

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420463

研究課題名(和文) 風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

研究課題名(英文) Development of a new simulation method for wildfire based on fluid and combustion interaction analysis

研究代表者

長谷部 寛 (HASEBE, Hiroshi)

日本大学・理工学部・講師

研究者番号：60366565

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は新たな林野火災解析法の構築を目指したのである。この成果は以下の3点にまとめられる。1つ目は、燃焼時の高温かつ密度変化を伴う気流を再現するために、低マッハ数近似に基づく流体の支配方程式を導入し、それをVMS法で離散化した解析法を構築したことである。2つ目は、実験データに乏しい林野火災の延焼速度を、枯葉を対象とした燃焼実験から取得したことである。延焼速度を評価する方法として、熱電対を用いる方法と画像解析により取得する方法を試み、両者に大きな差異はないことを確認した。3つ目は、任意の地点、時点において林野火災解析を実施するために必要となる、初期・境界条件をWRFの活用により取得した点である。

研究成果の概要(英文)：In the present study, we aimed to construct a new analysis method for wildfire. The results are summarized in the following three points. Firstly, we developed new analysis method for wildfire by using the low Mach number approximation and the variational multiscale method. Secondly, we conducted a combustion experiment in order to obtain the data of fire spreading speed for wildfire. Finally, the initial and boundary condition for a wildfire simulation were obtained by using WRF.

研究分野：風工学

キーワード：林野火災 低マッハ数近似 VMS法 木材延焼速度 WRF

### 1. 研究開始当初の背景

日本では毎年数千件の林野火災が発生し、その一部は大規模な火災に発展し、死者数は毎年 10 名程度を数える。そのような状況を改善するため、1997 年に消防庁が中心となって、林野火災の予防対策立案のためのシミュレーション法が構築された。

林野火災の予測には風の予測と火災の延焼予測の両方の精度が求められる。しかし前述のシミュレーション法の中では、風の予測に質量保存則のみに基づく簡易的な気象モデル・マスコンモデルが用いられており、局所的な地形の起伏の影響や、火災時の熱で発生する対流の影響が十分に考慮されていない。また、木材の延焼予測には、室内実験で得られた実験式が用いられており、木材の燃焼過程は直接解かれておらず、実験式の適用範囲に疑問が残る。

一方、林野火災の発生件数、規模がともに多大な米国では、WFDS (Wildland-Urban Interface Fire Dynamics Simulator) と称される火災解析コードが NIST (国立標準技術研究所) などにより開発され活用されている。この解析コードの中では、風の質量保存則だけでなく、運動量保存則とエネルギー保存則も解く工学モデル (LES) による解析が実施されている。なおかつ木材の燃焼過程は、その化学反応のモデル式に基づいて直接的に解析されており、精度の良い延焼予測が実現している。

以上の背景から、起伏に富んだ国土を有する日本にこそ、工学モデルによる風の解析と木材燃焼解析を連成させた林野火災解析法を用いる必要があると考えた。

### 2. 研究の目的

これまで、実地形上の風況予測のため RANS モデルによる解析法を構築し、さらに都市の風環境解析へ適用させるため、温度差を浮力に置き換え、非圧縮性を課したまま、熱の影響を考慮するブシネスク近似を用いた熱流体解析法へと発展させてきた。そして 2011 年から、熱流体解析法に Morvan らの木材燃焼の化学反応過程を解くモデルを組み込み、林野火災予測のための新たな連成解析法の構築に着手した。煙が立ち上るかのような流れが生じる結果が得られた。しかし、研究開始時点ではこの連成解析法に以下の課題が残されていた。

- ・ 燃焼に伴う気流は高温であり、密度変化が生じることから、密度変化を考慮した流体解析法を構築する必要があること。

- ・ 木材燃焼の実験データに乏しく Morvan らの木材燃焼モデルの妥当性が十分に検証できていないこと。

- ・ 実地形上の風の解析の初期条件・境界条件を定める方法が実装されていないこと。

以上の課題を克服し、新たな林野火災解析法を構築することを目的に研究を推進した。

### 3. 研究の方法

(1) 高温の密度変化を伴う気流の解析を実現するための流体解析法の改良

前述のように、流体解析において熱の影響を考慮するために、流体に非圧縮性の条件を課したまま、温度差を浮力に置き換えるブシネスク近似を用いてきた。しかし、火災で生じる流れは密度変化を考慮しなければならないほど高温である。そのため、圧縮性流体の方程式を解かなければならない。しかしながら、圧縮性流体解析法はマッハ数が低い流れでは収束性が極端に低下することが知られている。そのため本研究では、火災の解析で広く用いられている低マッハ数近似を用いて気流の密度変化を考慮することにした。

さらに、これまでは RANS タイプの乱流モデルを用いていたものの、高温の流れの乱流変動を精度良く捕らえるために、LES タイプの乱流モデルを導入することにした。有限要素法流れ解析の分野では、層流から乱流まで一貫して扱うことの出来る変分マルチスケール法 (Variational MultiScale method, VMS 法) が提案されていたことから、この VMS 法を採用した。

以上の形に解析コードを大幅に改良するとともに、キャピティ流れを対象に新しい流体解析コードの検証を行うこととした。

#### (2) 木材燃焼実験の実施

これまで木材燃焼解析には Morvan らの木材燃焼モデルを用いてきた。このモデルは木材の燃焼過程の化学反応を解くモデルであるが、その中には燃焼過程の熱量吸収率や、燃焼により生じる発熱量など、いくつかの実験パラメータが含まれている。これらは欧州の木材を対象にした実験により定められたパラメータであり、気候や植生が異なる日本の木材にそのまま適用できるとは考えにくい。さらに、モデルの妥当性を検証しようとしても、実験データに乏しく検証が困難である。

そこで、日本の山間部によく見られるマツやスギなどの木材や、野焼きの対象となるススキやアシなどの植物を対象として燃焼実験を実施し、モデルの検証に資するデータを自ら取得することにした。

#### (3) 林野火災解析の初期・境界条件を決定するための気象モデルの導入

構築する林野火災解析法を用いて林野火災の予防対策立案を行うためには、対象地域で火災が発生しやすい時期の、おおよその風速、風向、気温を把握し、適切に初期・境界条件を設定する必要がある。一つの方法として、気象庁のアメダスのデータから推定する方法が考えられるが、林野火災が問題となる山間部では観測点が乏しい。そこで、気象モデルを用いてメソ気象シミュレーションを実施し、林野火災の予防対策立案を行う地域の気象条件を取得することとした。

#### 4. 研究成果

(1) VMS 有限要素法にもとづく低マッハ数近似を用いた高温の密度変化を考慮する流れ解析法への改良

前述のように、流体解析の支配方程式には低マッハ数近似を適用した方程式を採用した。低マッハ数近似では、流体の密度を状態方程式により決定する。さらに、密度変化を考慮することから、質量保存則から導かれる連続条件式において、非圧縮性を仮定した際には消える密度の時間微分項も取り扱う必要がある。これらの点を考慮した上で構築した解析アルゴリズムは以下のようにまとめられる。

- ・木材燃焼モデルの計算を行い、木材から流体に伝わる熱量を算出する。
- ・エネルギー方程式の右辺に木材からの熱量をソース項として加えて解き、次の時間ステップ ( $n+1$  ステップ) の温度を求める。
- ・ $n+1$  ステップの温度を用いて、状態方程式より流体の密度を更新する。あわせて、連続条件式の密度の時間微分項を差分近似により求める。密度の時間微分項は既知量となるため、連続条件式の右辺に移項し、ソース項として扱う。
- ・低マッハ数近似にもとづき、外力項となる運動量方程式右辺の密度差に伴う浮力項を計算し、連続条件式、運動量方程式を連立して解き、 $n+1$  ステップの流速、圧力を求める。

以上のアルゴリズムに基づいて構築した解析法の検証のため、レイリー数  $Ra = 1.0 \times 10^8$  のキャビティ内の自然対流の解析を実施した。その結果、図1に示すようにVMS法を用いた場合と用いない場合で、解析結果に大きな差異が見られた。図1(a)のように、VMS法を用いない場合は乱流変動が見られず、図1(b)のように、VMS法を用いた場合は乱流変動が捕らえられた。

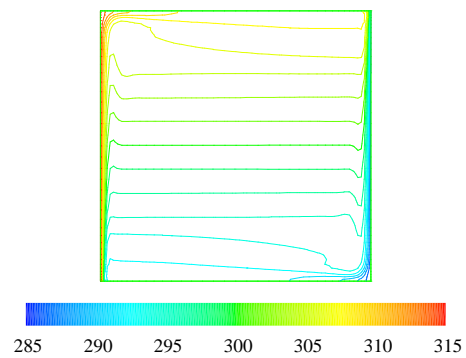
(2) 数値解析の検証データに資する木材延焼速度の実験結果の取得

林野火災の燃焼に関する実験データに乏しいことから自ら実験を実施した。林野火災では、樹幹部の延焼も重要であるが、林野火災の広がりには、地表面に落ちた枯葉を伝わる火が強く関係している。本研究ではそのような林野火災の延焼を模擬した実験を実施した。

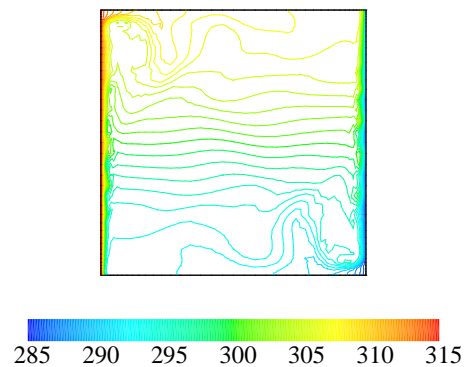
燃焼材としては主としてクヌギの枯葉を用いた。単位面積あたりの枯葉の重量(堆積密度)を  $0.5 \sim 1.5 \text{ kg/m}^2$  まで変化させた。延焼速度計測のために、K型熱電対を用いて、複数箇所の温度変化を計測し、その結果から延焼速度を評価した。また、火災の様子を捕らえるために動画を撮影し、その動画からも延焼速度を評価することにした。なお、実験は無風状態で実施した。今後は風の影響を評

価する必要がある。

得られた延焼速度の結果を図2に示す。熱電対の温度データから評価した結果と、画像解析で評価した結果に若干の際が見られたケースがあったが、おおむね両手法の結果は一致した。単純に堆積密度が増すと延焼速度が増加するわけではなく、ある程度の堆積密度で延焼速度は頭打ちとなる。延焼の様子を観察すると、表面が先に燃え、その後、内部が燃えるような様子が見られた。これは、堆積密度が大きくなると内部への酸素供給量が低下するため、表面と内部で燃焼状況に差異が生じたものと考えられる。今後は得られた延焼速度のデータを検証材料として、構築した数値解析法の検証を実施することが必要である。



(a) VMS法を用いない場合



(b) VMS法を用いた場合

図1 自然対流の解析結果(温度分布)

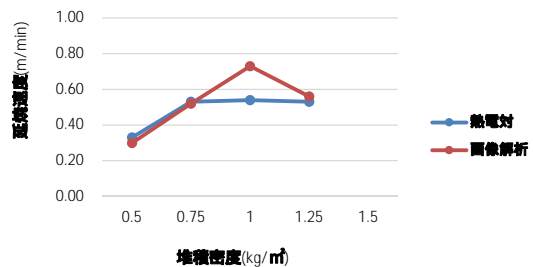


図2 計測された延焼速度

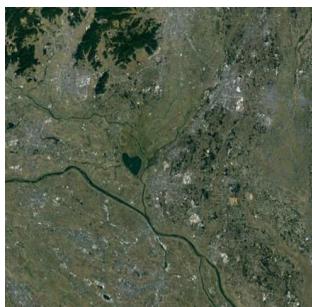
(3) WRF を活用した特定の地点、特定の時

## 間の風況データの取得

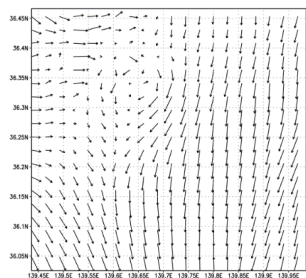
前述のように、林野火災解析の初期・境界条件を決定するため、気象モデルを用いた解析を実施した。本研究で採用した気象モデルは WRF (Weather Research and Forecast model) である。WRF は様々な研究者により活用されており、都市の風環境解析では、WRF の解析結果と数値流体解析結果をつなげる解析も実施されている。

本研究では渡良瀬遊水地を中心とした解析を実施した。渡良瀬遊水地では毎年大規模な野焼きが実施されている。実際の林野火災は、発生場所や時間を事前に把握することができないため、延焼速度や範囲は主に事後調査から判断せざるを得ない。一方で、渡良瀬遊水地のような野焼きは、着火場所と時間が決まっていることから、実スケールの延焼速度などのデータが取得しやすい。そこで、構築した解析法の検証を、渡良瀬遊水地の野焼きを対象として実施すれば、実スケールの検証ができる。以上の目的から、WRF の解析の中心を渡良瀬遊水地に設定した。

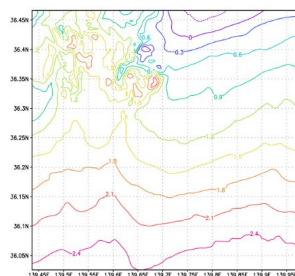
実施した WRF の解析は、3段階のネスティング解析とし、初期条件には NCEP の客観解析データを用いて 2014 年 1 月 1 日から解析を行った。地表面には、国土地理院の土地利用データおよび標高データを与えた。図 3 は WRF の解析結果の一例である。図 4 は格子数を 50、100、150 と変えた解析結果である。



(a) 解析対象領域 (第 3 領域)

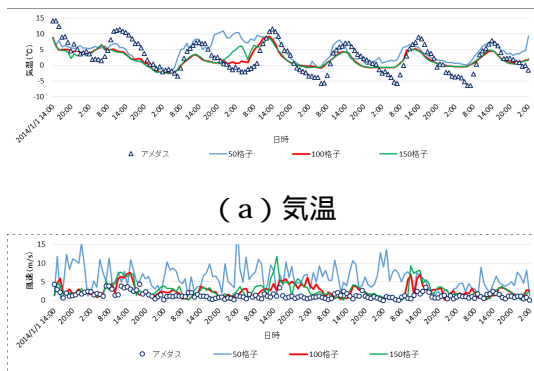


(b) 風速ベクトル



(c) 気温分布

図 3 WRF 解析結果



(a) 気温

(b) 風速

図 4 格子数を変えた WRF の解析結果

今回の解析範囲であれば、格子数を 100 以上にすると必要があると分かった。気温、風速ともにアメダスの実測値に近い結果が得られたが、WRF の風速は若干過大に評価される。今後は、WRF の解像度よりも林野火災解析の解析メッシュが細かいことから、得られた WRF データを林野火災解析の解析メッシュに落とし込む検討が必要である。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 1 件)

Hiroshi Hasebe, Toru Oyaide, Hiroya Suzuki and Takashi Nomura, Numerical Study on the Airflow Characteristics Caused by Wood Combustion, Proceedings of AUBE '17 / SUPDET 2017, 2017 (掲載決定), 査読有

### 〔学会発表〕(計 6 件)

長谷部寛, 鈴木宏哉, 野村卓史 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, Vol.22, C-08-1 (CD-ROM), 2017.06.01, ソニックシティ (埼玉県, 大宮市)  
長谷部寛, 小柳出亨, 鈴木宏哉, 野村卓史, 林野火災の延焼予測を目的とした風と木材燃焼の連成解析法の構築, 第 59 回風に関するシンポジウム講演概要集, pp.13-14, 2017.03.13, 日本大学理工学部 (東京都, 千代田区)

Hiroshi Hasebe, Toru Oyaide and Takashi Nomura, Study on the Airflow Characteristics around Burning Wood by using the Fluid-Combustion Interaction Analysis, The 3rd International Workshops on Advances in Computational Mechanics -IWACOM-III -, p.39, 2015.10.13, 第一ホテル両国(東京, 墨田区)

長谷部寛, 小柳出亨, 野村卓史, 有限要素法による木材燃焼時の気流性状に関する解析, 計算工学講演会論文集, Vol.20, A-1-3 (CD-ROM), 2015.06.08, つくば国際会議場(茨城県, つくば市)

Hiroshi Hasebe, Tomoya Saito and Takashi Nomura, Study on the outflow condition for wildfire simulation based on the fluid-combustion interaction analysis, 18th International Conference on Finite Element in Flow Problems -FEF2015-, E-004 (2 page), 2015.03.17, 台北(台湾)

長谷部寛, 齋藤友也, 野村卓史, 林野火災, 林野火災の予測のための流体と木材燃焼の連成解析法における境界条件の検討, 計算工学講演会論文集, Vol.19, A-3-4(CD-ROM), 2014.6.11, 広島国際会議場(広島県, 広島市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長谷部 寛 (HASEBE, Hiroshi)

日本大学・理工学部・専任講師

研究者番号: 6 0 3 6 6 5 6 5

### (2) 連携研究者

野村 卓史 (NOMURA, Takashi)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号: 5 0 1 2 6 2 8