



極低温液体水素の海上輸送を実現するための基盤技術の研究

武田, 実 ; 安井, 亮太 ; 前川, 一真 ; 井上, 雄貴 ; 藤川, 静一 ; 松野, 優 ; 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, 11:54-58

(Issue Date)

2014

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81008070>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81008070>



極低温液体水素の海上輸送を実現するための基盤技術の研究

Research on Basic Technology to Realize Cryogenic Marine Transportation of liquid Hydrogen

武田 実, 安井 亮太*, 前川 一真**, 井上 雄貴**,
藤川 静一***, 松野 優***, 黒田 恒生****, 熊倉 浩明****

Minoru TAKEDA, Ryota YASUI*, Kazuma MAEKAWA**, Yuki INOUE**,
Shizuichi FUJIKAWA***, Yu MATSUNO***, Tsuneo KURODA****, Hiroaki KUMAKURA****

(平成 26 年 6 月 30 日受付)

Abstract

Hydrogen is expected to be used as an ultimate energy source because of clean reaction of hydrogen and oxygen with only water. Using sustainable energy/renewable energy such as solar energy, wind energy and tidal energy, hydrogen can be produced nearly. In the storage and transportation of a large amount of hydrogen, liquid hydrogen has the advantage of high storage efficiency owing to extremely high density in comparison with gas hydrogen. To establish its worldwide storage and marine transportation, it is important to develop liquid hydrogen tanks/carriers like liquefied natural gas tanks/carriers and to elucidate the sloshing conditions inside the tanks during marine transportation. Synchronous measurement system has been designed, constructed and tested to obtain basic experimental data of liquid level, temperature, pressure and acceleration inside the liquid hydrogen cryostat on board. Preliminary experimental results obtained on training ship “Fukaemaru” are reported shortly.

(Received June 30, 2014)

1. はじめに

今日、私たちは地球温暖化や深刻なエネルギー問題に直面している。このような状況の中で、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等が疑問視され長期停止状態が続いており、2014 年現在では原子力発電の割合は 0 % である。その代わりに火力発電の割合が増加し、2010 年度では 62 % であったのに対し、2013 年度では 88 % になっており CO₂ 排出量が確実に増加していると考えられる⁽¹⁾。そこで、これまで以上に自然エネルギーや再生可能エネルギーが注目されてきており、太陽光発電・風力発電・地熱発電などの研究が精力的に行われている。しかし、これらのエネルギーは時間的に変動するとともにエネルギー密度が低く、地形等の条件から発電機を設置できる地点が限られているという問題がある。このような再生可能エネルギーを社会基盤となる規模で有効利用する為には、大規模なエネルギー貯

蔵・輸送技術が欠かせない。そこで、再生可能エネルギーの二次エネルギーとして、水素に変換する方法が注目されている。水素を大量に貯蔵・輸送することを考えると、気体水素の約 800 倍の密度となる液体水素（沸点 20 K）の状態での貯蔵・輸送することが望ましい。液体水素を貯蔵・輸送するには、蒸発損失を軽減するとともに、液量を正確に管理するための高精度の液面計が必要となる。そこで、本研究室では液体水素用液面計の開発を目標として、外部加熱型超伝導 MgB₂（二ホウ化マグネシウム）液面センサーの研究を行っている⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。ごく最近では、MgB₂ 液面センサーを用いて、2000 L 液体水素タンクのトラック走行試験を行い、液面の揺動状態等を明らかにした⁽³⁾。

液体水素をさらに大量輸送することを考えると、LNG（液化天然ガス）と同様に船で輸送することが有利である。しかし、これまで液体水素を海上輸送する実験的研究は行われていない。そこで、今後液体水素を海上輸送の際の基礎実験データを取得するために、液体水素の液面・液体水素タンク内部の温度分布・液体水素タンクにかかる加速度・液体水素タンク内部の圧力を同時計測できる実験システムを構築することを本研究の目的とする。

* 海事科学研究科 現在、川崎重工工業(株)勤務

** 海事科学研究科

*** 岩谷産業株式会社

**** 物質・材料研究機構

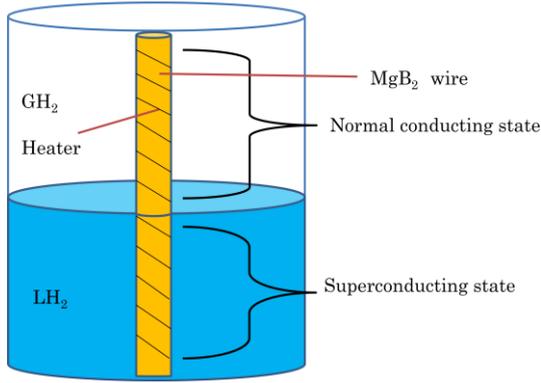


Fig.1 Measurement principle of MgB₂ level sensor.

2. 測定原理と実験装置

2.1 MgB₂ 液面センサーの測定原理

Fig.1 に示すように、液体水素容器の中に MgB₂ 液面センサー(超伝導転移温度 32 K)を入れると、液体水素(沸点 20 K)の液面以下の部分では超伝導状態、液面以上の気体部分では常伝導状態になる。液体水素の液面の高さ L_l は、MgB₂ 液面センサーの長さを L 、超伝導転移温度直上の電気抵抗を R_0 、気体水素部分の電気抵抗を R_g とすると、(1)式で示される。なお、蒸発ガスによる冷却を防ぐために MgB₂ 液面センサーには 2 mm 間隔で外部ヒーター(マンガン線)を巻きつけている⁽⁵⁾。

$$L_l = \frac{L}{R_0} (R_0 - R_g) \quad (1)$$

2.2 クライオスタット

Fig.2 に実験に用いた光学観測用クライオスタットの概略図を示す。Fig.2 に示すように、クライオスタットは、断熱真空槽、液体窒素槽(10.0 L)、液体水素槽(13.6 L)、サンプル槽(3.8 L)、光学観測窓、ニードル弁等で構成されている。クライオスタットの主な素材は SUS304 で、高さは 1203 mm、外径は 300 mm である。また、断熱真空槽と液体窒素槽は、クライオスタットの外部から液体水素槽とサンプル槽に熱が侵入するのを防ぐ役割を果たしている。なお、クライオスタットの下部には光学観測窓(有効直径 50 mm)が 4 箇所設けられている。材質はピレックスガラスで、厚さは一番厚い所で 10 mm になっており、ここからサンプル槽内の様子を観測できるようになっている。

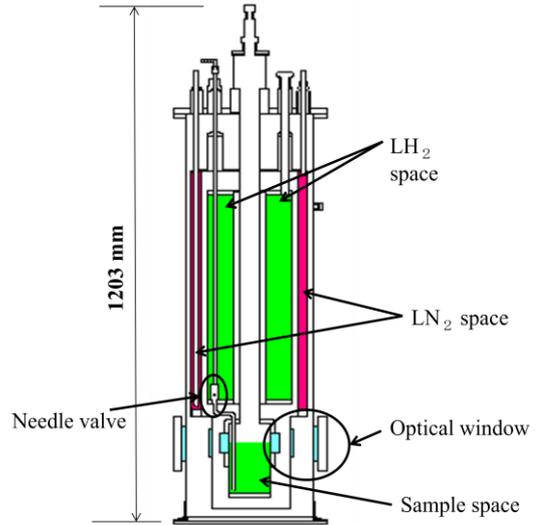


Fig.2 Schematic diagram of optical cryostat.

2.2 サンプルプローブ

サンプルプローブには MgB₂ 液面センサー(線径 0.32 mm、長さ 200 mm、超伝導転移温度 32 K)、熱電対温度計(金+0.07%鉄-クロメル、被覆径 0.24 mm)、外部ヒーター(ポリエステル被覆マンガン線、被覆径 0.23 mm)、電圧測定用リード線(ポリエステル被覆銅線、被覆径 0.13 mm)が取り付けられている。その簡略図を Fig.3 に示す。Tap 1~Tap 5 は、MgB₂ センサーのタップ間電圧、すなわち部分抵抗値から温度を知るためのものである。なお、熱電対は参照温度計として使用した。本研究では、サンプルプローブをクライオスタットのサンプル槽に挿入して実験を行った。

2.3 各種センサー

加速度センサーには PCB PIEZOTRONICS 社製の構造解析用高感度三軸 ICP 加速度計(分解

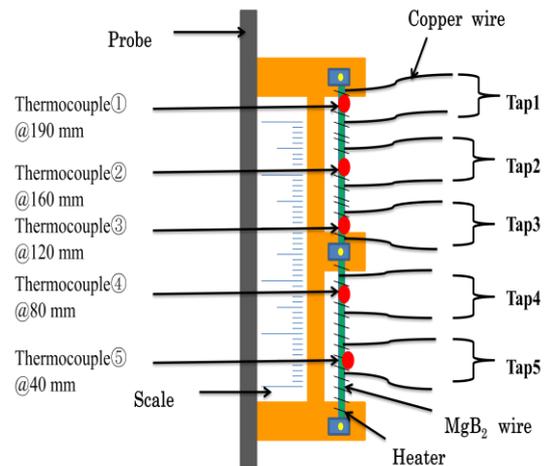


Fig.3 Schematic diagram of sample probe.

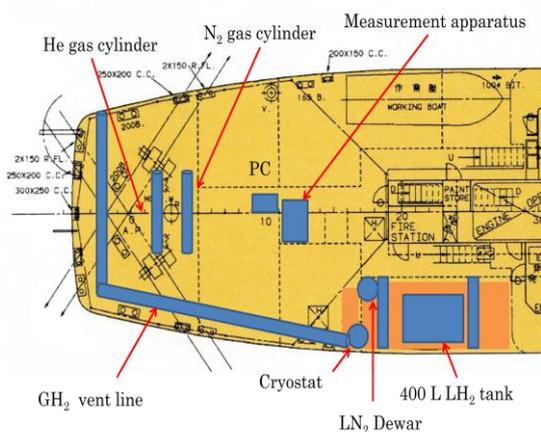


Fig.4 Schematic diagram of layout drawing of experimental apparatus.

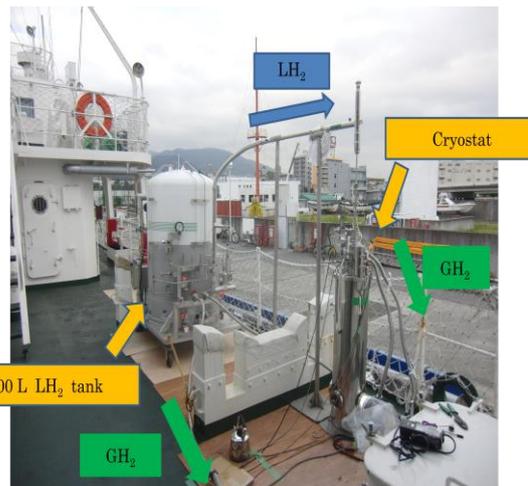


Fig.6 Picture of experimental apparatus part 1.

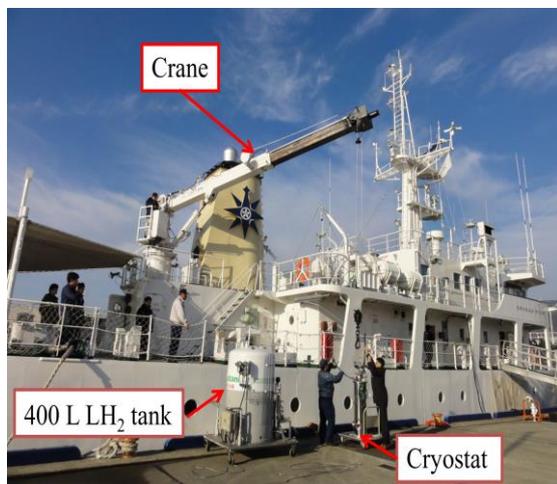


Fig.5 Picture of loading of 400 L LH₂ tank and cryostat.

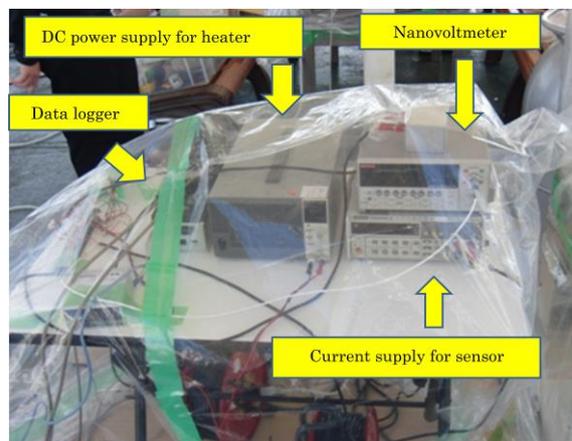


Fig.7 Picture of experimental apparatus part 2.

能 $0.0005 \text{ m/s}^2 \text{ rms}$ 、周波数範囲 0.3 Hz - 3 kHz) を用いた。この加速度センサーは 3 軸の測定が可能であるが、圧電型加速度センサーであるため、重力加速度のような大きさと向きが一定の加速度は検出できない。また、圧力センサーには長野計器(株)製の本質安全防爆構造 KJ16 圧力トランスミッターを使用した。さらに、液面センサーの測定電流を一定時間ごとに反転させるために、ソリッドステートタイマー (オムロン製 H3YN-4) を使用した。このソリッドステートタイマーは設定時間を 0.1 s ~ 10 min (1 s 、 10 s 、 1 min 、 10 min の 4 レンジ) に変更可能であり、4 つの動作モードに切り替えることができる。また、データロガーには KEYENCE 社製の NR-600 シリーズを用いた⁽⁵⁾。

3. 停泊中深江丸船上実験における事前準備

本研究における実験はすべて停泊中の本研究科附属練習船深江丸船上で行った。Fig.4 に実験装置の配置図を、また Fig.5 に 400 L 液体水素タンクとクライオスタットの深江丸への搬入の様子を示す。Fig.6 および Fig.7 には実験装置の配置の様子を示す⁽⁵⁾。

Fig.4 に示すように、深江丸後部甲板の右舷側に 400 L 液体水素タンクおよびクライオスタットを配置し、これらから出る蒸発ガスは左舷船尾側から排出されるようにベントラインを構築した。また、防爆用の窒素ガスボンベおよびサンプル槽加圧用のヘリウムガスボンベを後部甲板中央の柱に紐で括り固定した。Fig.6 に示すように、測定機器および PC は防爆用の袋で覆い、窒素ガスを供給し続けた。

4. 液面・温度・圧力・加速度の同時計測システムの構築

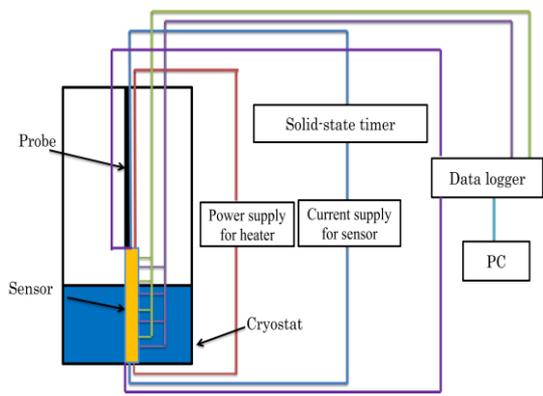


Fig.8 Schematic diagram of measurement system inside of the cryostat.

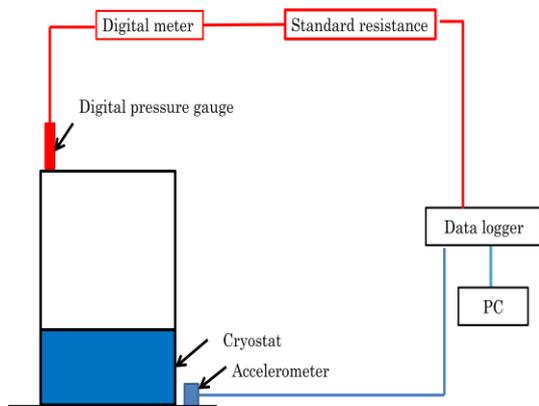


Fig.9 Schematic diagram of measurement system outside of the cryostat.

4.1 実験システムと実験方法

Fig.8 にクライオスタット内部の計測システムの概略図を、また Fig.9 にクライオスタット外部の計測システムの概略図を示す。

Fig.8 に示すように、クライオスタットに

MgB₂ センサー、熱電対温度計、マンガニン線が取り付けられているサンプルプローブを挿入した。次に、MgB₂ センサーに直流安定化電源、出力電圧測定用のデータロガーを接続し、さらに電流を反転させる為にソリッドステートタイマーを接続した。また、マンガニン線にはヒーター電源を接続した。温度校正用の熱電対温度計には参照温度として氷点温度を用いる為、小型のデュワーにシャーベット状の氷水を入れて、温度計の出力電圧をデータロガーにて測定した。Fig.9 に示すように、クライオスタット外部には圧力センサーと加速度センサーが取り付けられている。圧力センサーはデジタルメーターおよび標準抵抗を介してデータロガーに、また加速度センサーは直接データロガーに接続して測定回路を構成した。

実験は次のように行った。まず MgB₂ センサーに直流安定化電源から 100 mA の電流を印加し、外部ヒーターにはヒーター電源から 3 W の電力を供給した。そして、MgB₂ センサーの出力電圧、各タップ間の出力電圧、熱電対温度計の出力電圧、加速度センサーの出力電圧、圧力センサーの出力電圧をそれぞれデータロガーで同時計測した。

4.2 実験結果

一例として、Fig.10 に全実験データのうちの 16:50:47~16:52:26 における停泊中深江丸後部甲板上の加速度と圧力の時間変化のグラフを、また Fig.11 に同時刻における液面と tap 1 および tap 2 の出力電圧の時間変化のグラフを示す。Fig.10 および Fig.11 を見ると、加速度、圧力、液面、タップ間電圧の値の時間的変化はない。これは、ほぼ静止した状態の深江丸船上で実験を行ったためである。

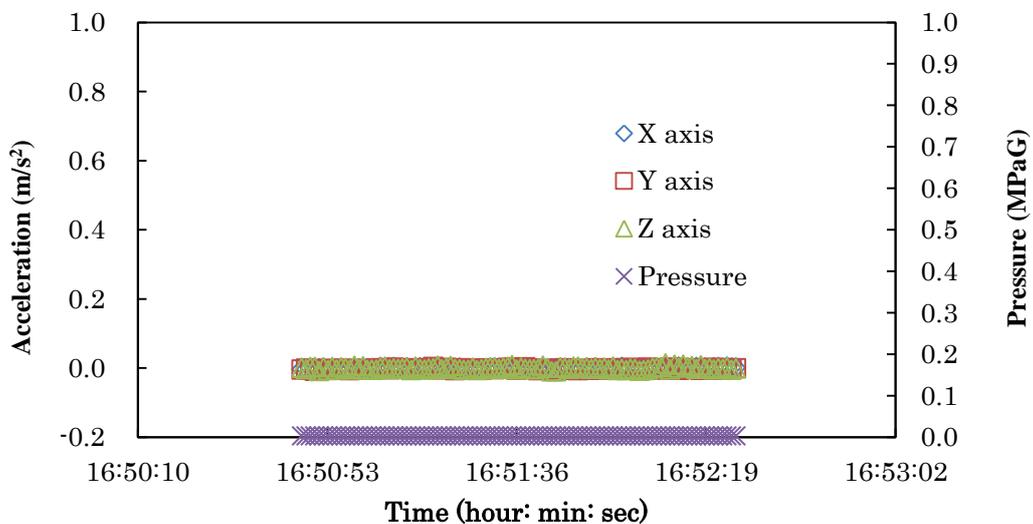


Fig.10 Time chart of acceleration and pressure on board.

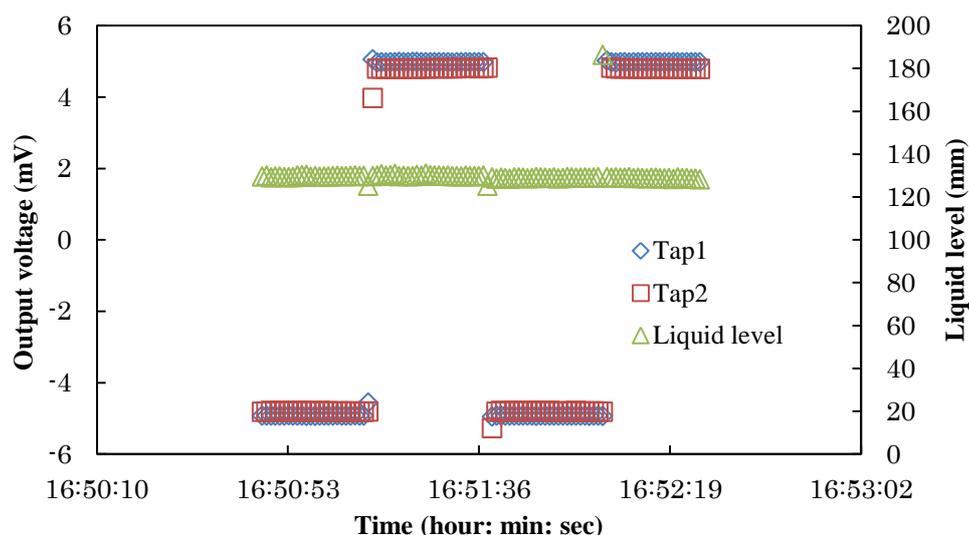


Fig.11 Time chart of output voltage of tap 1, tap 2 and liquid level on board.

Fig.11 において、液面センサーの出力電圧は、液面位置と出力電圧の間の近似直線を用いて液面高さに換算している。また、タップ間電圧は、ソリッドステートタイマーを用いて電流反転させているために正負の値を示している。タップ間電圧の値を温度に変換すると、Tap 1 では 52.7 K であり、Tap 2 では 53.9 K であった。これらの温度は、クライオスタット内部の温度分布ではなく、ヒーターによって暖められた MgB_2 センサー自身の温度である。このため、液面・加速度・圧力の同時計測は可能であるが、クライオスタット内部の温度分布はこれらと同時に計測できない。しかし、過去の研究から液面計測時のヒーター入力時間は 1 秒以内で良いことが示されているので、加速度・圧力の計測に加えて、必要な時はヒーター ON にして液面計測を行い、それ以外の時はヒーター OFF にして温度分布計測を行うシステムが構築できたとと言える。

5. まとめと今後の課題

液体水素を海上輸送する際の基礎実験データ取得のために、液体水素の液面・液体水素タンク内部の温度分布・液体水素タンクにかかる加速度・液体水素タンク内部の圧力を同時計測できる実験システムを構築し、本研究科附属練習船深江丸が停泊中に後部甲板にて実験を行った。その結果、加速度・圧力の計測に加えて、必要な時は液面計測を行い、それ以外の時は温度分布計測を行うシステムが構築できたとと言える。

今後の課題は、構築した同時計測システムを用いて、本研究科附属練習船深江丸の航海中に後部甲板で実験を行うことである。

謝辞

本研究で、実験場所を提供していただくとともに、実験実施の便宜を図っていただきました深江丸船長の矢野吉治教授をはじめ乗組員の皆様に心より感謝申し上げます。また、本研究の一部に対して、科研費基礎研究 A(24246143)の援助を受けました。ここに謝意を表します。

参考文献

- (1) 日本経済新聞 (夕刊) : 2013 年度エネルギー白書の関連記事, 2014 年 6 月 17 日.
- (2) K. Maekawa, M. Takeda, Y. Matsuno, S. Fujikawa, T. Kuroda and H. Kumakura: Thermal response of MgB_2 level sensor for liquid hydrogen using external heater, Proceeding of ICEC24-ICMC2012 (2013) pp. 59-62.
- (3) M. Takeda, S. Fujikawa, Y. Matsuno, K. Maekawa, T. Kuroda and H. Kumakura: Synchronous measurements of liquid level, temperature and pressure inside a 2000 liter liquid hydrogen tank during a track transportations, Proceedings of ICEC24-ICMC2012 (2013) pp. 311-314.
- (4) M. Takeda, Y. Matsuno, I. Kodama, H. Kumakura and C. Kazama: Application of MgB_2 Wire to Liquid Hydrogen Level Sensor — External-Heating-Type MgB_2 Level Sensor, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol.19 (2009) pp.764-767.
- (5) 安井亮太: 極低温液体水素の海上輸送を実現するための基盤技術の研究—超伝導 MgB_2 液面センサーを中心として—, 神戸大学大学院海事科学研究科修士論文 (2014).