

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月15日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20360256

研究課題名（和文） 浮屋根と液体の非線形性を考慮した大型液体貯槽の地震時スロッシング理論の体系化

研究課題名（英文） SYSTEMATIZATION OF THEORY OF SEISMIC SLOSHING IN LARGE-CAPACITY LIQUID STORAGE TANKS TAKING ACCOUNT OF NONLINEARITIES DUE TO LIQUID AND FLOATING ROOF

研究代表者

松井 徹哉（MATSUI TETSUYA）

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：70023083

研究成果の概要（和文）：浮屋根と液体の非線形性を考慮した大型液体貯槽の地震時スロッシング解析理論を体系化し、縮小模型による振動台実験を実施してその妥当性を検証した。さらにその成果に基づいて、2003年十勝沖地震で発生したシングルデッキ型石油貯槽浮屋根の損傷・沈没の原因究明を試み、浮屋根や液体の非線形性に起因する非線形振動モードの存在がポンツーンに過大な応力を発生させ、浮屋根を座屈・沈没に至らせる可能性のあることを指摘した。

研究成果の概要（英文）：The theory of seismic sloshing in large-capacity liquid storage tanks taking account of nonlinearities due to the liquid and the floating roof has been developed, and validated by performing the shaking table tests using reduced-scale models. The theory has been applied to clarify the mechanism of failure and submergence of the single-deck type floating roofs damaged during the 2003 Tokachioki earthquake. It was shown that the nonlinear oscillation modes produce excessively large stresses in the pontoon, which may cause the pontoon buckling followed by the submergence of the roof.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2009年度	5,000,000	784,941	5,784,941
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
総計	14,400,000	3,604,941	18,004,941

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：液体貯槽、浮屋根、スロッシング、長周期地震動、流体 - 構造連成作用、非線形振動、ポテンシャル理論、有限要素法

## 1. 研究開始当初の背景

2003年の十勝沖地震では、震源から200km以上離れた苫小牧市の製油所で大型石油貯槽7基の浮屋根がスロッシング（液面動揺）により沈没し、うち1基が全面火災に至る甚大な被害が発生した。これは平野部で増幅された長

周期の地震動が固有周期の比較的長い大型石油貯槽の過大なスロッシング応答を励起したためと推測される。スロッシングにより浮屋根が沈没し油面が大気に晒されるという極めて危険な事態に至った被害は、わが国では初めてのことである。沈没した貯槽の浮屋根はい

ずれも中央の曲げ剛性の極めて低いデッキ部と外周の剛性の比較的高いポンツーン部(浮き室)から成るシングルデッキ型浮屋根である。ポンツーン部にはスロッシング波圧により座屈した痕跡が残されており、損傷した浮き室に原油が浸入し徐々に浮力を失って沈没に至ったと想像される。危険物保安技術協会の報告書によると、このポンツーンの座屈は液面の有限振幅変位やデッキ部の大変形に伴うポンツーンの楕円化が原因であると指摘されている。同様の被害は、来るべき南海トラフ地震などの海溝型巨大地震の際には、関東・濃尾・大阪平野など、石油コンビナートが散在する全国のあらゆる大型平野で広域的に発生することが予測され、その対策が喫緊の課題となっている。

この地震を契機として、大型液体貯槽の浮屋根審査基準に係る消防法告示(平成17年総務省告示第30号)が改正され、長周期地震動の影響を考慮した浮屋根の耐震強度評価が義務づけられるようになった。改正告示では、液面の有限振幅変位やデッキ部の大変形に伴うポンツーンの楕円化変形を考慮することとして、浮屋根強度の照査式が示されているが、それらは実用を目的とした簡易評価式であり、その妥当性については今後、浮屋根と液体の非線形性を考慮したスロッシング解析や実験との比較によって詳細に検証されることが望まれる。

以上のように、浮屋根の耐震強度評価には浮屋根-液体連成系の非線形性を考慮した解析が必要となるが、現状ではこのような解析法が十分に確立されているとは言い難い。

## 2. 研究の目的

本研究では、スロッシングによる被害が特に集中しているシングルデッキ型浮屋根を有する大型円筒液体貯槽を対象とし、長周期地震動が浮屋根挙動に及ぼす影響を検討するために、浮屋根-液体連成系の非線形性を考慮したスロッシング解析理論を体系化し、その妥当性を模型振動台実験によって検証する。さらにその成果に基づいて、2003年十勝沖地震で発生したシングルデッキ型浮屋根の損傷・沈没のメカニズムを解明し、合理的な浮屋根の耐震強度評価法と耐震補強法の提案に結びつける。

## 3. 研究の方法

(1) 浮屋根と液体の非線形性を考慮した大型円筒液体貯槽のスロッシング解析理論を体系化し、スロッシング解析プログラムを開発する。浮屋根の非線形性としてデッキ部の大変形によ

る膜応力効果を、液体の非線形性として有限振幅液面変位を考慮する。液体に対しては液面条件(運動学的条件および動力学的条件)を除く全境界条件を満たすポテンシャル理論の解析解を、浮屋根に対しては有限要素法を適用する結合解法を採用する。これにより、液体部分の要素分割が省略でき、かつ浮屋根と液体の非線形連成挙動の追跡を効率的に実行できる構造流体連成スロッシング解析プログラムの開発を目指す。

(2) 浮屋根と液体の非線形性を考慮した構造流体連成スロッシング解析プログラムの妥当性を検証するために、円筒貯槽模型の振動台実験を実施する。相似則を考慮して製作した浮屋根と円筒貯槽の縮小模型を振動台上に設置し、同じ相似則に従って時間軸を縮小した地震動波形を地震波再現装置により再現し加振する。入力地震動として、2003年十勝沖地震のK-NET 苫小牧波を採用する。入力加速度、液面・屋根面の変位などを計測し、解析値と比較してその妥当性を検証する。

(3) 2003年十勝沖地震で発生した浮屋根の損傷・沈没のメカニズムの解明を試みる。浮屋根と液体の非線形性を考慮した構造流体連成スロッシング解析プログラムによりポンツーンに発生する応力を算定し、座屈耐力と比較して、沈没につながる座屈破壊の発生の可能性の有無を判定する。

(4) シングルデッキ型浮屋根のスロッシング挙動や耐震強度に及ぼす非線形要因の影響を分析し、合理的な浮屋根の耐震強度評価法と耐震補強法の提案に結びつける。

## 4. 研究成果

(1) 浮屋根と液体の非線形性を考慮した大型円筒液体貯槽のスロッシング解析理論として、液体には有限振幅ポテンシャル理論を、浮屋根には大たわみシェル理論を適用する構造流体連成スロッシング解析理論を体系化し、スロッシング解析プログラムを開発した。液体の運動を連続方程式(ラプラス方程式)および側壁・底面条件を満たす解析解で記述し、浮屋根を有限要素にモデル化することによって、液体部分の要素分割が省略でき、浮屋根と液体の非線形連成挙動の追跡を効率的に実行できる構造流体連成スロッシング解析プログラムの開発に成功した。

(2) 浮屋根と液体の非線形性を考慮したスロッシング解析理論の妥当性を検証するために、

模型振動台実験を実施した。実機との相似則を考慮して製作した浮屋根と円筒貯槽の縮小模型を振動台上に設置し、同じ相似則に従って時間軸を縮小した地震動波形を入力させた。入力地震動としては、2003年十勝沖地震のK-NET苫小牧EW波を採用した。

実験に使用した模型は、内半径800mmのステンレス鋼製の縦型円筒貯槽模型と外半径790mmのシングルデッキ型浮屋根模型とで構成される(図1)。浮屋根模型はデッキ部を塩化ビニル膜製、ポンツーン部をアクリル製の中空箱型断面とし、実機3万キロリットル貯槽を想定したR25モデル用と10万キロリットル貯槽を想定したR40モデル用の2体を用意した。内容液には水道水を用い、液深をR25モデルでは480mm、R40モデルでは300mmとした。浮屋根変位の計測には、各計測点の3次元的な動きを8台のCCD(固体撮像素子)カメラにより同時撮影し、撮影した映像をモーション・キャプチャシステムによりデジタルデータに変換する方法を採用した。

実験結果から得られた結論は以下のように纏められる。

3万キロリットル貯槽を想定したR25モデル実験では、線形1次モードが支配的であるものの、周方向0次および2次の非線形モードが内部共振によって励起されることが確認された。

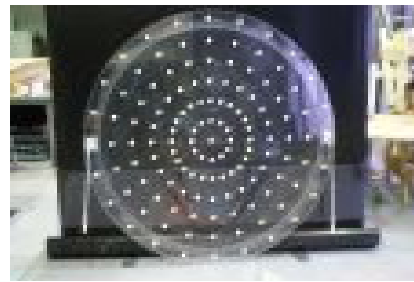
10万キロリットル貯槽を想定したR40モデル実験では、線形1次モードが主体であるものの、線形2次モードの影響も無視できないこと、また周方向0次、2次に加えて、3次の非線形モードが内部共振により励起されることが確認された。

周方向3次の非線形モードの発生は従来の摂動理論では説明できない現象であり、消防法告示でもその存在は考慮されていない。山本ら(日本建築学会構造系論文集、第643号、2009)は浮屋根の幾何学的非線形性を考慮した有限要素解析によって、周方向3次の非線形モードが励起される可能性を指摘し、その原因を線形2次モードの固有周期とこの3次の非線形モードの固有周期が接近しているためと分析しているが、その発生が実験により観測されたのは本研究によるのが最初である。

後述するように、本実験で観測された浮屋根の非線形挙動は、浮屋根と液体の非線形性を考慮したスロッシング解析理論による結果と定性的に良い対応を示すことが検証されたが、実験における避けがたい計測誤差のために、線形応答に比べて一桁小さい非線形応答を定量的に精度良く予測できるまでは至らなかった。その後、回転防止装置の改良とレー



貯槽模型



浮屋根模型

図1 実験模型

ダー変位計を使用した再実験により、R25モデルについては解析値と定量的にも良い一致を示す計測結果が得られた。

(3) 浮屋根と液体の非線形性を考慮したスロッシング解析理論を2003年十勝沖地震で被災したシングルデッキ型浮屋根を有する円筒石油貯槽群に適用し、浮屋根の損傷・沈没のメカニズムの解明を試みた。

解析結果から得られた結論は以下のように要約される。

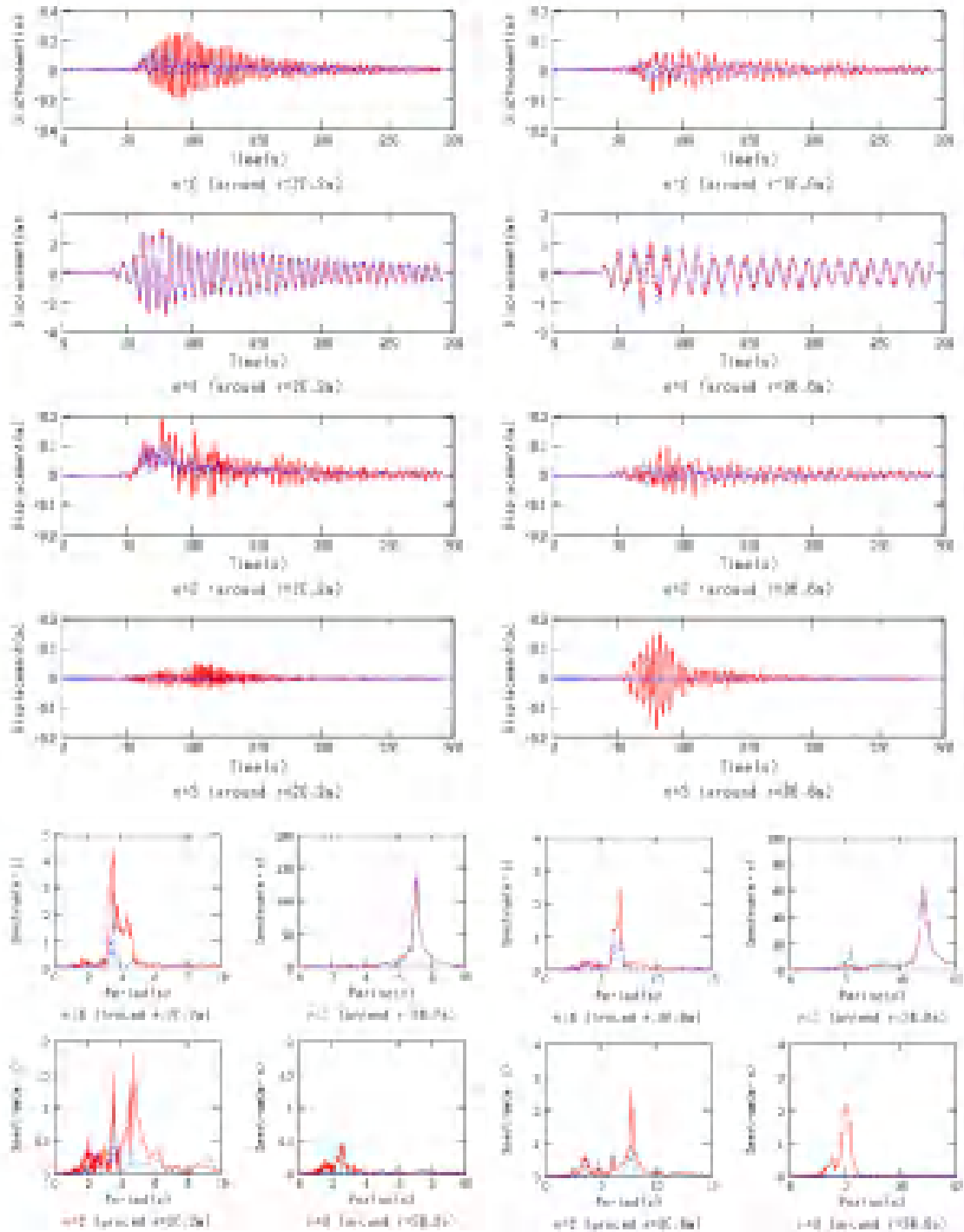
浮屋根の応答には、周方向1次の線形応答のほかに、液面や浮屋根の非線形性に起因する周方向0次、2次、さらに10万キロリットル貯槽の場合には3次の非線形モードが存在する(図2)。この解析結果は前述の模型振動台実験で観測された性状と定性的に良い対応を示している。

これらの非線形モードは、液面の有限振幅変位やデッキ部の大変形に伴う膜応力効果によって生じるもので、ポンツーンに鋼材の座屈限界を超える過大な軸圧縮力と面外曲げモーメントを発生させる。

2003年十勝沖地震で多発した浮屋根の損傷・沈没被害は、非線形モードの振動により発生したポンツーンの過大応力が原因となった可能性が極めて高い。

ポンツーン応力には、液面の非線形性よりも浮屋根の幾何学的非線形性、特にデッキ部の大変形に伴う膜応力の影響が大きい。

浮屋根の幾何学的非線形性を考慮することにより、ポンツーンには消防法告示では考

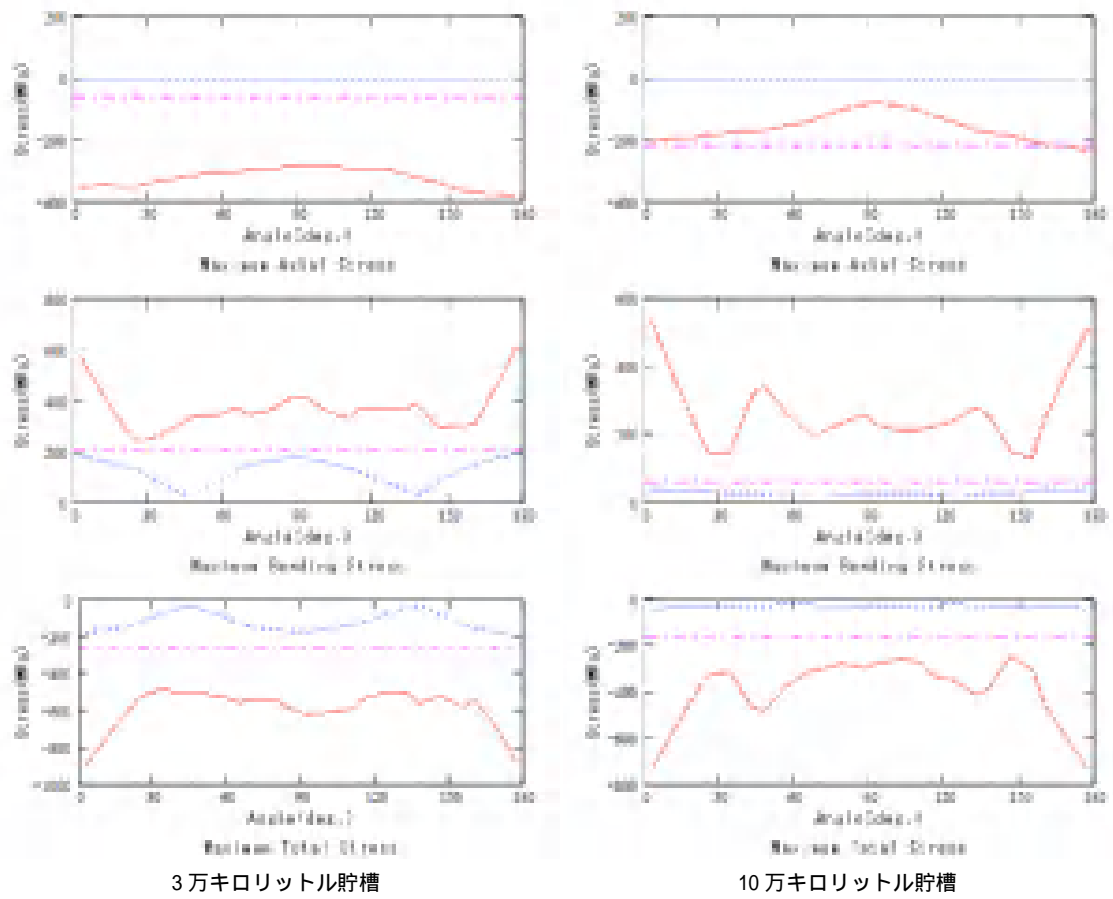


3万キロリットル貯槽 10万キロリットル貯槽  
 図2 ポンツーン変位の周方向フーリエ展開モード振幅の時刻歴とフーリエ振幅スペクトル  
 (赤実線：幾何学的非線形性考慮；青点線：幾何学的非線形性無視)

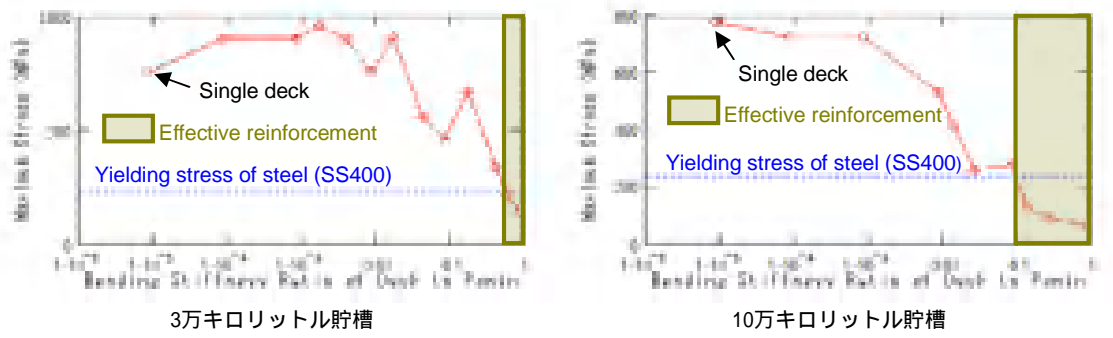
慮されていない線形1次モード変形による軸応力や線形2次モード変形による周方向3次の面外曲げ応力が発生しうる。これらの非線形モードの存在を見過ごしている改正消防法告示は、ポンツーン応力を過小評価する危険性があり、再検討が望まれる（図3）。

(4) シングルデッキ型浮屋根の応力には、液

面や浮屋根の非線形性に起因する非線形振動モードの影響が大きいため、耐震補強に当たっては、これらの非線形モードの発生を抑制する方法が効果的であるとの観点から、ダブルデッキ型への改修によりデッキ部の曲げ剛性を高める補強法を検討し、補強の効果を数値解析によって確認した。その結果、補強に必要なデッキ曲げ剛性のポンツーン剛



3万キロリットル貯槽 10万キロリットル貯槽  
 図3 ポンツーン最大応力度の周方向分布 告示式との比較  
 (赤実線：幾何学的非線形性考慮；青点線：幾何学的非線形性無視；紫鎖線：告示式)



3万キロリットル貯槽 10万キロリットル貯槽  
 図4 ポンツーン最大応力度とデッキ ポンツーン曲げ剛性比の関係

性に対する比として、3万キロリットル貯槽の場合70%程度を、10万キロリットル貯槽の場合10%程度を、暫定的な補強目標として提案した(図4)。

5. 主な発表論文等  
 (研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計10件)  
 永谷隆志、松井徹哉、シングルデッキ型浮屋根貯槽模型の地震時スロッシング

実験、圧力技術、査読有、50巻1号、2012、16-23、  
松井徹哉、永谷隆志、解析解と有限要素法の結合解法による浮屋根式円筒液体貯槽の非線形スロッシング解析、日本建築学会構造系論文集、査読有、第669号、2011、1915-1924、  
 永谷隆志、松井徹哉、浮屋根式円筒液体貯槽模型の地震時スロッシング実験線形ポテンシャル理論解の実験による検証、日本建築学会構造系論文集、査読有、第659号、2011、53-62、

永谷隆志、松井徹哉、解析解と有限要素法の結合解法による浮屋根を有する2次元矩形貯槽の非線形スロッシング解析、日本建築学会構造系論文集、査読有、第644号、2009、1723-1730、

T. Matsui, Y. Uematsu, K. Kondo, T. Wakasa and T. Nagaya, Wind Effects on Dynamic Response of a Floating Roof in a Cylindrical Liquid Storage Tank, ASME Journal of Pressure Vessel Technology, 査読有, Vol. 131, Issue 3, 2009, 031307/1-10,

T. Matsui: Sloshing in a Cylindrical Liquid Storage Tank with a Single-deck Type Floating Roof under Seismic Excitation, ASME Journal of Pressure Vessel Technology, 査読有, Vol. 131, Issue 2, 2009, 021303/1-10,

松井徹哉、植松康、近藤宏二、若狭拓夫、永谷隆志、頂部開口型円筒液体貯槽における浮屋根の強風時スロッシング応答、日本建築学会構造系論文集、査読有、第636号、2009、235-242、

松井徹哉、応答スペクトル法による円筒液体貯槽浮屋根の地震時スロッシング応答の予測、日本建築学会構造系論文集、査読有、第627号、2008、741-748

〔学会発表〕(計2件)

T. Nagaya, T. Matsui, Model Tests on Sloshing in a Cylindrical Liquid Storage Tank with a Single-deck Type Floating Roof, International Workshop on Advances in Seismic Experiments and Computations, March 13, 2012, Meijo University, Nagoya Japan,

永谷隆志、松井徹哉、シングルデッキ型浮屋根貯槽模型の地震時スロッシング実験、日本高圧力技術協会春季講演会、2011.5.28、東京

松井徹哉、永谷隆志、2003年十勝沖地震で被災したシングルデッキ型浮屋根貯槽の非線形スロッシング解析、日本高圧力技術協会春季講演会、2011.5.28、東京、

永谷隆志、松井徹哉、シングルデッキ型浮屋根を有する円筒液体貯槽模型の地震時スロッシング実験、第13回日本地震工学シンポジウム、2010.11.20、つくば

永谷隆志、松井徹哉、解析解と有限要素法の結合解法による浮屋根式円筒液体貯槽の非線形スロッシング解析、第13

回日本地震工学シンポジウム、2010.11.20、つくば

松井徹哉、浮き屋根応力の解析法、容器構造設計指針改定講習会、日本建築学会、2010.3.15、東京

松井徹哉、連成解析手法の現状 - 解析的アプローチ、第8回新シェル・空間構造セミナー：流体と構造物の連成解析手法の現状と展望、日本建築学会、2009.7.8、東京

T. Nagaya, T. Matsui, T. Wakasa, Model Tests on Sloshing of a Floating Roof in a Cylindrical Liquid Storage Tank under Seismic Excitation, ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, July 31, 2008, Chicago, Illinois, U.S.A,

T. Matsui, Y. Uematsu, K. Kondo, T. Wakasa, T. Nagaya, Wind Effects on Sloshing of a Floating Roof in a Cylindrical Liquid Storage Tank, ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, July 31, 2008, Chicago, Illinois, U.S.A

〔図書〕(計1件)

松井徹哉、他、日本建築学会、容器構造設計指針・同解説、2010、355 (320-330)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.arcsec-meijo.jp/index.aspx>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松井 徹哉 (MATSUI TETSUYA)  
名城大学・理工学部・教授  
研究者番号：70023083

(2) 連携研究者

武藤 厚 (MUTOH ATSUSHI)  
名城大学・理工学部・教授  
研究者番号：90278325

大塚 貴弘 (OHTSUKA TAKAHIRO)  
名城大学・理工学部・准教授  
研究者番号：10347354

(3) 研究協力者

永谷 隆志 (NAGAYA TAKASHI)  
名城大学・高度制震実験解析研究センター・ポスドク研究員