

高解像複合光学計測と大規模グリッドDNSによる 成層・混相乱流燃焼の構造解明と制御

A Study on Turbulent Stratified/Multiphase Combustion by High
Resolution Combined Laser Diagnostics and Large-Scale GRID DNS

宮内 敏雄 (TOSHIO MIYAUCHI)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授



研究の概要

各種燃焼器の高効率化と低環境負荷化は、近年問題となっている地球・都市環境問題の解決に必要な不可欠である。本研究では、世界最大級の高精度数値シミュレーションと種々のレーザ計測技術を組み合わせた世界最先端の高解像複合光学計測を用いて、実用燃焼器の高効率化と低環境負荷化に重要となる成層・混相乱流燃焼機構を明らかにし、それらに基づく高度乱流燃焼制御技術を確認する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：環境技術，二酸化炭素排出削減，エネルギー効率化

1. 研究開始当初の背景

各種燃焼器の高効率化と低環境負荷化の実現は、近年問題となっている地球・都市環境問題の解決に必要な不可欠である。多くの実用燃焼器内の流れは乱流状態にあるが、乱流燃焼機構には未解明な点が数多く残されており、乱流燃焼機構自体を効率良く制御することによる実用燃焼器の高効率・低環境負荷化を行う試みは殆ど行われていない。直噴エンジンやHCCIエンジン等の新燃焼法を採用した燃焼器では、乱流構造が燃焼特性を支配する種々の素過程に大きな影響を与えている。直噴エンジンでは、乱流による燃料噴霧の分散とそれらの蒸発・混合による燃料濃度変動を有した予混合気成層乱流燃焼し、それらの特性が大域的な燃焼特性を決定している。しかし、各素過程の詳細は未だ明らかにされておらず、試行錯誤的な設計に留まっている。

2. 研究の目的

本研究では、詳細化学反応機構を考慮に入れた超大規模直接数値計算(DNS)、高解像度粒子画像速度計(PIV)と複数ラジカルの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て、燃料液滴の分散・蒸発・混合及び燃焼過程、不均一燃料濃度及び不均一温度分布を有する予混合気の着火及び火炎伝播機構等の実用的な燃焼器の高効率化と低環境負荷化に重要となる成層・混相乱流燃焼機構を明らかにし、それらに基づく高度乱流燃焼制御技術を確認することを目的としている。

3. 研究の方法

燃料液滴の蒸発・混合及び燃焼過程、不均一燃料濃度及び不均一温度分布を有する予混合気の着火及び火炎伝播機構等の成層・混相乱流燃焼機構の素過程を詳細化学反応機構を考慮に入れた超大規模DNS、高解像度PIVと複数ラジカルPLIFを組み合わせた複合光学計測を用いて明らかにする。購入物品は、複数化学種のPLIF同時計測を可能とするためのPLIF用レーザ光源、色素レーザ及びICCDカメラ、火炎近傍の流体速度及び速度勾配全成分の面計測法を開発するための燃焼用二波長二平面PIV用レーザ光源及びシーディング発生装置、火炎構造及び流体速度の高精度な同時計測を可能とするビームプロファイラ、及び燃焼器内圧力を高精度で検出するためのロックインアンプ周波数エクステンダである。

4. これまでの成果

(1)大規模グリッドDNSによる乱流中での予混合気の着火・火炎伝播機構と液滴分散・蒸発及び混合過程の解明

【乱流中での不均一予混合気の着火・火炎伝播機構の解明】詳細化学反応機構と輸送係数・物性値の温度依存性を考慮に入れて、水素・空気、メタン・空気、ヘプタン・空気予混合気を対象として乱流中での着火・火炎伝播のDNSを行い、空間的な当量比変動が予混合気の着火と火炎伝播機構に与える基本的な影響を明らかにした。さらに、着火遅れ時間と乱流運動による歪み速度強度の間に強い相関があること、着火様式は、統計的に同一の乱流場であっても着火領域の乱流特性に大き

く依存することなどを明らかにした。このような DNS を HCCI エンジンにおける自着火・火炎伝播機構の解明に拡張し、予混合気の燃焼機構に対する当量比変動及び温度変動の影響を、水素・空気及びメタン・空気予混合気に対して検討した。自着火・火炎伝播特性は当量比変動及び温度変動強度に大きく依存し、自着火と火炎伝播が空間的に混在することを明らかにした。これを定量的に評価するために、反応動力学に基づく自着火領域と火炎伝播領域の判別法を提案した。

【乱流中での液滴分散・蒸発・混合・燃焼過程の解明】燃料としてデカンを対象として乱流中での液滴分散・蒸発及び混合過程の DNS を行い、乱流コヒーレント微細渦が液滴分散及び微細スケールにおける蒸発化学種分布を支配していることを明らかにした。コヒーレント微細渦は、乱流中での液滴分散に大きな影響を与え、特定の時間スケールを有する液滴は微細渦周囲に局在する。液滴分散のみならず、蒸発した化学種の濃度分布にも大きな影響を与え、液滴の時間スケールによってマイクロ・スケールの混合過程が大きく異なることを明らかにした。蒸発したデカンや前述のヘプタン等の高級炭化水素の乱流燃焼の DNS を実現するために、反応項の取り扱いに陰解法を導入することで、DNS に要する計算時間の大幅な短縮を実現した。

(2) 高解像複合光学計測による不均一予混合気の火炎伝播機構と液滴分散、蒸発及び混合過程の解明

【乱流中での不均一予混合気の火炎伝播機構の解明】不均一予混合気の火炎伝播機構を明らかにするには、局所的な火炎要素の伝播速度と乱流構造を明らかにする必要がある。本研究では、ダブルパルス CH PLIF 計測法と高解像度ステレオ PIV 法を組み合わせ、火炎伝播速度と速度三成分の同時計測法を確立し、さらに OH PLIF 計測を加えて局所的な火炎要素の伝播速度と乱流構造の同時計測に世界で初めて成功した。また、二平面 CH PLIF 計測法を開発し、これと一平面 OH PLIF を組み合わせることで、乱流予混合火炎の三次元構造を計測可能な複合光学計測法を確立し、乱流予混合火炎の瞬時三次元火炎構造を世界で初めて明らかにした。

【乱流中での液滴分散・蒸発・混合・燃焼過程の解明】燃料噴霧燃焼における雰囲気の酸素濃度と温度の不均一性が燃焼と排気に与える影響を解明するために、燃焼室内部の温度と酸素濃度分布を独立に変化させることができる燃焼器を新たに製作し、有害排出物の生成が着火までに噴霧内へ導入される酸素とエンタルピの量により支配さ

れることを明らかにした。

(3) IC エンジンの完全シミュレーションに関する研究

IC エンジン内乱流燃焼の DNS を実現するために、世界初の試みとして DNS を閉容器内乱流燃焼に拡張し、水素・空気予混合火炎とメタン・空気予混合火炎と壁面の干渉機構を検討した。閉容器内予混合火炎の局所火炎構造、壁面近傍での消炎機構及び熱損失特性、さらには容器内の圧力上昇と火炎構造及び乱流構造の関係など、これまで未解明であった IC エンジン内乱流燃焼の素過程を明らかにした。

5. 今後の計画

これまでの研究成果を踏まえて、乱流燃焼の DNS を HCCI エンジンや SI エンジン等の実用的な燃焼場に拡張し、乱流中での不均一燃料濃度及び不均一温度分布を有する予混合気の着火・火炎伝播機構や壁面との干渉機構などを明らかにすると共に、世界に先駆けて実用燃焼器内乱流燃焼場のフル・シミュレーションを試み、それらの結果を用いて実用的な燃焼器の制御に適用可能な高精度かつ汎用性の高い LES 技術の確立を目指す。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- M. Tanahashi, T. Seo, M. Sato, A. Tsunemi and T. Miyauchi, Huge Direct Numerical Simulation of Turbulent Combustion - Toward Perfect Simulation of IC Engine -, *J. Comput. Fluids Eng.*, Vol. 13, No. 4, pp. 114-125, 2008.
- M. Tanahashi, S. Taka, M. Shimura and T. Miyauchi, CH Double-Pulsed PLIF Measurement in Turbulent Premixed Flame, *Exp. Fluids*, Vol. 45, No. 2, pp. 323-332, 2008.
- M. Sato, M. Tanahashi and T. Miyauchi, Particle Dispersion and Coherent Fine Scale Eddies in Turbulence, *J. Fluid Sci. and Tech.*, Vol. 3, No. 1, pp. 149-160, 2008.
- M. Tanahashi, M. Sato, M. Shimura and T. Miyauchi, DNS and Combined Laser Diagnostics of Turbulent Combustion, *J. Thermal Sci. and Tech.*, Vol. 3, No. 3, 391-409, 2008.
- T. Aizawa and H. Kosaka, Laser-Induced Phosphorescence Thermography of Combustion Chamber Wall of Diesel Engine, *SAE Int. J. Fuels and Lubri.*, Vol. 1, No. 1, pp. 549-558, 2008.
- T. Miyauchi and M. Tanahashi, Current State and Perspective of Turbulent Combustion Research, *J. Fluid Sci. Tech.*, Vol. 2, pp. 514-524, 2007.

等学術論文 22 編, 著書 3 件, 招待講演 12 件, 国際会議発表 24 件, 国内会議発表 28 件, 日本機械学会熱工学部門部門貢献賞 (2008, 店橋), 日本機械学会創立 110 周年記念功労者表彰 (2007, 宮内及び店橋), 日本機械学会熱工学部門功績賞研究功績賞 (2006, 宮内), 文部科学大臣表彰若手科学者賞 (2006, 店橋)

ホームページ等

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