

火炎暴露試験の数値シミュレーション

Numerical Simulation of a Bonfire Test

山田 英助 ^{*1}

Eisuke YAMADA

Abstract

Hydrogen is one of the possible alternative energy sources to replace fossil fuels in the transportation sector. 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, a thermal pressure relief device (TPRD) is attached to the tank. In order to investigate the safety aspect of the TPRD system, a bonfire test was carried out. In this study, turbulent flame generated by the bonfire test was simulated with OpenFOAM which is an open source code of computational fluid dynamics. The appropriate flame is estimated with infinitely-fast chemistry assumption model and Large-eddy simulation. It is expected that the fluid-structure interaction with conjugate heat transfer can be applied to bonfire test simulation.

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 (FCV) が次世代の自動車として注目されている。水素の単位体積あたりのエネルギー密度は著しく低いので、FCVでは水素を高圧にして専用の高圧水素容器に格納している。最大70 MPa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。

その一つに、火災時にFCVの容器が破裂しないことを確認する火炎暴露試験がある。この試験では、容器を火炎に晒して容器に付属する熱作動式安全弁 (TPRD) を作動させ、安全に容器内の水素が放出されて容器が破裂しないことを確認する。TPRDの作動に重要な温度上昇過程を把握するために実験および数値シミュレーションによる研究が実施されている¹⁾。TPRDの不作動を防止するためには、数値シミュレーションで温度上昇過程を事前に確認することが有効と考えられる。本研究では、様々な流体解析に対応可能で安価に利用で

きるオープンソースソフトウェアのOpenFOAMに注目し、火炎暴露試験に対して有効な数値シミュレーションツールになり得るかどうかの検討を行った。

2. 計算手法

FCVの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行った。このような一般的な火災現象を解析するオープンソースソフトウェアとして、Fire Dynamics Simulator (FDS) が開発されており、簡易的に火炎暴露試験の解析が可能である²⁾。しかしながら、FDSは直交格子の有限差分法をベースとしているので、容器の曲面形状を模擬することは難しい。

そこで本研究では、FDSでは扱えない曲面形状を模擬できるOpenFOAMを使用した。曲面で構成される現実的な容器に対する物理現象の解明が期待できる。

2.1 OpenFOAM

本解析に使用したOpenFOAMは、有限体積法をベースとした数値流体力学 (CFD) のオープン

*1 一般財団法人日本自動車研究所 FC・EV研究部 博士(工学)

ソースソフトウェアである。1989年に英国の Imperial College で開発が始まり、現在はCFDの実行に必要な豊富なツールで構成され、化学反応、乱流、混相流、熱伝導、電磁気などを含む複雑な流体現象の解析が可能となっている。

ライセンスはGNU General Public License version 3 (GPL v3) が適用されているので、誰でもOpenFOAMの複製・改変・頒布が自由であり、改変したソフトウェアにもGPL v3が適用される³⁾。従って、様々なOpenFOAMの派生版が存在する。現在開発が継続されている主流のものとして、OpenFOAM Foundationが開発しているOpenFOAMと、OpenCFD Ltd.が開発しているOpenFOAM+がある⁴⁾。今回は、OpenFOAM+の標準ソルバーのfireFoamを利用して計算を実行した。fireFoamは燃焼系のソルバーの一つで乱流拡散火炎の解析に適している。

2.2 計算モデル概要

OpenFOAMには、メッシュ作成に関する各種ツールも含まれている。ここでは、構造格子のメッシュ作成ツールのblockMeshを用いてFig. 1に示すように容器の三次元メッシュモデルを作成した。全体の計算領域は直方体で、一般的な形状（円筒の両端に半球）の容器の周囲に六面体の構造格子を作成した。容器の円筒と半球の直径は0.4 m、円筒部の軸長さは0.5 mである。下側境界面から容器の最下部が0.2 m離れる位置に容器を設置した。その容器が火炎に包まれるように、下側境界面の中央に燃料となるメタンの流入境界として 0.5×0.424 mの長方形領域を設定した。流入境界以外の下側境界面と容器壁面は滑りなしの断熱壁境界、計算領域の上側と側面は流出境界とした。

全体のセル数は380,800で、火炎が形成される容器周辺のメッシュが密になるようにしている。初期状態は大気圧で300 Kの静止空気に満たされた条件とし、計算開始とともに流入境界から0.01 m/sのメタンが流れるようにして火炎暴露試験の数値シミュレーションを実行した。

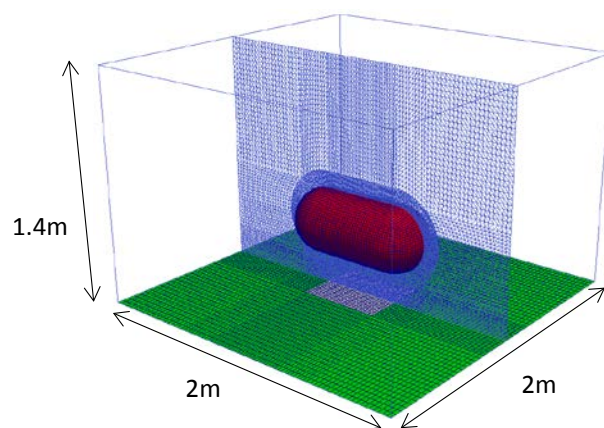


Fig. 1 Geometry of calculation domain.

2.3 燃焼モデル

燃焼モデルには、燃焼反応の素過程まで考慮する素反応モデル、火炎面を層流火炎片の集合とするflameletモデルなど様々なものが提案されている。解析対象と目的によって適切なものを選択する必要がある。

OpenFOAM+には燃焼系のソルバーとして、素反応まで考慮できるreactingFoam、レシプロエンジンの解析に適したengineFoamなどが開発されている。今回は火炎内部の詳細な化学反応を把握する必要がなく計算負荷の低減を考慮してfireFoamを利用した。このfireFoamは、化学反応が瞬時に完了するシンプルな仮定 (infinitely-fast chemistry assumption) に基づいた燃焼モデルのソルバーである⁵⁾。燃料と酸化剤の混合分率に基づいて燃焼後の各化学種の濃度を求めるため、計算負荷の高い化学反応速度を計算する必要がない。温度は混合気のエントルピーと化学種の濃度から求めるので計算負荷が小さく安定性が高いモデルである。火炎内部の詳細な構造まで扱う必要がない今回のような場合に適切なモデルである。

本計算では、燃料を CH_4 として、 O_2 、 N_2 、 CO_2 および H_2O の5個の化学種のみを対象とした。

2.4 乱流モデル

CFDの乱流モデルを大きく分けると、時間平均に基づくReynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) モデルと、小さい渦の影響をモデル化して大きい渦だけ直接解析するLarge-eddy

simulation (LES) モデルに分けられる。その他、運動量の保存則であるNavier-Stokes方程式をそのまま乱流モデルなしで小さい渦まで直接解析するDirect Numerical Simulation (DNS) モデルがある。

OpenFOAM+では、RANS, LES, DNSおよびRANS と LES を使い分ける Detached-eddy Simulation (DES) が利用可能である。RANS, LESおよびDESには、様々な派生モデルが提案されており、OpenFOAM+でも幾つかのモデルを利用できる。燃焼モデル同様に解析対象と目的によって適切なものを選択する必要がある。

今回は非定常計算であり、小さな渦構造を把握する必要がないため、LESの渦粘性モデル（1方程式）を使用した。

3. 結果

Fig. 2に十分に火炎が形成された時の容器の表面温度の分布と火炎の1000 Kと1500 Kの等値面を1秒間隔で示す。火炎が容器胴体部を包み込むように形成されている。容器上部は火炎から離れているので温度上昇は低い傾向にある。

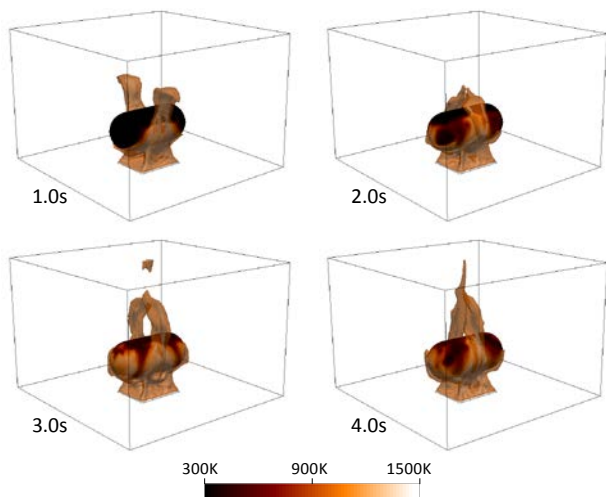


Fig. 2 Temperature distributions.

Fig. 3に示す容器表面の各点における温度変化をFig. 4に示す。まず容器の底の T_5 が1000 K超まで上昇し、容器の側面の T_2 と T_4 が上昇する。 T_2 と T_4 は T_5 より約100 K高い温度で推移している。

CH_4 が過濃である容器の底より O_2 との拡散混合が進行した側面で火炎温度が高くなっていると考えられる。

容器の両端の T_0 と T_1 も上昇しているが、温度変動が大きく不安定である。容器の上部の T_3 は上昇が緩やかであり、火炎の影響が少ないことが分かる。

ただし、容器表面の境界条件が断熱であり容器への熱伝達を考慮していないので、これらの温度は実際の容器表面温度より高いものと考えられる。

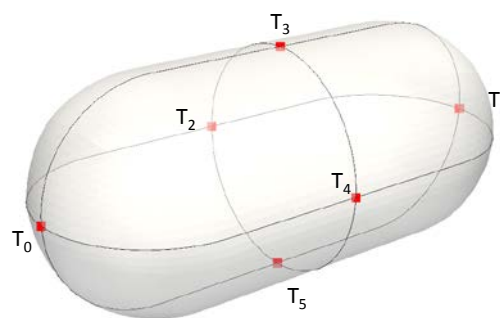


Fig. 3 Temperature measurement points.

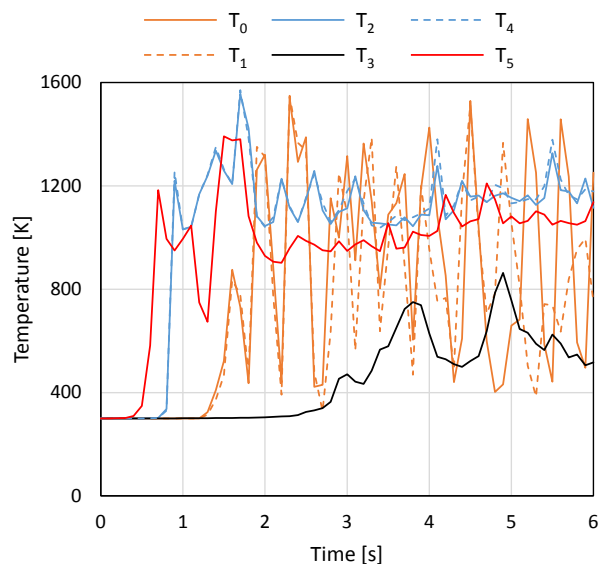


Fig. 4 Temperature change on the tank surface.

4. まとめ

OpenFOAMのfireFoamを用いて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。容器を包む火炎形成の模擬が可能であ

り, fireFoamの燃焼モデルは有効な手法と考えられる.

また, OpenFOAMでは固体と流体の熱伝達と固体内部の熱伝導の解析 (CHT: Conjugate Heat Transfer) が実行できるソルバーも開発されている⁷⁾. 今回は容器表面を断熱条件と仮定したが, CHTのソルバーとfireFoamを組み合わせることで, 火炎から容器への熱伝達と容器の熱伝導を考慮することが可能である. 今後の火炎暴露試験のモデル開発では, CHTのモデル導入が重要な課題である.

参考文献

- 1) Zheng, J. et al. : Experimental and numerical studies on the bonfire test of high-pressure hydrogen storage vessels, International Journal of Hydrogen Energy, 35, 8191-8198 (2010)
- 2) 山田英助: フリーソフトを活用した火災数値シミュレーション, JARI Research Journal, JRJ20150501 (2015)
- 3) GNU : <https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.en.html> (2017.4.25)
- 4) The OpenFOAM Foundation : <https://openfoam.org/> (2017.4.25)
- 5) OpenCFD Ltd. : <http://www.openfoam.com/> (2017.4.25)
- 6) Wang, Y. et al. : Large eddy simulation of fire plumes, Proceedings of the Combustion Institute, 33, 2473-2480 (2011)
- 7) Välikangas, T. : Conjugate heat transfer in OpenFOAM, Proceedings of CFD with OpenSource Software (2017)