

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360354

研究課題名(和文) 極低温液体貨物を貯蔵する浮体式海洋構造物の安全性評価法の開発

研究課題名(英文) Safety of floating structures for storing cryogenic liquid cargo

研究代表者

荒井 誠 (ARAI, MAKOTO)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00232025

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：化石燃料の中でも相対的にクリーンな液化天然ガス(LNG)の需要が増加している。現状では船舶用LNG格納タンクとしてメンブレン方式と球形タンク方式が使用されているが、近年のタンク容量の増大による半載航海への要望の高まりや、FLNGなど半載を前提としたシステムの出現により、貨液半載時に生ずる危険なスロッシングが懸念されている。本研究では、半載状態でのLNG格納タンクにおけるスロッシング挙動予測法の研究を進めた。また、液体運動と船体運動の連成効果を評価するツールを開発し、模型実験および数値計算によりその有効性を確認した。さらにスロッシングを防止するための装置やオペレーション法について検討を行った。

研究成果の概要(英文)：As a cleaner alternative to other fossil fuels, the demand for liquefied natural gas (LNG) is steadily increasing. This has resulted in technical innovations in the LNG supply chain. Among the various LNG tank systems, the membrane LNG tank and the spherical LNG tank are mainly used as practical storage systems. Increases in the size of the tank and the emergence of new operation modes of LNG carriers such as their usage as shuttle tankers for FLNG can lead to a partially filled condition which was not common in the past. In this context, the prediction of the dynamic behaviors of liquid cargo has become essential topics. Fundamental information was obtained regarding the sloshing motion, such as the criteria for the generation of sloshing and swirling, the coupling effect between the ship motion and the liquid motion, etc. In this study, we proposed a simple anti-sloshing floating device to be installed inside liquid cargo tanks and examined the performance of the proposed device.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：計画 設計 生産システム 液化天然ガス FLNG LNG船 スロッシング

## 1. 研究開始当初の背景

我が国にとって、海洋における資源開発は、エネルギー源や希少金属等の素材を得るという点で重要であるだけでなく、新たな産業創出や領海の権益確保などに必要な重要政策課題である。

たとえば、日本近海の海底には豊富なガス田が存在することが確認されているが、海底ガス田の開発には高度な技術が要求されること、また、採算性や周辺国との政治的関係などの複雑な要因があり開発が進んでいない。しかしながら、日本固有の資源開発に取り組むことの重要性は論を俟たない。ところで、海洋における「石油」開発では、浮体式の FPSO (Floating Production, Storage and Offloading) と呼ばれる生産・貯蔵・積み出し用の施設が多く使われている。一方、「天然ガス」の開発においては、天然ガスを極低温下 (-162 °C) で冷却液化し、体積を 1/600 程度に下げて貯蔵する必要がある。このため、液化天然ガス (LNG) の貯蔵では極低温のタンクが必要であり、その代表的な方式であるメンブレン方式 LNG タンクではタンク内に構造物がほとんどないため、波浪により浮体が動揺するとタンク内の液体が激しく動揺する同調現象が発生する危険性が高い。この現象はスロッシングと呼ばれ、液体とタンク構造の衝突により発生する衝撃荷重がタンク構造の損傷に結びつく危険性があるため、液体貨物を運搬する船舶でも設計上重要な検討項目となっているが、LNG-FPSO では殊更に重要でありその実現性を左右する。

## 2. 研究の目的

資源の乏しい我が国にとって、広大な排他的経済水域内に存在する海洋資源の利用が可能になれば、エネルギー源や希少金属等を他国の政治情勢によらず安定して確保できることになり国民生活の維持発展にとって極めて有益である。本課題では、海洋における石油や天然ガスの生産に必須のシステム

である浮体式海洋構造物の安全性確保技術について研究を行う。特に、現在はまだ実用化に至っていない浮体式天然ガス生産・貯蔵システムにおいて極めて重要な技術要素であるタンク内液体動揺の予測および制御に関する技術の研究に注力する。これにより、浮体式天然ガス生産・貯蔵システムの実現に寄与することを研究目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究の目的を達成するため、以下の項目に関する研究を実施する。

液体貨物と浮体 (FLNG や LNG 船) の連成影響を考慮した運動計算に関する理論展開を行う。また、その成果を元にして浮体運動シミュレーションプログラムを開発する。

タンク内に貯蔵された液体の挙動を研究するため、物体適合座標系を用いるスロッシングの数値計算プログラムを開発し、球形タンクおよび八角形断面をもつメンブレンタンクの数値解析を行い、それらのタンク内の液体の挙動を調べる。タンク形式として主流であるメンブレンタンクのスロッシング防止法に関する研究を行い、その有効性を開発した数値計算法および模型実験により確認する。本研究により得られた研究成果を国際船体構造会議 (ISSC) などの国際的学術組織に報告することにより、極低温液体貨物を貯蔵する浮体構造物の安全性確保に貢献する。

## 4. 研究成果

主な研究成果を以下に報告する。

### (1) 浮体構造物の運動とタンク内液体運動の連成に関する研究

タンク内液体運動計算と浮体の運動計算を連結した波浪中での連成計算法を開発した (雑誌論文、学会発表)。数値計算の流れを図 1 に示す。開発した数値計算法を用いて半載状態の球形タンクを搭載した大型 LNG 船の波浪中運動特性を調べたところ、タンク内液体運動を考慮しない場合には観測

されない複数の応答ピークが応答関数に現れることが示された。すなわち、船体運動の同調周波数の他にもタンク内液体運動の同調周波数において船体運動が大きくなることが分かった。

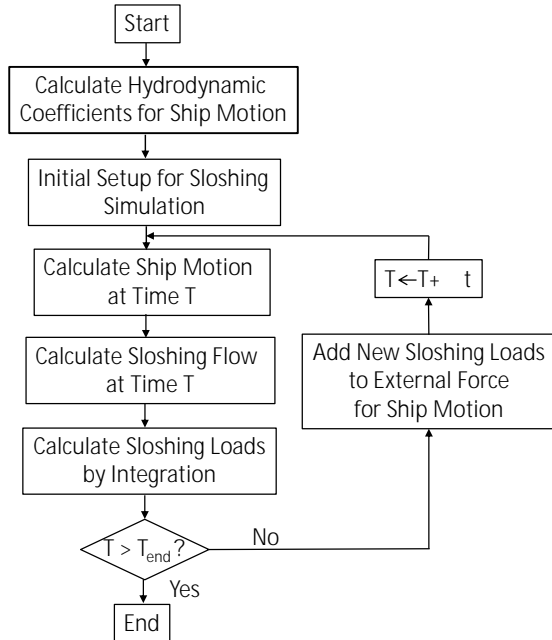


図 1 タンク内液体運動と船体運動の連成計算法の計算手順

## (2)液体貨物の挙動に関する研究

液体貨物貯蔵タンク内に格納された液体が船体の動揺により加振され大きく運動する現象（スロッシング）について考察を行った。特に角形のタンク形状をもつメンブレン方式のタンクでは、タンク天井や側壁に大きな衝撃荷重が作用することがある。これらの挙動とタンク構造設計上の注意点をまとめた（雑誌論文、）。また、スロッシング現象を精度良く再現するため、タンク壁形状に適合したメッシュ系を用いて数値計算を行うシミュレーション法を開発した。開発したシミュレーション法を球形タンクの解析に適用し、球形タンクのスロッシング特性を調べた。球形タンクでは、液体が前後・左右に動揺するだけでなく、タンク内を回転する現象（スワーリング）が発生するが、数値シミュレーションによってスワーリングを再

現できることを示した（学会発表、）。スワーリング発生時の液体の運動とタンク壁に作用する力の時系列計算結果を図 2 に示す。

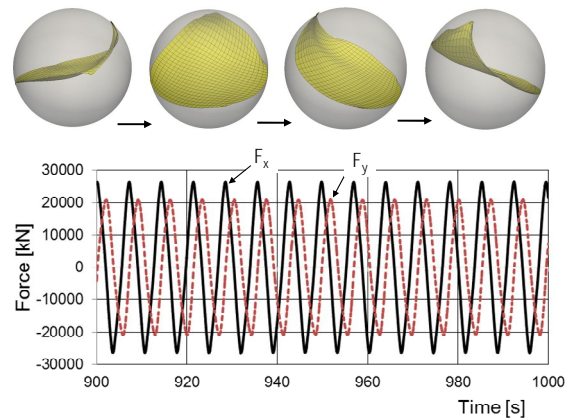


図 2 Sway 運動を与えた場合のタンク内液体運動（上段）とタンク壁に作用する力の時系列（下段、実線：加振方向の力、破線：加振に垂直方向の力）

さらに、タンク内に穴あき部材を設置する場合の液体運動の変化について検討し研究成果を報告した（学会発表、）。また、タンク内に存在するパイプタワーの動的挙動挙動に関する検討を行った（学会発表、）。

## (3)スロッシング低減法に関する研究

浮体式天然ガス生産・貯蔵システムは船体内に巨大な貯蔵タンクをもち、また、液化ガス生産過程において必ず半載状態が発生するため、スロッシングの影響を如何に抑えるかが設計上の重要な検討課題になっている。本研究では、以下に示す 2 通りのスロッシング低減法を研究しその有効性を示した。

### a) タンク内に小型浮体を設置する方法：

タンク内に小型の浮体を設置し、液体貨物の自由表面を 2 分割する方法を提案した。この方法は、自由表面幅を小さくすることにより、自由表面幅に依存する液体運動の固有周波数を高周波数側にシフトさせ船体運動の固有周波数から遠ざけることを狙っている。模型実験および数値計算により、本方法の有

効性を確認した（雑誌論文、学会発表、  
、  
、  
）。図3にスロッシング防止用浮体の効果を示す。なお、本研究の成果として得られたスロッシング防止方法は、国内および国際特許として出願中である。

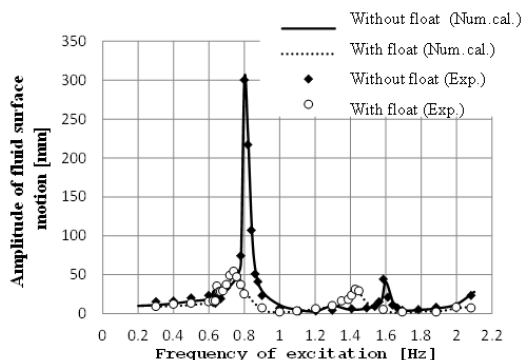


図3 スロッシング防止用浮体の効果  
(実線：浮体無し、破線：浮体有り)

b) メンブレン方式の LNG タンクをもつ洋上天然ガス生産設備ではスロッシング発生によるタンク構造の損傷の危険性がある。複数の貯蔵タンク間で液化天然ガスを移動させ、危険な液位をできるだけ起こさない貯蔵・移送方法を考案し、数値シミュレーションによりその有効性を確認した（雑誌論文、学会発表、  
、  
、  
、  
）。

#### (4)スロッシングに関する国際共同研究

国際船体構造会議 (ISSC) の共同研究として液化天然ガスの輸送と貯蔵問題に関する研究を実施した。特に大型の浮体式天然ガス生産・貯蔵設備 (FLNG) においては、天然ガス貯蔵設備としては従来にない使用方法（すなわち、浮体上のタンクに半載状態で天然ガスを貯蔵）となるため、スロッシング発生の危険性が指摘されている。発生する衝撃現象の検証、タンクの設計および建造上の問題点、船体運動との連成影響、パイプタワーの振動問題などの調査研究を行い、研究成果を報告した（雑誌論文、  
、  
）。

#### 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 5 件)

Arai, M., Matsuo, M., Sloshing Risk Reduction in Membrane Tanks of FLNG by Interchanging Liquid Cargo between Tanks, International Journal of Offshore and Polar Engineering, 掲載決定, 2016. 査読有

Huijsmans, R.H.M., Arai, M., Feirreira, M.D., Ha, M.K., Lindgren, M., Rahman, T., Schreier, S., Sharma, P., Valle, O., Tao, L., Zakky, A., Zhan, Z., Report of Committee V.2, Natural Gas Storage and Transportation, 19th International Ship and Offshore Structures Congress, Volume 2, pp. 591-618, 2015. 査読有

Wang, X., Arai, M., A Numerical Study on Coupled Sloshing and Ship Motions of a LNG Carrier in Regular and Irregular Waves, Journal of Engineering for the Maritime Environment, Vol. 229(1), pp.3-13, 2015. DOI 10.1177/1475090213493771. 査読有

荒井誠、鈴木良介、岸本直彦、安藤孝弘、浮体を用いた LNG タンクのスロッシング防止に関する研究、日本船舶海洋工学会論文集、第17号, p.p. 185-193 (2013). 査読有

Arai, M., Bogaert, H., Graczyk, M., Ha, M.K., Kim, W.S., Lindgren, M., Martin, E., Noble, P., Tao, L., Valle, O., Xiong, Y., Report of Committee V.2, Natural Gas Storage and Transportation, Proceedings of 18th International Ship and Offshore Structures Congress, Volume 2, pp. 67-112, 2012. 査読有

{ 学会発表 } (計 13 件)

Arai, M., Cheng, L.Y., Wang, X., Okamoto, N., Hata, R., Karuka, G., Sloshing and swirling behavior of liquid in a spherical LNG tanks, PRADS 2016,

Copenhagen, Denmark,発表決定, 2016.

Cheng, L. Y., Bellezi, C. A., Amaro, R. A., Arai, M., Okada, T., A numerical study on the effects of the perforated swash bulkheads on sloshing behaviors of liquid cargo tanks, 26th International Offshore and Polar Engineering Conference, Rodos, Greek, 発表決定, 2016.

Hata, R., Arai, M., and Furth, M., Sloshing and swirling inside a spherical tank, TEAM 2015, Oct. 12 - 15, 2015, Vladivostok, Russia, p.p.346-350, 2015.

Cheng, L.Y., Amaro, R. A., Arai, M. and Nishimoto, K., Hydrodynamic Performance of Perforated Breakwater, TEAM 2015, Oct. 12 - 15, 2015, Vladivostok, Russia, p.p.190-197, 2015.

Arai, M., Matsuo, M., A Study on the Sloshing Risk Reduction in Membrane-type LNG Tanks by Interchanging Liquid Cargo between Tanks, 25th International Offshore and Polar Engineering Conference, Hawaii, USA, pp.898-904, 2015.

松尾優、荒井誠、大型洋上 LNG 貯蔵設備のスロッシング軽減法の研究(分配操作法の提案) 日本船舶海洋工学会講演会、第 19 号、長崎、pp. 589-591, 2014.

Matsuo, M, Arai, M., A Study of the Reduction of Sloshing Risk in Membrane-type LNG Tanks Due to Interchanging Liquid Cargo between Tanks, 28th Asia Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, TEAM 2014, Istanbul, Turkey, p.p. 260-267, 2014.

Karuka, G, Arai, M., Masuda, T., Dynamic Response of Internal Structures in LNG Tanks Caused by Sloshing, 28th Asia Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, TEAM 2014, Istanbul, Turkey, p.p. 293-300, 2014.

Arai, M., Suzuki, R., Ando, T., Kishimoto, N., Performance study of an anti-sloshing floating device for membrane-type LNG tanks, 15th Congress of International Maritime Assoc. of Mediterranean, IMAM 2013, A Coruna, Spain, p.p.171-181, 2013.

Matsuo, M., Arai, M., Proposal of Distribution Control Method to Minimize Sloshing Risk in Membrane-type LNG Tanks of FLNGs, The 27th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures , TEAM 2013, Keelung, Taiwan, p.p. 149-155, 2013.

Cheng, L.Y., Bellezi, C.A., Arai, M., Particle-based Numerical Analysis of Wave Slamming on a Semi-submersible Platform, The 27th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures , TEAM 2013, Keelung, Taiwan, p.p. 125-132, 2013.

鈴木良介、荒井誠、岸本直彦、安藤孝弘、メンブレン方式FLNGのスロッシング防止に関する研究、日本船舶海洋工学会講演会、第 16号、広島、p.p.195-198 (2013).

Arai, M., Suzuki, R., Ohta, Y. and Wang, X., Study of an anti-sloshing floating device for membrane-type LNG tanks, 11<sup>th</sup> International Marine Design Conference, Glasgow, UK, Vol.2, p.p. 554-565, 2012.

〔図書〕(計 1 件)  
荒井誠、遠山泰美、渋谷唯司、修理英幸、深沢塔一、船舶海洋工学シリーズ、船体構造振動編、成山堂書店、2013 年 6 月

〔産業財産権〕  
出願状況(計 1 件)  
名称: スロッシング防止装置及びスロッシング防止方法(SLOSHING PREVENTING DEVICE AND PREVENTING METHOD)

発明者：荒井誠

権利者：同上

種類：特許権

日本：出願番号 特願 2013-511080(国内移行日 2013年8月21日)

中国：出願番号 2012 8 0019801.1(国内移行日 2013年10月22日)、審査請求(2013年12月23日)

韓国：出願番号 KR2013-7019169(国内移行日 2013年11月4日)、審査請求(2013年12月23日)

ブラジル：出願番号 BR112013027132-9(国内移行日 2013年10月21日)

取得状況(計0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

<http://ias.ynu.ac.jp/research/arai.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

荒井 誠 (Arai, Makoto)  
横浜国立大学・工学研究院・教授  
研究者番号：00232025

### (2) 研究分担者

村井 基彦 (Murai, Motohiko)  
横浜国立大学・環境情報研究院・准教授  
研究者番号：60292893

西 佳樹 (Nishi, Yoshiki)  
横浜国立大学・工学研究院・准教授  
研究者番号：70470052

### (3) 研究協力者

Cheng, Liang Yee  
サンパウロ大学(ブラジル)・工学部・助教授