

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 27 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289327

研究課題名(和文) タンク内遊動水影響を考慮した2船体動揺推定法に関する研究

研究課題名(英文) Study on the motion of Side-by-Side moored two ships in consideration of the sloshing influence in tanks

研究代表者

湯川 和浩 (YUKAWA, Kazuhiro)

国立研究開発法人 海上技術安全研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：80435776

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,000,000円

研究成果の概要(和文)：FLNGからLNG運搬船への船舶間荷役では、2船ともに大きなLNG貯蔵タンクを有するため、LNG移送する過程で、2船内タンクにおける遊動水の影響が船体動揺に与える影響が大きくなると考えられる。本研究では、船内タンクを有するFLNGとLNG運搬船がSide-by-Side係船された状態を対象として、パネル法に基づく数値計算により2船体の動揺推定を行った。また、洋上でのLNG移送時を模擬した2船体波浪中動揺試験を実施し、水槽試験の結果と数値計算による推定結果の比較により、波浪中における船内タンクの誘導水の挙動とそれが2船体動揺に及ぼす影響を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Because both FLNG and LNG carrier have large LNG cargo tanks, the sloshing in the tanks have an impact on motion of side-by-side moored two ships during LNG transfer operation at sea. In this study, including the sloshing effect, ship motion in the wave intended for FLNG and LNG carrier were estimated based on the panel method. In addition, model test which simulate the side-by-side mooring were carried out at Ocean Engineering Basin in National Maritime Research Institute (NMRI). Comparison of estimated results of the numerical calculation and measurement results of the model test clarified a characteristic of liquid behavior in the tank and the motion of side-by-side moored two ships.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：船体運動 LNG移送 Side-by-Side係船 スロッシング Ship-to-Ship transfer

1. 研究開始当初の背景

(1) 確認可採埋蔵量の 4~6 割を占めると言われる未開発の中小ガス田では、パイプライン網の整備による輸送に比べて、天然ガスを洋上でそのまま液化して、LNG 運搬船によるシャトル輸送で出荷する方法が効率の良い輸送手段となる可能性が高く、洋上 LNG 生産施設 (Floating-LNG、以下 FLNG) は有望な開発手段として、世界的にプロジェクト化の動きが加速している。

(2) FLNG から LNG 運搬船への船舶間 (Ship-to-Ship、以下 StS) 荷役では、2 船ともに大きな LNG 貯蔵タンクを有するため、LNG 移送する過程で、2 船内タンクにおける遊動水の影響が船体動揺に与える影響が大きくなると考えられる。Side-by-Side 係船された FLNG と LNG 運搬船の洋上における LNG 移送に対する安全性評価では、2 船体の動揺評価は必須であるものの、国内外において、タンク内遊動水を考慮した 2 船体の動揺問題を取り扱っている研究例が少ない。

2. 研究の目的

Side-by-Side 係船された FLNG と LNG 運搬船は係留索とフェンダーを介して接続されているため、その非線形な特性に加えて、2 船のタンク内スロッシング影響を考慮することで、2 船に作用する流体力も変化する複雑な問題となる。縮尺模型を用いた水槽試験の結果と数値計算による推定結果の比較により、波浪中における船内タンクの誘導水の挙動とそれが 2 船体動揺に及ぼす影響を明らかにする。

3. 研究の方法

船内タンクを有する FLNG と LNG 運搬船が Side-by-Side 係船された状態を対象として、パネル法に基づく数値計算により 2 船体の動揺推定を行う。海上技術安全研究所が所有する海洋構造物試験水槽において、洋上での LNG 移送時を模擬した 2 船体波浪中動揺試験を実施し、数値計算の精度を検証するとともに、2 船の船内タンクにおける誘導水が両船に及ぼす影響について検討を行う。

4. 研究成果

(1) 水槽試験による現象把握と数値計算の精度検証を目的として、LNG 船 1 隻を対象とした波浪中動揺試験を行った。対象としたのは縮尺 1/90 のメンブレン型 LNG 運搬船模型で、海上技術安全研究所が所有する海洋構造物試験水槽 (幅 27.1m、長さ 40m、深さ 2m) にて試験を実施した。使用する模型のサイズと造波機の造波能力を考慮し、水槽の水深は 1m に設定した。

模型船内には図 1 に示すように船内タンクを 3 つ設け、食紅で着色した水を入れた。船内に搭載する計測機器との兼ね合いもあり、タンク内の水はタンク容積の 40% とした。船

内には動揺計測のためのジャイロとデッキ上には変位計測のための LED、タンク内には水位変動計測のための波高計をタンクの四隅に設置した。また、方位角抑制治具を用いて、ばね定数の小さなつる巻ばねとワイヤーで LNG 運搬船模型が漂流しないように係留した。方位角抑制治具を水槽曳引台車上のターンテーブルに固定し、ターンテーブルを回転させることで模型船に対する波の入射角を変更した。図 2 にセッティングを示す。

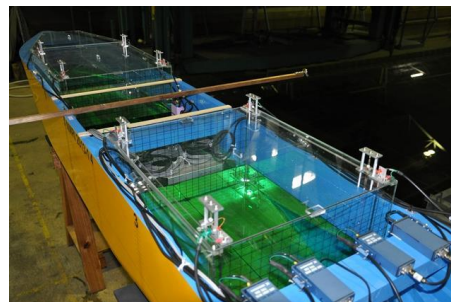


図 1 供試模型船と船内タンク

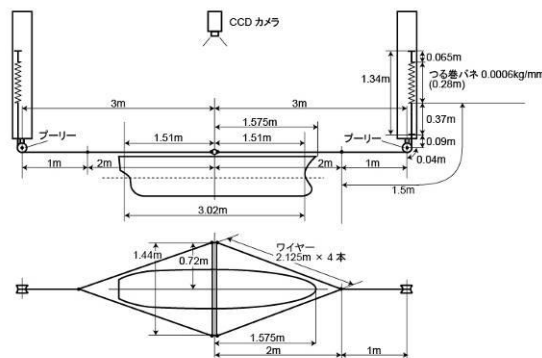


図 2 セッティング

表 1 実験条件

項目	条件(実機スケールで表示)
波向き	180, 150, 120, 90deg.
波周期	5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8, 10, 12sec
波高	2.5m

試験条件を表 1 に示す。波向きは 180deg (正面波) から 90deg (横波) まで 30deg 刻みとし、波高 2.8cm (実機 2.5m 相当) の規則波を入射波とした。図 3 に波浪中動揺試験の様子を示す。試験ではタンク内遊動水が船体の動揺量に及ぼす影響を調べるため、タンク内に水を入れた場合と水の代わりにおもりを入れた場合の 2 通りについて計測を行った。なお、おもりを入れる場合は船体の重量と重心位置が同一となるように、各タンクに鉄球ウェイトを搭載した。

水槽試験結果との比較を行うため、パネル法に基づく解析ツール WAMIT¹⁾を用いて、水槽試験結果との比較を行った。図 4 に数値計算で用いたメッシュデータを示す。座標系



図 3 波浪中動揺試験の様子

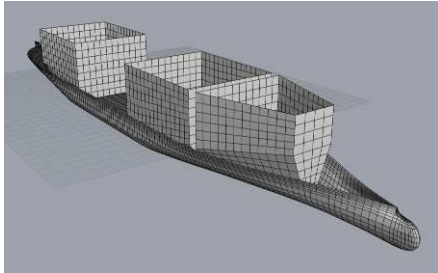


図 4 LNG 運搬船の Hull メッシュ形状

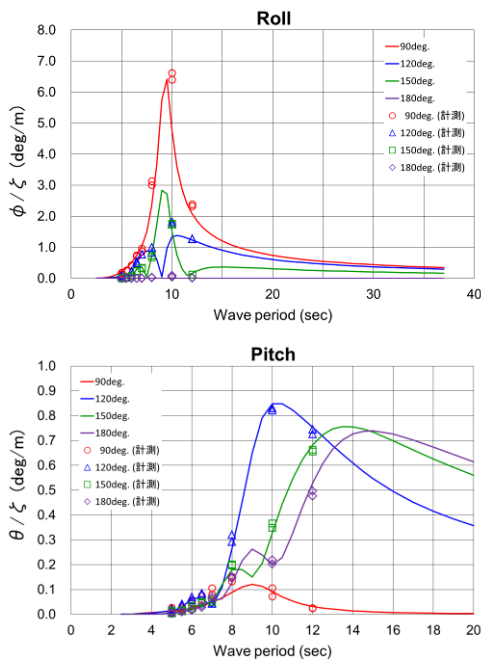


図 5 動揺 RAO の比較 (ウエイトの場合)

には Midship の水面高さに原点 O、船首方向に X 軸、左舷側に Y 軸、鉛直上向きに Z 軸の正の向きをとる右手系直交座標系を採用し、水面下の Hull 形状を 5,198 個の四角形パネルで分割して表現した。図 5 および図 6 に波浪中の動揺応答を比較した結果を示す。図は計算原点である O 点周りの結果であり、タンク内の遊動水を考慮した場合としない場合 (タンク内に鉄球ウエイトを搭載して計測した場合) について、例として Roll、Pitch の運動を比較した結果を示している。図の横軸は波周期、縦軸は各運動を入射波の片振幅 ζ で割った値である。図中の実線が数値計算による推定結果、プロットが波向き毎の計測

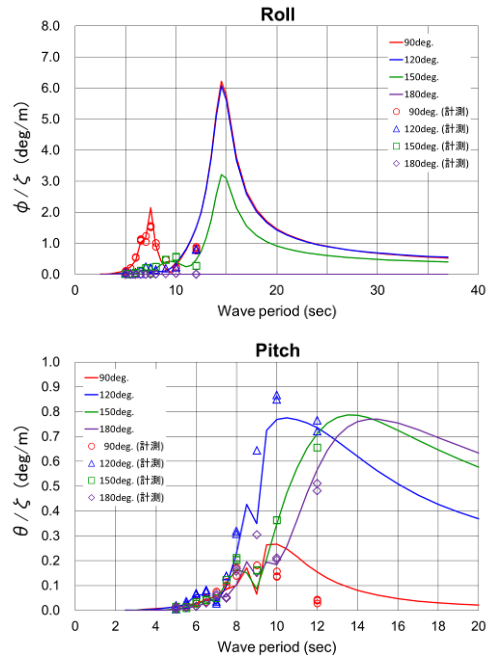


図 6 動揺 RAO の比較 (遊動水の場合)

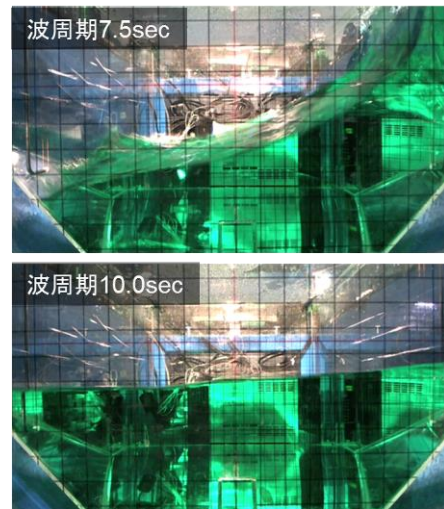


図 7 タンク内の様子 (波向き 90deg.)

結果を表す。図より数値計算による推定結果は模型試験結果の傾向を比較的良く表しており、一致度も良好であることが分かった。船内タンクの遊動水影響を考慮することで、特に Roll の応答に差が生じており、波周期 7.5sec 付近で遊動水の同調が見られ、Roll の固有周期が長くなることが分かった。

図 7 はタンク内における水位変動の様子を船内に設けたビデオで撮影した画像である。Roll の動揺 RAO に現れていた遊動水の同調周期 7.5sec で、大きな水位変動が生じている様子がよく分かる。また、図 8 はタンクの四隅に設置した容量式波高計で計測した水変動の RAO と数値計算による推定値を比較した結果である。タンク内誘導水の影響が船体の Roll 運動に及ぼす影響が大きい波向き 90deg. の場合について比較を行った結果である。図の横軸は入射波の周期、縦軸はタンク内の水位変動量を入射波の片振幅 ζ で割

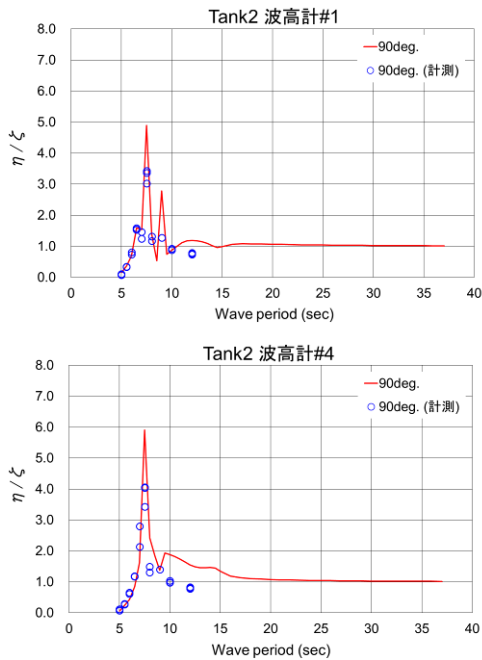


図 8 水位変動 RAO の比較 (波向き 90deg.)

った値を示す。実線が数値計算による推定結果、プロットが計測結果を表す。図より、計測結果と推定結果は比較的良く一致しており、同調周期付近の大きな水位変動を含めた波浪中動揺時のタンク内誘導水の水位変動の応答を数値計算により精度良く推定できることが分かった。

(2) 海上技術安全研究所が所有する海洋構造物試験水槽において、FLNG 及び LNG 運搬船の縮尺 1/90 模型を対象とする、2 船体波浪中動揺試験を実施した。FLNG は FLEX FLNG^[2]の主要目を参考とした。LNG 運搬船は前述した単船での波浪中動揺試験において対象とした 14.5 万 m³ のメムレン型 LNG 運搬船である。表 2 に 2 船の主要目を示す。なお、2 隻ともタンク内誘導水の挙動が大きくなると考えられる半載状態で実験を行った。

表 2 対象船の主要目

	FLNG		LNGC	
	実機	模型	実機	模型
垂線間長 L_{pp} (m)	328.0	3.64	272.0	3.02
型幅 B_{mid} (m)	50.0	0.56	43.4	0.48
型深さ D_{mid} (m)	31.6	0.35	26.0	0.28
喫水 d (半載) (m)	12.0	0.13	10.4	0.12

また、単船での計測と同様に、方位角抑制治具を用いて、ばね定数の小さな巻きばねとワイヤーで FLNG 模型船が漂流しないように係留した。方位角抑制治具を水槽曳引台車上のターンテーブルに固定し、ターンテーブルを回転させることで模型船に対する波の入射角を変更した。LNG 運搬船模型は、係船索とフェンダー模型を介して FLNG 模型船の右舷側に Side-by-Side 係船した。図 9 に試験時のセッティングを示す。

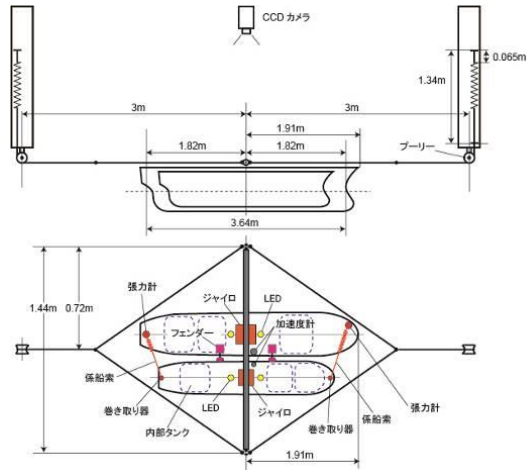


図 9 セッティング

2 船間の索取りは OCIMF (Oil Companies International Marine Forum) のガイドライン^[3]に基づき決定した。実機スケールで索径 90mm の Tail Rope と索径 47.5mm の Wire Rope の組み合わせとし、初期張力 5tonf で 16 本の係船索による索取りを想定した。2 船間のフェンダーについては、両船の接触エネルギーに基づき横浜ゴム株式会社のカタログ^[4]から直径 3.3m × 長さ 6.5m の空気式フェンダー 4 基の使用を想定した。

一方、水槽試験では 2 本の係船索と 2 基のフェンダー模型でそれらの特性を模擬できるように設計を行った。係船索はワイヤーと巻きばねで構成し、模型船の船首尾に設置したワイヤー巻き取り器により、係船索の初期張力を調整出来るようにした。

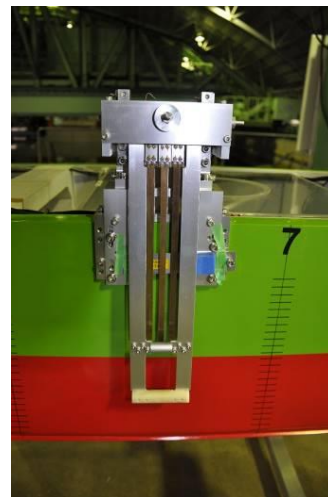


図 10 フェンダー模型の外観

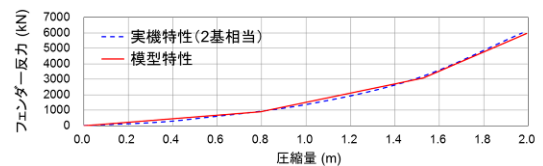


図 11 フェンダー反力特性の比較

また、フェンダーはばね定数の異なる 3 枚の

板ばねを組み合わせて用いることで、実機フェンダーの非線形な反力特性を模擬できるように工夫した。図 10 にフェンダー模型の外観、図 11 に実機フェンダーと模型の反力特性の比較を示す。想定した実機の係留配置図に基づく係留系全体の特性を模擬することが出来るように、係船索の配置とばね定数、フェンダー模型の配置をそれぞれ決定した。

FLNG および LNG 運搬船模型には、それぞれ 3 基の船内タンクを搭載した。FLNG の船内タンクには、タンク容量の 46%、LNG 運搬船の船内タンクにはタンク容量の 42% の水を入れ、船内に設置したビデオカメラにて観測しやすいように、食紅で着色した。

図 12 に 2 船体波浪中動揺試験の様子を示す。試験ではタンク内遊動水が船体の動揺量に及ぼす影響を調べるため、誘導水がある場合と無い場合の 2 通りについて計測を行った。誘導水が無い場合については、タンク内に超吸収ポリマーを入れて水をゲル化させることで、重量および重心位置を変えることなく水面の変動を抑制した。ただし、重量については、超吸収ポリマーを用いた水のゲル化により若干変化を伴うが、模型全体の重量に対し変化分が 1%未満であったため、本試験では無視した。表 3 に試験条件を示す。試験では、実機で波高 2.5m 相当の規則波に加えて、JONSWAP のスペクトル型 ($\gamma=2.5$) を用いたスペクトルピーク周期 T_p が 7.5sec と 9.0sec の不規則波も使用した。

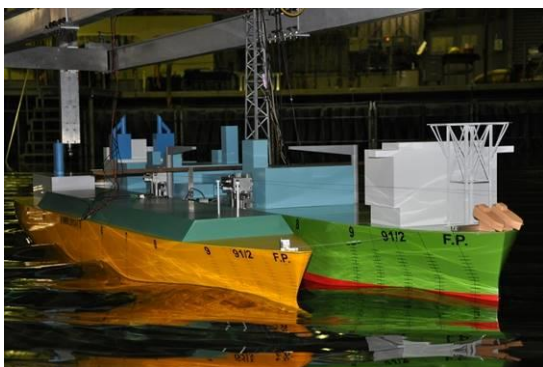


図 12 2 船体波浪中動揺試験の様子

表 3 試験条件

項目	条件 (実機スケールで表記)
波高(m)	2.5
周期(sec)	規則波: 5.0, 6.0, 7.0, 7.5, 8.0, 8.5, 9.0, 10.0 不規則波: $T_p=7.5, 9.0$ (JONSWAP, $\gamma=2.5$)
波向き(deg)	120, 150, 180, 210, 240, 270
船内タンク	スロッシング有り、無し

図 13 は規則波中で LNG 運搬船模型のタンク内における水位変動の様子を船内に設けたビデオで撮影した画像である。周期 7.5sec で水位変動が大きくなっている様子が分かる。

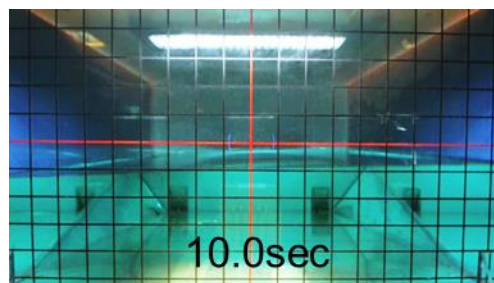
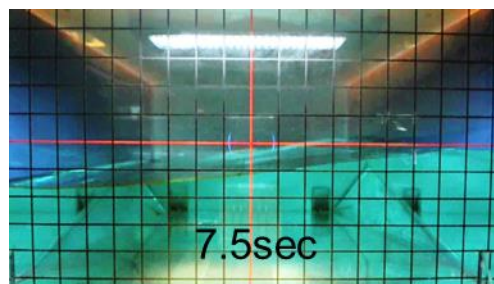


図 13 LNG 運搬船の船内タンク (規則波中)

水槽試験結果との比較を行うため、パネル法に基づく解析ツール WAMIT[®]を用いて、水槽試験結果との比較を行った。図 14 に数値計算で用いたメッシュデータを示す。FLNG および LNG 運搬船に対する水面下の Hull 形状をそれぞれ 5,594 個、4,606 個の四角形パネルで分割して表現した。

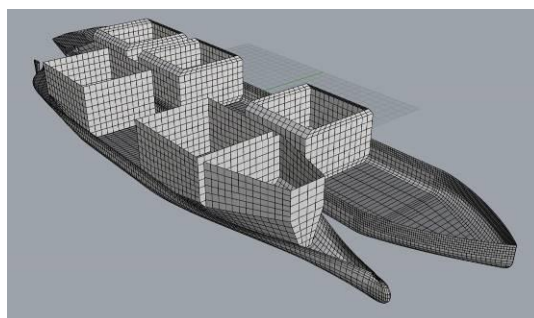


図 14 Side-by-Side 係船された 2 船体の Hull メッシュ形状

図 15 に波浪中の 2 船体動揺 RAO を比較した結果を示す。図は、タンク内誘導水を考慮した場合としない場合について、FLNG と LNG 運搬船に対する Roll 運動の応答を比較したものである。横軸は波周期、縦軸は Roll 角を入射波の片振幅 ζ で割った値を示す。図中のプロットが模型試験による計測結果で、タンク内の遊動水を考慮した場合が赤色のプロット、タンク内に搭載した水をゲル化して挙動を抑制した場合の結果を青色のプロットで色分けして示している。なお、塗りつぶしたプロットはスペクトルピーク周期 T_p が 9.0sec の場合の結果、白抜きした各プロットは規則波中での結果をそれぞれ表す。また、実線は数値計算による推定結果である。両者を比較すると、数値計算による推定結果は模型試験による結果の傾向をおおよそ捉えていることが分かる。タンク内に遊動水がある

場合、ちょうど波周期 7.5sec で同調がみられ、タンク内の誘導水を考慮した場合としない場合とは、Roll の応答 (固有周期と動揺量) に大きな差が生じることが分かる。

LNG 移送時の安全性、稼働性評価を行う際、タンク内の誘導水影響は考慮せずに評価を行うことが一般的であるが、本研究の結果から Side-by-Side 係船された 2 船は波周期が短い範囲で船内タンクの誘導水との同調、波周期の長い範囲において 2 船の動揺 (特に Roll 運動) の固有周期が長くなる方向へ変化し、それらの応答はパネル法に基づく数値計算により比較的良い精度で推定出来ることが分かった。今後は洋上における LNG 移送の安全性、稼働性評価においてもタンク内遊動水影響による応答の変化を考慮した評価を行うことが重要であるとともに、数値計算による評価技術と水槽試験技術の両方の技術向上に取り組み、将来的にはタンク容量変化に伴うインベントリ評価を考慮した、Total Availability 解析 (Sequential 出荷ダウンタイム解析) が出来る体制を構築したい。

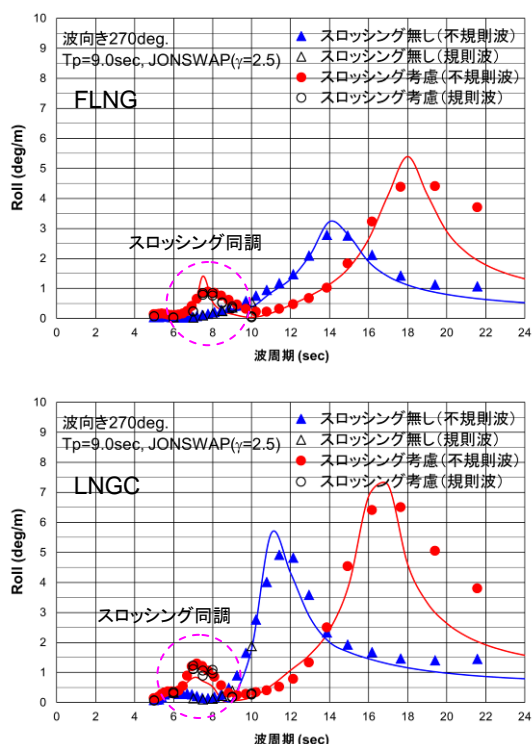


図 15 2 船体の動揺 RAO の比較 (Roll 運動)

<参考文献>

[1] Wamit, Inc. <<http://www.wamit.com/>>.
 [2] FLEX LNG <<http://www.flexlng.com/>>.
 [3] OCIMF; Mooring Equipment Guidelines 3rd Edition, 2008.
 [4] 横浜ゴム株式会社 : YOKOHAMA FLOATING FENDERS PNEUMATIC 50&80 ヨコハマ浮遊空気式防舷材 (洋上接舷用・岸壁用) , 2011.

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 件)

[学会発表] (計 件)

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称 :
 発明者 :
 権利者 :
 種類 :
 番号 :
 出願年月日 :
 国内外の別 :

○取得状況 (計 件)

名称 :
 発明者 :
 権利者 :
 種類 :
 番号 :
 取得年月日 :
 国内外の別 :

[その他]
 ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

湯川和浩 (YUKAWA, Kazuhiro)
 国立研究開発法人 海上技術安全研究所・
 その他部局等・研究員
 研究者番号 : 80435776

(2) 研究分担者

齊藤昌勝 (SAITO, Masakatsu)
 国立研究開発法人 海上技術安全研究所・
 その他部局等・研究員
 研究者番号 : 80359124

佐藤 宏 (SATO, Hiroshi)
 国立研究開発法人 海上技術安全研究所・
 その他部局等・研究員
 研究者番号 : 70435775

石田 圭 (Ishida, Kei)
 国立研究開発法人 海上技術安全研究所・
 その他部局等・研究員
 研究者番号 : 60636827