

皮膚の三次元伝熱シミュレーションによる 熱傷評価モデルの開発

Development of a Burn Evaluation Model with 3D Heat Transfer Simulation of Tissue

山田 英助*¹

Eisuke YAMADA

Abstract

Although the number of vehicle fires is decreasing in Japan, safety assessments for the human body are required in the case of combustion of storage batteries and high pressure hydrogen jet flames, which are new cases with the spread of electric vehicles. Therefore, the Japan Automobile Research Institute (JARI) conducts various fire and explosion experiments by simulating vehicle fires. In these experiments, as it is difficult to directly observe the effects on the human body, an evaluation model for burn damage by numerical simulation has been developed. In this paper, a three-dimensional numerical simulation using OpenFOAM is carried out to evaluate burn injuries caused by flames. Reacting flow and thermal conduction in three layers of human tissue are simulated. The heat generated by flames gradually transfers to the inside of the tissue. It is found that OpenFOAM has the ability to simulate the progress of burn injuries.

1. まえがき

日本における年間の交通事故の件数は、Fig. 1に示すように自動車保有台数の増加とともに増加して2000年頃にピークがある。車両の安全性の向上、道路整備、罰則強化などによって近年は減少傾向にあり、車両火災も同様に減少傾向である。

日本における火災件数も減少傾向で、2018年の総出火件数は37,981件であった⁴⁾。そのうち車両火災は3,660件で建物火災の次に多く、一日平均10件程度の車両火災が発生している。車両火災の出火原因としては、排気管によるものが627件で最も多く、交通機関内配線が353件、電気機器が214件と続く。交通機関内配線と電気機器は、短絡とスパークが主な発火源である。2008年の主な出火原因は、排気管の他に放火やタバコなどが上位を占めており、電気関係は少ない。近年は車両の電動化が進められており、出火原因として電気関係の割合が増加していると考えられる。

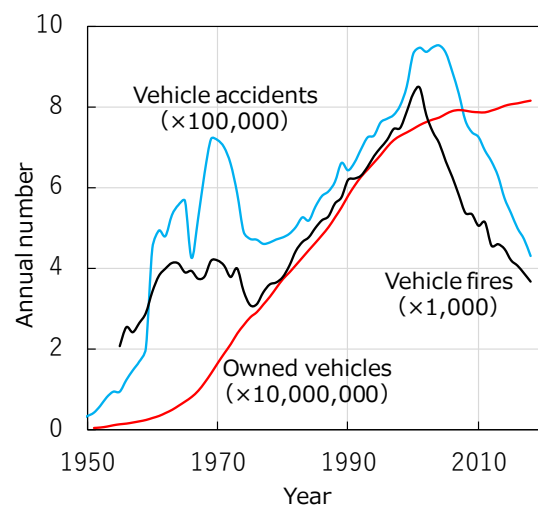


Fig. 1 Annual number of vehicle fires, accidents, and owned vehicles.^{1)~3)}

また、車両の軽量化に伴う新規材料の影響、電動車両(EV, FCV)の普及による蓄電池等の燃焼や高圧水素噴流火炎などに対する人体への安全性評価が、新しく求められている。そこで、一般財団法人日本

*1 一般財団法人日本自動車研究所 電動モビリティ研究部
博士(工学)

自動車研究所(JARI)の水素・燃料電池自動車安全評価試験設備(Hy-SEF)では、車両火災を模擬した様々な火災・爆発実験を実施して周囲の安全性を検討している。

実験では、人体への影響を直接観測することは困難であるので、温度や熱流束等の計測値から間接的に評価する必要がある。熱の影響は、測定した熱流束をEisenbergらによる単純化された式⁵⁾に適用することで評価可能である。しかしながら、この式では表皮のみの軽い損傷の熱傷(火傷)しか評価ができない欠点がある。そこで、より深い皮膚層に達する重度の熱傷までを対象とする熱傷評価の数値シミュレーションモデルの開発を行っている。これまで、ISO13506に示されている熱傷の評価手法(Henriquesモデル)と、皮膚のような薄い層状物質への短時間の熱作用に適していると考えられるNon-Fourier系の熱伝導モデルをベースとして、皮膚の熱傷評価の数値モデルを開発した⁶⁾。

しかしながら、この計算モデルでは皮膚の深さ方向の一次元で評価しているため、体表面全体の何%が熱傷に至るのかといった評価が出来ない。熱傷が広範囲に及ぶと死に至ることもあるため、熱傷の範囲を評価することも重要である。そこで、本研究では、熱傷の範囲を評価するため三次元の皮膚モデルの開発を行う。また、固体である皮膚の熱伝導だけでなく、化学反応を含む熱流体からの熱伝達も模擬できるように、熱流体と固体熱伝導の連成解析を試みた。

2. 計算モデル

一次元の固体熱伝導シミュレーションは、扱う変数も少なくソフトウェアとして簡単であるため、独自に作成した。しかしながら、化学反応を含む流体と固体熱伝導を三次元で解析するソフトウェアを作成するには多くの時間を必要とする。そこで、ベースとなるソフトウェアとしてOpenFOAM⁷⁾を利用する。

OpenFOAMは、数値流体力学(CFD)に関連する豊富なツールで構成されたオープンソースソフトウェアであり、ユーザが自由に改変可能である。化学反応や固体熱伝導のソルバーもあり、組み合わせることで今回のような問題にも適用可能である。

燃焼反応を含む流体と固体熱伝導の連成解析が可能なソルバーのmultiRegionReactingFoam⁸⁾がOpenFOAMベースで開発されている。これはOpenFOAMの標準ソルバーであるreactingFoam(化学反応性流体解析ソルバー)をベースに固体熱伝導も扱えるようにしたソルバーである。

ここでは、multiRegionReactingFoamを用いて火炎が形成される領域を流体、熱が伝わる皮膚の領域を固体として連成解析する。熱傷範囲評価の可能性の検討を行うため、火炎が瞬間的に皮膚に作用する簡単なモデルとする。解析領域の概要をFig. 2に示す。皮膚は一般的な3層構造(表皮、真皮、皮下組織)とし、文献^{9), 10)}を参考にして各層の厚さと物性値を与える(Table 1)。流体領域の下側境界面中央部に燃料の流入境界を設置して表皮に向けて火炎を形成させる。実際の車両火災では様々な物質が燃焼し複雑な現象となるが、ここでは火炎から固体の皮膚への熱伝達の現象を模擬することが目的のため、簡易的に燃料としてプロパンを選択する。プロパンは1.0m/sで皮膚に向けて噴出し、速度を線形で減少させて1秒後に停止することで瞬間的な火炎を形成した。火炎は皮膚表面に衝突し、火炎により生成された熱が、皮膚表面から内部へと伝わることになる。プロパンの燃焼反応は、Wenらの総括反応モデルを適用する¹¹⁾。初期の流体領域は温度15°Cの空気の混合気とし、固体の皮膚の温度を36°Cとした。

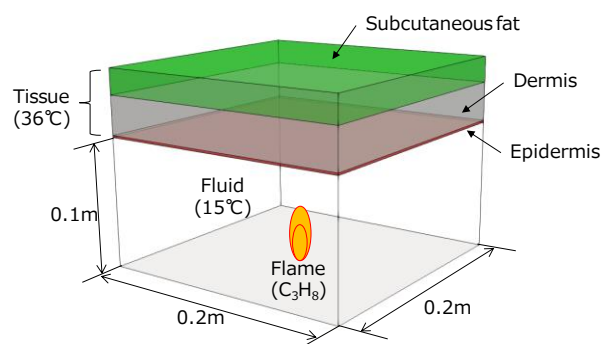


Fig. 2 Simulation model

Table 1 Properties of tissue

	Epidermis	Dermis	Subcutaneous fat
Thickness [mm]	0.08	1.5	10
Density [kg/m ³]	1190	1111	971
Specific heat [J/(kg K)]	3600	3300	2700
Conductivity [W/(m K)]	0.255	0.523	0.167

3. 結果

流体領域の噴流の軸を含む断面の温度分布を Fig. 3 に示す。下部から噴出したプロパンの噴流火炎が軸対称に形成され、上部の皮膚表面に衝突している様子が示されている。1.0 秒後にはプロパンの供給が無くなるため、消炎した影響が模擬できている。Fig. 3 と同時刻の皮膚の断面の温度分布を Fig. 4 に示す。下部が皮膚表面、上側が皮膚内部で、縦方向(深さ方向)を 20 倍拡大して表示している。中央部から温度が上昇しはじめ、周辺に広がっている。消炎後も皮膚内部への伝熱は進行しており、熱傷に至ることが推測される。

流体と構造の皮膚の間で熱移動が行われたことを模擬しており、multiRegionReactingFoam による三次元解析が、熱傷の範囲を評価する手法として利用可能と考えられる。

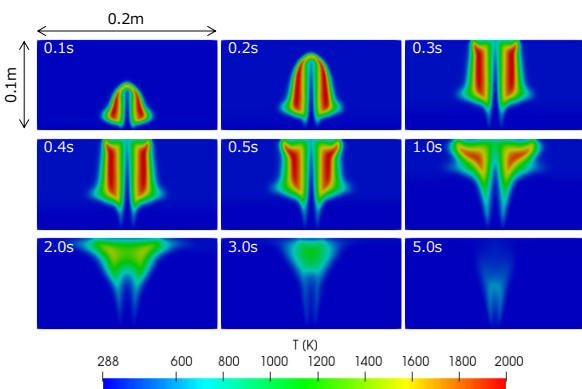


Fig. 3 Temperature in the fluid region

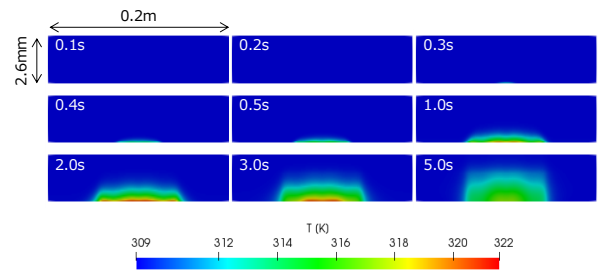


Fig. 4 Temperature in the tissue

一方、一般的な熱傷の評価は、式(1)に示す Henriques モデルで判断される。このモデルは Arrhenius 型で、 A は頻度因子、 ΔE は活性化エネルギー、 R は気体定数、 T は温度である。損傷の指標の Ω は、温度が $44^{\circ}\text{C}(317.15\text{K})$ を超えてからの時間積分として評価する。Fig. 4 では、 317.15K を超えた領域が皮膚表面近傍で確認できるので、熱傷に至った可能性が高い。今回は式(1)の Henriques モデルを計算に導入していないが、OpenFOAM はオープンソースであるので、このモデルの導入は可能である。

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} = A \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) \quad (1)$$

4. まとめ

OpenFOAM の multiRegionReactingFoam により、燃焼反応を含む三次元の熱流体と固体熱伝導の連成解析を行った。解析結果として火炎からの熱が、3層構造の皮膚内部へ伝わる様子が示された。このモデルでは燃焼反応を解析できるため、車両火災などの現象を模擬することで、より現実的な熱傷の評価が可能である。

今後は、実験等と比較することでモデルの精度を検証する必要があるが、オープンソースであるため、熱傷の評価モデルの導入や熱伝導方程式の改良なども可能であり、熱傷の範囲を評価する手法として十分利用できると思われる。

参考文献

- 1) 警察庁, 統計表 年報 : <http://www.npa.go.jp/publication/s/statistics/koutsuu/toukeihyo.html>(2019.10.30)
- 2) 一般財団法人自動車検査登録情報協会, 統計情報 : <http://www.jvci.co.jp/>

-
- s://www.airia.or.jp/publish/statistics/number.html(2019.10.30)
- 3) 総務省消防庁, 消防白書 : <https://www.fdma.go.jp/publication/>(2019.10.30)
 - 4) 総務省消防庁, 消防統計 : <https://www.fdma.go.jp/press-release/statistics/>(2019.10.30)
 - 5) Eisenberg, N.A., Lynch, C.J., and Breeding, R.J.: Vulnerability model. a simulation system for assessing damage resulting from marine spills, AD-A015-245, National Technical Information Service, p.92-94 (1975).
 - 6) 山田英助, 火傷評価モデルの開発, JARI Research Journal, JRJ20180605(2018)
 - 7) OpenCFD Ltd. : <http://www.openfoam.com/> (2019.10.30)
 - 8) TonkomoLLC/multiRegionReactingFoam, <https://github.com/TonkomoLLC/multiRegionReactingFoam/>(2019.10.30)
 - 9) ISO13506, Protective clothing against heat and flame, p.20 (2008)
 - 10)I. M. Cârstea, and I. Cârstea, Computational aspects in numerical simulation of skin tissues, Proceedings of the 3rd WSEAS Int. Conference on FINITE DIFFERENCES - FINITE ELEMENTS - FINITE VOLUMES - BOUNDARY ELEMENTS, p.34-40 (2000)
 - 11)J. Wen, and C. Wang, A new single step reaction model for propane explosions covering the entire spectrum of flame acceleration, transition to detonation and detonation, UKELG 50th Anniversary Discussion Meeting (2013) : <http://ukelg.ps.ic.ac.uk/UKELG50a.htm>(2019.11.5)