

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：32660

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K22023

研究課題名（和文）森林火災における延焼シミュレーションの新展開

研究課題名（英文）Simulating wildfire growth

研究代表者

桑名 一徳（Kuwana, Kazunori）

東京理科大学・創域理工学研究科国際火災科学専攻・教授

研究者番号：30447429

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：森林火災の件数、被害が世界的に急増している。森林火災に対する消火活動を効果的にするためには、延焼シミュレーションが大きな力を発揮する。本研究の目的は、森林火災の延焼シミュレーションを効率よく実施することであり、それを可能にするための数値計算モデルおよびスキームの構築を行った。また、延焼速度に影響を及ぼす燃焼ダイナミクスのスケール効果に着目し、実験室規模の風洞実験と、より大規模な野外実験を実施した。また、数値流体力学シミュレーションも併せて実施し、流れ場の変化等を詳細に検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の森林火災の急増は気候変動が主要因の一つとされている。また、森林火災により大量の二酸化炭素が放出されることから、森林火災と温暖化の間に負のスパイラルが存在していると言える。森林火災の被害を最小限に抑えるためには正確な延焼予測に基づいて消火活動を行うことが重要である。本研究で構築した数値モデルは、効率よく延焼シミュレーションを実施することを可能にする。また、延焼速度に大きな影響を及ぼす燃焼ダイナミクスについて研究することにより、延焼シミュレーションの予測精度向上に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：The number of wildland fires has been rapidly increasing worldwide, causing serious damage. Fire-spread simulations are a powerful tool for developing effective firefighting strategies against wildland fires. The objective of this study is to establish a numerical model and scheme for fast and efficient fire spread simulation of wildland fires. In addition, this study focused on the scale effects of combustion dynamics that affect the rate of fire spread; laboratory-scale wind-tunnel experiments and larger-scale field experiments are conducted to study their mechanisms. Computational fluid dynamics (CFD) simulations are also performed to investigate changes in the flow field in detail.

研究分野：火災安全工学

キーワード：森林火災 延焼速度 移動境界問題 火災旋風

1. 研究開始当初の背景

森林火災の件数が近年急増している。温暖化などの気候変動が主な原因であるとされ、森林火災による CO_2 の放出がさらなる温暖化を引き起こすという悪循環に陥っている。例えばインドネシアの森林火災では、一日に排出される CO_2 の量が米国の経済活動全体による量を上回ることがある。研究開始前の2018年11月に米国で発生した森林火災では死者が80名を超え、18,000以上の建物が焼けるなど甚大な被害が報告された。国内でも2017年5月に山火事が相次いだ。福島県浪江町で50ヘクタール、岩手県釜石市では400ヘクタール以上の山林が焼け、宮城県栗原市や福島県会津坂下町では民家などがそれぞれ11棟および5棟焼けた。このように森林火災は世界規模で大きな問題となっており、いかにして森林火災を防ぎ、また、被害を最小限に抑えるかが人類にとって大きな課題と言える状況であった。

2. 研究の目的

雷などによる森林火災の発生もあるので、森林火災の数をゼロにすることは不可能である。したがって森林火災の迅速な消火が求められるが、そのためには効果的な消火戦略の立案が必要である。これには、リアルタイムな燃え広がり(延焼)シミュレーションが大きな力を発揮する。一方、世界的に広く用いられている延焼シミュレータは、延焼速度を過小評価する場合があることが指摘されている。これは、延焼前線における燃焼ダイナミクスのスケール効果が適切に考慮されていないことが原因だと考えられる。これに加えて、延焼前線が移動する様子をシミュレーションする移動境界問題の数値解法はこの問題に特有な困難さを伴い、延焼速度を完全に予測できたとしても高速に延焼シミュレーションすることは容易ではない。つまり、正確なリアルタイムシミュレーションを可能にするための課題として、燃焼ダイナミクスのスケール効果に関する知見が不足していることと、高速な延焼シミュレーションが困難であることが挙げられる。

以上のことから、本研究では以下の2つの目的を設定した。

- スケールの異なる模型実験による、燃焼ダイナミクスのスケール効果の解明
- 高速延焼シミュレータの開発

3. 研究の方法

(1) 実験室規模の風洞実験

本研究で実施した風洞実験の模式図を図1に示す。出口サイズが60 cm×60 cmの風洞を用いて、有風下で様々な形状のエタノール(可燃性液体)プールを燃焼させた。風速やプール形状を変化させることにより、これらのパラメータが燃焼ダイナミクスに及ぼす影響を調査した。画像解析により火炎形状を定量化するとともに、燃焼率(単位時間当たりの燃料消費速度)を計測した。さらに、PIV法(粒子画像流速測定法)を用いて、燃焼領域周辺の流れ場を計測した。図2はPIV計測の一例であり、延焼前線近傍で渦流れが生じていることが可視化されている。また、このような風洞実験を対象とした数値流体力学(CFD)計算も実施した。実験で測定された火炎高さや流れ場を用いてCFDモデルの検証を行った。また、スケールを変化させたCFD計算を実施し、流れ場のスケール効果について検討した。

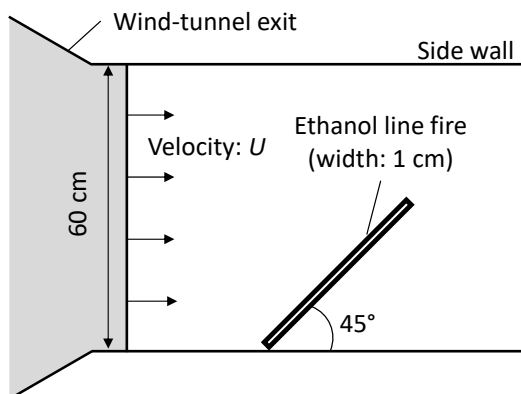


図1 風洞実験の模式図

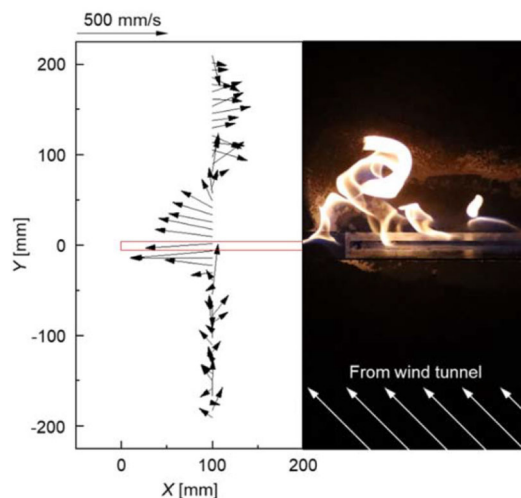


図2 PIV計測の例

(2) 屋外での燃焼実験

燃焼ダイナミクスのスケール効果を明らかにするためには、異なるスケールで実験すること

が有効である。本研究では、(1)で述べた実験室規模の風洞実験に加えて、屋外で比較的大規模な燃焼実験を実施した。実験の一例を図3に模式的に示す。270 mm×350 mmの容器に可燃性液体であるノルマルヘプタンを入れ燃焼させた。超音波風速計(図2における①および②)を用いて燃焼領域周囲の風速を計測するとともに、画像処理により火炎形状を抽出し(図4)、火炎高さ等のデータを得た。

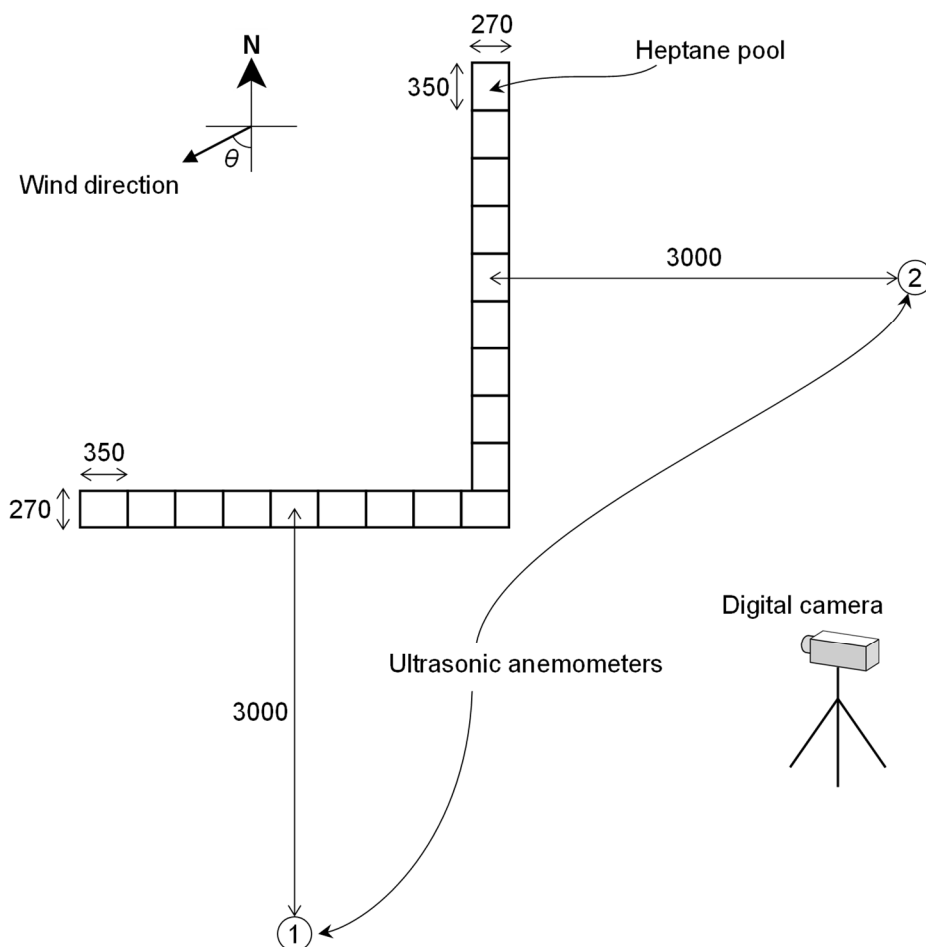


図3 屋外実験の模式図



図4 画像処理による火炎形状の抽出

(3) 延焼シミュレータの開発

延焼シミュレータの基本は、延焼速度に影響を及ぼすパラメータ(可燃物密度や地表面の傾きなど)を挙げ、延焼速度をこれらのパラメータの関数として表すことである。そして、予測される延焼速度に応じて延焼前線を移動させることにより、延焼シミュレーションが達成される。延焼速度を表す関数については従来から広く研究されているため、本研究でも基本的にこれらを踏襲した。本研究で特に着目したのは、燃焼ダイナミクスのスケール効果に基づいた延焼速度の補正である。

本研究では、G方程式と呼ばれる界面の移動を表すモデルを採用し、延焼シミュレーションに

用いた。このモデルを用いることにより、可燃物密度等に加えて、風速が延焼速度に及ぼす影響を自然に考慮できる。G 方程式を解く数値スキームとして、研究代表者および研究分担者が構築したものを用いた (M. Goto, K. Kuwana, S. Yazaki, JSIAM Letters 10, pp. 49-52, 2018)。このスキームを用いて延焼状況を計算した例を図 5 に示す。本研究では、風速は与えられたものとして取り扱った。火災時の燃焼現象に起因する局所的な流れ場の変化を詳細に考慮するためには CFD 計算が必要になるが、このような計算は負荷が高く、リアルタイム予測に用いるのは困難である。本研究では、局所的な流れ場の変化 (燃焼ダイナミクス) に起因する延焼速度の変化をスケール効果も含めてモデル化し、それにより延焼速度を補正するというアプローチを採用した。

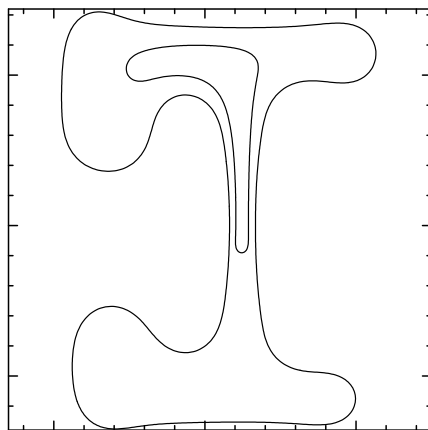


図 5 複雑な風速条件における延焼シミュレーションの例

4. 研究成果

(1) 燃焼ダイナミクスのスケール効果

風洞実験と CFD 計算、屋外実験の結果を比較することにより、フルード数が現象を支配していると結論した。フルード数は慣性力と浮力の比を表す無次元数である。本研究では、火炎高さを基準としたフルード数を用いてデータを整理できることを確認した。例えば、図 2 に示したような渦流れの代表速度は \sqrt{gH} に比例する。ただし、 g は重力加速度で、 H は火炎高さである。

大規模火災では、接炎が重要な延焼メカニズムである。すなわち、炎が近傍の可燃物に触れることにより延焼が進展する。このとき延焼速度もパラメータ \sqrt{gH} の影響を受ける。一般に、延焼シミュレーションで基にする延焼速度は、何らかの実験データから得られたものである。このデータを大規模火災に適用するためには、 \sqrt{gH} に相当する補正が必要であると結論した。

(2) 延焼シミュレーション

(1) で得られた成果に基づき、延焼速度を補正する延焼シミュレーションモデルを構築した。本研究の延焼シミュレーションモデルでは火炎高さ H を直接求めることはしないので、燃焼率 \dot{Q} から間接的に \sqrt{gH} に相当する補正を行うことを試みた。この補正を用いると、従来のモデルと比較して延焼速度が数倍程度大きく見積もられる。

(3) 今後の展望

本研究により、燃焼ダイナミクスのスケール効果を考慮できる延焼モデルを構築することができた。これにより、大規模火災では延焼速度を過小評価することがあった従来のモデルの欠点を克服できる可能性がある。一方、本研究で構築した延焼モデルの検証は十分ではない。これは、森林火災の大規模実験のデータが限定的なためである。また、本研究では考慮できなかった延焼メカニズムとして火の粉による延焼拡大が挙げられる。市街地火災では、火の粉による屋根の着火性状などに関する知見が蓄積されつつあるが、森林火災でこれを正確に考慮するのは困難である。

以上のような状況から、延焼シミュレータのさらなる精度向上のためには、大規模火災の延焼データの蓄積が不可欠である。地球観測衛星による森林火災の可視化データを活用するなど、実際の火災について定量データ化するとともに、制御焼却 (controlled burn) や計画焼却 (prescribed burn) などの林野に火を入れる施業の機会を活かしてデータを蓄積することが重要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 M. Goto, K. Kuwana, Y. Uegata, S. Yazaki	4. 巻 14
2. 論文標題 A method how to determine parameters arising in a smoldering evolution equation by image segmentation for experiment's movies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Discrete & Continuous Dynamical Systems - S	6. 最初と最後の頁 881 ~ 891
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3934/dcdss.2020233	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Iga, K. Kuwana, K. Sekimoto, Y. Nakamura	4. 巻 2
2. 論文標題 Open-field scale-model experiments of fire whirls over L-shaped line fires	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress in Scale Modeling, an International Journal	6. 最初と最後の頁 02-02-07.1~7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.13023/psmij.2021.02-02-07	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 K. Kuwana, K. Matsue, Y. Fukumoto, R. Dobashi, K. Saito	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Fire whirls: A Combustion Science Perspective	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Combustion Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1~18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00102202.2021.2019234	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 A. Darwish Ahmad, K. Kuwana, A. Salameh, N.K. Akafuah, K. Saito
2. 発表標題 Scaling fire spreading mechanism over live conifer fuels
3. 学会等名 9th International Symposium on Scale Modeling（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 N. Makita, K. Kuwana, K. Fujiwara
2. 発表標題 Effects of Reynolds and Froude numbers on the shape of small-scale jet diffusion flames
3. 学会等名 9th International Symposium on Scale Modeling (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桑名一徳
2. 発表標題 相似則の緩和について 指向的分割と方向性次元解析
3. 学会等名 日本実験力学会2021年度年次講演会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村桃実, 矢崎成俊, 桑名一徳
2. 発表標題 非一様なルイス数による折れ曲がりを考慮した紙の燃焼について
3. 学会等名 日本応用数理学会第18回研究部会連合発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村桃実, 桑名一徳, 矢崎成俊
2. 発表標題 折れ曲がった紙に沿って拡がる燃焼前線の形状と折れ曲りを考慮したモデル方程式について
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 牧田庸寛, 桑名一徳, 藤原翔
2. 発表標題 噴流拡散火災のフリッカリング現象に及ぼす無次元パラメータの影響に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊賀勇人, 桑名一徳
2. 発表標題 線火災上の火災旋風の発生条件と発生機構
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Yazaki
2. 発表標題 How to track the flame/smoldering front of combustion of a paper sheet in mathematics
3. 学会等名 Science and Technology in Japan 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢崎成俊, 桑名一徳, 上形泰英, 小林俊介
2. 発表標題 紙の燃焼現象を追跡する界面方程式とその数理解析
3. 学会等名 九州関数方程式セミナー
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Yazaki, K. Kuwana, M. Goto, Y. Uegata, S. Kobayashi
2. 発表標題 Flame/smoldering front tracking to evolution equations for combustion of a paper sheet
3. 学会等名 International Congress on Industrial and Applied Mathematics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Yazaki, K. Kuwana, M. Goto, Y. Uegata, S. Kobayashi
2. 発表標題 On an evolution equation of flame/smoldering combustion propagation of a paper sheet
3. 学会等名 44回偏微分方程式論札幌シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢崎成俊, 桑名一徳, 後藤舞香, 上形泰英, 小林俊介, 飯島ひろみ
2. 発表標題 紙の燃焼の数理解析
3. 学会等名 第2回松江数理生物学・現象数理学ワークショップ in 隠岐の島
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊賀勇人, 桑名一徳
2. 発表標題 線火災上の火災旋風に及ぼす火災基部近傍の流れの影響
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋巧, 渡部いづみ, 桑名一徳
2. 発表標題 拡散火災のフリッカリング現象の臨界条件に関する研究
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	矢崎 成俊 (Yazaki Shigetoshi) (00323874)	明治大学・理工学部・専任教授 (32682)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------