

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H00224

研究課題名（和文）先端レーザ計測及び直接数値計算データサイエンスに基づくAI支援乱流燃焼モデリング

研究課題名（英文）AI aided turbulent combustion modeling based on advanced laser diagnostics and direct numerical simulation data science

研究代表者

店橋 護（Tanahashi, Mamoru）

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：40242276

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高効率な自動車用エンジンやガスタービン燃焼器の設計・開発に重要となる乱流燃焼のLarge Eddy Simulation(LES)用の物理数学モデルとして乱流燃焼モデルと火炎・壁面干渉熱伝達モデルを構築し、それらに大規模直接数値計算と先端レーザ計測データを基盤とする深層学習等のAI技術を導入した。乱流燃焼モデルでは、研究代表者らが提案したFDSGS燃焼モデルに局所コルモゴロフスケール等を予測するAI支援モデルを導入した。火炎・壁面干渉熱伝達モデルでは、火炎・壁面干渉時に生じる壁面熱流束を予測できるAI支援モデルを開発した。さらに、AI支援モデル実装型の乱流燃焼LESも実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カーボンニュートラル実現には水素やアンモニア等の代替燃料やバイオ燃料の導入が必要であるが、それらの導入はエネルギーコストの増大を引き起こすと考えられる。エネルギーコストの低減には各種燃焼器の更なる高効率化が必要不可欠である。本研究では、高効率な自動車用エンジンやガスタービン燃焼器の設計・開発に必要な高精度な乱流燃焼モデルと火炎・壁面干渉熱伝達モデルの構築に焦点をあてた。本研究により開発されたAI支援型高精度モデルは今後高効率・低環境負荷燃焼器の開発に応用され、カーボンニュートラル実現に貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, a turbulent combustion model and a flame-wall interaction heat transfer model was constructed as physical and mathematical models for Large Eddy Simulation (LES) of turbulent combustion, which is important for the design and development of highly efficient automobile engines and gas turbine combustors. For these models, AI technologies such as deep learning based on large-scale direct numerical simulations and cutting-edge laser measurement data were introduced. For the turbulent combustion model, an AI-assisted model that predicts the local Kolmogorov scale, etc. was introduced into the FDSGS combustion model that has been proposed by the principal investigator. For the flame-wall interaction heat transfer model, an AI-assisted model was developed that can predict the wall heat flux in the flame-wall interaction. Furthermore, turbulent combustion LES implemented with an AI model was also realized.

研究分野：熱流体工学

キーワード：乱流燃焼 レーザ計測 直接数値計算 AI支援モデリング データサイエンス

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我が国の一次エネルギー供給の約 85%は依然として化石燃料の燃焼が担っている。太陽光、風力、バイオマス等の自然エネルギーの有効利用技術の確立は、化石燃料依存からの脱却に必要不可欠であるが、それらから獲得できるエネルギー量が我が国のエネルギー需要を満たすようになるには長い年月が必要とされる。このため、各種燃焼器には、更なる高効率化と低環境負荷化が求められており、それらは地球・都市環境問題の解決に直結する。短期間・低コストで高効率・低環境負荷燃焼器を開発するには、数値解析の積極的な利用が期待されている。しかしながら、多くの実用燃焼器内は乱流燃焼状態にあり、数値予測精度は採用された乱流燃焼モデル等に大きく依存するため、より高精度な乱流燃焼モデルの開発が必要である。

乱流燃焼機構の解明と大規模 DNS データ蓄積

研究代表者らは非反応性乱流の微細構造に関する研究から、乱流場の種類やレイノルズ数に依存しない普遍的な微細構造(コヒーレント微細渦構造)が乱流場に存在していることを明らかにした(Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 25, pp. 331-340, 2004 等)。コヒーレント微細渦はコルモゴロフ・スケールの 8 倍程度の小さな直径であるにも関わらず、その周方向最大速度は乱流強度にほぼ一致しており、非常に強い旋回運動を行っている。このコヒーレント微細渦が乱流予混合火炎の局所構造にも大きな影響を与えることが、研究代表者らによって世界で初めて行われた水素・空気乱流予混合火炎の三次元直接数値計算(DNS)から明らかにされている(Proc. Combust. Inst., Vol. 28, pp. 529-535, 2000)。このような乱流火炎の局所構造の変化は、乱流燃焼速度、火炎近傍のプロンプト NO の生成過程や火炎背後の CO の反応機構を支配している。研究代表者らによる世界初の三次元 DNS 以来、国内外の多くの研究者により三次元 DNS が実行されるようになった。世界初の DNS は、一様乱流中を自由伝播する平面乱流予混合火炎という比較的単純な系を対象に行われたが、時代とともにより現実なせん断乱流を伴う乱流燃焼場、例えば、V 型乱流予混合火炎(Phys. Fluids, Vol. 23, 125107, 2011 等)や乱流噴流予混合火炎(J. Turbulence, Vol. 13, N42, 2012 等)、ガスタービンを模擬した旋回乱流予混合火炎(Proc. Combust. Inst., Vol. 33, pp. 3293-3300, 2011 等)、自動車用エンジンを模擬した閉空間内乱流燃焼場(Proc. Combust. Inst., Vol. 35, pp. 1277-1285, 2015 等)等に拡張され、従来未解明であった乱流燃焼における物理素過程の解明に大きく寄与している。これらの過去 20 年に亘る大規模 DNS データの蓄積は、それらに基づくデータサイエンスを可能とする域に達している。

多次元複合光学計測の進展と大規模多変量計測データ蓄積

乱流燃焼機構を実験的に解明するには、高精度な計測手法が必要不可欠である。火炎構造を計測するために、燃焼反応により生成される中間生成物の平面レーザ誘起蛍光法(PLIF)が頻繁に用いられている。近年では、単一中間生成物の PLIF と速度 2 成分の計測可能な粒子画像流速計(PIV)を組み合わせた濃度と速度の面計測が一般的になりつつあるが、複雑な乱流火炎の構造を解明するには、単一の化学種濃度と流体速度 2 成分の同時計測では不十分である。研究代表者らは、OH ラジカルと CH ラジカル の 2 化学種の PLIF 及び速度 3 成分の計測が可能なステレオ投影 PIV の同時計測を世界で初めて実現し、乱流予混合火炎の局所火炎構造の詳細を明らかにした(Proc. Combust. Inst., Vol. 30, pp. 1665-1672, 2005)。乱流火炎の構造は本質的に三次元であり、局所火炎構造は乱流運動により火炎面に作用する歪み速度に依存する。研究代表者らは、火炎面の三次元特性を計測可能な三平面 PLIF と全速度(3 成分)・全速度勾配(9 成分)の計測が可能な二波長型二平面ステレオ投影 PIV の同時計測法を世界で初めて実現し、乱流火炎の三次元構造と火炎面に作用する歪み速度の関係を明らかにした(Proc. Combust. Inst., Vol. 33, pp. 775-782, 2011)。一方、多くの乱流燃焼モデルでは、局所的な火炎要素の構造を定常な層流火炎として近似している。この仮定は、乱流燃焼モデルの根幹をなすにも関わらず、これまで実験的に検証された例はない。研究代表者らは、局所火炎伝播速度の直接計測法である CH ラジカルのダブルパルス PLIF 法を開発し(Exp. Fluids, Vol. 45, pp. 323-332, 2008)、これに二波長型二平面ステレオ投影 PIV を組み合わせることで、局所燃焼速度の直接計測に世界で初めて成功し、乱流中の局所火炎要素に定常近似が成立しないことを明らかにした。さらに、研究代表者らが世界で初めて実現した高速ステレオ投影 PIV に加えて、OH ラジカルと CH ラジカル の 2 化学種の高速 PLIF との同時計測にも成功しており、これらの結果は乱流火炎の大域的なダイナミクスや局所燃料消費に対する新たな知見を与えている(Proc. Combust. Inst., Vol. 35, pp. 3663-3671, 2015)。研究代表者らによるこれらの先端レーザ計測は、次世代自動車用エンジン開発にも拡張され、従来の定説を覆す知見が得られている(Int. J. Engine Res., Vol. 20, pp. 718-725, 2019)。これらの世界最先端の多次元複合光学計測技術は乱流燃焼における物理素過程の解明に貢献するとともに、その蓄積された膨大な計測データは DNS と同様にデータサイエンスを可能とする域に達している。

乱流燃焼モデル開発と AI 支援モデリング

研究代表者らは、一連の乱流燃焼研究の中で、乱流の慣性小領域における構造と火炎の相互作用

用に注目し、乱流火炎も階層的な構造を持つことを明らかにした(Proc. Combust. Inst., Vol.29, pp. 2041-2049, 2002等)。さらに、乱流中での火炎要素の特性は火炎要素に作用する歪み速度と密接に関連していることから、フラクタル特性を用いて火炎面の階層構造を表現し(Proc. Combust. Inst., Vol. 33, pp. 1455-1462, 2011)、慣性小領域における歪み場との関係を考慮に入れることにより、乱流予混合火炎のLESのための新しい高精度SGS燃焼モデル、フラクタル・ダイナミックSGS(FDSGS)燃焼モデルを構築した(Proc. Combust. Inst., Vol.34, pp.1373-1381, 2013等)。LESはモデル定数の計算格子幅依存という本質的な問題を含んでいるが、申請者らは提案モデルを格子幅自己認識型FDSGS燃焼モデルに拡張することで、この問題を解決している(Flow Turb. Combust., Vol.97, pp.1147-1164, 2016)。さらに、Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation (RANS)の枠組みの中で、局所的にflamelet型とnon-flamelet型の乱流-火炎干渉機構のバランスを考慮に入れた反応速度モデルを構築した(Int. J. Hydrogen Energ., Vol. 41, pp. 9679-9689, 2015)。これらの結果は乱流燃焼の物理機構の解明に基づく物理数学モデル構築に大きく寄与しているが、物理現象の数学モデルは基本的に平均的な特性の数学表現であり、時間的・空間的に変化する局所的な特性を予測するには必ずしも十分ではない。上述のDNSと先端レーザ計測による膨大なデータに基づくデータサイエンスが可能な状況にあることから、深層学習等のAI技術を新たに導入することで、更なる乱流燃焼モデルの高精度化が期待できる。昨今第3次AIブームとして種々の非線形物理現象の予測等にAIが導入されつつあるが、AI支援は物理数学モデルの最終段階で導入されるべきであり、導入に際しては物理現象、ここでは乱流燃焼機構に関する十分な知見と経験が必要不可欠である。研究代表者らは、AI支援乱流燃焼モデル構築に必要な不可欠となる大規模DNSデータ群と先端レーザ計測データ群を有している世界で唯一の研究グループであるとともに、乱流燃焼機構とそのモデリングについて十分な経験と知見を有している。

2. 研究の目的

本研究では、研究開始時までの研究代表者らの研究成果を踏まえて、複数化学種濃度と速度の同時計測法や時系列速度計測法等を組み合わせた多次元複合光学計測及び超並列GPU計算技術と融合した大規模DNS技術等の世界最先端の実験的・数値的研究手法を用いて、乱流燃焼モデル、火炎・壁面干渉熱伝達モデル等に関する物理数学モデルを構築し、それらのモデルパラメータ同定において大規模DNS及び先端レーザ計測データに基づいた深層学習等のAI技術を導入することで、汎用性が高く、ロバスト性の高い高精度乱流燃焼モデルを構築することを目的とした。研究代表者らは現実的な乱流燃焼場の世界初のDNSを実現し、それらの結果からRANSやLESのための高精度乱流燃焼モデルを開発している。本研究では、これらのモデルにおいて平均的特性として数学モデルが導入されている部分について、深層学習等を導入し、AI支援乱流燃焼モデル、AI支援火炎・壁面干渉熱伝達モデルに拡張させる。また、実用燃焼器の設計に際して簡易的に燃焼特性等を予測可能とするために、AI支援乱流燃焼シミュレータの開発も併せて行うものとした。

3. 研究の方法

本研究は、直接数値計算(DNS)を用いた数値的研究と高解像度時系列粒子画像流速計(PIV)や高時間分解能平面レーザ誘起蛍光法(PLIF)等を組み合わせた複合光学計測を用いた実験的研究から構成した。DNSに基づく数値的研究では、乱流燃焼機構の解明を行うことで、AI支援乱流燃焼モデル及びAI支援火炎・壁面干渉熱伝達モデルにおいて基盤となる物理数学モデルの構築、すなわち深層学習等の入力物理量の選定を中心に研究を行うこととした。複合光学計測に基づく実験的研究では、構築するAI支援モデルの検証データ(一部教師データ)の取得を中心に研究を行うものとした。本研究では、次の研究項目について適切な研究方法を選択しながら、研究代表者並びに研究分担者が分担して研究を進めた。

AI支援乱流燃焼モデルの構築

数値的研究では、研究代表者らが所有する一様乱流中を伝播する平面乱流予混合火炎、平面噴流予混合火炎及びV型乱流予混合火炎の豊富なDNSデータに対して、フィルター操作を施すことでLESデータを構築し、LESにおいて解像されるグリッドスケール(GS)物理量と局所平均微細渦直径の関係を学習させることで、AI支援火炎面インナーカットオフスケール予測モデルを構築する。教師データには、研究代表者らが所有する水素・空気乱流予混合火炎のDNSデータの内でflamelets領域に分類されるDNSデータを用いる。ただし、レイノルズ数、カロールピッツ数及び幾何学形状が異なる5種類程度のデータを対象とする。検証データには同様にflamelets領域に分類される平面噴流予混合火炎と一部thin reaction zoneに分類されるV型乱流予混合火炎等のDNSデータを用いる。深層学習に現有のDNSデータが不足する場合は、追加のDNSを実行することで十分な学習データの確保を行うこととした。

実験的研究では、現有の乱流特性を制御可能な定容容器型燃焼器において、乱流特性や当量比が異なる種々の条件を対象として二平面CH PLIF(あるいはダブルパルスCH PLIF)、一平面OHPLIF及び波長型二平面ステレオPIV同時計測などの多次元多変量複合光学計測を用いて、火炎面のフラクタル特性を明らかにする。高解像度の火炎面及び速度データに対して、DNSと同様なフィルター操作を施すことで、実験的にLESデータを作成し、上述のAI支援火炎面インナー

カットオフスケール予測モデルの検証を行う。なお、CH ラジカル濃度が低当量比条件において CH PLIF を十分に高い精度で行えない場合には、計測対象を CH から CH₂O に変更するものとした。

AI 支援乱流燃焼モデルの検証と実装

研究代表者らの従来の研究で行われたマイクロガスタービンを模擬した矩形燃焼器の旋回乱流予混合燃焼の DNS データ等を用いて構築した AI 支援乱流燃焼モデルの検証を行う。検証データとしては、研究代表者らによって実施された旋回強度(スワール数)、当量比等の異なる水素・空気予混合気を対象とした DNS データを基盤とするが、将来の拡張性を鑑みて水素・メタン混焼条件での DNS データも用いる。なお、検証データが不足する場合には、追加の DNS を実施する。現有のガスタービン燃焼器を模擬した旋回型乱流予混合燃焼器における複合光学計測により取得されている乱流火炎情報を用いて、モデル検証を行う。なお、光学計測データの保有量は深層学習には明らかに不十分であるため、追加の実験により十分なデータ量の確保を行う。旋回乱流予混合火炎では、乱流場が強い異方性を有するため、前年度までに対象とした比較的等方的特性を有する場に適合した AI 支援乱流燃焼モデルでは不十分な可能性があるため、追加すべき適切な入力物理量の選定も必要があれば実施し、AI 支援乱流燃焼モデルの改良を行う。自動車用エンジンでは燃焼とともに平均圧力が時々刻々変化する。研究代表者らは定容容器内乱流燃焼の DNS データも有しており、これらのデータを用いて、開発される AI 支援乱流燃焼モデルの有効性を検証することで、モデルの汎用性を高める。

現有の乱流燃焼の LES コードに AI 支援乱流燃焼モデルの実装し、実際の LES を DNS と同条件で実施する動的テストを行うことで、モデルの有効性を明らかにする。動的テストは、乱流噴流予混合火炎、旋回乱流火炎を対象として行う。平均圧力が変化する定容容器内乱流予混合燃焼に対する動的テストは、AI 支援火炎・壁面干渉熱伝達モデルの開発・実装後とする。

AI 支援火炎・壁面干渉熱伝達モデルの構築

高効率燃焼器の開発には壁面からの熱損失量を高精度で予測する必要がある。火炎と壁面の干渉は、火炎が壁面に平行に衝突する Head on quenching と火炎が壁面に対して垂直に伝播する Side wall quenching に分類される。研究代表者らの従来の研究から、火炎が壁面に接近し、消炎に至る期間内に極めて高い熱流束が生じることが明らかにされている。この現象が生じる領域は壁面のごく近傍(数百 μm 以下)に限られることから、RANS や LES で用いられる通常の計算格子サイズでは予測することは不可能である。しかしながら、これによる熱流束の上昇期間は ms のオーダーである。

研究代表者らは、過去の研究から種々の燃料、当量比、予熱温度、壁温、圧力等の条件において、層流予混合火炎と壁面干渉に関する DNS を実施してきている。これらの DNS データに基づく解析から、層流予混合火炎・壁面干渉時の壁面熱流束は、予混合気特性、壁面条件(表面反応を含む)、壁面への火炎面接近速度等により決定されることが明らかになっている。壁面熱流束の予測には時間的な変化、すなわち総熱損失量が極めて重要であるため、ここでは、時系列変化を予測可能な再帰型ニューラルネットワークを用いて、層流条件での Head on quenching の際の火炎・壁面干渉熱伝達モデルを構築する。学習では、現有の DNS データを分割して教師データ及び検証データとする。実験的研究では、現有の壁温制御可能な火炎・壁面干渉実験用燃焼器を用いて、DNS と同様な条件で実験を行い、再帰型ニューラルネットワークモデルの検証を行う。次に、Side wall quenching の際の火炎・壁面干渉熱伝達モデルを検討する。ただし、Side wall quenching での実験データの取得は極めて困難であることから、検証は DNS データのみで行う。

上述で開発された Head on quenching と Side wall quenching に対する火炎・壁面干渉熱伝達モデルを組み合わせることで、Head on quenching と Side wall quenching が混在する乱流火炎と壁面の干渉に対する AI 支援火炎・壁面干渉熱伝達モデルの構築を行う。最終的に AI 支援火炎・壁面干渉熱伝達モデルを現有の LES コードに実装し、定容容器内乱流予混合燃焼等に対する動的テストを行うことで、AI 支援モデルの総合的な評価を行う。

4. 研究成果

本研究で設定した前述の研究項目に対する研究成果を以下に示す。

AI 支援乱流燃焼モデルの構築

DNS に基づく火炎面インナーカットオフスケールの深層学習モデルの構築では、一様乱流中を伝播する平面乱流予混合火炎の DNS データに対して、フィルター操作を施すことで LES データを構築し、それらを教師データ及び検証データとした。火炎面のインナーカットオフスケールは乱流の普遍的微細構造の直径と層流火炎厚さとの比に関係することから、グリッドスケール(GS)物理量と局所平均微細渦直径(局所コルモゴロフスケールの 8 倍)の関係を学習させることで、未燃側で 0.9 程度の高い相関係数を示す高精度モデルを構築した。定容容器内乱流予混合火炎の複合レーザ計測に基づく深層学習モデルの構築・検証では、定容容器型燃焼器において OH ラジカルを平面レーザ誘起蛍光法(PLIF)により取得された火炎面画像に加えて、一様乱流中を伝播する平面乱流予混合火炎の DNS データから疑似的に作成された火炎面画像を用いて、FDSCGS 燃焼モデルにおいて必要となる火炎のフラクタル次元を与える深層学習モデルの構築を行った。PLIF 及び DNS データ共にフィルター操作を施すことで LES を想定した GS 火炎面を構築し、粗視化された火炎面データ(画像)から直接フラクタル次元を与える深層学習モデルを構築した。

AI 支援乱流燃焼モデルの検証と実装

開発過程で対象とした一様乱流中の平面乱流予混合火炎に加えて、V型乱流火炎、平面噴流乱流火炎及びマイクロガスタービンを模擬した矩形燃焼器の旋回乱流予混合火炎を対象として、開発したAI支援モデルの精度検証を行った。いずれの乱流燃焼場においても、開発したAI支援モデルは未燃側で局所コルモゴロフ・スケールを高精度に予測可能であり、研究代表者らによるFDSGS燃焼モデルの高精度化に寄与できることを明らかにした。また、自動車用エンジンのような平均圧力が時々刻々変化する燃焼場における開発したAI支援乱流燃焼モデルの精度検証を行った。ここでは、研究代表者らは有する容容器内乱流燃焼のDNSデータを用いて、開発したAI支援乱流燃焼モデル(AI支援FDSGSモデル)の有効性を検証した。その結果、LESの枠組みの中で与えることのできる適切な入力物理量を選定することで、平均圧力が時々刻々変化する燃焼場にもAI支援FDSGSモデルを適用可能であることを明らかにした。

現有の乱流燃焼のLESコードにAI支援FDSGSモデルを実装し、実際のLESをDNSと同条件で実施する動的テストを行うことで、モデルの有効性を明らかにした。具体的には乱流噴流予混合火炎を対象としたAI実装LESを実現し、DNSデータ、AI実装前のFDSGSモデル及び既存SGS燃焼モデルとの比較から、開発したAI支援乱流燃焼モデルが十分な精度で乱流燃焼場を予測可能であることを明らかにした。

これまで開発した火炎面のインナーカットオフを決定するAI支援モデルに加えて局所フラクタル次元を簡易的に与えるAI支援モデルの構築を行った。学習には現有の乱流噴流予混合火炎、定容容器内乱流予混合火炎等のDNSデータを使用した。火炎面のフラクタル次元とインナーカットオフを局所的に与えるAI支援モデルを現有のLESコードに実装し、DNS結果との比較からAI支援乱流燃焼モデルの精度を検証した。

AI 支援火炎・壁面干渉熱伝達モデルの構築

層流条件でのHead on quenchingを対象にAI支援火炎・壁面干渉熱伝達モデルの構築に取り組んだ。種々の燃料、当量比、予熱温度、壁温、圧力等の条件における層流予混合火炎と壁面の干渉に関するDNSデータを有効利用し、火炎・壁面干渉時に生じる極めて大きな壁面熱流束をLESの枠組みの中で考慮に入れることを可能とするAI支援モデルを構築した。適切な入力物理量の選定を行うことで、LESの任意の空間解像度及び時間解像度において、火炎・壁面干渉による壁面熱流束を予測する高精度AI支援モデルを構築した。ここで、層流条件に対して開発したAI熱流束予測モデルを直接乱流条件に適用した場合でも概ね壁面熱流束を予測可能であることが明らかとなったが、LESの枠組みの中で入力物理量を選択し直すことで、さらに高精度に壁面熱流束を予測可能であることを明らかになった。

開発したHead on quenchingとSide wall quenchingが混在する乱流火炎と壁面の干渉に対するAI支援火炎・壁面干渉熱伝達モデルにおける入力物理量に壁面と火炎面のなす角を追加することで更なる高精度化を実現した。また、メタンを対象とした定容容器内乱流予混合火炎の三次元DNSを実施し、それらの詳細な解析から火炎・壁面干渉における三次元効果を明らかにするとともに、三次元効果を表現可能な入力物理量の選定を行った。最終的に、定容容器内のメタン・空気乱流予混合火炎を対象としてAI支援火炎・壁面干渉熱伝達モデルの総合評価を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kaminaga T., Wang Y., Tanahashi Mamoru	4. 巻 1
2. 論文標題 A Machine Learning Model for Wall Heat Flux in Flame-wall Interaction	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc.10th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 353-356
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1615/ICHMT.THMT-23.1270	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 Kiran D., Minamoto Y., Osawa K., Shimura M., Tanahashi M.	4. 巻 1
2. 論文標題 A Direct Numerical Simulation Study for Flame Structure and Propagation Characteristics of Multi-Jet Flames	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Combustion Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1~25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00102202.2023.2249220	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 Wang Ye, Minamoto Yuki, Shimura Masayasu, Tanahashi Mamoru	4. 巻 27
2. 論文標題 Quenching modes of local flame-wall interaction for turbulent premixed methane combustion in a constant volume vessel	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Combustion Theory and Modelling	6. 最初と最後の頁 715~735
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/13647830.2023.2209047	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 Huang Sib0, Shimura Masayasu, Tanahashi Mamoru	4. 巻 130
2. 論文標題 Development of thermally assisted OH PLIF temperature measurement method based on a single femtosecond laser	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Applied Physics B	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00340-024-08199-9	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 源 勇気 , 店橋 護	4. 巻 61
2. 論文標題 乱流燃焼シミュレーションと機械学習活用	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 伝熱= Journal of the Heat Transfer Society of Japan	6. 最初と最後の頁 33-39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Defne KIRAN, Yuki MINAMOTO, Masayasu SHIMURA, Mamoru TANAHASHI	4. 巻 64
2. 論文標題 Effect of Steam Dilution on the Structure and Stabilization of Lifted Flames of Hydrogen	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本燃焼学会誌	6. 最初と最後の頁 80-91
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Yuki Minamoto, Kherlen Jigjid, Rentaro Igari, Mamoru Tanahashi	4. 巻 239
2. 論文標題 Effect of flame-flame interaction on scalar PDF in turbulent premixed flames	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Combustion and Flame	6. 最初と最後の頁 111660
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 南 啓伸 , 源 勇気 , 志村 祐康 , 店橋 護	4. 巻 1
2. 論文標題 Prediction of Local Kolmogorov Length Scale Using Deep Neural Network in a Combustion LES Context	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The 32nd International Symposium on Transport Phenomena	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Ye Wang , Yuki Minamoto , Masayasu Shimura , Mamoru Tanahashi	4. 巻 1
2. 論文標題 Effect of Turbulence Intensity on Flame-wall Interactions of Turbulent Premixed Flame in an Enclosed Rectangular Domain	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The 32nd International Symposium on Transport Phenomena	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Fuse Azusa, Yamada Rie, Minamoto Yuki, Shimura Masayasu, Tanahashi Mamoru	4. 巻 25
2. 論文標題 A derivation of temperature-based energy equation for LES of isochoric turbulent combustion with FDSGS model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Combustion Theory and Modelling	6. 最初と最後の頁 1324 ~ 1351
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/13647830.2021.1976422	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 源 勇気、店橋 護	4. 巻 63
2. 論文標題 機械学習を活用した乱流燃焼モデル開発	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 37 ~ 43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20619/jcombsj.63.203_37	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 南 啓伸、源 勇気、志村 祐康、店橋 護	4. 巻 40
2. 論文標題 高精度SGS燃焼モデルのための局所コルモコロフ・スケールAI予測	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ながれ	6. 最初と最後の頁 119 ~ 122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Osawa K., Minamoto Y., Shimura M., Tanahashi M.	4. 巻 33
2. 論文標題 Voronoi analysis of vortex clustering in homogeneous isotropic turbulence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 035138 ~ 035138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0039850	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 -

〔学会発表〕 計23件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 雨宮 壮一, 店橋 護, 志村 祐康, 鎌田 慎
2. 発表標題 SI エンジンにおける壁面近傍流動と壁面熱流束
3. 学会等名 第60回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 住友 啓允, 志村 祐康, 店橋 護
2. 発表標題 水素酸素デュアル・スワール部分予混合燃焼のDNS
3. 学会等名 第60回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 谷本 一騎, 齋田 瑛希, 志村 祐康, 鈴木 佐夜香, 店橋 護
2. 発表標題 デュアルスワールバーナに形成される部分予混合乱流火炎に対する当量比及び流量比の影響
3. 学会等名 日本流体力学会年会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齋田 瑛希, 谷本 一騎, 志村 祐康, 鈴木 佐夜香, 店橋 護
2. 発表標題 デュアルスワールバーナに形成される非予混合 乱流火炎の OH PLIF 計測
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 谷口 明広, 中別府 修, 鈴木 佐夜香, 店橋 護
2. 発表標題 火炎壁面干渉における火炎挙動と壁面熱流束特性に関する実験的研究
3. 学会等名 第61回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 神永 拓輝, 鈴木 佐夜香, 店橋護
2. 発表標題 HQQ型火炎壁面干渉におけるCO挙動に対する熱損失効果
3. 学会等名 第61回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 住友 啓允, 王 也, 鈴木 佐夜香, 志村 祐康, 店橋 護
2. 発表標題 水素空気デュアル・スワール部分予混合燃焼のDNS
3. 学会等名 第37回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tota Kobayashi, Mamoru Tanahashi
2. 発表標題 Augmentation for Turbulent Combustion Modelling by using PCA-GAN
3. 学会等名 18th European Turbulence Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kaminaga T., Wang Y., Tanahashi M.
2. 発表標題 A Machine Learning Model for Wall Heat Flux in Flame-wall Interaction
3. 学会等名 10th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ye Wang, M. Tanahashi
2. 発表標題 Local quenching distance and local quenching-induced wall heat flux of V-shape flame in a turbulent channel flow
3. 学会等名 The 9th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ye Wang, Masayasu Shimura, Mamoru Tanahashi
2. 発表標題 Study of near-wall flame structure and flame-wall interaction of turbulent premixed combustion in a constant volume vessel
3. 学会等名 The 33rd International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 南 啓伸 , 源 勇気 , 志村 祐康 , 店橋 護
2. 発表標題 Prediction of Local Kolmogorov Length Scale Using Deep Neural Network in a Combustion LES Context
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ye Wang , Yuki Minamoto , Masayasu Shimura , Mamoru Tanahashi
2. 発表標題 Effect of Turbulence Intensity on Flame-wall Interactions of Turbulent Premixed Flame in an Enclosed Rectangular Domain
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mamoru Tanahashi
2. 発表標題 DNS and SGS Modeling of Turbulent Combustion for Future IC Engines and Gas Turbines
3. 学会等名 China National Symposium on Combustion, 2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 南 啓伸 , 源 勇気 , 志村 祐康 , 店橋 護
2. 発表標題 局所コルモゴロフスケールAI予測に基づいたSGS燃焼モデルの開発
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ye Wang, Yuki Minamoto, Masayasu Shimura, Mamoru Tanahashi
2. 発表標題 Numerical study of near-wall flame propagation and flame-wall interaction for lean premixed turbulent combustion in a constant volume vessel
3. 学会等名 第60回 燃焼シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神永 拓輝, 源 勇気, 志村 祐康, 店橋 護
2. 発表標題 機械学習による火炎壁面干渉における壁面熱損失の予測 モデル構築
3. 学会等名 第59回 日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神永拓輝, 源 勇気, 志村 祐康, 店橋 護
2. 発表標題 HOQ型火炎壁面干渉における壁面熱損失の機械学習モデル
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 南啓伸, 源 勇気, 志村 祐康, 店橋 護
2. 発表標題 異なる乱流燃焼条件に適用可能な局所コルモゴロフスケール AI 予測
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Matsushima, M. Shimura, Y. Minamoto, M. Tanahashi
2. 発表標題 Local Fractal Dimension Prediction of Turbulent Premixed Flame by Machine Learning
3. 学会等名 The Second Asian Conference on Thermal Sciences (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Wang, Y. Minamoto, M. Shimura, M. Tanahashi
2. 発表標題 Effect of Turbulence Intensity on Flame-wall Interactions of Turbulent Premixed Flame in an Enclosed Rectangular Domain
3. 学会等名 32nd International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Tanahashi
2. 発表標題 DNS and Advanced Laser Diagnostics of Steam-Diluted Hydrogen-Oxygen Combustion for Future Electric Power Generation
3. 学会等名 13th Asia-Pacific Conference on Combustion (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 南 啓伸、源 勇気、志村 祐康、店橋 護
2. 発表標題 高精度SGS燃焼モデルのための局所コルモコロフ・スケールAI予測
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京工業大学 店橋・志村/鈴木研究室
http://www.reactiveflows.mech.e.titech.ac.jp/

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	志村 祐康 (Shimura Masayasu) (30581673)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・主任研究員 (82626)	
研究分担者	源 勇気 (Minamoto Yuki) (70769687)	東京工業大学・工学院・助教 (12608)	削除：2023年1月19日

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
---------	---------