

第6回アドバンス・シミュレーション・セミナー2025 開催報告 東京理科大学 創域理工学研究科 国際火災科学専攻 教授 桑名 一徳 様

「火災・爆発現象のモデリングおよび早期異常検知」

アドバンス・シミュレーション・ニュースは、アドバンスソフト株式会社が2021年度から、我が国における計算科学技術の振興を目的として、幅広い分野の最先端研究を対象として開催している「アドバンス・シミュレーション・セミナー」の開催報告と今後の開催予定をご案内するサービスです。

本セミナーで紹介される多種多様な最先端研究をきっかけに、企業の研究開発を担う技術者の方が新たな視点を持つこと、最先端研究を産業に応用する起点となること、長期的には計算科学シミュレーション分野の裾野が広がること等を期待しています。

開催概要

- 日時：2025年10月17日（金）14:00～15:30
- 開催方法：オンラインセミナー（Zoomにて開催）
- 主催：アドバンスソフト株式会社 出版事業部
- 講演概要

火災・爆発事故を未然に防ぐためには、火災・爆発現象を科学的に理解することが重要である。そして、多くの火災・爆発現象は燃焼反応を伴う。本講演では、燃焼理論をもとにした火災・爆発現象のモデリング研究例を紹介したい。火災現象には、被害の急拡大を招くものがある。例えば、タバコ火災における燻焼から有炎燃焼への遷移現象や、フラッシュオーバー（屋内火災で燃焼範囲が急拡大する現象）、火災旋風の発生などである。このような現象のモデリングや、早期検知に関する研究について、特に焦点を当てる。2025年には、岩手県大船渡市などで大規模な山林火災が発生した。これらの火災の調査で得た、延焼メカニズム等に関する知見も紹介する。



本稿は、2025年10月17日に開催した「アドバンス・シミュレーション・セミナー2025」において、桑名 一徳 様にご講演いただいた内容をアドバンスソフトがまとめたものです。

ご講演内容

1. 講演内容

1.1. シンプルな燃焼モデリング

本講演では、火災や爆発といった燃焼現象のモデリング、および早期検知に関する研究を紹介する。昨今主流の詳細な数値シミュレーションとは異なり、「シンプルに捉える」という観点を重視している。単純なモデルは、現象の本質を大雑把に理解し、基礎的な情報を得る上で有用であると考え。まずガス爆発や粉塵爆発のモデリングについて述べる。次に、タバコ火災が炎の上がる危険な火災へどう遷移するかを論じる。続いて、屋内火災のフラッシュオーバーや火災旋風といった現象とその早期検知に触れ、最後に山火事の研究を紹介し、スケールを徐々に大きくしながら解説を進める。

1.2. ガス爆発とフラクタル火災

ガス爆発は、燃料と空気が予め混ざった予混合状態で着火し、火災が伝播する現象である。被害の大きさは火災伝播速度に依存し、この速度は火災の面積に比例する。火災は、燃焼による急激な「体積膨張」などの不安定性の影響で「モコモコ」とした複雑なしくちの構造を発達させる。この「しくち」の分だけ火災表面積は滑らかな球形よりはるかに増大し、伝播速度を加速させることが、被害を甚大にする要因である。この火災構造は「フラクタル構造」を持つことが知られ、その面積は半径の2乗ではなく、2.3乗といった2より大きな値（フラクタル次元）に比例して増大する。このフラクタル次元がわかれば爆発被害を推定できるが、大規模な実験や詳細な数値流体力学（CFD）による特定は容易ではない。

そこで、よりシンプルなモデルとして、火災界面の運動を記述する「シバシンスキー方程式」を採用した。この方程式には体積膨張の効果を表すパラメータ γ が含まれており、体積膨張が引き起こすフラクタル的な火災形状を再現できる。このモデルの最大の利点は、数学的な変数変換により、パラメータ γ の影響を消去できる点にある。これは、ある一つの γ の値で計算を実行しさえすれば、その結果を変数変換するだけで、あらゆる膨張率に対するフラクタル次元を理論的に導出できることを意味する。この効率性は、条件ごとに膨大な計算を要するCFDにはない強力な利点である。この手法で導出した膨張率とフラクタル次元の関係は、過去の研究結果とも非常によく一致した。

1.3. 粉塵爆発と離散的燃焼

粉塵爆発は、燃料が固体の微粒子であるという「つぶつぶ感」の存在がガス爆発と決定的に異なる。この現象をモデル化するため、粉塵の集まりを連続的なガスのように見なす「連続体モデル」と、個々の粒子を「点の熱源」と見なす「点熱源モデル」という二つのシンプルなモデルを検討した。

計算を極限まで単純化するため、燃焼による「熱膨張を無視」し、化学反応を「着火温度」と「燃焼時間」という単純なルールに置き換えた。これにより、解くべき方程式は実質的に「熱方程式」一本になる。このモデルで解析した結果、粒子の「燃焼時間」が現象の様相を大きく左右することがわかった。燃焼時間が（熱の伝わる時間に比べて）短い場合、熱が周囲に拡散する暇がなく、温度分布は「つぶつぶ感」が際立つ。逆に燃焼時間が長い場合、温度分布は滑らかになり、「連続体モデル」の結果と近くなる。

この簡易モデルは、微小重力下のアルミニウム粉塵の実験データとも比較し、伝播速度をある程度再現できた。条件によっては、つぶつぶ感を考慮した点熱源モデルの方が実験値との適合性が高いことも確認された。さらに、このモデルは粉塵爆発における重力の特異な影響も明らかにした。ガス燃焼とは異なり、重い粒子は伝播方向に影響する。火災が下向きに伝播する場合、粒子が火災から逃げないように沈降するため燃焼は不利になり、「消炎限界」が現れる。逆に上向き伝播では粒子が火災に降ってくるため有利となり、明確な限界が現れにくくなる。このモデルは爆

発下限濃度の予測にも応用可能であった。

1.4. 燐焼から有煙燃焼への遷移

火災の発生段階として、タバコ火災に着目する。タバコの火は、まず「燐焼（くんしょう）」と呼ばれる炎の上から表面燃焼から始まる。この際、煙（可燃性ガス）は発生するが燃えていない。しかし、ある条件がそろえば、この煙に火が付き、「有煙燃焼（ゆうえんねんしょう）」、すなわち炎を上げて燃える状態へと「遷移」する。この遷移が火災を危険にするため、遷移条件の解明が重要である。この現象を研究するため、タバコを太くした「棒灸（ぼうきゅう）」を用いた基礎実験系を構築した。異なる酸素濃度の空気を送り込み、どの濃度で燐焼から有煙燃焼へ遷移するかを観測した。この実験系を、一次元の対向流モデルとして単純化した。固体の「熱分解反応（ガスとチャー(char)を生成）」と、チャーの「表面燃焼（燐焼）」の二つを考慮した。モデルの方程式を解き、酸素濃度と表面温度の関係（解曲線）を求めた。その結果、燐焼には酸素濃度が一定以下で燃焼が停止する「消炎限界」が存在することが示された（S字状カーブ）。さらに、気相（煙）の燃焼反応もモデルに組み込むと、酸素濃度がある値を超えたところで、それまで存在していた燐焼の解が突然消滅する「分岐点」が見つかった。これが、燐焼が維持できなくなり有煙燃焼へ移行する「遷移限界」を理論的に示すものである。複雑なCFDシミュレーションでは特定が困難な「不安定解」や、こうした「限界条件（分岐点）」を明確に導出できることこそが、シンプルなモデル解析の大きな利点であると言える。

1.5. 火災の早期検知と山火事

最後に、火災がさらに拡大した状況と、その早期検知、そして大規模火災について述べる。

屋内火災において最も危険な現象の一つが「フラッシュオーバー」である。これは、火災が徐々に燃え広がるのではなく、ある瞬間に部屋全体が爆発的に炎に包まれる現象を指す。このメカニズムは、火元から出た高温の煙が天井付近に蓄積し、天井全体が均一に高温になることに起因する。この高温の天井層から床面へ向かって放たれる強力な「輻射熱」が、まだ燃えていない可燃物を一斉に発火させるのである。このフラッシュオーバーが発生する「予兆」を早期に検知できれば、避難や消火活動において非常に有益である。この検知手法を開発するため、まず火災シミュレータ（FDS）や、さらに単純化したモデル方程式を用いて、フラッシュオーバーが「起きる条件」と「起きない条件」の時系列データ（発熱速度など）を多数生成した。これらのデータをAI（機械学習）で判別させることも試みたが、うまくいかなかった。そこで、別の物理的な特徴量に着目した。一般に、システムが安定な状態から不安定な状態へ移行する「分岐点」に近づくと、その挙動に見られる「ノイズ（ゆらぎ）」が増大し、かつ、そのゆらぎに「自己相関性（過去のゆらぎが未来に影響する性質）」が強まることが知られている。

この知見に基づき、発熱速度の生データだけでなく、そこから抽出した「ノイズ成分の標準偏差」と「自己

相関関数」を監視する指標を作成した。FDS のシミュレーションデータにこの指標を適用したところ、発熱速度が急上昇してフラッシュオーバーが発生するよりも「かなり前」の段階で、ノイズの標準偏差が明確に増大し始めることが確認された。これにより、現象の急変を早期に検知できる可能性が示された。同様の手法は「火災旋風（炎の竜巻）」の検知にも応用した。火災旋風は、関東大震災などで甚大な被害をもたらした現象であり、局所的な燃焼の激化や「飛び火」の広域化を引き起こす。実験室で、同じ設定でも火災旋風が「起きる時」と「起きない時」がある条件を再現し、その際の火災の高さを時系列で計測した。その結果、火災がまだ高くなっていない実験開始直後（例えば 20 秒時点）でも、火災高さのデータに含まれる「ノイズ成分の標準偏差」と「自己相関」を解析すると、「起きる時」の方が「起きない時」よりも両方の値が明確に高く、その後の旋風の発生を統計的に見破ることができた。

最後に、最もスケールの大きな火災として「山火事」の研究を紹介する。米国西海岸などで深刻化している山火事は、2025 年（講演当時）には岩手県大船渡市や愛媛県今治市など、日本でも大規模なものが発生し、看過できない問題となっている。山火事には、地面の下草や落ち葉が燃える「地表火」と、樹木の上部まで燃え上がる「樹冠火」があり、後者は飛び火を伴うため鎮火が極めて困難となる。

大船渡市の火災跡地の調査を行った結果、地形の影響が極めて大きいことが明らかになった。衛星写真や現地調査から、特に「尾根筋」や「登り斜面」で燃焼が激化していることが強く示唆された。現在はまだ調査段階であるが、今後はこれらの地形効果のメカニズム解明や、延焼シミュレーションモデルの開発を進めていく計画である。

1.6. 聴講における感想（アドバンスソフト）

桑名先生は火災・爆発現象の科学および防災工学の最前線で研究・教育に取り組む、第一線の研究者で、「燃焼科学」を基盤とし、粉塵爆発、ガス爆発、延焼火災、火災伝播など、スケールの異なる火災・爆発現象を対象とし、定量的リスク評価手法の構築に取り組んでいる。実験室から大型スケール、さらには数値シミュレーションを併用しながら、「いかに火災・爆発が起こるか／起こったらどうなるか」を多面的に解明されている。

本セミナーでも燃焼モデル構築の考え方、粉塵爆発では実現象を再現するのに有意な物理モデルについて解説された。また、大災害につながるフラッシュオーバーではその予兆である「ノイズ（ゆらぎ）」を早期に検知することにより、予測の可能性があることを示された。そのノイズは数値シミュレーション（例えば FDS）で確認することができ、安全工学の観点で非常に興味深い内容である。

【ご経歴・ご研究内容】

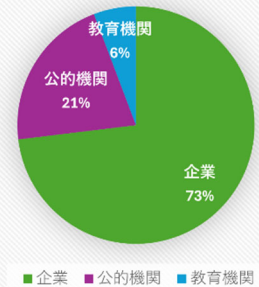
2000 年に東京大学大学院修了，博士（工学）。2000 年から 2006 年まで米国ケンタッキー大学で研究員，2006 年から 2009 年まで東京大学で特任講師，特任准教授，2009 年から 2021 年まで山形大学で准教授（2019 年から教授），2021 年 4 月から現職。

タバコ火災や火災旋風，ガスおよび粉塵爆発など，さまざまな火災・爆発現象のモデリングや早期異常検知技術に関する研究を行っている。

参加者のご意見

申込者は 79 名、当日の参加者（視聴者）（社外）は 52 名でした。参加者（視聴者）の内訳は、企業が 38 名、公的機関が 11 名、教育機関が 3 名でした。主な業種は、「材料/素材」、「官公庁/公的機関」、「エネルギー（電力・ガス・石油・原子力）」でした。主な職種は、「研究/開発」でした。

参加者の所属機関



セミナー後のアンケートは、36 名からご回答いただきました。満足度の平均値は 10 点満点中 8.3 と高評価をいただいております。「火災の科学に関する分かりやすいご説明から最新情報まで、内容は多岐にわたり、大変興味深く受講いたしました」「本来なら難解な解析技術を簡潔にご説明くださり、非常に分かりやすかったです。解析技術だけでなく、火災の実現象についての理解も深まりました」など、ご講演の内容そのものと、その分かりやすい説明の両面で、高い評価をいただく結果となりました。

公開資料

ご講演の YouTube 動画は、右の QR コードからご覧いただくことができます。



ご講演の資料は、右の QR コードの「資料をダウンロードする」からログイン後、ダウンロードすることができます。ログインアカウントをお持ちでない方は、「資料をダウンロードする」から新規メンバー登録後、ログインしてダウンロードすることができます。



右の QR コードから過去のアドバンス・シミュレーション・セミナーの YouTube 動画をご覧いただくことができます。



2024 年度に開催したセミナーの各記事の一つにまとめて、24 ページの冊子として発行いたしました。全 10 回分の記事を一度にご覧いただけますので、ぜひお手元にてご一読いただけますと幸いです。



2025 年度の開催日程

アドバンス・シミュレーション・セミナー

2025 の開催要領

<https://www.advancesoft.jp/seminar/33224/>

No.	日程 受付状況	内容	テーマ
第 1 回	5 月 30 日 (金) 終了	「太陽内部の磁気乱流シミュレーション」 名古屋大学 宇宙地球環境研究所 教授 堀田 英之 様	磁気流体力学 ・ HPC
第 2 回	6 月 13 日 (金) 終了	「流体乱流における同期現象とデータ駆動型手法」 東京理科大学 理学部 第一部 応用数学科 准教授 犬伏 正信 様	データ同化、 機械学習
第 3 回	7 月 18 日 (金) 終了	「火災・爆発災害のリスク低減への燃焼研究の応用」 東京理科大学 創域理工学研究科 国際火災科学専攻 教授 土橋 律 様	火災・爆発 災害現象
第 4 回	8 月 1 日 (金) 終了	「AI 新時代を切り拓く政府の次世代 HPC 戦略の展望」 文部科学省 研究振興局 参事官 (情報担当) 付 計算科学技術推進室 室長 栗原 潔 様	政府の 科学技術政策
第 5 回	9 月 12 日 (金) 終了	「量子技術を応用した次世代流体解析基盤の確立に向けて」 九州大学 工学研究院 航空宇宙工学部門 准教授 久谷 雄一 様	流体理工学, 量子演算
第 6 回	10 月 17 日 (金) 終了	「火災・爆発現象のモデリングおよび早期異常検知」 東京理科大学 創域理工学研究科 国際火災科学専攻 教授 桑名 一徳 様	火災科学, 燃焼理論
第 7 回	11 月 7 日 (金) 終了	「AI とシミュレーションが駆動する創薬分子設計」 東京科学大学 情報理工学院 情報工学系 准教授 大上 雅史 様	AI 創薬
第 8 回	11 月 28 日 (金) 終了	「原子力から考える汎用解析コードの役割と可能性」 早稲田大学 理工学術院 先進理工学研究科 共同原子力専攻 教授 山路 哲史 様	総合理工学
第 9 回	12 月 19 日 (金) 受付中 お申込みはこちら 	「『計算・データ・学習』融合と富岳 NEXT, その先にあるもの」 東京大学 情報基盤センター スーパーコンピューティング部門 教授 中島 研吾 様	計算科学・ 計算機科学
第 10 回	2026 年 1 月 23 日 (金) 受付開始 12/9 お申込みはこちら 	「地層処分の安全評価におけるシミュレーションの活用と展望」 原子力発電環境整備機構 技術部 性能評価技術グループ グループマネージャー 石田 圭輔 様	地層処分

【お問い合わせ先】

アドバンスソフト株式会社 出版事業部

〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台四丁目 3 番地 新お茶の水ビルディング 17 階西

E-mail : office@advancesoft.jp <https://www.advancesoft.jp/>

当社では随時人材の募集も行っております。

<https://www.advancesoft.jp/recruit/>

Copyright © 2025 AdvanceSoft Corporation. All right reserved.