



MgB₂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

武田, 実 ; 藤川, 静一 ; 松野, 優 ; 前川, 一真 ; 黒田, 恒生 ; 熊倉, 浩明

(Citation)

神戸大学大学院海事科学研究科紀要, 09:33-38

(Issue Date)

2012

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81003938>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81003938>



MgB₂液面センサーを用いた 2000 L 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

Transportation Test of 2000 Liter Liquid Hydrogen Tank by Truck Using MgB₂ Level Sensor: Synchronous Measurements of Liquid Level, Temperature and Pressure inside Tank

武田 実、藤川静一*、松野 優*、前川一真**、黒田恒生***、熊倉浩明***

Minoru TAKEDA, Shizuichi FUJIKAWA*, Yu MATSUNO*, Kazuma MAEKAWA**,
Tsuneo KURODA***, Hiroaki KUMAKURA***

(平成 24 年 4 月 13 日受付)

Abstract

Hydrogen is expected to be used as an ultimate energy source because only water is produced after the chemical reaction of hydrogen and oxygen. In the near future, new generation consuming a large amount of hydrogen, which is produced using sustainable/renewable energy, is expected to be realized. In the storage and transport of a large amount of hydrogen, liquid hydrogen (LH₂) has the advantage of high storage efficiency. An LH₂-level sensor based on superconducting MgB₂ wire demonstrates high linearity with a correlation coefficient exceeding 99.9%, a small measurement error of 1% or less and good reproducibility. To elucidate the sloshing conditions inside an LH₂ tank during transportation, a test involving the transportation of a 2000 liter LH₂ tank on a public road by a truck that employed a 1200-mm-long MgB₂ level sensor was performed, in which the temperature and pressure as well as the LH₂ level inside the tank were measured synchronously. Experimental results for the variations in the LH₂ level, temperature and pressure during transportation by truck are reported.

(Received April 13, 2012)

1. はじめに

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、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が日本から提唱されたが、その実現が危ぶまれている。このような状況下で、2011 年 3 月に起こった東日本大震災及び福島第一原発事故により、日本のエネルギー問題がクローズアップされている。今まさに、日本のエネルギー・環境問題の解決が喫緊の課題となってきた。

原発離れが進む中、代替エネルギー源として太陽光・風力等の再生可能エネルギーが注目されている。これらのエネルギーは、温室効果ガス削減の切り札として近年大いに期待されている。しかし、広く地球規模で分布しているので、これらを水素に変換して、液体水素 (LH₂: 沸点 20 K) の極低温状態で海外から日本へ海上輸送する計画⁽¹⁾が再び脚光を浴びている。

現在、原発の定期検査・停止に伴う電力不足を補うために、液化天然ガス (LNG: 沸点 112 K) の輸入量が急増している。LNG と比べて、LH₂ の比重は約 1/6、また粘性係数は約 1/8 なので、タンク内部での非常に複雑なスロッシング (液面揺動) が予想される。しかし、安全及び技術上の問題から、LH₂ のスロッシング状態は実験的に詳しく調べられていなかった。

一方我々は、LH₂ タンク用の高精度・高信頼性の液面計の開発を目指して、超伝導 MgB₂ (二ホウ化マグネシウム) 線材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⁾。これは、同時期にドレスデン工科大学^{(3),(4)}及び九州大学^{(5),(6)}で提案された自己 (内部) 加熱型と異なり、外部加熱型を採用しており、優れた静的液面検知特性 (直線性 99.9 % 以上、精度 1 % 以下) を有している。ごく最近の研究^{(7),(8)}により、動的液面検知特性も優れていることが明らかとなり、この液面センサーを用いた LH₂ のスロッシング状態の解明が喫緊の課題となってきた。そこで本研究では、2000 L の LH₂ タンクを対象として、輸送中の LH₂ のスロッシング状態を調べるために、MgB₂ 液面センサーを LH₂ タンク

* 岩谷瓦斯株式会社

** 海事科学研究科博士課程後期課程

*** 物質・材料研究機構

内部に装着して、公道でのトラック走行試験を行った。この試験では、LH₂ タンク内部の液面・温度・圧力の同時計測を行った。

2. MgB₂ 液面センサー

実験に用いた液面センサーは、1200 mm 外部加熱型 MgB₂ 液面センサー⁽²⁾である。このセンサーは、MgB₂ 線材（外径 0.32 mm、全長 1277 mm）の周りに外部ヒーターとしてマンガニン線（外径 0.2 mm）が 2 mm 間隔で巻き付けられている。このヒーターにより、液面より上部のセンサーが蒸発ガスにより冷却されて超伝導状態になることを防ぐことができる。このため、MgB₂ 液面センサーの液相部分は超伝導状態（電気抵抗ゼロ）となり、気相部分は常伝導状態（電気抵抗 R ）となるので、センサー全体の電気抵抗を測定することにより、液面の位置を求めることができる。

Fig.1 は、ヒーター入力値をパラメーターとした MgB₂ 液面センサーの静的液面検知特性（大気圧）である。この特性は、全長約 1000 mm のガラスデュワーを用いて、四端子法（測定電流 10 mA）に基づいて得られたものである。実験結果より、1200 mm MgB₂ 液面センサーの静的液面検知特性は直線近似でき、ヒーター入力値 6 W 以上で相関係数は 0.999 以上であることがわかった。また、別の実験では静的液面検知特性の圧力依存性は非常に小さいことが明らかになっている⁽²⁾。さらに、動的液面検知特性を調べる実験では、センサーが 0.1 s 以内で比較的速く応答することが明らかになっている⁽⁸⁾。

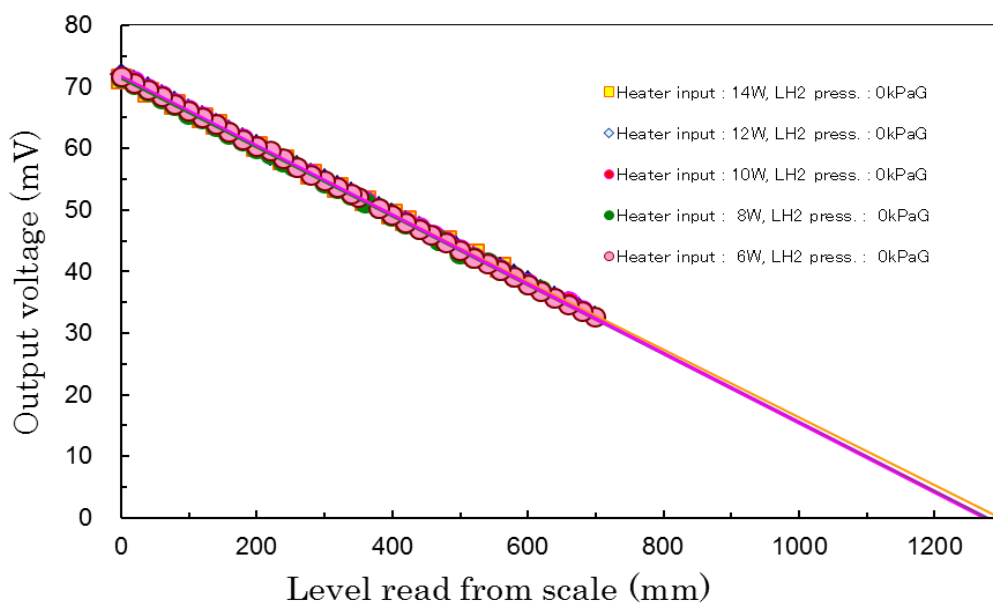


Fig.1 Relationship between output voltage of 1200-mm-long MgB₂ sensor and level read from scale as a parameter of heater input.

3. 実験装置と実験方法

実験装置の写真及び 2000 L の LH₂ タンク内部の熱電対温度計の配置図を Fig.2 に示す。この図に示すように、タンク内部には E 型熱電対が 3 箇所に取り付けられている。計測システムは、1200 mm MgB₂ 液面センサー、E 型熱電対①～③、圧力センサー、液面センサー用定電流電源（測定電流 10 mA）、外部ヒーター用電流電源（ヒーター入力値約 8 W）、データロガー等で構成されている。

トラック走行試験の前に、LH₂ タンクを静置した状態で MgB₂ 液面センサーを装着し、予備試験を行った。予備試験では、大型電子天秤を用いて LH₂ タンクの重量変化量（LH₂ の重量変化量）を計測するとともに、液面センサーの出力電圧及びタンク圧力を計測した。タンク内部の気相部分の温度分布を考慮して気相密度の補正を加えたところ、LH₂ の重量変化量と液面センサーの出力電圧から換算した重量変化量はほぼ一致した。

トラック走行試験では、Fig.3 に示すように、MgB₂ 液面センサーを装着した LH₂ タンクをトラックに載せて走り、液面変動時における液面センサー出力電圧、熱電対起電力、圧力センサー出力電圧を同時計測した。なお、温度計測において、LH₂ タンクの底に取り付けられている熱電対③を基準として、熱電対①及び熱電対②との起電力差より温度差①及び②を算出した。また、走行試験において、電気機器を箱及びビニール袋に入れて窒素ガスを流し、防爆対策とした。

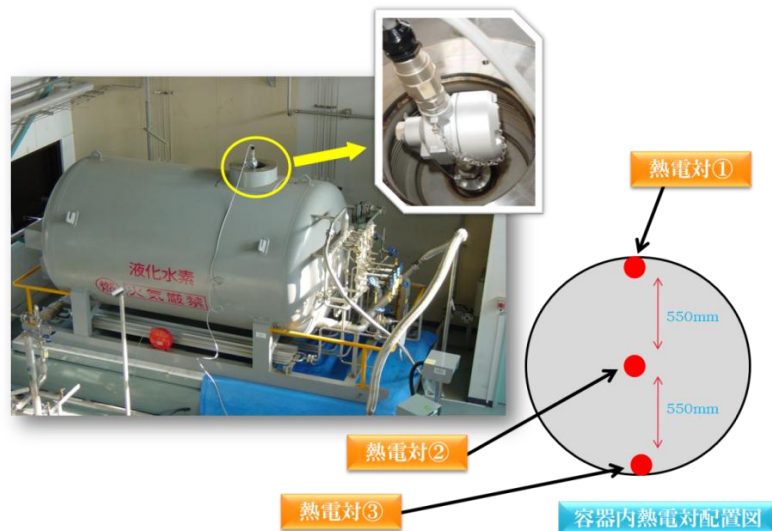


Fig.2 Photograph of experimental apparatus and position of thermocouples inside 2000 liter LH₂ tank.



Fig.3 Photograph of transportation test of 2000 liter LH₂ tank by truck.

4. 実験結果

2000 L の LH₂ タンクのトラック走行試験全結果を Fig.4 に示す。図中の番号は、以下のとおり走行試験の実施状況を示している。

- 試験① 10:40~10:52 STC 構内 2 周走行
- 試験② 10:55~11:15 STC 周辺公道走行
- 試験③ 11:25~12:17 STC → SGC 移動
- 試験④ 13:15~14:45 LH₂ 放出
- 試験⑤ 14:59~15:32 SGC 周辺公道走行
- 試験⑥ 14:48~16:52 SGC → STC 移動

ここで、STC：岩谷産業株式会社・岩谷瓦斯株式会社滋賀技術センター、SGC：同社滋賀ガスセンターである。

Fig.4 より、試験①の構内を走り出した段階（液面約 600 mm）で圧力が 0.03 MPaG（ゲージ圧）から 0.02 MPaG に低下していることがわかる。これは、液面が大きく揺れることにより、タンク内部の上側にある気相が冷やされたからであると考えられる。実際、Fig.4 に示すように、大きな液面変化が計測されている。このような大きな液面変化は、公道を走行中に頻りに発生した。

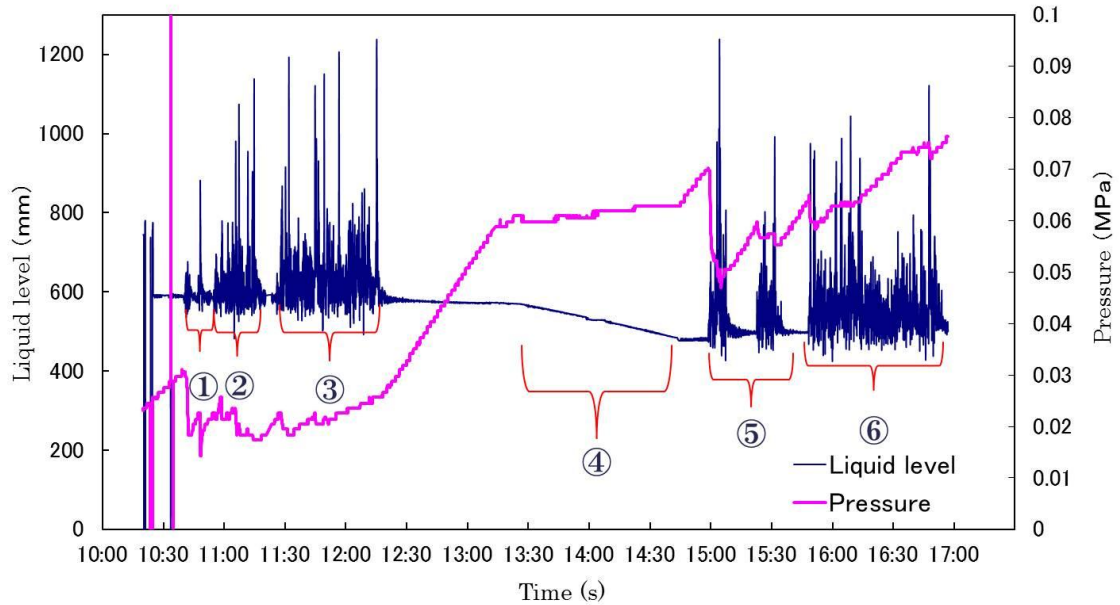


Fig.4 Overall results of transportation test of 2000 liter LH₂ tank by truck.

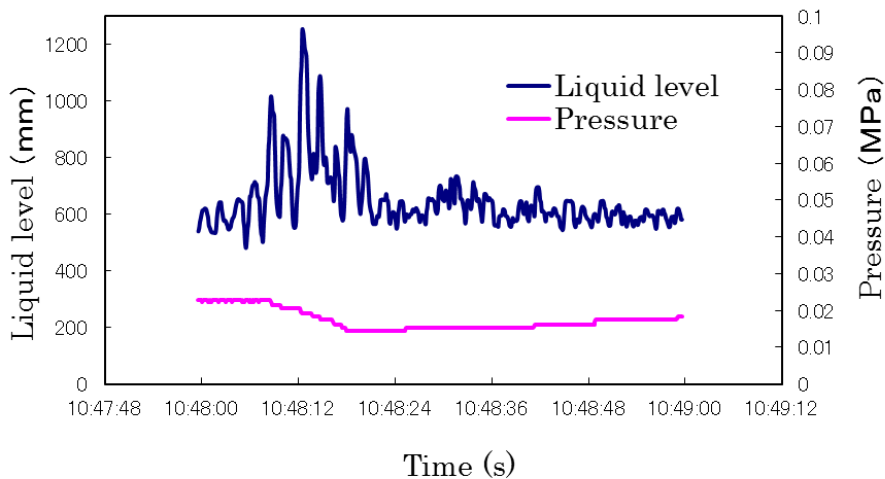


Fig.5 Time chart of liquid level and pressure inside 2000 liter LH₂ tank under transportation test ①: 10:48am-10:49am.

Fig.5 は、試験①の 10:48～10:49 における液面・圧力測定結果である。この図より、液面が 1200 mm を超えるような大きな波の中に約 2 s 周期の小さな波が存在していることがわかる。

試験①～②の温度・圧力測定結果（液面約 600 mm）を Fig.6 に示す。このとき熱電対②は液面より約 50 mm 上にあり、温度差②は 3 K 程度であるのに対して、温度差①は 40 K 以上であることがわかる。

Fig.7 は、試験③後の静置時の温度・圧力測定結果である。圧力上昇速度（測定時のヒーター入力値は約 7 W）を求めると、0.83 MPa/day であった。これに対して、ヒーター入力値ゼロの場合は、0.56 MPa/day であった。

5. まとめ

2000 L の LH₂ タンク内部に 1200 mm MgB₂ 液面センサーを装着して、公道でのトラック走行試験を行い、LH₂ タンク内部の液面・温度・圧力の同時計測に成功した。公道走行中は、1200 mm を超える大きな液面変化が頻繁に発生することが明らかになった。また、タンク内部での温度差は 40 K 以上であることがわかった。

今後は、LH₂ タンクを海事科学研究科附属練習船深江丸に載せて、海上での航行試験を行う予定である。

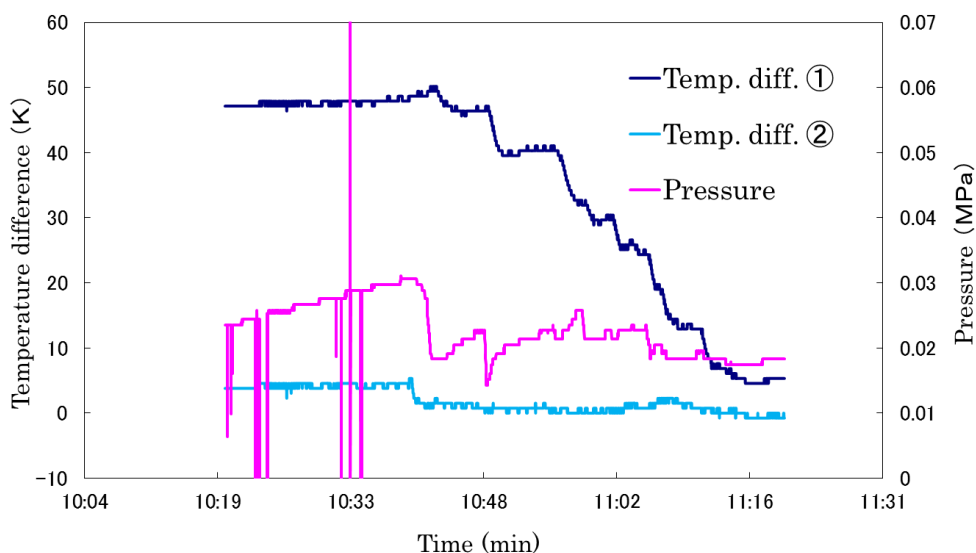


Fig.6 Time chart of temperature difference and pressure inside 2000 liter LH₂ tank under transportation test ①-② with a liquid level of about 600 mm.

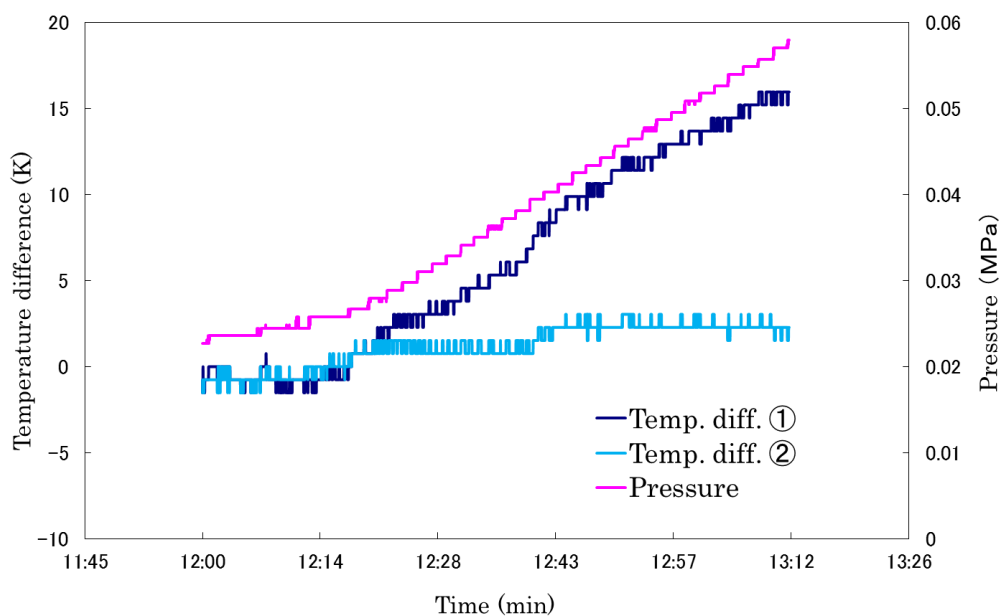


Fig.7 Time chart of temperature difference and pressure inside 2000 liter LH₂ tank after transportation test ③: stationary condition.

謝辞

本研究の一部に対して、日本郵船・ヘイエルダール記念事業助成金の援助を受けました。ここに、感謝の意を表します。

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) M. Takeda, Y. Matsuno, I. Kodama, H. Kumakura, and C. Kazama: Application of MgB₂ Wire to Liquid Hydrogen Level Sensor —

External-Heating-Type MgB₂ Level Sensor, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol.19 (2009) pp.764-767.

- (3) C. Haberstroh, and G. Zick: A Superconductive MgB₂ Level Sensor for Liquid Hydrogen, *Adv. Cryo. Eng.*, Vol. 51A (2006) pp.679-684.
- (4) C. Haberstroh, G. Dehn, and D Kirsten: Liquid Hydrogen Level Sensors Based on MgB₂, in *Proc. 21st Int. Cryo. Eng. Conf. / Int. Cryo. Mat. Conf. 2006*, Prague (2007) pp.357-360.
- (5) K. Kajikawa, K. Tomachi, N. Maema, M. Matsuo, S. Sato, K. Funaki, H. Kumakura, K. Tanaka, M. Okada, K. Nakamichi, Y. Kihara, T.

- Kamiya, and I. Aoki: Fundamental investigation of a superconducting level sensor for liquid hydrogen with MgB₂ wire,” *J. Phys.: Conf. Ser.* 97 (2008) 012140.
- (6) K. Kajikawa, K. Tomachi, K. Tanaka, K. Funaki, T. Kamiya, M. Okada, and H. Kumakura: Numerical simulation of a superconducting level sensor for liquid hydrogen with MgB₂ wire, in *Proc. 22nd Int. Cryo. Eng. Conf. / Int. Cryo. Mat. Conf. 2008*, Seoul (2009) pp.425-430.
- (7) M.Takeda, S. Yagi, Y. Matsuno, I. Kodama, S. Fujikawa, H. Kumakura, and T. Kuroda : Liquid Hydrogen Experiment Facility with System Enabling Observation under Horizontal Vibration, *Adv. Cryo. Eng.*, Vol.55 (2010) pp. 311-318.
- (8) M.Takeda, K. Maekawa, H. Nara, Y. Matsuno, S. Fujikawa, H. Kumakura, and T. Kuroda: in *Proc. 85th Meet. Cryo. Supercond. Soc. Jpn.* (2011) p.44, in Japanese.