



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

前川, 一真

(Citation)

電気評論, 104(8):56-60

(Issue Date)

2019-08

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90007989>



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

神戸大学 前 川 一 真*

1. はじめに

化石燃料の消費増大に伴う環境汚染が問題となる中、化石燃料に替わるエネルギーとして水素エネルギーが注目されている。

エネルギー資源に乏しいわが国において、水素エネルギーを普及させるためには、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、今、洋上風力発電等の再生可能エネルギーを利用して水素を製造する方法や、オーストラリアにおける未利用の褐炭などを利用して、水素を製造する方法等が注目されている。

この水素を大量に貯蔵・輸送することを考えた場合、気体水素密度の約800倍となる液体水素 (LH_2 : 沸点20 K) が有効である。

液体水素を安全に貯蔵・輸送するためには、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、液体水素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、応答性が悪く (十数秒程度)、また、測定誤差が大きいため ($\pm 10\%$)、安全性、経済性の観点から新たな液面計が求められる。

そこで、われわれは、超伝導線材をベースとした電気抵抗式外部加熱型超伝導 MgB_2 (二ホウ化マグネシウム: 超伝導転移温度 (T_c) 約32 K) 液面計の開発を行ってきた。図1に超伝導液面センサーの測定原理図を示す。この液面計は、気体中と液体中の電気抵抗の差を利用しており、蒸発ガスによって気体中のセンサーが冷却され超伝導状態になってしまうのを防ぐために外部ヒータを巻き付けている。これまでに、液面センサーの静的・動的液面検知特性、長尺化、熱応答性について明らかにしてきた¹⁻³⁾。

既に輸送が行われている液化天然ガス (LNG: LNGの主成分である液体メタンの沸点は約112 K)

のタンクで問題となる液面揺動現象 (スロッシング現象) は液体水素の場合、その詳細が実験的に明らかにされていなかった。

われわれが研究開発を行っている超伝導液面センサーは、液面検知に対する応答性が良いことから、この液面センサーを液体水素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、液体水素タンク内部の液面揺動を明らかにできると期待される。

本研究では、輸送時における液体水素タンク内部のスロッシング現象を解明するために、液体水素タンク (クライオスタット) 内部に5本の超伝導液面センサーを設置した。その後、神戸大学大学院海事科学研究科附属練習船深江丸後部甲板に液体水素実験システムを構築し、航海中における液体水素タンク内部の液面・温度・圧力・加速度等を同時に測定し、船体動揺に伴う液体水素タンク内部のスロッシング現象を解明することを目的とした。

2. 実験装置

図2に本研究で用いた光学観測窓付きクライオスタット (小型液体水素タンク) の概略図を示す。クライオスタットは、全高1,327 mm、光学観測窓5個 (有効径60 mm) 付きであり、液体水素槽 (20 L)、液体窒素槽 (15 L)、断熱真空槽で構成されている。また、液体窒素槽より下には、77 K アルミシールドが取り付けられており、液体窒素槽より下の液体水素槽も77 Kでシールドされている。

計測システムの概略図を図3に示す。計測システ

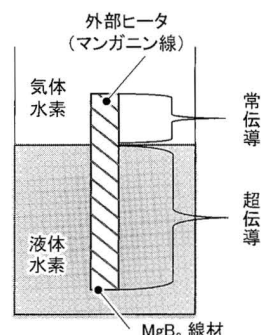


図1 超伝導液面センサーの測定原理図

*まえかわ かずま 大学院 海事科学研究科 マリンエンジニアリング 講座 助教

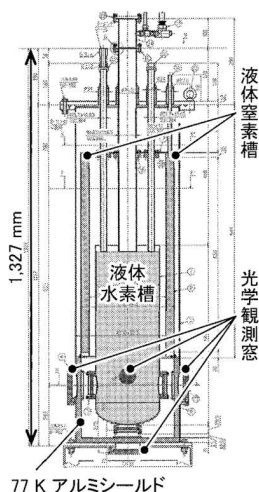


図2 クライオスタット (小型液体水素タンク) の概略図

ムは主に、クライオスタット、 MgB_2 センサー×5、センサー測定電流用の定電流電源×5、外部ヒータ用定電流電源×5、デジタル圧力計、クライオスタット内部の温度計測用 CCS (カーボンセラミックセンサー) 温度計2個、タンクに加わる加速度、船体動揺等を計測するための慣性計測ユニット (NAV440

:船体動揺・加速度 (3軸)) で構成されている。本実験では、5本の液面センサーを図4のように配置し、主に、ロール方向の液面揺動はセンサー A2 および B2、ピッチ方向の液面揺動はセンサー A1 および C で計測できるように配置している。また、加速度の向きは図4に示すとおり (X: 船体前後方向, Y: 船体左右方向, Z: 船体上下方向) である。5本のセンサーは、すべてプローブが回転するようになっており、自由に位置を変えることができる。なお、液面、温度、圧力のデータはデー

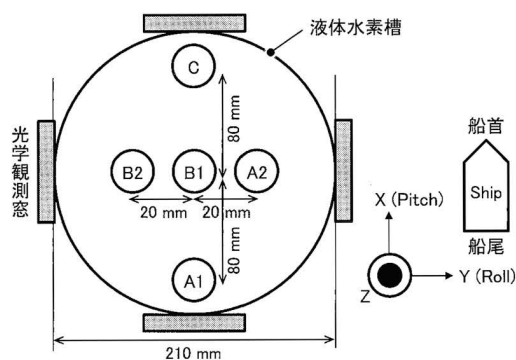


図4 船上における5本の液面センサー配置図

タロガーで同時に収集し、NAV440 で収集する船体動揺、加速度、深江丸の運行記録 (船速、海象・気象等) のデータは、船内 LAN を通じてすべて PC

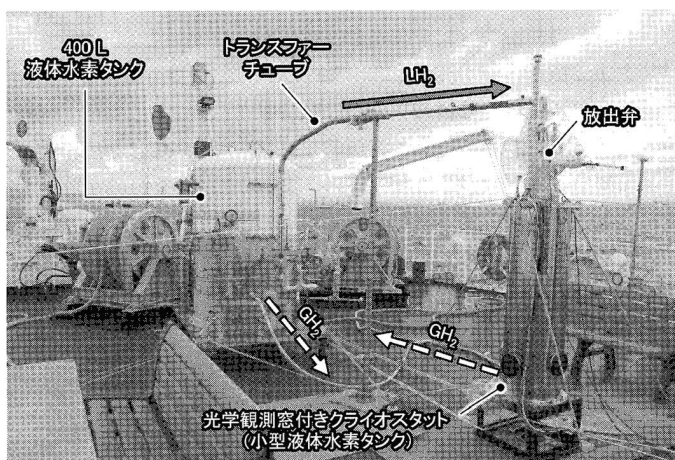


図5 船上での液体水素実験システム

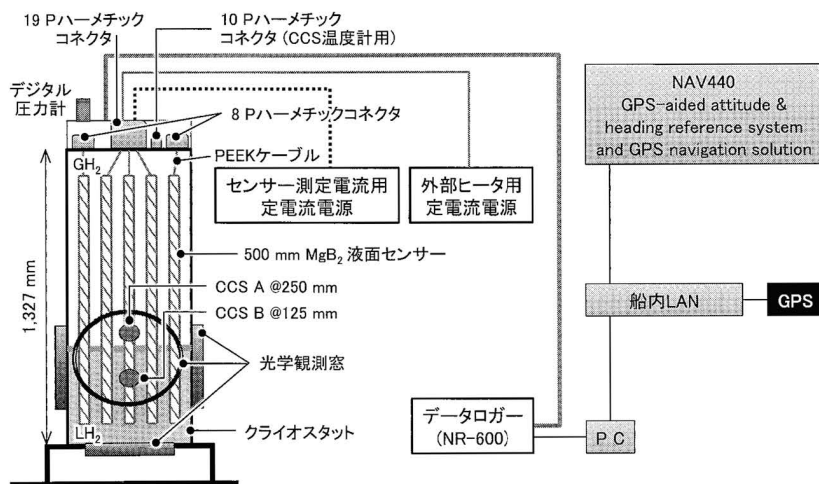


図3 計測システムの概略図

で収集し、PCとデータロガーは船内 LAN を通じて GPS 時刻で同期されている。図5に実験システムの写真を示す。なお、防爆対策として、測定機器等の電気機器は船内の計測器室にすべて設置している。

本研究では、液体水素海上輸送実験中、最も船体が動揺したZ試験 (船体を揺らすための航法) 時のスロッシング計測の結果について述べる。図6に本実験における全航跡図と、Z試

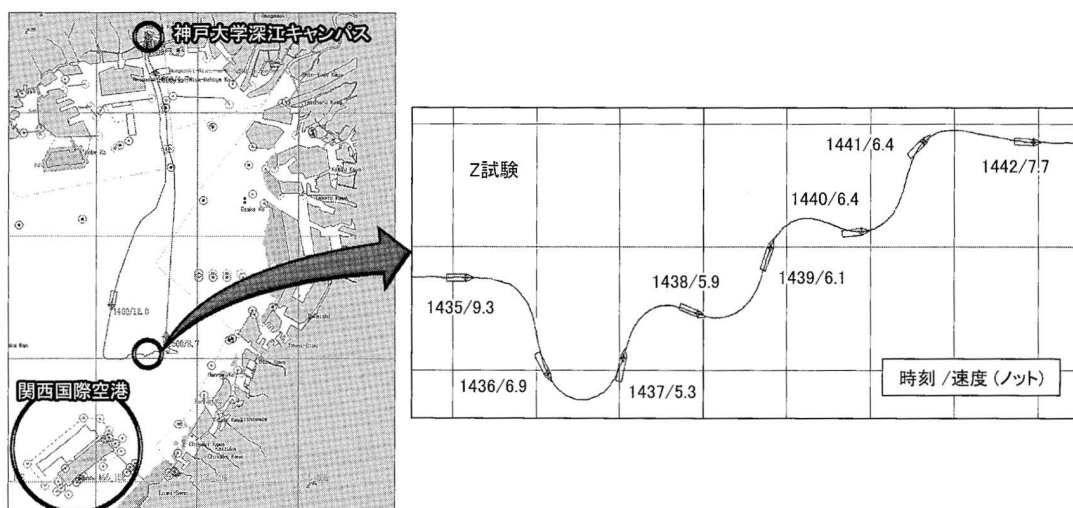


図6 大阪湾における深江丸の航跡図

験時の詳細な航跡図を示す。なお、本実験は、大阪湾内の内海で行った。

実験では、動的液面検知特性の実験で最も良好な結果を示した外部ヒータ入力値9Wを使用した。なお、実験では、クライオスタット（小型液体水素タンク）の圧力が0.2 MPaG（G：ゲージ圧）になるまで、放出弁を閉めてタンクを加圧し、0.2 MPaGに達すると、大気圧までタンク内圧を下げることを繰り返した。実際のタンクを輸送する際は、放出弁が閉じられた状態であるため、これまでの実験で水素の漏えいがないことが確認出来ている0.2 MPaGまでの加圧下で実験を行った。

3. 実験結果および考察

図7から図9に大気圧まで減圧後の、14時30分から14時42分までの航海中における液面、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。図8を見ると、14時30分より放出弁を閉めて、加圧を開始していることがわかる。図7より、14時35分からZ試験が開始されると、5本の液面センサーすべてにおいて、スロッシングを検知していることがわかる。図9より、同時刻において、ロール角が最大約5°、ピッチ角が最大0.8°、Y軸加速度（ロール方向）が最大約0.1g計測されていることがわかる。本実験において計測されたピッチ角、ロール角は小

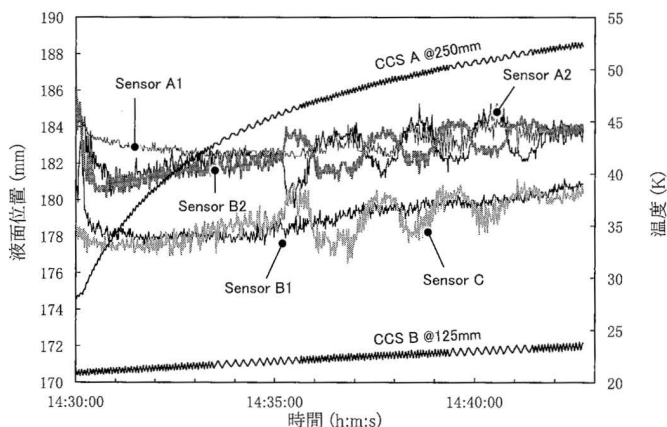


図7 14時30分から14時42分における液面・温度同時計測結果

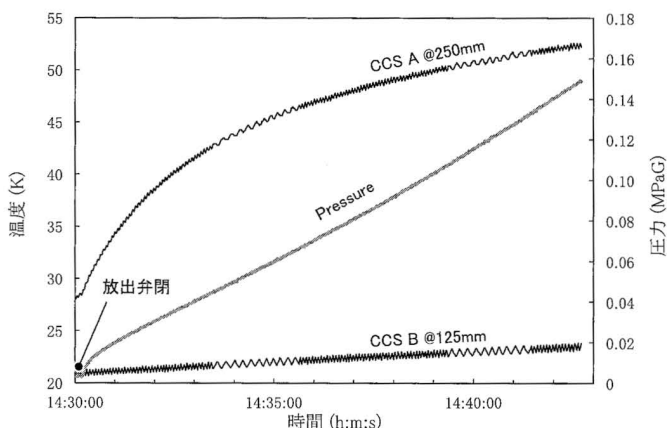


図8 14時30分から14時42分における温度・圧力同時計測結果

さかった。これは、実験海域が大阪湾という内海であったためである。本研究で用いた練習船深江丸が

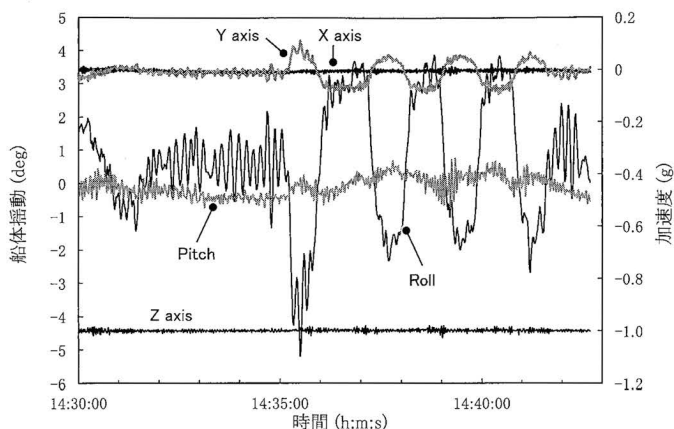


図9 14時30分から14時42分における船体動揺・加速度同時計測結果

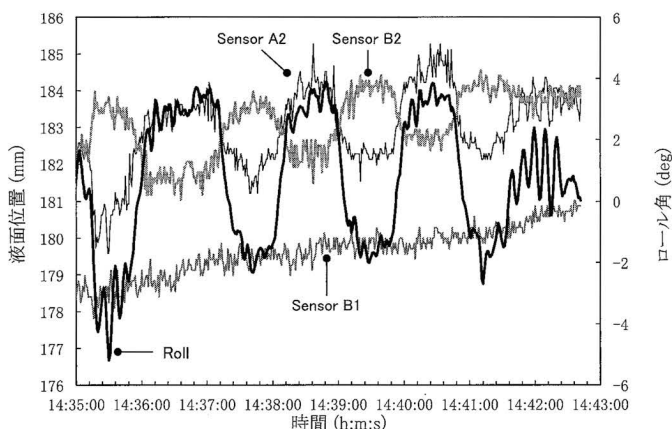


図10 14時35分から14時42分に行われたZ試験時における液面・ロール角同時計測結果

外洋に出て悪天候の中航海した場合、ロール角は最大25°、ピッチ角は20°程度計測される場合がある。

図8より、Z試験中における圧力上昇率は約0.67 MPaG/hであり、気体水素中に位置するCCS Aの温度上昇率は約1.0 K/minであった。ロール角、ピッチ角ともにほぼ0の時の航海中では、圧力上昇率は約0.45 MPaG/hであり、気体水素中に位置するCCS Aの温度上昇率は約2.2 K/minであった。Z試験中の圧力上昇率が大きかった理由として、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によって蒸発ガスが増大したためであると考えられる。一方で、CCS Aの温度上昇率が、Z試験中の方が低いのは、スロッシングに伴う蒸発ガスの増大により、タンク上部の気体水素の温度上昇が抑制されたためであると考えられる。また、液中に位置するCCS Bの温度が14時30分以降、約22 Kから

24 Kまで上昇している。これは、タンク内の圧力上昇に伴い、液体水素の飽和温度が上昇していることを示している。

図10は、Z試験時における液面位置とロール角の関係をより詳しく見るために、ロール方向に位置するセンサーA2、B2のデータおよびタンク中心に位置するセンサーB1とロール角を表示したものである。図10を見ると、ロール角の平均周期は114秒であり、液面センサーが検知した液面揺動周期はセンサーA2、B2ともに平均118秒であった。また、センサーA2とロール角は同位相に設置されており、図10を見ると、センサーA2が示す液面揺動とロール角の変化がよく一致していることがわかる。また、センサーB2が逆位相を示していることも分かる。すなわち、われわれが研究開発を行っている超伝導液面センサーは船体動揺に伴う液体水素タンク内部の揺れを正確に検知できているといえる。

4. ま と め

本研究では、輸送時における液体水素タンク内部のスロッシング現象を解明するために、神戸大学大学院海事科学研究科附属練習船深江丸の後部甲板に液体水素実験システムを構築し、大阪湾内にて

航海中にZ試験を行い、船体を強制的に動揺させて、液体水素タンク内部にスロッシングを発生させた。その結果、超伝導液面センサーは液体水素タンク内部のスロッシングを正確に検知し、スロッシングに伴うタンク内部の温度上昇率、圧力上昇率に影響があることを明らかにした。

今後の課題としては、今回得られた実験データをもとに数値解析モデルを構築し、様々なタンク形状、動揺条件下での数値解析を行っていく予定である。また、今回、実験海域が大阪湾内という内海であったため、今後は、より大きな船体動揺下での実験データの取得のため、外洋での実験も計画している。

謝 辞

本研究は、(公財)関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団の助成を受けて行いました。ここに

厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 前川一真, 武田 実, 松野 優, 藤川静一, 黒田恒生, 熊倉浩明: 外部加熱型液体水素用 MgB₂ 液面センサーの個体差性能評価, 低温工学 Vol. 50 No. 4, pp. 368-373 (2015).
- 2) 前川一真, 武田 実, 松野 優, 藤川静一, 黒田恒生, 熊倉浩明: 外部加熱型液体水素用 MgB₂ 液面センサーの熱応答性に対するセンサー長の影響, 日本マリンエンジニアリング学会誌 Vol. 49 No. 4, pp. 122-128 (2014).
- 3) 前川一真, 武田 実, 松野 優, 藤川静一, 黒田恒生, 熊倉浩明: 外部加熱型液体水素用 MgB₂ 液面センサーの最適化, 低温工学 Vol. 49 No. 2, pp. 69-75 (2014).

センサ技術と IoT を活用した作業者安全モニタリングシステムを販売開始

～生体情報・作業環境をモニタリングし作業者の健康管理に貢献～

—村田製作所—

(株)村田製作所と戸田建設(株)は、2018年8月より改良を進めてきた建設作業者の生体情報や周囲環境（作業環境）をヘルメット取り付け型センサデバイスでリアルタイムに監視する「作業者安全モニタリングシステム」を共同で開発し、このたび販売を開始した。

国内の人口減少に起因する建設就労者の減少、現場の作業者の高齢化が進んでおり、建設業界において今まで以上に安全で快適な作業環境を整備する必要性が高まっている。さらに近年、夏の暑さが厳しくなっており、作業者が熱中症の発症や過労・体調不良といった状態になるまで、作業環境の悪化に気がつかないことが建設現場で問題となっていた。そこで、センサ技術やシステムソリューションの提供にノウハウを持つ村田製作所と戸田建設が協業し、生体情報や作業環境をモニタリングするシステムを2018年8月に開発した。

※熱ストレス：脈拍、活動量、温度、湿度などを計測して、総合的に判断する本システム独自のパラメータ

本システムは、センサ技術とIoTを活用し、作業者の生体情報と作業環境をリアルタイムに収集することで熱ストレス^{*}を把握することができる。計測した数値をクラウド上で解析し、アラートを送信することで、現場監督者が適切に作業者の健康管理を行うこともできるという。



図 センサデバイス（右：外部環境情報測定部、左：生体情報測定部）をヘルメットに装着

詳細は村田製作所 HP 参照：

<https://www.murata.com/ja-jp/products/info/other/other/2019/0603>