

2022年度共同利用研究報告書

2023年05月07日

所属・職名 東京理科大学・理工学研究科・教授

桑名 一徳

	整理番号	2022a011	
1.研究計画題目	消炎や振動を含む不安定燃焼の数理		
2.新規・継続	継続		
3.種別	一般研究		
4.種目	短期共同研究		
5.開催方法	ハイブリッド開催		
6.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	職名 教授
7.研究実施期間	2022年11月04日(金曜日)～2022年11月04日(金曜日)		
	2023年03月06日(月曜日)～2023年03月06日(月曜日)		
8.キーワード	燃焼工学と理学の接点, 漸近解析, 分岐理論, 燃焼不安定性, 燃焼振動, 消炎		
9.参加者人数	21人		

10.本研究で得られた成果の概要

2021年度に「燃焼・消炎機構の数理に基づく火災・爆発の安全対策」という題目で短期共同研究を実施した。消炎限界に関する数理を火災・爆発現象の安全対策につなげようという研究であり、ガス、固体、粉塵などの様々な燃焼形態を対象として研究を行った。このときの研究成果の一つとして、消炎限界に近づくと火災の周期的な振動や、反応面の不安定性が発現し、このような燃焼モードの変化がさらに消炎限界に影響を及ぼすことを明らかにしたことが挙げられる。

消炎限界や不安定燃焼条件は、産業用燃焼機器の運転条件設定においても重要な設計指標である。想定外の消炎や不安定燃焼、あるいは燃焼状態の急激な変化が生じると、燃焼機器やその下流側での反応暴走や爆発事故につながる可能性がある。また、燃焼機器で不安定燃焼が生じると有毒な一酸化炭素の生成量が増加するなどの二次的な影響を伴うことが経験的に知られている。さらに、振動燃焼は燃焼騒音の原因にもなり得る。したがって、消炎や振動を含む不安定燃焼が発生する条件を明らかにすることは、安全で安定な燃焼機器運転のために不可欠である。

本研究では、消炎や不安定性燃焼を記述する数理モデルを確立し、将来的には反応器設計等に活用できる知見を提供することを目的とし、固体燃焼やガス燃焼、粉塵燃焼の不安定性に関して検討した。

成果報告書「消炎や振動を含む不安定燃焼の数理」

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），
富塚孝之（アドバンスソフト株式会社）

概要

2021年度に「燃焼・消炎機構の数理に基づく火災・爆発の安全対策」という題目で短期共同研究を実施した。消炎限界に関する数理を火災・爆発現象の安全対策につなげようという研究であり，ガス，固体，粉塵などの様々な燃焼形態を対象として研究を行った。このときの研究成果の一つとして，消炎限界に近づくと火災の周期的な振動や，反応面の不安定性が発現し，このような燃焼モードの変化がさらに消炎限界に影響を及ぼすことを明らかにしたことが挙げられる。

消炎限界や不安定燃焼条件は，産業用燃焼機器の運転条件設定においても重要な設計指標である。想定外の消炎や不安定燃焼，あるいは燃焼状態の急激な変化が生じると，燃焼機器やその下流側での反応暴走や爆発事故につながる可能性がある。また，燃焼機器で不安定燃焼が生じると有毒な一酸化炭素の生成量が増加するなどの二次的な影響を伴うことが経験的に知られている。さらに，振動燃焼は燃焼騒音の原因にもなり得る。したがって，消炎や振動を含む不安定燃焼が発生する条件を明らかにすることは，安全で安定な燃焼機器運転のために不可欠である。本研究では，消炎や不安定性燃焼を記述する数理モデルを確立し，将来的には反応器設計等に活用できる知見を提供することを目的とし，固体燃焼やガス燃焼，粉塵燃焼の不安定性に関して検討した。

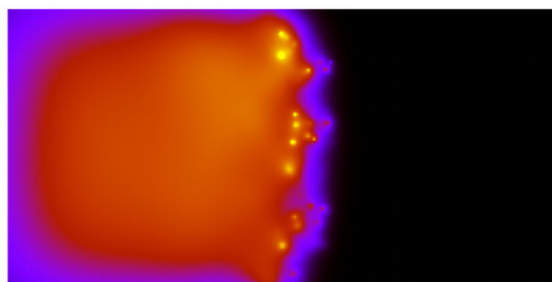
実施内容および成果報告

2022年11月4日（金）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。これに加えて，2023年3月6日（月）にも短期共同研究を実施し，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。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6日（月）の公開プログラムでの報告者を意味する。

粉塵爆発における不安定燃焼（報告者：桑名一徳）

粉塵雲の燃焼において，条件によっては振動燃焼が生じることが実験的に知られている。粉塵雲の燃焼実験は，粉体濃度の制御が容易でないといった困難さがあるので，数値計算により振動燃焼に関する知見を得ることを試みた。個々の粉体粒子の燃焼による発熱を点熱源とみなすモデルを用いて数値計算した。下図は計算の一例である。これにより，消炎限界近傍の条件において振動燃焼が顕著になる様子を再現することができた。微粒子燃焼は産

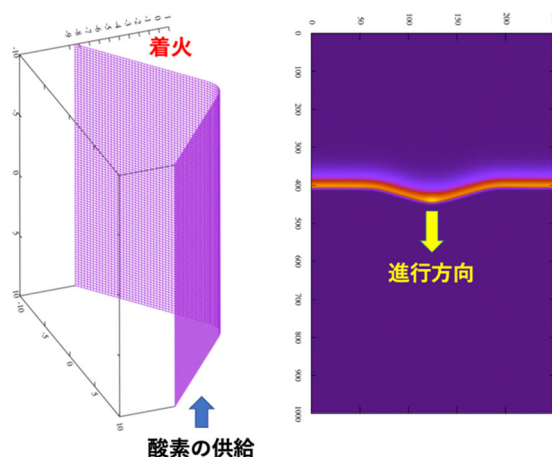
業的にも活用されている技術であり、今回のような数値計算により安定燃焼条件に関する理解が進むものと期待される。



図：点熱源モデルによる粉塵爆発シミュレーションの結果

3成分燃焼モデルに現れる一様燃焼の不安定化（報告者：出原浩史）

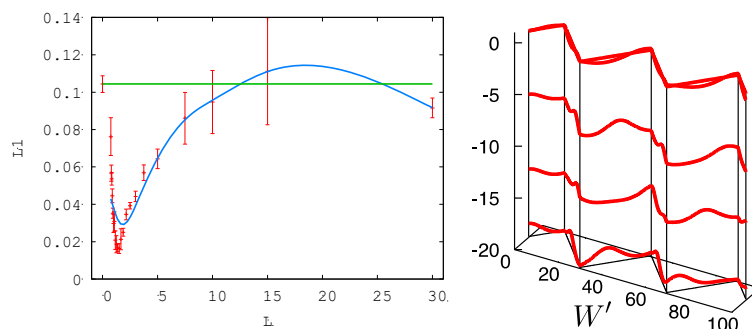
狭い空間での紙の燃焼は多様な燃焼パターンを見せることから興味を持たれている。本講演では、その燃焼を記述する数理モデルを解析した。酸素供給と燃焼波の進行方向が同一の場合(並行流燃焼)と逆向きの場合(対向流燃焼)の両方を対象とし、対向流燃焼、並行流燃焼ともに酸素供給速度に応じて燃焼パターンの性質が変化する様子が数理モデルにより再現され、実験結果とよく一致していることを確認している。ここでは特に、複雑な燃焼は燃焼面の不安定化に起因するため、2次元の一様燃焼面の不安定化問題を数値的に考察した。この問題は反応拡散系の2次元平面進行波解周りでの固有値問題に帰着され、固有関数を z 軸方向と y 軸方向に分離することにより、 y 軸方向の不安定化を取り出すことができる。並行流燃焼および対向流燃焼の両方を対象とし、解析を行なった結果、特定のフーリエモードが不安定化していることが燃焼面の不安定化に関与していることがわかった。さらに、曲面上での燃焼の数理モデルについても解析を行った。局所的に酸素供給が増加するモデルを用いることにより、下の図のような実験と類似した結果を再現できることを確認した。



蛇腹形状を有する紙の燃焼速度に関する考察（報告者：小林俊介）

蛇腹状に規則的に折られた紙の上方から下方への燃焼において、その折幅と燃焼速度の

関係性が実験的に考察されている。特筆すべきは、折り幅をある程度小さくすると燃焼速度が低下することである。本研究では、燃焼の基礎方程式の1つである Kuramoto—Sivashinsky 方程式の係数に、空間非一様性を有した数理モデルを提案した。そして、数値シミュレーションにより、燃焼速度が加速される折り幅と減少させる折り幅の双方の存在を実証した（下図参照）。これは実験結果を理論的に裏付けるものであり、紙の空間構造を変化させることで、燃え拡がりの伝播を抑制させる効果があることを示唆している。



左図：折り幅（横軸）と燃焼速度の時間平均（縦軸）のグラフ。右図：5回折りのときの数値シミュレーション結果

3次元 DDT（爆轟遷移）シミュレーションへの取り組み～Advance/FOCUS-i の機能および事例紹介（報告者：富塚孝之）

アドバンスソフト株式会社が開発した高速流体解析ソフトウェア Advance/FOCUS-i は、超音速、燃焼、爆燃、爆轟解析が可能で、非構造格子に対応した圧縮性流体解析ソルバーである。防災分野における安全対策検討にも役立つ事を目的としており、その解析機能と DDT（爆轟遷移）の解析事例を報告した。火炎伝播燃焼モデルは G 方程式燃焼モデルを使用し、DDT モデルには Ettner の起爆モデルを参考とした。乱流燃焼モデルは wrinkling モデルを採用した。層流燃焼速度、着火遅れ時間は Cantera で、既燃気体の化学種分率は NASA-CEA で予め計算しデータベース化することにより、詳細反応モデルの情報を計算負荷をかけずにシミュレーションに取り入れる手法を取っている。実スケール（全長 80m）の DDT 実験（水素—空気混合気）に対し、計算格子幅 10 cm～20 cm の解像度で比較解析をおこない、実験値と一致する結果を示した。

電磁流体中の火炎面のダリウス・ランダウ不安定性に対する磁場の効果（報告者：福本康秀）

平面予混合火炎の安定性解析について議論した。ダリウス・ランダウ不安定性の観点からは全ての予混合火炎が不安定である。一方、予混合火炎の安定化効果として一般にはルイス数効果が知られているが、磁場にも安定化作用が期待できる。本研究では、ダリウス・ランダウ不安定性に及ぼす磁場の効果を検討した。これは、Ia 型超新星爆発などで起こりうる状況でもある。未燃側と既燃側の透磁率の違いを考慮するとともに、特に、火炎に対して斜めの磁場を加えた場合に焦点を当てた。

火炎に対して平行な磁場がかかっている場合、磁場によりダリウス・ランダウ不安定性が

安定化される領域が現れるが、Ia 型超新星爆発のように未燃側の透磁率が既燃側よりも小さい条件では安定な領域が小さくなる。斜めの磁場がある場合は接線速度が不連続になり得て、ケルビン・ヘルムホルツ不安定性が加わる可能性がある。解析の結果、条件によっては磁場により安定な領域が小さくなることが確認された。

炎と音、時々他のもの: Sivashinsky 方程式と分岐理論の可能性 (報告者: 松江要)

カーボンニュートラル社会創生に向けて、燃焼によるエネルギー生成はエネルギー安定供給のために引き続き欠かせない技術である。特に水素やアンモニアなど、新燃料による燃焼技術の開発が精力的に進められているが、それに伴う不測の事態 (効率の低下や機器の故障) を防ぎ、様々な燃料や環境による燃焼を包括的に記述し理解を促進するため、本講演では「重力パラメータと炎の相互作用」の解析で用いた「分岐理論」の可能性を論じた。分岐理論では燃料特性をパラメータとして広範なパラメータ値における予混合火炎での長時間挙動をシステマティックに計算し、起こり得る燃焼現象を包括的に記述できる (図参照)。

ガスタービンなど実際の発電技術で避けられない「燃焼振動」など様々な現象の制御を燃料ごとに行うため、炎と様々な相互作用: 例えば「炎と音」の相互作用による火炎の長時間挙動の理解が産業界からのニーズとなっている。その分岐理論を考察するためのモデル: Sivashinsky 型方程式をレビューした。しかしそこには数学的な困難がいくつか生じており、分岐理論を実際に適用するには考察する対象を制限するなど、乗り越えるハードルは少なくない。

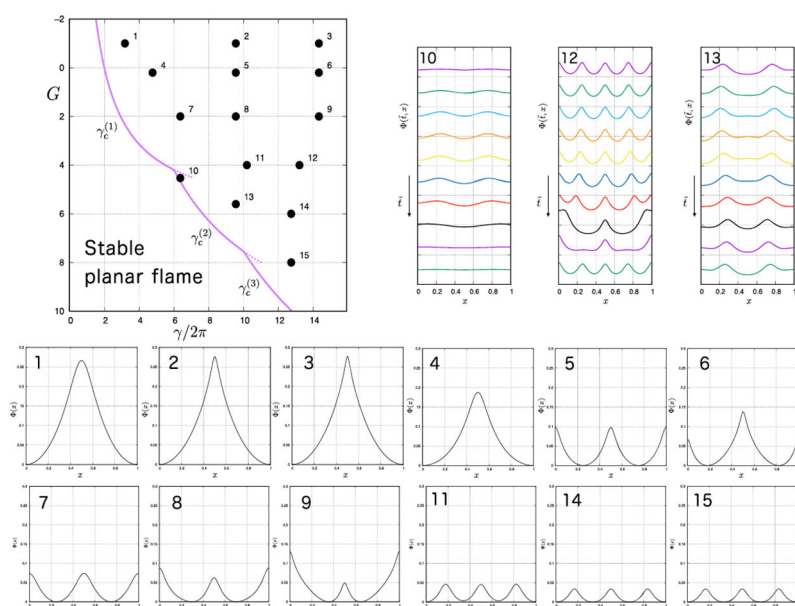


図: 様々なパラメータ値 (Markstein 数と重力パラメータ) における安定な火炎面プロファイル

燃焼前線と消炎の表現 (報告者: 矢崎成俊)

異なる媒質や性質を隔てる界面 (境界面や境界線) が時々刻々と変形しながら空間を移動

していく問題を一般に移動境界問題と呼ぶ。燃焼現象における燃焼前線も既燃領域と未燃領域を隔てる界面とみなすことができる（下図 1）。したがって、燃焼現象も移動境界問題の一種である。界面の位置、および界面上で満たすべき条件は、数学的には厚みを持たない空間曲面や幅を持たない平面曲線上の境界条件として与えられる。下図 2 は、運動学的な境界条件である蔵本-シバシンスキー方程式と同値な界面方程式を数値的に解いたシミュレーション図である。紙のような薄い固体が内側から外側へ燃焼していく様子がわかる。このように燃焼前線の追跡は燃焼現象の理解を促進させる。一方、消炎など、燃焼前線が停止する場合も考えられる。当該講演では、それを異方性的一种として取り扱うことを提案したが、現在進行中の課題である。消炎現象を界面の動きで表現することは、燃焼現象の数学的な取り扱いや防災の観点からも解決が待ち望まれる課題である。

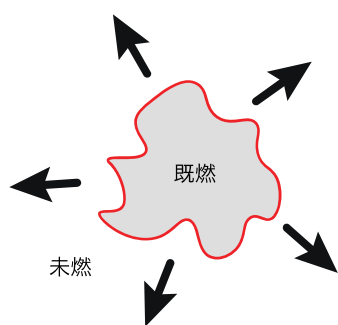


図 1：燃焼現象のイメージ図

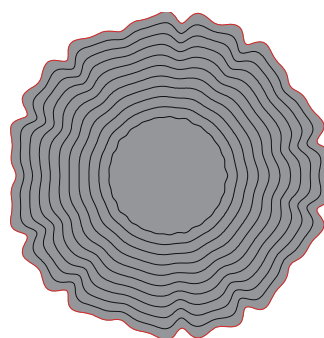


図 2：紙の燃焼のシミュレーション

開催日：2023/03/06～2023/03/06

消炎や振動を含む不安定燃焼の数理 | 共2022a011

カテゴリー：イベント タグ：一般研究 短期共同研究

開催概要

- 開催方法：九州大学 伊都キャンパスとZoomミーティングによるハイブリッド開催
- 開催場所：九州大学 伊都キャンパス ウエスト1号館 D棟 4階 IMIオーデトリウム (W1-D-413)
- 主要言語：日本語
- 主催：九州大学マス・フォア・インダストリ研究所
- 研究計画題目：消炎や振動を含む不安定燃焼の数理
- 研究代表者：桑名 一徳 (東京理科大学・理工学研究科・教授)
- 研究実施期間：2022年11月4日 (金), 2023年3月6日 (月)
- 公開期間：2023年3月6日 (月)
- 研究計画詳細：https://joint1.imi.kyushu-u.ac.jp/research_chooses/view/2022a011

プログラム

3月6日 (月)

10:30～11:10

桑名 一徳 (東京理科大学)
粉塵爆発における不安定燃焼

11:10～11:50

出原 浩史 (宮崎大学)
3成分燃焼モデルに現れる一様燃焼の不安定化

11:50～13:00 休憩

13:00～13:40

小林 俊介 (宮崎大学)
蛇腹形状を有する紙の燃焼速度に関する考察

13:40～14:20

富塚 孝之 (アドバンスソフト株式会社)
3次元DDT (爆轟遷移) シミュレーションへの取り組み～Advance/FOCUS-iの機能および事例紹介

14:20～15:00

福本 康秀 (九州大学マス・フォア・インダストリ研究所)
電磁流体中の火炎面のダリウス・ランダウ不安定性に対する磁場の効果

15:00～15:20 休憩

15:20～16:00

松江 要 (九州大学マス・フォア・インダストリ研究所)
炎と音、時々他のもの: Sivashinsky方程式と分岐理論の可能性

16:00～16:40

矢崎 成俊 (明治大学)
燃焼前線と消炎の表現