



海上輸送のための液体水素用外部加熱型超伝導MgB₂液面センサーの開発研究およびスロッシング計測への応用

前川, 一真

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2015-03-25

(Date of Publication)

2016-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6340号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006340>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



論文内容の要旨

氏 名 前川 一真

専 攻 海事科学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

海上輸送のための液体水素用外部加熱型超伝導 MgB₂ 液面 センサーの開発研究およびスロッシング計測への応用

指導教員 武田 実 教授

我が国のエネルギー問題、環境問題を解決する方法の一つとして水素エネルギーが期待されている。エネルギー資源に乏しい我が国においては、水素をどこでどのようにして製造するかが課題であった。そこで、海外における余剰再生可能エネルギーなどを利用して、現地で水素を製造・液化し、密度の高い極低温液体である液体水素 (LH₂:沸点約 20 K) の形で安価に大量輸入する WE-NET 計画が再び脚光を浴びている。

本研究では、このような LH₂ を安全に海上輸送するための基盤技術の開発を目指している。LH₂ を海上輸送するためには、船用大型 LH₂ タンクが必要であり、容器内の液量を管理するための液面計が必要である。従来、LH₂ ローリーなどの大型タンクで用いられている差圧式液面計では、測定誤差が大きく (±10%)、本研究で対象としている船用大型 LH₂ タンク (1250 m³) では、10% の誤差が 125000 L にも相当する。また、差圧式液面計は応答性が悪く (十数秒程度)、陸上施設から船の LH₂ タンクに LH₂ を移送する際には、LH₂ タンク内部では液面が揺動 (スロッシング) し、液量を正確に把握できないため過充填等を起こす危険性がある。さらに、LH₂ は膨張率が高いため、タンクへの充填率は 85% 程度に抑える必要がある。そこで、測定誤差が小さく、応答性が良い新たな液面計が必要となってきた。

本研究では、新たな液面計として、電気抵抗式の外部加熱型超伝導 MgB₂ 液面センサーの研究開発を推進している。本研究で想定する船用大型 LH₂ タンクに搭載する液面センサーは 10 m 級であるため、センサーの長尺化が急務となってきた。センサーを長尺化するためには、このセンサーにとって非常に重要である外部ヒーターのセンサーへの加熱効果がセンサー長に依存するかどうか、すなわち最適ヒーター入力値のセンサー長依存性に関する知見が必要であるが、まだ明らかにされていなかった。また、センサー長を変えた場合における静的液面検知特性とヒーター入力値の関係も明らかにされていなかった。これらは、センサーを長尺化する上で非常に重要である。さらに、タンク内部の液面揺動時において液面検知を可能にするためには、センサー長を変えた場合の外部ヒーターに対するセンサー出力およびセンサー温度の熱応答性を明らかにし、センサーの熱応答性から見た最適ヒーター入力値も調べる必要がある。

今日、タンカーによる液化天然ガス (LNG : LNG の主成分である液体メタンの沸点は約 112 K) の海上輸送が急増しているが、この LNG タンクで問題となる液面揺動現象 (スロッシング現象) は LH₂ においてその詳細が明らかにされていないことから解明が急がれている。本研究で開発研究を行っている外部加熱型超伝導 MgB₂ 液面センサーは、外部ヒーターを巻き付けていることにより、センサーを効率よく加熱できることから、液面検知に対する応答性が良いことが明らかになってきた。そこで、この液面センサーを LH₂ タンク内部に複数本設置し、液面を同時に計測することで、LH₂ タンク内部の液面揺動を解明できると期待される。

本研究の目的は、船用大型 LH₂ タンクに搭載するための長尺液面センサー（測定誤差±1%以内、良好な応答性）の開発を目指し、外部加熱型超伝導 MgB₂ 液面センサーの最適化として、センサーのヒーター入力値をセンサー温度分布、静的液面検知特性、熱応答性の3つの観点から求めるとともに、これらのセンサー長依存性の有無を調べることを目的とした。

さらに、実験的に詳しく調べられていない LH₂ のスロッシング現象を解明するために、今までにない新手法である複数本の超伝導 MgB₂ 液面センサーを用いた液面同時計測（スロッシング計測）を行うことも目的とした。

まず、本研究では、外部加熱型超伝導 MgB₂ 液面センサーの最適化を行った。以下に、研究成果を示す。

温度分布測定

- (1) 温度分布測定により、外部ヒーターを入力していない場合、液面から約 120 mm まではセンサー温度が T_c 以下となっていた。
- (2) 温度分布測定により、液面直上 10 mm 程度の区間を除いて、液面上部のセンサー温度がほぼ全域にわたって T_c 以上となるのはヒーター入力値 6 W 以上であった。

故に、センサー温度の観点からみた最適動作条件はヒーター入力値 6 W であった。

静的液面検知特性

- (1) 静的液面検知特性の実験により、センサー出力電圧と液面位置の直線近似の相関係数はヒーター入力値 3 W の時から 0.99 以上と高かった。
- (2) 有効液面検知長さの割合は、ヒーター入力値 6 W 以上ではほぼ変わらなかった。

故に、センサーの直線性と有効液面検知長さの観点からセンサーの最適動作条件はヒーター入力値 6 W であった。これは、過去の外部ヒーター形状が同じで、センサー長の異なる静的液面検知特性の結果と同様の傾向であり、このセンサーの直線性および有効液面検知長さの割合に関して、センサー長依存性がないことが分かった。よって、どのセンサー長においても安定した液面検知を行うには、ヒーター入力値 6 W が望ましいことが分かった。センサーの液面検知誤差は±1 mm 以内であったことから、最小のセンサー（全長 200 mm）でも、目標の液面検知誤差 1%以内をクリアした。

熱応答性

- (1) 熱応答性の実験により、センサー出力の応答時間はセンサー温度の応答時間に比べて非常に短く、センサー温度の応答時間はヒーター入力値に依存しなかった。
- (2) センサー出力の応答時間はセンサー長および液面位置に依存しなかった。
- (3) センサー出力の応答時間はヒーター入力値 6 W で平均 0.6 秒であり、9 W 以上では平均 0.28 秒であることから、液面揺動が大きい場合は、ヒーター入力値 9 W を使用することが望ましい。ただし、液面揺動が小さい場合は、ヒーター入力値 6 W でも十分である。

故に、熱応答性よりみたセンサーの最適ヒーター入力値は 9 W である。

以上より、センサー温度分布、静的液面検知特性、熱応答性の3つの観点からセンサーが最適に動作するヒーター入力値を明らかにした。また、センサー性能のセンサー長依存性がないことを明らかにすることができた。よって、センサーの長尺化は可能であり、船用大型 LH₂ タンクに搭載する液面計として適用可能であることを明らかにした。

続いて、本研究の最終目標である LH₂ タンク内部のスロッシング計測を行うために、同じ条件下で作製した 1.7 m の MgB₂ 線材 3 本から、全長 500 mm の液面センサーを新たに 5 本作製した。さらに、5 本の液面センサーを同時に較正することが可能な、液面同時較正システムを設計・製作した。これを用いて実際に較正試験を行い、未だ明らかにされていなかった外部加熱型超伝導 MgB₂ 液面センサーの個体差性能評価を行った。以下に、研究成果を示す。

- (1) 構築した液面同時較正試験システムの有用性とセンサーの個体差による性能のばらつきを検証するために、全長 500 mm MgB₂ 液面センサー 5 本同時に静的液面検知特性試験を行った。
- (2) センサーの直線性を示す直線近似の相関係数においては、5 本のセンサー全てにおいて、ヒーター入力値 3 W から 9 W の範囲で 0.99 以上であり、良好な結果を得た。
- (3) 有効液面検知長さの割合とヒーター入力値の関係では、センサー A1 とセンサー A2 の結果が最大で、約 1%程度の違いがあった。これは、フルスケールに対して、約 5 mm の誤差であった。
- (4) 液面位置が 0 mm における出力電圧より、センサー A1 の出力電圧が他のセンサーに比べて約 0.6 mV 程度大きかった。これは、このセンサーの単位長さ当たりの出力電圧がどのセンサーにおいても平均約 0.06 mV/mm であることから、センサー長に換算すると約 10 mm 程度のずれであった。これは、フルスケールに対して、約 2%程度の誤差である。
- (5) 今回、作製した 5 本のセンサーの性能評価試験において、性能のばらつきとしては、センサー A1 の 2%の誤差が最大であった。

以上より、5 本のセンサーのうち 4 本に関しては、ばらつきが小さかったことから、このセンサーの量産は可能であり、このセンサーは非常に再現性の良いセンサーであることを明らかにすることができた。

最後に、海上輸送のための LH₂ タンク内部のスロッシング計測として、較正した 5 本の液面センサーを用いた液面同時計測を行った。以下に研究成果を示す。

- (1) データロガーと同期可能な高速度カメラを用いて、液面揺動時において、液面センサーが示す液面位置と実際の液面位置の比較を行った結果、ヒーター入力値 6 W において、液面位置の最大のずれは約 4 mm（フルスケールの約 0.8%）であり、波の最大振幅

(氏名：前川 一真 NO. 4)

の位置の時間のずれは約 0.06 秒であったことから、このセンサーの動的液面検知特性が非常に良いことが明らかになった。

- (2) 液面揺動が小さい場合、ヒーター入力値 6 W において、センサーが検知した波の最大振幅は約 2 mm であり、非常に細かい波を検知できていることが分かった。また、検知した波の周期も最大で約 0.2 秒であり、非常に周期の短い波を検知することができた。これは、ヒーター入力値 9 W においても同様の傾向であった。

- (3) LH₂ タンクからクライオスタットの LH₂ 槽に LH₂ を充填する際、液面は大きく揺動した。その際、5 本の液面センサーで液面が約 70 mm から約 100 mm に上昇するまでの 30 秒間測定したところ、最大液面位置 160 mm の大きな波を検知するとともに小さな波も検知することができた。また、波の周期は最大で約 0.6 秒であり、液面揺動が穏やかな場合に比べて周期の長い波も検知することができた。これは、ヒーター入力値 9 W においても同様の傾向であった。

以上より、本研究で開発した外部加熱型超伝導 MgB₂ 液面センサーを用いて、今までになかった新手法による LH₂ タンク内部のスロッシング計測への応用が可能であることを明らかにした。

| | | | |
|---|---|-----|-------|
| 氏名 | 前川 一真 | | |
| 論文 題目 | 海上輸送のための液体水素用外部加熱型超伝導 MgB ₂ 液面センサーの開発研究 およびスロッシング計測への応用 | | |
| 審査 委員 | 区 分 | 職 名 | 氏 名 |
| | 主 査 | 教授 | 武田 実 |
| | 副 査 | 教授 | 福田 勝哉 |
| | 副 査 | 教授 | 三村 治夫 |
| | 副 査 | | |
| | | | 印 |
| 要 旨 | | | |
| <p>【論文概要】</p> <p>化石燃料の消費に伴う大気汚染や酸性雨の問題、さらには地球温暖化の問題などが深刻化している。このような状況の下で、2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故により、原子力発電の安全性などが疑問視され長期停止状態が続いている。原子力発電の代替として液化天然ガス (LNG: 沸点 110 K) 燃料ベースの火力発電の割合が増加し、その割合が 2010 年度では 62% であったのに対して、2013 年度では 88% に急増している。このため、地球温暖化の問題解決が危ぶまれている。</p> <p>化石燃料や原子力に替わるエネルギー源として、太陽光・風力・水力・地熱・海流などの再生可能エネルギーが注目を集めている。これらのエネルギーは世界中で広範囲に分布しているもののエネルギー密度が低く、発電場が限られている。そこで、二次エネルギーとして電気から水素に変換し、これを大量に液化して日本へ海上輸送するプロジェクトが進行している。液体水素 (LH₂: 沸点 20 K) は気体水素の約 800 倍の密度を有しているため、大量に貯蔵・輸送するエネルギー媒体として最適であると考えられる。</p> <p>大量の液体水素を安全かつ効率的に海上輸送するためには、高精度の液体水素用液面計の開発や船用大型タンク内部のスロッシング (液面揺動) 現象の解明などが極めて重要である。特に、極低温危険物である液体水素は、LNG と比べて比重が約 1/6、粘性係数が約 1/7 であり、非常に大きなスロッシングが予想されるが、未だ実験的に明らかにされていない。</p> <p>本研究では、船用大型液体水素タンクに搭載するための長尺液面センサーの開発を目指して、センサーの温度分布、静的液面検知特性、熱応答性に着目し、外部加熱型超伝導 MgB₂ (二ホウ化マグネシウム) 液面センサーの最適ヒーター入力値を明らかにするとともに、これらのセンサー長依存性の有無を詳しく調べている。続いて、MgB₂ 液面センサーを用いた液体水素のスロッシング計測への応用を目指して、5 本のセンサーおよび光学観測窓付液体水素用実験装置を用いて、液面同時計測に基づくスロッシング計測に挑戦している。その際、静的液面検知特性に着目してセンサーの個体差性能評価を行うとともに、高速度カメラによる液面画像データとセンサー出力との相関関係を解析している。</p> <p>博士論文は、5 章で構成されている。</p> <p>第 1 章では、水素の特性、水素の製造・貯蔵・輸送の現状、超伝導 MgB₂ 液面センサーの測定原理および研究開発動向等について述べた後で、本研究の目的を示している。第 2 章では、外部加熱型超伝導 MgB₂ 液面センサーの最適化の研究として、センサーの温度分布、静的液面検知特性、熱応答性の 3 つの観点から、センサーの最適ヒーター入力値を実験的に調べ、センサー性能のセンサー長依存性について詳述している。また、液面検知の相関係数および有効液面検知長さの割合とヒーター入力値の関係、センサー出力の熱応答時間等について考察している。</p> <p>続いて第 3 章では、外部加熱型超伝導 MgB₂ 液面センサーの個体差性能評価の研究として、全長 500 mm の 5 本の液面センサーを同時較正する計測システムの設計・製作、およびこれを用いた液面センサーの個体差性能評価結果について述べている。第 4 章では、海上輸送のための液体水素タンク内部のスロッシング計測の研究として、光学観測窓付液体水素用実験装置の設計・製作、および高速度カメラによるスロッシング観測データと液面センサー出力との比較結果について記述し、最後に外部加熱型超伝導 MgB₂ 液面センサーのスロッシング計測への応用可能性を吟味している。</p> <p>以上の研究成果を第 5 章でまとめ、結論としている。</p> | | | |

氏名 前川 一真

【審査内容および評価】

本申請者は、海上輸送のための液体水素用外部加熱型超伝導 MgB_2 液面センサーの最適化の研究として、1)温度分布、2)静的液面検知特性、3)熱応答性に着目し、最適ヒーター入力値について系統的に調べている。また、これらの性能のセンサー長依存性の有無を詳しく調べている。その結果、1)温度分布より、液面直上 10 mm 程度の区間を除いて、液面上部のセンサー温度がほぼ全域にわたって超伝導臨界温度以上となるのはヒーター入力値 6 W 以上であることを明らかにした。2)静的液面検知特性より、センサー出力と液面位置の直線近似の相関係数はヒーター入力値 3 W 以上で 0.99 を超えており、有効液面検知長さの割合はヒーター入力値 6 W 以上でほぼ変化しないことを明らかにした。3)熱応答性より、センサー出力の応答時間はヒーター入力値 6 W で約 0.6 秒、9 W 以上で約 0.28 秒であり、センサー温度の応答時間に比べて非常に短いことを明らかにした。また、センサー出力の応答時間は、センサー長および液面位置に依存しなかった。以上より、センサー性能のセンサー長依存性がないことを実証し、センサーの長尺化が可能であるとともに、船用液体水素タンクに搭載する液面計として適用可能であることを結論付けたことは、高く評価できる。

続いて、外部加熱型超伝導 MgB_2 液面センサーの個体差性能評価の研究では、全長 500 mm の液面センサー 5 本の静的液面検知特性を試験するために液面同時較正試験システムを構築し、センサーの直線性を示す直線近似の相関係数、有効液面検知長さの割合、および液面位置が 0 mm における出力電圧に着目して、検知特性を調べている。その結果、相関係数は全て 0.99 以上、有効液面検知長さの割合は約 1% の個体差を示すとともに、出力電圧は約 2% の個体差を示すことから、外部加熱型超伝導 MgB_2 液面センサーの個体差は小さく、高い再現性を示すことを明らかにした。

さらに、液面較正を行った 5 本の液面センサーを用いて、液体水素の 3 次元スロッシング計測に挑戦している。そのために、光学観測窓付液体水素実験装置を製作し、スロッシング中における液面・温度・圧力・加速度の同時計測システムを構築している。製作した実験装置に 5 本の液面センサーをセットして、高速度カメラによるスロッシング観測および液面センサー出力の同時計測に成功している。観測データとセンサー出力を比較すると、液面検知のずれは約 0.8%、応答時間は約 0.06 秒であり、このセンサーの動的液面検知特性が非常に優れていることを実証した。液体水素のスロッシング現象を高速度カメラで観測した例は極めて少なく、特筆すべき成果である。以上より、本研究で開発した外部加熱型超伝導 MgB_2 液面センサーを用いて、全く新しい手法による液体水素タンク内部のスロッシング計測への応用が可能であることを結論付けたことは、高く評価できる。

以上のとおり、本研究は船用液体水素タンクに搭載するための長尺液面センサーの開発を目指して、外部加熱型超伝導 MgB_2 液面センサーの最適化に関する液面検知特性・熱応答特性等を実験的に明らかにするとともに、液体水素運搬船の実現に不可欠なスロッシング現象解明に関する重要な知見を得たものとして価値ある集積と認める。よって、学位申請者の前川一真は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。