

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01247

研究課題名(和文) 表面反応モデル構築を含む乱流予混合火炎の壁面近傍挙動の解明

研究課題名(英文) Study on near-wall behaviors of turbulent premixed flames including surface reaction modelling

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) 29,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、直接数値計算と呼ばれる高精度な数値シミュレーション法と最先端のレーザー計測技術を用いて、自動車エンジンや発電用ガスタービン燃焼器の熱効率向上に重要となる火炎と壁面の干渉機構を解明した。壁面表面での中間生成物の反応機構と壁面熱流束の関係を明らかにし、壁面近傍で火炎が消滅する直前には層流状態での燃焼速度を示すことを明らかにした。燃料の組成により火炎と壁面の干渉機構は異なり、乱流による歪み速度と壁面冷却によるラジカル生成反応の抑制が相乗的に影響を及ぼすことで消滅が起こることを明らかにした。また、火炎と壁面の干渉機構を考慮に入れたSGS燃焼モデルの構築も行い、その予測精度を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、我が国の一次エネルギー供給の大半を占める燃焼現象を対象とし、なかでも燃焼器のエネルギー効率の向上に重要となる火炎と壁面の干渉機構の解明とモデル化に焦点を当てた。本研究により、壁面近傍での火炎特性や熱損失特性が明らかにされるとともに、熱損失を予測可能なモデルも構築された。それらは今後高効率・低環境負荷燃焼器の開発に応用され、地球・都市環境問題の解決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, flame-wall interactions were investigated by highly-accurate direct numerical simulation and advanced laser diagnostics. The understanding of flame-wall interactions is important for improving thermal efficiency of automobile engines and gas turbine engines for electric power supply. Relation between the near-wall chemical reactions including surface reactions and wall heat flux is investigated in details. A new finding that burning velocity just before the quenching near the wall coincides with that of freely-propagating laminar flame is also reported. The flame-wall interaction depends on the fuel decomposition in swirl-stabilized combustor, which is the results of strong strain rate caused by turbulence and suppression of radical production due to heat loss through the wall. A sub-grid scale combustion model was proposed considering the flame-wall interaction mechanism which was shown by the present study, and the accuracy of the model was verified by a dynamic test.

研究分野：熱流体工学

キーワード：乱流燃焼 火炎壁面干渉 表面反応モデル 直接数値計算 レーザ計測

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (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。多くの実用燃焼器内の流れは乱流燃焼状態にあり、燃焼室壁面と乱流火炎の干渉が燃焼器自体の熱効率を決定する。しかし、理論的、実験的及び数値的取り扱いの困難さから、実用燃焼器で用いられている高レイノルズ数乱流火炎と壁面の干渉機構には、未解明な点が多く残されている。

#### ①高レイノルズ数乱流火炎と壁面の干渉機構

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ロモゴロフ・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)。研究代表者らは、乱流の慣性小領域における構造と火炎の相互作用に注目し、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 Large Eddy Simulation (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)。また、Reynolds Averaged Navier-Stokes 方程式の枠組みの中で、局所的な flamelet 型と non-flamelet 型の乱流-火炎干渉機構を考慮に入れた反応速度モデルを構築した(Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 41, pp. 9679-9689, 2015)。これらの結果は乱流燃焼研究の進展に大きく寄与しているが、実用燃焼器の効率を支配している乱流火炎と壁面の干渉機構については未解明な点が多く残されている。研究代表者らは、従来開空間の乱流火炎に限られていた乱流燃焼の DNS を壁面が存在する閉空間内乱流燃焼場に拡張している(Proc. Combust. Inst., Vol. 35, pp. 1277-1285, 2015 等)。これらの研究から、壁面上での化学反応モデル、燃料種、乱流特性等によって、火炎が壁面に衝突した際の熱流束特性が異なることが明らかにされている。実用燃焼器の高効率化と低環境負荷化には、高精度な壁面反応モデルを構築するとともに、乱流火炎と壁面の干渉機構の解明が必要不可欠である。

#### ②多次元複合光学計測の進展

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。従来の研究では、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ている(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ている(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により、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。これらの世界最先端の多次元複合光学計測技術の多くは壁面近傍の乱流燃焼特性に関する研究にも適用可能である。

#### ③超並列 GPU-DNS と表面反応モデル

乱流燃焼は、計算科学の中でも最も困難な問題の一つである。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。DNS の対象は当初基本的な乱流燃焼場に限定されていたが、近年では乱流噴流火炎や V 型乱流火炎等のより

現実的な乱流燃焼場に拡張されつつある。計算機関連技術の進展から、近い将来自動車用 IC エンジン内燃焼の完全シミュレーションが可能となることが研究代表者らによって示唆されており (J. Comput. Fluids Eng., Vol.13-4, pp. 114-125, 2008), これには超並列 GPU クラウド等の最新の計算科学的手法と乱流燃焼の DNS を融合させる必要がある。自動車用 IC エンジン内燃焼の完全シミュレーション実現に向けて、研究代表者らは、自動車用エンジン内を模擬した閉空間内乱流燃焼の DNS 技術の構築にすでに取り組んでおり、水素、メタン、ヘプタン等を燃料として壁面近傍の乱流火炎挙動を明らかにしつつある。また、厳密な DNS を壁面と乱流火炎の干渉に拡張するには、壁面で生じる表面反応を正確に記述する必要がある。しかし、特殊な場合を除き、現状では壁面を化学的に完全不活性とするか、あるいはラジカルの完全失活を仮定するかの手法のみであり、壁面での熱損失を予測するには高精度な表面反応モデルの構築が必要不可欠である。また、自動車用 IC エンジン内燃焼の完全シミュレーション実現には、複雑燃料の燃焼に対応できる詳細化学反応機構を用いる必要がある。しかし、これらの詳細化学反応機構は、膨大な数の化学種と素反応から構成されるため、乱流燃焼 DNS に直接用いることは不可能である。近年、経路流束分析法 (PFA)、数値的特異点摂動法 (CSP) 等を用いて、巨大化した詳細化学反応機構を効率よく最適化する研究が活発に行われているが、それらは層流火炎を対象とした基礎研究に留まっており、乱流燃焼に適用された例は存在しない。これらの化学反応機構最適化手法を用いて化学反応機構を局所的に最適化することで、壁面と乱流火炎の干渉を含む高レイノルズ数乱流燃焼の DNS が実現される。

## 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、表面反応モデルを構築し、壁面と乱流火炎の干渉機構を明らかにすることを目的とした。また、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 Large Eddy Simulation (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、この研究代表者らによるモデルを本研究の成果を用いて拡張させ、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、LES に基づく乱流燃焼シミュレータの開発も目指すものとした。

## 3. 研究の方法

本研究は、DNS を用いた数値的研究と高解像度時系列 PIV や高時間分解能 PLIF 等を組み合わせた多次元複合光学計測を用いた実験的研究から構成した。実用燃焼器内で観察される乱流火炎と壁面の干渉機構を総合的に解明するには、高精度表面反応モデルの構築、乱流火炎の壁面近傍挙動と壁面熱損失特性及びそれらに対する燃料種、当量比、壁温及び乱流特性の影響を詳細に検討する必要がある。本研究では、乱流予混合火炎を対象として、表面反応モデルについては、層流条件での光学計測と DNS を比較検討することで、最適なモデル構築を行うこととした。構築された表面反応モデルを用いて自動車エンジンを模擬した定容容器内乱流予混合燃焼及びマイクロガスタービンを模擬した矩形燃焼器の DNS 及び複合光学計測を行うことで、乱流火炎の壁面近傍挙動と壁面熱損失特性を明らかにすることとした。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。

### ①表面反応モデル構築と層流火炎・壁面干渉機構

実験的研究では、層流予混合火炎の壁面近傍挙動の複合光学計測に取り組む。ここでは、メタン・空気予混合火炎を対象として、乱流特性を制御可能な現有の定容容器燃焼器において層流条件での実験を行う。現有の定容容器燃焼器はレーザ着火が可能であり、外乱が極めて少ない状況で層流予混合火炎と壁面の干渉を検討できる。当量比等が異なる種々の条件における OH-CH<sub>2</sub>O PLIF とステレオ PIV 同時計測から、壁面近傍の燃焼速度やラジカル分布、消炎距離特性等を明らかにする。望遠顕微鏡を新たに導入することで、壁面近傍の火炎構造計測を高い空間分解能で実現する。

数値的研究では、層流予混合火炎の壁面近傍挙動の超並列 GPU-DNS に取り組む。これまでに開発してきた詳細化学反応を考慮に入れた閉空間内乱流予混合火炎の DNS コードを超並列 GPU-DNS に拡張する。実験と同様な条件において DNS を実行し、実験結果との比較から、表面反応モデルの妥当性を検討する。ここで、壁面での化学的条件として、化学的に不活性な条件とラジカルが完全失活する条件等について DNS を行い、これらの表面反応モデルの特性を明らかにする。

### ②乱流予混合火炎と壁面の干渉機構

実験的研究では、メタン・空気予混合火炎を対象として、乱流特性を制御可能な現有の定容容器燃焼器において乱流条件での実験を行う。ここで、現有の定容容器燃焼器では、燃焼器内に設置された乱流生成ファンを駆動させることにより等方的な乱流場が形成されるように設計されている。比較的乱流レイノルズ数が低い条件において、多次元多変量複合光学計測を用いて、壁面近傍の火炎面特性と局所燃焼速度の関係等を明らかにする。

数値的研究では、マイクロガスタービン燃焼器の超並列 GPU-DNS を実施する。ここでは、研究代表者らの従来の研究で確立し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 コードに表面反応モデルを組み込むとともに、大規模 DNS を実現するために超並列 GPU に拡張する。ガスタービン燃焼器のように旋回型乱流火炎が燃焼室壁面と干渉する場合、保炎機能を有する再循環領域とスワール数の関係が重要となる。開空間における旋回型乱流予混合火炎の場合、燃料噴出口の後流に形成される再循環領域が保炎機能として重要な役割を果たすが、側壁で囲まれた旋回型乱流火炎では側壁近傍に外部再循環領域が形成され、保炎機能だけでなく、壁面熱流束にも重要な役割を果たすものと考えられる。このため、異なるスワール数条件の水素・空気乱流予混合火炎及びメタン・空気乱流予混合火炎を対象として DNS を行う。DNS 結果から、火炎面と壁面の干渉機構に対する旋回乱流特性、それらに対する燃料種、当量比、壁温及び外部循環流の影響を明らかにする。また、ガスタービン型燃焼器では燃焼器の固有不安定モードに対応した振動燃焼が生じるが、これらと壁面熱損失の関係を燃焼室内圧力変動及びそれに連動した火炎面の大域的な動的特性に注目して検討する。これらの DNS 結果と実験的研究の結果を総合して、乱流予混合火炎と壁面の干渉機構に対する旋回流の影響を明らかにする。

### ③乱流予混合火炎と壁面の干渉機構を考慮に入れた SGS 燃焼モデルの構築

実用的な燃焼器の設計には、簡易的に熱損失特性を予測できる数値解析手法が有効である。本研究では LES に基づく乱流燃焼シミュレータの開発を目指す。本研究で明らかにされる乱流予混合火炎と壁面の干渉機構に基づき、壁面近傍の乱流予混合火炎の消炎と壁面熱損失に関する概念モデルを構築する。個々の火炎要素と壁面の干渉を解像できない LES を再現するために、DNS 結果と計測結果にフィルター操作を施し、概念モデルの検証を行う。概念モデルを定式化し、研究代表者らによって提案されている高精度 SGS 乱流燃焼モデルに反映させることで、壁面近傍の火炎挙動予測を含む新たな SGS 乱流燃焼モデルを提案する。提案された SGS 燃焼モデルを用いて、DNS 及び複合光学計測が対象とした燃焼場の LES を実行し、モデルの最終検証を行う。

## 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。

### ①表面反応モデル構築と層流火炎・壁面干渉機構

実験的研究では、乱流特性を制御可能な現有の定容容器燃焼器を対象として種々の層流条件における OH ラジカル及び  $\text{CH}_2\text{O}$  (ホルムアルデヒド) の燃焼中間生成物を対象とした PLIF 計測を実施し、当量比及び圧力が火炎構造に与える影響を明らかにした。望遠顕微鏡を新たに導入し、壁面近傍の火炎構造計測を高い空間分解能で実現可能な PLIF 計測法を構築するとともに、壁面材質及び壁面温度を変更可能な壁面を定容容器燃焼器に設置することで、予混合火炎と壁面の干渉機構を検討可能な実験装置を構築した。これらの計測法及び実験装置を用いた層流条件における計測結果から、壁面近傍での燃焼速度や消炎距離特性等を明らかにした。すなわち、壁面材料、初期圧力及び当量比によらず、火炎が壁面に接近するにつれて火炎伝播速度が点火前のバルクの熱化学的条件下での層流燃焼速度まで低下するとともに、さらに火炎が壁面に接近する際に火炎伝播速度が上昇することを明らかにした。この傾向は後述する層流予混合火炎と壁面との干渉に関する DNS 結果と一致する。

数値的研究では、これまでに開発してきた詳細化学反応を考慮に入れた閉空間内乱流予混合火炎の DNS コードを超並列 GPU-DNS に拡張を行った。壁面近傍における火炎伝播の基本特性を解明するために、水素、メタン及びヘプタンと異なる燃料を対象として壁面に向かって伝播する層流火炎の DNS を、様々な予熱温度、壁面温度条件及び着火位置条件下で実施した。予熱温度が壁面温度と同一な条件においては、壁面からの火炎までの距離が消炎距離よりも短くなると、どの燃料種においても火炎伝播速度が変極値を示し、その時刻における火炎伝播速度は、対応する燃焼条件での層流燃焼速度とほぼ一致することを明らかにした。また、表面反応によるラジカルの壁面への吸着が壁面近傍の火炎伝播挙動及び熱流束特性に与える影響を検討し、Head on Quenching と Side-wall Quenching によらず、表面へのラジカル、特に水素ラジカルの吸着が顕著になる場合、壁面近傍での火炎伝播速度の上昇が抑制され、壁面熱流束が低減されることを明らかにした。

### ②乱流予混合火炎と壁面の干渉機構

実験的研究では、乱流特性を制御可能な現有の定容容器燃焼器において、比較的乱流レイノルズ数が低いメタン・空気乱流予混合火炎を対象として多次元多変量複合光学計測を実施した。対象とした燃焼器の特性から、平均流動のない乱流予混合火炎と壁面が干渉する場合について、壁面近傍での火炎及び乱流と壁面の干渉機構を明らかにした。すなわち、時間的、空間的に変動する乱流火炎が壁面と干渉する場合であっても、壁面の極近傍では Head on Quenching が支配的であり、壁面熱流束の高精度な予測には少なくとも Head on Quenching を考慮に入れたモデルを構築・採用する必要があることを明らかにした。

数値的研究では、旋回乱流燃焼などの強い流動を有する燃焼場における火炎・壁面干渉及び熱流束特性に燃料種や当量比が与える影響を明らかにするために、旋回乱流予混合燃焼の超並列 GPU-DNS を実施した。水素のみを燃料とした場合に加えて、水素にメタンを添加した場合についても DNS を実施し、火炎構造及び火炎と壁面干渉に対する燃料組成の影響を検討した。メタンの添加割合の違いによる燃料組成の変化は、大域的な火炎構造にも大きな影響を与え、特にメタンの添加割合が高い条件では外側せん断層における火炎が消失することを明らかにした。壁面近

くに形成される火炎構造が燃料組成の影響を受けることから、壁面と火炎の干渉形態も燃料組成によって大きく異なることを明らかにした。すなわち、外側再循環領域における壁面近傍での消炎は、乱流による歪み速度と、壁面での冷却によるラジカル生成反応の抑制が相乗的に影響を及ぼすことで引き起こされている可能性を明らかにした。

### ③乱流予混合火炎と壁面の干渉機構を考慮に入れた SGS 燃焼モデルの構築

壁面近傍の火炎挙動を考慮に入れた SGS 燃焼モデルの構築では、乱流予混合火炎と壁面の干渉による熱流束の予測に取り組んだ。本研究で明らかにした乱流予混合火炎と壁面の干渉機構を考慮に入れて、定容容器内に形成される乱流予混合火炎を対象に研究代表者らによって提案された SGS 燃焼モデルの動的テストを行った。フィルター操作を施した DNS 結果と熱流束に関して比較を行った結果、火炎と壁面の干渉が生じる時刻において、研究代表者らによって提案された SGS 燃焼モデルが従来提案されてきた燃焼モデルよりも高精度で熱流束を予測可能であることを明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Narukawa Kosuke, Minamoto Yuki, Shimura Masayasu, Tanahashi Mamoru	4. 巻 268
2. 論文標題 Near-wall flame propagation behaviour with and without surface reactions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fuel	6. 最初と最後の頁 117216 ~ 117216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fuel.2020.117216	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 Park Joonhwi, Minamoto Yuki, Shimura Masayasu, Tanahashi Mamoru	4. 巻 45
2. 論文標題 Effects of hydrogen enrichment on CH <sub>4</sub> /Air turbulent swirling premixed flames in a cuboid combustor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	6. 最初と最後の頁 9039 ~ 9051
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2019.12.175	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 Aoki Kozo, Shimura Masayasu, Park JoonHwi, Minamoto Yuki, Tanahashi Mamoru	4. 巻 104
2. 論文標題 Response of Heat Release Rate to Flame Straining in Swirling Hydrogen-Air Premixed Flames	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Flow, Turbulence and Combustion	6. 最初と最後の頁 451 ~ 478
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10494-019-00102-3	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 Minamoto Yuki, Tanahashi Mamoru	4. 巻 44
2. 論文標題 Effect of turbulent motions at different length scales on turbulent premixed swirl-stabilised flame topology	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	6. 最初と最後の頁 22316 ~ 22327
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2019.06.146	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 J. Park, Y. Minamoto, M. Shimura, M. Tanahashi	4. 巻 1
2. 論文標題 Direct Numerical Simulations of Hydrogen-Enriched Methane/air Turbulent Swirling Premixed Flames	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 11th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena	6. 最初と最後の頁 -
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 源 勇氣, 生川 功祐, 田中 翔太, 志村 祐康, 店橋 護	4. 巻 1
2. 論文標題 壁面近傍における火炎伝播特性と表面反応の影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会2019年度年次大会講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
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 Doan N. A. K., Swaminathan N., Davidson P. A., Tanahashi M.	4. 巻 3
2. 論文標題 Scale locality of the energy cascade using real space quantities	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 84601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.3.084601	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 該当する

1. 著者名 Itoh T., Naka Y., Minamoto Y., Shimura M., Tanahashi M.	4. 巻 72
2. 論文標題 Large-scale clustering of coherent fine-scale eddies in a turbulent mixing layer	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Fluid Flow	6. 最初と最後の頁 100 ~ 108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatfluidflow.2018.05.007	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 Ghiasi G., Doan N.A.K., Swaminathan N., Yenerdag B., Minamoto Y., Tanahashi M.	4. 巻 43
2. 論文標題 Assessment of SGS closure for isochoric combustion of hydrogen-air mixture	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	6. 最初と最後の頁 8105 ~ 8115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2018.02.140	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 該当する

1. 著者名 Joonhwi Park, Kozo Aoki, Yuki Minamoto, Masayasu Shimura, Mamoru Tanahashi	4. 巻 1
2. 論文標題 DNS of methane/hydrogen air turbulent swirling flame in a cuboid combustor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 16th International Heat Transfer Conference	6. 最初と最後の頁 -
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 生川 功祐, 源勇気, 志村祐康, 店橋護	4. 巻 1
2. 論文標題 壁面と干渉する予混合火炎の伝播特性	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 第55回日本伝熱シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
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 大沢耕介, 源勇気, 志村祐康, 店橋護	4. 巻 1
2. 論文標題 高レイノルズ数乱流における微細渦クラスターの形成機構	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本流体力学会年会2018講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
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 源 勇気, YENERDAG Basmil, 店橋 護	4. 巻 1
2. 論文標題 水素・空気旋回乱流予混合燃焼場における乱流-火炎の干渉スケールの位相幾何学的解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本流体力学会年会2018講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
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 生川功祐, 源勇気, 志村祐康, 店橋護	4. 巻 1
2. 論文標題 予混合火炎の壁面近傍挙動に対する表面反応の影響	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2018講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
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 源 勇気, YENERDAG Basmil, 店橋 護	4. 巻 1
2. 論文標題 位相幾何学に基づく水素・空気旋回乱流予混合火炎の形態と構造の解明	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 第56回燃焼シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
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 Park Joonhwi, 源 勇気, 志村 祐康, 店橋 護	4. 巻 1
2. 論文標題 メタン/水素/空気旋回乱流予混合火炎構造に対する水素添加率及び乱流の影響	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 第56回燃焼シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
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 生川 功祐, 源 勇気, 志村 祐康, 店橋 護	4. 巻 1
2. 論文標題 予混合火炎の壁面近傍挙動と表面反応	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 第32回数値流体力学シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
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 Park Joonhwi, 源 勇気, 志村 祐康, 店橋 護	4. 巻 1
2. 論文標題 水素添加メタン/空気旋回乱流予混合火炎の直接数値計算	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 第32回数値流体力学シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
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 Yenerdag Basmil, Nada Yuzuru, Minamoto Yuki, Shimura Masayasu, Tanahashi Mamoru	4. 巻 USB
2. 論文標題 Effects of Wall Heat Loss on Near Wall Flame Behaviors in a Confined Turbulent Premixed Flame	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference	6. 最初と最後の頁 -
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 Yenerdag Basmil, Minamoto Yuki, Shimura Masayasu, Tanahashi Mamoru	4. 巻 USB
2. 論文標題 Flame Displacement Speed Characteristics of Turbulent Premixed Flames in a Constant Volume Vessel	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the 11th Asia-Pacific Conference on Combustion	6. 最初と最後の頁 -
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 Son Jaewon, Itoh Toshitaka, Naka Yoshitsugu, Minamoto Yuki, Shimura Masayasu, Tanahashi Mamoru	4. 巻 USB
2. 論文標題 Clustering of Fine-scale Eddies and its Relation with Large-scale Structures in Temporal Mixing Layer at High Reynolds Number	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本流体力学学会年会 2017講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
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 Yenerdag Basmil, Minamoto Yuki, Shimura Masayasu, Tanahashi Mamoru	4. 巻 USB
2. 論文標題 Local Flame Displacement Speed of Centrally-Ignited Premixed Flame in Constant Volume Vessel	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 第55回燃焼シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
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 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 J. Park, Y. Minamoto, M. Shimura, M. Tanahashi
2. 発表標題 Direct Numerical Simulations of Hydrogen-Enriched Methane/air Turbulent Swirling Premixed Flames
3. 学会等名 11th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 源 勇気, 生川 功祐, 田中 翔太, 志村 祐康, 店橋 護
2. 発表標題 壁面近傍における火炎伝播特性と表面反応の影響
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kosuke Narukawa, Yuki Minamoto, Masayasu Shimura, Mamoru Tanahashi
2 . 発表標題 DNS of Near-Wall Flame Propagation
3 . 学会等名 13th World Congress on Computational Mechanics ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Joonhwi Park, Kozo Aoki, Yuki Minamoto, Masayasu Shimura, Mamoru Tanahashi
2 . 発表標題 DNS of methane/hydrogen air turbulent swirling flame in a cuboid combustor
3 . 学会等名 16th International Heat Transfer Conference ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Kosuke Osawa, Yuki Minamoto, Masayasu Shimura, Mamoru Tanahashi
2 . 発表標題 Formation of Fine-scale Eddy Cluster in Turbulent Flows
3 . 学会等名 The 29th International Symposium on Transport Phenomena ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Kosuke Narukawa, Yuki Minamoto, Masayasu Shimura, Mamoru Tanahashi
2 . 発表標題 DNS Investigation of Near-Wall Flame Behavior Including Radical Quenching Effect
3 . 学会等名 71st Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 Joonhwi Park, Yuki Minamoto, Masayasu Shimura, Mamoru Tanahashi
2. 発表標題 Effects of hydrogen enrichment ratios and turbulence on the structures of methane/hydrogen/air turbulent swirling flames in a cuboid combustor
3. 学会等名 71st Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 生川 功祐, 源勇氣, 志村祐康, 店橋護
2. 発表標題 壁面と干渉する予混合火炎の伝播特性
3. 学会等名 第55回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大沢耕介, 源勇氣, 志村祐康, 店橋護
2. 発表標題 高レイノルズ数乱流における微細渦クラスターの形成機構
3. 学会等名 日本流体力学会年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 源 勇氣, YENERDAG Basmil, 店橋 護
2. 発表標題 水素・空気旋回乱流予混合燃焼場における乱流-火炎の干渉スケールの位相幾何学的解析
3. 学会等名 日本流体力学会年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 生川功祐, 源勇気, 志村祐康, 店橋護
2. 発表標題 予混合火炎の壁面近傍挙動に対する表面反応の影響
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 源 勇気, YENERDAG Basnil, 店橋 護
2. 発表標題 位相幾何学に基づく水素・空気旋回流予混合火炎の形態と構造の解明
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 Park Joonhwi, 源 勇気, 志村 祐康, 店橋 護
2. 発表標題 メタン/水素/空気旋回流予混合火炎構造に対する水素添加率及び乱流の影響
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 生川 功祐, 源 勇気, 志村 祐康, 店橋 護
2. 発表標題 予混合火炎の壁面近傍挙動と表面反応
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Park Joonhwi, 源 勇気, 志村 祐康, 店橋 護
2. 発表標題 水素添加メタン/空気旋回乱流予混合火炎の直接数値計算
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Narukawa Kosuke, Minamoto Yuki, Shimura Masayasu, Tanahashi Mamoru
2. 発表標題 Near-Wall Flame Propagation Characteristics
3. 学会等名 70th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Osawa Kosuke, Minamoto Yuki, Shimura Masayasu, Tanahashi Mamoru
2. 発表標題 Fine scale eddy cluster in turbulent channel flow
3. 学会等名 70th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yenerdag Basmil, Nada Yuzuru, Minamoto Yuki, Shimura Masayasu, Tanahashi Mamoru
2. 発表標題 Effects of Wall Heat Loss on Near Wall Flame Behaviors in a Confined Turbulent Premixed Flame
3. 学会等名 Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yenerdag Basmil, Minamoto Yuki, Shimura Masayasu, Tanahashi Mamoru
2. 発表標題 Flame Displacement Speed Characteristics of Turbulent Premixed Flames in a Constant Volume Vessel
3. 学会等名 11th Asia-Pacific Conference on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Son Jaewon, Itoh Toshitaka, Naka Yoshitsugu, Minamoto Yuki, Shimura Masayasu, Tanahashi Mamoru
2. 発表標題 Clustering of Fine-scale Eddies and its Relation with Large-scale Structures in Temporal Mixing Layer at High Reynolds Number
3. 学会等名 日本流体力学学会年会 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yenerdag Basmil, Minamoto Yuki, Shimura Masayasu, Tanahashi Mamoru
2. 発表標題 Local Flame Displacement Speed of Centrally-Ignited Premixed Flame in Constant Volume Vessel
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〕

東京工業大学 店橋・志村研究室  
<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)	東京工業大学・工学院・准教授    (12608)	
研究分担者	源 勇氣  (Minamoto Yuki)  (70769687)	東京工業大学・工学院・助教    (12608)	

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