

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 6月 4日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21246131

研究課題名（和文） タンク内スロッシング荷重による流力弾性影響とその低減手法に関する研究

研究課題名（英文） Hydroelastic effect and new reduction device on sloshing load

研究代表者

田中 義照（TANAKA YOSHITERU）

独立行政法人海上技術安全研究所・構造系・系長

研究者番号：40373419

研究成果の概要（和文）：タンク壁面の弾性影響を考慮したスロッシング荷重設定法の開発、および、スロッシング衝撃圧低減機構の開発のため、種々のタンク模型を用いた実験的研究を実施した。その結果、タンク模型の相似比 R に対しピーク圧平均の比は $0.7R \sim 1.3R$ のばらつきを示すこと、衝撃水圧作用時の付加水質量は4分円モデルによって見積もることができ、中液位では振動周期の増加に対して動的応答倍率が単調減少傾向を示すことが明らかになった。また、膜材によるスロッシング衝撃圧低減効果は液位に拘わらず大きい、中液位以上では繫留索の支持点反力がかなり大きくなることが明らかになった。そのため、低液位に特化したスロッシング低減機構に改良し、その有効性を実験的に示すとともに、低減機構の有限要素法シミュレーションが可能であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In order to establish the estimation method of sloshing load in consideration of the hydroelastic effect of tank walls and to develop the new reduction device for sloshing pressure, the experimental study was conducted by using the various types of tank models. As results, it was cleared that the ratio of the average peak pressure showed from $0.7R$ to $1.3R$ compared with the scale ratio R of tank models and that the mass of additional water could be estimated by the quarter circle model when the impulsive pressure was applied to tank top plate. In addition, though the reduction effect of sloshing pressure by membrane materials was remarkable for wide filling ratio of inside fluid, it was found that the reaction force at supporting points of ropes got to large in the middle and high filling ratio. Therefore, the reduction device was improved only for low filling ratio and its effectiveness was verified experimentally.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
年度			
年度			
年度			
年度			
年度			
総計	19,200,000	5,760,000	24,960,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：船舶工学、スロッシング、流力弾性応答、低減装置、LNG 船、縮尺影響、相似則、有限要素法解析

1. 研究開始当初の背景

クリーンエネルギーとしての天然ガス需要の増大に伴い、積載量 200,000 m³ を超える大型 LNG 船の設計・建造やフローティング LNG プラントの概念設計が試みられている。このようなカーゴタンクの大型化に伴い、部分積載された液体貨物によって生じるスロッシング荷重も増大することが予想され、船体強度に及ぼす影響が懸念される。

大型 LNG 船の構造安全性をより厳密に評価するためには、流体と構造との連成影響、模型タンクと実機間の縮尺影響を明らかにすることが必要である。また、スロッシング現象そのものを制御し、スロッシング荷重を低減することは、船体重量軽減、すなわち環境負荷低減に繋がると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、大型 LNG 船の疲労損傷対策に有効なガイドライン作成、および、構造安全性の確保に資することを目標として、

(1) タンク壁面の弾性影響を考慮したスロッシング荷重設定法の開発

(2) スロッシング衝撃圧低減機構の開発を研究の目的とする。

3. 研究の方法

(1) タンク壁面の弾性影響を考慮したスロッシング荷重設定法の開発

①カーゴタンクに生じるスロッシング荷重の縮尺影響の解明

実船に作用するスロッシング荷重を精度良く推定するためには、タンク模型の相似比がスロッシング衝撃圧に及ぼす影響とともに、同調周期に及ぼす影響も明らかにする必要がある。そこで、これらの縮尺影響を明らかにするため、既存の二次元矩形断面タンク模型と相似の二次元タンク模型を製作した。この相似模型を用いて、様々な液位に対するスロッシング試験を実施し、衝撃圧及び同調周期の縮尺影響を明らかにする。また、これらの試験条件に合わせた数値解析を行い、有効性を検証する。

②タンク壁面の剛性がスロッシング荷重に及ぼす影響解明

実船カーゴタンクの寸法と剛性の比を保持したタンク模型を製作することは不可能であるため、タンク模型の側面を低剛性の弾性パネル（例えばポリカーボネート等）とした二次元タンク模型の動揺試験を実施する。弾性パネルは、縦方向にアルミニウム型材のサポートにて分割し、各パネルの中央及び上下端に貼付したひずみゲージによりブリッジを組み、パネルの曲げひずみを計測する。曲げひずみは予め実施する静水圧試験や

FEM 計算結果により荷重に変換される。

また、スロッシング衝撃圧に及ぼす弾性影響の解明を実施する。スロッシング試験は、下記③で使用する大型三次元タンク模型の壁面の一部を弾性パネルに変えて実施するとともに、流体-構造連成解析を実施する。

(2) スロッシング衝撃圧低減機構の開発

①膜材による低減効果の検証

本研究の目標のひとつは、タンク壁面での荷重分担や構造物の追加を極力排した、スロッシング衝撃圧低減機構の開発である。そのための手段として膜材の利用を前提としているが、豊富な計測データを蓄積している既存の二次元矩形断面タンク模型 (1,200×600×200mm) を改良して、スロッシング試験を実施する。主に高液位での定常波 (standing wave) によるタンク肩部への衝撃圧を抑制する方法 (A 法)、並びに、主に低液位での段波 (traveling wave) による壁面下部への衝撃圧を抑制する方法 (B 法) について、同じ実験条件に対する衝撃圧を膜材の有無によって比較することにより、低減効果を検証する。なお、衝撃圧を圧力センサにより計測するとともに、膜材の支持位置にロードセルを配置し、膜材に作用する張力を計測する。得られた張力から膜材による吸収エネルギー、及び、支持部材に必要な強度を推定する。

②三次元的液面変動に対する低減効果検証

実船のカーゴタンク内の自由液面には、前述のような二次元的な動揺だけでなく、斜め方向や渦巻現象 (swirling) 等非対称な動揺も発生する。そこで、非対称な自由液面動揺が発生するように、船長方向に横断面形状が変化する小型三次元タンク模型を新たに製作し、スロッシング試験に供する。前記①と同様に膜材を設置し、衝撃圧を圧力センサにより計測するとともに、膜材の支持位置にロードセルを配置し、膜材に作用する張力を計測する。得られた張力から膜材による吸収エネルギー、及び、支持部材に必要な強度を推定する。本研究では、主にメンブレン型 LNG 船を対象としたスロッシング衝撃圧低減機構の開発を目指す。メンブレン型 LNG 船では、カーゴタンク内部に膜材の支点となるような強度部材が無い場合、A 法を改良した浮体式膜構造 (C 法) を検討する。例えば、膜浮体を気密性のある袋状のものとし、タンクの内圧よりやや高い気圧の不活性ガス (例えば窒素) を充填する。膜浮体が自由液面上で広がり、液体の運動を抑制すると同時に、タンク肩部でのスロッシング衝撃圧に対しては、膜浮体が緩衝材となる。動揺試験は、小型三次元タンク模型を使用する。

③低温液体貨物に適用可能な膜材の検討

LNG 船カーゴタンク内への膜材の設置を考える場合、極低温域（-162℃以下）においても材料特性を維持できる必要がある。また、C法のような気密性を保持する構造とするならば、コーティング剤についても同様に極低温域での性能が求められる。想定する膜材としては、アラミド繊維及びポリアリレート繊維織物を中心に、極低温域での材料試験を実施し、大型三次元タンク模型による結果を満たす膜材について検討する。膜材のコーティングについても低温域での実績のあるシリコン系のコーティングを中心に検討する。なお、膜材の材料試験は、膜材メーカーに外注する。

4. 研究成果

(1) タンク壁面の弾性影響を考慮したスロッシング荷重設定法の開発

①カーゴタンクに生じるスロッシング荷重の縮尺影響の解明

相似な2つの二次元剛矩形タンク（ただし奥行きは等長）で、 L/T^2 （ L ：タンク代表長さ、 T ：加振周期）を揃えて同調時周辺の7ケースの液位条件で動揺試験を行い、中～高液位時の天板への衝撃圧について圧力波形、ピーク値の統計的性質、および衝撃時水面形状の観点から相似性を検討した。その結果、衝突前に含まれる気泡、衝突時巻き込み空気量、空気巻き込み衝突の出現頻度、といった点で相似とはならないケースが観察され、タンク模型の相似比 R に対しピーク圧平均の比は $0.7R \sim 1.3R$ のばらつきを示した。これら衝突時の液面の三次元的挙動に由来すると考えられる結果は、二次元タンク試験結果へ相似則を適用する際の注意を示唆するものといえる。

②タンク壁面の剛性がスロッシング荷重に及ぼす影響解明（中～高液位におけるタンクの弾性天板に作用する衝撃圧とその応答）

二次元タンク模型天板の一部を SUS430、リン青銅、ポリカーボネートといった弾性パネルに置換し、周波数特性を変化させ、スロッシング衝撃荷重作用時の応答（弾性板に生じるひずみより換算）を比較した結果、以下の知見が得られた。

各材料のハンマリング試験を行い、材料特性と固有周期特性を比較したものを図1に示す。横軸は板の密度 ρ_p 、板厚 h および曲げ剛性 D により特徴づけられる材料特性を示し、縦軸は振動応答特性である。ここで、固有周期は、空気中、満水時および各スロッシング衝撃荷重作用時（波形中のピーク値から減衰時間中）の各ケースにおいて、FFT解析により求めた。

本条件下で、空気中における固有周期 T_0

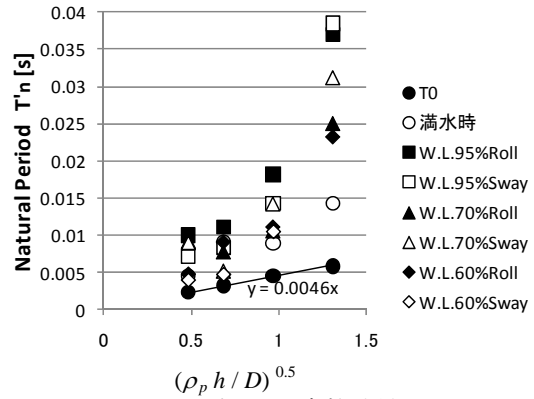


図1 板の周波数特性

は、 $T_0 = 0.0046 (\rho_p h / D)^{0.5}$ で近似できたが、接水時はそれよりも周期が長くなっている。これは、接水している付加水質量によるものと考えられる。そこで、図2に示すように、衝撃圧作用時の付加水を4分円でモデル化し、接水状態における周期を

$$T' = T_0 (1 + \delta)^{0.5} \quad (1)$$

$$; \delta = m_w / m_p = (\rho_w \pi b^2 / 4) / \rho_p a h$$

として全パネルの周期データについて式(1)の妥当性を検討した（図3参照）。ただし、 m_w 、 m_p 、 ρ_w 、 b および a は、それぞれ、付加水質量、板の質量、水の密度、接水長さおよび板の長さであり、横軸に式(1)を縦軸に計測値をとっている。接水長さ a は画像から判断し、液位95%で $b = 300\text{mm}$ 、液位70%のroll時は $b = 200\text{mm}$ 、sway時は $b = 220\text{mm}$ 、液位60%のroll時は $b = 150\text{mm}$ 、sway時は $b = 220\text{mm}$ とした。

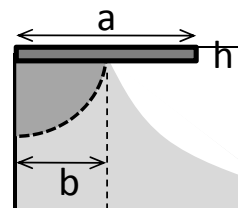


図2 4分円モデル

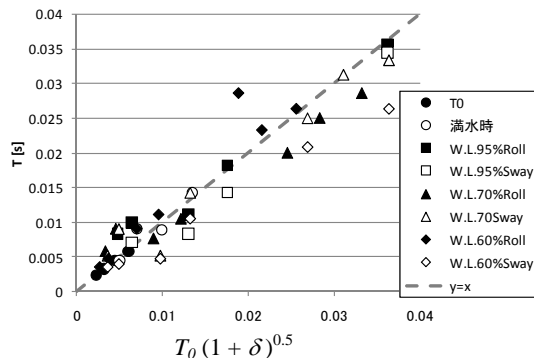


図3 付加水質量を考慮した周波数特性

図3より、実際には各液位で水圧作用形式が異なるものの、接水時の固有周期も直線 $y = x$ 上に移動し、4分円モデルによって衝撃水圧作用時の付加水質量をおおよそ見積もることができた。

以上をもとに付加水質量を考慮した水圧作用時の弾性板の固有周期と動的応答倍率との関係を図4に示す。図中、横軸は T_n'/γ ($\gamma =$ 衝撃水圧持続時間パラメータ)、縦軸は、動的倍率のパラメータとして、剛な天板の水圧計で計測された水圧が弾性パネルに作用していると仮定した無次元化ひずみ $\varepsilon/\varepsilon^*$ を圧力ピーク値 P_{max} で除した値である。各液位、加振条件、および衝撃タイプにより差はあるものの、中液位では振動周期の増加に対して動的応答倍率が単調減少傾向を示すケースが多く見られた。ここから、本傾向が指数減衰波で作用波形をモデル化した際の1質点系動的応答倍率の傾向に近いことを示し、設計スロッシング衝撃圧波形のモデル化手法の一例を示した。

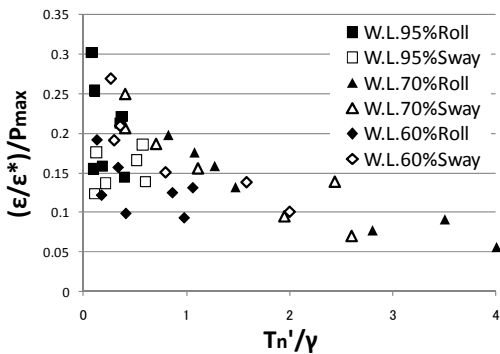


図4 計測された動的応答倍率

③タンク壁面の剛性がスロッシング荷重に及ぼす影響解明 (低液位におけるタンクの弾性側壁に作用する段波衝撃圧とその応答)

両側壁板をそれぞれポリアセタール弾性板と剛板とした3次元矩形タンクを用い(図5参照)、低液位でスロッシング加振実験を行い、両側壁での衝撃時作用圧力波形とを比較した結果、次のような知見が得られた。

まず、側壁の弾性振動特性について、静水時に対する衝撃時の低周波側への移動は上記②と同様の傾向であった。本加振条件においては、いずれも対応する計測点で腰掛圧成分、ピーク圧両者に弾性壁側は剛壁側を上回る傾向が見られた。特に、空気を巻き込まず衝撃時に液面が側壁を上昇するような衝撃タイプにおいて、弾性振動の寄与は顕著に見られ、流体衝撃時における弾性壁への主要作用荷重位置移動の差が影響したと考察される。また、空気巻き込み有りのタイプの衝撃に比べて空気巻き込みなしのタイプの衝撃は、作用圧力と変形との間により強い相関が見られた

(図6参照)。

これらの結果は、衝撃時作用圧力への弾性振動・変形の寄与分を明らかにしたものと見える。また、類型化された衝撃タイプの観点からの衝撃時応答の比較は、さらなるスロッシング時の流力弾性影響評価の議論の見通しをよくするものである。

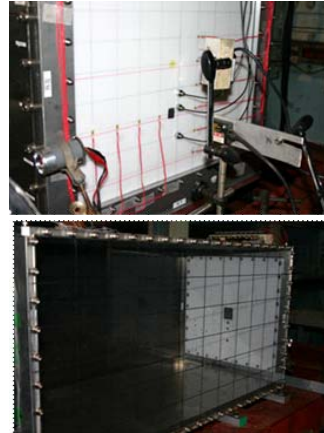
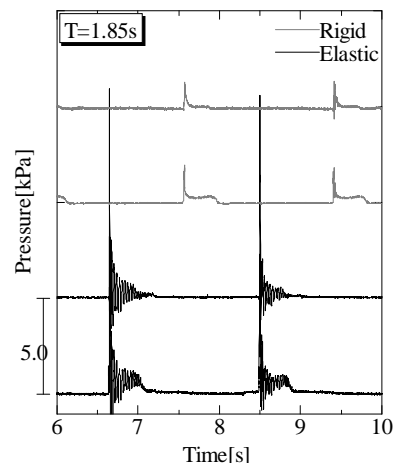
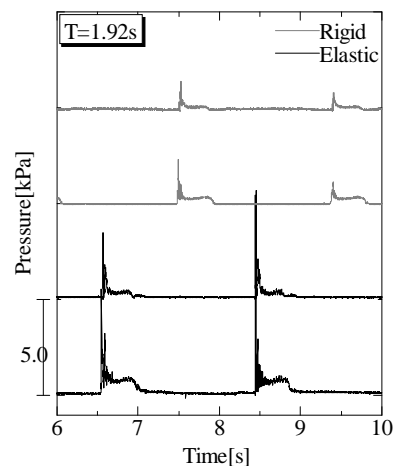


図5 弾性壁三次元タンク模型外観



(a) 空気巻き込みなし



(b) 空気巻き込みあり

図6 弾性壁、剛壁への作用圧力比較

(2) スロッシング衝撃圧低減機構の開発

①膜材によるスロッシング低減効果の検証

液体貨物を積載する角型形状のカーゴタンクに生じるスロッシング衝撃荷重は、中・高液位では定常波によりタンク上部コーナ一部分付近に発生し、また低液位では段波となりタンク側壁下部に発生するというように、タンク内液位により現象が大きく異なる。タンク内液位に関係なくスロッシングを抑制するため、予備試験の結果からタンク内にタンク長さ (L) の 1.1 倍程度の長さで設定したフロート付き膜材を V 字型に配置する方法 (図 7 参照) を考案し、これを設置した二次元矩形タンクの加振試験により、本設置方法の効果及び問題点について調査した。試験結果の一例として、膜材適用前後のタンク内壁各部位 (P01~P10) における圧力分布 (圧力ピーク値の 1/10 最大平均値) を図 8 に示す。膜材適用後、生じる衝撃圧は、定常波、段波に関係無く大幅に軽減された。一方、引張ロープに生じる張力を計測したところ、膜材が有効に機能する h_c の設定範囲内においては、段波に比べ定常波を抑制する際に高い反力が生じることが明らかとなった。

以上の様に、膜材による衝撃圧抑制効果を確認すると共に、本設置方法に関しては下記の問題点を抽出した。

- ・タンクに設置する際に膜材が長尺になる。
- ・定常波を抑制する際に反力が増大する。
- ・液位毎に h_c を設定し直す必要がある。

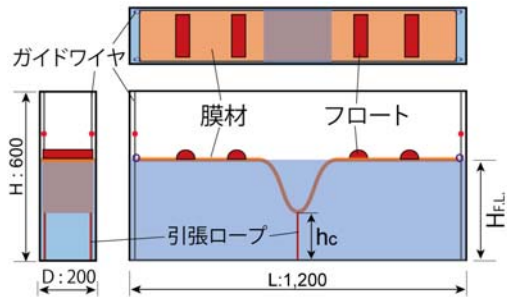


図 7 二次元矩形タンク及び膜材配置方法

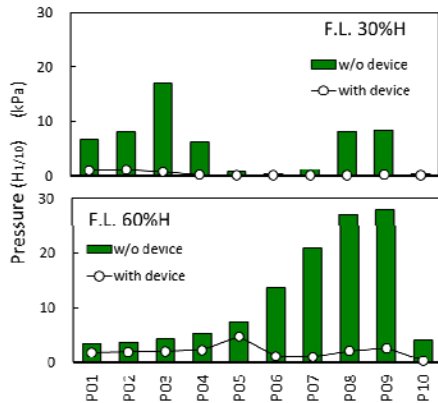


図 8 圧力計測値の比較 (並進運動±30mm)

②スロッシング衝撃圧低減機構の開発

考案した膜材設置方法の問題点について対策を講じ、三次元形状タンクへ適用可能なスロッシング衝撃圧低減機構を開発した。図 9 に写真を示す。タンク内液位の条件を、発生する支点反力が比較的小さい低液位のみ絞り、定常波の抑え込みに必要な膜材中央の没水部及び引張ロープを廃止することにより、膜材面積の削減と液位の変更に伴う調整作業を排除した。左右に分割された膜材は 2 本のロープで連結し、ロープ中央のリングを介してタンク中央のガイドワイヤに接続する。これにより膜材のタンク上下方向への自由度を確保しつつ、タンク長手方向の自由度を制約し、併せてタンク中央側の膜材付きフロートを上下に配置することにより、段波に対する効力を持たせた。

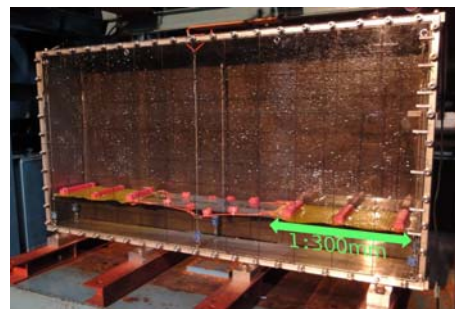


図 9 スロッシング衝撃圧低減機構

二次元矩形タンクに本機構を設置し、加振試験により圧力低減効果を検証した。同時に膜長 (l) の影響についても調査した。試験結果の一例として、本機構適用前後のタンク内壁各部位における圧力分布を図 10 に示す。本機構で安定した圧力低減効果を得るには 0.3L 程度の膜長の確保が望ましいことを示しており、低液位で発生するスロッシングに対する本機構の有効性を確認すると共に、三次元形状タンクへの適用に関して有用な知見を得た。

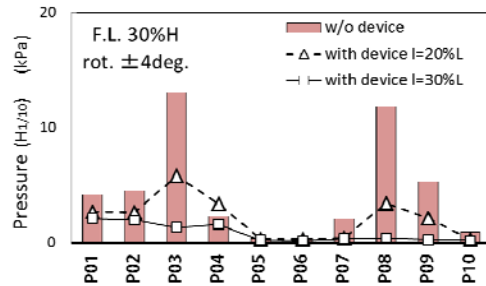


図 10 膜長の違いによる圧力分布の比較

③低減機構の三次元タンクへの適用

三次元形状タンクの写真を図 11 に示す。タンク内寸は最大で、長さ L : 1,300mm、奥行

D : 990mm、高さ H : 680mm、タンク長手方向 (図 11 太矢印) に対して八角形断面を有する形状に製作した。開発したスロッシング衝撃圧低減機構の三次元形状への適用を検証するため、膜長 $l = 0.3L$ の膜材をタンク奥行方向に拡張設置し、タンク長手方向への並進運動による加振試験を実施した。膜材にはタンク奥行方向の長さ (膜幅: w) が違う 2 種類を用意し、膜幅の影響についても併せて調査した。図 12 に本機構適用前後における圧力分布を示す。 $w \approx 0.6D$ では波が膜上を通過しないタンクコーナー部付近 (P07~P13) に対しての消波効果が乏しく、本機構をタンク長手方向の段波に対して効果的に作用させるためには、タンク奥行方向に対して膜材をより広く確保する必要があることを示している。次に、複雑な三次元的挙動を示すスロッシングに対する本機構の効果について、加振試験により検証した。加振方向をタンク対角方向に、加振周期をタンク長手方向の同調周期から 3%程短く設定した加振条件では、タンク長手方向及びタンク幅方向の波が重なることで三次元的な波が形成され、その結果、タンクコーナー部に高い衝撃圧力が計測された (図 13 参照)。一方、本機構を適用した場合には前述のスロッシングの励起が抑えられ、発生する圧力値も 1/5 以下となることを確認した。この加振条件では高次のモードを伴ったスロッシングが観察されており、本機構が比較的短周期の波に対して効果的に作用することを示している。

以上のように、単純な膜構造を浮体として作用させた本機構を、三次元形状タンク内に設置した場合、発生する低液位のスロッシングに対して良好な抑制効果が期待できることが明らかとなった。また系統的な試験により、膜材の効果や特性等について多くの知見を得たことは、今後の研究につながる貴重な成果である。但し本研究は模型試験による基礎的な検討をしたに過ぎず、当然のことながら今後の実機等への適用を目指すためには、相似性、安定性、安全性等に対する検討を加える必要があり、今後の課題となる。

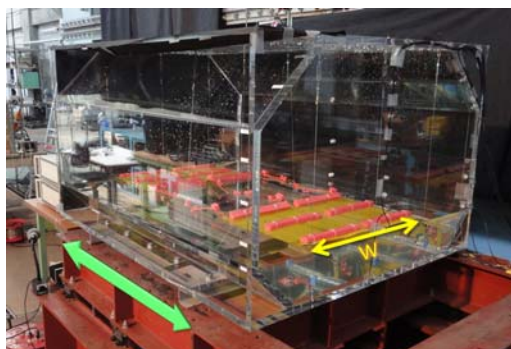


図 11 三次元形状タンク模型

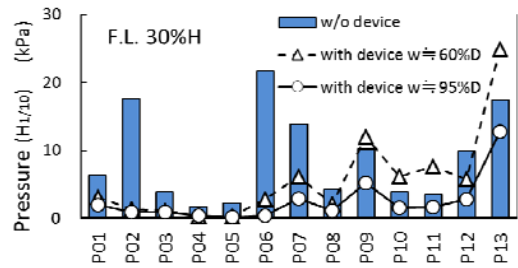


図 12 膜幅の違いによる圧力分布の比較

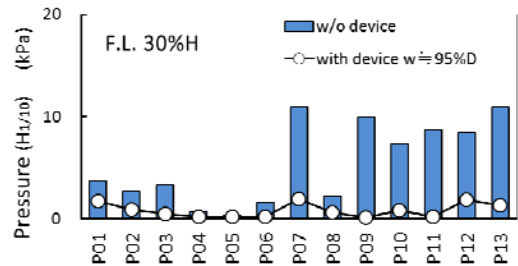


図 13 タンク対角方向への加振試験結果

④有限要素法によるシミュレーション

スロッシング衝撃圧低減機構の効率的な開発を目的として、FEM 解析を用いたシミュレーションを検討した。本研究では、模型タンク、膜材および流体をモデル化した連成解析を必要とするため、商用の衝撃・流体構造連成解析ソルバー MSC.Dytran を用いて解析を実施した。図 14 に図 7 の膜材配置についてモデル化したものを示す。Multi Euler Domain に膜材の上下で分割した個別の Coupling Surface を対応させることにより、膜材で仕切られた 2 つ領域をモデル化した。また現象を簡略化するため、膜材とタンク壁面にダミー要素を設定することで Euler 領域間での流体の出入りを排除している。タンク壁面には剛体を適用し、圧力センサ部は実物の受圧面積と等しくなるようなメッシュ形状に調整した。機構部は膜材、補強テープ、フロート等をそれぞれの物性値を用いてモデル化し、膜材四隅には剛体ジョイント要素を設定することにより、タンク上下方向へのスライド機構をモデル化した。解析結果として、没水部の圧力値の時刻暦データを試験結果と併せて図 15 に示す (加振条件: 並進運動 $\pm 30\text{mm}$)。FEM 解析結果は、圧力振幅及び位相共に試験結果と良く一致しており、本機構のような付加物を設置したタンク内の液体の挙動について、良好にシミュレート可能であることが明らかとなった。今後は、低液位で発生する進行波や碎波、膜材の屈曲等の非線形性の強い挙動に対する FEM 解析の適用の検討、あるいは機構部の強度や膜材の剛性等の評価についても検討していく予定である。

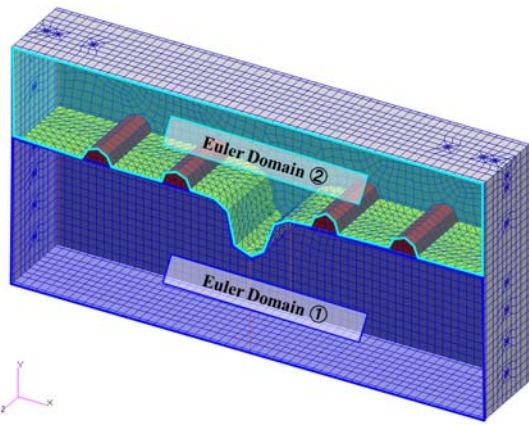


図 14 FE モデル

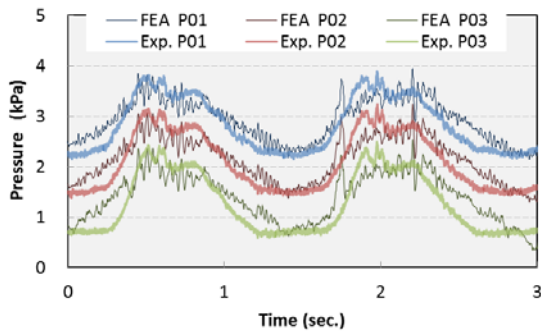


図 15 圧力値の時刻歴データの比較

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)

[学会発表] (計 3 件)

① Y.Anai, T.Ando, N.Watanabe, C.Murakami and Y.Tanaka : Development of a new reduction device of sloshing load in tank, Proceedings of The 20th International Offshore and Polar Engineering Conference, Volume3, pp18-25, Beijing, China, June 20-25, 2010 (査読有)

② 安藤孝弘、田中義照、穴井陽祐、渡邊尚彦 : スロッシング荷重低減に関する実験的研究、日本船舶海洋工学会平成 22 年度春季講演会講演集、pp.617-620、2010 (査読無)

③ 渡邊尚彦、安藤孝弘、穴井陽祐、村上睦尚、田中義照、佐久間正明 : スロッシング衝撃荷重を受けるパネルの弾性応答に関する実験研究、日本船舶海洋工学会平成 22 年度秋季講演会講演集、pp.285-288、2010 (査読無)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称 : スロッシング荷重軽減装置及びスロッシング荷重軽減装置付き船舶

発明者 : 安藤孝弘、佐久間正明、田中義照、穴井陽祐、渡邊尚彦

権利者 : 独立行政法人 海上技術安全研究所
種類 : 特許

番号 : 特開 2011-148511

出願年月日 : 平成 22 年 1 月 16 日

国内外の別 : 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 義照 (TANAKA YOSHITERU)

海上技術安全研究所・構造系・系長

研究者番号 : 40373419

(2) 研究分担者

安藤 孝弘 (ANDO TAKAHIRO)

海上技術安全研究所・構造系・研究員

研究者番号 : 30425756

穴井 陽祐 (ANAI YOSUKE)

海上技術安全研究所・構造系・研究員

研究者番号 : 60470051

村上 睦尚 (MURAKAMI CHIKAHISA)

海上技術安全研究所・構造系・主任研究員

研究者番号 : 90392688

山田 安平 (YAMADA YASUHIRA)

海上技術安全研究所・構造系・主任研究員

研究者番号 : 90443241

渡邊 尚彦 (WATANABE NAOHICO)

岐阜工業高等専門学校・環境都市・助教

研究者番号 : 50550034