

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：73905

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560702

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実用化

研究課題名(英文) PRACTICAL APPLICATION 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)

公益財団法人名古屋産業科学研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：70023083

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：平成20年度～23年度の科学研究費助成研究にて開発した浮屋根と液体の非線形性を考慮した円筒液体貯槽のスロッシング解析プログラムを、浮屋根のモデル化に偏心シェル要素や偏心はり要素を採用することにより、実物のポンツーンや補強部材をより忠実にモデル化できるように改良した。改良したスロッシング解析プログラムを利用して、2003年十勝沖地震で多発したシングルデッキ型浮屋根の損傷・沈没の原因究明を試みるとともに、浮屋根の耐震補強法として、内部デッキ板をリブ補強することにより損傷・沈没の原因となった非線形振動モードの発生を抑制する方法を提案し、補強の効果を検証した。

研究成果の概要(英文)：The computer program for nonlinear sloshing analysis of floating-roofed cylindrical liquid storage tanks, developed under the support by the Grant-in-Aid for Scientific Research during 2012-2014, has been improved by employing the eccentric shell and beam elements to model the pontoon and stiffening members of the floating roof. The improved program has been applied to clarify the mechanism of failure of pontoon of single-deck floating roof observed during the 2003 Tokachioki earthquake. The effectiveness of the proposed method for stiffening the inner deck has been confirmed to restrain the occurrence of nonlinear oscillation modes that may cause the pontoon failure.

研究分野：工学

キーワード：シングルデッキ型浮屋根 非線形スロッシング 構造 流体連成作用 長周期地震動 非線形振動 ポンツーン座屈 耐震補強

## 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による面外曲げ変形やデッキ部の大変形に伴うポンツーンの楕円化変形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た。

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による面外曲げ変形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、その妥当性については必ずしも十分な検証がなされている訳ではなかった。

以上のような背景の下、平成20年度～23年度の科学研究費助成研究「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」(課題番号20360256)では、浮屋根と液体の非線形性を考慮した円筒液体貯槽のスロッシング解析法として、液体の運動をポテンシャル理論の解析解で表現し、浮屋根(液面)のモデル化に有限要素法を適用する結合解法を提案し(発表論文②)、縮小相似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(発表論文①)。さらにその成果を応用して、2003年十勝沖地震で浮屋根の損傷・沈没被害が多発したシングルデッキ型浮屋根貯槽の地震応答解析を行い、被害原因の究明を試みた。その結果、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浮屋根ポンツーンに線

形理論では予測できない過大な応力を発生させ、ポンツーンを座屈・沈没に至らせた可能性があること、またこれら非線形振動モードのいくつかを見逃している改正消防法告示の浮屋根強度算定式は、浮屋根応力を過小評価していることが指摘された。

## 2. 研究の目的

本研究では、「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」に関する平成20年度～23年度の研究成果を、実用化に向けて発展させることを目的とする。具体的には、

- (1) 液体の運動をポテンシャル理論の解析解で表現し、浮屋根(液面)のモデル化に有限要素法を適用する結合解法において、浮屋根を実物により忠実にモデル化することにより、解析精度の向上を図ること、
  - (2) 浮屋根と液体の非線形性に起因する非線形振動モードの発生と2003年十勝沖地震で多発したシングルデッキ型浮屋根の座屈・沈没との因果関係を明らかにすること、
  - (3) 改正消防法告示に定める浮屋根応力評価式の妥当性を検証し、代替評価式を提案すること、
  - (4) 長周期地震動に対する浮屋根の効果的な耐震補強法を提案すること、
- の4つを達成目標とする。

## 3. 研究の方法

平成20年度～23年度に開発した液体の運動をポテンシャル理論の解析解で表現し、浮屋根(液面)のモデル化に有限要素法を適用する非線形スロッシング解析プログラムを、実物の浮屋根や補強部材をより忠実にモデル化できるように改良する。すなわち、薄肉箱型断面で構成されるポンツーンを伸び剛性および曲げ剛性の等価な中実等厚シェル要素でモデル化していたこれまでのプログラムを拡張し、偏心シェル要素や偏心はり要素を立体的に配置することによりポンツーンや補強部材をモデル化する。

改良された非線形スロッシングプログラムを利用して、すでに指摘した浮屋根と液体の非線形性に起因する非線形振動モードの発生と2003年十勝沖地震で多発したシングルデッキ型浮屋根の座屈・沈没との因果関係をより詳細に検討するとともに、改正消防法告示に定める浮屋根強度算定式の検証解析を行い、代替評価式を提案する。

以上の研究成果を総合して、合理的な浮屋根の耐震補強法を提案し、補強の効果を改良された非線形スロッシングプログラムを用いて検証する。

## 4. 研究成果

- (1) 液体の運動をポテンシャル理論の解析解で表現し、浮屋根(液面)のモデル化に有限

要素法を適用する非線形スロッシング解析プログラムにおいて、薄肉箱型断面で構成されているポンツーンを伸び剛性および曲げ剛性の等価な中実等厚シェル要素でモデル化していた平成 23 年度までのプログラムを拡張し、ポンツーン上・下板を偏心シェル要素で、内・外リム板や補強部材を偏心はり要素でモデル化することにより (図 1)、実物のポンツーンや補強部材をより忠実にモデル化できるようにプログラムを改良した。

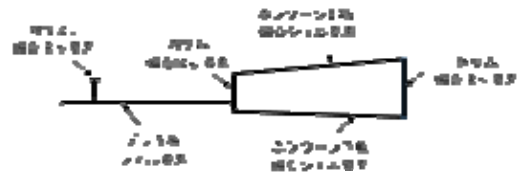
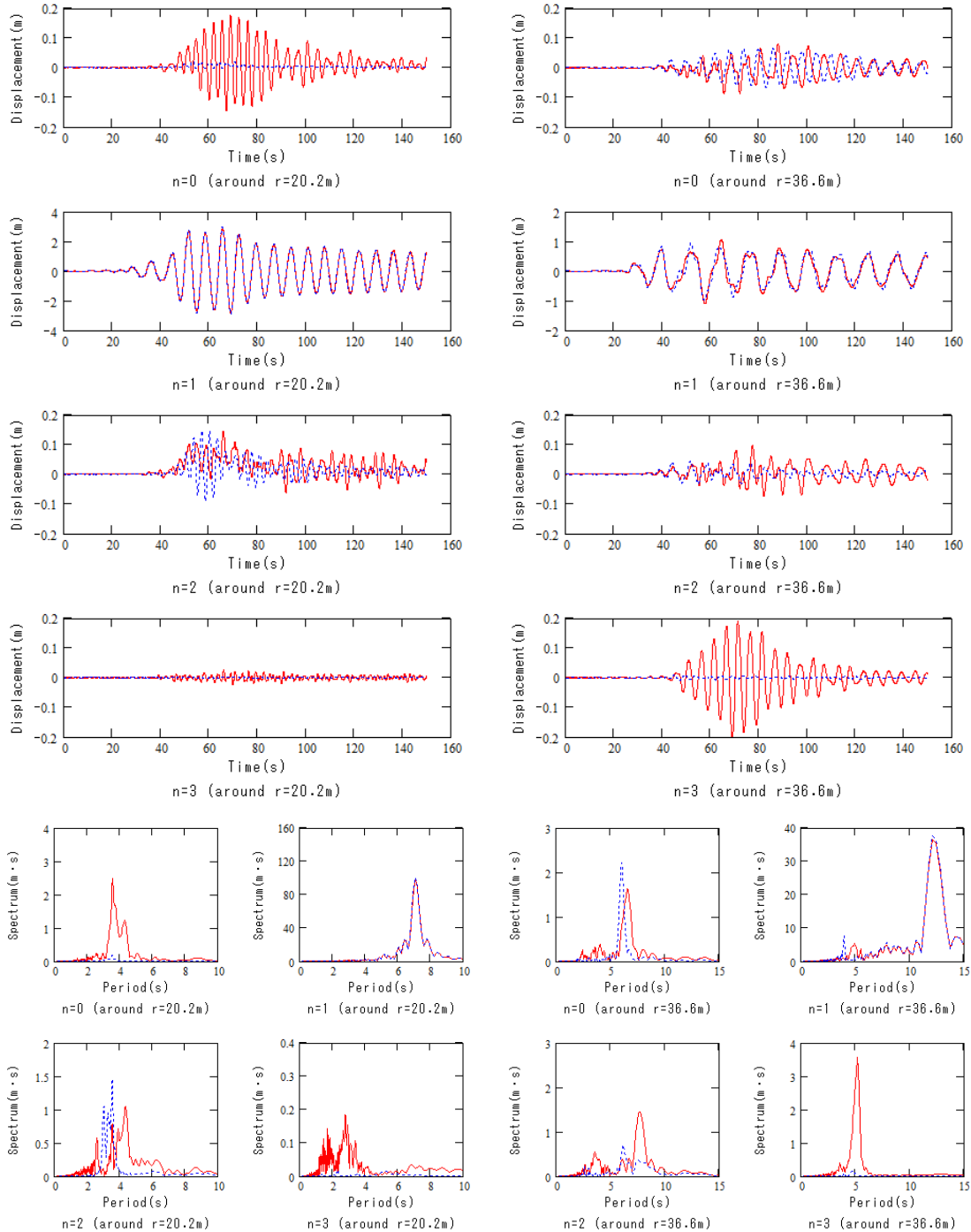


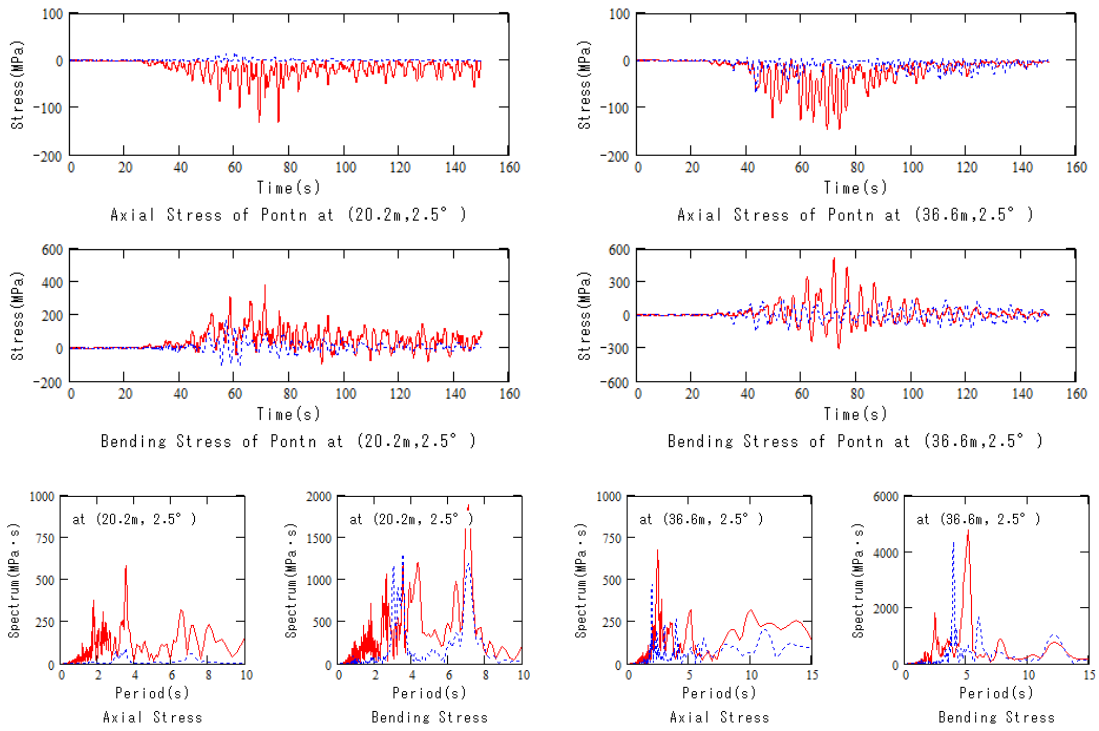
図 1 浮屋根の有限要素モデル化

ラムを利用して、2003 年十勝沖地震でスロッシングにより損傷・沈没した円筒石油貯槽浮屋根の地震応答解析を行い、被害原因の究明を試みた。入力地震動には、2003 年十勝沖地

(2) 改良した非線形スロッシング解析プログ



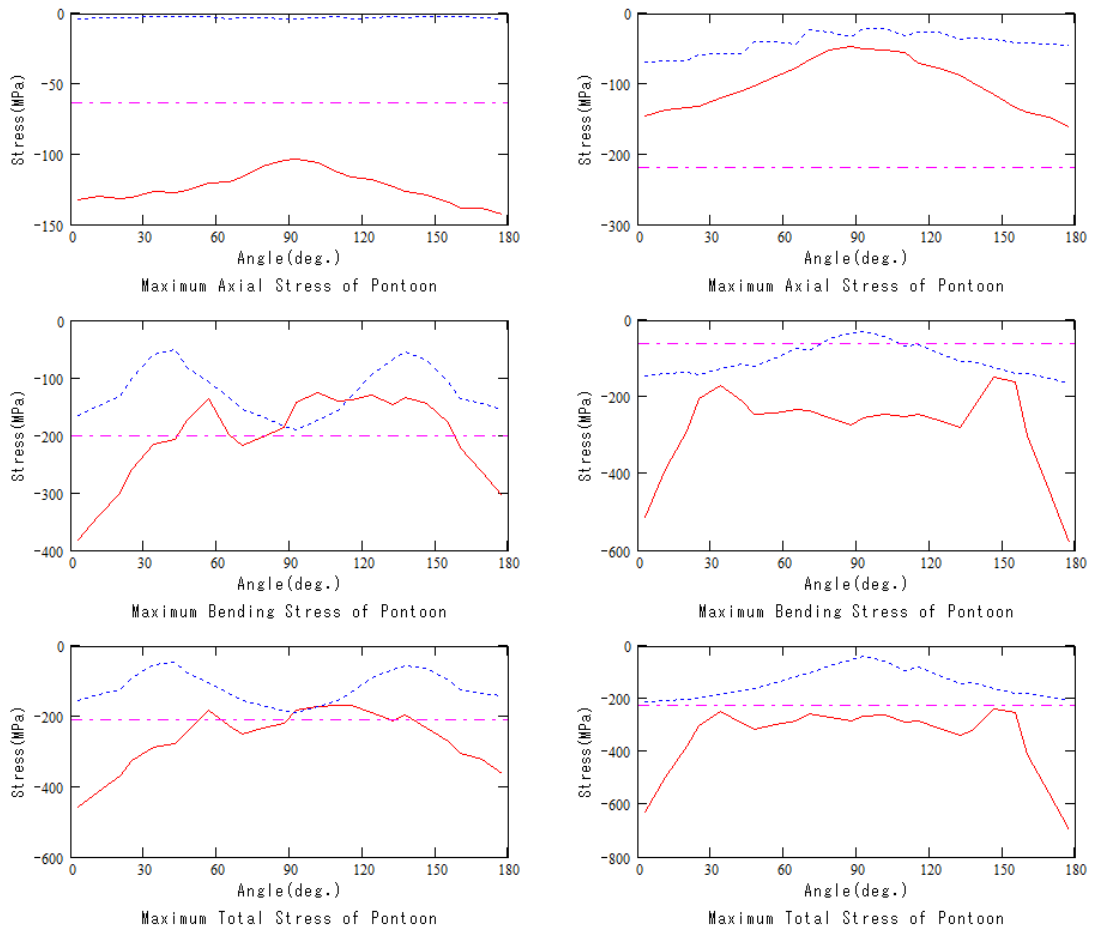
3 万キロリットル貯槽 10 万キロリットル貯槽  
 図 2 ポンツーン変位の周方向フーリエ展開モード振幅の時刻歴とフーリエ振幅スペクトル  
 (赤実線：補強前；青点線：補強後)



3万キロリットル貯槽

10万キロリットル貯槽

図3 ポンツーン応力の時刻歴とフーリエ振幅スペクトル  
(赤実線：補強前；青点線：補強後)



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の周方向分布  
(赤実線：補強前；青点線：補強後；紫鎖線：告示式（補強前）)

震 K-NET 苫小牧 EW 波を使用した。その結果、液面の有限振幅変位や浮屋根デッキ部の大変形に伴う円周方向 0 次、2 次、さらに 10 万キロリットル級貯槽の場合には 3 次の非線形振動モードの存在が、ポンツーン上・下板に鋼材の座屈強度を超える過大応力を発生させ、浮屋根の損傷・沈没を招いた可能性が高いとする平成 20 年度～23 年度の指摘を再確認した (図 2～図 4)。

(3) 改正消防法告示に定める浮屋根強度算定式の妥当性を、地震応答解析の結果と比較することにより検証した。その結果、上記の非線形振動モードのいくつかを見逃している改正告示の浮屋根強度算定式はポンツーン応力を過小評価しているという平成 20 年度～23 年度の指摘を再確認した (図 2～図 4)。

(4) シングルデッキ型浮屋根の耐震補強法として、内部デッキ板をリブ補強することにより損傷・沈没の原因となった非線形振動モードの発生を抑制する方法 (図 5) を提案し、補強の効果を改良した非線形スロッシング解析プログラムを用いて検証した (図 2～図 4)。

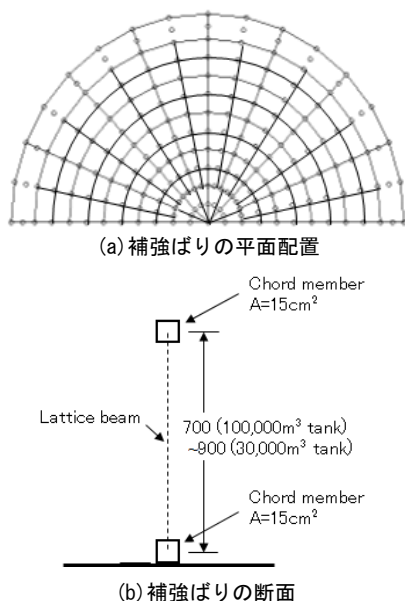


図 5 シングルデッキ型浮屋根の補強法

(5) 3 ヶ年の研究期間内で、当初に設定した目標のすべてを達成することはできなかったが、やり残した以下の事項については今後の研究課題としたい。

- ① 改正消防法告示の浮屋根強度算定式に代わる実用評価式の提案
- ② 提案した浮屋根補強法の実現性 (施工性・経済性など) の検討

## 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 2 件)

- ① T. Matsui and T. Nagaya, Nonlinear Oscillation of a Floating Roof in a Cylindrical Tank Under Liquid Sloshing -Model Tests versus Theoretical Prediction-, Journal of Structural and Construction Engineering, Transactions of the Architectural Institute of Japan, 査読有, Vol. 80, No. 710, 2015, 593-599
- ② T. Matsui and T. Nagaya, Nonlinear Oscillation in a Floating-roofed Oil Storage Tank Under Long-period Seismic Ground Motion, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 査読有, Vol. 42, Issue 7, 2013, 593-599, DOI:10.1002

[学会発表] (計 2 件)

- ① 松井徹哉、永谷隆志、長周期地震動を受ける大型円筒浮屋根貯槽の非線形スロッシング挙動—浮屋根と液体の連成を考慮した解析と振動台実験による検証—、第 14 回日本地震工学シンポジウム、2014. 12. 4-2014. 12. 6、幕張メッセ国際会議場、千葉
- ② 永谷隆志、松井徹哉、シングルデッキ型浮屋根のダブルデッキ化による耐震補強効果の数値解析による検証、日本建築学会大会 (東海) 学術講演会、2012. 9. 12-2012. 9. 14、名古屋大学

[その他]

ホームページ等

- ① 松井徹哉、退官して 10 年、生涯研究者を目指して、名古屋大学建築学科創設 50 周年記念事業「わたしの仕事」展、<http://www.nuac.nagoya-u.ac.jp/50th/Matsui.pdf>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

松井 徹哉 (MATSUI TETSUYA)

公益財団法人名古屋産業科学研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：70023083