

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 3月31日現在

機関番号：12608

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22860021

研究課題名（和文） GPUクラウドによるHCCIエンジン内乱流燃焼のDNS

研究課題名（英文） DNS of Turbulent Combustion in HCCI Engine by GPU-Cloud Supercomputer

研究代表者

福島 直哉（FUKUSHIMA NAOYA）

東京工業大学・大学院理工学研究科・特任助教

研究者番号：80585240

研究成果の概要（和文）：

環境・エネルギー問題の解決策の一つとして、高効率・低環境負荷燃焼法である圧縮着火火乱流燃焼（HCCI 燃焼）が近年注目されている。本研究では、乱流燃焼の直接数値計算(DNS)のGPUクラウドに最適化したプログラムを開発するとともに、移動境界壁を有する実用燃焼器へ適用可能な計算スキームを構築し、HCCIエンジン内の不均一燃料濃度及び不均一温度分布を有する着火火・火炎伝播機構のDNSを行い、乱流燃焼機構や壁面と火炎の干渉機構を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

To resolve the environmental and energy issues, homogeneous charge compression ignition (HCCI) is expected to be one of the promising combustion technologies in terms of low emission and high efficiency. In this research project, Direct Numerical Simulation (DNS) code of turbulent combustion has been optimized for GPU-cloud supercomputer and the computational scheme which can be applied to practical combustors with a moving wall has been developed. DNS on autoignition and flame propagation of premixed mixture with inhomogeneity of fuel concentration and temperature has been conducted to reveal turbulent combustion mechanisms and flame-wall interaction in HCCI engines.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,260,000	378,000	1,638,000
2011年度	1,160,000	348,000	1,508,000
総計	2,420,000	726,000	3,146,000

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：乱流燃焼，直接数値計算，HCCIエンジン，GPUクラウド，超並列計算，予混合火炎，エネルギー効率化，環境技術

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環境・エネルギー問題の解決に必要不可欠である。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多く残されている。低環境負荷型燃焼器として期待され

る HCCI エンジンでは、マクロ・スケールで均一に混合された予混合気を自着火させるが、それらの燃焼機構はマイクロ・スケールにおける当量比変動や温度変動と密接に関連していると考えられ、それらの解明が HCCI エンジンの実用化において極めて重要なものと予測される。

HCCI エンジンの自着火・火炎伝播機構においてマイクロ・スケールでの当量比変動や温度変動等とそれらのスケールに対するコヒーレント微細渦や階層構造等の乱流スケールの比が燃焼過程の理解に重要であると予測される。さらに、HCCI エンジンではピストンの運動による圧縮・膨張過程による乱流微細構造やマイクロ・スケールでの当量比変動や温度変動への影響を把握することも燃焼過程の解明に重要である。また、HCCI エンジン内における壁面と火炎の干渉機構は、局所消炎及び壁面熱損失、未燃物や反応中間生成物等の滞留など燃焼器性能へ大きな影響をもたらすので、その解明が必要不可欠である。

一方、近年の GPU(Graphics Processing Unit)の高速なメモリーと高い演算能力の発達は著しく、流体計算など汎目的計算への応用(GPGPU)が始まり、数十倍の演算速度が達成されつつある。さらに移動境界壁を伴う実用燃焼器内を模擬した乱流燃焼の DNS を行うためには、等間隔格子で用いられている高精度フィルターや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)を境界適合座標系で利用可能なように、理論的に一般化する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、詳細化学反応機構と熱物性値・輸送係数の温度依存性を考慮した乱流燃焼の直接数値計算(DNS)の GPU クラウド(GPGPU を搭載したグリッド型スーパーコンピュータ)に最適化したプログラムを開発するとともに、移動境界壁を有する実用燃焼器へ適用可能な計算スキームを構築し、HCCI エンジン内の不均一燃料濃度及び不均一温度分布を有する自着火・火炎伝播の DNS を行い、圧縮・膨張過程を伴う乱流燃焼機構や壁面と火炎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

本研究では、まず、GPU クラウドへの最適化による乱流燃焼の直接数値計算(DNS)の高速化を行う。次に、移動境界壁を境界条件に適用可能とするために、高精度空間離散化・フィルターなどの計算スキーム及び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境界条件を境界適合座標系に適用可能となるように、理論的に一般化する。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自着火・火炎伝播の DNS を二次元一様等方乱流中で行った後、こ

れを三次元に拡張し、マイクロ・スケールにおける当量比変動や温度変動と乱流スケールとの関係の観点から、自着火・火炎伝播機構及び壁面と火炎の干渉機構を明らかにする。さらに、不均一予混合気の圧縮自着火乱流燃焼機構を定量的に評価するために、ラグランジュ流体粒子追跡法を用いた燃焼形態の分類法を開発する。最終的には、上記と同様に、マイクロ・スケールにおける当量比変動や温度変動と乱流スケールとの関係の観点から、移動境界壁による圧縮・膨張過程を伴う自着火・火炎伝播機構及び壁と火炎の干渉機構を解明する。

4. 研究成果

(1) 乱流燃焼の大規模グリッド DNS プログラムの GPU クラウドへの最適化

CPU によるグリッド・コンピュータに最適化された乱流燃焼の DNS プログラムの GPU クラウドへの最適化を行った。過去に CPU で DNS が行われた乱流予混合燃焼へ適用し、それらのデータベースとの比較・検証により、計算アルゴリズムの妥当性を確認した。粘性係数、反応速度、拡散係数の計算を GPU クラウドへ最適化し、約 20 倍の計算速度を実現するとともに、DNS 全体として約 3 倍の高速化を実現した。これは、約 1 年かかる DNS の計算時間を 4 ヶ月に短縮するものである。開発したプログラムを用いて、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自着火・火炎伝播機構や壁面と火炎の干渉機構を明らかにするために、詳細化学反応機構と物性値・輸送係数の温度依存性を考慮に入れた予混合気の自着火・火炎伝播に関する二次元 DNS を三次元に拡張した。

(2) 移動境界壁を境界条件に適用可能とする計算スキームの構築

移動境界壁を境界条件に適用可能とするため、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)を境界適合座標系へ理論的に一般化した。過去に DNS が行われた乱流予混合燃焼へ適用し、それらのデータベースとの比較・検証により、計算アルゴリズムの妥当性を確認した。開発した計算アルゴリズムを用い、移動境界壁を伴う流路において圧縮・膨張過程を伴う不均一予混合気の自着火・火炎伝播機構を解明するために、GPU クラウドを用いた DNS を圧縮・膨張過程に拡張した。

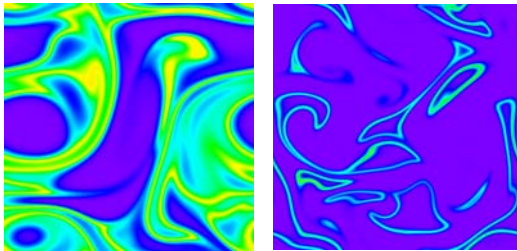


図 1：高圧条件下における不均一メタン・空気予混合気の自着火・火炎伝播の DNS。(左：初期温度変動小，右：初期温度変動大)

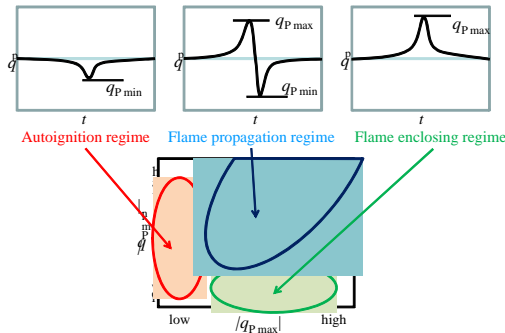


図 2：ラグランジュ流体粒子上の熱伝導を用いた HCCI 燃焼における燃焼形態の分類。

(3) 大規模 GPU クラウド DNS による乱流中での予混合気の自着火・火炎伝播機構及び壁面と火炎の干渉機構の解明

【実機を考慮に入れた圧力及び温度条件下における予混合気の自着火・火炎伝播機構の解明】

まず、実機を考慮に入れた圧力及び温度条件下において、詳細化学反応機構と物性値・輸送係数の温度依存性を考慮に入れ、メタン・空気の均一予混合気に対して、自着火・火炎伝播に関する DNS を行い、乱流燃焼速度に対する乱流強度、乱流スケール、当量比及び圧力の影響を明らかにした。

実機を考慮に入れた圧力及び温度条件下において、一様等方性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メタン・空気の予混合気の自着火・火炎伝播の DNS を行い、乱流中での予混合気の自着火・火炎伝播機構を明らかにした。局所火炎構造と乱流燃焼速度に対する乱流強度、乱流スケール、変動強度とそのスケール及び圧力の影響を明らかにした。さらに、初期温度変動の大きさが自着火乱流燃焼機構に与える影響を明らかにした。図 1 から、初期温度変動が小さい場合に比べ、初期温度変動大きい場合は自着火に比べ、火炎伝播の割合が大きいことが分かる。

不均一予混合気の圧縮自着火乱流燃焼機構を定量的に明らかにするために、ラグランジュ流体粒子追跡法を用いた燃焼形態の分類法を開発した。図 2 に示すように、流体粒子上の熱伝導や物質拡散の時間変化特性が

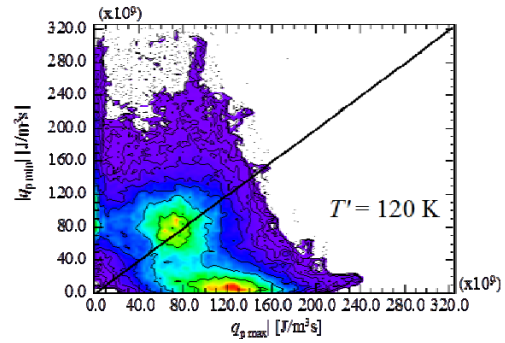
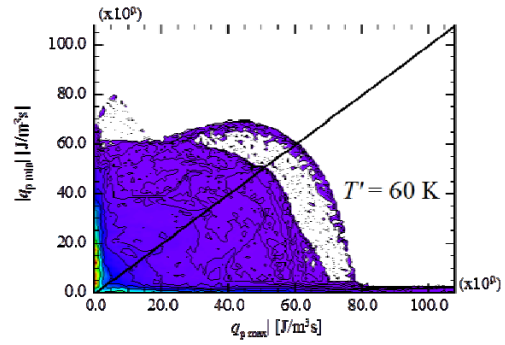


図 3：乱流中の HCCI 燃焼における燃焼形態の確率密度分布。(上：初期温度変動小，下：初期温度変動大)

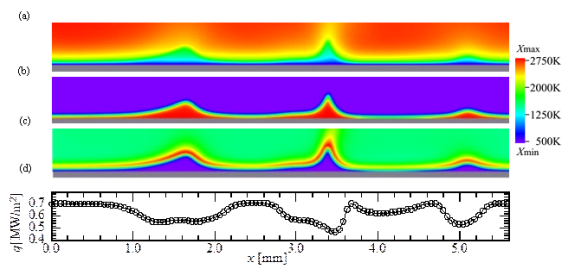


図 4：壁面近傍における温度(a)、メタン(b)、一酸化炭素(c)の分布及び壁面熱流束(d)。

ら、不均一燃料または温度分布を有する予混合気の圧縮自着火乱流燃焼において、3つの燃焼形態：自着火燃焼形態、火炎伝播形態及び火炎囲い込み形態への分類を提案した。不均一温度分布を有するメタン・空気の予混合気の自着火・火炎伝播の DNS に本分類法を適用した結果を図 3 に示す。初期温度変動が小さい場合、ほとんどの燃焼は自着火燃焼形態に分類される。初期温度変動が大きな場合、自着火燃焼形態の割合は小さく、火炎伝播形態及び火炎囲い込み形態の割合が大きい。この結果は、図 1 に示した高圧条件下における不均一メタン・空気予混合気の自着火・火炎伝播の可視化結果ともよく一致しており、ラグランジュ流体粒子追跡法を用いた燃焼形態の分類法の有効性が示された。これらの結果から、HCCI 燃焼において、乱流燃焼機構の総合的な解明が必要であることを明らかにした。

【壁面と火炎の干渉機構の解明】

HCCI エンジン内における壁面と火炎の干渉機構を解明するために、閉空間内におけるメタン・空気予混合気を対象として詳細化学反応機構と輸送係数及び熱物性値の温度依存性を考慮に入れた自着火・火炎伝播に関するDNSを行い、温度や当量比の不均一性及び壁面での熱損失が予混合気の自着火燃焼機構に与える影響を明らかにした。図4に伝播火炎の一部が壁面に接する時刻における壁面近傍での温度、メタンと一酸化炭素のモル分率及び壁面熱流束の分布を示す。壁面近傍では熱損失によりメタンの分解反応が抑制され、未燃のままのメタンが滞留している。この壁面付近に滞留する未燃予混合気は火炎面によって徐々に消費される。また、COなどの中間生成物は燃焼反応が壁面近傍で不活性になるために比較的長時間滞留する。火炎面が壁面に近づくと壁面近傍での温度勾配は大きくなり、壁面熱流束が増大する。火炎が壁面に接し、消炎し始めた領域では壁面熱流束がやや低下している。このように局所的な壁面熱流束の予測には火炎面および壁面近傍での消炎を考慮する必要がある。これらの結果から、壁面と火炎の干渉による消炎機構や壁面熱損失の有無による未燃物や反応中間生成物等の滞留時間などを明らかにした。

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9件)

M. Katayama, N. Fukushima, M. Shimura, M. Tanahashi and T. Miyauchi, DNS on Autoignition and Flame Propagation of Methane-Air Mixture under High Pressure Condition, Proceedings of 8th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2 pp., 2012, 査読有。

M. Katayama, N. Fukushima, M. Shimura, M. Tanahashi, T. Miyauchi, DNS Investigation of Autoignition and Flame Propagation of Methane-Air Mixtures, Proceedings of 4th International Forum on Multidisciplinary Education and Research Center for Energy Science, 2 pp., 2011, 査読有。

M. Katayama, N. Fukushima, M. Shimura, M. Tanahashi and T. Miyauchi, DNS on Autoignition and Flame Propagation of Methane-Air Mixtures at High Pressure, Proceedings of 11th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, pp. 16-17, 2011, 査読有。

片山牧人, 福島直哉, 志村祐康, 店橋護, 宮内敏雄, 高圧条件下におけるメタン・空気予混合気の自着火の直接数値計算, 熱工学コンファレンス2011講演論文集, pp. 137-138, 2011, 査読無。

H. Fukumoto, T. Seo, M. Shimura, N. Fukushima, M. Tanahashi and T. Miyauchi, DNS Investigation on Autoignition and Flame Propagation in HCCI Combustion, Journal of Fluid Science and Engineering, Vol. 6, pp. 45-55, 査読有。

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, Proceedings of 8th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, pp. AJTEC2011-44476, 9 pp., 2011, 査読有。

M. Katayama, M. Shimura, N. Fukushima, M. Tanahashi and T. Miyauchi, DNS of Autoignition and Flame Propagation in a Closed Vessel, Proceedings of 3rd International Forum on Multidisciplinary Education and Research Center for Energy Science, pp. 75-76, 2010, 査読有。

I. Yoshikawa, M. Katayama, N. Fukushima, M. Shimura, M. Tanahashi and T. Miyauchi, Direct Numerical Simulation of HCCI Combustion, Proceedings of International Symposium: Technology and Policy for Low Carbon Society, p. 30, 2010, 査読無。

片山牧人, 福島直哉, 志村祐康, 店橋護, 宮内敏雄, 閉空間内におけるメタン・空気予混合気の自着火及び火炎伝播の直接数値計算, 第48回燃焼シンポジウム講演論文集, pp. 258-259, 2010, 査読無。

〔学会発表〕(計8件)

M. Katayama, N. Fukushima, M. Shimura, M. Tanahashi and T. Miyauchi, DNS on Autoignition and Flame Propagation of Methane-Air Mixture under High Pressure Condition, 8th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2012.3.18-21, Incheon, Korea.

M. Katayama, N. Fukushima, M. Shimura, M. Tanahashi, T. Miyauchi, DNS Investigation of Autoignition and Flame Propagation of Methane-Air Mixtures, 4th International Forum on Multidisciplinary Education and Research Center for Energy Science, 2011.12.17-21, Hawaii, USA.

M. Katayama, N. Fukushima, M. Shimura, M. Tanahashi and T. Miyauchi, DNS on Autoignition and Flame Propagation of Methane-Air Mixtures at High Pressure,

11th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, 2011.11.9-11, Sendai, Japan.

片山牧人, 福島直哉, 志村祐康, 店橋護, 宮内敏雄, 高圧条件下におけるメタン・空気予混合気の自着火の直接数値計算, 熱工学コンファレンス 2011, 2011.10.29-30, 静岡県浜松市.

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, 8th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, 2011.3.13-17, Honolulu, USA.

M. Katayama, M. Shimura, N. Fukushima, M. Tanahashi and T. Miyauchi, DNS of Autoignition and Flame Propagation in a Closed Vessel, 3rd International Forum on Multidisciplinary Education and Research Center for Energy Science, 2010.12.9-14, Ishigaki, Japan.

片山牧人, 福島直哉, 志村祐康, 店橋護, 宮内敏雄, 閉空間内におけるメタン・空気予混合気の自着火及び火炎伝播の直接数値計算, 第48回燃焼シンポジウム, 2010.12.1-3, 福岡県福岡市.

I. Yoshikawa, M. Katayama, N. Fukushima, M. Shimura, M. Tanahashi and T. Miyauchi, Direct Numerical Simulation of HCCI Combustion, International Symposium: Technology and Policy for Low Carbon Society, 2010.11.8-10, Beijing, China.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.navier.mes.titech.ac.jp/star-t-up/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福島 直哉 (FUKUSHIMA NAOYA)

東京工業大学・大学院理工学研究科・特任助教

研究者番号：80585240