

## 高圧水素容器の火炎暴露試験の数値シミュレーション

### Numerical Simulation for the Bonfire Test of Compressed Hydrogen Cylinder

- 山田英助, JARI, 茨城県東茨城郡城里町大字小坂字高辺多 1328 番 23, eyamada@jari.or.jp  
田村陽介, JARI, 茨城県東茨城郡城里町大字小坂字高辺多 1328 番 23, ytamura@jari.or.jp  
Eisuke Yamada, Japan Automobile Research Institute, 1328-23 Takaheta, Osaka, Shirosato, Ibaraki  
Yohsuke Tamura, Japan Automobile Research Institute, 1328-23 Takaheta, Osaka, Shirosato, Ibaraki

Hydrogen fuel cell vehicles (FCV) are expected to play an important role in the future. A composite storage tank to store compressed hydrogen is used for FCV. To prevent a tank from bursting in the case of a fire accident, it is required that a thermally-activated pressure relief device (TPRD) is attached to the tank. In order to investigate the safety aspect of the TPRD system, a bonfire test is required in Global Technical Regulation No.13. In this study, the bonfire test is simulated with OpenFOAM which is an open source code of computational fluid dynamics. The effects of wind are studied. It reveals that the influence of wind on temperature profile is significant. It is necessary that the wind condition is regulated properly.

#### 1. はじめに

化石燃料の代替エネルギー源の有力候補である水素を燃料とした燃料電池自動車 (Fuel Cell Vehicle (FCV)) が 2014 年に市販化され、普及が期待されている。FCV の燃料である水素は、単位体積あたりのエネルギー密度が著しく低いので、圧縮して専用の高圧水素容器に格納している。最大 70MPa (15°C 基準) に達する FCV の高圧水素容器には高度な安全性が求められており、各種の評価試験が実施されている。

その一つとして、火災時の高圧水素容器の安全性を検証するために、火炎暴露試験が実施されている<sup>(1)</sup>。火災時の温度上昇による容器の破裂を防止するため、容器には熱作動式の安全弁 (Thermally-activated Pressure Relief Device (TPRD)) の装着が要求されており、試験ではこの TPRD の作動を確認する。この試験方法は、世界技術規則第 13 号 (Global Technical Regulation No.13 (GTR13)) に定められており、海外でも試験が行われている。しかしながら、試験の再現性に課題があり、GTR13 の改定作業が進められている。火炎形状や基準となる温度計測点、風の影響などを適切に基準化することが必要と考えられている。本研究では、基準化に資するデータを取得するため、数値シミュレーションによって火炎暴露試験を模擬することを目的とする。はじめに実験と数値シミュレーションを比較して妥当性を検証する。次に、周囲の風の影響を加えた数値シミュレーションを実行し、試験条件としての風の影響を検討する。

#### 2. 計算モデル

高圧水素容器の周囲を計算領域として、容器に火炎を作用させる解析を実施する。バーナーの大きさと容器の相対位置、および温度計測位置などが GTR13 に規定されている。これをもとに試験を実施し、数値シミュレーションではその試験に相当する数値モデルを作成した。試験での容器設置状況を Fig. 1 に、それを模擬した計算モデルを Fig. 2 に示す。容器は円筒両端に半球と小さい円筒状のエンドボス部が接続した軸対称の形状である。容器の全長は 0.9m、胴部の直径は 0.3m である。容器は地面に対して水平に横置きし、容器の最下部から 0.1m 離れた位置にバーナーを設置する。バーナー台の高さは 0.5m で、バーナーは長方形平面の流入口で構成され、プロパンを 100NL/min で供給する。バーナーの中央の上側に容器を設置し、2 つの容器支持部分も計算モデルに再現している。容器の中心を原点とし、境界の影響を少なくするため容器の軸方向と横方向は -4.0~4.0m、上下方向は -0.75~5.0m を計算領域とする。火炎暴露試験は、数分から十分程度の時間がかか



Fig. 1 Experimental setup.

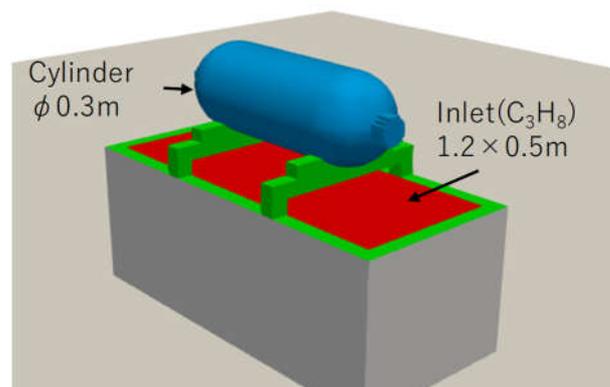


Fig. 2 Simulation model.

るため、計算負荷の観点から詳細な空間解像度での計算は実用的ではない。従って、適度に格子数を調整する必要がある。そこで、計算領域全体は約 142 万の六面体で構成し、火炎が形成される部分はより詳細に格子幅を約 0.01m とする。

初期温度は 25.1°C で、初期速度は全体を 0 とし、計算開始とともにプロパンが流入して火炎を形成する。地面とバーナー台と容器および容器支持部分は、固体を想定した壁境界とし断熱条件とする。周囲の外側境界は上部境界も含めてすべて流入流出を考慮した境界条件とする。

解析には、オープンソースコードの OpenFOAM v1806 の標準ソルバーの fireFoam を利用する。燃焼反応はプロパンの総括反応モ

デルを適用する<sup>2)</sup>。考慮する化学種は C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> の 5 個である。拡散係数は Sutherland モデルを適用し、各化学種で調整する。乱流モデルは、Large Eddy Simulation (LES) の 1 方程式の渦粘性モデルとする。

GTR13 では容器底部の下約 0.025m の火炎温度を 3 本以上の熱電対で計測することが求められている。実験で設置した K 型熱電対 (φ3.2mm) 3 本の位置を Fig. 3 に F1, F2, F3 で示す。F2 は中心部, F1 と F3 は左右対称の位置である。

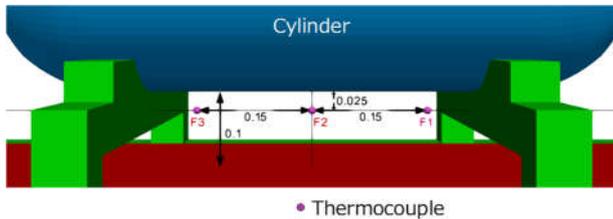


Fig. 3 Thermocouple positions.

数値シミュレーションでは, F1, F2, F3 の温度を式(1)の熱電対のエネルギー保存式により評価する。

$$\rho C_p V \frac{dT}{dt} = \epsilon(G - \sigma T^4)A + h(T_g - T)A \quad (1)$$

$\rho$ ,  $C_p$ ,  $V$ ,  $A$ ,  $\epsilon$ ,  $T$  は熱電対の密度, 比熱, 体積, 表面積, 放射率, 温度である。  $G$  は熱電対が受ける放射で, P1 放射モデルにより得られる。  $t$  は時間,  $T_g$  は気体温度,  $\sigma$  はボルツマン定数である。  $h$  は熱伝達率で, Nusselt 数から求める。この熱電対モデルは OpenFOAM のユーティリティにあり, 実験で使用した K 型熱電対の物性値を適用して利用する。

### 3. 結果と考察

100 秒後の 500K と 1000K の等値面を Fig. 4 に半透明で表示する。容器は 500K の等値面で覆われており, 容器下部では 1000K 程度まで上昇している。同時に示す速度ベクトルの分布から, 火炎 (容器) 上部に上昇流が発生していることが確認でき, 定性的には問題がない結果と考えられる。

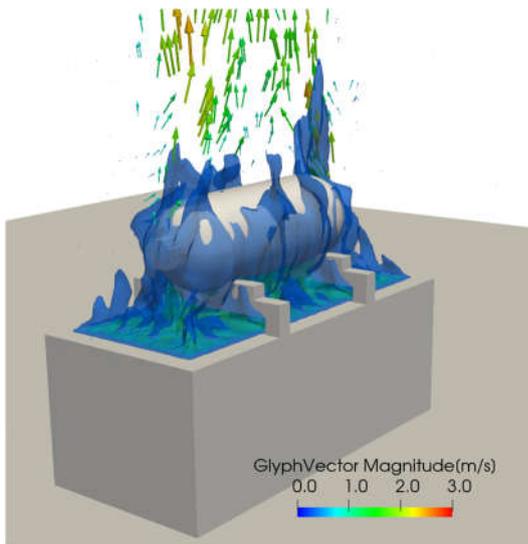


Fig. 4 Temperature contours and velocity vector distribution.

Fig. 5 に容器下の温度変化を示す。実験は K 型熱電対で測定した結果を示し, 数値シミュレーションはその熱電対を模擬したモデルにより得られた結果を示す。実測値の初期の温度上昇は 3 点で明確な差が現れているが, 120 秒以降は約 800°C の一定値を保持している。数値シミュレーションの初期の温度上昇は, 3 点で同様の傾向を示し, 実測値の F1 と同じ傾向である。温度上昇後, 中央の F2 は 700~800°C で推移しているが, 両端の F1 と F3 はやや低い 600°C 前後で推移している。容器の両端部付近で数値シミュレーションの温度が過小評価されているが, 中央部の F2 は概ね良好な結果が得られている。

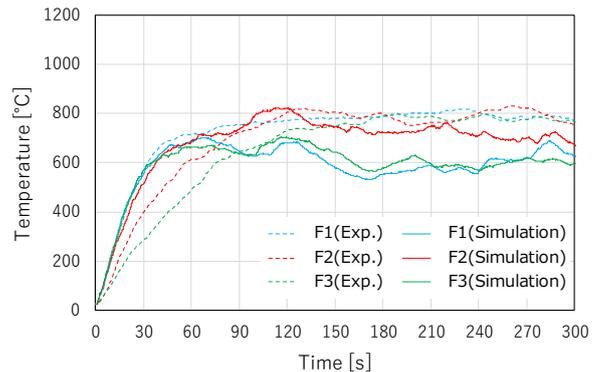


Fig. 5 Temperatures under the tank.

次に, 周囲の風の影響を検討するため, Fig. 6 に示されるように容器の軸方向 (W<sub>x</sub>) と横方向 (W<sub>y</sub>) の風速を加えた数値シミュレーションを実行する。初期条件では全体を速度 0 とし, どちらかの風速の境界条件を線形変化させて 10 秒で最大風速とする。以後, 最大風速を保持する。最大風速は, 0.50, 1.00, 2.25m/s として検討する。

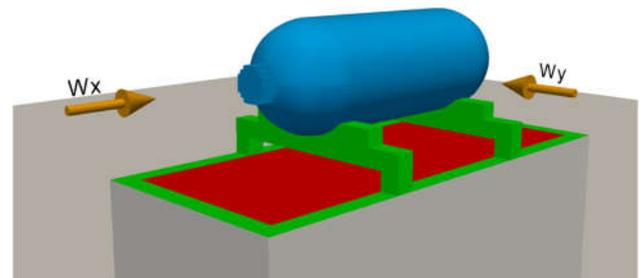


Fig. 6 Wind direction for the tank.

Fig. 7 と Fig. 8 に W<sub>x</sub> と W<sub>y</sub> の風の影響を受けた時の速度ベクトルと温度の等値面 (500K, 1000K) を示す。風速が 0.5m/s の場合でも, Fig. 4 と比較して等値面が大きく変形している。容器全体を火炎で炙ることが出来ず, 試験条件として風を考慮する必要がある。

風の影響を受けた時の容器下の中央部 (F2) の温度変化を Fig. 9 と Fig. 10 にそれぞれ示す。これらのグラフの実験値と風速 0 は, Fig. 5 の F2 の温度変化と同じである。風の条件を適用した境界が容器中央から 4m 離れているため, 最初は風速 0 の結果と同じであるが, 風の影響が F2 に到達すると, 徐々に風速 0 の結果から逸脱し, 温度上昇が抑制される。W<sub>x</sub> 方向の風速の影響を示す Fig. 9 では, 風速が 0.50m/s の場合, 60 秒付近で温度が大きく低下しているが, 安定した状態では約 400°C になっている。1.00m/s の時も

約 400°C である。2.25m/s の場合は、大きく風の影響を受けて 100°C 以下である。Wy 方向の風の影響は、Wx 方向の影響より顕著に現れており、すべての結果で 50°C 以下である。Wx 方向は、容器支持部が風の影響を抑制したと考えられる。

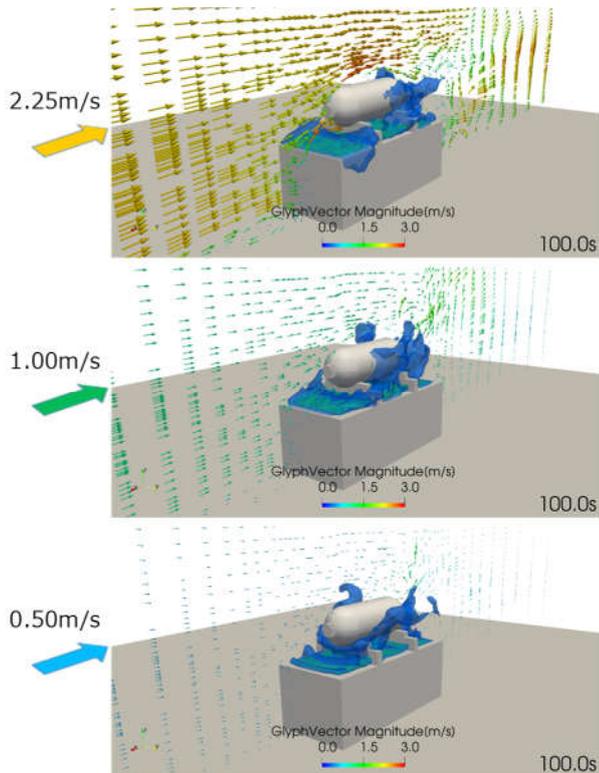


Fig. 7 Temperature contours and velocity vector distributions with wind, Wx

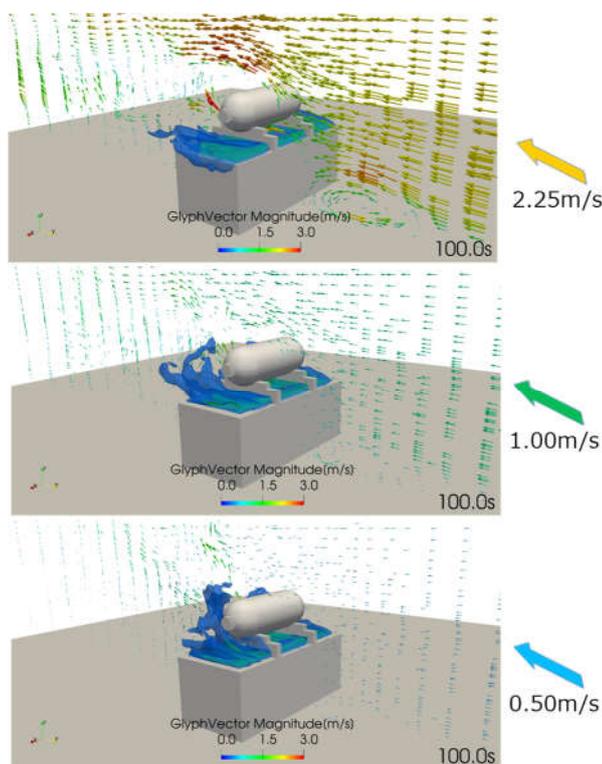


Fig. 8 Temperature contours and velocity vector distributions with wind, Wy.

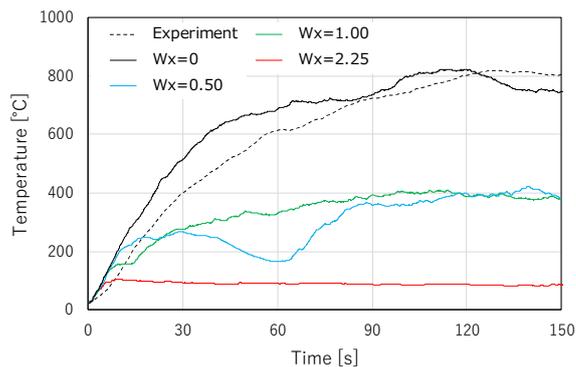


Fig. 9 Temperature profiles at F2 with wind, Wx.

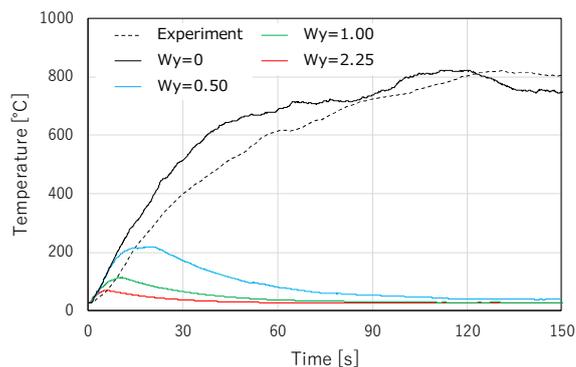


Fig. 10 Temperature profiles at F2 with wind, Wy.

#### 4. まとめ

FCVの高圧水素容器の火炎暴露試験の数値シミュレーションを実行した。同様の実験と比較するため、熱電対のモデル化により温度変化を模擬した。容器下の中央部の温度変化は、実験と比較して良好な結果が得られた。火炎暴露試験の条件を検討するにあたって、この数値シミュレーションは有益なツールになりえる。

火炎暴露試験時の風の影響を数値シミュレーションで検討したところ、0.50m/sの流速でも温度に大きく影響が現れた。試験条件として風を考慮する必要があることが確認できた。

今後は、容器の大きさやバーナーの大きさの関係や燃料の流量変化の影響などを調査し、再現性の高い試験条件を検討する必要がある。

#### 謝辞

本研究は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により実施した「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業/国際展開、国際標準化等に関する研究開発/燃料電池自動車の国際基準調和・国際標準化に関する研究開発」の成果の一部をまとめたものである。

数値シミュレーションの結果は、東京大学情報基盤センターの Reebush スーパーコンピュータシステムを利用して得られたものである。

#### 参考文献

- (1) J. Zheng, et al., International Journal of Hydrogen Energy, 35, 8191-8198 (2010)
- (2) J. Wen, and C. Wang, UKELG 50th Anniversary Discussion Meeting (2013)