

## 【研究成果の要約】

氏名	中谷 辰爾
1. 研究題目	超過濃燃焼・急速混合・希薄燃焼におけるデータドリブン手法を応用した水素燃焼ダイナミクスと窒素酸化物生成特性の解明
2. 研究内容	<p>近年、地球温暖化抑制の観点から二酸化炭素排出の抑制が強く求められており、工業炉や輸送分野において水素の使用が考えられている。水素の可燃範囲が広い水素の燃焼特性を考慮した多段燃焼形態を提案し、航空機用エンジンや工業炉用バーナへの応用を目指し、実験的研究を実施した。ジェットエンジンモデル燃焼器を作成し、基礎実験を実施し、その燃焼特性および低窒素酸化物(NOx)燃焼コンセプトを実証した。また、燃焼器燃焼不安定性メカニズムについて調べ、非線形現象を記述するため深層Koopmanネットワークを構築し、データドリブンアプローチにより明らかにすることを目的とした。また、水素過濃燃焼における窒素酸化物生成特性を明らかにすることに加え、燃焼器内における生成特性の挙動を把握するため、過濃水素ラム燃焼器における燃焼挙動に対し、数値解析を実施した。また敵対的生成ネットワーク(Generative Adversarial Network: GAN)を応用したクラスタリング手法を応用し、燃焼特性が異なる領域を明確にし、各領域のNOx生成挙動を明らかにした。低NOx燃焼実現のための改良を実施するための知見を得ることを目的とした。</p> <p>実験は可視化可能な燃焼器を使用し、近赤外発光画像(NIR)およびOH*化学発光画像に対しては高速度カメラで測定を行い、同時に燃焼室内の圧力計測を実施した。高エンタルピー風洞を使用し、800K程度の高温雰囲気、0.5MPa程度の高圧力雰囲気で行った。燃焼器出口をチョークさせ、排気をサンプリングし、フーリエ変換赤外分光法(Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FT-IR)を用いてNOx濃度測定を行った。数値解析は900K、0.3MPaの高エンタルピー風洞におけるラム燃焼試験を想定し、乱流モデルとしてk-方程式輸送ラージエディシミュレーション(Large Eddy Simulation: LES)と乱流燃焼モデルに渦消散モデル(Eddy Dissipation Concept: EDC)を用いた数値流体解析を並列計算機により実施した。その結果に対して敵対的オートエンコーダ(Adversarial Auto Encoder: AAE)を応用したクラスタリングを実施した。</p> <p>本研究では、実験および数値計算で得られる時系列データに代表されるビッグデータに対して、演繹的手法や数学的線形手法では解析的に解くことができない現象に対して、人工ニューラルネットワークを応用した非線形解析を実施することで、新たな解析手法を実証するのに加え、燃焼および環境負荷物質生成メカニズムを明らかにした。</p>
3. 研究成果	<p>本研究では、モデル燃焼器を用いた実験および並列計算機を使用した数値解析を実施し、解析を行った結果以下のような成果が得られた。</p> <ul style="list-style-type: none"><li>● 800K、0.5MPaのモデル燃焼器において、過濃燃焼領域の当量比を3.0および希薄燃焼領域の当量比を0.3とした段階燃焼により、最適化なしに15.6ppm程度の低NOxで安定な燃焼が実現できることを示した。</li><li>● ジェットエンジンモデル燃焼器において、全体当量比を0.5より上昇させると熱音響振動燃焼が励起されることを示した。</li><li>● 深層Koopmanネットワークを用いた非線形モード分解手法により、振動燃焼といった燃焼不安定性の発生メカニズムに関する知見を得た。</li><li>● 水素ラム燃焼における数値計算によりNOxの生成挙動を機械学習の応用により明確にした。</li></ul>

## 【研究成果の概要】

氏名	中谷 辰爾
1. 研究題目	超過濃燃焼・急速混合・希薄燃焼におけるデータドリブン手法を応用した水素燃焼ダイナミクスと窒素酸化物生成特性の解明

## 1. 設計点における低 NOx 安定燃焼挙動

水素過濃燃焼による NOx 低減効果を見込んだ超過濃燃焼・急速混合・希薄燃焼のシングルセクタモデル燃焼器を用いて燃焼試験を行い、排気の NOx 濃度計測および火炎挙動の光学計測による調査を行った。東京大学柏キャンパスの高エンタルピー風洞にて流入空気全温 800K, 燃焼室圧 0.5MPa の条件で燃焼時間 8 秒の試験を実施した。過濃燃焼領域の当量比を 3.0, 希薄燃焼領域の当量比を 0.3 とする設計点で燃焼試験を行った際の燃焼室圧履歴とその Wavelet 変換により得られたスカログラムを Fig. 1 に示す。横軸は風洞通風開始からの時間を表しており、燃焼開始後 4 秒間は燃焼器予熱時間である。希薄燃焼当量比が 0.3 に達すると 420Hz 付近のピークが強まるものの圧力変動の振幅は十分小さく抑えられ、設計点での安定燃焼が確認された。

水分子の近赤外発光および OH\*化学発光、燃焼室圧を同時計測し、これらの画像に多変数動的モード分解を適用することにより、420Hz の振動成分に対応する火炎挙動を把握した。燃焼開始後 6.5 秒における振動モードを Fig. 2 に示す。近赤外画像のモードから、希釈混合領域における渦生成と対応していることが確認され、熱発生率の指標である OH\*発光画像の振動モードからは、発熱率変動と圧力変動が同位相となる領域が少ない。これにより、希釈混合領域における渦生成による流体力学的振動と熱発生率変動との結合は弱く、安定燃焼していることが示唆される。設計点における安定燃焼を確認した上で、燃焼開始後 6 秒から 8 秒までの 2 秒間で採集した燃焼排気のサンプリングを行い、FT-IR を用いて排気の NOx 濃度計測を実施した。NO と NO<sub>2</sub> を合わせて 15.6ppm であり、最適化を行っていないにも関わらず、NOx 濃度が低いことが確認された。

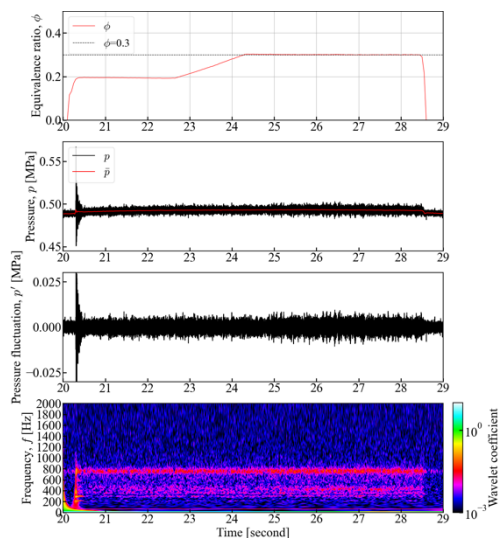


Fig.1 当量比,燃焼室圧の履歴および燃焼室圧の Wavelet 変換スカログラム(設計点)

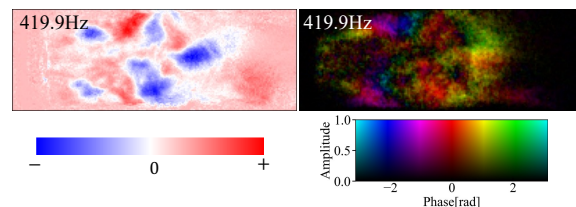


Fig.2 420Hz に対応する DMD モード(左:近赤外画像,右:OH\*化学発光画像,カラーバーは OH\*化学発光の振幅および圧力変動との位相差を表す)

## 2. 熱音響振動の発生

次に、様々な当量比での火炎挙動を大まかに把握するための連続的に当量比を上昇させる燃焼試験

を行った。その際の当量比と圧力の履歴とそのスカログラムを Fig. 3 に示す。また、OH\*化学発光と燃焼室圧の時系列データの DMD スペクトログラムを Fig. 4 に、燃焼開始後 8 秒における多変数 DMD により得られた代表的な振動モードを Fig. 5 に示す。全体当量比がおよそ 0.5 以上と設計点から大幅に過濃となったとき、燃焼室全体で圧力と発熱が連成し、大振幅の熱音響振動が誘起されたことが確認できる。

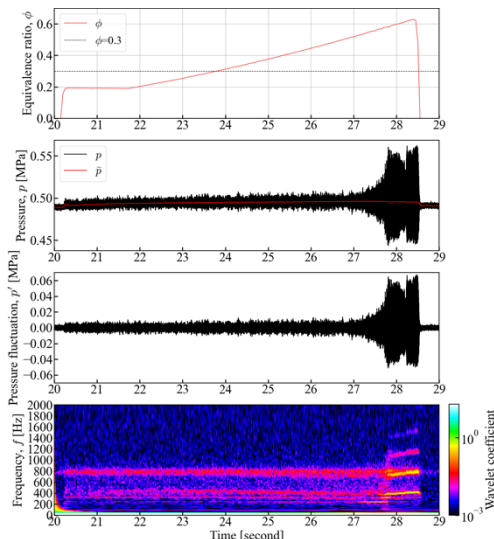


Fig.3 当量比,燃焼室圧の履歴および燃焼室圧の Wavelet 変換スカログラム(設計点外)

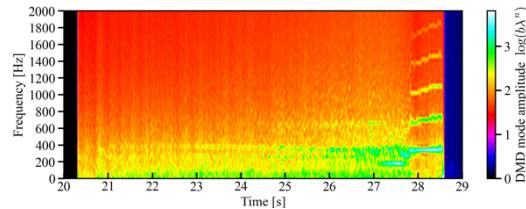


Fig.4 OH\*化学発光と燃焼室圧の DMD スペクトログラム

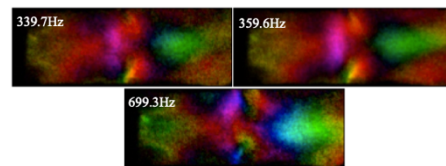


Fig.5 燃焼開始 8 秒後における OH\*化学発光の代表的な振動モード

### 3. 深層 Koopman ネットワークを用いた非線形モード分解

設計点外の高当量比で燃焼不安定性が生じるメカニズムをさらに調査するため、非線形系にも適用可能な Koopman 理論に基づくニューラルネットワークを用いた非線形モード分解を活用した。一般に燃焼不安定性が生じる過程は複雑かつ非線形な現象であるため、POD や DMD などの線形変換で得られる情報には限度がある。そこで Koopman 理論では、観測量と呼ばれる非線形関数および Koopman 作用素と呼ばれる線型演算子により、非線形システムを線型システムに変換し、Koopman 作用素の固有値、固有関数から非線形システムの予測・制御・理解を深めることができる。しかしながら、これらの固有値と固有関数を解析的に得ることが難しいため、本研究では畳み込みオートエンコーダをベースとしたニューラルネットワークで Koopman 作用素の固有値・固有関数の学習を行う。このネットワークを Koopman ネットワークと称し、その構造を Fig. 6 に示す。エンコーダが Koopman 固有関数に対応し、デコーダが Koopman 固有関数の逆関数に対応する。さらに、補助ネットワークにより、エンコーダの出力から Koopman 固有値が予測される。OH\*発光画像に対して、この Koopman ネットワークを適用し、非線形モード分解を実施した。

水素の超過濃燃焼・急速混合・希薄燃焼の設計点外で熱音響振動が励起される過程の約 1 秒間 (Fig. 3 の 27s から 28s) について、OH\*化学発光時系列画像データに対し Koopman ネットワークを適用した。およそ 370Hz の熱音響振動が発生する直前に、220Hz の振動成分が強まるのが圧力履歴から分かる。Koopman ネットワークにより得られた、これら 2 種類の振動成分に対応する振動モードを Fig. 7 に示す。いずれも希釈混合領域から下流の希薄燃焼領域へと局所的に発熱する領域が伝播していくパターンが見られた。220Hz の振動が類似したダイナミクスを示す 370Hz の振動を誘起した可能性が

考えられる. このように Koopman モード分解により, 非定常な系で熱音響振動が励起される過程を考察することが可能となる. 今後, 熱音響振動の発生過程のより詳細な実験データを取得した上で Koopman ネットワークを活用し, 振動要因を明らかにする.

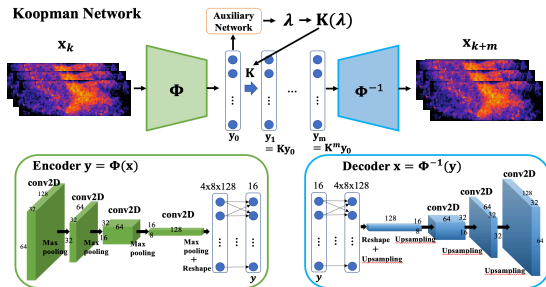


Fig.6 深層 Koopman ネットワーク

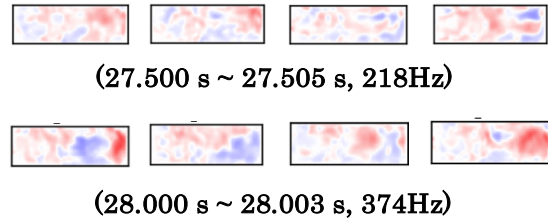


Fig.7 Koopman ネットワークで得られた 1 周期分の振動モード

#### 4. 水素ラム燃焼における NOx の生成挙動

水素ラム燃焼における NOx の生成挙動を明らかにするために, 高エンタルピー風洞におけるラム燃焼試験を想定し, 流入空気全温 900K, 全圧 3 気圧の下で当量比 0.72 と 2.55 の希薄, 過濃の両条件で数値解析を行った. Fig. 8 に可視化燃焼試験で得られた OH\*自発光画像, Fig. 9 に数値計算で得られた燃焼器中心断面における OH\*モル濃度分布および温度分布を示す. 実験と数値解析で火炎の概形は一致しており, 数値解析はある程度妥当であると考えられる.

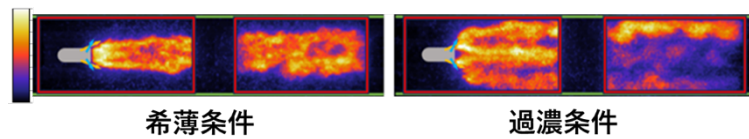


Fig.8 実験における OH\*自発光画像(瞬時場)

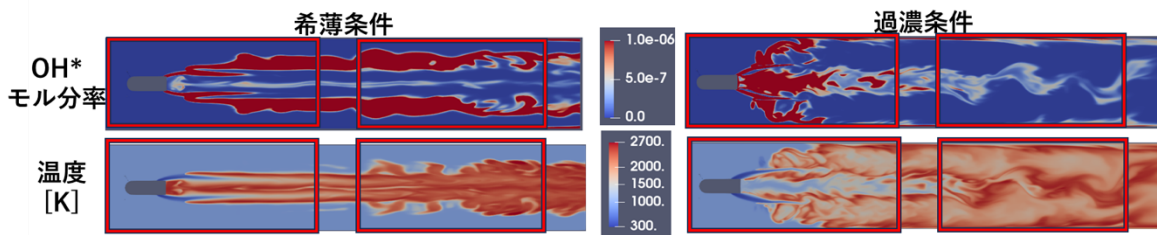


Fig.9 数値解析結果(中央断面, 瞬時場)

本研究では, 数値解析結果を敵対的オートエンコーダ(AAE)によりクラスタリングすることにより, NOx 生成挙動を調査する. AAE はオートエンコーダ(AE)と敵対的生成ネットワーク(GAN)を組み合わせたもので, 任意の事前分布を想定し, AE でデータの特徴を抽出しつつ, GAN により潜在変数の分布が想定した事前分布に似るように学習を行うものである. 事前分布に似た分布を持つ潜在変数を得ることができ, 目的毎に想定する事前分布を変えることで柔軟な議論を可能で, 本研究では明確に分離した混合ガウス分布を事前分布に想定することで, 数値解析結果を明確にクラスタリングする.

数値解析は格子点数 800 万点で行われ, 各格子点が密度, 温度, 各化学種の質量分率などの多次元の情報を持つ. 希薄および過濃条件の 2 条件での計 1600 万点の格子点から 100 万点をランダムにサンプリングし, 敵対的オートエンコーダの学習データとした. Fig. 10 に学習済みのエンコーダを用いて 1600 万点のデータをすべて 2次元潜在空間上へと射影しクラスタリングを行った結果および, Fig. 11 にクラスタリング結果を計算格子に反映したものを示す.



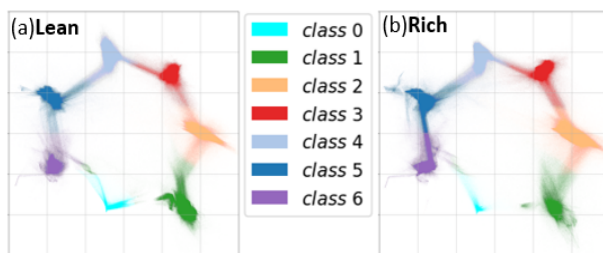


Fig.10 AAEにより得られた潜在変数の分布

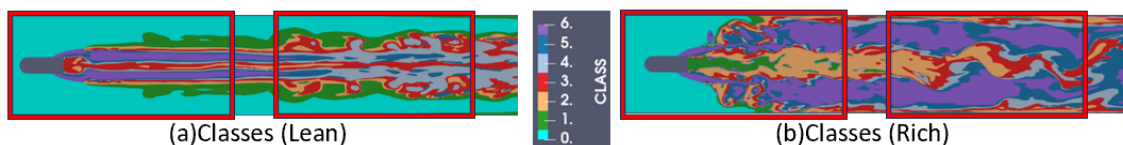


Fig.11 計算格子へのクラスタリング結果の反映

Fig. 12にクラスごとの平均温度、当量比、平均NO生成速度を示す。NOが生成されているクラス2,3はそれぞれ、高温空気側拡散層、反応帯に相当し、希薄条件では燃料噴流と主流の境界に、水素過濃条件では再循環領域に広く存在する。Fig. 13に各クラスにおける、主要NO生成経路(NNH経路, N<sub>2</sub>O経路, Thermal NO経路)の寄与を示す。Fig. 13より、クラス2,3ではThermal NO経路により大部分のNOが生成されていることが確認できる。次にNOが還元されているクラス4,5に注目する。これらのクラスは過濃条件の下流に多く存在しており、燃料側拡散層、水素過濃既燃ガスに相当する。Fig. 13より、クラス4ではNH, N, HラジカルがNOと反応することでNOが還元されており、これは隣接する反応帯(クラス3)から拡散してきたラジカルによりものと考えられる。一方でクラス5では還元速度はクラス4より小さく、HラジカルとNOの反応による還元が主であり、これは高温の既燃ガス内でH<sub>2</sub>が熱乖離することにより発生したHラジカルによるものと考えられる。

このように、LES燃焼解析結果を用い、AAEによるクラスタリングを行うことで、燃焼器内部のどの領域でどの反応経路によりどれだけNO<sub>x</sub>が生成されているかを明らかにできる。

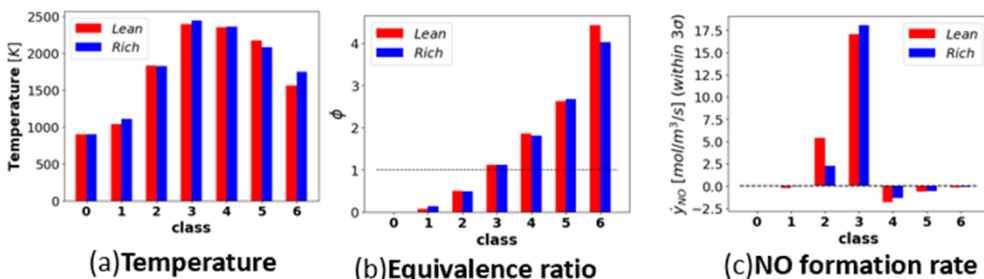


Fig.12 各クラスの平均温度、当量比、平均NO生成速度

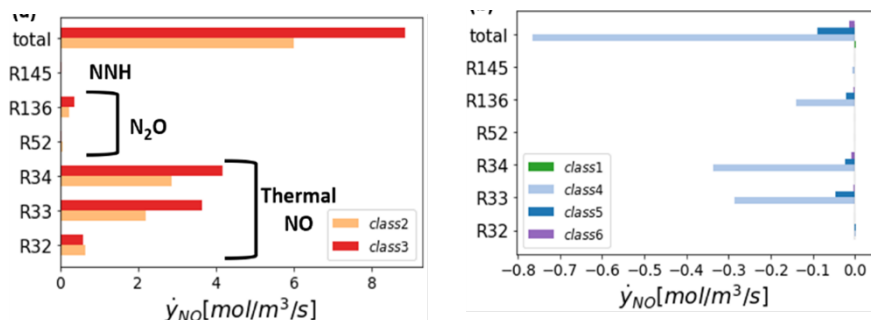


Fig.13 各クラスでの主要反応経路のNOの生成速度への寄与