

三次元皮膚モデルによる火傷の数値シミュレーション

山田英助^{1†}

¹ 一般財団法人 日本自動車研究所

Numerical Simulation of Burn Using 3D Skin Model

Eisuke YAMADA^{*†}

^{*}Japan Automobile Research Institute

Abstract

A three-dimensional numerical simulation using OpenFOAM is carried out to evaluate burn injuries caused by flame. Reacting flow and thermal conduction in three layers of human skin are simulated. The heat generated by flame gradually transfers to the inside of the skin. It is found that OpenFOAM has an ability to simulate the progress of burn injury.

Keywords: Burn, Fluid-structure interaction, OpenFOAM

1. はじめに

総務省消防庁によると 2017 年の総出火件数は、39,373 件であった。そのうち車両火災（自動車車両、鉄道車両及び被けん引車又はこれらの積載物が焼損した火災）は、3,863 件で建物火災の次に多い。一日平均 10 件以上の車両火災が発生している。火災車両の周辺は高温になるので、人体への熱的影響を評価することが重要である。また、2014 年 12 月より発売が開始された高圧水素を搭載した燃料電池車（FCV）では、車両火災時に瞬間的な水素噴流火災が形成されることから、その事象に適応した評価も新しく必要となっている。

一般財団法人日本自動車研究所では、車両火災を模擬した実験により安全性の検討を行っている。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。そこで、これらの計測値から数値シミュレーションによって熱的影響の火傷を評価する計算モデルの開発を行った[1]。この計算モデルでは、一般的な火傷の重症度（1～3 度）の評価が可能となっている。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%が火傷を負うのかといった評価が出来ない。火傷が広範囲に及ぶと死に至ることもあるため、火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、火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った。流体構造連成解析により火災の熱が皮膚内部へ伝わる状況を模擬し、火傷の範囲を評価する手法として利用可能かどうかの検討を行った。

2. 計算モデル

火災が形成される領域を流体、熱が伝わる領域を個体として連成解析を行った。燃焼反応を含む流体構造連成解析が可能なソルバーの multiRegionReactingFoam[2]を OpenFOAM v1806 により実行した。

解析領域の概要を Fig. 1 に示す。ここでは、火傷の範囲を評価する手法としての利用可能性の検討を行うため、火災が瞬間的に皮膚に作用する簡単なモデルとする。皮膚の反対側の流体領域の境界面中央部にプロパンの流入境界を設置し、逆側の皮膚表面に向けて火災を形成させる。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 秒後に停止するようにして瞬間的な火災を形成した。火災は皮膚表面に衝突し、火災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[3]。個体領域の皮膚は、外側から表皮、真皮および皮下組織の一般的な 3 層構造とし、文献[4][5]を参考にして各層の厚

[†] E-mail address of corresponding author: eyamada@jari.or.jp

さと物性値を与えた (Table 1). 皮膚の部位や性別年齢等によって厚さや物性値は異なるが, ここでは標準的な値を使用して評価する. 初期の流体領域は温度 15℃の空気の混合気とし, 皮膚全体は温度を 36℃とした.

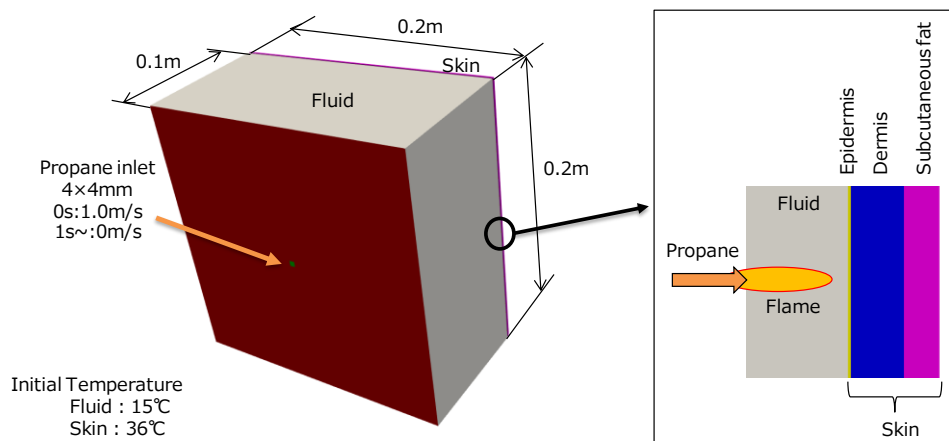


Fig. 1 Simulation model

	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

Table 1 Properties of skin

3. 結果

流体領域の噴流の軸を含む断面の温度分布を Fig. 2 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り, 消炎している. Fig. 2 と同時刻の皮膚の断面の温度分布を Fig. 3 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 10 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, 火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, 火傷の範囲を評価する手法として利用可能と考えられる. multiRegionReactingFoam 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, より現実的な火傷の評価が可能である.

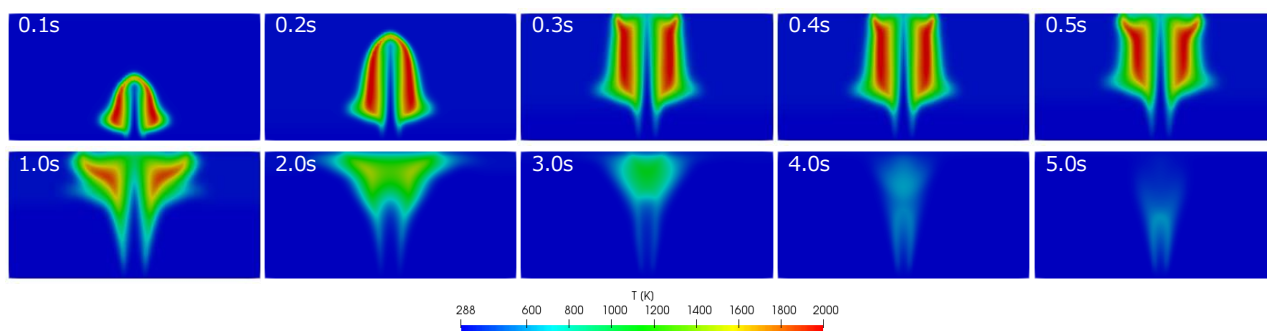


Fig. 2 Temperature in the fluid region

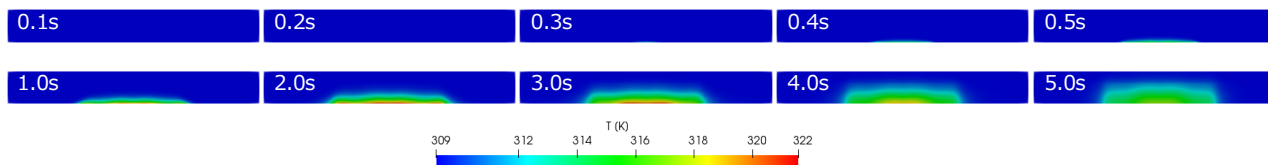


Fig. 3 Temperature in the skin

一方、一般的な火傷の評価は、式(1)の Arrhenius 型の評価モデルで判断される[4]. Ω が損傷の指標であり、 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. Ω は $T > 273.15 + 44$ Kの時の積分値で評価する. Fig. 3 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、火傷に至った可能性が高い. 今回は式(1)の評価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.

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

また、皮膚のような不均一な物性値の構造体に対して、短時間に大量の熱が発生するフラッシュファイアのような温度変化の激しい現象は、Fourier の法則での再現が難しいと考えられている[6][7]. Fourier の法則では熱の伝播速度が無限大になることが原因と考えられている. そこで、熱の伝播速度を有限とするため、Fourier の法則を修正したモデル化が行われている. 式(2)のように熱緩和時間 τ を用いて熱の伝播速度を有限とする熱伝導方程式のモデルなどが提案されている. ρ は密度、 c は比熱、 T は温度、 t は時間、 κ は熱伝導率で、 τ によって熱の伝播が緩和されることになる. なお、 $\tau = 0$ の時は Fourier の法則を適用した式になる. 今後、このようなモデル式の改良を検討する時、オープンソースは非常に有利である.

$$\rho c \left(\tau \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{\partial T}{\partial t} \right) = \kappa \nabla^2 T \quad (2)$$

4. まとめ

multiRegionReactingFoam により、燃焼反応を含む三次元の流体構造連成解析を行った. 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. 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、より現実的な火傷の評価が可能である.

また、オープンソースであるため、火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、火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] 山田英助, 火傷評価モデルの開発, JARI Research Journal, 40, 6 (2018)
- [2] TonkomoLLC/multiRegionReactingFoam, <https://github.com/TonkomoLLC/multiRegionReactingFoam>, (accessed 2018-11-07).
- [3] J. Wen, and C. Wang, UKELG 50th Anniversary Discussion Meeting (2013)
- [4] ISO13506, Protective clothing against heat and flame
- [5] 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 (2000)
- [6] Ye, H., and De, S.: Thermal injury of skin and subcutaneous tissues: A review of experimental approaches and numerical models, Burns, 43, 909-932 (2017)
- [7] Xu, F., Seffen, K.A., and Lu, T.J.: Non-Fourier analysis of skin biothermomechanics, Int. J. Heat and Mass Transfer, 51, 2237-2259 (2008)