

令和元年5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18026

研究課題名(和文)特性時間スケールに基づくブリッジ関数を導入した乱流予混合燃焼モデル

研究課題名(英文) Turbulent combustion modelling based on characteristic scales and bridge function

研究代表者

源 勇気 (Minamoto, Yuki)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：70769687

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：希薄予混合燃焼やMILD燃焼技術などを用いた次世代低環境負荷燃焼では、乱流特性時間が火炎特性時間に比べて局所的に短くなる場合があり、乱流燃焼条件は局所的に大きく異なる。このような特性を持つ低環境負荷燃焼器を低コストで開発するには数値計算解析による予測が必要であるが、そのような燃焼場の予測を可能とする単一の乱流燃焼モデルは存在しない。本研究では、火炎干渉による局所燃焼速度の変化とその動的特性を解明し、極限的乱流燃焼条件に適合する複数の漸近モデルに対して特性時間スケールに基づくブリッジ関数を導入することで、様々な乱流燃焼形態が混在する乱流燃焼場を連続的に記述できるモデルを開発する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

各種燃焼器の高効率化と低環境負荷化は、地球環境保全及びそのために課せられる厳しい環境規制遵守のための最優先事項である。数少ない低環境負荷燃焼技術として、代替燃料を用いた希薄予混合燃焼や希釈・予熱した混合気を用いる燃焼技術がある。これらの燃焼条件に適した燃焼機器を低コスト・短期間で開発するには、燃焼流の数値予測技術の確立が必要不可欠である。産業スケールの実用燃焼器の数値解析では、種々の数学モデルを用いて基礎方程式を閉じる必要があるが、数値解析精度に最も大きな影響を与える非線形性の強いモデルが、乱流燃焼モデルである。本研究では、次世代低環境負荷燃焼場に適用可能な乱流燃焼モデルを開発した。

研究成果の概要(英文)：Next generation combustion devices are expected to utilize lean and diluted combustion conditions where characteristic time scale of chemical reactions becomes larger and closer to the turbulence time scale. Also, because of high level of turbulence-flame interaction, there could be many localized, unusual events such as ignition and flame-flame interaction, as well as conventional flame propagation. In such a turbulent combustion field, various regimes and modes of turbulent combustion could exist, and single popular turbulent combustion model may no longer predict such combustion accurately. In the present study, a relatively low-cost turbulent combustion model is developed to consider these mentioned combustion phenomena, based on characteristic chemical and turbulence scales and a bridge function which smoothly connects these modes.

研究分野：乱流、乱流燃焼

キーワード：乱流燃焼 直接数値計算 乱流燃焼モデル

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は、近年問題となっている地球環境保全及びそのために課せられる厳しい環境規制遵守のための最優先事項である。数少ない低環境負荷燃焼技術として、代替燃料を用いた希薄予混合燃焼や希釈・予熱した混合気を用いる Moderate or Intense Low-oxygen Dilution (MILD)燃焼技術がある。これらの燃焼条件に適した燃焼機器を低コスト・短期間で開発するには、燃焼流の数値予測技術の確立が必要不可欠である。産業スケールの実用燃焼器の数値解析では、種々の数学モデルを用いて基礎方程式を閉じる必要があるが、数値解析精度に最も大きな影響を与える非線形性の強いモデルが、乱流燃焼モデルである。

実用燃焼機器の運転条件下では、燃焼器内の流れは乱流状態である。乱流は、大小様々な特性長さを持つ流体運動を含んでおり、燃焼反応に必要な燃料、酸化剤及び高温生成物の混合に貢献する。一方で、燃焼反応により乱流自身も影響を受け、この火炎と乱流の相互干渉は強い非線形性を有する。この現象の解明とモデル化は、乱流燃焼研究分野において数十年にわたる研究課題となっている。申請者は現在までに様々な乱流条件と燃焼形態を有する乱流燃焼場における火炎と乱流の相互干渉機構の解明とそのモデル化に取り組んできた。具体的には、せん断乱流中の Corrugated flamelets 及び Thin reaction zones に分類される乱流予混合燃焼における、火炎と乱流の相互干渉への影響の解明と漸近解析に基づく乱流燃焼モデルの開発 (Y. Minamoto ら, Phys. Fluids, 2011; 他 2 件)、伝播火炎と自着火燃焼が混在する乱流 MILD 燃焼場における伝播火炎同士の干渉が局所燃焼速度に与える影響の解明 (Y. Minamoto ら, Proc. Combust. Inst., 2013; 他 5 件)、部分予混合浮き上がり火炎における合成ガス組成が火炎の安定化へ与える影響の解明 (Y. Minamoto ら, Combust. Flame, 2015) などである。これらの燃焼は、単一の燃焼器内で実現される燃焼方式であるが、それぞれが低環境負荷燃焼を構成する要素的な燃焼法でもある。次世代低環境負荷燃焼器では、これら複数の燃焼形態が一つの燃焼器内で混在すると考えられており、その数値解析予測には各要素乱流燃焼形態を連続的に記述できる乱流燃焼モデルが必要である。しかし、そのような実用的な単一の乱流燃焼モデルは存在しない。これは多くの乱流燃焼モデルが特定の乱流燃焼条件・形態のみを対象として開発が行われてきたためである。

乱流と火炎の特性時間と特性長さに着目すると、乱流予混合燃焼条件は大きく 4 つに分類される (N. Peters, Cambridge Univ. Press, 2000)。それらの中で、燃焼に関する化学反応の特性時間が乱流の特性時間に比べて十分に短く (より正確には高ダムケラー数 Da 及び低カルロピッツ数 Ka)、火炎の内部構造が乱流に影響されずに、乱流火炎が局所的に層流火炎の集合体と見なせる条件の極限では、漸近解析により求められるモデルを用いて乱流燃焼を記述することができる。逆に、化学反応の特性時間が乱流の特性時間に比べ非常に長い (低 Da 及び高 Ka) 場合の極限では、反応性スカラー輸送は、微小スケールの乱流運動と相似であるとの漸近的仮定の下でモデル化が可能である。現在、実用燃焼器開発に用いられる数値解析では、これら 2 つの概念に基づくモデルのどちらか一方を用いて、乱流燃焼場を記述している。次世代低環境負荷燃焼器に限らず、実用燃焼器内の乱流燃焼条件は、これら 2 つの極限的な条件のどちらか一方に当てはまることは一般的になく、その中間に位置し、一様でない乱流燃焼条件を考慮する必要がある。そのため、申請者らの以前の研究では、乱流及び火炎伝播に関する特性時間スケールの比をブリッジ関数を導入して考慮することで、複合的で一様でない乱流条件を有する乱流燃焼場を記述する手法を考案し、直接数値計算 (DNS) を用いた検証を通して、その有効性を明らかにした (Y. Minamoto ら, Int. J. Hydrogen Energy, 2015)。本手法を用いることで、単一の乱流燃焼場でしか適用できない漸近的な乱流燃焼モデルを局所乱流燃焼特性に基づいて選択的に用いることが可能であり、複合的な乱流条件を有する燃焼速度場を連続的に記述できる。しかし、本モデル化概念は、局所的に強度の異なる乱流中を伝播する火炎を対象として検証されており、MILD 燃焼のような低環境負荷燃焼で見られる自着火と伝播火炎などの複合燃焼形態を持つ燃焼場での有効性は未知である。

現在の乱流燃焼モデルに不足している物理の一つとして、伝播火炎同士の干渉現象がある。実用燃焼器内の燃焼条件と同等レベルの乱流条件下では、火炎は乱流作用により様々な特性長さを持って湾曲し、火炎同士の干渉が引き起こされる。次世代低環境負荷燃焼では高レベルの希薄・希釈条件のために、乱流強度が火炎伝播速度に比べて特に大きくなるため、伝播火炎の干渉が頻繁に引き起こされると考えられる。次世代低環境負荷燃焼器実現のための重要な燃焼現象であるとの認識の下、火炎干渉現象は近年、活発に研究されている (O. R. Darbyshire, Ph.D. Thesis, Univ. Cambridge, 2011; T. D. Dunstan ら, Combust. Sci. Technol., 2012; Y. Minamoto ら, Proc. Combust. Inst., 2013; R. A. C. Griffiths ら, Proc. Combust. Inst., 2015)。申請者らは、乱流 MILD 燃焼において干渉伝播火炎の反応性スカラー輸送が 0 次元着火問題と相似性を持つことを世界で初めて解明した (Y. Minamoto ら, Proc. Combust. Inst. 2013; Y. Minamoto ら, Combust. Flame, 2014)。疑似的な 0 次元着火と見なすことのできる干渉中の MILD 伝播火炎は、スカラー散逸率の減少及び局所熱発生率の急激な上昇という特徴を持ち、通常の乱流燃焼メカニズムとは根本的に異なる。さらに、典型的な希釈度の MILD 燃焼ではそのような反応領域の体積は全体の 30%以上を占め、局所燃焼速度は火炎特性スケールから考えられる値より、平均的に 20%以上増加する (Y. Minamoto ら, Proc. Combust. Inst. 2013)。このような局所的燃焼速度増加の正確な見積もりは、汚染物質生成予測や燃焼不安定性の予測に

においても重要である。申請者らの以前の研究では、化学反応速度のヤコビ行列から算出される、化学反応特性時間の逆数に相当する Chemical Explosive モードを用いることで、部分予混合乱流燃焼場において、燃焼速度が局所的に最大となる混合気塊を事前に予測することに成功した (Y. Minamoto ら, Combust. Flame, 2015)。本手法を火炎干渉の予測に応用することで、火炎干渉の燃焼速度への局所的な影響を予測することができると考えられる。従って、MILD 燃焼条件下で得られた火炎干渉に関する知見や Chemical Explosive モードによる火炎干渉の影響の予測手法を、次世代低環境負荷燃焼条件に相当する複合乱流燃焼場で検証し、乱流燃焼モデルで考慮する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、複合乱流燃焼場において伝播火炎干渉の動的特性及びその影響を明らかにし、以前の研究で提案したブリッジ関数を導入した乱流燃焼モデルの概念を、次世代低環境負荷燃焼を対象として発展させ検証する。さらに、以前の概念をさらに発展させ、ブリッジ関数内に火炎干渉の局所燃焼速度への影響を考慮に入れることで、伝播火炎干渉が頻発する低環境負荷燃焼に適した、乱流予混合燃焼モデルを開発することを目的とする。モデル開発では、火炎干渉の非定常性を考慮するために将来的な応用の期待が高まる Large Eddy Simulations (LES) を主な対象とするが、時間平均的な火炎干渉の影響を考慮することで、一般的に燃焼器開発に用いられる Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) シミュレーションも対象とする。

3. 研究の方法

本研究は、直接数値計算 (DNS) を用いた数値的研究と高分解能平面レーザー誘起蛍光法 (PLIF) 計測による実験的研究からなる。申請者らの以前の研究結果から、乱流 MILD 燃焼条件下の伝播火炎干渉に関する反応性スカラー輸送は疑似的な 0 次元着火燃焼問題と相似性があることが示されており、この現象は干渉火炎前縁での化学反応特性時間スケールによって特徴づけられると考えられる。本研究ではこれらの知見を発展させ、次世代低環境負荷乱流燃焼を含む複合乱流燃焼場における火炎干渉機構を解明する。また、明らかにした火炎干渉機構に基づき、火炎干渉の局所燃焼速度への影響をブリッジ関数内にて記述し、次世代低環境負荷燃焼器に相当する複合的な乱流燃焼場での燃焼速度を予測する乱流燃焼モデルを開発する。

平成 28 年度：

初年度は、伝播火炎同士干渉の基本メカニズムを明らかにした申請者らの以前の研究 (Y. Minamoto ら, Combust. Flame, 2014) を数値的・実験的手法を用いて発展させ、伝播火炎干渉の熱発生への影響及びその動的特性の解明に重点を置く。

干渉火炎の前縁は、伝播する 2 つの火炎からのラジカル・中間生成物などが集中する可能性があり、それらの動的特性および化学反応特性を詳細に解明するには、詳細化学反応機構又は Skeletal 素反応機構、選択拡散の影響及び輸送係数の温度依存性を考慮に入れた DNS を行う必要がある。様々な条件での火炎干渉メカニズムを、関連する特性スケールで整理し、一般化するために、次の 2 種類の DNS 結果を対象とした解析を行う。(i) 対面する 2 つの 1 次元層流伝播火炎の DNS を行い、以前 MILD 燃焼場にて明らかにされた火炎干渉の基本的な機構を、低環境負荷燃焼条件を含む様々な当量比、希釈条件及び予熱温度条件において一貫していることを確認する。また、火炎干渉過程を詳細に解析し、層流火炎干渉が局所燃焼速度へ与える影響を定量的に明らかにするとともに、ブリッジ関数内で考慮するために必要な特性時間・長さスケールとの関係を解明する。(ii) 火炎干渉が引き起こされる十分高い乱流強度を考慮に入れた V 型乱流火炎又は乱流条件が局所的に異なる 3 次元乱流燃焼 DNS を行い、乱流燃焼条件が局所的に異なる燃焼場での火炎干渉機構を明らかにする。本 DNS での乱流燃焼条件は、十分希薄な混合気を燃焼ガスで希釈し、低 Da 高 Ka 条件の下で行う。また、(i) で解明する層流火炎干渉特性と比較し、火炎干渉における乱流特性スケールの影響を解明する。

平成 29 年度：

2 年次は、初年度に得た知見を基礎として、火炎干渉現象予測への Chemical Explosive モードの適用性を検討する。研究手法として DNS による数値的手法を用いる。まず、DNS 結果から直接算出される Chemical Explosive モードが局所的な最大値を持つ領域と、初年度の研究から得られる層流及び乱流中の火炎干渉領域との相関関係について解明する。さらに、Chemical Explosive モードを用いた火炎干渉による燃焼反応速度への影響の予測適用性についての検証を行う。これは、火炎干渉は疑似的な 0 次元自着火問題に帰着できるが、0 次元自着火問題における燃焼速度増加は Chemical Explosive モードによって見積もることができるからである。このように、DNS を用いる数値解析では、Chemical Explosive モードを用いることで火炎干渉を同定できると考えられるが、実用燃焼器の数値解析では、乱流燃焼中の火炎を解像することはせず、一部の化学種の基礎方程式のみを取り扱う。この場合、局所的な伝播火炎干渉の同定を、スカラー散逸率及び局所燃焼反応速度を用いる DNS と同様の手法で行うことが不可能であり、Chemical Explosive モード算出に必要な化学反応率のヤコビ行列を得ることは困難である。

そこで、本研究における干渉火炎の同定方法として、任意の化学種の組から算出でき、化学反応速度に基づくヤコビ行列を用いない Reduced Chemical Explosive モードを用いる。DNS 結果を用い、厳密な Chemical Explosive モード及び Reduced Chemical Explosive モードを定

性的・定量的に比較する。次に、上記で解明する Chemical Explosive モードと火炎干渉による燃焼速度増加の相関関係を用い、時間平均 (RANS モデル) や空間フィルター (LES モデル) 操作を施した DNS 結果から Reduced Chemical Explosive モードを用いて、伝播火炎干渉の燃焼速度への局所的な影響をブリッジ関数内に記述する手法を開発する。仮に本手法によって、火炎干渉の影響を考慮できないことが分かった場合は、火炎干渉による影響を記述する付加項を用い、ブリッジ関数と共に乱流燃焼モデルに適用する。

平成 30 年度：

前年度までに構築した、火炎干渉による燃焼反応速度への影響を考慮し、さらに特性時間スケールに基づいたブリッジ関数を導入し、高 Da 低 Ka 条件と低 Da 高 Ka 条件に対応した 2 つの漸近的な乱流燃焼モデルを用いて、次世代低環境負荷燃焼を含む複合乱流燃焼場を連続的に記述する手法の検証を行う。初めに、既に得られている DNS 結果に時間平均又は空間フィルター操作を施し、それらの場から本モデルによって燃焼速度場を予測し、DNS から求める燃焼速度に時間平均又は空間フィルター操作を施した結果と比較する静的テストを行う。必要に応じて、本研究室で開発される LES 又は RANS 乱流燃焼数値解析コードを用い、DNS 及び実験条件と同一の境界条件を用いて数値計算解析を行い、得られる結果を DNS 結果及び計測結果と直接比較する動的テストも行う。ブリッジ関数を用いることで、複数の漸近モデルを用いた燃焼場の連続的な記述が特別な考慮無しに可能となるが、用いる特性時間スケールとして複数の組み合わせ候補を挙げることができる。その組み合わせの選定は、本乱流燃焼モデルの検証作業と並行して行う予定である。また、必要に応じて、汎用燃焼流体数値解析ソフトウェアに本モデルを組み込み、実用燃焼器を対象とした数値解析を行うことによって、より包括的な検証を行う。

4. 研究成果

数値的・実験的手法による燃焼場の情報を用いて、伝播火炎干渉の熱発生への影響及びその動的特性の解明を行った。具体的には伝播する 2 つの火炎の 1 次元直接数値計算 (DNS) を用いた数値的解析により、伝播火炎の干渉領域が、拡散現象により支配される伝播ではなく、化学反応速度が支配的な、自着火に近いモードで燃焼反応が進むことを解明した。これは、多くの乱流燃焼モデルが伝播火炎の重ね合わせを仮定しているのに対し、低環境負荷燃焼条件では、局所的な自着火タイプの燃焼形態を考量する必要があることを示唆している。また、ガスタービン燃焼器内乱流燃焼に近い形態の 3 次元巡回乱流燃焼 DNS の結果やディーゼル燃焼を模擬した DNS 結果、MILD 燃焼 DNS 結果などの複数の DNS 結果を用い、火炎干渉過程を詳細に解析し、層流火炎干渉が局所燃焼速度へ与える影響を定量的に明らかにするとともに、本研究で開発するモデルに用いるブリッジ関数内で考慮するために必要な特性時間・長さスケールとの関係を解明した。実際の燃焼器同様、巡回乱流燃焼場では、各種乱流スケールが局所的に大きく異なっており、これらの幅広い乱流条件において、火炎と乱流の干渉機構のみならず、火炎同士の干渉も考慮した乱流燃焼モデルを考案した。考案した乱流燃焼モデルを適用して、実験旋回流バーナを対象とした Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) 解析を実施し、粒子画像流速計 (PIV) 及び OH 平面レーザー誘起蛍光法 (PLIF) を用いて実験的に計測された速度場、スカラー場と比較した。数値解析結果と計測結果は定性的に良い一致を見せており、ブリッジ関数による乱流燃焼モデルが当初の目的を果たしていることを示唆している。

乱流予熱燃焼場及び乱流 MILD 燃焼場を対象として、直接数値計算 (DNS) を用いた数値的研究を実施した。乱流燃焼場に関係する様々なスケールに着目し、(複合)乱流燃焼場の反応領域トポロジーと乱流燃焼速度の関係性を明らかにした。乱流に関する時間スケールが燃焼反応の時間スケールと同程度の条件では、反応領域トポロジーに関する火炎と乱流の干渉は、テイラー・マイクロスケールの長さスケールで発生する。この長さスケールは、乱流の平均歪みに関係する長さスケールであるが、多くの乱流燃焼モデルにて考慮される、積分長に比べ小さい。また、この長さスケールは、所謂 Implicit LES における空間解像度決定の指針となる可能性がある。今後は、得られた知見を用いた既存モデルの改良や、比較的大きなスケールの燃焼器を対象とした産業用のシミュレーションを実施する予定である。

複合乱流燃焼場の一つである乱流 MILD 燃焼場を対象として、直接数値計算 (DNS) を用いた数値的研究を実施した。これらの燃焼場における動的モード及びその時間スケールの同定手法を開発し、通常の乱流燃焼場及び複合乱流燃焼場に適用した。これらの結果から、複合乱流燃焼場においては、通常の乱流燃焼場とは異なり、化学反応の時間スケールと乱流の時間スケールが非常に近いことが示され、さらにその動的モードは、散逸モードであることが明らかになった。上記の解析及び昨年度、一昨年度の解析結果に基づき、局所乱流燃焼条件に対応して滑らかに変化するブリッジ関数及び単一の局所燃焼モードの予測を高効率に実施可能な乱流燃焼モデルを選択的に用いるハイブリッド乱流燃焼モデルを実験スケールの乱流燃焼場の数値解析に適用し、計測結果との比較を実施し、その有効性を明らかにした。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2 件)

Yuki Minamoto, Basimil Yenerdag, Mamoru Tanahashi, Morphology and structure of hydrogen-air turbulent premixed flames, Combustion and Flame, 192, 369-383 (2018). 査読あり

Nguyen Anh Khoa Doan, Nedunchezian Swaminathan, Yuki Minamoto, DNS of MILD combustion with mixture fraction variations, Combustion and Flame, 189, 173-189 (2018). 査読あり

〔学会発表〕(計5件)

N. A. K. Doan; Y. Minamoto; N. Swaminathan, Modes of combustion and reaction zones morphology in mild combustion, Tenth Mediterranean Combustion Symposium, 2017

Yuki Minamoto, Basimil Yenerdag, Mamoru Tanahashi. 位相幾何学に基づく水素・空気旋回乱流予混合火炎の形態と構造の解明, 日本燃焼学会 第56回燃焼シンポジウム, Nov. 2018.

Yuki Minamoto, Basimil Yenerdag, Mamoru Tanahashi. 水素・空気旋回乱流予混合燃焼場における乱流-火炎の干渉スケールの位相幾何学的解析, 日本流体力学会年会 2018, Sep. 2018.

Yuki Minamoto. Topological Features of Reaction Zones in Turbulent Combustion, Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, Sep. 2018.

Yuki Minamoto, Masayasu Shimura, Mamoru Tanahashi. Numerical and Experimental Studies of Lean, Diluted Turbulent Combustion, KAUST Research Conference: Combustion in Extreme Conditions, Mar. 2018.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者
研究分担者氏名：
ローマ字氏名：
所属研究機関名：
部局名：
職名：

研究者番号（8桁）:

(2)研究協力者

研究協力者氏名:

ローマ字氏名:

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。