

平成22年 3月 31日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007 ～ 2009  
 課題番号：19560486  
 研究課題名（和文） 実機浮屋根式タンクを考慮したスロッシング挙動の把握とその減衰対策への研究  
 研究課題名（英文） Experiment method proposal on sloshing behavior of real scale floating-roof-tank  
 研究代表者  
 平野 廣和（HIRANO HIROKAZU）  
 中央大学・総合政策学部・教授  
 研究者番号：80256023

## 研究成果の概要（和文）：

2003年9月に北海道で発生した平成15年十勝沖地震で浮屋根等を有する特定屋外貯蔵タンクにおいてスロッシング現象が生じ、浮屋根の破壊、沈没、火災発生といった事故が発生した。これを受けて、液面のスロッシングに伴う浮屋根の挙動の力学的特性についての検証が始まり、実規模レベルでのタンクによる検証を行うことが求められている。そこで、本研究では実際に使用されている実機浮屋根式タンクを用いて、ここにスロッシング現象を発生させる一つの実験方法を提案するものである。タンク内部に造波装置を設置し、エアシリンダーで造波装置をスロッシングの固有周波数に合わせて作動させることによりタンク内部の流体全体を動かし、これにより浮屋根にスロッシング現象を発生させることを試みるものである。この結果、実機タンクの浮屋根にスロッシング現象を発生させ、かつ妥当な減衰を得ることができた。

## 研究成果の概要（英文）：

The liquid sloshing phenomenon of oil storage tank was excited by the 2003 Tokachi-oki Earthquake. This phenomenon caused severe damage to oil storage tanks at Tomakomai igniting fire and sinking floating roofs. After this accident, verification of various, dynamic behavior of a floating roof due to liquid sloshing have been begun and it has been desired to verify it with the tank at the real scale level. Then, we propose the experiment method of generating the sloshing phenomenon in the floating roof tank using a real tank. This method uses the excitation equipment of the liquid sloshing phenomenon by the Wave Generator with air cylinders which is set up and moves the fluid in the tank. As a result, we succeeded in the generation of the liquid sloshing in a real tank and obtained appropriate damping factor of the liquid sloshing.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：スロッシング，減衰機構，実機タンク，浮屋根式タンク

1. 研究開始当初の背景

2003年9月26日に発生した北海道十勝沖地震(M=8.0)は、やや長周期地震動の影響により、震源から200km以上離れた苫小牧地区において7基のシングルデッキ型浮屋根を有する屋外石油貯蔵タンクにおいて沈没に至る甚大な被害が発生した。その内、2基のナフサタンクで発生した全面火災については、消火に困難を極めるものとなり、大きな社会的関心を集めた。この浮屋根の損傷は、地震の揺れに伴う貯蔵液の液面揺動(スロッシング)により発生したものと考えられる。

これを受けて浮屋根式屋外貯蔵タンクの浮屋根部分の損傷防止対策と改修措置に対する評価基準の策定に関する検討が行われるようになった。ここでは、実際の浮屋根の破壊状況や沈下状況に基づいた浮屋根の破壊メカニズムの解明と改修対策が検討され、技術基準として整備された。しかしながら、液面のスロッシングに伴う浮屋根の挙動の力学的特性については、中規模モデルでの検証が始まったばかりであり、実規模レベルでのタンクによる検証を十分行うことが希求されている。特に過去の被害調査から、直径40m程度のタンクでは浮屋根の最大上昇が両振幅で約2m以上に達した場合、浮屋根に甚大な被害が発生すると考えられているが、浮屋根の損傷がどのような液面形状に至った場合に生じたかについては、これから検討の余地が残されている。さらに現状では浮屋根が損傷から破壊に至る過程までを考慮したスロッシング挙動の研究は比較的少ない。また、具体的な浮屋根のスロッシング制振手法に関しても研究が始まったばかりである。

ところが、実規模レベルの浮屋根式タンクを用いてスロッシング現象を発生させるに



写真-1 1600KL インナーフロートタンク

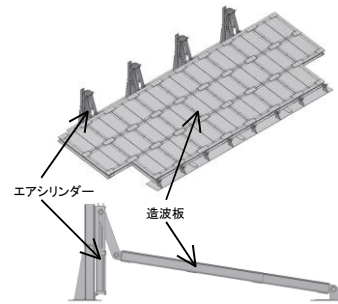


図-1 タンク内に設置した造波装置

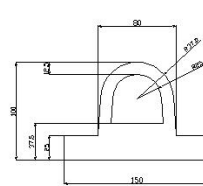


図-2 バッファー形状

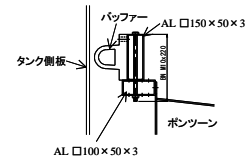


図-3 取付方

表-1 起振条件 (周波数1次モード0.21Hz)

パターン	造波回数 (回)	回転軸バッファの有無
T-1	40	あり
T-2	60	あり
T-3	40	なし

は、特別な実験方法を考案する必要がある。(独)防災科学研究所兵庫耐震工学研究センターの世界最大の大型振動台である E-ディフェンスを用いても直径12m程度までの実規模タンク模型でしか振動実験を行うことができない。そのため振動台以外の方法で実規模タンクでのスロッシング現象を発生させる実験手法を検討する必要がある。

以上の様な背景から、本研究では実際に使

用される実機タンクを用いて、浮屋根にスロッシング現象を発生させる一つの実験方法を提案するものである。本研究に使用したのは、写真-1 に示す秋田県男鹿市にある(株)ジャパンエナジー船川事業所の休止中タンクである直径 15.5m、高さ 10m の 1,600KL インナーフロートタンクである。このタンク内部に造波装置を設置し、エアシリンダーで造波装置をスロッシングの固有周期で作動させることによりタンク内部の流体全体を動かし、浮屋根にスロッシング現象を発生させる。

## 2. 研究の目的

実機タンクを用いてスロッシング現象を発生させる実験研究は、おおむね以下の 3 種類に分けることができる。

- ① 浮屋根を人力で加振する方法
- ② タンク内部に気泡を注入する方法
- ③ エアシリンダーを用いて浮屋根を鉛直方向に押し下げる方法

①は、タンク内部にある梯子を支持点、浮屋根ポンツーンアッパーデッキを作用点とした梃子を作り、数人で浮屋根をスロッシングの固有周期に合わせて押し付け、液面を揺動させるもので、最も簡単な方法である。しかし、浮屋根の減衰定数を計測すると、従来から述べられている値の 10 倍以上となる結果が得られている。

②は、タンク内部側板下部にエアノズルを設置し、屋外に置かれたコンプレッサーから一定の空気を浮屋根のスロッシング固有周期毎に放出し、液面を揺動させるものである。この手法は、揺動高が大きくなると注入された気泡が浮屋根に接するまでの時間が長くなり、かつ上昇する際に気泡が細かく分散することから、浮屋根の上昇に有効に使われなくなってくる。

③は、直径 38m、高さ 13m、15,000KL タ

ンクを用いて浮屋根揺動高さ両振幅 2m を目標として検討された。タンク側板に固定された 8 本のエアシリンダー (16kN/本) で浮屋根を直接鉛直方向に加振をした。その結果、浮屋根揺動高さ両振幅 1.8m 程度を得るとともに、0.5%未満の浮屋根の減衰定数を得ることができた。ここでは、浮屋根を直接エアシリンダーで加振することから、浮屋根を損傷させる可能性もあるので、事前に十分な構造検討が必要となる。しかしながら、直径 40m 程度の実機タンクを用いて浮屋根揺動高さ両振幅 2m 以上の実験を行うには、この手法以外適用可能なものはないのが現状である。

以上のことから、本研究では上記以外での新たな加振方法を考案するとともに、可能な限りコストを抑えることを命題とした。ここでは、造波装置をタンク底部に設置し、これをエアシリンダーで駆動させてタンク内部の流体全体を動かし、スロッシング現象を発生させる手法を提案するものである。さらに、実タンク実験でのバッファースロッシング減衰効果を評価実証する。

## 3. 研究の方法

### (1) 造波機とバッファアの概要

実験モデルは、写真-1 に示す直径約 15m、高さ約 10m、1600KL のインナーフロートデッキ (シングルデッキ) で、タンク内に海水を水深 4m まで充填した。起振方法は、図-1 に示すような造波装置をタンク底部に設置し、エアシリンダーを電磁弁およびスピードコントローラーを用いて制御することで、1 次のスロッシング固有周波数に同調させて造波板を鉛直方向に稼動させた。

バッファアモデルは、本実験タンクの浮屋根質量と速度応答スペクトルから浮屋根がタンク側面へ衝突する際のエネルギーを算出し、そのエネルギーを吸収できるポテンシ

ヤルエネルギーを有し、かつスロッシングの減衰効果を得るために、高減衰性ゴム配合および形状設計を行った。図-2 にバッファの断面形状を示しておく。なお、このバッファを図-3 に取付方を示すようにポンツーン外周部に 8 本設置した。

## (2) 実験方法

タンク底部に設置した造波装置での起振条件を表-1 に示す。なお、起振条件に回転軸バッファの有無とあるが、これは波高の増大に伴って、浮屋根が回転して梯子等の構造物と衝突するために評価が難しくなるので、回転軸にバッファを設置して、その回転運動を抑制しバッファ有無での減衰評価を可能にするためのものである。

表-1 の起振条件にてスロッシングを発生させた時の浮屋根上に生じる加速度、変位（波高）およびひずみを計測した。計測箇所は、浮屋根の起振軸上の 0.3R、0.6R および 0.9R の位置に加速度計およびひずみゲージを、さらに浮屋根の起振軸および起振軸直角方向の端部に変位計を取付け、起振時の各位置における水平及び鉛直方向の加速度、ひずみおよび変位を測定した。そして、浮屋根の振動減衰曲線からバッファ有無による減衰性能の比較評価を行なった。

## 4. 研究結果

パターン T-1 におけるバッファ有無での浮屋根変位量を図-4 に示す。バッファなしに対し、バッファを設置することで浮屋根の変位が 30%程度に抑制されていることがわかる。つまり、バッファによってスロッシング時の浮屋根揺動を抑制する効果が認められる。次に波高をさらに大きくしたパターン T-3 を図-5 に示す。この場合、バッファなしにおいて、途中変位が急激に減少する部分が確認された。これは波高が増大することによって浮屋根がタンク側板等と衝突し、

～バッファなし～ ～バッファあり～

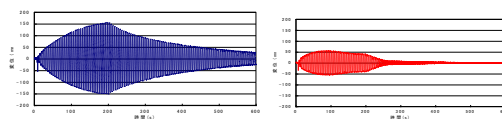


図 4 T-1 における浮屋根応答変位

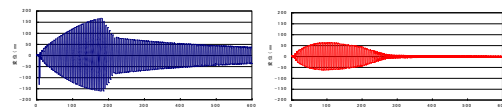


図 5 T-3 における浮屋根応答変位

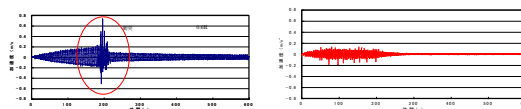


図 6 T-3 における浮屋根上の応答加速度 (0.6R)

表 2 各パターンにおける減衰定数

パターン	減衰定数	
	波高レベル5cm	波高レベル20cm
バッファ有	0.0081	0.0195(前年度まで)
		0.0037(今年度)
バッファ無	0.0160	0.0172(前年度まで)
		0.0174(今年度)

浮屋根の応答変位が乱れることを示している。この現象については、図-6 に示した加速度波形において急激に加速度が増大していることからも確認できる。一方で、バッファを設置した場合には、浮屋根がタンク側板等と衝突することなく、浮屋根の応答変位と加速度を抑制していることがわかる。

次に波高 5cm と 20cm レベルにおけるバッファ有無の減衰定数を表 2 に示す。なお、本タンクの減衰の傾向を確認するため、前年度までの双方の結果を示す。バッファなしを確認すると、波高 5cm レベルでは減衰定数が 0.8%であるが、波高 20cm レベルでは、1.95%と 0.37%となり大きく乖離していることがわかる。この理由として、前年度までの実験では、起振軸方向に梯子が設置されており、波高が増大に伴ってその梯子と衝突し、強制的に波高が抑制されて減衰が大きくな

る。それに対し、本年度の実験では、梯子のない方向を起振軸としたことで、波高 20cm レベルで浮屋根が他の構造物と衝突しないために減衰定数が小さくなったと考えられる。これらは本タンク特有の傾向と言える。この時の減衰定数 0.37%は、消防研究センターが実施した 3 万 KL クラスでの実験で得た減衰定数 (0.5%) とほぼ一致する。一方で、バッファーを設置した場合、波高レベルに関係なく 1.7%前後の減衰定数を有することがわかる。つまり、浮屋根の運動エネルギーに応じてバッファーが変形し、そのエネルギー吸収することでスロッシングを減衰させる効果が得られたものと考えられる。

本研究により、実タンクでバッファーのスロッシング減衰効果を確認することができた。さらに、バッファーで浮屋根と他の構造物との衝突を防ぐことも確認できた。しかし、本タンクをはじめ浮屋根式タンクには多数の種類が存在する。そのため、タンクの各仕様に基づいた浮屋根の強度評価を実施し、浮屋根に生じる断面力を低減する最適なバッファー設計を行い、浮屋根式タンクのスロッシング減衰装置として実用化を図ることが今後の課題と考えている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- ① 井田剛史, 平野廣和, 森川卓保:造波機を用いての実機浮屋根式タンクでのスロッシング実験方法の提案, 土木学会論文集 A 編, Vol.65, No.3, pp568-573, 2009, 査読有
- ② 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, 土木学会応用力学論文集 No.11, pp549-556, 2008, 査読有
- ③ 井田剛史, 坂東譲, 平野廣和, 佐藤尚次: 浮屋根式貯蔵タンクのスロッシング減衰対策- $\phi$ 4m タンクモデルの振動実験-, 土木学会地震工学論文集 No.29, pp510-519, 2007, 査読有
- ④ 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 -  $\phi$ 4000 タンクモ

デルでの振動実験, 土木学会論文集 A 編, Vol.63, No.3, pp444-453, 2007, 査読有

- ⑤ 井田剛史, 平野廣和, 鈴木森晶, 坂東譲, 佐藤尚次: 浮屋根式貯蔵タンクのスロッシング減衰対策 -  $\phi$ 0.6m タンクモデルの振動実験-, 土木学会論文集 A 編, Vol.63, No.1, pp242-251, 2007, 査読有

〔学会発表〕(計 7 件)

- ① 池田達哉, 佐藤尚次, 平野廣和, 井田剛史: 矩形断面容器におけるスロッシング対策に関する一考察, 土木学会関東支部第 37 回技術研究発表会, I-37, 2010.3.12., 日本大学理工学部
- ② 池田達哉, 佐藤尚次, 平野廣和, 井田剛史: 矩形断面容器におけるスロッシング対策に関する一提案, 土木学会第 64 回年次学術講演会概要集, I-407, 2009.9.2., 福岡大学
- ③ 池田達哉, 佐藤尚次, 平野廣和: 矩形断面容器におけるスロッシング対策案の検討, 第 36 回土木学会関東支部技術研究発表会, I-33, 2009.3.15., 千葉工業大学
- ④ 井田剛史, 平野廣和, 佐藤尚次, 連重俊: 実機タンクでのスロッシング実験による制振装置の検証, 土木学会第 63 回年次学術講演会概要集, I-182, 2008.9.10., 東北大学
- ⑤ 池田達哉, 平野廣和, 佐藤尚次, 井田剛史: 矩形断面容器における自由表面でのスロッシング現象把握と対策案の検討, 土木学会第 63 回年次学術講演会概要集, I-185, 2008.9.10., 東北大学
- ⑥ 井田剛史, 平野廣和, 連重俊: 実タンクでのスロッシング制振装置の実証実験, 土木学会関東支部第 35 回技術研究発表会, I-46, 2008.3.14., 芝浦工業大学
- ⑦ 池田達哉, 平野廣和, 佐藤尚次, 井田剛史: 矩形断面容器における自由表面でのスロッシング現象の把握, 土木学会関東支部第 35 回技術研究発表会, I-45, 2008.3.14, 芝浦工業大学
- ⑧ 井田剛史, 平野廣和, 連重俊: 1600KL 浮屋根式タンクでのスロッシング減衰装置の検証実験土木学会第 62 回年次学術講演会概要集, I-563, 2007.9.12., 広島大学

〔その他〕

ホームページ等

- ① [http://www2.chuo-u.ac.jp/clip/2008seeds\\_files/03\\_TAMA/2204\\_Hirano\\_Hirokazu.html](http://www2.chuo-u.ac.jp/clip/2008seeds_files/03_TAMA/2204_Hirano_Hirokazu.html)
- ② [http://www.chuo-u.ac.jp/chuo-u/randdev/pdf/f02\\_04\\_01\\_2008-17.pdf](http://www.chuo-u.ac.jp/chuo-u/randdev/pdf/f02_04_01_2008-17.pdf)

6. 研究組織

(1)研究代表者

平野 廣和 (HIRANO HIROKAZU)

中央大学・総合政策学部・教授

研究者番号：80256023

(2)研究分担者

(3)連携研究者

奥村 哲夫 (OKUMURA TETSUO)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：70078913

丸岡 晃(MARUOKA AKIRA)

八戸工業高等専門学校・建設環境工学科・

准教授

研究者番号：30310973