

林野火災解析法の構築を目的とした境界条件と解析領域の検討

日本大学 学生員 〇斎藤 友也
日本大学 正会員 長谷部 寛
日本大学 フェロー会員 野村 卓史

1. はじめに

日本では、毎年 1700 件以上の林野火災が発生し、焼失面積は約千ヘクタール、損害額は 4.8 億円にも上る。そのため、被害軽減を目的とした数値解析による林野火災予測シミュレーションシステムが存在する¹⁾。しかし、局所的な地形の起伏の影響や対流風の影響を十分に考慮したものとは言い難い。

本論文では、気流解析と木材燃焼の方程式をそれぞれ解く連成解析に基づく林野火災解析法の構築を目指し、境界条件や解析領域について検討した。

2. 有限要素法流れ解析による林野火災の解析

2.1 数値解析法

流れ解析の基礎方程式に、連続条件式、Boussinesq 近似を用いた Navier-Stokes 方程式、エネルギー方程式を用いた。

連続条件式：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

運動方程式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - g_i \beta (T_g - T_0) \end{aligned} \quad (2)$$

エネルギー方程式：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u_j \frac{\partial h}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_t \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S_r - Q_c - Q_r \quad (3)$$

ここで、 u_i は流速、 p は圧力、 T は温度、 ρ は空気の数密度、 g は重力、 $h(=C_p T)$ はエンタルピー、 C_p は比熱、 S_r はガス生成に伴う発熱量、 Q_c は対流熱伝達、 Q_r は放射熱伝達、 k は乱流熱伝率、 ν は動粘性係数である。

本論文では、有限要素法(SUPG/PSPG 法)により空間の離散化を行った²⁾。連立 1 次方程式の解法は、GMRES 法を用いた。時間積分法は、Crank-Nicolson 法を適用した。

また、木材燃焼過程は Morvan のモデル³⁾を用い、木材の温度は以下の方程式を解いて求めた⁴⁾。

$$m_s C_p \frac{dT_s}{dt} = D_m + Q_c + Q_r \quad (4)$$

$$D_m = -L_{H_2O} \omega_{H_2O} - L_p \omega_p - \alpha_{sg} L_c \omega_c \quad (5)$$

$$Q_c = h_c \alpha_s \sigma_s (T_g - T_s) \quad (6)$$

$$Q_r = \alpha_s \frac{\sigma_s \sigma_s}{4} (4\sigma T_g^4 - 4\sigma T_s^4) \quad (7)$$

T_s : 木材の温度 m_s : 木材の質量 α_s : 木材の充填率
 T_g : 気体の温度 $\sigma_s = 4550 [\text{m}^{-1}]$ $\alpha_{sg} = 0.5$
 D_m : 木材の反応に関する生成熱
 $C_p = 1300 [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$, ω_{H_2O} : 水分の反応速度
 ω_p : 乾燥木材の反応速度, ω_c : 炭化木材の反応速度
 $L_{H_2O} = 2.26 \times 10^6 [\text{J}/\text{kg}]$ $L_p = 4.18 \times 10^2 [\text{J}/\text{kg}]$
 $L_c = -1.2 \times 10^7 [\text{J}/\text{kg}]$ $h_c = 100 [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$
 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$
: ステファンボルツマン定数

2.2 解析領域

図-1 に示すような高さ 0.1cm, 幅 0.1cm, 20×20 の要素数 400, 節点数 441 の解析領域の底部中央に厚さ 0.05cm の木材が置かれている状況を想定する。底部を固定境界とし、底部以外の 3 辺には、流れ、温度ともにトラクションフリーの条件を与えた。底部中央の木材には $\dot{Q} = 79.5 (\text{KJ}/\text{s})$ の熱量を与え、木材燃焼の基礎方程式の右辺に組み込み、周辺の流れの変化を解析した。時間積分間隔 0.01s で計算した。

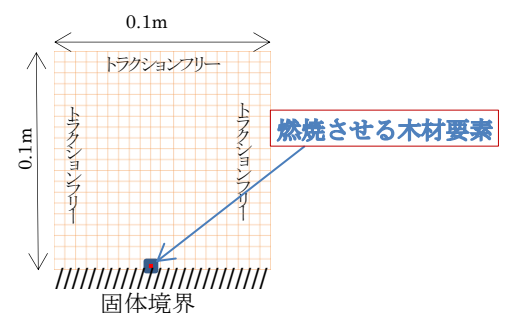


図-1 解析領域

2.3 解析結果

解析開始 159 秒後の流速ベクトル図を図-2 に、温度分布図を図-3 に示す。この後、解析は発散した。流速ベクトル図から、上部境界上に領域外側から内側へ流入する強い流れが発生することで、発散したと考えられる。

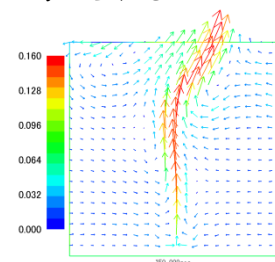


図-2 流速ベクトル図

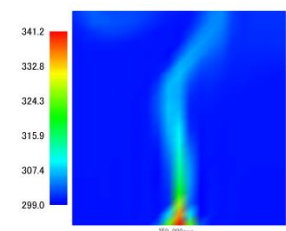


図-3 温度分布図

Key Words: 林野火災, 有限要素法, 境界条件

連絡先: 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14

3. 上方境界の境界条件の検討

3 辺トラクションフリーの解析では、領域外側からの強い流入する流れにより発散したことから、上方境界の節点流速の V 成分が大きな負値になると発散すると考え、上方境界上節点の流速 V が負値となった時、強制的に $V=0$ に修正する境界条件で解析を行った。

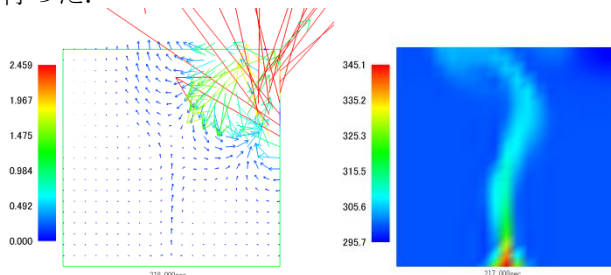


図-4 流速ベクトル図

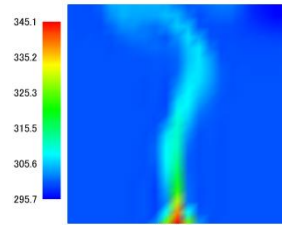


図-5 温度分布図

上方境界の境界条件を修正した解析の流速ベクトル図を図-4、温度分布図を図-5に示す。3 辺トラクションフリーの解析より長く 218 秒まで計算可能になったが、側方境界からの強い内向きの流れにより発散した。

4. 解析領域の検討

側方からの強い流入を回避するため、図-6に示すように解析領域の幅を 0.3m へと広げ、要素数 1200、節点数 1271 のメッシュで解析した。それ以外の条件は変更せず、3 節で用いた上方境界条件を適用し解析を行った。

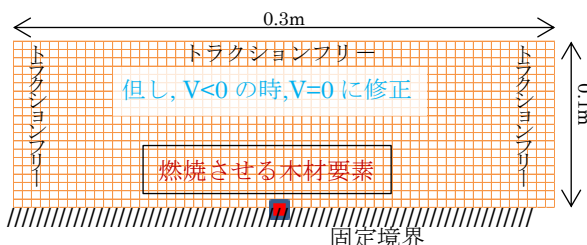


図-6 新たな解析領域

図-7 と図-8 には新たな解析領域を用いて解析した結果の流速ベクトル図と温度分布図を示す。ここでは、1000 秒の図を示したが、さらに解析を進めることができ、発散を回避できた。

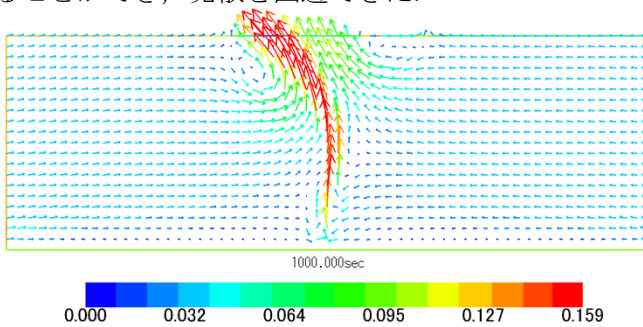


図-7 流速ベクトル図(1000 秒時点)

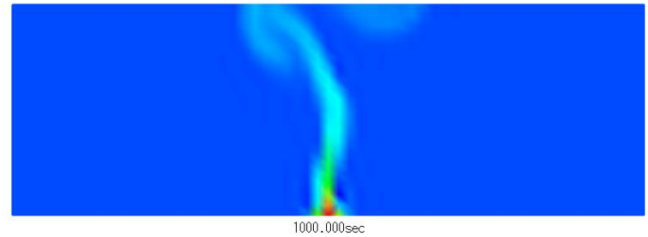


図-8 温度分布図(1000 秒時点)

図-9 には木材の温度変化の関係を示す。上方の境界条件を検討したケースは、温度上昇に伴い発散するのに対し、解析領域のサイズを検討したケースでは、400 秒付近まで温度上昇した。ただし、それ以降ほぼ一定の温度で推移した。これは、木材に加えた熱量が小さいためと考えている。

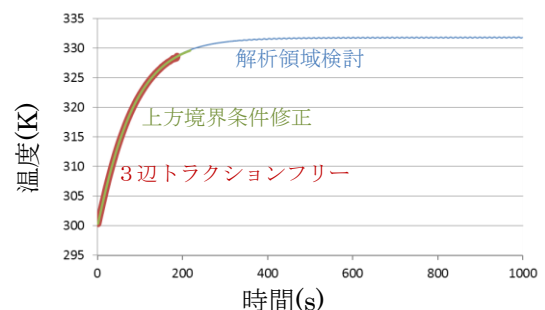


図-9 木材の温度変化

5. おわりに

本研究は、林野火災解析法の構築を目指し、境界条件や解析領域サイズを検討した。領域外側から内側へ流入する強い流れにより生じた解析の発散は、ある程度広い解析領域を確保し、上部境界での負の流速を強制的にゼロに修正する方法を用いることで発散が回避できた。今後の課題は、木材に加える熱量を増加させ、高温状態の解析を実現させることである。

参考文献

- 1) 菅沼秀樹, 安部征雄, 吉武孝:「林野火災応急シミュレーション」モデルの検証, 日林誌, 86, pp. 337-348, 2004
- 2) 日本計算工学会流れの有限要素法研究委員会: 続・有限要素法による流れのシミュレーション, シュプリンガー・ジャパン, 2008
- 3) D. Morvan and J. L. Dupuy : Modeling of Fire Spread Through a Forest Fuel Bed Using a Multiphase Formulation, Combustion and Flame, vol.127, pp. 1981-1994, 2001
- 4) 長谷部寛, 新井望, 野村卓史 : 気流と木材燃焼の連成解析に基づく林野火災シミュレーション法の構築, 日本風工学会誌, 127, pp. 201-202, 2011