



2000L液体水素タンク輸送のためのシミュレーション 解析

奈良, 洋行 ; 前川, 一真 ; 武田, 実 ; 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, 10:68-73

(Issue Date)

2013

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81005255>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81005255>



2000 L 液体水素タンク輸送のためのシミュレーション解析

Simulation Analysis of 2000 Liter Liquid Hydrogen Tank for Transportation

奈良洋行^{*}, 前川一真^{**}, 武田 実, 藤川静一^{***}, 松野 優^{***}, 黒田恒生^{****}, 熊倉浩明^{****}

Hiroyuki NARA^{*}, Kazuma MAEKAWA^{**}, Minoru TAKEDA, Shizuichi FUJIKAWA^{***},
Yu MATSUNO^{***}, Tsuneo KURODA^{****}, Hiroaki KUMAKURA^{****}

(平成 25 年 6 月 28 日受付)

Abstract

Hydrogen is an ultimate energy source because only water is produced after the chemical reaction of hydrogen and oxygen. In the near future, a large amount of hydrogen, produced using sustainable/renewable energy, is expected to be consumed. Since liquid hydrogen (LH₂) has the advantage of high storage efficiency, it is expected to be the ultimate medium for the worldwide storage and transport of large amount of hydrogen. To make a calculation model of the sloshing of LH₂ inside a 2000 liter tank, simulation analyses of LH₂ surface oscillation, temperature and pressure inside the tank during a truck transportation were carried out using a multipurpose software ANSYS CFX. Calculated results are discussed in comparison with experimental results.

(Received June 28, 2013)

1. はじめに

近年、地球温暖化問題や一昨年発生した福島第一原子力発電所での事故を受け、化石燃料や原子力に替わるエネルギー源として太陽光や風力などの再生可能エネルギーに注目が集まっている。これらのエネルギーは地球上の広範囲に分布しているため、得られた電気エネルギーを水素に一度変換し、輸送・貯蔵効率の高い極低温液体水素(LH₂:沸点 20.4 K)の状態では海外から日本へ海上輸送する計画⁽¹⁾が立てられている。これらの大量の液体水素を安全に貯蔵・輸送するためには、精度の高い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)現象を把握することが非常に重要である。

我々は、これまで液体水素用超伝導液面センサーの研究開発や小型容器・2000 L タンクを対象とした液体水素の液面振動の基礎研究などを行ってきた⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。ごく最近では、2000 L の LH₂ タンクのトラック走行試験を行い、LH₂ のスロッシング挙動、タンク内の温度、圧力の時間変化について実験的に調べた⁽⁴⁾。

本研究は液体水素のスロッシングの解析モデルの構築を目的として、このトラック走行試験の際に発生した 2000 L タンク内部の液体水素の液面振動に関する解析を汎用熱流体解析ソフト ANSYS CFX を用いて行った。

2. 支配方程式

本研究で使用している解析ソフトである ANSYS CFX で使われている支配方程式について説明する。

まず、液面振動を再現するために使用した式として(1)式の連続の式、(2)式の運動方程式、(3)式の浮力の式、(4)式の体積分率の式が挙げられる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_{\alpha} \rho_{\alpha}) + \nabla \cdot (r_{\alpha} \rho_{\alpha} \vec{U}_{\alpha}) = 0 \quad (1)$$

$$r_{\alpha} \rho_{\alpha} \left[\frac{\partial \vec{U}_{\alpha}}{\partial t} + (\vec{U}_{\alpha} \cdot \text{grad}) \vec{U}_{\alpha} \right] \quad (2)$$

$$= -\text{grad}(r_{\alpha} p_{\alpha}) + r_{\alpha} \mu_{\alpha} \Delta \vec{U}_{\alpha} + \vec{f}_{\alpha}$$

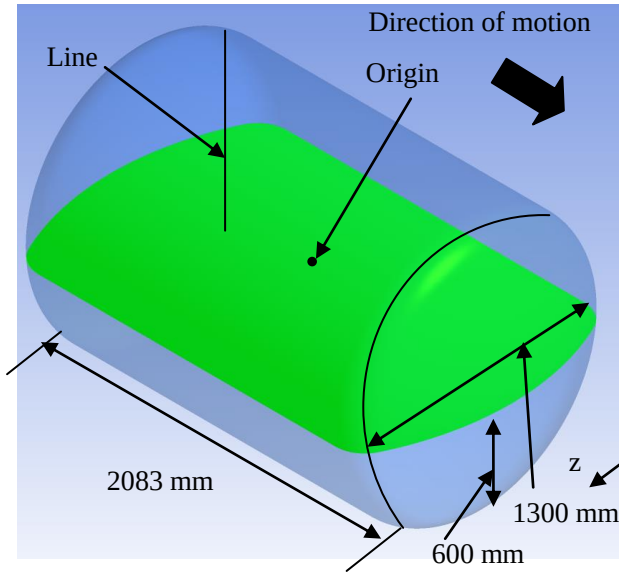
$$F_{\alpha} = (\rho_{\alpha} - \rho_{\text{ref}}) g \quad (3)$$

^{*} 海事科学研究科博士課程前期課程
現在、(株)ヤスナ設計工房勤務

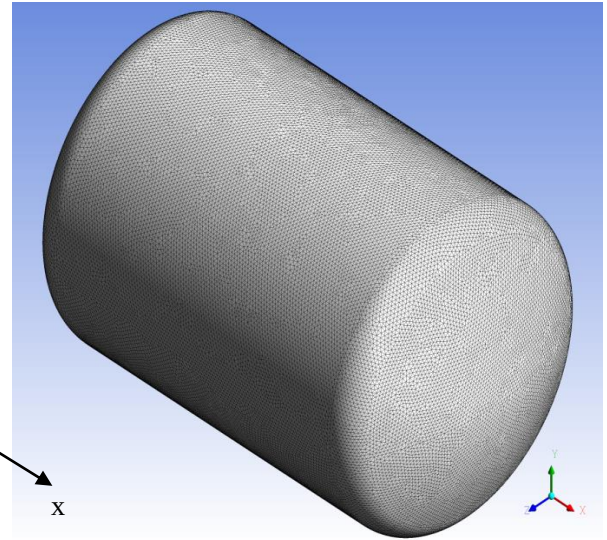
^{**} 海事科学研究科博士課程後期課程

^{***} 岩谷瓦斯株式会社

^{****} 物質・材料研究機構



(a) Analytical model



(b) Mesh configuration

Fig.1 Analytical model and mesh configuration of 2000 L tank.

$$r_\alpha = \frac{V_\alpha}{V} \quad (4)$$

ここで、 r_α は相 α の体積分率、 ρ_α は相 α の流体の密度、 t は時間、 $\vec{U}_\alpha$ は相 α の流速、 μ_α は相 α の粘性係数、 p_α は相 α の圧力、 $\vec{f}_\alpha$ は相 α の上記以外の力、 ρ_{ref} は参照密度、 V は任意の小さいメッシュの体積、 V_α は V 中で相 α が占める体積、 α は気体または液体を表す。

また、タンク内への熱侵入や液体水素の蒸発を考える場合は上記の式に加え、(5)式の状態方程式、(6)式の比熱の式、(7)式の熱エネルギー方程式、(8)式の相間移動量の式も支配方程式として挙げられる。

$$p_\alpha = \frac{RT_\alpha}{v_\alpha - b} - \frac{a(T_\alpha)}{v_\alpha(v_\alpha + b)} \quad (5)$$

Where,

$$a = a_0 \left(\frac{T_\alpha}{T_{\alpha,c}} \right)^{-0.5}, \quad a_0 = \frac{0.42748 R^2 T_{\alpha,c}^2}{p_{\alpha,c}}, \quad b = \frac{0.08664 R T_{\alpha,c}}{p_{\alpha,c}}$$

$$C_{\alpha,p}^0 = R_\alpha (a_{\alpha,1} + a_{\alpha,2} T_\alpha + a_{\alpha,3} T_\alpha^2 + a_{\alpha,4} T_\alpha^3 + a_{\alpha,5} T_\alpha^4) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (r_\alpha \rho_\alpha e_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha e_\alpha)) \\ &= \nabla \cdot (r_\alpha \lambda_\alpha T_\alpha) + r_\alpha \tau_\alpha (\nabla \vec{U}_\alpha)^2 + S_{E\alpha} + Q_\alpha \\ &+ \sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ e_{\beta S} - \Gamma_{\beta\alpha}^+ e_{\alpha S}) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\dot{m}_{\alpha\beta} = \frac{k_\alpha (T_\alpha - T_s) - k_\beta (T_s - T_\beta)}{L} \quad (8)$$

ここで、 T_α は相 α の温度、 v_α は相 α の比体積(=1/ ρ)、 $T_{\alpha,c}$ は相 α の臨界温度、 R は気体定数、 $p_{\alpha,c}$

は相 α の臨界圧力、 R_α は相 α の気体の比気体定数(気体定数を分子量で割った値)、 $a_{\alpha,1} \sim a_{\alpha,5}$ は気体ごとに定まる定数、 e_α は相 α の内部エネルギー、 λ_α は相 α の液体の熱伝導率、 τ_α は相 α の応力テンソル、 $S_{E\alpha}$ は外部熱源からの熱、 Q_α は他の相との界面から相 α に入ってくる熱、 N_p は相の数、 $\Gamma_{\alpha\beta}^+$ は相 β から相 α への単位体積あたりの質量流量、 $\Gamma_{\beta\alpha}^+$ は相 α から相 β への単位体積あたりの質量流量、 $e_{\beta S}$ は相変化などにより相 β から入ってくる内部エネルギー、 $e_{\alpha S}$ は相変化などにより相 α から出ていく内部エネルギー、 $\dot{m}_{\alpha\beta}$ は界面間の質量流速、 k_α 、 k_β はそれぞれ、相 α 、相 β の熱伝達係数、 T_α 、 T_β は相 α 、相 β の温度、 T_s は飽和温度を、 L が蒸発潜熱を表す。

3. 2000 L タンクのモデル形状とメッシュ

Fig.1 に 2000 L タンクのモデル形状とメッシュ形状を示す。2000 L タンクは Fig.1(a)のように、直径 1300 mm、長さ 2083 mm の円柱を横向けにした形状になっており、タンクの容積は計算すると 2764 L となっている。そして、参考に行っているトラック走行試験⁽⁴⁾と条件を合わせるため、タンクには液体水素が 1189 L(初期の液面位置がタンクの底から 600 mm)入っている状態での解析を行った。

また、このモデルをメッシュに分割したものが Fig.1(b)である。メッシュは四面体形状に分割されており、初期の液面位置のメッシュが滑らかになるよう、液面とメッシュが交わらないようにして、液相と気相を別々にメッシュ分割している。ちなみに、節点数は 30 万 個、要素

数は 166 万個、メッシュサイズは最大で 16.5 mm となっている。

4. 熱解析

2000 L タンクの熱解析について説明する。この解析ではタンクが静止している状態における気相の温度分布を求めた。

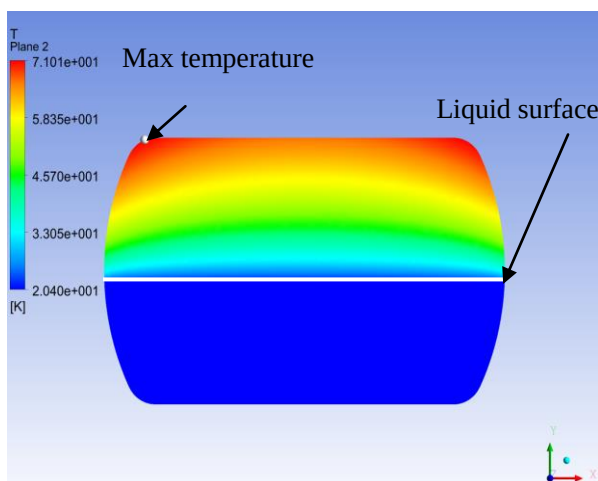
まず、解析条件として液体水素は 20.4 K と固定し、液面からの蒸発や浮力による対流は起こらないと仮定した。その理由はタンクへの熱侵入は非常に緩やかであるため、熱はほとんど気体水素の熱伝導のみで伝えられると考えたためである。

次に、初期条件として、気体水素の初期温度は 20.4 K であるとしている。そして、液面の高さは前述した通り、参考にしている実験⁽⁴⁾と同じ

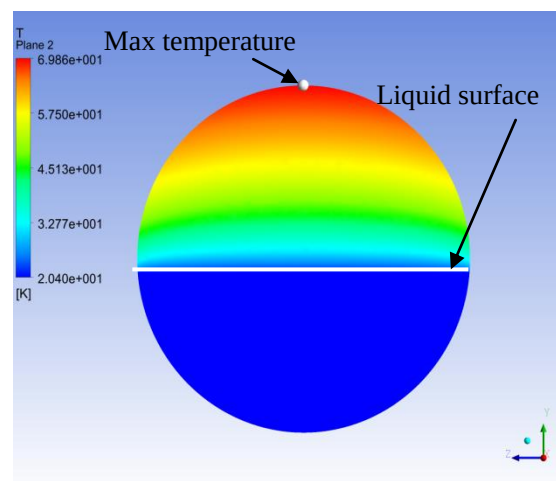
600 mm となっている。

最後に、境界条件としてタンク壁面から 17 W の侵入熱が均等に入熱しているとした。この熱量は実験で観測した静止状態におけるタンクの圧力上昇率⁽⁴⁾より求めている。

Fig 2 に $z = 0$ mm、 x 軸正の方向から見た $x = -690.5$ mm の平面の温度分布を示す。なお座標は Fig1 中に表示している Origin (タンクの重心) を基準に定義している。Fig.2 より、気相の温度は液面から遠ざかるごとに温度が高くなっており、特に、上部の両端で高くなっていることがわかった。これは侵入熱がすべての壁面に対して均等にかつ垂直に入熱しているとして、タンク上部の両端に侵入した熱が集中して、他の範囲より温度が高くなっていることが原因であると考えられる。ここで、各平面の



(a) $z = 0$ mm



(b) $x = -690.5$ mm

Fig.2 Temperature distribution in the tank.

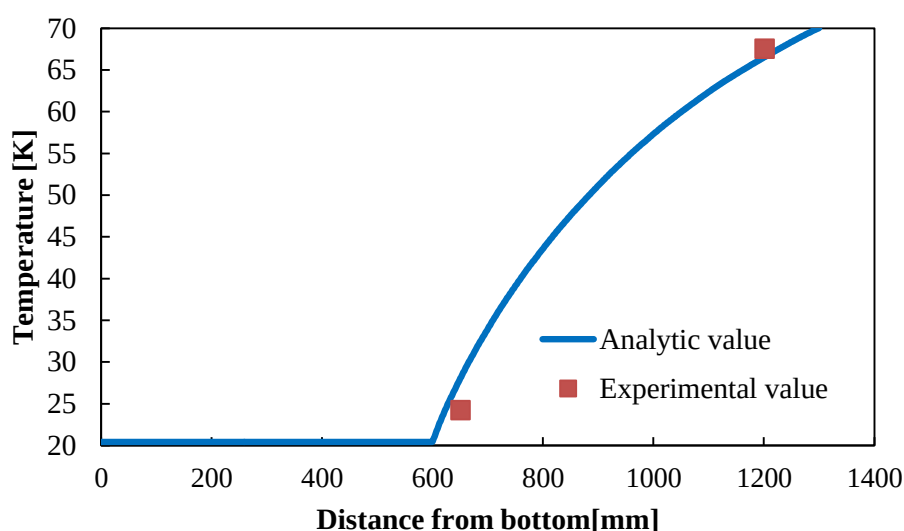
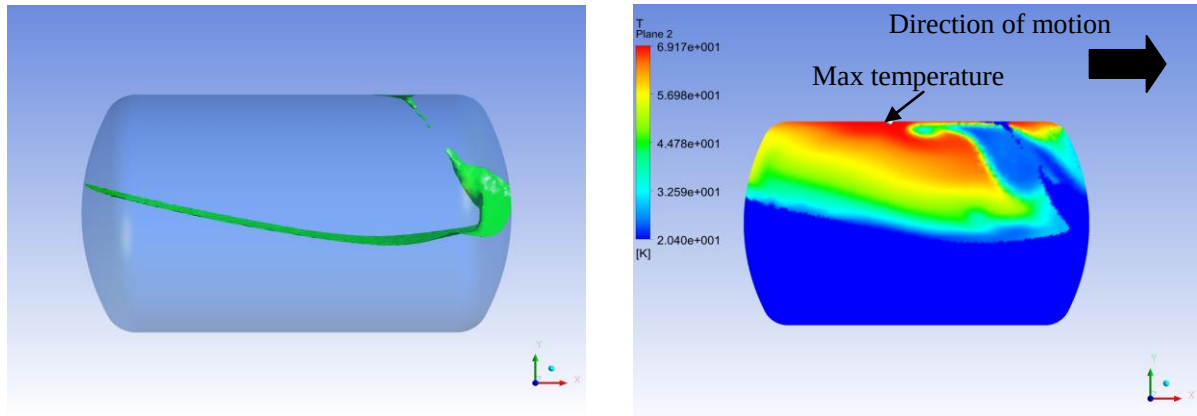


Fig.3 Temperature distribution along the line in Fig. (a).

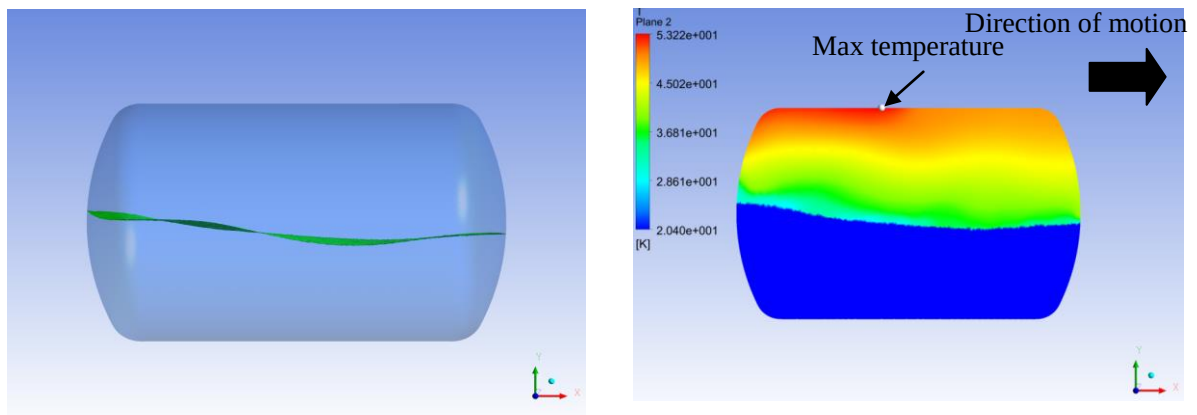
最高温度は各図の Max temperature の位置でそれぞれ、71.0 K と 69.8 K であった。また、タンク全体の最高温度は 71.0 K であった。

また、Fig.3 に Fig.1 の Line の位置(Origin から x 軸方向に -690.5 mm の位置、液面センサーがある位置)における温度分布を示す。グラフの横軸はタンクの底からの距離を表しており、グラフ上にプロットされている実験値は Line 上のタンクの底から 650 mm、1200 mm 離れた位置の温度である。Fig.3 より、タンクの底か

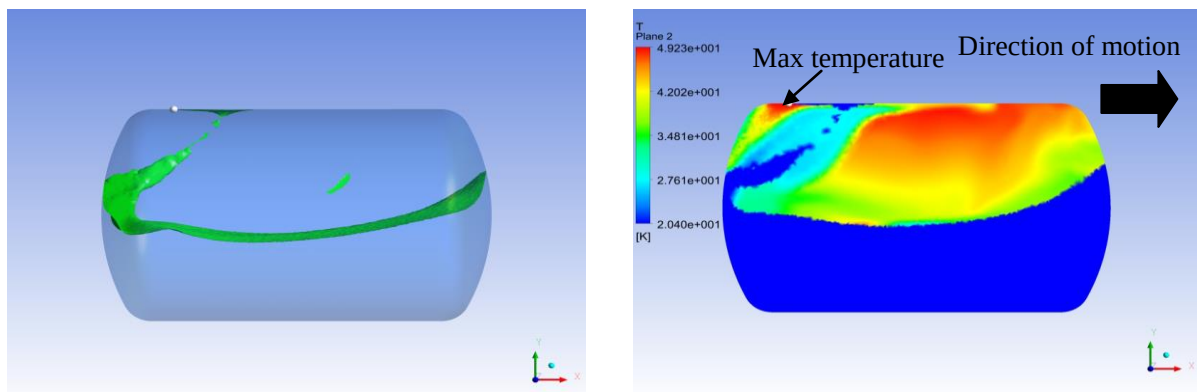
ら 650 mm 離れた位置の温度は実験値が 24.2 K であったのに対し、解析値は 28.0 K となった。一方、タンクの底から 1200 mm 離れた位置の温度は実験値が 67.5 K であったのに対し、解析値は 66.5 K となった。以上の結果から、このシミュレーションは実際のタンク内の気相の温度分布をおおよそ再現できていると考えられる。よって、この解析結果を 2000 L タンクの振動熱解析の初期条件として使用した。



(a) $t = 2.0$ s (Acceleration)



(b) $t = 8.0$ s (Uniform velocity)



(c) $t = 10.0$ s (Deceleration)

Fig.4 Position of liquid surface (left) and temperature distribution in the plane of $z = 0$ mm (right).

5. 振動熱解析

2000 L タンクの振動熱解析について説明する。この解析では液面振動の様子とその間の気相の温度と圧力の変化に関する解析を行った。

まず、解析条件として、気相の温度、圧力は自由に変動できるものとし、タンク内での壁面からの熱侵入や液面からの蒸発の発生を考慮した。このような条件の下、タンクに Fig.1 の矢印の方向(x 軸正の方向)に 0.3 G の加速度を与え、その後 40 km/h の等速運動をさせ、さらに -0.3 G の加速度で停止させた。ここで、設定している加速度、および速度の大きさは一般的な自動車の出せる加速度と速度の大きさを採用している。また、この解析のタイムステップは 0.01 s に設定しており、12 s 間の液面振動の様子をシミュレーションしている。

次に、初期条件として、容器は最初完全に静止しているものとし、初期の液面位置は参考に行っているトラック走行試験に基づいて、底から 600 mm の位置にあるとした。また、静止状態における熱解析の結果をタンク内の気相の初期温度分布として与えた。

最後に、境界条件として、前節の熱解析と同様、17 W の熱侵入が壁面から均等に入熱させるよう設定した。

Fig.4 に $t = 2.0$ s (加速中)、 $t = 8.0$ s (等速運動中)、 $t = 10.0$ s (減速中)の液面振動の様子を z 軸正の方向から見た図と、その時の平面 $z = 0$ mm の温度分布図を示す。平面 $z = 0$ mm の温度分布図においては、図中の Max temperature の位置がこの平面の最高温度になっており、その値は $t = 2.0$ s で 66.5 K、 $t = 8.0$ s で 52.3 K、 $t = 10.0$ s で 49.2 K となっている。これらの温度分布図と液面位置の図より、液面が跳ね上がると、近辺の温度が下がっている様子がよくわかる。特に、液面振動の跳ね返りが起こる瞬間(加速中の $t = 2.0$ s、減速中の $t = 10.0$ s)に気相の冷却が広い範囲で起こっていることが図よりわかった。そして、時間が 10 s 経過した Fig.4(c)の温度分布図より、気相の温度が時間の経過とともに下がり始め、均等に近づいていることもわかる。これは、液面振動によって温度の高い部分の気体が冷却されたことや温度の高い気体水素と低い気体水素が混じり合ったことが原因で起こったと考えられる。

次に、Fig.1 の Line 上における液面高さタンクの底から 1200 mm (初期液面から 600 mm)離れた位置の温度の時間変化を表した図を Fig.5 に、気相部分の平均圧力と平均温度の時間変化を表す図を Fig.6 に示す。なお、図はタンクが運動を始める時刻を $t = 0$ s とし、0.1 s ごとにプロットされている。

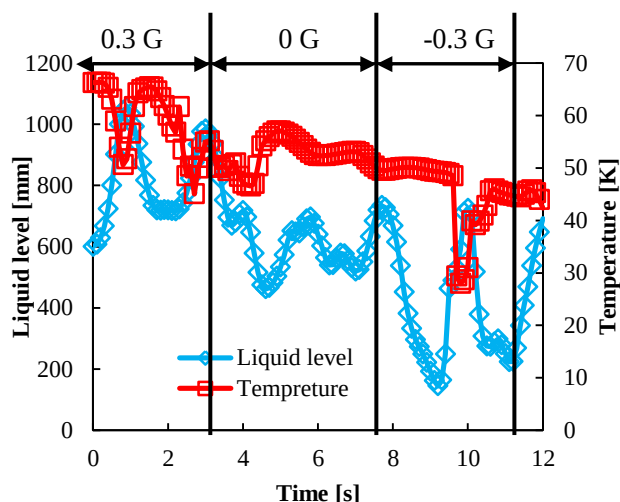


Fig.5 Time chart of liquid level and temperature of GH_2 in 2000 L tank.

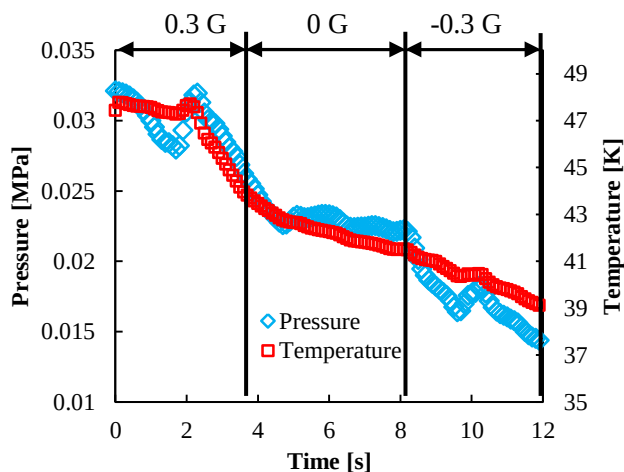


Fig.6 Time chart of average pressure and average temperature of GH_2 in 2000 L tank.

また、Fig.5 中の液面の高さはタンクの底から液面までの高さであり、Fig.6 の圧力はゲージ圧で表している。

解析の結果、Fig.5 に示したように液面振動の平均周期は 2.2 s であり、Line 上の液面は最大で 1054 mm まで上昇した。過去に行われたトラック走行実験では液面振動の周期は約 2.0 s で液面は 1200 mm 以上まで上昇しており、解析値と似た値になっている。また、タンクの底から 1200 mm 離れた位置の温度は時間経過とともに低くなっている。特に、加速、減速時に液面の変動が大きくなっているため、気相の温度が液面振動の影響を大きく受けている様子がよくわかる。これは、液面振動によって気相部分の温度が冷却されているために起こる現象であり、これと似た現象は実際のトラック走行試験でも観測できた。

一方、Fig. 6 より、気相内の平均圧力は気相温度の低下に伴って徐々に減少し、12 s 間でタンク全体の最高温度は 71.0 K から 47.6 K まで、

平均温度は 47.8 K から 39.1 K まで、平均圧力は 0.032 MPaG から 0.014 MPaG まで低下していることがわかった。

以上の解析結果より、タンク内の液面振動中に気相の温度や平均圧力に起こる変化はおおよそ再現できていると言える。ただし、実験の際にトラックの加速度を計測していなかったため、厳密に実験値と解析値を比較できなかった。また、今回の解析は短時間の液面振動しか解析できなかったため、液体が正しく蒸発しているか判断できなかった。

6. まとめと今後の課題

2000 L タンクの液面振動の解析を行った結果、液面振動の平均周期や液面変化の実験値と似た解析値を求めることができた。また、液面振動による気相部分の温度や圧力の低下という 2000 L タンクの走行実験でも観測された現象を再現できた。

今後は液面振動実験時に加速度も同時に計測し、その実験をシミュレーションで再現する。また、タンク内への侵入熱量がタンク内の状況(液面の位置や気体の温度分布など)によって変化するように設定すること、メッシュのサイズや構造を再検討することが必要である。さらに、液体が正しく蒸発しているか判断できるよう、長時間の振動の様子を解析する必要もある。

その後、液体水素運搬用の船用大型タンク(1250 m³)を想定した解析モデルを構築し、そのスロッシング挙動を求める予定である。

謝辞

本研究に対して、科研費挑戦的萌芽研究(23656550)および基盤研究 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) 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) M. Takeda, S. Yagi, 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.
- (4) 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-ICMC 2012* (2013) pp. 311-314.