

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月24日現在

機関番号：14501  
 研究種目：挑戦的萌芽研究  
 研究期間：2011～2012  
 課題番号：23656550  
 研究課題名（和文） 超伝導センサーを用いた船用液体水素タンク内部の3D液面揺動計測  
 研究課題名（英文） 3D Sloshing Measurements inside Shipping Liquid Hydrogen Tank Using Superconducting Level Sensors  
 研究代表者  
 武田 実 (TAKEDA MINORU)  
 神戸大学・大学院海事科学研究科・教授  
 研究者番号：50206992

## 研究成果の概要（和文）：

始めに、液体水素用小型容器を対象として、液面が減衰振動する様子を光学観測するとともに、超伝導MgB<sub>2</sub>液面センサーの横振動に対する出力信号を取得した。これらの計測値は、シミュレーション解析値と定性的に一致した。続いて、大型容器をトラックに積載して、低速走行しながら液面・温度・圧力の同時計測を行ったところ、大きな液面揺動（スロッシング）を観測した。これらの計測値も、シミュレーション解析値と定性的に一致した。以上より、超伝導液面センサーによる3Dスロッシング計測の新しい手法の開発に目処が付いた。

## 研究成果の概要（英文）：

First, observations on the damped oscillation of liquid hydrogen surface inside a small vessel as well as acquisition of the output signal of a superconducting MgB<sub>2</sub> level sensor under horizontal vibration were carried out. These experimental values were qualitatively in agreement with computed values based on simulation analysis. Second, data of liquid hydrogen level, temperature and pressure inside a large vessel during a truck transportation were measured synchronously with a large sloshing signal. These experimental values were also qualitatively in agreement with computed values. Accordingly, there is the prospect for developing a new method of 3D sloshing measurements inside a shipping liquid hydrogen tank using superconducting level sensors.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

## 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：水素，超伝導材料・素子，スロッシング，水素液面，3D計測

## 1. 研究開始当初の背景

化石燃料の消費に伴う大気汚染や酸性雨の問題、更には地球温暖化の問題等が深刻化している。これらの問題について、2009年9月に開催された国連気候変動サミットにおいて、鳩山元首相は1990年比で2020年までに温室効果ガスを25%削減する先導的目標を世界に先駆けて提唱した。このような大幅な削減目標を達成するためには、「環境負荷

の少ない代替エネルギー源」の確保が急務である。

化石燃料の代替エネルギー源として、今「水素」が最も注目されている。その主な理由は、地球上で無尽蔵に存在すること、また化学反応後に残るのが水だけだからである。水素が「究極のクリーンエネルギー源」と言われる所以は、ここにある。このような水素を海外にて「再生可能エネルギー」、例えば

風力エネルギーを利用して製造し、これを「液体水素」の極低温状態で日本へ海上輸送する計画（WE-NET 計画）[1]が再び脚光を浴びている。

我々はこれまでに、液体水素タンク用の高精度・高信頼性の液面計の開発を目指して、新超伝導体である $\text{MgB}_2$ （二ホウ化マグネシウム、超伝導転移温度 39 K）をベースとした、電気抵抗式の液面センサーを創製した[2,3]。この液面センサーは、その周りに細いヒーター線を巻いて外部から加熱する型式であり、99.99%以上の直線性および0.1%以下の測定精度を有している。これだけの性能を有している超伝導液面センサーは、世界で唯一無二である。

LNG（液化天然ガス、沸点 110 K）と同様に液体水素を海上輸送するには、船用大型タンクが必要不可欠である。この船用タンクの開発においては、液面揺動状態の把握が最重要課題である。本研究では、これまでに創製した高性能の超伝導液面センサーをタンク内部へ等間隔で設置し、センサー出力を同時計測すれば、「3D液面揺動計測」が可能であるとの着想に至った。

#### 参考文献

[1] WE-NET (World Energy Network; 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術研究開発) 成果報告書 (1998)

[2] 神戸大学・物材機構・岩谷瓦斯：液体水素用液面センサー及び液体水素用液面計，特願 2008-014998

[3] M. Takeda, Y. Matsuno, I. Kodama, H. Kumakura and C. Kazama: Application of  $\text{MgB}_2$  Wire to Liquid Hydrogen Level Sensor – External-Heating-Type  $\text{MgB}_2$  Level Sensor, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 19, No. 3, (2009) pp. 764-767

## 2. 研究の目的

我々が創製した「超伝導液面センサー」は、極低温「液体水素（沸点 20 K）」用の高精度・高信頼性を有する新型液面センサーである。本研究では、船用液体水素タンク内部の「液面揺動（スロッシング）」状態の解明を目指して、「超伝導センサーによる3D（3次元）液面揺動計測」の新しい手法を開発することを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究の目的は、我々が蓄積してきた超伝導技術をベースとして、船用液体水素タンク内部のスロッシングを3D計測する新しい手法を開発することである。予備的な研究を含めて、主な研究の方法は以下のとおりである。

(1) 液体水素のスロッシングの光学観測：超伝導液面センサーの動的検知特性を明らかにするためには、センサー出力の計測と同時に液面位置を光学観測する必要がある。そこで、液体水素実験用小型容器（クライオスタット、既存）および横振動試験装置（既存）を用いて、センサーのない状態でスロッシングの光学観測を行った。

始めに、小型容器に液体水素を入れ、約 1 リットルの液体のスロッシングを直径 50 mm の光学窓より観測した。観測には、LED 投光器およびデジタル CCD カメラ（いずれも既存）を用い、PC でその画像を解析した。振動理論と比較するために、横振動を 1 回与えた後に液面が減衰する振動を対象とした。

(2) 超伝導液面センサーの動的検知特性：作製した $\text{MgB}_2$ 超伝導線材（長さ 200 mm）の周りに細いヒーター線を巻き付けるとともに、抵抗測定用のリード線を取り付けて、液面センサーを完成させた。このセンサーを小型容器内部の光学窓付近に設置した。

始めに、トランスファーチューブ（新設）を用いて小型容器に液体水素を入れ、液面位置が自然降下するときの液面センサー出力を計測した。これにより、センサー出力と液面位置の直線関係、すなわち静的検知特性を調べた。次に、大気圧状態で横振動を 1 回与え、センサー出力と CCD カメラの画像データを PC で同時計測した。画像解析結果とセンサー出力とを比較して、液面変化に対するセンサーの応答時間および追従性、すなわち動的検知特性を調べた。

(3) 小型容器を対象としたスロッシング計測：長さ 200 mm の液面センサーを作製し、センサーの静的検知特性を調べた。

始めに、小型容器に液体水素を入れ、その後大気圧状態で横振動を 1 回与えて、センサー出力を計測した。出力信号を液面位置に変換し、これを時系列解析することによりスロッシングの画像表示を試みた。次に、一定の周期で横振動を与え続けて、液体水素のスロッシングの時間発展について調べた。

(4) 大型容器を対象としたスロッシング計測：長さ 1500 mm の液面センサーを作製し、センサーの静的検知特性を調べた。その後、センサーを大型容器（2000 リットル、既存）内部へ設置した。

始めに、大型容器に液体水素を入れ、これをトラックに積載した。次に、トラックで構内を低速走行しながら大型容器に振動を与え続けて、大気圧および加圧状態でセンサー出力を計測した。計測データより、大型容器内部の液体水素のスロッシングの時間発展を調べた。

#### 4. 研究成果

極低温液体水素 (沸点 20 K) を海上輸送するための基盤技術の開発を目指し、超伝導  $MgB_2$  (二ホウ化マグネシウム) 線材をベースとした液面センサーを用いて、液体水素の液面揺動 (スロッシング) に関する研究を行った。以下に、得られた研究成果を示す。

(平成 23 年度)

(1) 液体水素のスロッシングの光学観測：液体水素用小型容器、横振動試験機およびデジタル CCD カメラを用いて、液面センサーのない状態で液体水素のスロッシングの光学観測を行った。横振動を 1 回与えた後に液面が減衰振動する状態を画像解析し、振動理論と比較したところ良い一致が見られた。

(2) 超伝導液面センサーの動的検知特性：電気抵抗式の外部加熱型  $MgB_2$  液面センサー (長さ 200 mm) を作製し、液体水素用小型容器の内部へ設置した。始めに、小型容器に液体水素を入れ、自然降下する液面位置とセンサー出力の関係、すなわち静的検知特性を明らかにした。次に、液面が減衰振動する状態で、CCD カメラの画像データとセンサー出力を同時計測した。画像解析結果とセンサー出力結果を比較したところ、液面変化に対するセンサーの応答時間は 0.1 s 以下であることがわかった。

(平成 24 年度)

(1) 小型容器を対象としたスロッシング計測：長さ 200 mm の液面センサーを作製し、これを用いて横振動に対するスロッシングの時間発展を調べた。この実験結果とシミュレーション解析結果を比較したところ、両者は定性的に一致した。

(2) 大型容器を対象としたスロッシング計測：長さ 1500 mm の液面センサーを作製し、これを大型容器 (2000 L) 内部へ設置した。この容器をトラックに積載して、低速走行しながら液面・温度・圧力の同時計測を行ったところ、平均振動周期が 2 s の大きなスロッシングを観測した。液面・温度・圧力の時間発展は、シミュレーション解析と定性的に一致した。

2 年間の研究を通じて、1000 mm を超える液体水素用超伝導  $MgB_2$  液面センサー作製のノウハウを確立するとともに、液面センサーの静的および動的検知特性が秀逸であることを明らかにした。また、小型容器および大型容器を対象として、超伝導  $MgB_2$  液面センサーによる液体水素のスロッシング計測に成功した。さらに、液面・温度・圧力の同時

計測およびシミュレーション解析にも成功した。以上より、超伝導液面センサーによる 3D スロッシング計測の新しい手法の開発に目処が立った。これにより、船用液体水素タンク内部のスロッシング状態を解明するとともに、船用大型液体水素タンクの開発が可能となる。

#### 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)

[雑誌論文] (計 4 件)

(1) K. Maekawa, M. Takeda, Y. Matsuno, S. Fujikawa, T. Kuroda, H. Kumakura : Thermal response of  $MgB_2$  level sensor for liquid hydrogen using external heater, Proceedings of ICEC 24-ICMC 2012, 査読有 (2013) pp. 59-62

(2) M. Takeda, S. Fujikawa, Y. Matsuno, K. Maekawa, T. Kuroda, H. Kumakura : Synchronous measurements of liquid level, temperature and pressure inside a 2000 liter liquid hydrogen tank during a truck transportation, Proceedings of ICEC 24-ICMC 2012, 査読有 (2013) pp. 311-314

(3) 武田実, 藤川静一, 松野優, 前川一真, 黒田恒生, 熊倉浩明 :  $MgB_2$  液面センサーを用いた 2000L 液体水素タンクのトラック走行試験：タンク内部の液面・温度・圧力の同時計測, 神戸大学大学院海事科学研究科紀要, 査読無, 第 9 号 (2012) pp. 33-38

(4) 前川一真, 武田実, 松野優, 藤川静一, 黒田恒生, 熊倉浩明 : 液体水素用  $MgB_2$  液面センサーの外部ヒーターに対する熱応答性, 神戸大学大学院海事科学研究科紀要, 査読無, 第 9 号 (2012) pp. 39-45

[学会発表] (計 5 件)

(1) 奈良洋行, 前川一真, 武田実, 松野優, 藤川静一, 熊倉浩明, 黒田恒生 : 液体水素のスロッシングに関する基礎研究 - シミュレーション解析, 第 86 回 2012 年度秋季低温工学・超電導学会, いわて県民情報交流センター (岩手県); 2D-a03, 2012 年 11 月 8 日

(2) M. Takeda, S. Fujikawa, Y. Matsuno, K. Maekawa, T. Kuroda, H. Kumakura, Transportation test of 2000 liter liquid hydrogen tank by truck using  $MgB_2$  level sensor: Synchronous measurements of liquid level, temperature and pressure inside tank, ICEC 24-ICMC 2012, 福岡国際会議場 (福岡県); 16C-OR2-04, 2012 年 5

月 16 日

(3) K. Maekawa, M. Takeda, Y. Matsuno, S. Fujikawa, T. Kuroda, H. Kumakura, Thermal response of MgB<sub>2</sub> level sensor for liquid hydrogen using external heater, ICEC 24-ICMC 2012, 福岡国際会議場 (福岡県) ; 15P-P01-12, 2012 年 5 月 15 日

(4) 武田実, 前川一真, 奈良洋行, 松野優, 藤川静一, 熊倉浩明, 黒田恒生 : 液体水素のスロッシングに関する基礎研究, 第 85 回 2011 年度秋季低温工学・超電導学会, 金沢歌劇座 (石川県) ; 1D-a02, 2011 年 11 月 9 日

(5) 前川一真, 奈良洋行, 武田実, 松野優, 藤川静一, 熊倉浩明, 黒田恒生 : 液体水素用 MgB<sub>2</sub>液面センサーの外部ヒーターに対する熱応答性および液面検知特性, 第 85 回 2011 年度秋季低温工学・超電導学会, 金沢歌劇座 (石川県) ; 1D-a01, 2011 年 11 月 9 日

[その他]

ホームページ等

<http://www.maritime.kobe-u.ac.jp/professors/takeda.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

武田 実 (TAKEDA MINORU)

神戸大学・大学院海事科学研究科・教授  
研究者番号 : 50206992

### (2) 研究分担者

該当者なし

### (3) 連携研究者

熊倉 浩明 (KUMAKURA HIROAKI)

物質・材料研究機構・超伝導材料センター・センター長

研究者番号 : 90354307