

令和 2 年 5 月 31 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14883

研究課題名（和文）船用液体水素タンク内部における熱流動現象の解明 -計測・数値解析-

研究課題名（英文）Study on thermal hydraulics phenomenon inside liquid hydrogen tank for marine transportation: measurement and numerical analysis

研究代表者

前川 一真 (Maekawa, Kazuma)

神戸大学・海事科学研究科・助教

研究者番号：20760664

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、液体水素を安全に海上輸送するための基盤技術の提供を目指して、海上輸送時における液体水素タンク内部の熱流動現象を解明することを目的とし、練習船深江丸を用いた外洋における液体水素海上輸送実験を行った。海上輸送実験では、船体動揺に伴うスロッシングを複数本の超伝導液面センサーで検知するとともに、タンク内部の温度上昇率、圧力上昇率、液体水素蒸発量等への影響を明らかにした。また、数値解析ソフトSTAR-CCM+を用いて、液体水素タンク内部の熱流体解析モデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

LNGをはじめ船用の大型タンク内部の極低温危険物のスロッシング時の熱流動現象は、安全及び計測技術の問題から、実験的に詳しく調べられていなかった。本研究では、液体水素タンク内部のスロッシングを複数本の超伝導液面センサーを用いて調べる新手法を確立するとともに、海上輸送実験により取得したタンク内部の温度、圧力、タンクに加わる加速度等のデータを数値解析の参照データとして用いることで、最適な数値解析モデルを構築することができた。本研究により、安全な液体水素海上輸送技術を確立するとともに、船用大型液体水素タンクの開発に貢献することができる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aim to provide basic technology for the marine transportation of liquid hydrogen. To clarify the thermal hydraulic phenomenon inside a liquid hydrogen tank during marine transportation, we carried out the marine transportation test of liquid hydrogen by the training ship Fukae-maru in the open sea. In the marine transportation test, we examined sloshing in a liquid hydrogen tank using multiple MgB2 sensors and clarified the effects of sloshing on the increase rate of the temperature, the pressure and the evaporation of liquid hydrogen inside a liquid hydrogen tank. Moreover, we developed the thermal fluid analysis model inside a liquid hydrogen tank using the simulation software STAR-CCM+.

研究分野：低温工学

キーワード：水素 超伝導応用 液面センサー 海上輸送 スロッシング 熱流動 低温計測

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

福島第一原発事故以降、我が国における化石燃料への依存度は高まっており、「環境負荷の低い代替エネルギー」が求められている。また、エネルギー資源に乏しい我が国においては、エネルギーの大部分を海外の化石燃料に依存しており、エネルギー供給源の多様化のためにも新たなエネルギー源が必要である。

新たなエネルギー源として、今「水素エネルギー」が最も期待されている。その主な理由として、水素は水が原材料となりうることから地球上に無尽蔵に存在し、製造方法が多いこと、また利用時に CO_2 を排出しないこと等が挙げられる。しかし、エネルギー資源に乏しい我が国において、水素エネルギーを普及させるためには、国内の再生可能エネルギー、副生水素等の利用による水素製造だけでは供給不足である。そこで、海外における余剰再生可能エネルギーや、未利用の褐炭等を使用して、水素を現地で製造・液化し、高密度の極低温液体である液体水素の形で我が国に船舶によって安価で大量に海上輸送する計画（WE-NET 計画）が脚光を浴びている。

我々は、液体水素の貯蔵・輸送・利用のための基盤技術の一つとして、世界で初めて液体水素用外部加熱型超伝導 MgB_2 （二ホウ化マグネシウム：超伝導転移温度（ T_c ）約 32 K）液面センサーの研究開発を行っており、これまでに、センサーの静的液面検知特性、長尺化、熱応答性、等について明らかにしてきた。また、最近の予備実験で、この液面センサーの動的液面検知特性（液面変化に対するセンサーの応答時間および追従性）も優れていることが分かってきた。

すでに海上輸送が行われている液化天然ガス（LNG）のタンクで問題となるスロッシング現象は液体水素において明らかにされていないことから、その解明が急がれている。また、液体水素の場合、LNG に比べて沸点が低く、約 10 倍蒸発しやすいことから、スロッシングが発生すると、タンク壁面等との熱交換等によって液体水素が蒸発し、Boil off gas（BOG）の増加に伴って、タンク内圧の急激な上昇が起こると予想される。安全に液体水素を海上輸送するためには、タンク内部のスロッシングに伴う熱流動現象を解明し、最適なタンク形状、揺動防止板を開発する必要がある。本研究において、我々が開発した高精度・高信頼性の超伝導液面センサーをタンク内部に複数本設置し、同時に液面を計測することで、光学的に観測が難しいタンク内部のスロッシングを把握することが可能となる。また、同時にタンク内の温度・圧力、タンクに加わる加速度、船速等も計測することで、スロッシングに伴うタンク内部の熱流動現象が実験的に解明できるとの着想に至った。さらに、実験で得られたデータと汎用熱流体解析ソフトウェア STAR-CCM+ による数値解析結果の比較を行うことで、最適な解析モデルを構築することができるとの着想に至った。

2. 研究の目的

2011 年に起こった福島第一原発事故以降、我が国のエネルギー問題は深刻であり、新たなエネルギー源の確保が求められている。本研究は、究極のクリーンエネルギーである水素エネルギーに着目し、水素を海外から我が国へ高密度の極低温液体である液体水素（ LH_2 ; 沸点約 20 K）の形で船舶によって安価で大量に海上輸送するための基盤技術の確立を目指している。

本研究の目的は、海上輸送時における液体水素タンク内部の液面揺動（スロッシング）に伴う熱流動現象の解明である。

3. 研究の方法

本研究の目的は、海上輸送時における船用液体水素タンク内部のスロッシングに伴う熱流動現象を、最先端の超伝導技術と 3 次元熱流体解析ソフトウェアを用いて解明することである。予備的な研究を含めて、主な研究方法は以下のとおりである。

（1）超伝導液面センサーの動的液面検知特性：超伝導液面計を用いてスロッシングを計測するためには、液面センサーの動的液面検知特性を評価することが重要である。そこで、光学観測窓付クライオスタット内部に 5 本の超伝導センサーを取り付け、光学観測窓から高速度カメラを用いて液面を観測し、センサー出力から求めた液面位置との比較を行った。タンク内部の液面は横振動試験装置を用いて強制的に揺動させた。センサー出力から液面を求める際には、すでに行っている静的液面検知特性におけるセンサー出力と液面位置の関係を用いた。外部ヒーター入力値をパラメータとして、ヒーター入力値 6 W、9 W、12 W における液面検知誤差、応答時間について調べた。

（2）岸壁係留中における深江丸船上での液体水素予備実験：海上輸送実験の予備実験として、岸壁係留中の深江丸において、液体水素実験システムの安全確認と計測装置の正常作動確認を行った。また、静的液面検知特性を調べて、陸上と船上での実験結果を比較し、船上における外乱等の影響を調べた。

（3）深江丸を用いた液体水素海上輸送実験：深江丸を用いた液体水素海上輸送実験では、神戸大学深江キャンパスを出港し、1 泊 2 日の日程で、和歌山県沖の外洋まで航海し、航海中における液体水素タンク内の液面・温度・圧力、タンクに加わる加速度、船体動揺等を同時にデータロガーで収集した。実験では、液体水素タンクが大気圧下の条件と、蓄圧状態での条件の 2 通り行った。

(4) 熱流体解析ソフトウェア STAR-CCM+を用いた液体水素タンク内部の3次元熱流体解析：本研究では、(3)で使用した液体水素タンクを解析対象として、スロッシング時における液体水素の蒸発モデルの構築を主として行った。解析では、STAR-CCM+に搭載されている Volume of Fluid (VOF) 法を用いた。また、スロッシング時の液体水素タンク内部の温度、圧力の解析も行った。

4. 研究成果

本研究で得られた成果を以下に示す。

(1) 超伝導液面センサーの動的液面検知特性：実験結果の一例として、図1にヒーター入力値9Wにおける動的液面検知特性試験結果を示す。動的液面検知特性の実験では、全てのセンサーおよびヒーター入力値で、実際の液面位置とそれに対する液面センサーの応答時間は、平均して約0.11秒であった。実際の液面位置とセンサーから得た液面位置の差はほぼ5mm以下であり、スロッシングを計測するための液面センサーとして十分な性能を有していることが分かった。また、動的液面検知特性の観点から見た最適な外部ヒーター入力値は9Wであることが分かった。

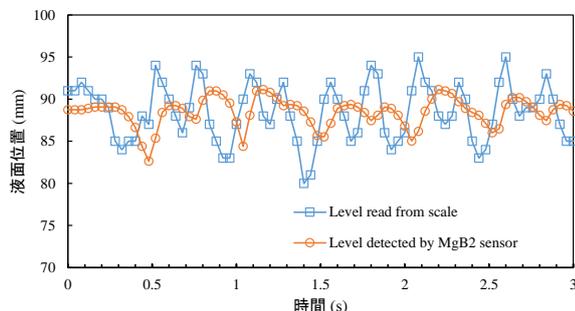


図1 ヒーター入力値9Wにおける動的液面検知特性

(2) 岸壁係留中における深江丸船上での液体水素予備実験：液体水素海上輸送実験の予備実験として、深江丸岸壁係留中において、深江丸後部甲板に液体水素実験システムを構築し、液体水素の漏えい等がないことを確認した後、船上で静的液面検知特性を調べた。過去の、陸上での静的液面検知特性の実験結果と比較したところ、結果に差がなく、洋上においても液面センサーに問題がないことが分かった。

(3) 深江丸を用いた液体水素海上輸送実験：海上輸送実験で深江丸後部甲板に構築した液体水素実験システムの写真を図2に示す。図2に示すように、海上輸送実験では、液体水素タンク内部の液面、温度、圧力、タンクに加わる加速度を計測するとともに、船体動揺、船速等を同時計測した。また、実験条件として、液体水素タンクからの蒸発ガスを放出する大気圧下での試験と、放出弁を閉じて蓄圧する2通りの実験を行った。船体動揺を得るために、外洋において、自動航行による再現性のあるスラローム試験と手動操船によるZ試験を行った。図3にスラローム試験中のロール方向に位置する液面センサーが示す液面位置とロール角の比較結果の一例を示す。5本の液面センサーによるスロッシング計測では、特に変化の大きかったロール角の変化と、ロール方向に配置した液面センサーの変化がよく一致していた。また、ピッチ方向においても同様の結果であった。図4、図5に実験結果の一例として、スラローム時における蓄圧実験の

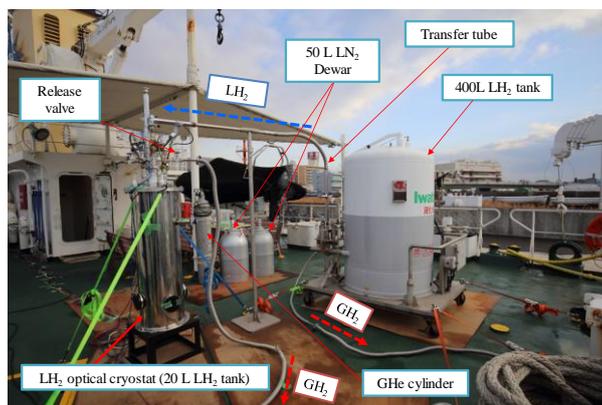


図2 実験システムの写真

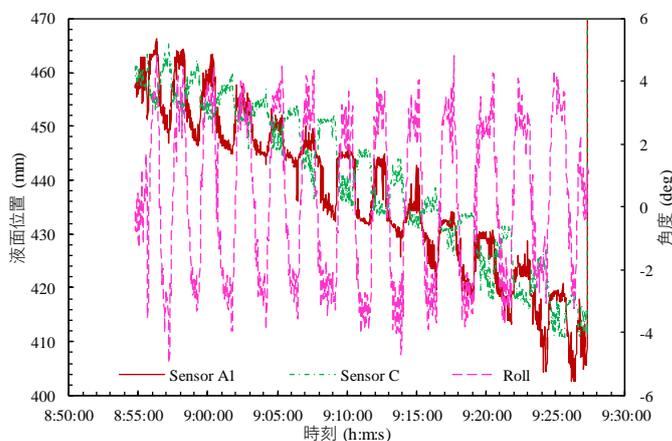


図3 スラローム試験中のロール方向に位置する液面センサーが示す液面位置とロール角の比較結果

温度・圧力、船体動揺・加速度同時計測結果の 1 秒データを示す。実験では、10 時 4 分より放出弁を閉めて、蓄圧を開始し、10 時 21 分から 30 分間スラローム試験を行った。スラローム試験中の圧力上昇率、温度上昇率は、スラローム開始前と比べて下がる結果が得られた。その理由としては、蒸発ガスの増大により、気体水素の温度が下がり、温度上昇率、圧力上昇率がともに抑制されたと考えられる。また、Z 試験時においても同様の傾向が得られた。大気圧下における実験での液体水素の蒸発率は、Z 試験時が約 0.2 L/h、スラローム試験時が約 0.26 L/h、錨泊中が約 0.05 L/h であった。これは、船体動揺によって液体水素タンク内部でスロッシングが発生し、タンク内壁との熱交換等によって蒸発量が増加したことを示している。本実験により、船体動揺に伴う液体水素タンク内部の温度、圧力、蒸発量への影響を明らかにすることができた。

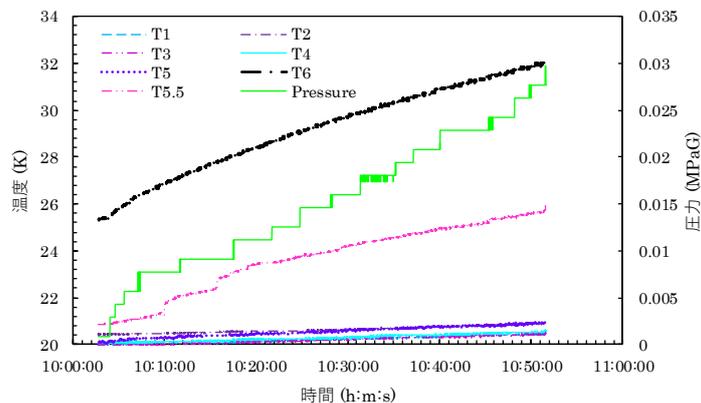


図 4 スラローム時における温度・圧力同時計測結果 (蓄圧実験)

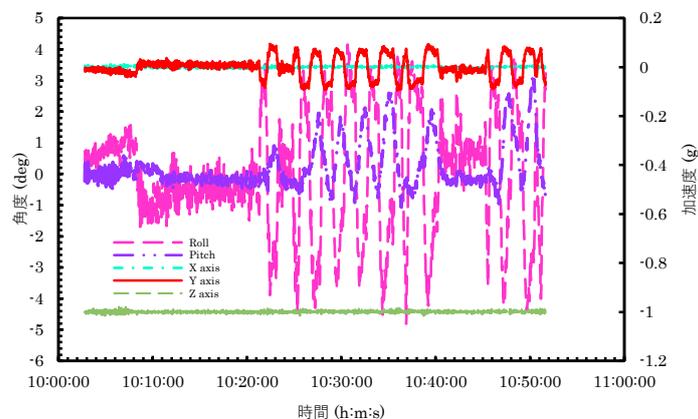


図 5 スラローム時における船体動揺・加速度同時計測結果 (蓄圧実験)

(4) 熱流体解析ソフトウェア STAR-CCM+ を用いた液体水素タンク内部の 3 次元熱流体解析：本研究では、液体水素海上輸送実験で使用したクライオスタットを解析対象として、揺動条件下における液体水素の蒸発を含めたシミュレーションを行った。図 6 に解析結果の一例として、横振動条件下での液体水素タンク内部におけるスロッシングの計算結果を示す。本研究における数値解析では、初期条件として、陸上での静置状態のクライオスタットの蒸発ガス量より求めた自然入熱量を使用し、クライオスタット内部の温度分布の初期条件を再現した。その後、揺動条件下でのタンク内の温度、圧力、液体水素の蒸発を解析するための熱流体解析モデルの構築を Volume of Fluid (VOF) 法を用いて行った。また、異なるタンク形状の解析モデルとして、角型タンクにおける熱流体解析も行った。以上の研究により、液体水素タンクの熱流体解析モデルの構築の目処を立てることが出来た。

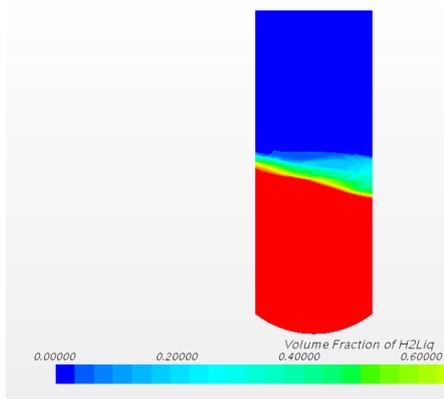


図 6 横振動下における液体水素タンク内部のスロッシングの計算結果

本研究は、最先端の超伝導技術と 3 次元熱流体解析ソフトウェアを用いて、液体水素の海上輸送のための基盤技術の開発を行うものであり、本研究がさらに発展することで、水素エネルギー社会の早期実現に大きく貢献することができる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Maekawa Kazuma, Takeda Minoru, Miyake Yuuki, Kumakura Hiroaki	4. 巻 18
2. 論文標題 Sloshing Measurements inside a Liquid Hydrogen Tank with External-Heating-Type MgB2 Level Sensors during Marine Transportation by the Training Ship Fukae-Maru	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 3694 ~ 3694
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s18113694	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 前川一真	4. 巻 104(8)
2. 論文標題 超伝導液面センサーを用いた液体水素タンク内部のスロッシング現象の解明	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気評論	6. 最初と最後の頁 56 ~ 60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 赤松 慧亮, 三宅 勇希, 前川 一真, 武田 実, 高橋 和彦, 熊倉 浩明
2. 発表標題 輸送用液体水素タンク開発のための充填・貯蔵時における液体水素容器内部の観測
3. 学会等名 第97回2018年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三宅 勇希, 前川 一真, 武田 実, 熊倉 浩明
2. 発表標題 海上輸送時における液体水素容器内部の液面・温度・圧力測定
3. 学会等名 第88回 (平成30年) マリンエンジニアリング学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宋 思遥, 北田 一輝, 臼井 智之, 武田 実, 前川 一真
2. 発表標題 横振動下における極低温液体の温度分布変化
3. 学会等名 第96回2018年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北田一輝, 武田 実, 前川一真
2. 発表標題 横振動下における船用タンク内部の極低温液体の温度・圧力・蒸発量測定
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 赤松慧亮, 武田 実, 前川一真, 岩佐太陽, 中山郁夢, 熊倉浩明
2. 発表標題 海上輸送用液体水素タンク開発のための急減圧時における液体水素容器内部の観測
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前川一真, 武田 実, 赤松慧亮, 岩佐太陽, 中山郁夢, 若林伸和, 矢野吉治, 熊倉浩 明
2. 発表標題 練習船深江丸外洋航海中における液体水素タンク内部のスロッシング計測
3. 学会等名 第89回(令和元年)マリンエンジニアリング学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----