

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K06950

研究課題名(和文)ニューラルネットワークを用いた燃焼振動の低次元化解析

研究課題名(英文)Dimension Reduction Analysis on Combustion Oscillation using Neural Network

研究代表者

田辺 光昭 (TANABE, Mitsuaki)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：90291707

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：燃焼器の安全や高効率化の要となる燃焼ダイナミクスの解析に深層学習を適用することを試みた。複雑系の状態推定と支配現象を特定する手法を開発し検証するものである。ロケットエンジンの爆発の前駆現象である、圧力と発熱の変動の連成で生じる自励燃焼振動と、SIエンジンノックの前駆現象である、温度と化学種濃度の変動の連成で生じる自励冷炎振動を解析対象とした。数値計算で燃焼場の時間発展を解いて得た物理量の時空発展データを入力し解析した。振動の位相や振動モードのエネルギー分率の算出、相関分析、現象推移の短期予測を実証した。燃焼場の特徴現象を特定し、いつどこで何が生じると危険かなど支配要因を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

燃焼ダイナミクスは非線形力学系で表される複雑現象で、従来の解析手法である直交モード分解では多数の独立モードが発現し、現象分析に高次元の位相空間が必要なことから理解困難な現象であった。これに対し深層学習で位相空間を張る変数を導くと、複雑な燃焼振動場の状態を2次元という低次元位相空間に表せ、さらにモードとの関係も求められるので、どのような現象がどこでどの順番で生じるかを容易に判別可能となった。冷炎ダイナミクス解析にも適用できたことから、例えば同じ連鎖分岐爆発問題であるバンデミックの感染者数の時間的空間的振動なども解析できると考えられ、一般の非線形力学系問題の解析法として応用が期待できる成果を得た。

研究成果の概要(英文)：Deep learning is applied to the analysis of combustion dynamics which is the key for the safety and efficiency of combustors. This is to develop and validate the method for state estimation and for the determination of controlling phenomena in complex systems. The analyzed phenomena are the intrinsic combustion oscillation by the coupling between pressure and heat release fluctuations, and the intrinsic cool-flame oscillation where temperature and species concentration are coupled. The big data of physical quantities by numerical simulation of transient combustion field are input to the analysis. The phase and the energy fraction of oscillation modes are derived, as well as validating the ability of correlation analysis and near-term prediction. In addition, the controlling phenomena and location and phase at which they arise are clarified through the determination of the distinctive feature of combustion field.

研究分野：燃焼工学・推進工学

キーワード：振動燃焼 ロケットエンジン ガソリンエンジン 冷炎 深層学習 自己符号化器 非線形力学系 モード解析

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

ロケットやガスタービンなど、高圧高負荷な燃焼器内では、急激な発熱と膨張により圧力波が生じ、それが燃焼器内部を往来し、火炎に影響して、さらなる熱発生を生じる場合がある。圧力振動と熱発生とが連成し、レイリー積分(圧力変動と熱発生変動の内積)が正となる時、共鳴などで圧力波の散逸が少なければ振動が発散して燃焼器を破壊される問題がある。この燃焼振動のうち、圧力波の線形性が保たれる範囲(平均圧の5%程度までの振幅)で振動する際、火炎形状(発熱分布)の変化も基準振動とその高次モードの和で表せ、POD(Proper Orthogonal Decomposition)やDMD(Dynamic Mode Decomposition)といった直交分解法で支配的なモードを抽出し低次元モデル化ができることが知られており、著者らも振動バーナー問題で有効性を確認した。これに対し、ロケット燃焼器での燃焼振動実験から、強い圧力振動が生じる場合には急峻な圧力勾配を持つN波が発生することを確認した。正弦波がN波に遷移するのは、大振幅固有の非線形性の現れで、さらに燃焼場では自発点火等の突発事象も頻発し、場は複雑現象の様相を呈する。5%以上の圧力振幅で生じるとされる燃焼器の機械的損傷はこのN波が原因と考えられ、危険な大振幅の非線形圧力波が生成し維持される燃焼場を簡略化して分析できる手法が必要となっている。

この要請に対し、著者らは自発点火現象の解析に機械学習を適用し、危険な圧力波生成について自動検出手法を提案した。機械学習のツールであるニューラルネットワークでは、PODやDMDといった演算が内部に実装可能であることに着目し、深層学習法の発達により多層化によって非線形性の強い複雑現象の抽象表現が可能となったことから、多層のニューラルネットワークを用いてPODやDMDの上位互換の低次元解析法が構築できることを着想するに至った。データサイエンスの成果を工学的に有用なエンジンの振動現象解析に応用する新手法であり、また、解析手法そのものは汎用性があり、他の工学的分析で応用できる可能性も高く、早急な研究進展が望まれる状況にあり、本研究を立案した。

## 2. 研究の目的

ロケット燃焼器などの高圧・高負荷燃焼器の破壊を引き起こす複雑な燃焼振動現象につき、新たにニューラルネットワークを用いた非線形のモード分解による抽象化法を提案し、その振動に隠された法則を明らかにし、より安全で高負荷な燃焼器の設計指針を得ることを目的とするものである。一見複雑な現象を理解可能な数の固有現象に分解して解釈する手法として、近年PODやDMDといった線形の固有モード分解が用いられているが、それらでは達成困難なレベルの低次元化を実現できる見込みを得ており、かつそれらを包含する解析法の飛躍を目指すものである。

## 3. 研究の方法

### (1) 解析対象のビッグデータ生成

本研究では以下の3つの燃焼振動の解析を行うこととし、解析用神経回路に入力する、時間的・空間的に変動する様々な物理変数に関するビッグデータを生成した。

- 同軸単一噴射器のロケット燃焼器内の燃焼振動
- 共鳴音響場内のトリプルフレームの振動
- 燃料液滴列に生じる冷炎振動

とは数値モデルを作成し、非定常数値シミュレーションで温度・圧力・各種化学種などの空間分布の時系列データを生成した。はマルチスロットバーナを用いた実験にてLIFによる火炎の高速度断層撮影を行い火炎面の時系列変化データを得た。は圧力と発熱の連成による自励振動、は流速分布振動に火炎が応答することによる強制振動、は温度場と化学種濃度(連鎖分岐反応の連鎖担体濃度)の連成による自励振動であり、典型的な振動のパターンを網羅的に検証するものである、

### (2) 燃焼振動解析用深層神経回路(DNN)の開発と解析法の確立

解析用深層神経回路(DNN)は、燃焼振動解析に特に重要な以下の3点を実現すべく神経回路の設計を行い、動作を検証する。

- 力学系をコンパクトに記述する低次元の状態変数空間表示ができる
- 従来の直交モード分解法の主要な機能を全て併せ持ち、従来法の上位互換となる
- 燃焼振動の発現機構に関わる物理現象の理解に利用できる

具体的には、は実現象を記述する物理変数空間から位相空間への射影が適切で、位相空間上の座標から実現象の状態推定が可能で、かつ位相空間上での時間変化が軌跡として表現できる(燃焼状態の違いが適切に判別でき、位相空間上で状態推定が可能であること。物理変数空間の任意の点とその近傍が位相空間上の1点とその近傍に射影される)ような次元削減を実現することである。はPODなどで従来行われている直交モード分解して時空発展を複数の時間変化に関する基底関数と空間分布に関する基底関数に分けて議論でき、さらにの状態空間上で現象を

単純で独立な物理現象の要素に分解して表し、物理変数同士の相互相関の分布を求められる手法とすることである。また、位相空間上で直交モードの遷移（位相毎に活性化している要素現象を特定し、どのような順に現象が発現することで燃焼場が時間発展していくか）を特定し振動の機構を議論できるようにすることである。

従来法の POD（固有直交分解）低次元化モード解析を 3 層以上の中間層を持つ深層自己符号化器（DAE）に実装できることから、まず DAE を燃焼振動問題に適用し改善点を明らかにし、改善策を模索した。結果的に、変分自己符号化器（VAE）で学習し、事後に求められる直交化層を付加した神経回路を用いれば上記 - を達成できる見込みを得て、その有効性を実証した。

#### 4. 研究成果

##### (1) ロケット燃焼器の燃焼振動解析

図 1 に示すような円筒状燃焼器の燃焼を数値計算で解き、圧力・温度・発熱率・各種化学種濃度等のデータを得た。この燃焼器は Purdue 大で実際に実験されている CVRC（連続可変共鳴燃焼器）の形状に習っており、実験でも自励振動が発生することが確認された形状である。燃料にはメタン、酸化剤には酸素を用いて、反応は 1 段総括反応とした。実際に図 2 に示すように、圧力振動がほぼない状態から振幅が増大し、最終的に振幅がほぼ一定で歪んだ形のリミットサイクル振動の挙動が得られた。

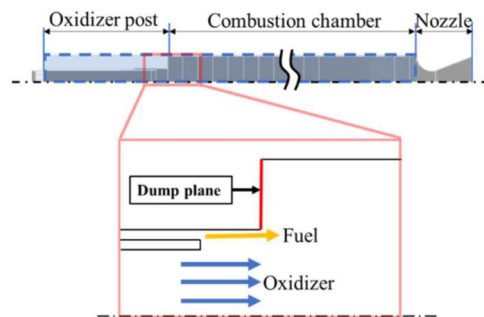


図 1 同軸噴射器型ロケット燃焼器

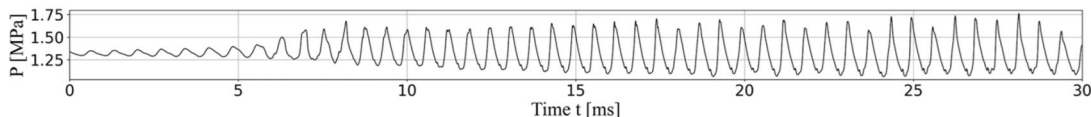


図 2 燃焼器内圧力の自励振動（ダンプ面で計測）

得られた自励振動場のデータを前述の新規開発した直交モード出力が可能な深層自己符号化器で解析した。図 3 に VAE で出力した潜在変数で張られた位相空間上にこの燃焼場の軌跡を描いたものである。原点付近から出発し、らせん状に徐々に半径を拡大しつつ遷移していることが分かる。また、リミットサイクル振動に入るまで軌跡は重なったり交差したりすることがない。つまり、この自励振動中の様々な状態を適切に区別して位相平面上に射影できていることが分かる。この平面を張った潜在変数が状態変数として機能し、この位相平面は力学系のダイナミクスを表現する状態平面として用いることができることが確認できたと考えられる。図の背景は固有モード（POM）の活性度で色付けしているが、原点付近は青の POM3 が主であり、振幅増大に伴って、赤の POM1 と緑の POM2 が位相差 90 度で交互に発現するような現象が起きていることが分かった。このそれぞれのモードにつき、圧力と発熱変動の相関がどのように空間分布しているかを算出したものを図 4 に示す。この相関はレイリー積分であり、振動にエネルギーを与える度合いを表している。図に示すように各モードで燃焼振動を強めている場所が赤く、また減衰に寄与している部分を青く示している。このように、燃焼器内のどの部分が加振源になって、どのような位相で実際にエネルギーが与えられるのかを明らかにできた。これらの分析から、これまで加振源の場所として指摘されていたインジェクター出口付近の線断層における発熱は振幅が小さい場合に限られることが分かり、振幅が大きい場合にダンプ面付近の再循環領域が加振に寄与することを明らかにすることができた。

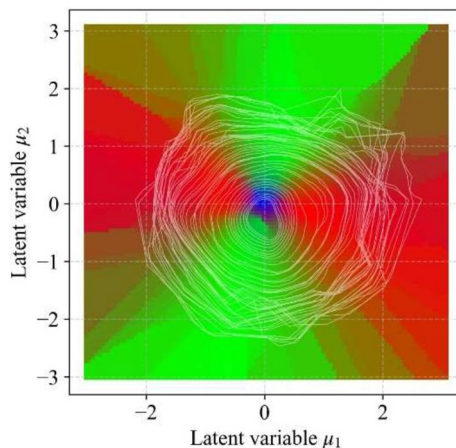


図 3 位相平面上の軌跡（白）およびモード活性（R,G,B=POM1,2,3）

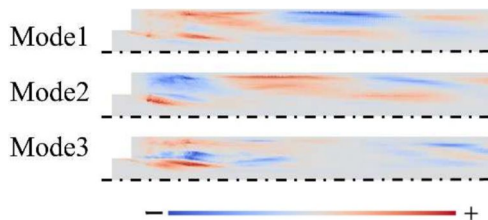


図 4 各モードでのレイリー積分分布

（引用：Arai et al, 33<sup>rd</sup> ISTS, 2022）



### (2) トリプルフレームの振動

強制加振した場合の燃焼場の振動についてマルチスロットバーナを用いたトリプルフレームの加振実験で深層神経回路を用いた解析の有効性を確認した。正弦波の音響振動を付加し、定常的に一定の振幅で火炎を揺らして、火炎形状がどう変化するかを高速撮影し、その時間変化する火炎像を深層学習を利用した解析に入力した。この系では振動に伴う火炎の並進・回転・振動を検出することを試みた。音場は単一周波数で、理論的にも曲率振動で周波数が倍になるだけとなる非線形性の弱い現象であり、DAEで従来の解析法であるPODと同様の解析が機能することが確認できた。3次元の位相平面上の軌跡を図5に示す。図のfeature1-2平面では円運動、feature3軸方向に振動の周波数の2倍での振動が検出できている。

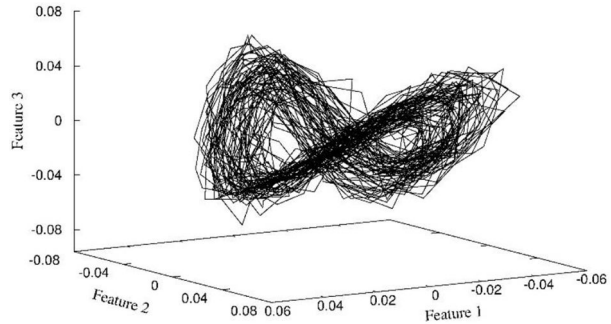


図5 トリプルフレーム振動の軌跡

### (3) 燃料液滴列に生じる冷炎振動

爆轟発生の起点となる可能性が指摘されている冷炎は図6に示すようなOHを主の連鎖担体とする連鎖分岐反応で生じる低温の火炎である。この反応が拡散場で生じ、熱損失や化学種の散逸がある場合に温度場と化学種濃度場が支配する非線形力学系となり自励振動が生じる。本研究では、無重量場の一列に並んだ燃料液滴列から蒸発した燃料により自発点火して生じる冷炎を模擬した。対流を抑制し、拡散による散逸が主となるような系での振動解析である。図7に示すように位相平面上の軌跡はロケット燃焼器の解析同様に重複や交差を避けつつ状態を一意に特定できるものであり、リミットサイクル振動に達する様子を適切に表せたと考えられる。また、この位相平面上の任意の点における「状態」、つまり液滴列周囲の温度分布や化学種濃度分布パターンも求められ、それを図右に示している。このように、位相空間の座標で特定した「状態」がどのような実空間での物理変数の分布を持っているかを算出することで位相毎に抽象化した燃焼場の分布を得られ、さらにそれが位相の変化に伴ってどのような順番で状態変化していくかといった経路まで調べることができるようになった。この系についても、詳細な相関分析も実施し、温度と相関のある化学種の特定や、化学種が発現する位相の特定、また空間的に液滴列のどこでどの位相でどのような反応が支配的かを明らかにすることができていることを確認できた。

(引用：Tanabe et al, IJSMA, 2020； 田辺, 日本燃焼学会誌, 2021)

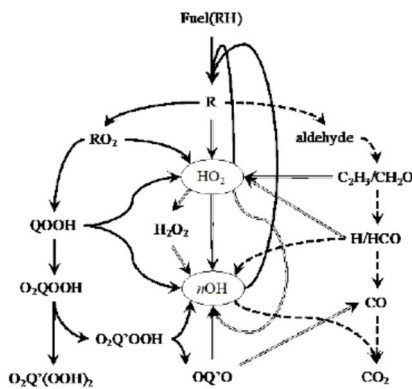


図6 冷炎の反応経路

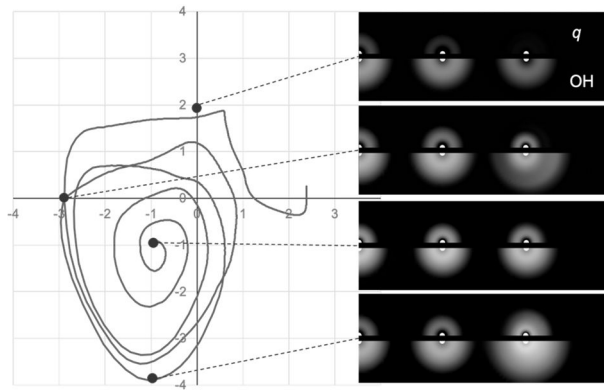


図7 位相平面上に表された冷炎振動

ロケット燃焼器は時間遅れ系の質点運動問題と類似の方程式に支配され、また、冷炎振動は連鎖分岐爆発問題で、例えば感染者が移動する場合のパンデミックの感染爆発挙動などと同じ問題であることから、本研究により、様々な時空発展する非線形ダイナミクス全般へのこのVAE解析の有効性と応用可能性が示せたものと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 MOTOHASHI Kazunori、SAITO Masanori、TANABE Mitsuaki	4. 巻 19
2. 論文標題 Study on Hysteresis of Combustion Oscillation in Continuously Variable Resonance Combustor using Deep Neural Network	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN	6. 最初と最後の頁 570 ~ 576
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2322/tastj.19.570	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mitsuaki TANABE, Masanori SAITO, Yusuke SUGANUMA, Masato MIKAMI, Masao KIKUCHI, Yuko INATOMI, Osamu MORIUE, Hiroshi NOMURA	4. 巻 37
2. 論文標題 Scope of PHOENIX-2 Sounding Rocket Experiment, "Cool Flame Dynamics in Multi-droplet Ignition"	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Microgravity Science and Application	6. 最初と最後の頁 370401-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.15011/jasma.37.4.370401	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 田辺 光昭	4. 巻 63
2. 論文標題 深層自己符号化器を用いた燃焼ダイナミクスの低次元化解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本燃焼学会誌	6. 最初と最後の頁 21-29
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20619/jcombsj.63.203_21	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Hamano , A. Shiomi , M. Saito and M. Tanabe	4. 巻 -
2. 論文標題 POD Analysis of Oscillation Mode of Triple Flame in Standing Acoustic Field by using Cross-Sectional Image	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIAA Propulsion and Energy Forum	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/6.2020-3904	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Saito Masanori, Motohashi Kazunori, Iezumi Tetsuo, Tanabe Mitsuaki	4. 巻 -
2. 論文標題 The oscillation and the location of a triple flame under acoustic oscillations are modeled and major mode of triple flame motion is analyzed by using a Deep Auto-Encoder (DAE) which is kind of Neural Network (NN).	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIAA Scitech 2019 Forum	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/6.2019-2013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Kazuki Iemura, Masanori Saito, Yusuke Suganuma; Masao, Kikuchi, Yuko Inatomi, Hiroshi Nomura, Mitsuaki Tanabe
2. 発表標題 Study on spatial-temporal dynamics of cool flame oscillation phenomenon occurred around a fuel droplet array by using variational auto-encoder
3. 学会等名 39th International Symposium on Combustion (accepted) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 新井史也, 家村和輝, 齊藤允教, 田辺光昭
2. 発表標題 ロケット燃焼器内の燃焼振動に関する可読性の神経回路を用いた研究
3. 学会等名 日本航空宇宙学会 第61回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fumiya Arai, Kazuki Iemura, Masanori Saito and Mitsuaki Tanabe
2. 発表標題 Study on Nonlinear Dynamics Using the State Space of Combustion Oscillation in a Rocket Combustor
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 新井史也, 家村和輝, 齊藤允教, 田辺光昭
2. 発表標題 変分自己符号化器による位相平面を用いたロケット燃焼器内での燃焼振動ダイナミクスに関する研究
3. 学会等名 日本燃焼学会 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 家村和輝, 新井史也, 齊藤允教, 田辺光昭
2. 発表標題 燃料液滴列に生じる冷炎の振動現象と液滴間干渉効果に関する変分自己符号化器を用いた調査
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 家村和輝, 新井史也, 齊藤允教, 田辺光昭
2. 発表標題 数値計算で模擬された燃料液滴列で生じる冷炎のダイナミクスに対する変分自己符号化器の適用可能性
3. 学会等名 日本マイクログラビティ応用学会 第33回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshifumi Sakata, Fumiya Arai, Masanori Saito, Mitsuaki Tanabe
2. 発表標題 Variational Auto Encoder for Correlation Analysis of Pressure Fluctuation and Heat Release Fluctuation in Continuously Variable Resonance Combustor
3. 学会等名 The 10th Asian Joint Conference on Propulsion and Power (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yurie Ohno, Masanori Saito, Mitsuaki Tanabe, Christian Eigenbrod
2. 発表標題 Study on Cool Flame Dynamics at Spontaneous Ignition of Droplet Pairs with Transient Heating
3. 学会等名 43rd COSPAR Scientific Assmby (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田辺光昭, 齊藤允教, 菅沼祐介, 野村浩司, 高橋晶世, 高橋賢一, 森上修, 三上真人, 後藤芳正, 山村宜之, 山本信, 野倉正樹, Eigenbrod Christian, 石川毅彦, 菊池政雄, 嶋田徹, 稲富裕光
2. 発表標題 複数液滴の冷炎ダイナミクスに関する観測ロケット実験“PHOENIX-2”進捗報告
3. 学会等名 第35回宇宙環境利用シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大野友利恵, 池澤英明, 齊藤允教, 田辺光昭
2. 発表標題 非定常加熱を考慮した数値計算を用いた二液滴の自発点火時における冷炎振動の分析
3. 学会等名 JASMAC-32
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田辺光昭, 齊藤允教, 菅沼祐介, 三上真人, 菊池政雄, 稲富裕光, 森上修, 野村浩司
2. 発表標題 PHOENIX-2, -複数液滴の冷炎ダイナミクス-, 状況報告
3. 学会等名 JASMAC-32
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 Kazunori MOTOHASHI, Masanori SAITO, Mitsuaki TANABE
2. 発表標題 Study on Hysteresis of Combustion Oscillation in Continuously Variable Resonance Combustor using Deep Neural Network
3. 学会等名 32nd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 濱野 康平, 塩見 爽, 齊藤 允教, 田辺 光昭
2. 発表標題 定在音場におけるTriple Flameの振動モードに関する研究
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂田 良文, 下村 軍皓, 齊藤 允教, 田辺 光昭
2. 発表標題 畳み込み自己符号化器による低次元化解析を用いた連続可変共鳴燃焼器での燃焼振動のモードに関する研究
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本橋 和典, 齊藤 允教, 田辺 光昭
2. 発表標題 深層学習を用いた連続可変共鳴燃焼器の Rayleigh Index に関する研究
3. 学会等名 第56回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田辺光昭
2. 発表標題 燃焼振動場の低次元化解析への深層学習の適用
3. 学会等名 日本燃焼学会「AI技術開発の最前線と燃焼研究への応用」ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazunori Motohashi, Masanori Saito, Mitsuaki Tanabe
2. 発表標題 Analysis Method on Flame with Acoustic Forcing Using Neural Network
3. 学会等名 6th Pacific-Asia Conference on Mechanical Engineering（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 下村 軍皓, 本橋 和典, 飛田 直也, 齊藤 允教, 田辺 光昭
2. 発表標題 深層自己符号化器による低次元化解析を用いた連続可変共鳴燃焼器での振動燃焼のモードに関する研究
3. 学会等名 第55回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>DNN for combustion analysis (JSPS KAKENHI)  <a href="https://sites.google.com/a/nihon-u.ac.jp/tanabelab/research-information/dnn-for-combustion-analysis">https://sites.google.com/a/nihon-u.ac.jp/tanabelab/research-information/dnn-for-combustion-analysis</a></p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	齊藤 允教  (SAITO Masanori)  (20801020)	日本大学・理工学部・准教授     (32665)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関