

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

Investigations on Multi-Hierarchical Structures of
Turbulent Premixed Flame by Multi-Dimensional Combined
Laser Diagnostics and GPU Cloud DNS

宮内 敏雄 (MIYAUCHI TOSHIO)

明治大学・研究・知財戦略機構・特任教授



研究の概要

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、それらのモデル化を行うことを目的としている。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：燃焼

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面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環境の困難さから、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面の階層構造、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)燃焼モデルを構築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開発も併せて行う。

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構築し、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、乱流燃焼モデルの構築を行う。

4. これまでの成果

(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 型乱流予混合火炎及び平面乱流噴流予混合火炎を対象として、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面の階層構造に与える影響を明らかにした。さらに火炎内部の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、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。

【高圧・高レイノルズ数乱流予混合火炎における火炎面の階層構造の解明】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。

(2) 多次元複合光学計測による乱流予混合火炎の火炎面の階層構造の解明

【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、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。

【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特性を計測する必要がある。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算出可能な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示した。

5. 今後の計画

数値的研究では、複雑燃料を対象とした高圧力条件下の超並列 GPU-DNS を実現するために、計算手法の高度化に重点を置いて研究を行う。実験的研究では、大気圧下・高圧下の乱流予混合火炎を対象として多次元複合光学計測を用いて火炎面の階層構造を明らかにすることに重点を置いて研究を行う。各種燃焼場を対象とした数値的・実験的研究の結果を総合し、火炎の固有不安定波長が火炎面の階層構造に与える影響を明らかにし、より一般的な SGS モデルを構築する。構築した SGS 燃焼モデルを導入した LES を行い、実験結果及び DNS 結果との比較から SGS 燃焼モデルを確立する。最終的に LES に基づく乱流燃焼シミュレータの開発を推進する。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む) 学術論文雑誌等

- 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, pp. 1383-1391 (2013).
- 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).
- 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). (その他5件)

受賞等

- 日本機械学会熱工学部部門講演論文表彰: 沈永三, 福島直哉, 志村祐康, 店橋護, 宮内敏雄, Thin reaction zonesにおける乱流予混合火炎の局所火炎構造。

招待講演等4件, 国際会議発表20件, 国内会議発表19件

ホームページ等

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