

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2011～2015

課題番号：23226005

研究課題名(和文) 多次元複合光学計測とGPUクラウドDNSによる乱流予混合火炎の多重階層構造の解明

研究課題名(英文) A Study on Multi-Hierarchical Structures of Turbulent Premixed Flame by Multi-Dimensional Combined Laser Diagnostics and GPU-Cloud DNS

研究代表者

宮内 敏雄 (Miyuchi, Toshio)

明治大学・研究・知財戦略機構・特任教授

研究者番号：50016664

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 161,500,000円

研究成果の概要(和文)：多くの実用燃焼器内の流れは、高レイノルズ数及び高圧力条件の下にあり、乱流の階層構造による火炎面の階層構造が乱流燃焼特性を支配している。本研究では、超並列GPUクラウドによる直接数値計算(DNS)と多次元複合光学計測を用いて、高圧力環境下、高レイノルズ数乱流予混合火炎の火炎面及び火炎内部の階層構造を明らかにすると共に、それに基づくサブ・グリッド・スケール(SGS)燃焼モデルを開発し、乱流燃焼のラージ・エディ・シミュレーション(LES)を構築した。

研究成果の概要(英文)：Practical combustors are operated in conditions of high Reynolds numbers and high pressure, and turbulent flame structures generated by hierarchical structure of turbulent flows dominate characteristics of turbulent combustion. In this research project, structures of turbulent premixed flames in high pressure and high Reynolds number conditions are investigated by DNS with parallel GPU cloud and by multi-dimensional combined laser diagnostics. Based on the characteristics of turbulent flame structures, an SGS combustion model has been developed and LES of turbulent combustion has also been established.

研究分野：熱流体工学

キーワード：乱流燃焼 階層構造 複合レーザー計測 直接数値計算 超並列計算 熱工学 流体工学

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 90%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な不可欠であるが、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、高レイノルズ数及び高圧力条件の下にあり、乱流の階層構造による火炎の階層構造が乱流燃焼特性を支配している。しかし、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条件での乱流燃焼機構には、未解明な点が多く残されている。

2. 研究の目的

実用燃焼器内で観察される乱流燃焼の階層的構造を総合的に解明するには、高レイノルズ数及び高圧力環境下の火炎階層構造、乱流のコヒーレント微細渦と火炎の干渉による火炎内部の階層構造及びそれらと火炎自体が有する固有不安定性との関連を詳細に検討する必要がある。本研究では、超並列 GPU クラウドによる直接数値計算 (DNS) と多次元複合光学計測を用いて、高圧力環境下の高レイノルズ数乱流予混合火炎の火炎面及び火炎内部の階層構造を明らかにすると共に、それに基づくサブ・グリッド・スケール (SGS) 燃焼モデルを開発することを目的としている。さらに、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、ラージ・エディ・シミュレーション (LES) に基づく乱流燃焼シミュレータの構築も併せて行う。

3. 研究の方法

数値的研究では、超並列 GPU クラウド等の最先端の科学計算技術、局所最適化簡略化学反応機構等の近年提案された燃焼計算手法を乱流燃焼の DNS に組み込み、各種燃焼場の高圧力条件下の高レイノルズ数乱流予混合火炎の DNS を行う。実験的研究では、平面レーザー誘起蛍光法 (PLIF) による複数化学種濃度と粒子画像流速計 (PIV) による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を行い、高圧・高レイノルズ数乱流予混合火炎の三次元火炎構造とその動的特性を明らかにする。数値的・実験的研究結果を総合して、乱流燃焼モデルの開発と LES の構築を行う。

4. 研究成果

(1) 超並列 GPU-DNS による高レイノルズ数乱流予混合火炎の火炎面階層構造の解明

【大気圧条件下における高レイノルズ数乱

流予混合火炎の火炎面の階層構造】詳細化学反応を考慮に入れた等方性乱流中を伝播する水素・空気乱流予混合火炎及びメタン・空気乱流予混合火炎の DNS コードを超並列 GPU 計算用に拡張した。等方性乱流中を伝播する乱流予混合火炎、保炎用高温ロッドの後流に形成される V 型乱流予混合火炎 (図 1) 及び平面乱流噴流予混合火炎 (図 2) を対象として、高レイノルズ数条件での DNS を大気圧下で行った。DNS 結果に、フラクタル解析を施すことにより、フラクタル次元及び inner cutoff 等の火炎面の階層的挙動を明らかにするとともに、乱流微細構造、平均せん断及び大規模渦構造が火炎階層構造に与える影響を明らかにした。さらに火炎内部に階層構造が形成されると予測される乱流微細構造と火炎の時間スケールが近い条件について、一様等方性乱流中を伝播する予混合火炎の超並列 DNS を行い (図 3)、最も基本的な火炎内部の階層構造を明らかにし、その形成過程と局所熱発生率に及ぼす影響を明らかにした。

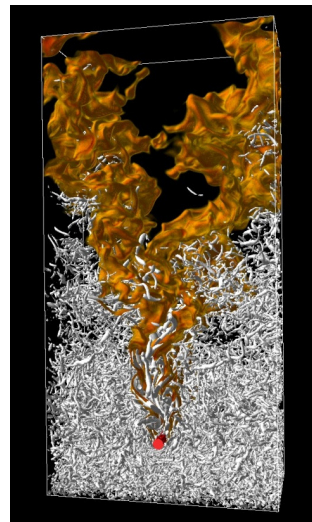


図 1 高レイノルズ数 V 型乱流予混合火炎の DNS 例 (灰色等値面：微細渦構造，橙色分布：熱発生率分布)

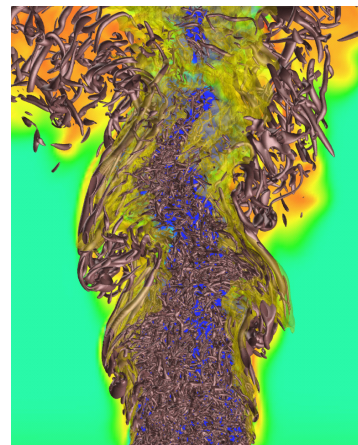


図 2 高レイノルズ数乱流噴流予混合火炎の DNS 例 (褐色等値面：微細渦構造，背面色：OH，黄色半透明等値面：温度)

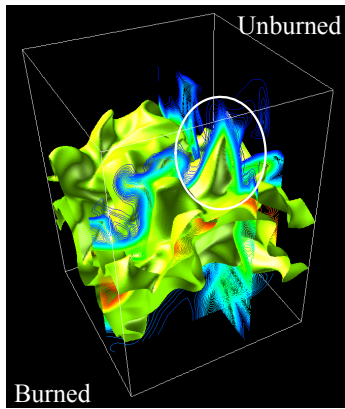


図 3 高レイノルズ数一様等方性乱流中の予混合火炎の DNS 例(白丸: radical fingering, 等値面, 等値線: HO_2 質量分率)

【高圧・高レイノルズ数乱流予混合火炎における火炎階層構造の解明】水素・空気予混合気の V 型乱流火炎を対象とした超並列 GPU-DNS を高圧力条件に拡張し, さらに高いレイノルズ数の DNS を実現した. 高圧力条件では, 乱流構造が微細化することにより火炎面が微細に湾曲する. さらに保炎ロッド後流で形成されるカルマン渦列による火炎面の大規模な湾曲と重なり, 火炎面の多重畳み込み構造が形成され, 局所熱発生率が顕著に上昇することを明らかにした. 高圧条件下では相対的に火炎面厚さが薄くなるため, HO_2 等の燃焼中間生成物が局在化し, 局所熱発生率が顕著に上昇すると共に分散も大きくなることを明らかにした. これらの知見は高圧条件下における乱流燃焼機構を解明する上で有用である.

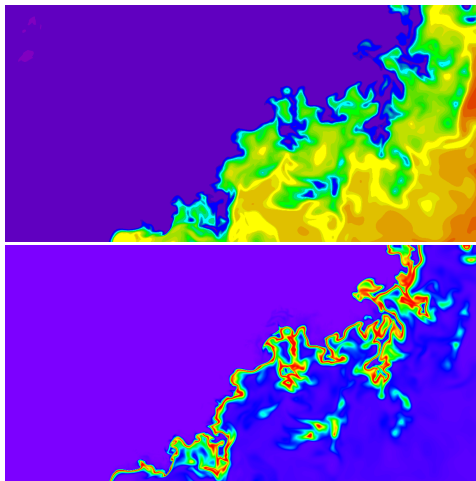


図 4 高圧・高レイノルズ数 V 型乱流予混合火炎の DNS 例 (計算領域半分のみ可視化. 上: 温度, 下: HO_2 質量分率)

【超並列 GPU-DNS と局所最適化簡略化学反応機構の融合による複雑燃料の DNS】複雑燃料を対象とした厳密な DNS を高圧力・高レイノルズ数条件に拡張するには, 高圧力条件での燃焼反応や複雑燃料の燃焼に対応できる化学反応機構を用いる必要がある. しかし, 膨

大な数の化学種と素反応から構成される詳細化学反応機構を, 乱流燃焼 DNS に直接用いることは不可能である. そこで, 近年開発された局所最適化簡略化学反応機構を用いて化学反応機構を局所的に最適化することで, DNS に要する計算時間の大幅な短縮を実現し, 複雑燃料を対象とした高圧・高レイノルズ数乱流燃焼の DNS を実現した. メタン・空気予混合気の希薄条件について等方性乱流中を伝播する乱流予混合火炎を対象として詳細化学反応機構を考慮に入れた超並列 DNS を行い (図 5), 統計的な火炎構造特性のレイノルズ数依存性, 当量比依存性を明らかにした. 今後, より複雑な燃料 (プロパン, ヘプタン等) を対象とした DNS による乱流燃焼機構の解明が期待されている.

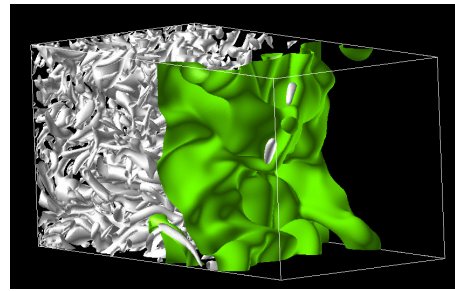


図 5 等方性乱流中を伝播する希薄メタン・空気予混合火炎の DNS 例 (灰色等値面: 渦構造, 緑等値面: 温度)

(2) 多次元複合光学計測による乱流予混合火炎の階層構造の解明

【二平面 CH PLIF, 二平面 OH PLIF 同時計測による乱流予混合火炎の三次元火炎構造】研究代表者らによって開発された火炎面の三次元計測と流体速度 3 成分, 速度勾配 9 成分の同時計測が可能な二平面 CH PLIF, 一平面 OH PLIF 及び波長型二平面ステレオ PIV 同時計測法に OH PLIF を追加することで四平面 PLIF 計測を実現した. これを高レイノルズ数メタン・空気乱流噴流予混合火炎に適用し (図 6), 主要な火炎構造が分断される領域において広範な高熱発生領域が形成される等, 乱流予混合火炎の特徴的な三次元火炎構造を明らかにした. 乱流火炎の三次元構造を解明することは乱流火炎研究において最も重要かつ困難な課題の一つであり, 本研究で開発した計測手法は世界最先端である.

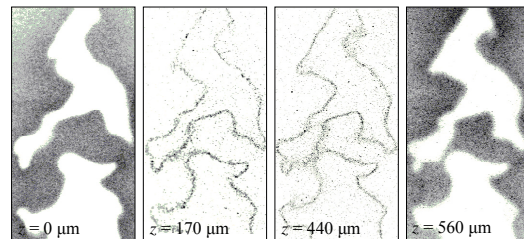


図 6 乱流噴流予混合火炎における四平面 PLIF 計測結果の一例 (左から OH, CH, CH, OH ラジカル分布)

【ダブルパルス CH PLIF, OH PLIF 及び波長型二平面ステレオ PIV 同時計測による乱流予混合火炎の局所燃焼速度直接計測】乱流予混合火炎の階層構造を明らかにするには、乱流中での火炎面の動的な特性を計測する必要があります。これまでの研究代表者らの研究によって、一平面におけるダブルパルス CH PLIF 計測が構築されているが、前述の三次元火炎構造及びそのダイナミクスを考慮に入れて計測を行う必要がある。本研究では、ダブルパルス CH PLIF 計測に OH PLIF 及び波長型二平面ステレオ PIV を組み合わせ、さらに OH PLIF をダブルパルス化することで二平面同時局所燃焼速度の直接計測法を構築した。さらに、乱流噴流火炎の DNS 結果を用いて、局所燃焼速度の算出法の開発を行った。CH₄ の反応速度に基づいた局所燃焼速度と実験的に求められた局所燃焼速度を比較することで、高精度な局所燃焼速度算出法を構築した。開発したダブルパルス CH PLIF, OH PLIF 及び波長型二平面ステレオ PIV 同時計測法を、高レイノルズ数乱流噴流火炎に適用することで、高精度で局所燃焼速度を直接計測可能であることを明らかにした (図 7)。

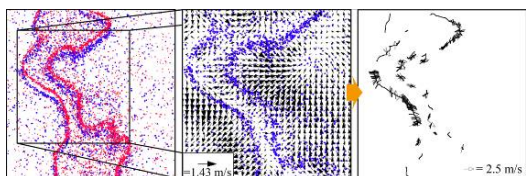


図 7 乱流噴流予混合火炎におけるダブルパルス CH PLIF, OH PLIF 及び波長型二平面ステレオ PIV 同時計測結果の一例 (CH PLIF の計測面)

【高速度 OH PLIF と時系列 PIV の同時計測による乱流予混合火炎の動的な特性の解明】上記の低繰り返しダブルパルス計測では、局所的な乱流燃焼速度を計測可能であるが、時系列で動的な特性を追うことはできない。このため、高速度 OH PLIF と時系列 PIV の同時計測法を構築した。これを希薄条件の旋回流予混合火炎に適用し、dynamic mode decomposition (DMD) を施すことにより、燃焼器内の圧力変動と対応した火炎構造の動的な特性を明らかにした。

【OH PLIF, CH₂O PLIF 同時計測による高圧乱流予混合火炎の火炎構造の解明】火炎の反応帯構造の解明に CH ラジカルの PLIF は有効であるが、高レイノルズ数、希薄条件下では計測が困難である。一方で近年の研究から OH とホルムアルデヒド (CH₂O) のモル分率の積が熱発生と相関があることが明らかにされており、これらを同時に計測することが高レイノルズ数、希薄条件下の火炎構造の解明に有効である。これらの同時計測を定容容器内に形成される乱流予混合火炎に適用した (図 8)。火炎面の曲率と擬似熱発生率 (OH × CH₂O) との関係を検討し、それらの火炎構造の圧力依存性、レイノルズ数依存性を明らかにした。

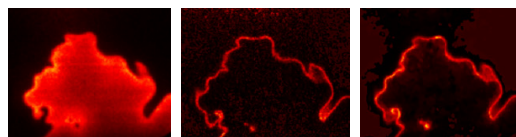


図 8 定容容器燃焼器内に形成される高圧メタン・空気乱流予混合火炎の火炎構造例. 左から、OH ラジカル, CH₂O, 擬似熱発生率.

(3) 火炎の階層構造に基づく SGS 燃焼モデルの開発と乱流予混合火炎の LES の構築

【火炎階層構造に基づくフラクタル・ダイナミック SGS 燃焼モデル】上記で得られた火炎の階層構造に関する結果をこれまでに開発した LES のための SGS 燃焼モデルに反映させ、モデルの高精度化を行った。前述 (1) で得られた火炎面のフラクタル特性及び Inner cutoff に関する普遍的な相関式を提案し、それらを SGS 燃焼モデルに反映させた。実機燃焼器内の火炎は、V 型火炎、噴流火炎と同様に局所的にフラクタル次元が異なることから、フラクタル次元の局所算出法を用いたフラクタル・ダイナミック SGS 燃焼モデルを提案した。乱流噴流火炎の DNS データベースを用いた静的テストを行うことで、フラクタル・ダイナミック SGS 燃焼モデルにより火炎面面積を高精度で予測可能であることを明らかにした (図 9)。さらに高圧力条件下の乱流予混合火炎では、前述の火炎面の多重折り畳み構造が特徴的な構造であり、これは局所的な乱流特性が燃焼特性に大きな影響を与えることを意味している。このため、局所的な SGS 応力をグリッドスケール成分の物理量から予測可能なモデル、格子幅自己認識型 SGS 応力モデルの構築を行った。

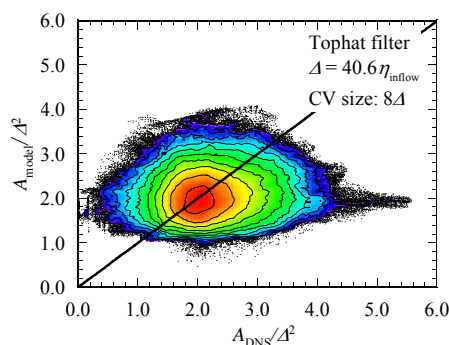


図 9 フラクタル・ダイナミック SGS 燃焼モデルによる火炎面面積の予測結果例。DNS 結果の火炎面面積 (横軸) とモデルによる火炎面面積予測値 (縦軸) の結合確率密度関数。

【フラクタル・ダイナミック SGS 燃焼モデルを用いた乱流予混合火炎の LES】開発したフラクタル・ダイナミック SGS 燃焼モデルを組み込み、乱流予混合火炎の LES を構築した。精度検証のため、DNS と同じ条件において、乱流噴流予混合火炎の LES を行った。空間フィルターを施した DNS 結果との比較 (図 10)、また、従来 LES で用いられてきた SGS 燃焼モデルを用いた LES 結果との比較から、本研究において構築された

LES が高い精度で乱流火炎構造を予測可能であることを明らかにした。

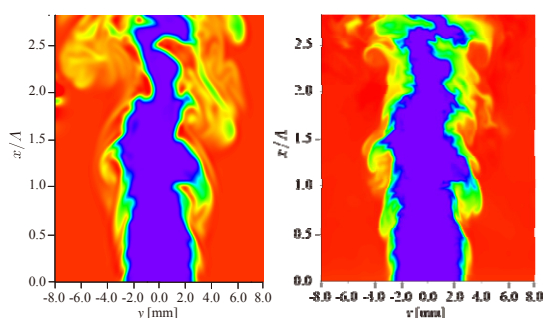


図 10 フラクタル・ダイナミック SGS 燃焼モデルを用いた乱流噴流予混合火炎の LES 結果例 (温度分布). 左: LES, 右: 空間フィルタを施した DNS

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 17 件)

- ① Y. Naka, K. Tomita, M. Shimura, N. Fukushima, M. Tanahashi, T. Miyauchi, Quad-plane Stereoscopic PIV for Fine-scale Structure Measurements in Turbulence, *Experiments in Fluids*, *Experiments in Fluids*, Vol. 57:63 (2016), 20pp. doi: 10.1007/s00348-016-2146-4. 査読有.
- ② B. Yenerdag, N. Fukushima, M. Shimura, M. Tanahashi, T. Miyauchi, Turbulence-Flame Interaction and Fractal Characteristics of H_2 -Air Premixed Flame under Pressure Rising Condition, *Proceedings of the Combustion Institute*, 35(2) (2015), pp. 1277-1285. doi:10.1016/j.proci.2014.05.153, 査読有.
- ③ E. Miyata, N. Fukushima, Y. Naka, M. Shimura, M. Tanahashi, T. Miyauchi, Direct Numerical Simulation of Micro Combustion in a Narrow Circular Channel with a Detailed Kinetic Mechanism, *Proceedings of the Combustion Institute*, 35(3) (2015), pp. 3421-3427. doi:10.1016/j.proci.2014.07.057, 査読有.
- ④ A. Johchi, Y. Naka, M. Shimura, M. Tanahashi, T. Miyauchi, Investigation on Rapid Consumption of Fine Scale Unburned Mixture Islands in Turbulent Flame via 10 kHz Simultaneous CH-OH PLIF and SPIV, *Proceedings of the Combustion Institute*, 35(3) (2015), pp. 3663-3671. doi:10.1016/j.proci.2014.09.007, 査読有.
- ⑤ K. Hiraoka, M. Shimura, Y. Naka, M. Tanahashi, T. Miyauchi, LES of a Hydrogen-Air Turbulent Jet Premixed Flame using a Fractal Dynamic SGS Combustion Model, *Proceedings of the International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer 8*, (2015), 12pp. 査読有.
- ⑥ K. Osawa, Y. Naka, N. Fukushima, M. Shimura, M. Tanahashi, T. Miyauchi, Effects of Flow Structures on Turbulence Statistics of Taylor-Couette Flow in the Torque Transition State, *Proceedings of the International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer 8*, (2015), 12pp. 査読有.
- ⑦ N. Fukushima, Y. Naka, K. Hiraoka, M. Shimura, M. Tanahashi, T. Miyauchi, A Scale Self-recognition Mixed SGS Model Based on the Universal Representation of Kolmogorov Length by GS Variables, *Proceedings of the 9th International Symposium on Turbulent Shear Flow Phenomena*, (2015), 6pp. 査読有.
- ⑧ M. Tanahashi, M. Shimura, DNS and Advanced Laser Diagnostics of Turbulent Combustion, *Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference (IHTC-15)*, (2014), 12pp. doi: 10.1615/IHTC15.kn.000022, 査読無.
- ⑨ M. Tanahashi, M. Shimura, Scientific Visualization of Turbulent Combustion Field by Advanced Laser Diagnostics, *Proceedings of the 16th International Symposium on Flow Visualization (ISFV16)*, (2014), 8pp. 査読無.
- ⑩ Y.-S. Shim, N. Fukushima, M. Shimura, Y. Nada, M. Tanahashi, T. Miyauchi, Radical Fingering in Turbulent Premixed Flame Classified into Thin Reaction Zones, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 34 (2013), pp. 1383-1391. 査読有.
- ⑪ 店橋護, 志村祐康, 福島直哉, スーパーコンピュータを用いた大規模乱流燃焼解析, *日本伝熱学会誌「伝熱」*, 査読無, Vol. 52, No. 220 (2013), pp. 33-38. (解説・総説)
- ⑫ 店橋護, 志村祐康, 福島直哉, 燃焼器における可視化技術の活用, *日本ガスタービン学会誌*, 査読無, Vol. 41, No. 5 (2013), pp. 11-16. (解説・総説)
- ⑬ M. Shimura, K. Yamawaki, N. Fukushima, Y.-S. Shim, Y. Nada, M. Tanahashi, T. Miyauchi, Flame and Eddy Structures in Hydrogen-Air Turbulent Jet Premixed Flame, *Journal of Turbulence*, Vol. 13, N42 (2012). 査読有.
- ⑭ 店橋護, 福島直哉, 志村祐康, 由川格, 乱流火炎構造研究の最先端 (DNSと先端レーザ計測), *日本流体力学学会誌「ながれ」*, 査読無, Vol. 31, No. 4 (2012), pp. 333-338. (解説・総説)
- ⑮ 店橋護, 福島直哉, 由川格, 志村祐康, 乱流燃焼研究における大規模数値データのハンドリングと可視化技術, *日本燃焼学会誌*, 査読無, Vol. 54, No. 169 (2012), pp. 158-165. (解説・総説)

- ⑯ 店橋護, 志村祐康, 福島直哉, エンジン内乱流燃焼機構の解明に向けて, 自動車技術会誌「自動車技術」, 査読無, Vol. 66, No. 4 (2012), pp. 82-85. (解説・総説)
- ⑰ Y. Minamoto, N. Fukushima, M. Tanahashi, T. Miyauchi, T. D. Dunstan, N. Swaminathan, Effect of Flow-Geometry on Turbulence-Scalar Interaction in Premixed Flames, Physics of Fluids, Vol. 23, 125107 (2011). 査読有.

[学会発表] (計 76 件)

- ① M. Tanahashi, LES of Turbulent Premixed Flames Based on a Fractal Dynamic SGS Model, Workshop on Recent Advances in Turbulent Premixed Combustion Modelling, Cambridge (United Kingdom), 25 June, 2015. (Invited Lecture)
- ② K. Matsui, Y. Naka, N. Fukushima, M. Shimura, M. Tanahashi, T. Miyauchi, Static and Dynamic Tests of the Grid-Width Self-Recognizing SGS Model in a Turbulent Plane Jet, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015, Seoul (Republic of Korea), 26-31 July 2015.
- ③ M. Tanahashi, Scientific Visualization of Turbulent Combustion Field by Advanced Laser Diagnostics, The 16th International Symposium on Flow Visualization (ISFV16), 沖縄コンベンションセンター (沖縄県・宜野湾市), 24-27 June 2014. (Keynote Lecture)
- ④ M. Tanahashi, DNS and Advanced Laser Diagnostics of Turbulent Combustion, The 15th International Heat Transfer Conference (IHTC15), 京都国際会館 (京都府・京都市), 10-15 August 2014. (Keynote Lecture)
- ⑤ M. Shimura, B. Yenerdag, Y. Naka, Y. Nada, M. Tanahashi, 3D DNS of Turbulent Premixed Flame with over 50 Species and 300 Elementary Reactions, 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, San Francisco (United States of America), 23-25 November, 2014.
- ⑥ T. Miyauchi, Direct Numerical Simulation of Turbulent Combustion, The 4th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow, Hong Kong (China), 3-6 June 2013. (Keynote Lecture)
- ⑦ N. Fukushima, H. Shiono, M. Shimura, I. Yoshikawa, M. Tanahashi, T. Miyauchi, Pressure Effects on Flame Structure in Turbulent V-Flame, The 4th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow, Hong Kong (China), 3-6 June 2013.
- ⑧ N. Fukushima, E. Matsumoto, M. Shimura, M. Tanahashi, T. Miyauchi, GS-SGS Energy Transfer and Validation of SGS Stress Models in Homogeneous Isotropic

Turbulence, 9th China-Japan Workshop on Turbulent Flows (CJWTF9), Xi'an (China), 15-18 October, 2012. (Invited Lecture)

- ⑨ T. Miyauchi, Recent Progress in Laser Diagnostics and DNS of Turbulent Combustion, 8th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Incheon (Republic of Korea), 18-21 March., 2012. (Plenary Lecture)
- ⑩ 宮内敏雄, 40年の燃焼研究を振り返って, 第49回燃焼シンポジウム, 慶應義塾大学 日吉キャンパス 来往舎・協生館 (神奈川県・横浜市), 2011年12月5日. (特別講演)
- ⑪ Y.-S. Shim, S. Tanaka, M. Shimura, N. Fukushima, M. Tanahashi, T. Miyauchi, Flame Brush Structure of H₂-air Turbulent Premixed Flames at High Reynolds Numbers, Proc. ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, アクトシティ 浜松 (静岡県・浜松市), 24-29 July, 2011.
- ⑫ M. Shimura, A. Johchi, G.-M. Choi, K. Iwamoto, M. Tanahashi, T. Miyauchi, Measurement of Flame and Flow Structures of Turbulent Jet Premixed Flame by Simultaneous Triple-Plane PLIF and Dual-Plane Stereoscopic PIV, The 23rd International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Irvine (United States of America), 24-29 July, 2011.

[その他]

ホームページ等

<http://www.navier.mes.titech.ac.jp/ka ken-s-2011/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮内 敏雄 (MIYAUCHI TOSHIO)

明治大学・研究・知財戦略機構・特任教授

研究者番号: 50016664

(2) 研究分担者

中別府 修 (NAKABEPPU OSAMU)

明治大学・理工学部・教授

研究者番号: 50227873

店橋 護 (TANAHASHI MAMORU)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号: 40242276

志村 祐康 (SHIMURA MASAYASU)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号: 30581673

福島 直哉 (FUKUSHIMA NAOYA)

東京理科大学・工学部・准教授

研究者番号: 80585240