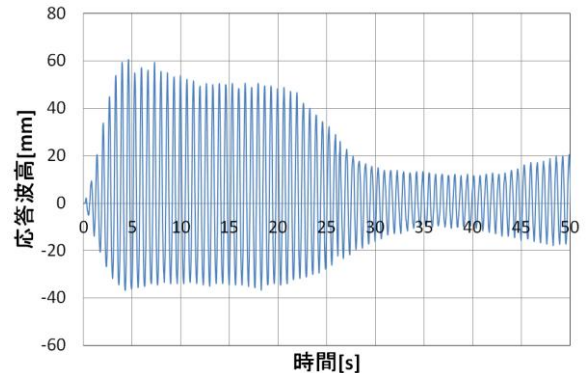


図-7 加振方向角0°の加振から50秒間の応答波形

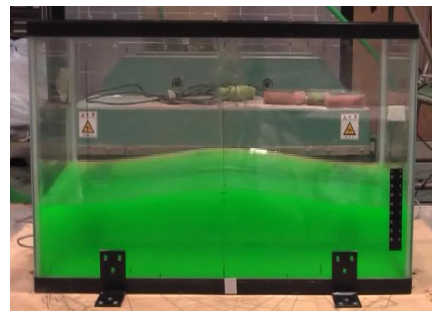


写真-4 短辺方向1次モードの長辺方向の液面挙動 (加振から20秒後)

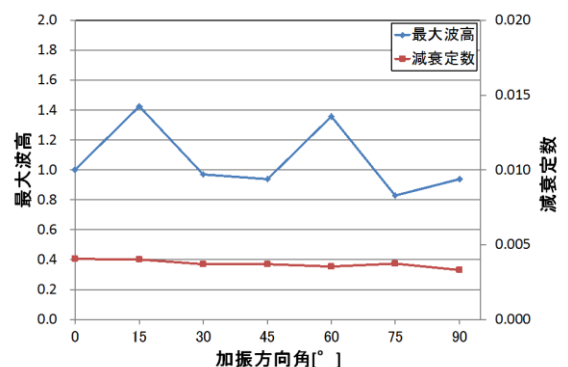


図-8 矩形断面容器短辺方向の2次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数

なる固有振動数が相互干渉を引き起こし、液面挙動に影響を与えたことが原因と推測される。

また、写真-5に加振方向角が $0^\circ$ の場合の加振方向と直交している辺の加振から約20秒後の静止面を示す。写真-5より、短辺方向を加振方向に用いているにも関わらず、加振方向と直交する長辺方向においても液面揺動が発生していることが見てとれる。これは1次モードの挙動と同様に、奥行き方向の容器の幅が加振方向の容器の幅に対して約2倍の長さとなることが原因と考えられる。

減衰定数に関しては、加振方向角に関わらず0.0030~0.0045と小さい値をとる。

### (3) 短辺方向加振の特徴

1次モード、2次モードを検討した結果より、矩形断面容器において短辺方向を加振方向に用いた場合には、加振方向と直角方向である長辺方向に依存する液面挙動も発生することが確認された。

## 3.3 正方形断面容器の結果

### (1) 1次モードの検討 (1.1Hz 加振)

1次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数の関係を図-9に示す。図-9より、1次モードでは、加振方向角を変化させていくと徐々に最大波高が増大し、加振方向角 $45^\circ$ の場合に最大波高が1.63となり、加振方向角 $0^\circ$ の場合に比べて、最大波高が約60%増加している。加振方向角 $45^\circ$ を超えると、最大波高が徐々に減少していき、加振方向角 $90^\circ$ の場合には最大波高が1.09となり、加振方向角 $0^\circ$ もしくは $5^\circ$ の場合の最大波高と同等の値となっている。矩形断面とは明らかに異なった挙動を示している。

写真-6の(a)に加振方向角が $0^\circ$ の場合、(b)に加振方向角が $45^\circ$ の場合の加振から約5秒後の静止面を示す。写真-6より、加振方向角が変化することで、正方形断面容器の対角線上で揺動し、最大波高側の隅角部で集中的に波高が大きくなっていることがわかる。

図-10に加振方向角が $0^\circ$ と $45^\circ$ の場合の加振から50秒間の応答波形を示す。加振方向角が $45^\circ$ の場合には、最大波高を観測した後に約10秒間にわたって応答波高がほとんど減衰せず、一定の波高を示している。この様に、加振方向角が変化することで、スロッシング挙動に影響を与えることがわかる。

一方、減衰定数に関しては、加振方向角に関わらず0.0025~0.0035と小さい一定の値となる。

### (2) 2次モードの検討(2.3Hz 加振)

図-11に2次モードの各加振方向角における最



写真-5 短辺方向2次モードの長辺方向の液面挙動（加振から20秒後）

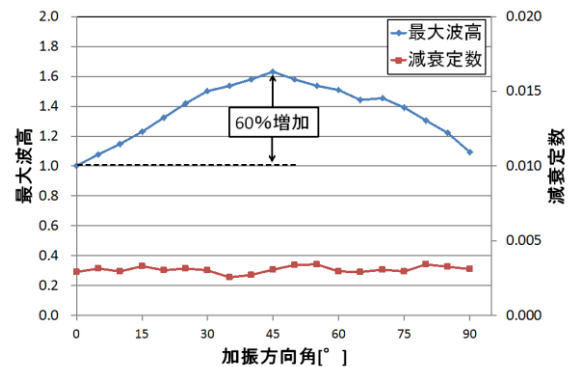
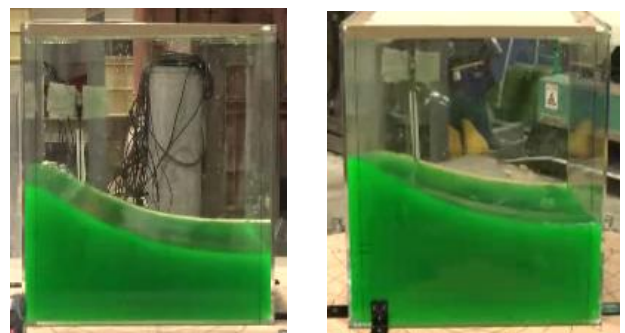


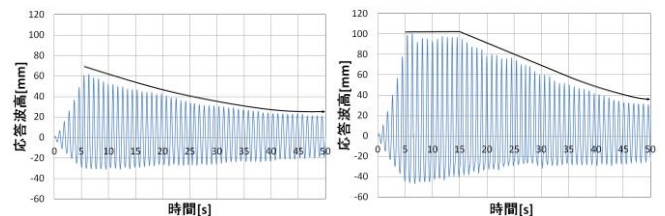
図-9 正方形断面容器の1次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数



(a) 加振方向角 $0^\circ$

(b) 加振方向角 $45^\circ$

写真-6 1次モードの液面挙動（加振から5秒後）



(a) 加振方向角 $0^\circ$

(b) 加振方向角 $45^\circ$

図-10 1次モードの加振から50秒間の応答波形

大波高と減衰定数の関係を示す。2次モードでは、加振方向角が $30^\circ$ ~ $75^\circ$ の場合に最大波高の値が50%程度増加している。加振方向角が $65^\circ$ の場合に最大波高が1.52と最も大きい値となっている。

図-12 に加振方向角  $0^\circ$  と  $65^\circ$  場合の加振から 50 秒間の応答波形を示す。図-12 より、加振方向が  $0^\circ$  と  $65^\circ$  の場合を比較すると、加振方向が  $65^\circ$  の場合の方が加振中に応答波高が大きくなっている。また、加振開始から約 5 秒後と約 10 秒後の 2 回にわたって応答波高が卓越していることがわかる。写真-7 の(a)に加振方向角が  $0^\circ$  の場合、(b)に加振方向角が  $45^\circ$  の場合の加振から約 5 秒後の静止画を示す。写真-7 より、加振方向角が変化することで、容器のそれぞれの辺に沿って 2 次モードのスロッシング挙動が起きていることが確認できる。以上のように、加振方向角が変化し液面形状、スロッシング挙動に影響を及ぼすことで、応答波高が増大することが考えられる。さらに、加振方向角が変化したことにより、回転する挙動が促されることも応答波高が増大した原因の一つと考えられる。

減衰定数に関しては、加振方向角に関わらず 0.0030~0.0050 とほぼ一定の値をとる。

### (3) 正方形断面容器の特徴

1, 2 次モードそれぞれのモード形状において、加振方向角が変化することにより応答波高が増大することが見られた。そこで 1, 2 次モードの応答波形に着目したところ、加振方向角が変化したことにより、応答波形に影響を与えることを確認した。また、2 次モードでは、加振方向角により液面形状が変化することがわかった。

また、図-13 の(a)に 1 次モードの場合、(b)に 2 次モードの場合の各加振方向角におけるピーク振動数を示す。ここで、式(1)よりスロッシング固有振動数は、容器の幅と水深に依存している。図-13 より、加振方向角が変化することで、加振軸上の容器の幅は変化するが、スロッシング固有振動数は加振軸上の容器の幅に依存せず、ほぼ一定の値を取っていることが確認できる。

## 4. おわりに

本論文は、矩形断面容器（辺長比約 2:1）モデルと正方形断面容器モデルを用いて、加振方向角を変化させながら加振実験を行い、加振方向の変化によるスロッシング挙動の違いを把握することを目的としてきた。まず、矩形断面容器においては以下のこと得られた。

- (1) 長辺方向の 1 次モードは、加振方向角が変化することで、最大波高がほぼ線形に減少した。
- (2) 長辺方向の 2 次モードは、加振方向角が  $45^\circ$

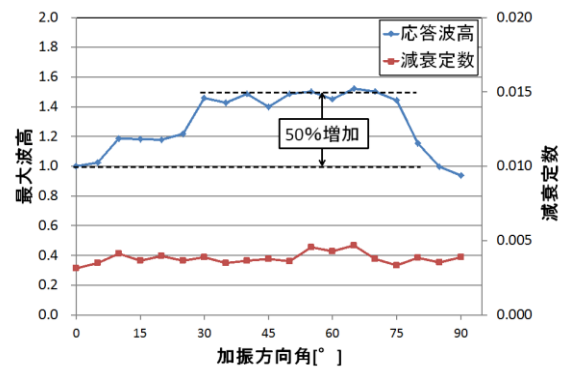
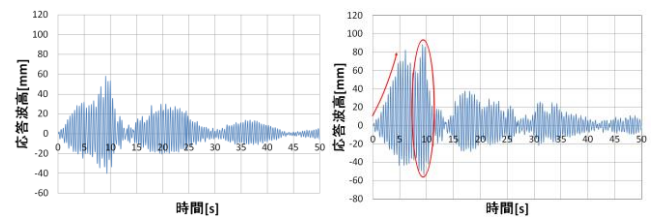


図-11 正方形断面容器の 2 次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数



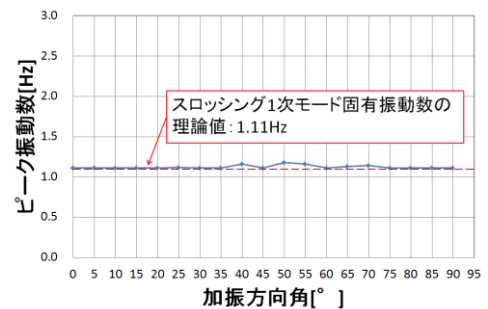
(a) 加振方向角  $0^\circ$  (b) 加振方向角  $65^\circ$

図-12 2 次モードの加振から 50 秒間の応答波形

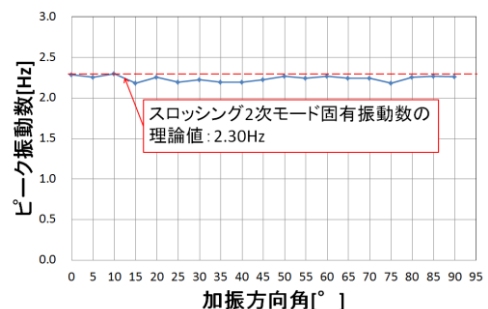


(a) 加振方向角  $0^\circ$  (b) 加振方向角  $45^\circ$

写真-7 2 次モードの液面挙動（加振から 5 秒後）



(a) 1 次モード



(b) 2 次モード

図-13 各加振方向角におけるピーク振動数

の場合に長辺方向の 2 次モードと短辺方向の 1 次モードの混在モードが存在した。

- (3) 短辺方向の 1 次モードは、長辺方向と同様に加振方向角の変化により、最大波高が減少した。
- (4) 短辺方向の 1, 2 次モードは、短辺方向を加振方向としているにも関わらず、加振方向と直交する長辺方向に依存する液面挙動を示した。
- (5) 減衰定数は、モード形状や加振方向角に関わらず 0.0025~0.0050 とほぼ一定の小さい値となった。

次に、正方形断面容器に関して、以下のことが得られた。

- (1) 1 次モードは、加振方向角 45°の場合に隅角部で集中的に波高が大きくなり、ここで最大波高が 0°と比較し 60%程度大きな値となった。
- (2) 2 次モードは、加振方向角が 30°~75°の場合に最大波高の 40%程度の増加が見られた。
- (3) 正方形断面容器は、矩形断面容器と異なり加振方向角が変化することで、最大波高が大きくなる。
- (4) 正方形断面容器は、加振方向角が変化してもスロッシング固有振動数がほぼ一定である。
- (5) 減衰定数は、モード形状や加振方向角に関わらず 0.0025~0.0050 とほぼ一定の小さい値となった。

以上により、本論では矩形断面容器(辺長比 2:1)と正方形断面容器を用いて加振方向角を変化させながら加振実験を行うことで、スロッシング挙動の違いを確認することが出来た。特に正方形断面に関しては矩形断面と異なり、加振方向角が変化することによって、隅角部で波高が著しく増大することを確認した。そのためスロッシング対策等を実施する場合には、隅角部での十分な注意と検討が必要である。今後の課題として、縮尺依存性を考慮して、形状が同一でかつ大きさの異なる容器を用いての振動実験を行う予定である。

## 謝 辞

本研究を行うに際し、中井商工(株) 連 重俊博士から貴重な助言と協力を得た。また、実験を行うに際しては、中央大学理工学部都市環境学科の学生諸君から協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。最後に、本研究の一部は、(独)日本学術振興会科学研究費・基盤研究 (C)、中央大学理工学部研究所共同研究助成及び中央大学特定課題研究費の給付を受けたことを付記する。

## 参考文献

- 1) 東京電力株式会社：柏崎刈羽原子力発電所 1~7 号機 原子炉建屋オペレーティングフロアにおける溢水について、健全委第 10-5 号、参考資料 1、2008. 9.
- 2) 朝日新聞：「東通原発、非常用発電機使えず 女川も 1 台故障」記事より、2011. 4. 8.
- 3) 坂井藤一：2003 年十勝沖地震における浮き屋根子規タンクの被害について、日本鋼構造協会、JSSC、No.52、2004. 4.
- 4) 消防研究所：平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震に際して発生した出光興産(株)北海道製油所原油タンク火災に係わる火災原因調査報告書、2004. 3.
- 5) 酒井理哉、東貞成、佐藤清隆、田中伸和：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 vol. 53、pp. 597-604、2007. 3.
- 6) 井田剛史、平野廣和、有田新平、佐藤尚次、奥村哲夫：スロッシング発生時の貯槽浮屋根挙動の一考察-φ4000 タンクモデルでの振動実験、土木学会論文集 A、Vol.63、No.3、pp. 444-453、2007. 6.
- 7) 座間信作、山田實、西晴樹、廣川幹浩、平野廣和、鈴木森晶：石油タンクのスロッシングによる内容液の溢流の算定、消防研究所報告、第 101 号、pp. 14-20、2006. 9.
- 8) 池田達哉、井田剛史、平野廣和、佐藤尚次：矩形断面容器におけるスロッシング対策案の検討、応用力学論文集、vol. 11、pp.549-556、2008. 8.
- 9) 豊田幸宏、田中伸和：平成 19 年新潟県中越沖地震時に発生した使用済燃料貯蔵プールの溢流を伴うスロッシング評価、(財)電力中央研究所環境科学研究所研究概要 2007 年度版
- 10) 渡辺昌宏、小林信之、本多智一、大野克徳、本井久之：隔壁挿入による矩形容器内液体スロッシングの制振特性、日本機械学会論文集(C編)、67 巻 657 号、pp. 1422-1429、2001. 5.
- 11) 鈴木森晶、奥村哲夫：加振方向角を変えた矩形型貯槽のスロッシング現象に関する基礎的実験、土木学会第 65 回年次学術講演会、I-646、2010. 9.
- 12) 則竹一輝、鈴木森晶、田中直貴、青木徹彦：加振角度を変えた矩形型貯槽の寸法比と水深比による液面挙動に関する研究、土木学会第 66 回年次学術講演会、I-668、2011. 9.
- 13) 遠田豊、平野廣和、井田剛史、佐藤尚次：加振方向角を変化させた矩形断面容器のスロッシング挙動、土木学会第 66 回年次学術講演会、I-668、2011. 9.

(2012 年 3 月 8 日受付)