

令和 4 年 4 月 29 日現在

機関番号：12608
研究種目：若手研究
研究期間：2019～2021
課題番号：19K14903
研究課題名（和文）機械学習を導入した局所燃焼現象同定手法に基づく高精度乱流燃焼モデル

研究課題名（英文）Machine learning-based turbulent combustion modelling

研究代表者
源 勇氣（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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：機械学習により、予混合燃焼やMILD燃焼など種々の乱流燃焼条件へ適用可能な乱流燃焼モデルを開発した。特に通常の誤差関数に加え、保存則などの物理法則を加味した関数を考慮することにより幅広い条件下での高精度予測が可能なモデル学習手法の確立やそれを活用した乱流燃焼モデル構築、従来のモデル開発枠組みと機械学習を併用した乱流燃焼モデルなどを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
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熱流体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乱流燃焼モデル開発は困難である。本研究では、高精度数値熱流体解析の実現に寄与する乱流燃焼モデルを機械学習により開発した。

研究成果の概要（英文）：Turbulent combustion models were developed by using machine learning techniques which may be applied to various combustion conditions such as premixed and MILD combustion. For these purposes, physics-guided loss function was proposed to consider mass and atomic conservations. Also a conventional modelling framework was incorporated with machine learning to achieve robust modelling.

研究分野：熱工学

キーワード：乱流燃焼 乱流燃焼モデル 直接数値計算 機械学習 LES RANS

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

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熱流体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開発は困難である。また、低環境負荷燃焼場で起こり得る火炎同士の干渉による燃焼速度の変化や自着火、消炎などの複数の局所現象が複合的に混在する燃焼場を予測可能な乱流燃焼モデルは存在しない。

2. 研究の目的

本研究では、伝播火炎だけでなく、火炎干渉、自着火及び消炎などの局所現象が複合的に混在する複合的乱流燃焼場における局所現象及びその発生に関連するスカラーの動的特性を解明し、解明された洞察と機械学習の活用により、高精度に予測する物理モデルを開発することを目的とする。具体的には、機械学習実施に向けて、複合的乱流燃焼場を対象とした直接数値計算結果から得られた結果を用い、本研究で解明する上記局所現象に関する洞察に基づき機械学習データベースを構築する。構築されたデータベースと機械学習を複合乱流燃焼場におけるサブグリッド・スケールの局所現象の同定に適用し、同定された異なる種類の局所現象をそれぞれに適切なモデルを用いて連続的に記述する。乱流燃焼モデル開発では、局所的な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 LES を主な対象とするが、これらの局所現象の時間平均的な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) に基づく数値熱流体解析も対象とする。

3. 研究の方法

本研究では次の4項目を中心に研究を遂行する。

1. 直接数値計算結果を用いた局所現象の解明及び同定
複合乱流燃焼場を対象とした直接数値計算結果を用い、火炎干渉、自着火、消炎などの局所現象を解明する。直接数値計算では、これらの局所現象は全て完全に解像されているため、スカラー場の輸送想定式のバランスから直接これらの現象を同定可能である。本項目では、特に、局所現象を数値熱流体解析において同定するために必要な、関連するグリッド・スケールのスカラー場の動的特性を明らかにすることを目的とする。
2. 同定された局所現象による学習データ構築
直接数値計算結果に空間フィルターを施し数値熱流体解析における情報を模擬した燃焼場の物理量を用いて、機械学習の入力データを構築する。入力する物理量の選択は、上記の解明によって得られる洞察に基づき行う。また、上記で得られた物理的な洞察に基づき、局所現象の位置や発生時刻を直接数値計算結果から直接取得することで、機械学習に用いる学習データとする。
3. 機械学習モデルの開発及び学習
機械学習モデルを開発し、2. で構築された学習データを用いて機械学習を実施する。開発及び学習済みの機械学習モデルを、複合乱流燃焼場を対象とした直接数値計算結果に適用し、複合的乱流燃焼場を構成する局所現象の同定精度を検証する。本作業では、様々な複合的乱流燃焼場において高い精度で局所現象の同定を行えるように、機械学習モデルや学習データ構築手法の改良も必要に応じて実施する。
4. 機械学習支援型乱流燃焼モデルの構築
機械学習を用いて同定された局所的な燃焼形態を、それぞれの燃焼物理に適した乱流燃焼モデルを用いて記述する手法を統合的に開発する。個々の局所燃焼現象を記述するためのモデルの一部は、申請者の過去の若手研究(B)で開発された乱流燃焼モデルを活用する(Y. Minamoto ら, Int. J. Hydrogen Energy, 2015; Y. Minamoto ら, Combust. Flame, 2018)。開発された本乱流燃焼モデルを、複合的乱流燃焼場の直接数値計算結果に適用し、モデル精度の静的テストを実施する。

4. 研究成果

機械学習により、乱流燃焼モデルを開発した。特に通常の誤差関数に加え、保存則などの物理法則を加味した関数を考慮することにより幅広い条件下での高精度予測が可能なモデル学習手法

の確立やそれを活用した乱流燃焼モデル構築、従来のモデル開発枠組みと機械学習を併用した乱流燃焼モデルなどを開発した。

関連する査読付き国際学術雑誌掲載論文

1. Y. Minamoto, K. Jigjid, R. Igari, M. Tanahashi, Effect of flame-flame interaction on scalar PDF in turbulent premixed flames, *Combustion and Flame*, in press (2021).
2. R. Nakazawa, Y. Minamoto, N. Inoue, M. Tanahashi, Species reaction rate modelling based on physics-guided machine learning, *Combustion and Flame*, 235, 111696 (2022).
3. K. Jigjid, C. Tamaoki, Y. Minamoto, R. Nakazawa, N. Inoue, M. Tanahashi, Corrigendum to "Data driven analysis and prediction of MILD combustion mode", *Combustion and Flame*, 227, 481-482 (2021).
4. K. Jigjid, C. Tamaoki, Y. Minamoto, R. Nakazawa, N. Inoue, M. Tanahashi, Data driven analysis and prediction of MILD combustion mode, *Combustion and Flame*, 223, 475-485 (2021).
5. N. A. K. Doan, S. Bansude, K. Osawa, Y. Minamoto, T. Lu, J. H. Chen, N. Swaminathan, Identification of combustion mode under MILD conditions using Chemical Explosive Mode Analysis, *Proceedings of Combustion Institute*, 38 (4) 5415-5422 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Jigjid, Kherlen Tamaaki, Chitoshi Minamoto, Yuki Nakazawa, Ryota Inoue, Nakamasa Tanahashi, Mamoru	4. 巻 223
2. 論文標題 Data driven analysis and prediction of MILD combustion mode	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Combustion and Flame	6. 最初と最後の頁 474-485
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.combustflame.2020.10.025	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Jigjid, Kherlen Tamaaki, Chitoshi Minamoto, Yuki Nakazawa, Ryota Inoue, Nakamasa Tanahashi, Mamoru	4. 巻 227
2. 論文標題 Corrigendum to "Data driven analysis and prediction of MILD combustion mode" [Combust. Flame 223 (2021) 474-485]	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Combustion and Flame	6. 最初と最後の頁 481-482
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.combustflame.2021.01.017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Doan, N. A.K. Bansude, S. Osawa, K. Minamoto, Y. Lu, T. Chen, J. H. Swaminathan, N.	4. 巻 38
2. 論文標題 Identification of combustion mode under MILD conditions using Chemical Explosive Mode Analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the Combustion Institute	6. 最初と最後の頁 5415-5422
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.proci.2020.06.293	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 源 勇気, ジグジッド ヘルレン, 玉置 千智, 店橋 護
2. 発表標題 データ指向型手法によるMILD燃焼モードの解明とモデル開発
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 ジグジッド・ヘルレン, 源 勇気, 玉置 千智, 店橋 護
2. 発表標題 複合的燃焼場における局所燃焼モードのデータ指向型解析
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryota Nakazawa, Yuki Minamoto, Masayasu Shimura, Mamoru Tanahashi
2. 発表標題 Fundamental Analysis of Turbulent Combustion Modelling with Deep Learning
3. 学会等名 The Second Pacific Rim Thermal Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryota Nakazawa, Yuki Minamoto, Masayasu Shimura, Mamoru Tanahashi
2. 発表標題 Analysis for Deep Learning Based Turbulent Combustion Modelling
3. 学会等名 7th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中澤 凌太, 源 勇気, 志村 祐康, 店橋 護
2. 発表標題 深層学習を応用したレイノルズ平均反応速度モデル
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中澤 凌太, 源 勇気, 志村 祐康, 店橋 護
2. 発表標題 深層学習を活用した乱流燃焼モデルの開発
3. 学会等名 第56回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Y. Minamoto, N. A. K. Doan, N. Swaminathan	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Cambridge University Press	5. 総ページ数 31
3. 書名 MILD Combustion, In N. Swaminathan, X.-S. Bai, N. E. L. Haugen, C. Fureby, G. Brethouwer, ed., Advanced Turbulent Combustion Physics and Applications	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------