

火災と爆発のサイエンス

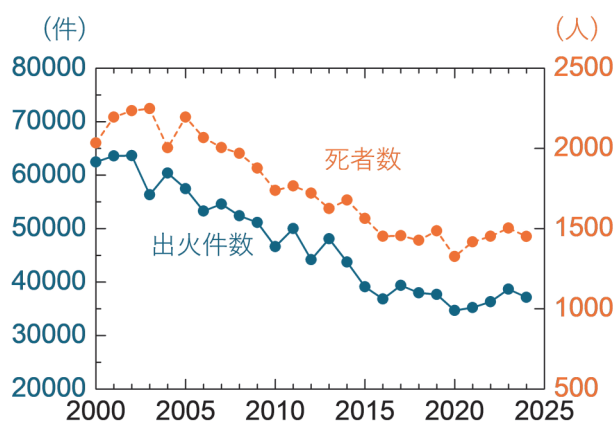
東京理科大学 創域理工学研究科 国際火災科学専攻 教授 | くわな かずのり
桑名 一徳

火災と爆発

私は火災や爆発現象の研究をしています。火災は、人の意図に反して可燃物が燃え始めて拡大する現象です。放火の場合は犯人の意図には反していないかもしれませんが、多くの人の意図に反しています。この定義によるとガス爆発も火災に含まれますが、火災と爆発はしばしば区別されます。その場合、比較的ゆっくり進む燃焼現象を火災、温度や圧力の急激な上昇が起こる場合を爆発と呼んで区別します。爆発現象は燃焼を伴わないこともあり、例えば水蒸気爆発では、水が高温の物質と接触することで一気に水蒸気になり、急激な圧力上昇や体積膨張が起こります。

2000年以降の出火件数と火災による死者数の推移を【図1】に示します。出火件数や死者数は長期的には減少傾向で推移していますが、この10年ぐらいはおおむね横ばいです。火災や爆発事故を未然に防ぐためには、あるいは事故が起こってしまったとしても被害を最小限に抑えるためには、これらの事象がいつどのように起こるのか、そして、どのように止めることができるのか、科学的に理解することが不可欠です。

私が所属している東京理科大学の国際火災科学専攻や火災科学研究所には火災科学の専門家が集結し、日々研究を行っています【写真1】。野田キャンパスにある火災科学研究所実験棟は、延べ面積が約1900m²、高さが約20mもあり、大学に付属する施設としては世界トップレベルの規模と機能を誇ります。火災の規模を表すために、しばしば発熱速度が用いられ、単位はキロワットやメガワットです。火災科学研究所実験棟にある排煙フードの下では、最大2メガ



【図1】 出火件数と火災による死者数の推移（総務省消防庁『消防白書』のデータをもとに作成）



【写真1】 東京理科大学火災科学研究所実験棟での実験風景（火災科学研究所ウェブサイトより）

ワットの火災実験を行うことができます。家庭用の電気ヒーターの消費電力がおよそ1キロワットですから、その2000倍の発熱速度の火災実験が可能です。私も、この実験棟を活用しながら火災・爆発研究を行っています。以下では、火災や爆発事故でみられるいろいろな現象について説明するとともに、関連する研究成果を紹介します。

タバコ火災

タバコが原因の火災は世界中で多く発生しています。日本でも、住宅火災の発火源別死者数（放火自殺者等を除く）のうち、最も多いのがタバコによるものです（令和7年版『消防白書』より）。

タバコの燃焼は炎を伴わない無炎燃焼です。タバコの葉が熱せられて熱分解を起こし、タールや一酸化炭素といった可燃性の揮発分が気相に放出されます（高沸点成分が凝縮し、湯気のように白く見えます）。この可燃性気体は燃焼せず、熱分解の後に残った炭化物が表面燃焼を起こします【図2】。これがタバコの燃焼メカニズムで、揮発分の放出後に残る炭素が表面燃焼することを燻焼といいます。燻焼時の温度は一般に1000℃以下です。ロウソクのように炎を伴う燃焼（有炎燃焼と呼びます）では炎の温度が通常1000℃以上になります。燻焼は有炎燃焼と比べると低温で緩慢な燃焼形態なのです。

タバコを可燃物の上に置くと、多くの場合、その可燃物は、はじめは燻焼します。燻焼しているタバコには、いきなり可燃物を有炎燃焼させるほどのエネルギーが無いからです。その後、徐々に燻焼領域が拡大し、燃焼に有利な条件がそろうと、揮発分が燃えはじめて有炎燃焼に遷移することがあります【写真2】。そして、ひとたび有炎燃焼が開始すると一気に火災が拡大します。つまり、燻焼から有炎燃焼への遷移の有無がタバコ火災の被害を左右します。

【写真2】のように可燃物の上にタバコを置いたと



【図2】 タバコの表面燃焼

しても、必ずしも有炎燃焼に遷移するわけではありません。むしろ、熱がこもりやすいとか、空気の流れがあり酸素が供給されやすいといった条件がうまくそろわないと有炎燃焼に至りません。私の研究室では、燻焼から有炎燃焼への遷移条件を詳しく調べています。

可燃物の熱分解により揮発分が放出される反応①、反応①で残った炭化物が表面燃焼する反応②、揮発分が空気中で燃焼する反応③の3つの反応を考えた解析を行いました。反応①と②が主として起こるのが燻焼、反応①と③が主として起こるのが有炎燃焼です。

解析で得られた結果¹⁾を【図3】に模式的に示します。横軸が空気中の酸素濃度で、縦軸が燃焼反応の最高温度です。破線は実際には実現できない不安定な解を表していて、物理的な意味はありません。実線で示したのが、実現可能な状態です。この解析の条件では、通常の空気中（酸素濃度が約21%）では燻焼しか起こりません（線香の燃焼などをイメージしていただければと思います）。酸素濃度を上げると燻焼温度も少しずつ上昇します。そして、酸素濃度が約37%になると燻焼状態を表す解が消滅し、有炎燃焼のみが可能になります。つまり、有炎燃焼への遷移が起こります。実際に、

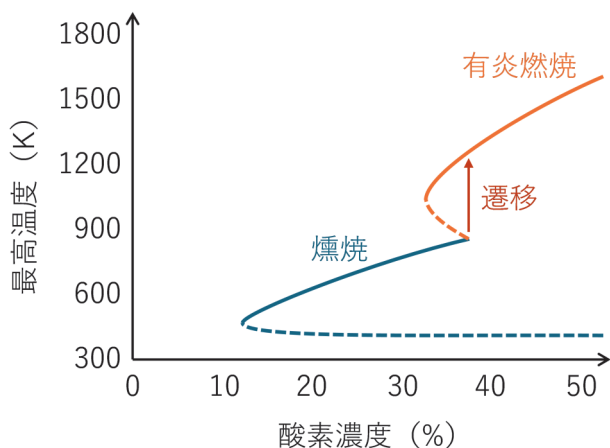


【写真2】 タバコ火災における燻焼から有炎燃焼への遷移。Tシャツの上にタバコを置いたところ、まず燻焼領域が拡大し（上の写真）、その後、有炎燃焼へ遷移する（下の写真）

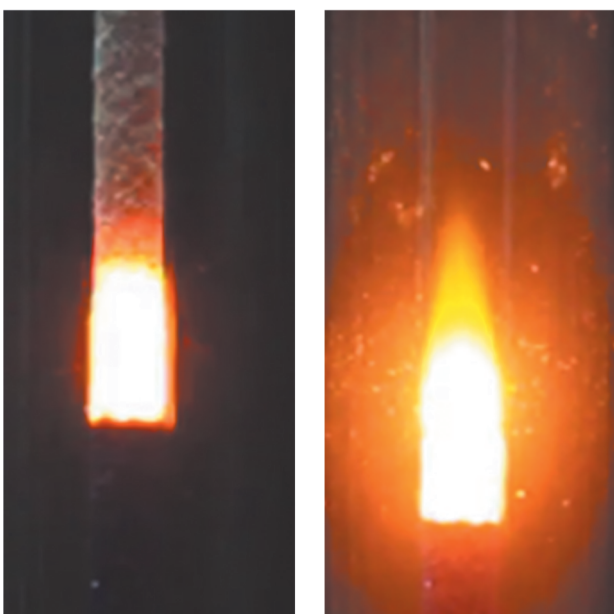
燻焼している線香に酸素を吹き付けると有炎燃焼に移ります。【写真3】は酸素濃度40%の条件で、石英管の中で線香を燃焼させたときの様子です。はじめは普通に燻焼していますが、やがて有炎燃焼へと移行します。

【図3】の条件では、酸素濃度を下げて12%程度以下になると燃焼を維持できず消えてしまいます。酸素濃度が32%~37%の範囲では燃やし方によって有炎燃焼も燻焼も可能です。

タバコや線香の燃焼は誰でも見たことがあるありふれた現象ですが、よく考えると奥が深いものだとわかります。【図3】の解析を行った Viriya-amornkij さん（タイからの留学生です）は、燻焼の研究で博士の学位を取得しました。



【図3】 燻焼から有炎燃焼への遷移条件



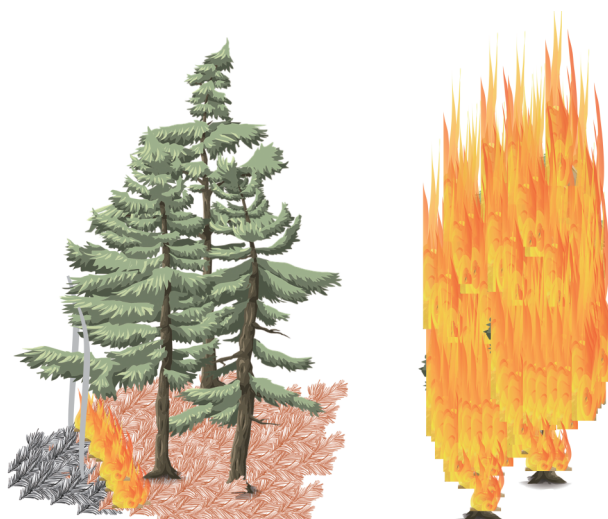
【写真3】 左：焦焼する線香 右：有炎燃焼する線香 (提供：門脇督氏)

林野火災

消防庁の定義によると、林野火災とは、森林、原野または牧野が焼損した火災のことです。山火事、山林火災、森林火災と呼ばれるものも林野火災に含まれます。

2025年には国内で大規模な林野火災が多発しました。それまで、日本の林野火災は減少傾向にあると言われていました。2015年から2024年の10年間の、日本国内の年間の林野火災による焼損面積の平均は700ヘクタール弱でした。ところが、2025年2月に岩手県大船渡市で発生した林野火災では合計3,000ヘクタール以上が焼損しました。同年3月に岡山県岡山市と愛媛県今治市で起きた林野火災でも、それぞれ480ヘクタール以上が焼損しました。2026年にも大きな林野火災が起きています。1月に山梨県上野原市で発生し、大月市にも延焼した林野火災では400ヘクタール近くが焼損しました。山梨県では過去最大規模の林野火災です。これらの火災では、少雨による乾燥と、季節風の強まりなどによる強風が延焼拡大に大きく寄与しています。日本の気候は比較的湿潤で、アメリカ西海岸のように夏に乾燥する地域と比べると、大規模な林野火災は起こりにくいと考えられてきました。しかし、地球温暖化に伴う気候変動のために今後は極端な気象条件が増えるという指摘もあり、国内でも大規模な林野火災が増える可能性があります。

林野火災での燃焼形態にはいろいろありますが、ここでは地表火（ちひょうか）と樹冠火（じゅかんか）を取り上げます。【図4】に模式的に示したように、地



【図4】 地表火（左）と樹冠火（右）



【写真4】 2025年大船渡市林野火災による焼損状況。左は地表火による焼損エリアで、右が樹冠火による焼損エリア

表火では、落ち葉や下層植生など、地面付近の可燃物だけを燃やしながらか延焼します。一方の樹冠火では、樹冠部の可燃物が燃焼し、樹冠上部でも延焼が起こります。

2025年の大船渡市林野火災でも大規模な樹冠火が発生しました。【写真4】の左は、地表火により焼損したエリアで、右が樹冠火発生エリアです。地表火では木の根元だけ炭化しているのに対し、樹冠火では、樹木全体が炭化しています。

樹木は熱を受けて炭化する過程で脆くなります。そして浮力流や風の力でちぎれて飛散することで火の粉が発生します。大規模林野火災では多くの場合、風が強いので、発生した火の粉が風に乗って未燃焼エリアまで飛び、延焼が拡大します。火の粉による飛び火です。火の粉が数百メートルかそれ以上飛散して飛び火することも珍しくありません。特に樹冠火が起こると火の粉が大量に発生するので、飛び火による延焼が広範囲に起こります。大船渡市林野火災では、200棟以上の建物が被害を受けるに至りました。

林野火災の延焼リスクを評価するためには、樹冠火の発生予測が重要です。そして、樹冠火は、地表火の勢いが増して炎が樹冠部に届くことで始まります。したがって、樹冠火の発生予測の第一歩として、地表火の延焼動態をよく理解しなければなりません。

地表火の延焼速度は、可燃物の性質はもちろん、風速や地形（傾斜など）の影響を強く受けます。大船渡



【図5】 地表火延焼シミュレーションの例

市を対象として、地表火の延焼シミュレーションを実施した例を【図5】に示します。このシミュレーションでは、風速と傾斜を与えれば延焼速度を求められる経験式を用いて延焼範囲が拡大する様子を計算しています。

林野火災は、鎮火したらめでたしめでたし、ではありません。焼損が激しい箇所では、倒木や土砂災害のリスクが高まっていることが懸念されます。実際、大船渡市では、2025年10月31日から11月1日にかけての大雨の影響で、大量の土砂や流木が漁港に流れ出ました。【写真5】に、焼損木が倒れた様子を示します。やがて、多くの焼損木が同じように倒れてしまうという指摘もあります。大規模林野火災が起こると、森林復興のあり方も考えなければなりません。

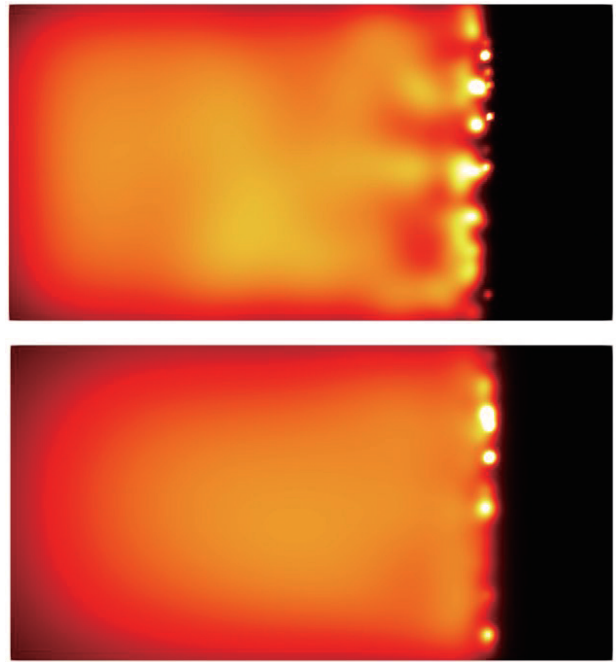


【写真 5】 倒れた焼損木

粉塵爆発

鉄の塊を燃やすのはとても難しいですが、鉄粉を浮遊させると割と簡単に火をつけられます。粉塵爆発は、空气中に浮遊している可燃性粉体群が着火し、高速で燃焼波が伝播する現象です。かつての日本では、炭鉱で炭塵が爆発する事故が多く起こりました。1963年には福岡県大牟田市で炭塵爆発が起こり、爆発の威力と発生した一酸化炭素により、458名が死亡するという大惨事となりました。粉塵爆発事故は近年でも決して珍しくはなく、2025年3月には愛知県豊田市にある工場で集塵機内のダストが粉塵爆発を起こし、従業員1人が死亡しました。

粉塵爆発現象に関する基礎的な知見を蓄積するためには、条件を制御した実験が必要です。ところが、例えば粉塵濃度を均一にした実験は容易ではありません。ガス爆発実験であれば、拡散現象により可燃性ガスと空気が混合するので、時間がたてばやがて濃度が均一になります。しかし、粉体粒子は拡散・混合しませんし、重力があるので、粉体を長時間にわたって浮遊させることもできません。微小重力環境での実験により基礎データを得る試みも進められています²⁾が、そも



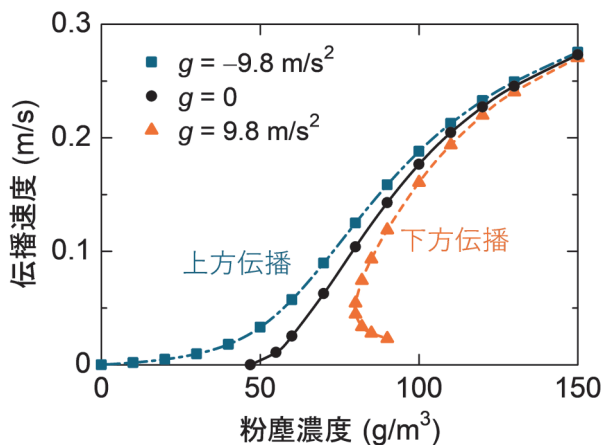
【図 6】 粉塵爆発の数値シミュレーション結果の例。上は発熱反応が速い条件での結果で、下は粒子間熱移動が速い条件での結果を表す

そも重力が粉塵雲中の燃焼波伝播に及ぼす影響についてほとんど調べられていません。そこで、粉塵雲中の燃焼波伝播をシミュレーションできる数理モデルを構築し、それにより粉塵爆発現象を解明することを目指しています^{3), 4)}。

それぞれの粉体粒子を点とみなし、ある粒子が燃焼することで発生した熱がその近傍にある粒子に伝わって次々と着火する様子をシミュレーションして得た温度分布の計算例⁴⁾を【図 6】に示します。燃焼波は右に向かって伝播していて、図の黒色の部分は未燃で低温な領域を表します。

発熱反応（燃焼反応）の速さと粒子間熱移動の速さのどちらが相対的に大きいかで温度分布の様相が変わります。【図 6】の上の図は、発熱反応が速い条件での結果で、個々の粒子が離散的に発熱している様子が温度分布に反映されています。下の図は、逆に粒子間熱移動が速い場合の温度分布で、粒子近傍の局所的な温度上昇が緩和されています。ところで、上の図も下の図も、同じ粒子配置に対して温度分布を計算したものです。同じ粒子配置を実験的に再現することは不可能ですが、シミュレーション上は粒子を好きなように配置できます。粒子サイズの分布を自由に設定するようなシミュレーションも簡単にできます⁵⁾。

同じ数理モデルを用いて、重力が燃焼波の伝播速度に及ぼす影響を評価した結果⁴⁾を【図 7】に示します。



【図7】 粉塵爆発現象における伝播方向の影響

重力加速度 $g = -9.8 \text{ m/s}^2$ の条件は上向きの伝播を表していて、 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ は下向きです。粉塵濃度が小さく、伝播限界に近い条件では、伝播方向の影響が顕著に見られます。上向きの伝播では粒子が燃焼波に向かって落ちてくるので、燃料供給が促進され、燃焼反応が強化されます。結果として、伝播速度も増加します。逆に下向き伝播では、粒子が燃焼波から逃げていくので燃焼反応が弱まり、伝播速度が遅くなります。

最後に

今回は、タバコ火災や林野火災、粉塵爆発に関する研究成果を紹介しました。火災実験や現地調査と、数理モデルを用いた数値シミュレーションを組み合わせることで研究を進めています。実験実施が困難な条件がありますし、現地調査だけではわからないことも多いので、数理モデルによる解析はとても強力な研究手法です。一方、いかなる数理モデルも完璧ではありません。数理モデルの妥当性を確認するためにも、実験データを得ることは重要です。これらをバランスよく組み合わせ、今後も火災・爆発研究を進めていこうと思います。

謝辞

林野火災について記載した内容は、JSPS 科研費 JP25K21634 の助成および東京理科大学マルチハザード都市防災研究拠点の支援を受けて実施した研究の成果をもとにしています。

参考文献

- 1) Viriya-amornkij, P. et al. (2026), A reduced model of smoldering-to-flaming (StF) transition, *Combust. Flame*, 284, 114654.
- 2) Kim, W. et al. (2021), Research on risk of dust explosions in microgravity for lunar and planetary exploration, *Int. J. Microgravity Sci. Appl.*, 38, 380204.
- 3) Kuwana, K. et al. (2023), Gravity effects on the minimum explosive concentrations in 1-D dust explosion, *Combust. Sci. Tech.*, 195, 1622–1636.
- 4) 桑名一徳 (2024), 連続体モデルと点熱源モデルによる粉塵爆発における重力の影響評価, *実験力学*, 24, 17–22.
- 5) 桑名ら (2021), 粉塵爆発下限濃度付近の燃焼挙動の検討, *安全工学*, 60, 101–108.