

令和元年6月26日現在

機関番号：32644

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18025

研究課題名(和文) 圧縮自着火乱流燃焼における希薄火炎と壁面の干渉機構の解明

研究課題名(英文) Investigation on Interference Mechanisms on Turbulent Lean Flame and Walls during Charge Compression Ignition Process

研究代表者

福島 直哉 (Fukushima, Naoya)

東海大学・工学部・特任講師

研究者番号：80585240

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：高効率・低環境負荷燃焼法である圧縮自着火乱流燃焼が近年注目されている。そこで本研究では、数値的手法を駆使し、GPUを搭載したグリッド型スーパーコンピュータに最適化した乱流燃焼のDNSを行い、圧縮・膨張過程を伴う自着火乱流燃焼特性及び壁面近傍に形成される希薄火炎と壁面の干渉機構を解明することを目的とした。本研究課題では、数値的手法を用い、GPUクラウド(GPUを搭載したグリッド型スーパーコンピュータ)へ最適化された乱流燃焼の直接数値計算を行い、定容容器内及び圧縮・膨張過程を伴う乱流中での自着火乱流燃焼機構と壁面近傍に形成される希薄火炎と壁面の干渉機構を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた圧縮自着火乱流燃焼特性及び希薄火炎と壁面の干渉機構に関する知見は様々な種類の高効率・低環境負荷型燃焼器の開発に利用可能であり、環境・エネルギー問題の解決に大きく貢献できると考えられる。また、GPUクラウドへの最適化プログラミング技法は熱流体、燃焼、材料力学等の幅広い工学分野でのCAE(Computer Aided Engineering)などへの応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：To resolve environmental issues, it is expected that high-efficiency and low-emission combustion technology of homogeneous-charge compression ignition will be achieved. The objectives in this study is to reveal characteristics of auto-ignited turbulent combustion during compression and expansion processes and to investigate interference mechanisms on turbulent lean flame and walls. We have optimized direct-numerical-simulation (DNS) codes of turbulent combustion to a GPU cloud computer (a supercomputer with GPUs) and conducted DNS of auto-ignited turbulent combustion during compression and expansion processes to reveal interference mechanisms on turbulent lean flame and walls.

研究分野：熱流体工学

キーワード：乱流燃焼 HCCIエンジン 直接数値計算 自着火燃焼特性 火炎と壁面の干渉 エネルギー効率化 予混合火炎

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

環境・エネルギー問題の解決策の一つとして、圧縮自着火乱流燃焼が高効率・低環境負荷燃焼法として近年注目されている。HCCIエンジンに用いられるこの燃焼手法は古くから存在するが、自着火に伴う燃焼器内圧力振動制御の困難さから実用化に至っていない。このため、自着火制御に関する研究が広く行われてきた。燃焼器内圧力振動を抑制するために、希薄予混合気に当量比変動や温度変動を与え、急激な熱発生率を抑制する手法が研究されている。これまでの研究の多くでは、当量比・温度変動を与えた場合も予混合気の自着火特性が燃焼制御において重要な役割を果たすと考えられてきた。しかし、研究代表者らはエンジン内を模擬した高圧条件下での二次元定容容器内自着火乱流燃焼の直接数値計算(DNS)を行い、希薄予混合気に比較的大きな温度変動を与えた場合、幾つかの自着火領域から火炎が伝播することを明らかにし、さらに熱や化学種等の拡散という火炎伝播の本質を表す指標を用い、自着火、火炎伝播、火炎囲い込み形態に分類する手法を新たに提案(図1)、自着火領域は全領域の僅か5%程度であり、火炎伝播形態が全領域の最大約7割を占めることを明らかにした(Fukushima et al., Proc. Combust. Inst., 2015)。そのため、自着火だけでなく、火炎伝播等を含む乱流燃焼機構の総合的な理解が必要である。さらに、自着火乱流燃焼に関する従来の概念とは異なり、燃焼器壁面近傍には希薄火炎が長時間滞留し、その壁面との干渉が局所消炎による未燃物の排出や壁面熱損失などの燃焼器性能に大きな影響を与える(図2)ことを明らかにした(Katayama et al., Proc. 8th ASME-JSME Therm. Eng. Conf., 2011)。すなわち、高効率・低環境負荷な圧縮自着火乱流燃焼を実現するには、自着火制御手法に加え、希薄火炎と壁面の干渉機構の解明が必要不可欠である。そのためには、数値的手法を駆使し、燃焼器壁面材質と燃料種の表面反応の依存性を明らかにする必要がある。

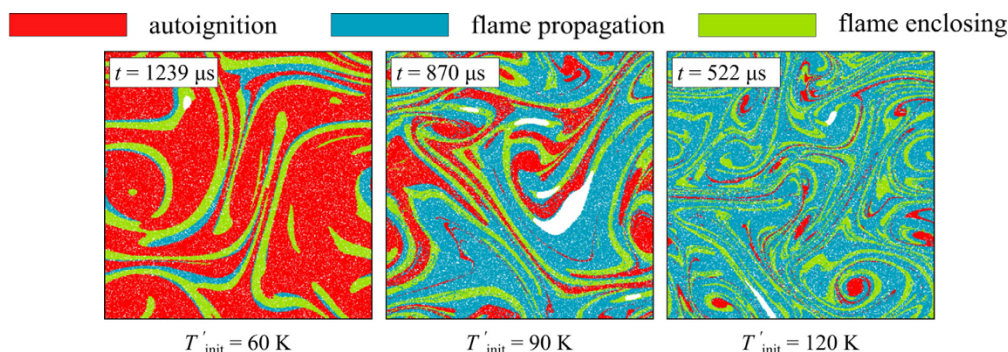


Fig. 1 Distributions of fluid particles classified in the three combustion regimes;  $T'_{init} = 60$  K (left), 90 K (middle), 120 K (right).

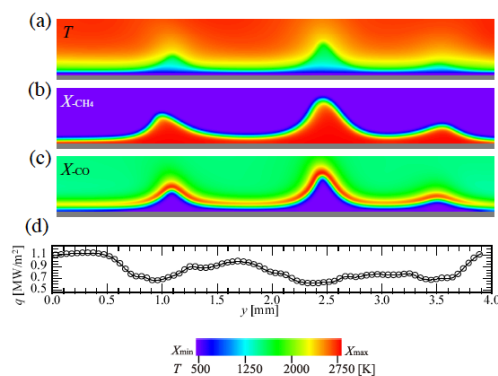


Fig. 2 Near-wall distributions of temperature (a), mole fraction of  $\text{CH}_4$  (b) and  $\text{CO}$  (c) and heat flux on the wall (d).

計算科学分野では、GPU(Graphics Processing Unit)の汎目的計算への応用が始まり、CPUの数十倍の演算速度が達成されている。研究代表者はこれまでに、詳細化学反応機構を考慮に入れた乱流燃焼のDNSプログラムをGPUクラウドへ最適化するとともに、様々な燃料種を取り扱えるように詳細化学反応機構に含まれる多くの化学種や素反応や表面反応機構を自動的に取り込み、最適化したDNSプログラムを構築するアルゴリズムを開発してきた。圧縮自着火乱流燃焼特性及び希薄火炎と壁面の干渉機構を明らかにするためには、移動境界壁を伴う実用燃焼器内乱流燃焼DNSの実行のため、境界条件や高精度フィルター等を理論的に境界適合座標系に一般化した計算スキームを構築する必要がある。さらに、その燃料依存性を明らかにするには、詳細化学反応機構を自動的に取り組むだけではなく、層流燃焼で近年活発な研究が行われている巨大化した詳細化学反応機構を効率良く最適化する経路流束分析法(PFA)等をGPUクラウドへ最適化し、DNSの更なる高速度化が求められる。化学的局所消炎等の希薄火炎と壁面の干渉機

構の系統的な解明には、表面反応機構を考慮に入れたDNSプログラムの開発、GPUクラウドへの最適化が求められている。

## 参考文献

- N. Fukushima, M. Katayama, Y. Naka, T. Oobayashi, M. Shimura, Y. Nada, M. Tanahashi and T. Miyauchi, “Combustion Regime Classification of HCCI/PCCI Combustion using Lagrangian Fluid Particle Tracking”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 35 (3), pp. 3009–3017 (2015).
- M. Katayama, N. Fukushima, M. Shimura, M. Tanahashi and T. Miyauchi, “DNS on Autoignition and Flame Propagation of Inhomogeneous Methane–Air Mixtures in a Closed Vessel,” *Proc. 8th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*, pn. AJTEC2011-44476, 9 pp., 2011.

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、数値的手法を駆使し、GPU を搭載したグリッド型スーパーコンピュータに最適化した乱流燃焼の DNS を行い、圧縮・膨張過程を伴う自着火乱流燃焼特性及び壁面近傍に形成される希薄火炎と壁面の干渉機構を解明することを目的としている。

## 3. 研究の方法

本研究課題では、数値的手法を用い、GPU クラウド(GPU を搭載したグリッド型スーパーコンピュータ)へ最適化された乱流燃焼の直接数値計算(DNS)を行い、定容容器内及び圧縮・膨張過程を伴う乱流中での自着火乱流燃焼機構と壁面近傍に形成される希薄火炎と壁面の干渉機構を明らかにする。

まず、移動境界壁を伴う実用燃焼器内乱流燃焼 DNS の実行のため、境界条件や高精度フィルター等を理論的に境界適合座標系に一般化した計算スキームを構築する。そのために、移動境界壁を境界条件に適用可能とするため、一般座標系を導入するとともに、等間隔格子における高精度空間離散化や高精度フィルター (Lele, *J. Comp. Phys.*, 1992) を理論的に一般化し、境界適合座標系における高精度空間離散化や高精度フィルターなどの計算スキームを構築した。さらに、境界における人工的な圧力反射を除去するために用いられる Navier-Stokes characteristic boundary condition (NSCBC) (Poinsot & Lele, *J. Comp. Phys.* (1992)等)を境界適合座標系へ理論的に一般化を行った。これらのスキームを導入し、GPU クラウドへ最適化された乱流燃焼の直接数値計算(DNS)コードを開発した。

さらに、燃料依存性を明らかにするには、詳細化学反応機構を自動的に取り組むだけではなく、更なる高速化を達成する必要がある。そこで、局所最適化簡略化学反応機構を組み込んだ DNS コードの開発を行った。局所最適化簡略化学反応機構を組み込んだコードを、GPU クラウドへ最適化し、乱流燃焼の直接数値計算(DNS)の更なる高速化を達成した。

## 参考文献

- S.K. Lele, “Compact finite difference schemes with spectral-like resolution,” *J. Comput. Phys.*, 103 (1992), 16–42.
- T.J. Poinsot and S.K. Lele, “Boundary conditions for direct simulations of compressible viscous flows,” *J. Comput. Phys.*, 101 (1) (1992), pp. 104-129.

## 4. 研究成果

まず、開発した乱流燃焼の直接数値計算(DNS)コードの妥当性の検証を行った。検証対象としては、これまでに多くの DNS が行われており、雑誌論文等に多くの統計量、ホームページを通じてデータベースが公開されている水素・空気の予混合気による平面乱流火炎を対象とした。その結果、開発した乱流燃焼の直接数値計算(DNS)コードは計算精度などに問題なく、その DNS 結果が妥当であることが示された。

次に、局所最適化化学反応機構と熱物性値・輸送係数の温度依存性を考慮に入れた圧縮・膨張過程を伴う乱流中の圧縮自着火の直接数値計算を行い、HCCI エンジンのピストンを模擬した移動境界壁を伴う燃焼器において圧縮・膨張過程を伴う不均一予混合気の自着火・火炎伝播機構を明らかにする。まず、計算対象を圧縮・膨張過程を伴う二次元乱流中の圧縮自着火とし、燃焼器形状は長方形型(二次元)とし、圧縮・膨張過程が自着火特性へ与える影響を明らかにした。その結果、圧縮・膨張過程の周期、すなわちエンジンの回転数、燃焼種や燃料の初期温度に依存性はあるものの、圧縮過程において、燃焼反応における中間生成物の生成は始まっていることが明らかとなった。この結果から、圧縮・膨張過程、特に圧縮過程における燃焼初期反応を考慮に入れた自着火の直接数値計算を行う重要性が示された。また、これまでに行われてきた定容容器内自着火乱流燃焼の直接数値計算においては、初期条件の設定に十分な注意を払う必要があることが明らかとなった。

さらに、燃料種の影響を考慮するために、詳細化学反応機構を考慮に入れた定容容器内乱流中の不均一予混合気の自着火の直接数値計算を行った。それらの結果から、自着火乱流燃焼における燃焼形態、乱流と燃焼の長さ・時間スケール、当量比・温度変動の大きさだけでなく、

そのスケールと乱流燃焼スケールの影響を明らかにしている。

最終的には、局所最適化化学反応機構と熱物性値・輸送係数の温度依存性を考慮に入れた圧縮・膨張過程を伴う三次元乱流中の圧縮自着火の直接数値計算を行い、HCCI エンジンのピストンを模擬した移動境界壁を伴う燃焼器において圧縮・膨張過程を伴う不均一予混合気の自着火・火炎伝播機構を明らかにする。燃焼器形状は円筒型とし、圧縮・膨張過程が自着火特性へ与える影響を明らかにすることを試みた。特に、圧縮・膨張過程に伴う化学種組成変化や圧力変動の影響に注目する。さらに、熱的及び化学的消炎機構や壁面熱損失、未燃物や中間生成物の滞留時間等の火炎と移動境界壁の干渉機構への壁温の影響を解明しようと研究を進めた。

今後、これらの直接数値計算(DNS)結果に加えて、圧縮・膨張過程を伴う三次元乱流中の圧縮自着火のDNSをさらに進めていき、伝播火炎を含む圧縮自着火乱流燃焼機構及び希薄火炎と壁面の干渉機構の燃料種及び壁面材質依存性を系統的かつ総合的に解明し、未燃物の排出や壁面熱損失などの燃焼器性能へ与える影響を明らかにしていく。本研究課題による研究成果は、その第一歩となるものである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- (1) Mizuki Kihara, Naoya Fukushima, Yuki Minamoto, Masayasu Shimura, Mamoru Tanahashi, “GS-SGS Energy Transfer Characteristics in a Turbulent Channel Flow,” Proc. 16th European Turbulence Conference, 査読有, (2017), pn. 29688.
- (2) Katsuhiko Hiraoka, Yoshitsugu Naka, Masayasu Shimura, Yuki Minamoto, Naoya Fukushima, Mamoru Tanahashi, Toshio Miyauchi, “Evaluations of SGS Combustion, Scalar Flux and Stress Models in a Turbulent Jet Premixed Flame,” Flow Turbulence and Combustion, Vol. 97, 査読有, (2016), pp. 1147-1164, DOI10.1080/00102202.2016.1195820.
- (3) Katsuhiko Hiraoka, Yuki Minamoto, Masayasu Shimura, Yoshitsugu Naka, Naoya Fukushima, Mamoru Tanahashi, “A Fractal Dynamic SGS Combustion Model for Large Eddy Simulation of Turbulent Premixed Flames,” Combustion Science and Technology, Vol. 188, 査読有, (2016), pp. 1472-1495.

〔学会発表〕(計 4 件)

- (1) Naoya Fukushima, “DNS investigation on anisotropy and inhomogeneity of Reynolds stress in rhombic ducts,” 71st Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, (2018)

〔その他〕

ホームページ等

<http://fukushima.lab.u-tokai.ac.jp/kaken-wakate/>

## 6. 研究組織

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。