

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06626

研究課題名(和文) 回転状スロッシングを利用した矩形タンク内衝撃荷重軽減技術に関する研究

研究課題名(英文) A Study on impact load reduction effect in rectangular tank using rotary sloshing

研究代表者

安藤 孝弘 (ANDO, TAKAHIRO)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：30425756

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：LNG燃料船の燃料タンクにメンブレンタイプの適用を想定した場合、常に変化する燃料を考慮しカーゴタンクで適用されている積載条件の緩和が必要となる。そのためには燃料タンク等の比較的コンパクトなタンク形状に特有のスロッシング現象を十分に把握し、その対策を講じる必要がある。本研究では、水平断面形状が正方形に近いコンパクトな矩形タンク模型内に数種類のスペーサーを入れてタンク形状を変更し強制動揺試験を行った。試験結果から、低液位では二方向のスロッシング現象が重畳する場合や、付加物により段波に直交するような流動を励起させた場合に、衝撃荷重が軽減される傾向にあることを示した。

研究成果の概要(英文)：Assuming that membrane type containment system is applied to LNG-fueled vessels, it should be necessary to relax the restriction of loading patterns applied to the cargo tank, taking account of fuel which varies continuously. For this reason, we should understand and take measures against the peculiar sloshing phenomenon in a relatively compact tank shape such as a fuel tank.

In this study, the excitation tests were performed with the deformed tank model: It was deformed by installing several types of spacers in the compact rectangular tank model of which horizontal section shape is approximately square.

The test result shows that impact load tends to decrease at low filling ratio when bi-directional sloshing phenomena are superposed or appendages induce the flow which is orthogonal to travelling waves.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：船舶工学 スロッシング 低減手法 LNGタンク LNG燃料船

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化ガス排出量の削減を目的とした国際的な環境規制強化により、欧州を中心とした諸外国では船舶燃料についても既に環境性能が高い天然ガスへの転換が進みつつある。LNG カーゴタンクに比べて燃料タンクはコンパクトに設定可能であるため、LNG カーゴタンクに採用されている独立式やメムレン方式の安全基準は過剰となる恐れがある。他方、居住区画近傍への配置や逐次変化する燃料液位によるスロッシング等を考慮した場合十分な安全性を確保する必要があることから、コンパクトなタンク内に発生するスロッシング衝撃荷重の低減手法を確立することで、LNG 燃料船の普及推進、すなわち環境負荷の低減に繋がると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、LNG 燃料船の燃料タンクを念頭にコンパクトな矩形タンク内に発生するスロッシング現象についての知見を得ると共に、発生する衝撃荷重についてその低減手法を確立することにより、構造安全性の確保に資することを目標として、

(1) 各種タンク内に発生する回転状スロッシング (スワリング) 特性の解明

(2) スワリング等を活用したスロッシング衝撃荷重軽減手法の開発を研究の目的とする。

3. 研究の方法

(1) 各種タンク内に発生する回転状スロッシング (スワリング) 特性の解明

LNG 燃料船に搭載する燃料タンクとしてコンパクトな矩形タンクを想定した場合、これまで多くの研究が実施されているカーゴタンクのスロッシング現象とは大幅に挙動が異なることが予想されることから、その現象の差異について確認しておく必要がある。そこで、小型矩形タンク模型 (以下、S タンク模型、 $450 \times 300 \times 400\text{mm}$) とそのタンク模型内に挿入可能なスペーサーを製作し、これらを組み合わせることで S タンク模型水平断面のアスペクト比を $1.5 : 1$ から $1 : 1$ に近づくように変更した際のスロッシング現象を観察した。更に S タンク模型コーナー部が斜板となるようなスペーサーも併用し、タンク模型水平断面形状を矩形から変化させた場合についても同様の観察を実施する。加振は試験条件をある程度網羅的に実施する必要があることから、手動で加振可能な専用の装置 (簡易動揺装置) を製作し、これを用いた簡易動揺試験を実施する。発生する、中・低液位におけるスロッシング現象の観察から、衝撃荷重の緩和が期待できるタンク形状や試験条件等の抽出を行う。

(2) スワリング等を活用したスロッシング衝撃荷重軽減手法の開発

3. (1) で得られた知見をもとに、専用の強制動揺装置に搭載可能な三次元タンク模型

(以下、L タンク模型) を製作し、油圧アクチュエータによる強制加振を行った際に発生するタンク壁面のスロッシング圧力を計測する。L タンク模型は 3. (1) と同様にタンク長調整用スペーサーを用いて L タンク模型水平断面のアスペクト比 (L/D) の変更を 3 ケース、大小の三角柱スペーサーを用いたタンク水平断面形状の変更についても 3 ケース、これらの組み合わせとしてタンク形状の変更を計 9 ケース実施する。その他のタンク内液位及び加振に関する各パラメータについては簡易動揺試験を踏襲し、これらを組み合わせた試験条件による強制動揺試験を行い、発生するスロッシング現象とタンク壁面に設置した計 9 ヶ所の圧力センサーの計測値との関係から、タンク形状の変更に伴うスロッシング荷重の変化を調査し、その軽減策について検討する。

4. 研究成果

(1) 各種タンク内に発生する回転状スロッシング (スワリング) 特性の解明

① 特許申請

回転 (ROLL)、並進 (SWAY) 加振が可能な簡易動揺装置を製作し、様々な形状のタンク模型を搭載した状態で簡易動揺試験を実施した。試験の観察から得られたスワリングに関する知見をもとに下記 2 件の特許申請を実施した。

(A) スワリング発電装置

回転体形状のタンク模型による簡易動揺試験から下記の知見を得た。

- 球形や円筒形等の回転体形状のタンクでは、内部液体の流動は不安定なスロッシング状態から分岐しスワリングに移行し易い。
- 不規則動揺でもスワリングは発生し、且つ一度生じたスワリング現象は多少の外乱があっても持続する。

これらの特性を利用し、浮体上に搭載された単体または複数の回転体形状のタンク内の液体に対し波浪による揺動からスワリングを励起・促進し、発生した回転流れによりタービンを回し発電する着想を得た。加えて、スワリングの励起手法、エネルギーを回収する回転翼の配置、並びに浮体や浮体上のタンクの配置等に関するアイデアを纏めて特許出願を実施した。図 1 にスワリング発電装置の概念図を示す。

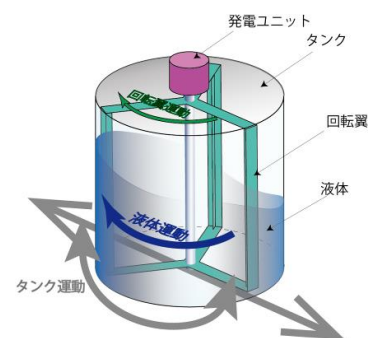


図 1 スワリング発電装置

(B) 旋回流を利用した減揺装置、及び旋回流れを利用した減揺方法

MOSS型LNGタンクに代表される球形タンク内にスワリングが発生する場合、液体の回転に伴う変動荷重が球形タンクの外周方向に絶えず作用することが知られている。タンク内液体をスワリング発生時よりも著しく高速に回転させ、内部荷重を連続的に生じさせることにより姿勢維持効果や減揺効果を得られるとの着想に至ったため、図2のような円環タンク模型を製作し組み込まれたポンプにより強制的に旋回流れを生じさせた際の減揺効果について、簡易動揺装置を用いた計測(図3)を実施した。

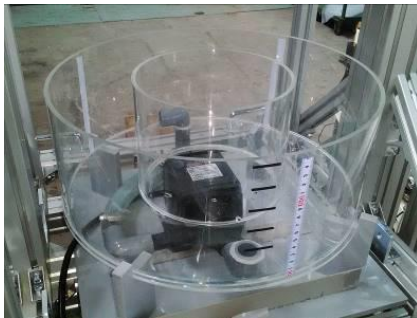


図2 円環タンク模型



図3 減揺効果の計測

計測結果から、旋回流れの流速の上昇に伴い、より高い減揺効果が期待できることや、図4に示すようにタンクの天板高さ($h1$)と液位(hw)の間隔を調整することで効率的な減揺が可能になることが明らかとなった。これらの知見を纏めて、浮体やゴンドラ等を対象に、減揺効果を能動的に制御可能な減揺装置として特許出願を実施した。

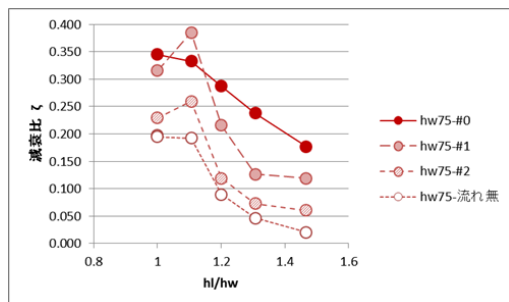


図4 天板高さと減衰比の関係

② 衝撃荷重の緩和が期待できるタンク形状や試験条件等の抽出

図5に簡易動揺試験に用いたSタンク模型の水平断面寸法(mm)及びスペーサー配置について示す。タンク長さはタンク内に(A)スペーサーを複数挿入することでタンク長さ:Lとタンク奥行:Dの比率としてL/D:1.5、1.33、1.25、1.17の4種類に設定した。またタンクコーナー部には、底辺を1/3Dに設定した二等辺三角形断面の(B)三角柱スペーサーを対角に1対設置した。この時、L及びDは代表寸法とし加振方向及び加振垂直方向におけるタンク最大寸法を用いた(図5参照)。

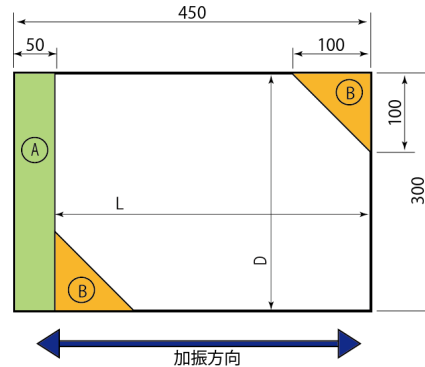


図5 小型矩形タンク模型の水平断面形状及びスペーサーの配置例(L/D:1.33)

液位はタンク長さの変更を考慮して、液高:Hとタンク長さ:Lの比として、低液位H/L:20%、中液位H/L:40%の二種類に設定した。簡易動揺装置の加振はタンク模型長手方向への並進加振とし、加振周期は装置に取り付けた加速度計の値を参考に同調周期付近となるように手動で行った。但し加振振幅については任意とした。簡易動揺試験の様子を図6に示す。

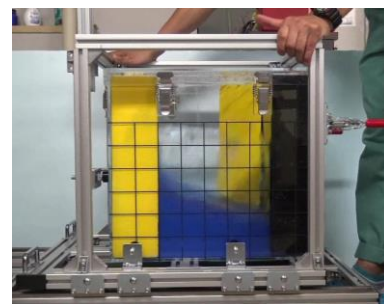


図6 簡易動揺試験の様子

簡易動揺試験の結果として、衝撃荷重の軽減が期待できるスワリング状の流動が発生する条件として、

- ・低液位 H/L:20%・・・L/D:1.33 以下
- ・中液位 H/L:40%・・・L/D:1.25 以下

であること、更にタンクコーナー部に三角柱のスペーサーを設置することにより、スワリング状の流動を励起し易くなることを確認した。

(2) スワリング等を活用したスロッシング衝撃荷重軽減手法の開発

製作した L タンク模型の詳細を図 7 (全て内寸(mm)) に示す。タンク奥行、高さは S タンク模型の 2.2 倍、タンク長さのみ L/D:1.33 に設定し、また P1~P9 に示す位置に圧力センサー (株共和電業製 PS-05KD) を専用の治具を介して組み込んだ。タンク内のスペーサーの配置を図 8 に示す。④に示すタンク長調整用スペーサーを用いて L/D を 1.33, 1.25, 1.17 に変更すると共に、図 8 に示す断面形状の三角柱スペーサー L, S 一対をそれぞれ対角に設置し、タンク形状を変更した。

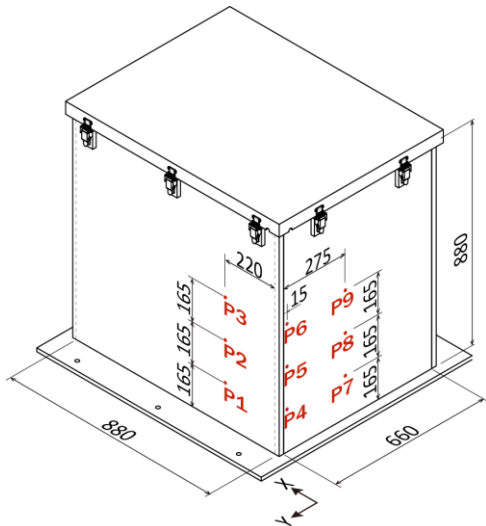


図 7 三次元タンク模型

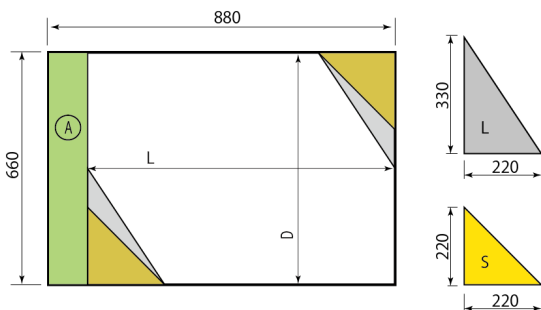


図 8 三次元タンク模型の水平断面形状及びスペーサーの配置例

強制動揺試験は、タンク形状に加え加振周期 TL 及び TD の 2 ケース、液位 H/L:20%, 40% の 2 ケースをパラメータとして実施した。加振方向はタンク長手方向 (図 8 X 軸方向) への並進加振、加振振幅は全ケースで $\pm 30\text{mm}$ とした。スロッシング圧力の計測はサンプリング 100Hz で 2 分間実施したため、各ケース 100 波前後の計測である。液位 H/L:20% の試験結果として、タンク内壁各部位における圧力分布 (圧力振幅値の 1/10 最大平均値) を加振周期 TL, TD に分けて、それぞれ図 9, 10 に示す。試験条件によりタンク容積が異なるがここでは無次元化等の処置はしていない。いずれもスワリング状の流動を確認したケースを棒グラフ、それ以外を折れ線、三角柱スペーサー

を併用したケースについては点線で示し、L/D の値並びに併用した三角柱スペーサーの種類 (L, S または未使用) については凡例内に示した。

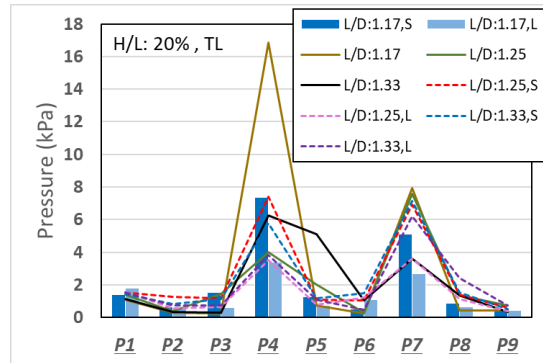


図 9 タンク壁面の圧力分布 (H/L:20%、TL)

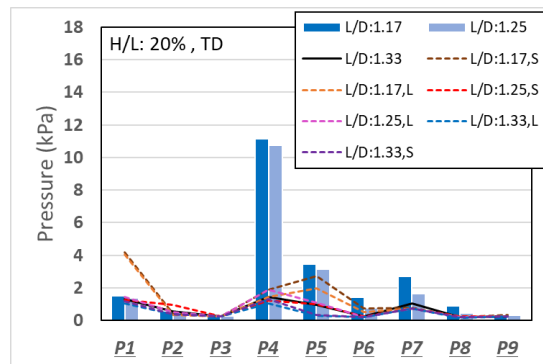


図 10 タンク壁面の圧力分布 (H/L:20%、TD)

液位 H/L:20%における強制動揺試験の結果として、特に加振周期: TL (図 9)、L/D:1.17 で加振方向に発生する段波の影響によりタンクコーナー下部 (P4) に高い衝撃圧が計測されたが、タンク寸法がより長尺となる L/D:1.33, 1.25 では段波に加えタンク幅方向の波が発生し P4 の値も低下した。現象の確認のためこれらの試験条件について FEM による複素固有値解析を実施した結果、図 11 (a) に示すタンク長手方向の一次モードに対し図 11 (b) に示すタンク奥行方向の二次モードの固有振動数が 2 倍付近となることから、L/D:1.33, 1.25 の加振時では上記両モードが発生・重畳し、タンク奥行方向への流動が生じたことで P4 における衝撃圧が緩和されたと推察できる。また三角柱スペーサーを設置した場合も同様に、タンク長手方向に進行する段波の一部が斜板の影響によりタンク奥行方向の流動となり元の段波と合流することで、衝撃圧が緩和される傾向を確認した。

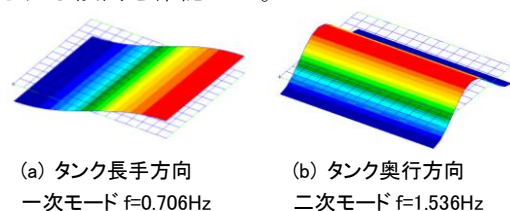


図 11 固有値解析例 (L/D:1.33, H/L:20%)

一方、加振周期：TD (図 10)、L/D:1.17 及び 1.25 の設定では、激しいスワリング状の流動の発生に伴いタンクコーナー下部に高い衝撃圧が発生することを確認した。また三角柱スペーサーを設置した試験条件ではスワリング状の流動が生じていないが、これは加振周期とした代表長さから求めた同調周期 TD と実際と同調周期が若干異なることや同調現象が発生する周波数域が比較的狭いことに起因する可能性があるため、追加試験等による確認を要する。

中液位 H/L:40%の試験の結果を図 12, 13 に示す。加振周期：TL (図 12) ではスワリング状の流動が発生した試験条件ではタンクコーナー部 (P4, P5) にやや高い圧力が確認できること、また加振周期：TD (図 13) についてもコーナー上部 (P6) に同様の傾向が見られる。一般的に中液位で発生するスロッシングは定在波に伴う上下方向の流動が主となりタンク上方に対する衝撃圧が問題となるが、スワリングが併発するような場合には更に局所的に衝撃荷重が集中する可能性が高くなるため、スワリングが発生した際のタンク上部の圧力分布並びに圧力変化についての検証が今後の課題として挙げられる。

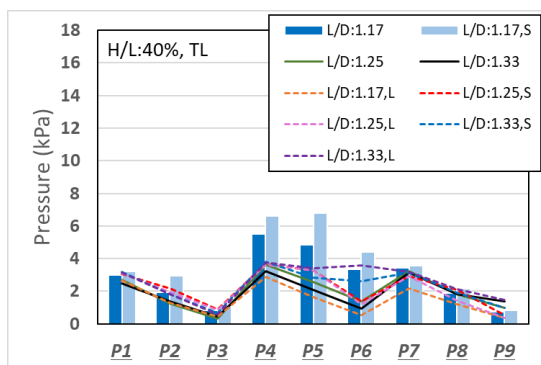


図 12 タンク壁面の圧力分布 (H/L:40%、TL)

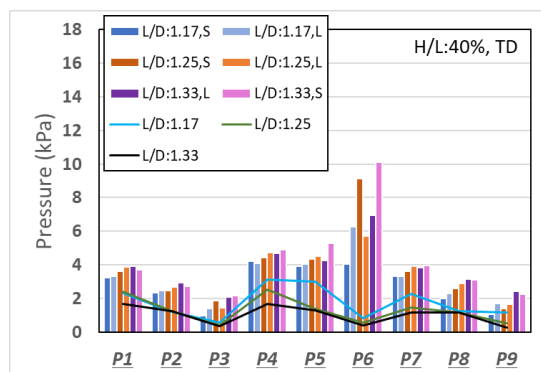


図 13 タンク壁面の圧力分布 (H/L:40%、TD)

以上から、得られたコンパクトな矩形タンクに生じるスロッシングの傾向並びにタンク壁面に生じる衝撃荷重の低減に関する知見について、以下にまとめる。

- 低液位では、タンク長手方向の一次モードとタンク奥行方向の二次モードのスロッシングが重畳する場合や、タンクコーナー部の対角を斜板にするなどして、タ

ンク奥行方向の流動を励起することにより、タンク下部の衝撃圧力が緩和される傾向にあることを確認した。

- 中・低液位共に、激しいスワリング状の流動が発生する場合、タンク壁面コーナー部に生じる圧力が増加する傾向にあり、特に中液位で定在波が併発するような場合に注意を要する。

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)

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

①名称：旋回流を利用した減揺装置、及び旋回流を利用した減揺方法

発明者：安藤孝弘、岡正義、佐久間正明

権利者：国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

種類：特許

番号：特願 2017-252765

出願年月日：平成 29 年 12 月 28 日

国内外の別：国内

②名称：スワリング発電装置

発明者：岡正義、安藤孝弘

権利者：国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

種類：特許

番号：特願 2015-172637

出願年月日：平成 27 年 9 月 2 日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安藤 孝弘 (ANDO TAKAHIRO)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・構造安全評価系・主任研究員

研究者番号：30425756

(2) 研究分担者

岡 正義 (OKA MASAYOSHI)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・構造安全評価系・構造解析研究グループ長

研究者番号：70450674