

## 林野火災解析に用いる木材燃焼モデルの延焼速度評価

日本大学 学生会員 ○大木薫仁 日本大学 正会員 長谷部寛

## 1. はじめに

風は火災の延焼速度を増幅させるため、例えば林野火災が発生した際に強風が吹くと大きな被害が急激に拡大する<sup>1)</sup>。そこで本研究では森林における局所的な地形の起伏や、風況の変化を考慮出来るよう、林野火災予測のためのシミュレーション法を構築している<sup>2)</sup>。これまでの研究では単一の木材要素を配置した燃焼解析であったが、多数の木材要素を配置した解析をすることで、実際の林野火災のような延焼予測を再現出来ると考えられる。そのため本研究では多数の木材要素を配置した延焼解析を行い、解析法に用いられる木材燃焼モデルを延焼速度を評価することにより検証する。さらに放射熱の扱いは空気間、空気と木材間で伝達すると扱われていたが、新しく木材間の放射効果を加える解析を行い、延焼速度の解析値と小林らによって行われた延焼実験での実験値<sup>3)</sup>を比較し、解析における放射効果を検討する。

## 2. 解析手法

本研究で用いる解析手法は気流解析と木材燃焼解析をそれぞれ解く連成解析法である。

## (1) 気流の支配方程式

気流の解析手法は低マッハ数近似を適用した圧縮性流体方程式をVMS有限要素法により離散化したものである<sup>4)</sup>。

## 連続条件式

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

## 運動方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + g_i(\rho - \rho_0) + \rho f_i \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

## エネルギー方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j C_p T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S_r \quad (4)$$

## 状態方程式

$$p^0 = \rho T \quad (5)$$

$f$ は外力、 $\sigma_{ij}$ は応力テンソル、 $g_i$ は重力加速度、 $\rho_0$ は初期の空気密度、 $p$ は流体力学的圧力、 $\mu$ は粘性係数、 $k$ は熱伝導率、 $S_r$ は外部の熱量、 $p^0$ は熱力学的圧力である。

## (2) 木材燃焼の基礎方程式

ここで用いる木材燃焼の解析にはMorvanらのモデルを改良して用いた<sup>5)</sup>。木材の温度は以下の微分方程式から求められる。

$$m_s C_{ps} \frac{dT_s}{dt} = D_m + Q_c + Q_r + \bar{Q} \quad (6)$$

$$D_m = -L_{H_2O} \omega_{H_2O} - L_p \omega_p - \alpha_{sg} L_c \omega_c \quad (7)$$

$$Q_c = h_c \alpha_s \sigma_s (T_g - T_s) \quad (8)$$

$$Q_r = Q_{r1} + Q_{r2} \quad (9)$$

$$Q_{r1} = \alpha_s \frac{\alpha_s \sigma_s}{4} (4\sigma T_g^4 - 4\sigma T_s^4) \quad (10)$$

$$Q_{r2} = \alpha_s \frac{\alpha_s \sigma_s}{4} (4\sigma T_s^4 - 4\sigma T_{s,d}^4) \quad (11)$$

ここで $T_s$ は木材の温度であり、時間積分項 $dT_s/dt$ は差分近似して解き進める。木材温度の微分方程式の右辺の $D_m$ は木材の化学反応に伴い生成される熱量、 $Q_c$ 、 $Q_r$ 、はそれぞれ対流熱伝達、放射熱伝達であり、 $\bar{Q}$ は木材を燃焼させるために本研究で追加した強制的に加える熱量である。木材間の放射熱は解析対象の木材要素が一つ目以降の場合に全体の熱量に加えられるものとして、簡易的に表す。 $Q_{r1}$ は木材と周辺空気間、 $Q_{r2}$ は隣接木材間の放射熱伝達である。今回、 $Q_{r1}$ のみ $Q_{r1}$ と $Q_{r2}$ の両方を考慮した解析を行い、比較検証した。また、 $m_s$ は木材の質量、 $\alpha_s$ は木材の充填率、 $D_m$ は木材の反応に対する生成熱、 $C_{ps}$ は木材の比熱(=1300[J/(kg·K)])、 $\omega_{H_2O}$ は水分の反応速度、 $\omega_p$ は乾燥木材の反応速度、 $\omega_c$ は炭化木材の反応速度、 $T_g$ は空気の温度、 $T_{s,d}$ は下流側の木材の温度である。モデルパラメータとして、 $L_{H_2O} = 2.26 \times 10^6$ [J/kg]、 $L_p = 4.18 \times 10^2$ [J/kg]、 $L_c = -1.2 \times 10^7$ [J/kg]、 $\alpha_{sg} = 0.5$ 、 $h_c = 100$ [W/(m<sup>2</sup>·K)]、 $\sigma$ はステファンボルツマン定数(=5.67×10<sup>-8</sup>[W/(m<sup>2</sup>·K)])とした。木材燃焼プロセスの各段階での反応速度はアレニウスの法則に基づき次式のようにモデル化される。

$$\omega_{H_2O} = \alpha_s \rho_s Y_{H_2O} k_{H_2O} T_s^{1/2} \exp(-E_{H_2O}/RT_s) \quad (12)$$

ここで、 $u_i$ は流速、 $\rho$ は空気密度、 $T$ は温度、 $C_p$ は比熱、

キーワード 延焼解析、放射効果、延焼速度、前進差分法、後退差分法

連絡先 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14

$$\omega_p = \alpha_s \rho_s Y_p k_p \exp(-E_p/RT_s) \quad (13)$$

$$\omega_c = \frac{1}{\nu_{O_2}} \alpha_g \rho_g Y_{O_2} k_c T_s^{\frac{1}{2}} \exp(-E_c/RT_s) \sigma_s \quad (14)$$

ここで、 $\rho_s$ は木材の密度、 $Y_{H_2O}$ は湿潤木材の質量分率、 $Y_p$ は乾燥木材の質量分率、 $\alpha_g$ は空気の充填率、 $\rho_g$ は空気の密度である。モデルパラメータとして、 $k_{H_2O} = 6.05 \times 10^5 [K^{1/2}/s]$ 、 $E_{H_2O}/R = 5956 [K]$ 、 $k_p = 3.64 \times 10^4 [1/s]$ 、 $E_p/R = 7250 [K]$ 、 $k_c = 4.30 \times 10^2 [K^{1/2}/s]$ 、 $E_c/R = 9000 [K]$ 、 $\sigma_s = 4550$ 、 $Y_{O_2} = 0.2$ とした。

### 3. 解析条件および解析結果

図1に示すように1要素あたり幅、高さ0.01mの木材要素を60要素並べた1次元空間を対象に延焼解析を行う。境界条件は左端の要素に $\tilde{Q} = 7.94 [MJ/s]$ の熱量を加え、木材を加熱する。また、1次元的な延焼を表現するため、解析領域に一樣に風速0.01m/sを与えた。

延焼速度の評価方法は、木材の発火温度である500K(226.85℃)に達した時刻を基準とし、500Kに達した要素までの距離を燃焼時間で除して算出する。木材間の放射効果を考慮しないケース( $Q_{r1}$ のみ)と考慮するケース( $Q_{r1}$ と $Q_{r2}$ を考慮)の解析結果を図2、図3に示す。図2、図3に示すように左端の木材に熱を加えることで隣の木材へと熱が伝わっていることが分かる。改良前は解析開始200s後に0.02mまで500Kに達した。改良後は0.16mまで500Kに達し、約8倍の延焼速度増加となった。したがって、解析において木材間の放射効果が延焼に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

続いて、過去に実験で測定した延焼速度<sup>3)</sup>との比較結果を図4に示す。解析による延焼速度の値は実験による値よりも小さい結果となった。原因として左端に加えた熱量が小さいことが考えられたため、加える熱量を大きくした解析を行ったが、解析は発散してしまった。木材の燃焼過程の確認を行ったところ、乾燥状態における木材の反応速度が急激に減少しており、式(13)から乾燥木材の反応速度が起因する変数の推移を確認すると、乾燥木材の温度の上昇率が途中から下がっていることが分かった。そこで、解析を安定させるために時間積分法の変更を行った。今まで木材の化学反応を解く際には前進差分法を用いていたが、これを後退差分法を用いて解析を行った。その結果、変更後に反応速度の急激な減少はしたが、温度上昇率の一定時間は延び、解析が安定する時間も延びた。課題として、実験で用いたクヌギの枯葉に類するパラメータ設定、燃焼させるために加えた熱量の検討が必要と考えられる。

### 4. まとめ

本研究では、火災の延焼に及ぼす放射の影響を、木材を一次元的に配置した解析で検討した。その結果、木材

間の放射を考慮すると、延焼速度が増加するが、過去の実験結果との差異が見られた。加える熱量を上げた解析では時間積分方法の変更により、解析が少し安定したが発散してしまった。今後は解析に用いるパラメータを検討する必要がある。

### 謝辞

延焼解析の一部は、平井惇貴氏の卒業研究の一環として実施したものである。記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 林野庁 HP : <https://www.rinya.maff.go.jp/>, (閲覧日2022年9月30日)
- 2) 長谷部寛ら: 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開発, 日本風工学会誌, Vol.36, No2, pp.201-202, 2011
- 3) H. Hiroshi.et.al: An Attempt to Measure the Speed of Fire Spread in the Wind, international conference proceedings, Vol.1, pp.321-322, 2019
- 4) 長谷部寛ら: VMS 有限要素法によるキャビティ内の自然対流の解析, 計算工学講演会論文集, 22 巻, pp.4-7, 2017
- 5) Morvan, D.et.al: Modeling of Fire Spread Through a Forest Fuel Bed Using a Multiphase Formulation, Combustion and Flam, Vol.127, pp.1981-1994, 2001

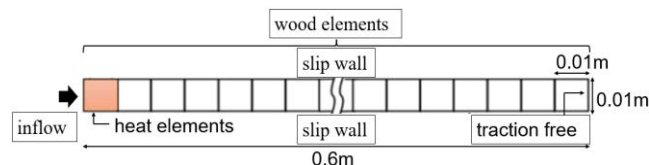


図1 解析領域と境界条件



図2 木材間の放射効果を考慮しない延焼解析



図3 木材間の放射効果を考慮した延焼解析

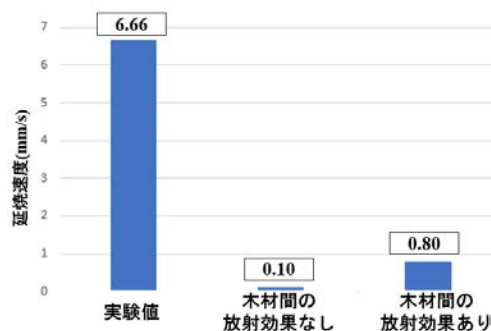


図4 延焼速度の比較