

アドバンス・シミュレーション 第6回 ・セミナー 2025

2025 年 10 月 17 日 (金) 開催

プログラム

1. アドバンスソフト株式会社についてと、先生のご紹介 1
2. **招待講演**
「火災・爆発現象のモデリングおよび早期異常検知」 3
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
3. アドバンスソフトからの情報提供 25

講演概要

「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・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。



アドバンスソフト株式会社 セミナー事務局

〒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

TEL: 03-6826-3971 FAX: 03-5283-6580

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

Copyright ©2025 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

アドバンスソフト株式会社についてと 先生のご紹介

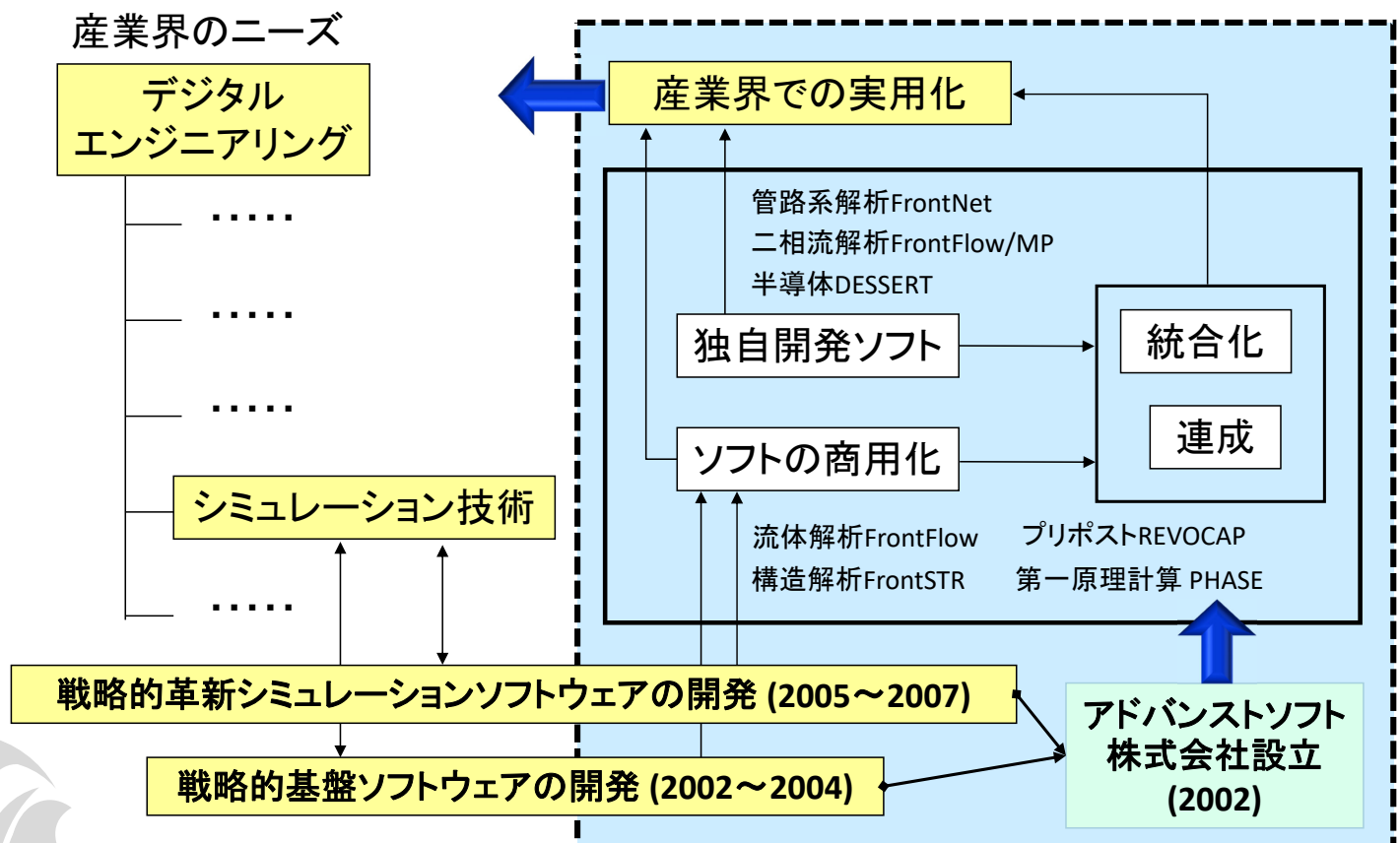
第6回 アドバンス・シミュレーション・セミナー 2025
(東京理科大学 創域理工学研究科 国際火災科学専攻
教授 桑名 一徳 様)

2025年10月17日（金）開催
アドバンスソフト株式会社

Copyright ©2025 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

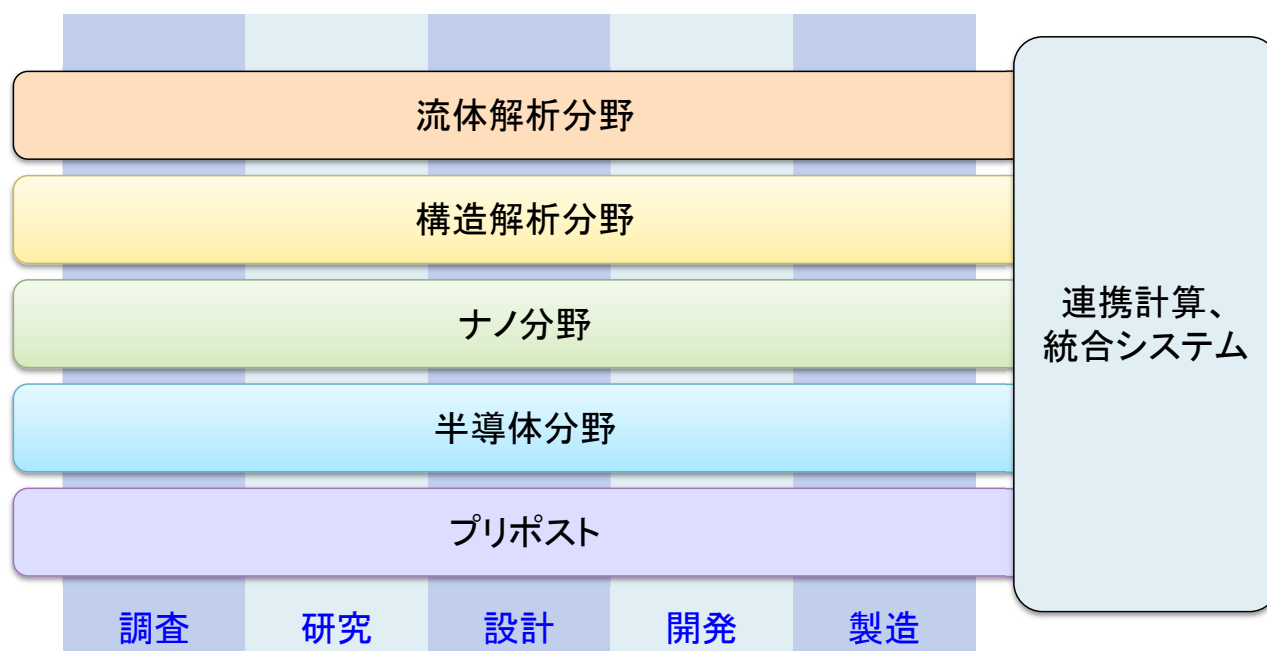
1

アドバンスソフトとは



Copyright ©2025 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

事業分野



産業の主要な分野のあらゆるフェーズで直面する課題に対し、
科学技術計算によるソリューションをご提供します。

桑名 一徳 先生 のご紹介

ご経歴

2000年	東京大学大学院修了，博士（工学）。
2000-2006年	米国ケンタッキー大学で研究員，
2006-2009年	東京大学で特任講師，特任准教授，
2009年	山形大学で准教授，
2019年	同 教授。
2021年4月	東京理科大学 創域理工学研究科 国際火災科学専攻 教授。

ご研究内容

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。

火災・爆発現象のモデリング および早期異常検知

桑名一徳

(東京理科大学 創域理工学研究科国際火災科学専攻)

火災・爆発現象と燃焼工学

本日のメニュー

火災・爆発現象	関連する燃焼現象
ガス爆発	予混合燃焼，火炎伝播，火炎の不安定性
粉塵爆発	微小粒子の燃焼，火炎伝播
タバコ火災	燐焼（表面燃焼），燐焼から有炎燃焼への遷移
屋内火災	フラッシュオーバー，バックドラフト
火災旋風	拡散燃焼（非予混合燃焼），火炎形状
山林火災	地表火，樹冠火，火の粉・飛び火による延焼

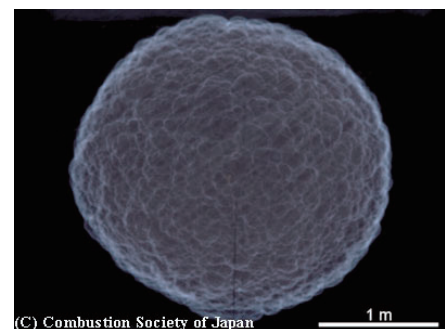
ガス爆発

土橋律先生（東京理科大学）による実験



ガス爆発

- ガス爆発は、**予混合火炎の伝播現象**
- 火炎伝播速度が速いほど、爆発被害が大きい
- 火炎伝播速度は、火炎面積に比例する
- 火炎を不安定化するメカニズム
 - ルイス数（熱拡散率と拡散係数の比）
 - 選択拡散（燃料と酸素の拡散係数が異なる場合）
 - 体積膨張
 - 浮力（上向き伝播は不安定）
- 予混合火炎は、**未燃側と既燃側を隔てる界面**



金・茂木・桑名・土橋
2013年『美しい炎』の写真展優秀作品賞
(フラクタル的な火炎構造)

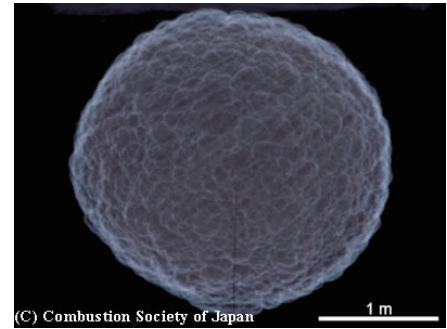


予混合バーナ火炎
下向き伝播なので、とても安定

↑ C_3H_8/Air

フラクタル次元

- 火炎伝播速度が速いほど，爆発被害が大きい
- 火炎伝播速度は，火炎面積に比例する
- 体積膨張に伴う火炎の自発的な乱れにより，火炎構造が**フラクタル的**になる
- フラクタル次元（膨張率に依存？）がわかれば，爆発被害を推定できる
Dobashi et al., Proc. Combust. Inst. 33 (2011) 2295-2301
- **フラクタル次元と膨張率の関係**を求めたい！



金・茂木・桑名・土橋
2013年『美しい炎』の写真展優秀作品賞
(フラクタル的な火炎構造)



予混合バーナ火炎
下向き伝播なので，とても安定

↑ C_3H_8/Air

Michelson-Sivashinsky方程式

Michelson & Sivashinsky, Acta Astronaut. 4 (1977) 1207

$$\dot{f} + \frac{1}{2}f'^2 + (\alpha - 1)f'' + 4f'''' = \frac{\gamma}{2\pi} \int_0^\infty k dk \int_{-\infty}^\infty f(\xi, t) \cos k(x - \xi) d\xi$$

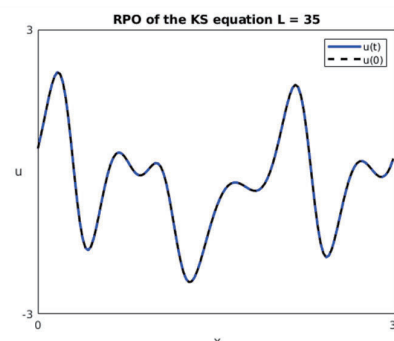
Lewis数効果

体積膨張の効果

$f(x, t)$ ：火炎形状を表すグラフ

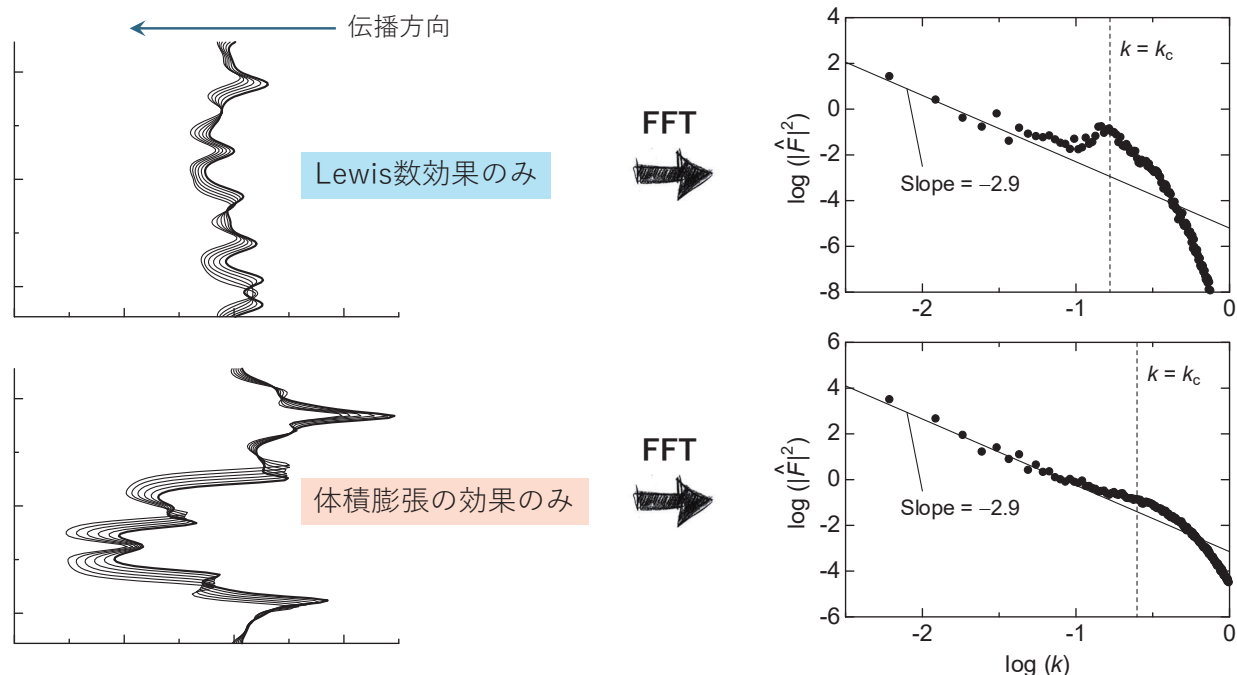
参考 Kuramoto-Sivashinsky方程式

$$\dot{f} + \frac{1}{2}f'^2 + f'' + f'''' = 0$$



By Mgolden96 - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=116538208>

不安定性と火炎構造



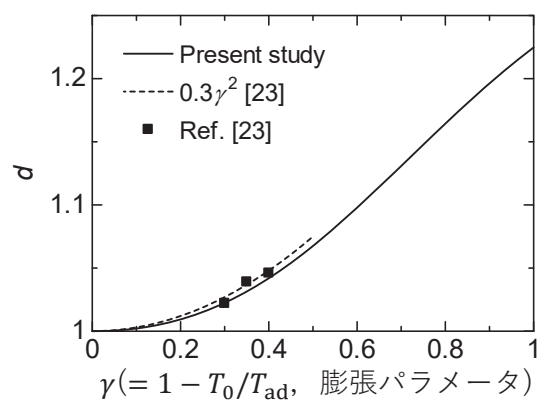
フラクタル次元と膨張率の関係

Michelson & Sivashinsky, Acta Astronaut. 4 (1977) 1207

$$\dot{f} + \frac{1}{2}f'^2 + 4f'''' = \frac{\gamma}{2\pi} \int_0^\infty k dk \int_{-\infty}^\infty f(\xi, t) \cos k(x - \xi) d\xi$$

体積膨張の効果のみ

- γ を変えて、たくさん計算すればよい？
 - 適切な変数変換で γ を消せる！
- Mukaiyama et al., Combust. Flame 160 (2013) 2471



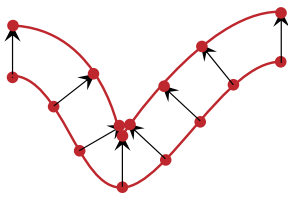
その他の界面追跡方法の例

(2次元シミュレーションで特に有効。山林火災などで応用可能！)

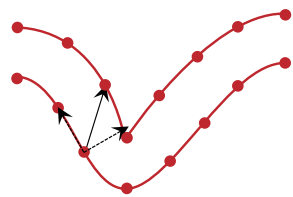
Goto et al., JSIAM Lett 10 (2018) 49-52

界面の移動速度が既知の場合

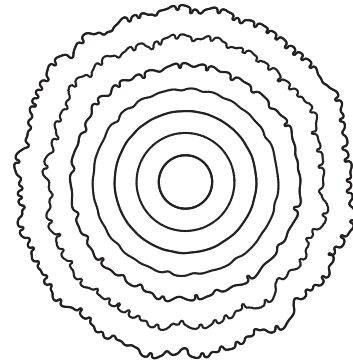
例：Kuramoto-Sivashinsky方程式は、 $V = 1 + (\alpha - 1)\kappa + 4\kappa_{ss}$ と同値
(V ：法線速度， κ ：曲率， s ：弧長パラメータ)



普通に解くと，格子点の粗密が生じる



一様に配置されるように接線速度を与える！



余談：G方程式

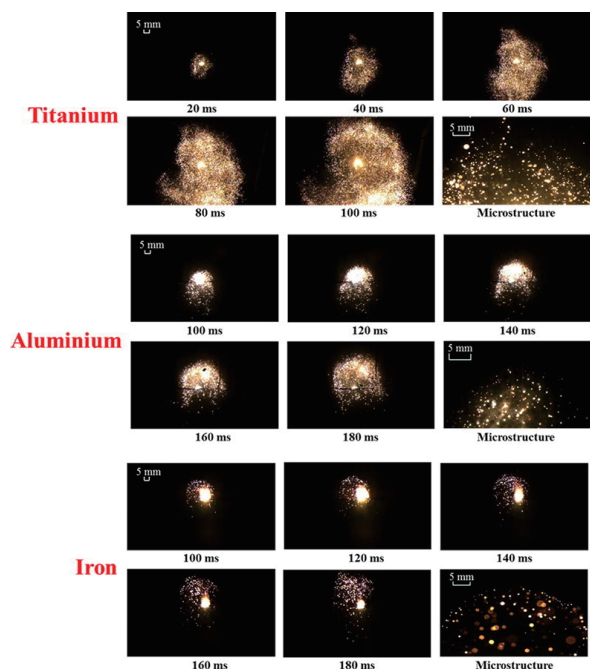
- 伝播する火炎面を追跡するモデル方程式（レベルセット法の一つ）
- 乱流燃焼シミュレーションでしばしば用いられる

Williams, The Mathematics of Combustion, SIAM, 1985, 97-131

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla G = s_T |\nabla G|$$

なぜ G なのか？

粉塵爆発



各粒子の燃焼・発熱を考慮するのは大変そう

➡ どこまでシンプルにできるか？

Gao et al., Powder Tech. 321 (2017) 154-162

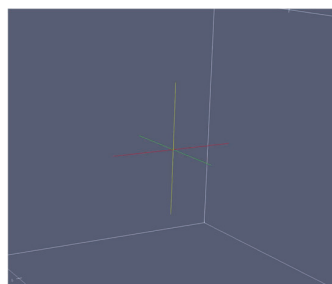
粉塵雲燃焼の（シンプルな）モデル

連続体モデル

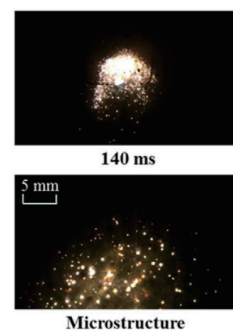
- ✓ 粉塵雲を連続相とみなす（拡散しないガスのようなイメージ）

点熱源モデル

- ✓ 個々の粒子の発熱を考える
- ✓ 連続体モデルより適用範囲が広いと期待される



点熱源モデルの計算例



アルミニウム粒子の燃焼
Gao et al., Powder Tech. 321 (2017)

モデルのシンプル化

モデルの仮定

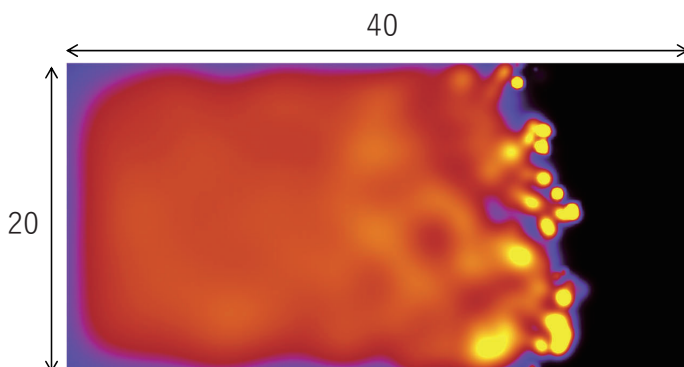
- 粒子温度 = 気相温度 (粒子が小さい)
- 着火温度 T_c と 燃焼時間 t_c の概念を導入
 - ➔ 粒子温度が T_c に達したら, 時間 t_c かけて燃焼
- 物性値の温度依存性を考えない (気相密度も)
 - ➔ 流れを既知として扱える
 - ➔ 気体は静止, 粒子は終端速度で落下

気相の熱方程式を
考えれば十分

$$\rho_g c_g \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_g \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q\omega$$

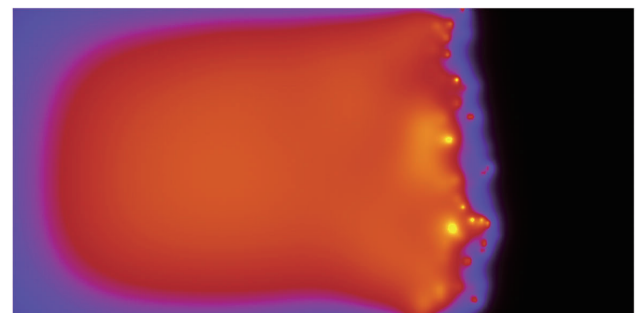
発熱項が連続的だったり離散的
だったり移動したりする

点熱源モデル



$$\tau_c = 0, T_{ig} = 0.1$$

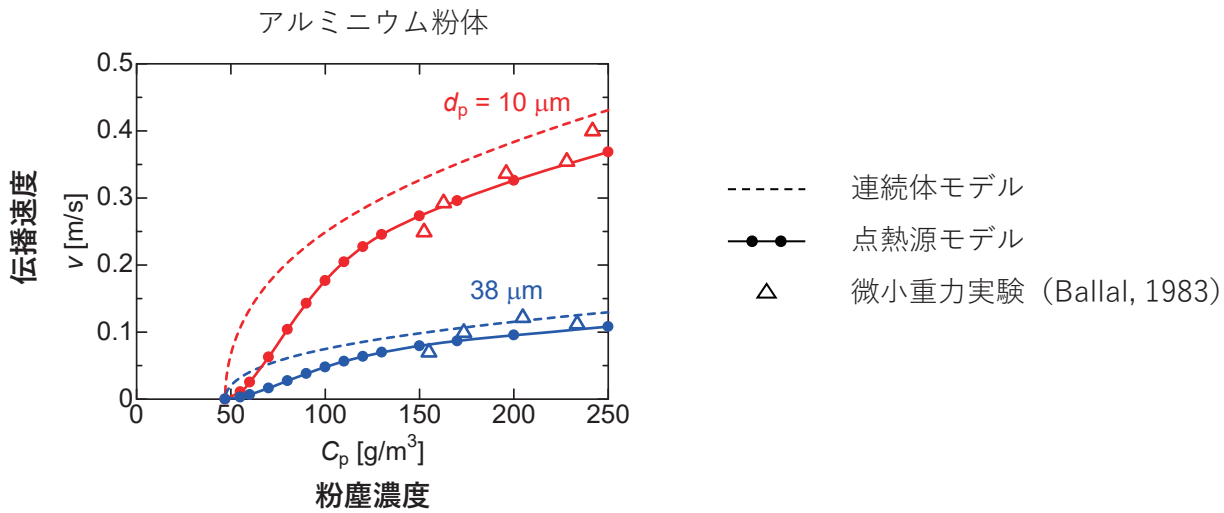
離散的な温度分布
(連続体モデルでは再現不可能)



$$\tau_c = 1, T_{ig} = 0.1$$

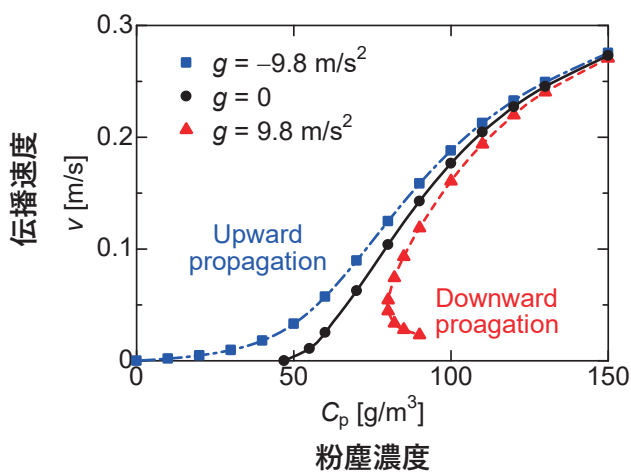
連続的な温度分布
(連続体モデルで再現できる)

実験結果（微小重力）との比較



桑名, 実験力学24 (2024) pp. 17-22

重力の影響



桑名, 実験力学24 (2024) pp. 17-22

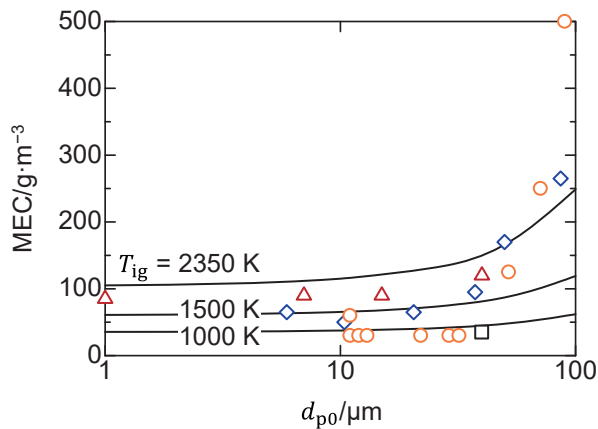
(熱損失がない場合)

- ✓ 重力がない場合は, 断熱燃焼温度が着火温度に等しくなる条件が伝播限界
- ✓ 下向き伝播では粒子が燃焼波から逃げるので, 伝播限界が高濃度側にシフトする
- ✓ 上向き伝播では粒子が燃焼波に向かって落ちてくる. 粉塵濃度が低くても伝播可能
- ✓ ガス燃焼の場合は, 1次元伝播は重力の影響を受けない

爆発下限濃度の予測

Kuwana et al., Combust. Sci. Tech. 195 (2023) 1622-1636

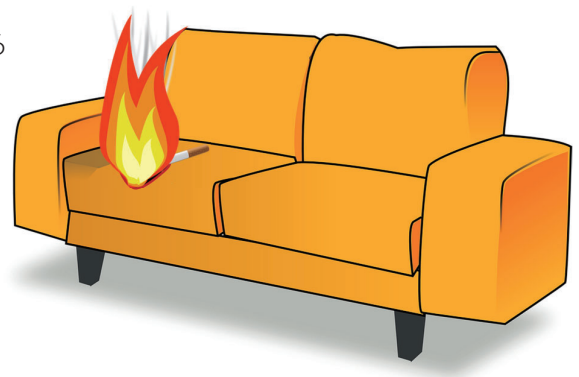
連続体モデルを用いて、**爆発下限濃度の予測**を試みた（熱損失を考慮）



- ✓ 粒径が大きくなると下限濃度が増加
- ✓ 粒径が小さくなると下限濃度が一定値に収束する傾向
- ✓ 下限濃度は着火温度に依存する
- ✓ 実験結果のバラツキが大きい

タバコ火災と有炎燃焼への遷移

- タバコ火災の発生が世界中で多く報告されている
- タバコにより着火された固体は、多くの場合まず燐焼する
→ 燐焼範囲が徐々に拡大する
- 燃焼に有利な条件がそろくと、有炎燃焼に遷移
→ 火災が急拡大する
- **有炎燃焼への遷移はタバコ火災の被害を大きく左右する**



燐焼から有炎燃焼への遷移



Tシャツの上にタバコ

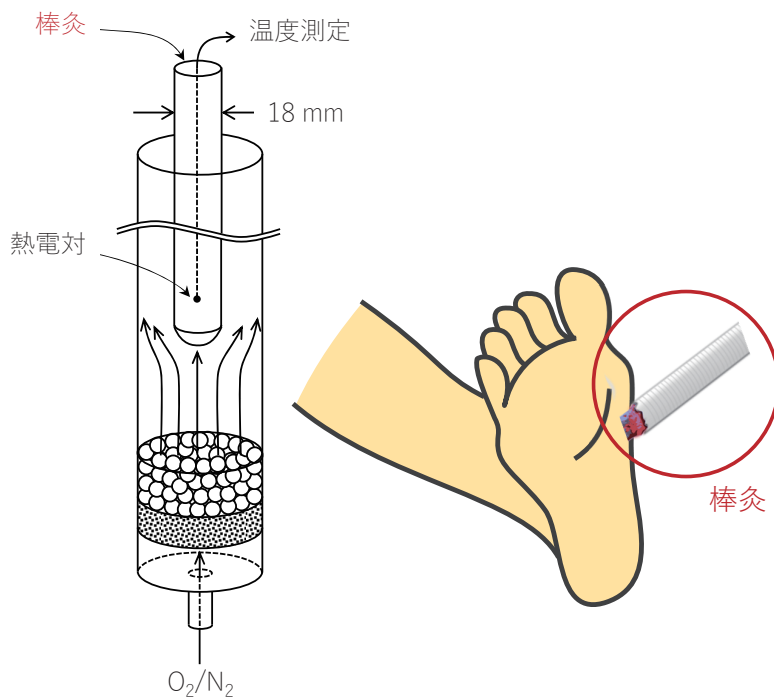


燐焼燃え拡がり

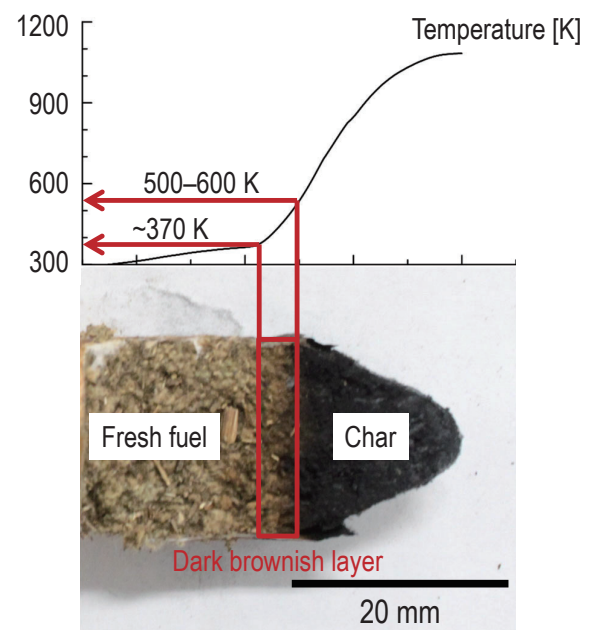


有炎燃焼への遷移！

実験

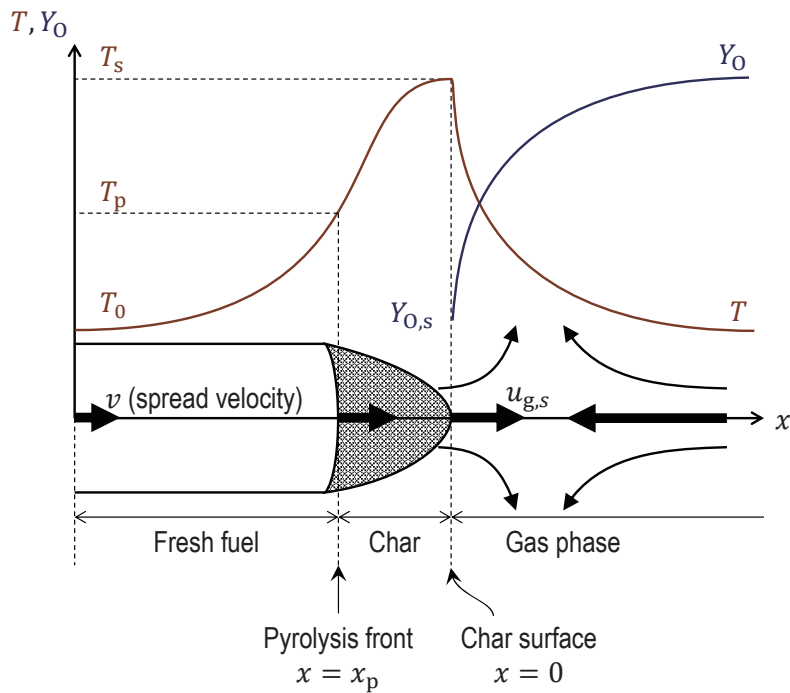


Kadowaki et al., Proc. Combust. Inst. 38 (2021) 5005-5013



A half-cut sample ($Y_{O,0} = 0.23$)

モデル構築



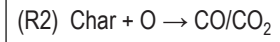
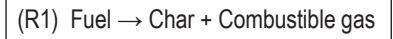
Five equations:

Mass balance equations

$$\rho_F v = \rho_g u_{g,s}$$

$$\rho_F v = \dot{\omega}_1''$$

$$v_{1,C} \dot{\omega}_1'' = \dot{\omega}_2''$$



$$\dot{\omega}_1'' = B_1 \rho_F e^{-E_1/RT_p}$$

$$\dot{\omega}_2'' = B_2 \rho_C \rho_g Y_{O,s} e^{-E_2/RT_s}$$

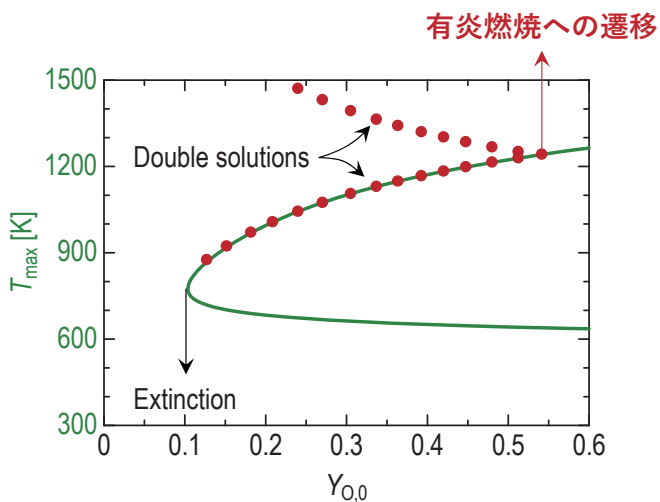
Energy & oxygen balance equations

$$Q_1 \dot{\omega}_1'' + Q_2 \dot{\omega}_2''$$

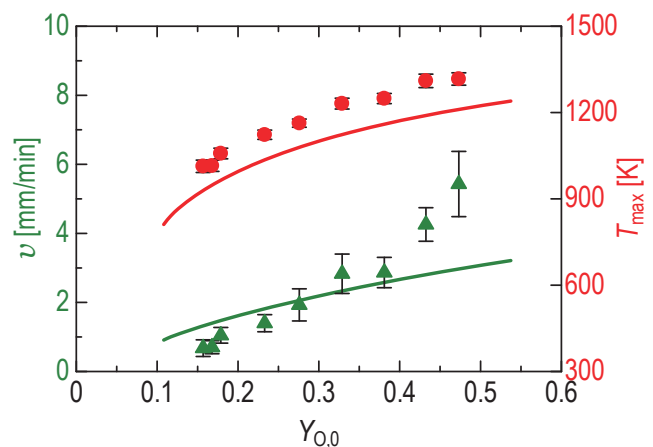
$$= \rho_g c_g u_{g,s} T_s - \rho_F c_F v T_0 - \lambda_g \left. \frac{dT}{dx} \right|_s + \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_0^4)$$

$$v_{2,O} \dot{\omega}_2'' = \rho_g \alpha_g \left. \frac{dY_O}{dx} \right|_s - \rho_g u_{g,s} Y_{O,s}$$

予測結果



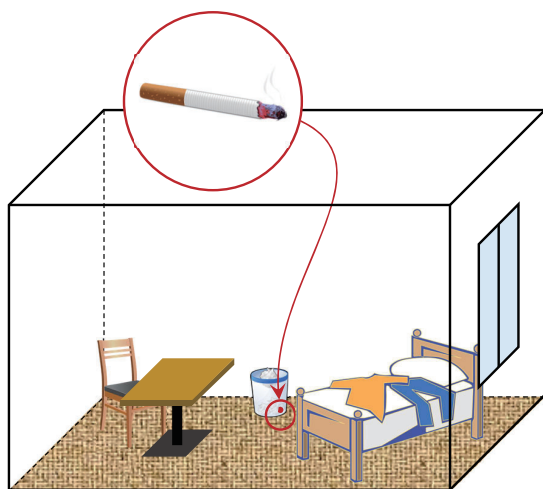
Maximum temperature, T_{max} , as a function of $Y_{O,0}$



Smoldering spread velocity, v , and maximum temperature, T_{max}

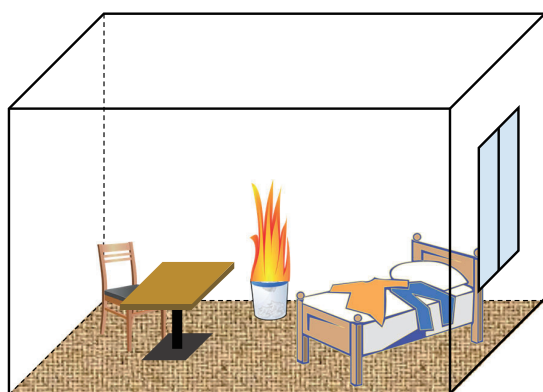
▲ ● Experimental data — — Predictions

屋内火災（フラッシュオーバー）



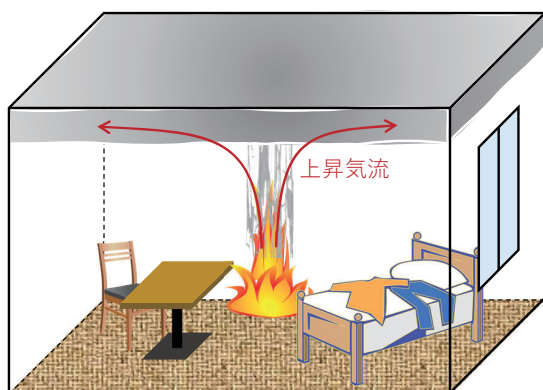
- ① タバコをしっかりと消さないままゴミ箱に放置

屋内火災（フラッシュオーバー）



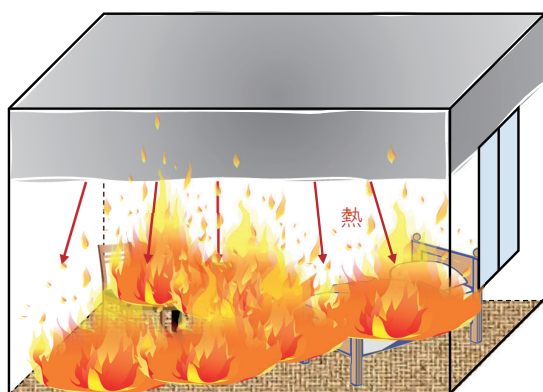
- ① タバコをしっかりと消さないままゴミ箱に放置
- ② 出火（燻焼から有炎燃焼への遷移）

屋内火災（フラッシュオーバー）



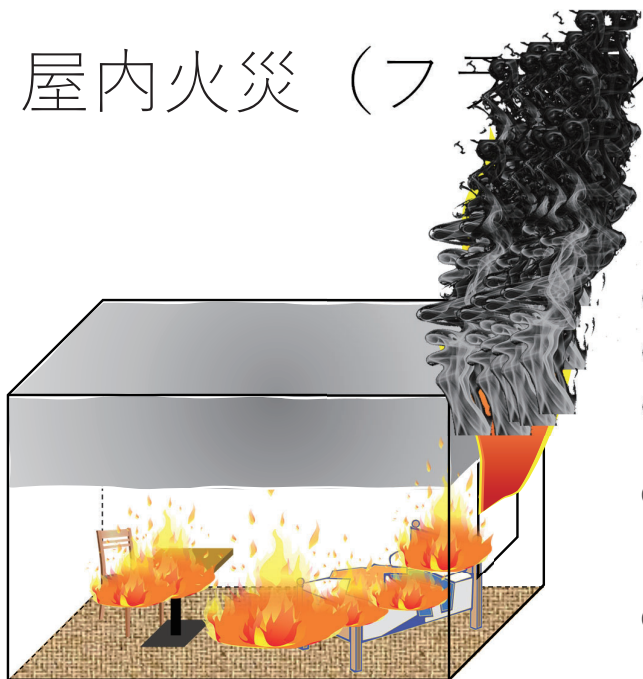
- ① タバコをしっかりと消さないままゴミ箱に放置
- ② 出火（燐焼から有炎燃焼への遷移）
- ③ **上昇気流により高温の煙が天井下にたまる**
(天井下の煙層の温度が上昇する)

屋内火災（フラッシュオーバー）



- ① タバコをしっかりと消さないままゴミ箱に放置
- ② 出火（燐焼から有炎燃焼への遷移）
- ③ 上昇気流により高温の煙が天井下にたまる
(天井下の煙層の温度が上昇する)
- ④ **煙層の温度がおよそ500℃に達すると、煙層からの熱により室内の可燃物が発火**
(フラッシュオーバー発生)

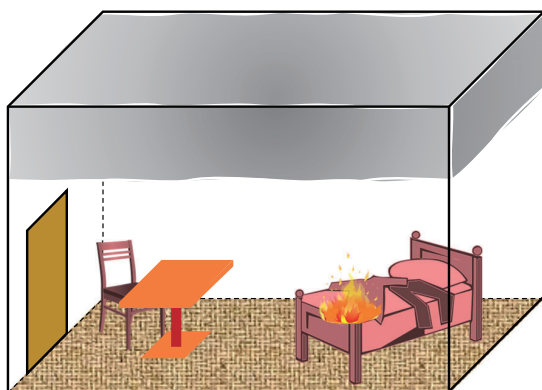
屋内火災（フラッシュオーバー）



- ① タバコをしっかりと消さないままゴミ箱に放置
- ② 出火（燐焼から有炎燃焼への遷移）
- ③ 上昇気流により高温の煙が天井下にたまる（天井下の煙層の温度が上昇する）
- ④ 煙層の温度がおおよそ500℃に達すると、煙層からの熱により室内の可燃物が発火（フラッシュオーバー発生）
- ⑤ 窓ガラスが割れ、炎が噴き出す（上の階などへの延焼の可能性）

屋内火災（バックドラフト）

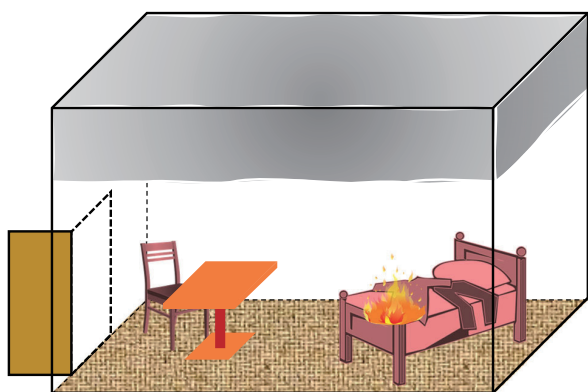
バックドラフト



部屋に開口部が無い場合、室内が高温で可燃性ガスが充満していたとしても、酸素が不足して燃焼が停止することがある

屋内火災（バックドラフト）

バックドラフト



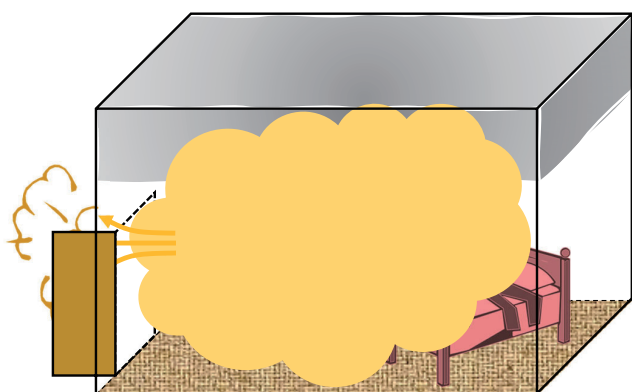
部屋に開口部が無い場合、室内が高温で可燃性ガスが充満していたとしても、酸素が不足して燃焼が停止することがある



扉を開けると……

屋内火災（バックドラフト）

バックドラフト



部屋に開口部が無い場合、室内が高温で可燃性ガスが充満していたとしても、酸素が不足して燃焼が停止することがある

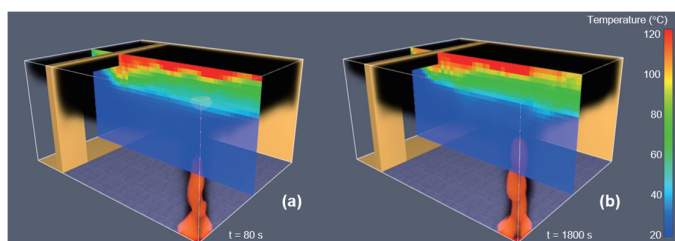


扉を開けると……

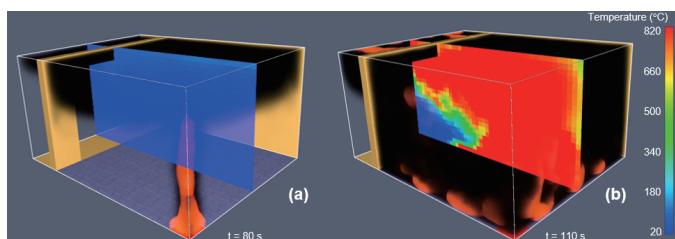
室外から酸素が供給され、急激に再燃焼する。ガス爆発現象のような急激な燃焼を伴う場合がある(**バックドラフト現象**)

火災室の扉を不用意に開けてはいけない

フラッシュオーバー現象の数値シミュレーション



フラッシュオーバーが起こらない条件

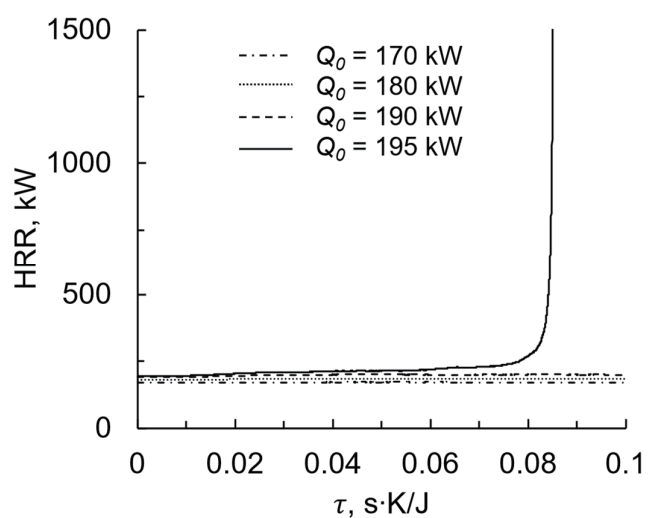


フラッシュオーバーが起こる条件

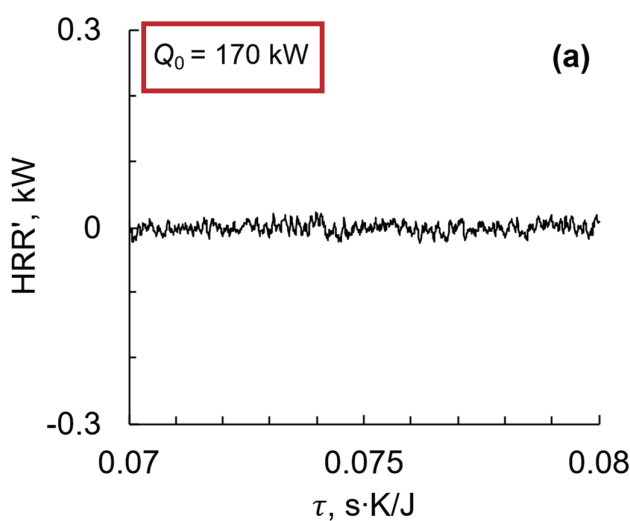
フラッシュオーバーが発生する**予兆を早期検知**できないか？

Thinnakornsutibutr et al., Fire Safety J. 150 (2024) 104264

フラッシュオーバーの早期検知



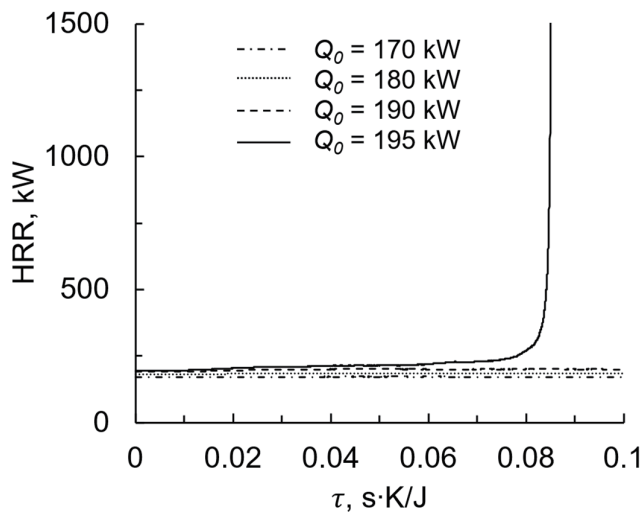
モデル方程式による発熱速度の計算



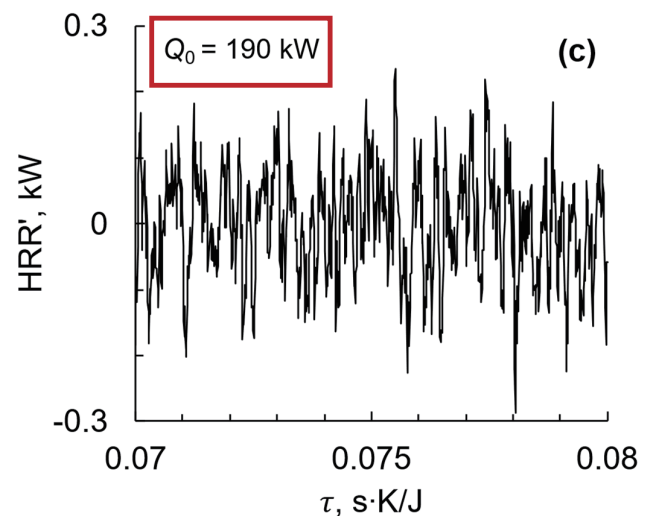
ノイズ成分

Thinnakornsutibutr et al., Fire Safety J. 150 (2024) 104264

フラッシュオーバーの早期検知



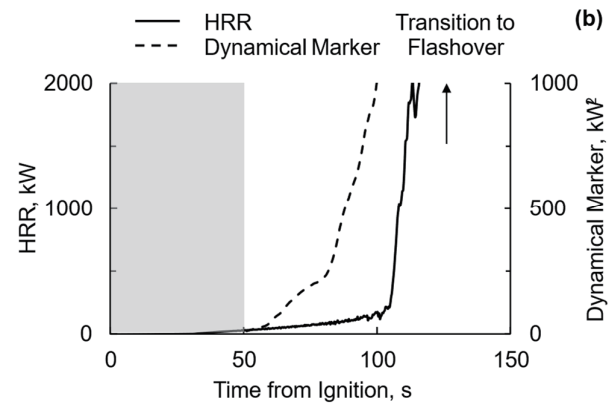
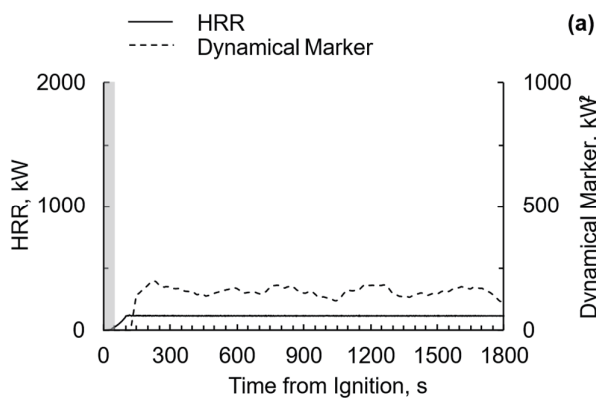
モデル方程式による発熱速度の計算



ノイズ成分

Thinnakornsutibutr et al., Fire Safety J. 150 (2024) 104264

フラッシュオーバーの早期検知



フラッシュオーバー検知指標 = 平滑化された発熱速度 × 標準偏差

Thinnakornsutibutr et al., Fire Safety J. 150 (2024) 104264

火災旋風

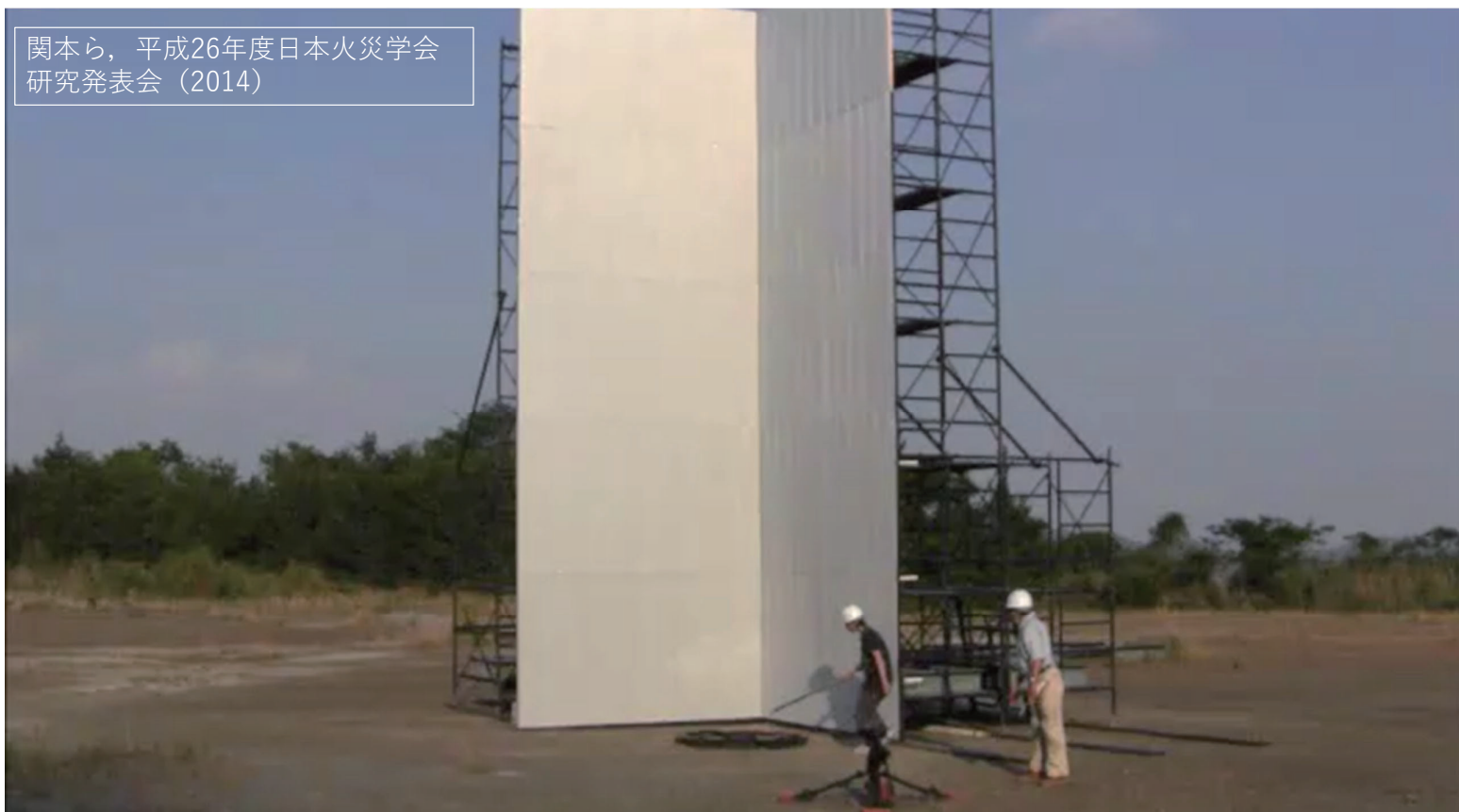


Ghodrat et al. (2021)

火災旋風

- 炎の竜巻のような現象
- 林野火災でしばしば目撃される
- 関東大震災では、火災旋風のために数万人が死亡
- 火災旋風が発生すると、局所的な延焼速度が増加する
- 飛び火の原因になる

関本ら，平成26年度日本火災学会
研究発表会（2014）



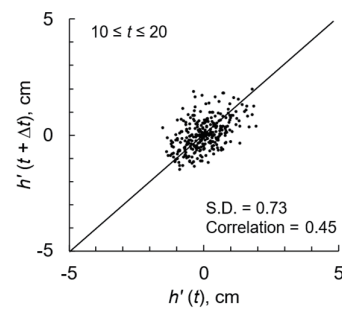
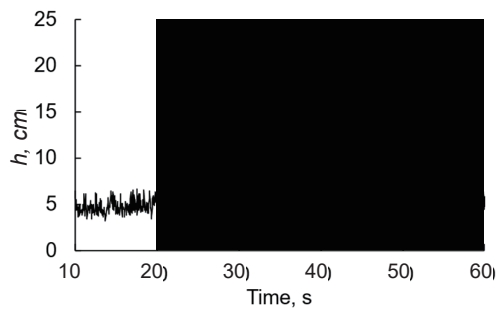
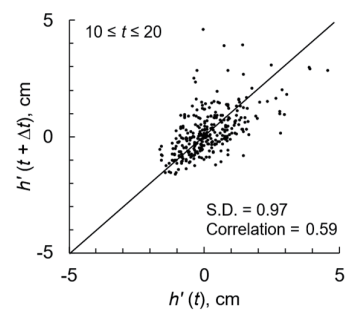
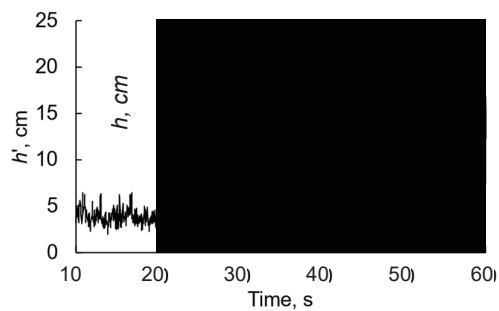


火災旋風発生を検知する



同じ条件で実験しても，火災旋風が発生するときとしないときがある
Thinnakornsutibutr et al., J. Therm. Sci. Tech. 19 (2024) 24-00194

火災旋風発生を検知する



山林火災

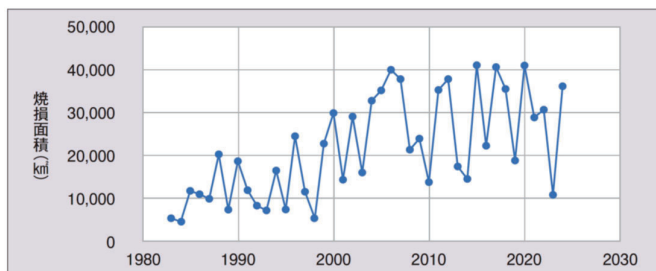


図 米国における林野火災での焼損面積

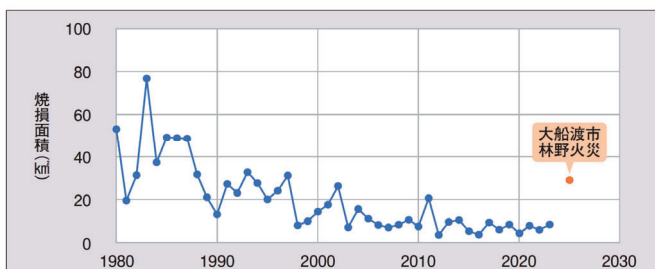


図 日本における林野火災での焼損面積

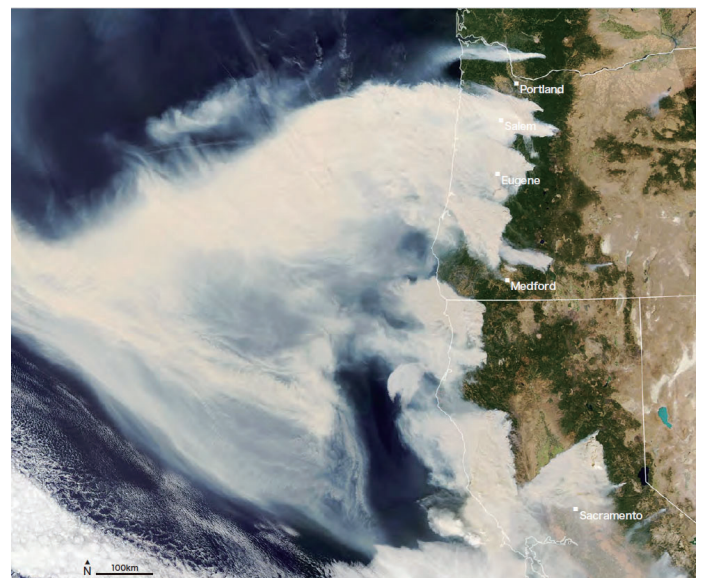


図 2020年9月8日の衛星写真 (NASA Earth Observatory)

『月間フェスク』2025年5月号より (日本消防設備安全センター発行)

山林火災



地表火
Surface fire

樹冠火
Crown fire

Weise et al. (2018)

地表火

- 地表近くの可燃物が燃焼する
- 延焼速度は、時速数キロメートル～10キロメートル程度

樹冠火

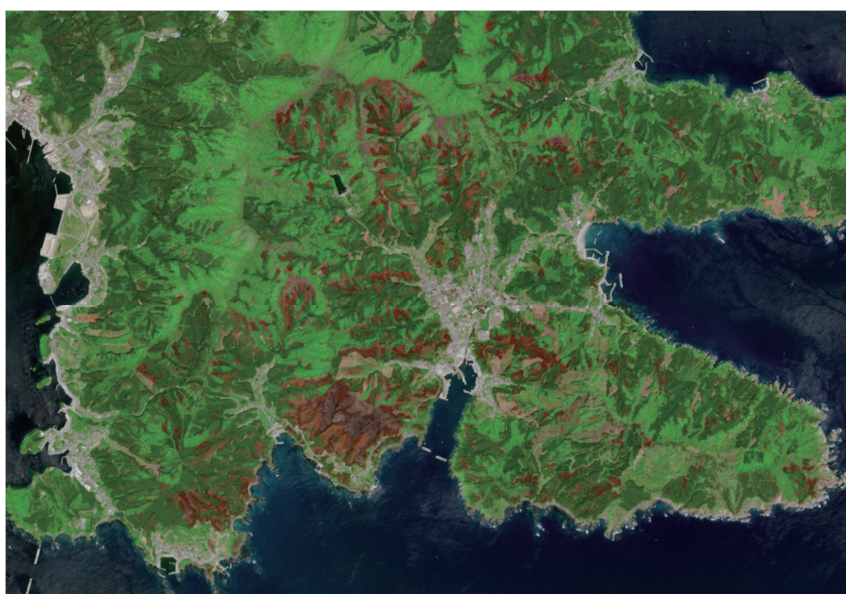
- 樹冠（枝や葉の層）が燃える
- 延焼速度は時速10キロメートル程度以上
- 地表火から遷移して起こることが多い
- 飛び火による延焼拡大（数百メートルにもおよぶ）

※ 出火原因は、たき火・火入れ・放火など、人為的要因によるものが圧倒的に多い（令和6年版「消防白書」より）



出火防止の徹底が重要

2025年大船渡市火災の延焼状況調査



国土地理院 色別標高図

May 13, 2025 (Copernicus Sentinel data obtained in 2025)

- ✓ 稜線や尾根筋を境に焼損の程度が変わる傾向が明らか（浮力流の影響だと思われる）
- ✓ 延焼シミュレーションでは、局地風と浮力流の相互作用を考慮することが不可欠



まとめ

- さまざまな火災・爆発現象のシンプルなモデルについて紹介した
 - シンプルなモデルは正確な予測をできないかもしれないが、現象を大まかに理解するのに役立つ
 - 詳細な数値シミュレーションと並行してシンプルモデルによる解析を行うことは意義がある（と信じたい）
- 異常現象の早期検知に関する研究例を紹介した
- 国内の山林火災発生状況について調査結果を紹介した

アドバンスソフト
からの情報提供

1. 今後のセミナー予定
2. セミナー資料のダウンロード
3. アーカイブ動画のご案内

Copyright ©2024 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

今後のセミナー予定

第7回

2025年11月7日（金）
14：00～15：30

「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

受付中

第8回

2025年11月28日（金）
14：00～15：30

「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

受付中

Copyright ©2024 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

下記のURLから、過去のセミナー資料をダウンロード可能です。
<https://www.advancesoft.jp/download/>



Copyright ©2024 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

YouTubeにて、セミナーのアーカイブ動画を配信中
<https://www.youtube.com/user/advancesoft>



Copyright ©2024 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.



警告

このレポートに収録されている文章および内容については、ご自身のために役立てる用途に限定して無料配布しています。
このレポートを、販売、オークション、その他の目的で利用するには、著作権者の許諾が必要になります。
このレポートに含まれている内容を、その一部でも著作権者の許諾なしに、複製、改変、配布を行うことおよびインターネット上で提供する等により、一般へ送ることは法律によって固く禁止されています。