

2021年度共同利用研究報告書

2022年05月30日

所属・職名 東京理科大学 理工学研究科 国際火災科学専攻・教授

桑名 一徳

		整理番号	20210007	
1.研究計画題目	燃焼・消炎機構の数理に基づく火災・爆発の安全対策			
2.新規・継続	新規			
3.種別	プロジェクト研究			
4.種目	短期共同研究			
5.研究代表者	氏名	桑名 一徳		
	所属 部局名	東京理科大学 理工学研究科 国際火災科学専攻	職名	教授
6.研究実施期間	2021年09月06日(月曜日)～2021年09月06日(月曜日)			
	2022年03月07日(月曜日)～2022年03月08日(火曜日)			
7.キーワード	火災・爆発安全, 火災伝播, 消炎			
8.参加者人数	13人			

9.本研究で得られた成果の概要

火災や爆発事故の未然防止や被害の最小化のためには火災・爆発現象の科学的な理解が不可欠である。しかし現状では定量的リスク評価を可能にするための研究が十分とはいえず、経験則に基づいた安全対策が広く行われているのが実情である。火災・爆発現象の数理モデルを確立することにより科学に基づいた安全対策を可能にし、経験則に依存している現状からの脱却を目指すのが本研究の目的である。

具体的な研究対象として、ガス爆発や粉塵爆発における着火・消炎現象や、不安定性による火災伝播の加速現象、可燃性固体の燃え拡がり現象、森林火災における火災ダイナミクス（火災旋風の発生等）を設定した。粉塵爆発研究では、燃焼下限濃度を予測できる数理モデルを構築し、実験結果を矛盾なく説明できることを確認した。2020年度に開始した火災旋風に関する研究では、本年度に得られた成果を加えた論文がCombustion Science and Technology誌に掲載されている

(<https://doi.org/10.1080/00102202.2021.2019234>)。今後は、燃焼不安定性などに関する共同研究をさらに進めることを計画している。

成果報告書「燃焼・消炎機構の数理に基づく火災・爆発の安全対策」

参加者

桑名一徳（東京理科大学，代表），福本康秀（九州大学），松江要（九州大学），
矢崎成俊（明治大学），出原浩史（宮崎大学），小林俊介（京都大学），
倉橋香那子（東京ガス株式会社），山崎将英（東京ガス株式会社），
堅田龍之介（東京ガス株式会社）

概要

火災や爆発事故の未然防止や被害の最小化のためには火災・爆発現象の科学的な理解が不可欠である。しかし現状では定量的リスク評価を可能にするための研究が十分とはいええず、経験則に基づいた安全対策が広く行われているのが実情である。火災・爆発現象の数理モデルを確立することにより科学に基づいた安全対策を可能にし、経験則に依存している現状からの脱却を目指すのが本研究の目的である。

具体的な研究対象として、ガス爆発や粉塵爆発における着火・消炎現象や、不安定性による火炎伝播の加速現象、可燃性固体の燃え拡がり現象、森林火災における火炎ダイナミクス（火災旋風の発生等）を設定した。粉塵爆発研究では、燃焼下限濃度を予測できる数理モデルを構築し、実験結果を矛盾なく説明できることを確認した。2020年度に開始した火災旋風に関する研究では、本年度に得られた成果を加えた論文が *Combustion Science and Technology* 誌に掲載されている (<https://doi.org/10.1080/00102202.2021.2019234>)。今後は、燃焼不安定性などに関する共同研究をさらに進めることを計画している。

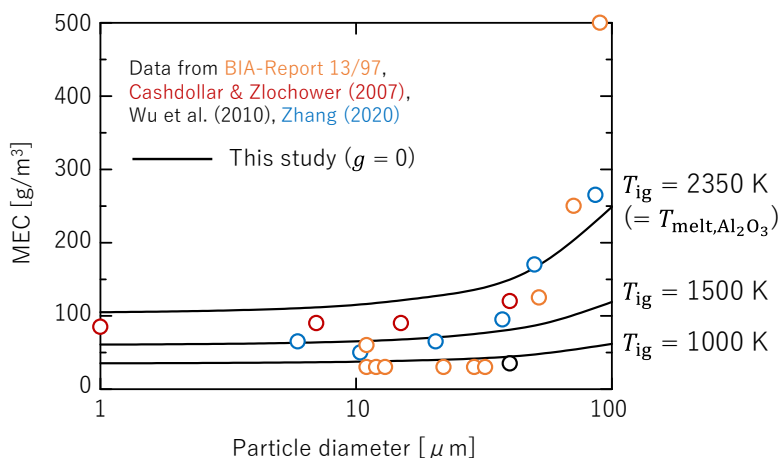
実施内容および成果報告

2021年9月6日（月）に非公開のオンラインミーティングを開催し、研究内容に関する打ち合わせおよび意見交換を行った。2022年3月7日（月）、8日（火）にも短期共同研究を実施し、3月8日（火）には公開のオンラインワークショップを開催して意見交換を行った。さらに、火災旋風発生時の火炎形状に関する理論解析を実施し、論文を *Combustion Science and Technology* 誌に投稿した。研究成果を以下にまとめる。なお、以下の各項目の報告者は、3月8日（火）の公開プログラムでの報告者を意味する。

粉塵爆発限界とガス爆発限界の比較（報告者：桑名一徳）

ガス爆発現象の数理解析では一般にアレニウス型の反応速度が仮定され、熱損失を考慮することにより燃焼限界条件を予測できる。しかし粉塵爆発における個々の粉体粒子の反応は複雑で、アレニウス型の反応速度式で表すのは困難である。一方、安全工学分野では可燃性粉体の粉塵爆発危険性の評価指標として着火温度が広く用いられている。本研究では、着火温度に基づいた反応モデルを用いた数理モデルを構築し、既往の実験データを説明で

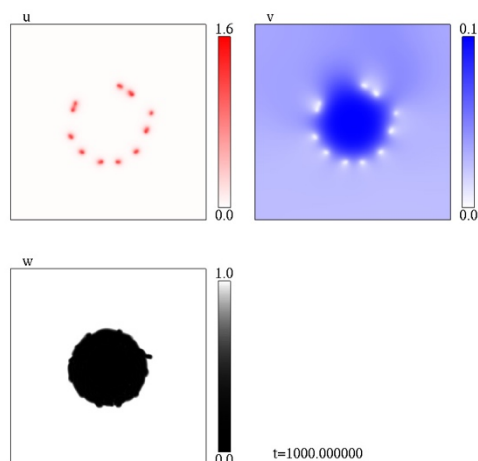
きるか検証を行った。異なる粒子径に対して爆発下限濃度の実験データと計算結果を比較したところ、着火温度を適切に設定すれば実験結果と矛盾しない結果が得られることがわかった（下図）。このことは、粉塵爆発性状の理論予測のためには着火温度の正確な評価が不可欠なことを示唆している。可燃性粒子の着火温度評価モデルについて今後研究を進める予定である。



図：爆発下限濃度（MEC）と粒径の関係

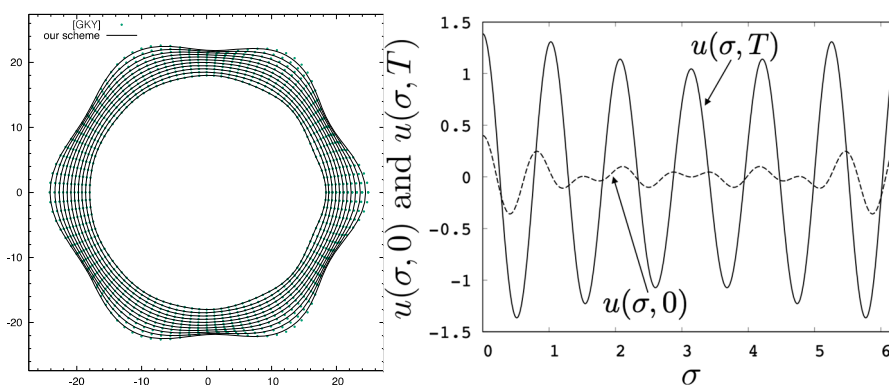
狭い空間での燃焼の数値モデル解析（報告者：出原浩史）

狭い空間での紙の燃焼を記述する数値モデルを解析した。酸素供給と燃焼波の進行方向が同一の場合（並行流燃焼）と逆向きの場合（対向流燃焼）の両方を対象とした。対向流燃焼、並行流燃焼ともにて、酸素供給速度に応じて燃焼パターンの性質が変化する様子が数値モデルにより再現され、実験結果とよく一致した（右図は並行流燃焼のシミュレーション例）。これらの複雑な燃焼は燃焼面の不安定化に起因するため、2次元の一樣燃焼面の不安定化問題を数値的に考察した。この問題は反応拡散系の2次元平面進行波解周りでの固有値問題に帰着され、固有関数をz軸方向とy軸方向に分離することにより、y軸方向の不安定化を取り出すことができる。今回、不安定化に最も寄与する各モードの実部最大固有値を計算したが、予想される結果に比べ若干の誤差が生じた。今後この誤差について詳細に検討することで、燃焼面の不安定化に対してさらなる理解が可能になると考えている。



燻焼波面のダイナミクスの数理解析へ向けて（報告者：小林俊介）

紙などの水平に置かれた薄い固体における燻焼現象の数理解析モデルとして、ある界面方程式が提案されている。このモデルは、定数、曲率、曲率の弧長による二階微分の3つの項の線形結合として法線方向速度が規定されている。本研究では、この界面方程式の解の定性的性質を調べるため、厳密解である円周解近傍における摂動の時間発展方程式の導出、ならびに摂動方程式に対する数値解析をおこなった。摂動方程式は非自励系の四階放物型非線形偏微分方程式として得られるが、これについて空間・時間の両方について全離散化し、その差分方程式の解の存在性・一意性・厳密解への二次の収束性を証明した。界面方程式と摂動方程式の双方に対する数値シミュレーションの比較により、界面方程式の解の挙動、ならびに解の不安定化を精度良く近似できていると言える（下図）。今後は、曲面上へと理論展開し、空間曲線の時間発展方程式の導出、ならびに解の定性的性質の解析へと進めていく。



図：（左）界面方程式と摂動方程式の数値計算結果。（右）摂動方程式の数値解の形状

予混合火炎面の拡散・熱不安定性に対する密度変動の効果（報告者：福本康秀，松江要）

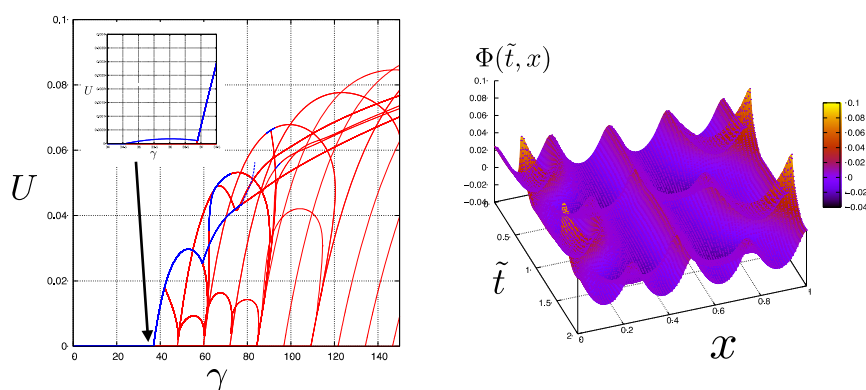
予混合燃焼において、60年代からニュートンによる経験則を用いたバルク熱損失のモデル化が行われて、それによる安定性解析が盛んに行われてきた。ニュートン則から導かれる結果によって実験事実を説明できるが、ニュートンの経験則の起源は追求されてこなかった。熱伝導方程式において、通常は省略される圧力変動の項を考慮し、この項を通じて取り込んだ重力の効果が、ニュートン則に従うバルク熱損失項と等価であることを見出した。

化学反応に加えて重力の効果をとり込んだ熱伝導方程式にもとづいて、層流火炎速度に対する重力の効果を計算した。火炎速度は、厚さ数十マイクロンも反応層とそれを包むサブミリの予熱層からなる薄い層状領域で、特異摂動法を用いて、熱伝導方程式と反応物質の拡散方程式の連立系を解くことによって導かれる。重力の作用で火炎速度が減少すること、さらに重力効果が強くなる消炎が起こる可能性を示した。

重力環境下における流体力学的不安定な予混合火炎動態の全体像（報告者：松江要）

全ての予混合火炎は熱膨張に起因する「流体力学的不安定性」が内在している。すなわち、

伝播火炎面の微小摂動が時間と共に増幅するという性質がある。様々な実験・理論的な考察を経て、火炎伝播速度の火炎伸長率と Markstein 長依存性が明らかになり、火炎伸長が流体力学的不安定性を制御する機構も明らかになっている。一方、他の物理化学的因子、例えば重力による火炎動態の影響など、未知な機構は多く残されている。本研究は重力の影響にスポットを当て、重力と Markstein 長の変化に伴う火炎動態の全体像を解明するものである。本研究では予混合火炎の基礎方程式に基づく「流体力学モデル」、熱膨張率が 1 に限りなく近いことを仮定して導出される「Sivashinsky 方程式」の解の安定性を考察した。前者による現実の炎に限りなく近い定性的性質、後者による分岐理論を援用したパラメータ族としての火炎動態の全体像の抽出を合わせて、現実の炎が持つ定性的性質の解明を試みた。共通して見られる機構として「重力が増えると火炎伝播速度が下がる」「正の重力が生じると、炎の曲がりを表すカスプ状構造が分離する」「Markstein 長の変動の仕方によって、同一環境下における安定な火炎の形状が複数あり得る（ヒステリシス構造）」「重力が十分大きいと、時間周期的に振動するプロファイルが出現する」などが観察された。前者 2 つは基礎方程式に近い流体力学モデルでも観察されたものであり、複数のモデルで観察される機構を通して、現実の炎の振る舞い（今回は、特に重力の影響）の全体像の記述が可能となると期待される。

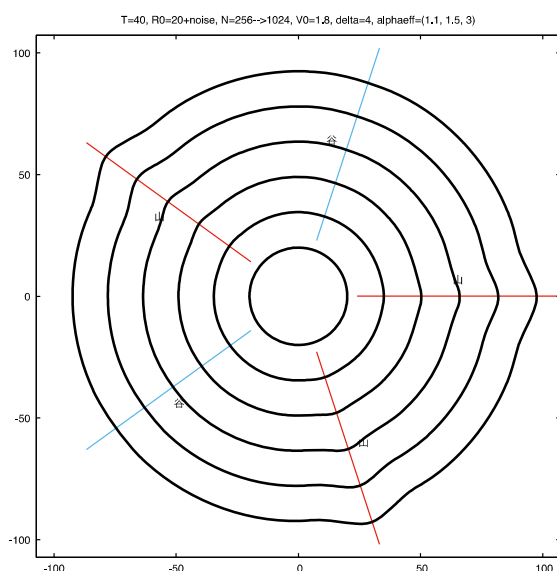


図：重力が充分大きい時の Sivashinsky 方程式の定常解・時間周期解の分岐図式(左)、時間周期的な火炎面プロファイル(右)

折れ曲がった紙の燃焼について（報告者：矢崎成俊）

ここ数年、弘前大学の鳥飼研究室を中心に、蛇腹折りの紙の燃焼の実験的研究が進んでいる。平坦な紙と折れ曲がった紙では、燃焼の仕方が異なるのは想像に難くないが、折り方を細かく蛇腹状にしていくと、燃焼速度が遅くなる傾向が実験的に観察されている。細かく折ると燃焼速度が低下するという現象は、防災の観点からは非常に魅力的な話である。本研究の目的は、実験の検証や実験では難しい細かい折り方、未だ実験されていない設定など、

種々の状況下で、折れ曲がった紙の燃焼，特に燃焼前線を Kuramoto-Sivashinsky 方程式を用いて数値的に追跡することである。その結果，非一様なルイス数を用いて，床面付近に山・谷折りを施した紙を置いた場合，山折り（床面から離れる方が山）の方が谷折りよりも燃焼が早く進行する傾向があることがわかった。以下は，1つのサンプル図である。



図：中心付近から外側に向かって燃焼が進む。赤線が山折り，青線が谷折り

火災旋風に関する研究

火災旋風に関する研究を実施した。火災旋風は火災時に生じる竜巻状の炎であり，林野火災や都市火災でたびたび観察される（下図）。火災旋風が発生すると火炎高さが著しく増加し，延焼速度の上昇へとつながる。したがって，火災旋風発生時の火炎形状予測は火災安全上重要である。2020年度に火災旋風に関する共同研究を開始し，論文を執筆した。この論文に混合分率モデルによる火炎形状計算方法について本年度に得られた成果を加えたものが Combustion Science and Technology 誌に掲載されている

(<https://doi.org/10.1080/00102202.2021.2019234>)



図：野外実験で再現された火災旋風の様子

九州大学 IMI 共同利用・短期共同研究 公開プログラム

燃焼・消炎機構の数理に基づく火災・爆発の安全対策

Fire and explosion safety: Measures based on mathematics of combustion and extinction

日時： 2022年3月8日（火） 13:00 ～ 17:20
場所： 九州大学 伊都キャンパス ウエスト1号館 D棟5階
中講義室（W1-D-512）
（対面+オンラインのハイブリッド形式）
研究代表者： 桑名 一徳（東京理科大学・教授）



※プログラムは都合により変更になる場合がありますので予めご了承ください。
最新情報はホームページをご覧ください。

3月8日（火）

13:00-13:40

桑名 一徳（東京理科大学）
粉塵爆発限界とガス爆発限界の比較

13:40-14:20

出原 浩史（宮崎大学）
狭い空間での燃焼の数理解析

14:20-15:00

小林 俊介（京都大学）
燻焼波面のダイナミクスの数理解析へ向けて

15:20-16:00

福本 康秀（九州大学マス・フォア・インダストリ研究所）
予混合火炎面の拡散・熱不安定性に対する密度変動の効果

16:00-16:40

松江 要（九州大学マス・フォア・インダストリ研究所）
重力環境下における流体力学的不安定な予混合火炎動態の全体像

16:40-17:20

矢崎 成俊（明治大学）
折れ曲がった紙の燃焼について