

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03964

研究課題名(和文) 予混合火炎から拡散火炎までシームレスに表現可能な複合Flameletモデルの提案

研究課題名(英文) A seamless modeling of premixed and non-premixed flames based on flamelet approaches

研究代表者

松下 洋介 (Matsushita, Yohsuke)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80431534

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：予混合燃焼から拡散燃焼までシームレスに表現可能な複合Flameletモデルによる広域的な燃焼モデリングを実施した。まず、一次元の予混合あるいは拡散火炎を対象にFlamelet-Generated Manifolds method (FGM)あるいはFlamelet/Progress-Variable approach (FPV)に基づきFGMとFPVのFlamelet tableを構築した。次に、局所の燃焼モードをFlame Indexで評価し、予混合燃焼の特徴が現れる領域ではFGMを、拡散燃焼の特徴が現れる領域ではFPVを用いる複合Flameletモデルを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの燃焼シミュレーションの多くでは、対象とする燃焼場が予混合燃焼あるいは拡散燃焼かの燃焼モードによって燃焼モデルを使い分けている。これは、燃焼モデルが燃焼モードに依存し、普遍的ではないことを意味する。また、部分予混合燃焼、噴霧燃焼や微粉炭燃焼では、これらの燃焼場に予混合燃焼と拡散燃焼の両方の燃焼モードが現れる。予混合燃焼から拡散燃焼までシームレスに表現可能な複合Flameletモデルにより、燃焼モードに依存しない普遍的な燃焼のモデリングが可能となり、異なる燃焼モードが混在する燃焼場を記述することができることが期待される。

研究成果の概要(英文)：Combustion modeling in which premixed combustion and diffusion combustion can be seamlessly expressed was conducted. First, the Flamelet tables based on the Flamelet-Generated Manifolds method (FGM) and the Flamelet/Progress-Variable approach (FPV) were constructed for the one-dimensional premixed and diffusion flames, respectively. Then, the combined Flamelet model in which the FGM or FPV is selected for the premixed or diffusion combustion characteristic according to the local combustion mode evaluated by the Flame Index was proposed.

研究分野：化学工学

キーワード：予混合火炎 拡散火炎 Flamelet FPV FGM Large Eddy Simulation 乱流シュミット数 有限体積法

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

燃焼シミュレーションにおいて、拡散燃焼に対しては Flamelet approach が広く用いられており、近年では Flamelet モデルを拡張した Flamelet/Progress-Variable approach (FPV)¹⁾が成果を上げている。FPV ではあらかじめ詳細化学反応を用いて一次元の対向流拡散火炎を対象に混合分率と Progress Variable (PV)に対して温度や化学種の濃度のデータベースを作成する。ここで、一次元拡散火炎を対象としているため、データベースは拡散燃焼の特徴が反映されたものとなる。実際の燃焼シミュレーションでは混合分率と PV の保存式を解き、温度や化学種の濃度を決定する。

一方、予混合火炎に対する Flamelet-Generated Manifolds method (FGM)²⁾では、あらかじめ詳細化学反応を用いて一次元の予混合火炎を対象に種々の当量比と Control Variable (CV)に対して温度や化学種の濃度のデータベースを作成する。さらに、当量比を混合分率に変換することで FPV モデルと類似したデータベースが得られる。ここで、一次元予混合火炎を対象としているため、データベースは予混合燃焼の特徴が反映されたものとなる。実際の燃焼シミュレーションでは混合分率と CV の保存式を解き、温度や化学種の濃度を決定する。

拡散燃焼に対する FPV および予混合燃焼に対する FGM は間接的ではあるものの、詳細化学反応を考慮可能な燃焼モデルであり、一定の成果を収めていることに疑う余地はない。また、用いる詳細化学反応が複雑になっても間接的に詳細化学反応を考慮した燃焼シミュレーションの計算負荷が増えない。しかしながら、これらのモデルは対象とする系を予混合燃焼あるいは拡散燃焼のいずれかに限定した燃焼モデルであり、FPV には予混合燃焼の特徴が、FGM には拡散燃焼の特徴が欠落している。

2. 研究の目的

予混合燃焼あるいは拡散燃焼のいずれかを対象とした狭域的な燃焼モデリングから脱却し、予混合燃焼から拡散燃焼までシームレスに取り扱うことが可能な複合 Flamelet モデルによる広域的な燃焼モデリングを実施する。具体的には、燃焼場を Flame Index で評価し、拡散燃焼の特徴が現れる領域では Flamelet/Progress Variable (FPV)を、予混合燃焼の特徴が現れる領域では Flamelet Generated Manifolds (FGM)を用いる複合 Flamelet モデルを提案する。ここで、Flame Index とは燃料と酸化剤の勾配の内積で示される変数であり、Flame Index が正、すなわち燃料と酸化剤の勾配の方向が同じ場合に予混合燃焼の特徴が、Flame Index が負、すなわち燃料と酸化剤の勾配の方向が逆の場合に拡散燃焼の特徴が現れると考える。これにより、例えば、ガスタービンの高効率化のために採用されている部分予混合燃焼を正確に予測するとともに、複合 Flamelet モデルによる燃焼モデリングに関する国内初かつ国際的にも数少ない情報発信源となることを目指す。

3. 研究の方法

拡散燃焼と予混合燃焼をシームレスにモデル化した燃焼シミュレーションを実現するために、(1) LES における乱流シュミット数を決定し、(2) FPV および FGM による Flamelet Table を構築し、(3) 複合 Flamelet モデルによる部分予混合火炎対象とした乱流燃焼の LES を実施する。

(1) Large Eddy Simulation における乱流シュミット数の決定

乱流燃焼では、熱移動や化学反応など物質移動以外にも多くの現象が同時に生じるため、乱流燃焼を対象にシュミット数を決定するのは困難である。そのため、乱流混合のみが生じる問題を対象に乱流シュミット数を検討する必要がある。同軸二重ノズルからプロパンと空気を供給する Sandia Propane Jet は単純かつ乱流燃焼の流れのパターンに酷似しており、流れ場だけでなく、混合分率、その変動に加え、混合分率の確率密度を含む詳細な実験データを提供している。そこで、平成 30 年度では、種々の乱流シュミット数および動的にシュミット数を決定する方法により、Sandia Propane Jet を対象に、Large Eddy Simulation による物質移動解析を実施し、適切な乱流シュミット数を決定する。

(2) FPV および FGM による Flamelet Table の構築

部分予混合の乱流燃焼で最も有名な Sandia Flame C-F を対象に、一次元対向流拡散火炎および一次元予混合火炎を用いて詳細化学反応における化学種の濃度や温度などの重要な情報を正確に表現しうる Flamelet/Progress Variable (FPV)における Progress Variable (PV)と Flamelet Generated Manifolds (FGM)における Control Variable (CV)を検討するとともに、FPV と FGM の Flamelet Table を構築する。さらに、複合 Flamelet モデルを構築するために PV と CV に共通なパラメータを決定する。また、Sandia Flame C-F を対象に古典的な Flamelet および拡散火炎を対象とした最新の燃焼モデルである FPV のみおよび FGM のみの Flamelet Table も構築し、これらと比較することで、FPV および FGM の Flamelet Table の表現する範囲を明確にすることで、FPV および FGM それぞれの特徴を明示する。なお、Flamelet Table の構築において用いる補間および数値積分にはそれぞれ Natural Spline および Gauss Legendre を適用する。また、FPV と FGM の Flamelet Table の構築には FlameMaster を用いる。

(3) 複合 Flamelet モデルによる部分予混合火炎対象とした乱流燃焼の LES

部分予混合の乱流燃焼で最も有名な Sandia Flame C-F を対象に、乱流燃焼の LES を実施する。(2)で決定した 1~3 個のみの Progress Variable (PV)あるいは Control Variable (CV)の保存式を解くだけで、詳細化学反応のあらゆる情報を表現することを試みる。ここで、実験結果と比較することで、PV あるいは CV の変動も考慮すべきかどうか慎重に判断する。これと同時に、比較対象として、古典的な Flamelet、拡散火炎を対象とした最新の乱流燃焼モデルである Flamelet/Progress Variable、Flamelet Generated Manifolds および詳細化学反応による乱流燃焼の LES も実施する。なお、詳細化学反応を考慮する場合、化学反応の時間スケールは流れの時間スケールと比較して小さいことから、化学反応の計算には流れの計算より小さいタイムステップを用い、その解法には当研究室の別のグループで実績のある LSODE あるいは VODE を用いる。これらの結果と FGM による結果と比較することで、FGM による乱流燃焼の LES の特徴を明確にする。燃焼シミュレーションのボトルネックとなるポアソン方程式の解法には藤井の開発した Algebraic Multi-Grid Solver (AMGS)³⁾を適用することで、計算時間を短縮するとともにロバスト性を高める。また、本コードには Message Passing Interface (MPI)による並列化が施されており、速やかにシミュレーションを実施できる。

4. 研究成果

(1) Sung et al.の対向流拡散火炎を対象とした FPV と FGM の比較

Sung et al.⁴⁾は層流の対向流拡散火炎を対象に、温度 300 K、モル比で酸化剤を $O_2:N_2 = 0.23:0.77$ 、燃料を $CH_4:N_2 = 0.23:0.77$ の混合気とし、ひずみ速度を $a = 42, 56, 90 \text{ s}^{-1}$ と変化させた際の酸化剤と燃料のノズル間における温度と化学種のモル分率を測定している。本研究では、Sung et al.⁴⁾の対向流拡散火炎の $a = 42 \text{ s}^{-1}$ の条件を対象とする。

Figure 1 に Sung et al.⁴⁾の対向流拡散火炎において、ひずみ速度 $a = 42 \text{ s}^{-1}$ の条件を対象に FPV¹⁾あるいは FGM²⁾に基づく燃焼シミュレーション実施し、求めた酸化剤と燃料ノズル間の温度の空間分布を示す⁵⁾。用いる燃焼モデルによらず、酸化剤と燃料ガスが衝突する領域に高温場が形成されており、安定した火炎が形成されている。そのため、いずれのモデルを用いても対向流拡散火炎の大まかな特徴が表現されていると考えられる。しかしながら、高温場を形成したノズル間の中央付近の火炎の温度に着目すると、FPV を用いた場合と比較して FGM を用いた場合の方が火炎の温度が若干低い。

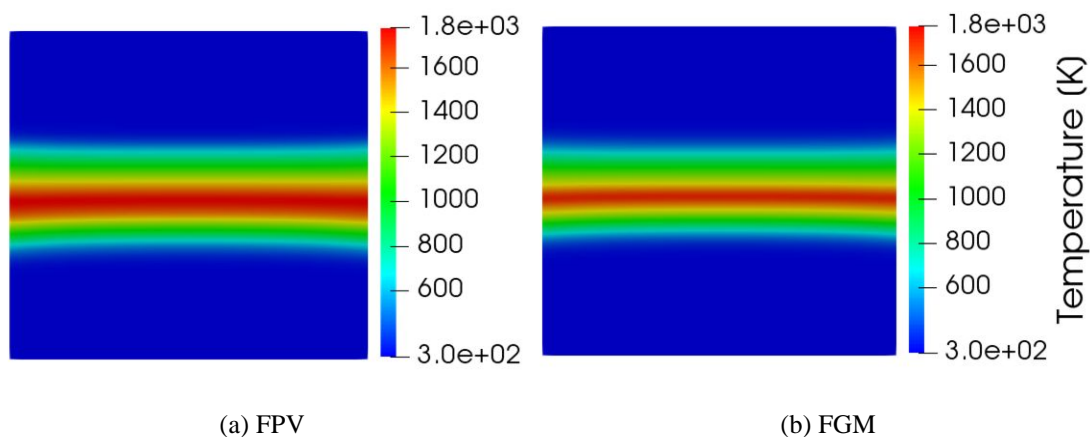


Figure 1 Temperature distributions in the counter-flow diffusion flame^{4,5)}

Sung et al.⁴⁾は対向流拡散火炎のノズルの中心軸上における一次元の燃焼解析を実施し、実験値と比較しており、本解析においても中心軸上の数値解と実験値を比較し、妥当性を検討する。なお、酸化剤を供給するノズルからの距離を横軸にし、燃料を供給するノズルは 13 mm の位置に存在する。Figure 2 に FPV あるいは FGM を用いた燃焼シミュレーションから求めた酸化剤と燃料ノズル間の中心軸上の CO と CO_2 のモル分率分布を、詳細化学反応機構を用いた数値解および測定値⁴⁾とともに示す⁵⁾。なお、ここでは示していないが、FPV と FGM による CH_4 、 O_2 と H_2O のモル分率の数値解は測定値と詳細化学反応機構の数値解とほぼ完全に一致した。図より CO と CO_2 のモル分率がそれぞれ上昇していることから、この領域において燃焼反応が進行していることがわかる。さらに、FPV を用いた数値解は、各化学種のモル分率について詳細化学反応機構を用いた計算結果とほぼ完全に一致した。したがって、対向流拡散火炎を対象とする場合、FPV は詳細化学反応機構を用いた計算結果と同等の精度で解析が可能であることがわかる。そのため、FPV の数値解は測定値と若干の差異が生じたものの、これは実験と同等の境界条件で燃焼シミュレーションを実施できていない可能性もあり、詳細化学反応機構を用いた数値解を再現する本来の目的を達成したと考える。なお、ここでは示していないが、詳細化学反応機構に San Diego Mech を用いた燃焼シミュレーションも実施したが、本研究で検討している主要な化学種のモル分率の分布についてその数値解は GRI-Mech 3.0 を用いた数値解とほぼ同じであった。一方、ここでは示していないが、FGM を用いた場合、 O_2 、 CH_4 および H_2O のモル分率の数値解は FPV を

用いる場合と同等の精度で測定値と詳細化学反応機構の数値解を表現した。しかしながら、FGMを用いた数値解は測定値や詳細化学反応機構の数値解と比較して特に燃料側でCOのモル分率を過大に、CO₂のモル分率を過小に評価した。そのため、FGMを用いた燃焼シミュレーションでは、詳細化学反応機構を用いた数値解を再現する本来の目的を達成できているとは言い難い。

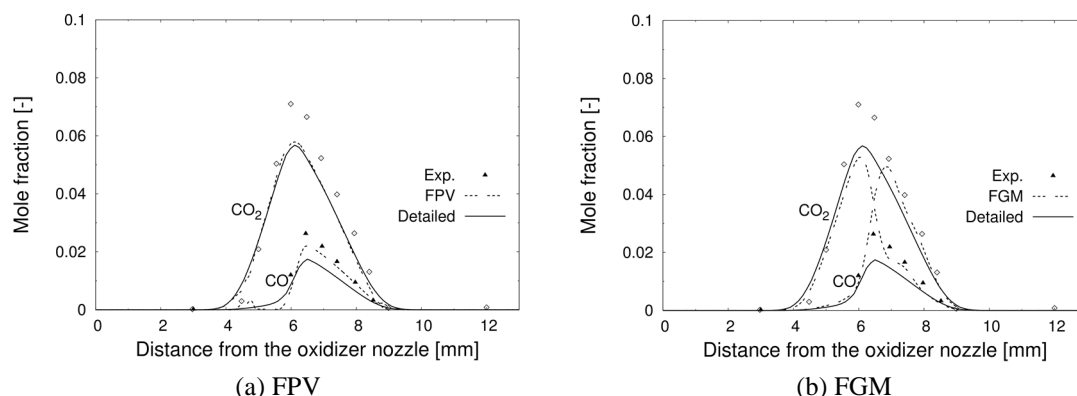


Figure 2 CO and CO₂ mole fraction distributions in the counter-flow diffusion flame^{4,5)}

FPVでは対向流拡散火炎を対象に、FGMには予混合火炎を対象にそれぞれFlamelet Tableを作成するため、これら異なる火炎の特徴がそれぞれのFlamelet Table反映される。すなわち、対向流拡散火炎では等量比の異なる周囲の混合気の影響を受けながら定常状態に達するのに対し、予混合火炎ではあらかじめ酸化剤と燃料が完全に混合した等量比一定の混合気定常状態に達する。そのため、FGMで対象とする予混合火炎における定常状態は化学平衡あるいはこれに近い状態となり、吸熱反応であるCO₂の解離反応が進行し、特に燃料側でCOのモル分率が高く、CO₂のモル分率が低くなったと考えられる。本研究では、反応進行変数をCO、CO₂、H₂とH₂Oの質量分率の和と定義している。反応進行変数にCOとCO₂の質量分率の和が含まれるため、FGMにはCOとCO₂の内訳を表現できなかった可能性も考えられる。この傾向は、既往のCOに関する解析においても同様の傾向が報告されている⁶⁾。以上のことから、FGMは拡散火炎を対象とした場合にも適用可能であるものの、FGMのCOおよびCO₂のモル分率の予測精度はFPVよりも低いことが示唆された。

(2) Sandia Flame Dを対象とした部分予混合火炎を対象とした乱流燃焼シミュレーション

Figure 3に中心軸上における混合分率、そのRoot-Mean-Square (RMS)、温度および化学種(CH₄、CO、CO₂、OH、H₂O、H₂)の質量分率の時間平均値を測定結果とともに示す⁷⁾。解析結果および測定結果はいずれも上流から下流に向かって1から徐々に減衰している。これはノズルから供給された燃料の拡散しながら周囲のガスと混合するためである。混合分率の時間平均値の解析結果は測定結果とほぼ完全に一致していることから、本解析はノズルから供給された燃料の噴流が乱流燃焼場において減衰し、周囲のガスと混合する過程を良好に表現していることを意味する。

混合分率のRMSについては解析結果および測定結果はいずれも上流から下流に向かって上昇し、その後減少している。解析結果は測定結果を概ね再現しているものの、上流において解析結果は測定結果より若干低い値を示している。これは、解析では流入境界面において空間的な速度分布を考慮しているものの、その時間的な変動を考慮していないためであると考えられる。理想的には本解析の流入境界面より上流の燃料を供給するノズルを解析対象に含めることで、本解析の流入境界面における時間的な速度の変動も再現すべきである。しかしながら、LESにおいて壁せん断が支配となるノズル内の乱流流れの解析を実施するためにはさらに多くの計算格子を必要とし、計算負荷が大きくなってしまいうため現実的ではない。ノズルの下流に位置するある断面における速度などの物理量をノズルの上流に位置する流入境界面に複製するいわゆるRecycle boundaryを用いることで解析すべきパイプの長さを短くすることはできるものの、それでもなお多くの計算格子を必要とする。一方、Pierce and Moin⁸⁾は事前にノズルのみを対象とした解析を実施し、実際の解析の流入境界面に相当する断面における速度などの空間的な分布とその時間的な変動を含む物理量をすべて保存し、実際の解析でこの保存したデータを流入境界条件として用いることを提案している。この方法では、流入境界面において妥当な空間的な分布と時間的な変動が求められることが期待されるが、保存すべきデータ量が膨大となるだけでなく、異なる解析対象間に生じるメッシュの不整合を処理しなければならない。また、パイプ内の流動が下流の影響を受けないことも確認しなければならないため、用いるためには解決すべき課題も多い。実用的な方法として、流入境界面において人工的に時間的な変動を生成する手法⁹⁾が数多く提案されている。しかしながら、本解析対象と同じSandia Flame Dを対象に流入境界面に人工的に時間的な変動を生成する手法を適用した解析結果が報告されているものの、解析対象ごとに調整すべきパラメータが存在し、汎用性に欠ける。そのため、LESにおいて妥当な流入境界条件を与えるのは極めて困難であり、今後の研究課題であると言える。

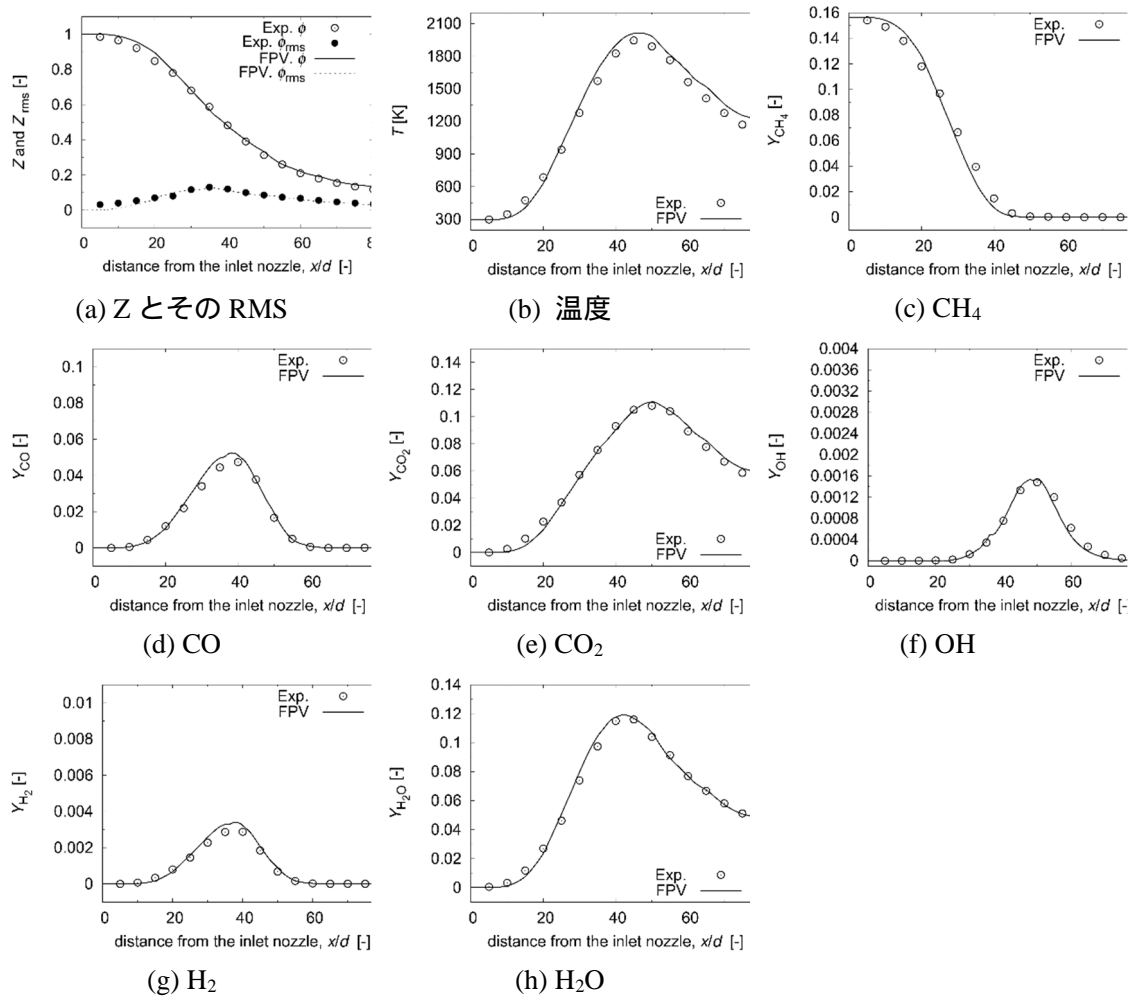


Figure 3 Variable distributions on the center-axis⁷⁾

< 引用文献 >

- 1) C. Pierce and P. Moin, Progress-variable approach for large-eddy simulation of non-premixed turbulent combustion, *Journal of Fluid Mechanics*, 504, 73–97 (2004)
- 2) J. Oijen and L. Goey, Modelling of Premixed Laminar Flames using Flamelet-Generated Manifolds, *Combustion Science and Technology*, 161 113–137 (2000)
- 3) 藤井昭宏ら, 領域分割による並列 AMG アルゴリズム, *情報処理学会論文誌コンピューティングシステム (ACS)*, 44, SIG06(ACS1), 9–17 (2003)
- 4) C. Sung et al., Structural response of counterflow diffusion flames to strain rate variations, *Combustion and Flame*, 102, 481–492 (1995)
- 5) Y. Matsushita et al., Evaluation of the Flamelet/Progress-Variable Approach and Flamelet-Generated Manifolds Method in Laminar Counter-Flow Diffusion Flame, *Journal of the Japan Institute of Energy*, 100, 83–91 (2021)
- 6) L. M. Verhoeven et al., Modeling non-premixed laminar co-flow flames using flamelet-generated manifolds, *Combustion and Flame*, **159**, 230–241 (2012)
- 7) 赤尾津ら, Flamelet approach に基づくガス燃料を対象とした燃焼シミュレーション, *SENAC*, 52(3), 1–7 (2019)
- 8) C. Pierce and P. Moin, Method for generating equilibrium swirling inflow conditions, *AIAA Journal*, 36(7), 1325–1327 (1998)
- 9) M. Klein, A digital filter based generation of inflow data for spatially developing direct numerical or large eddy simulations, *Journal of Computational Physics*, 186(2), 652–665 (2003)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Ishimoda Kengo, Akaotsu Shota, Saito Yasuhiro, Matsushita Yohsuke, Aoki Hideyuki	4. 巻 52
2. 論文標題 Numerical Simulation of Single Coal Char Particle Combustion with the Overall Gas-Phase Reaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN	6. 最初と最後の頁 616 ~ 624
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1252/jcej.18we012	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 -
1. 著者名 赤尾津翔大、松下洋介、青木秀之、Weeratunge Malalasekera	4. 巻 52
2. 論文標題 Flamelet approachに基づくガス燃料を対象とした燃焼シミュレーション	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 SENAC	6. 最初と最後の頁 1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 該当する
1. 著者名 Akaotsu Shota, Ozawa Ryoma, Matsushita Yohsuke, Aoki Hideyuki, Malalasekera Weeratunge	4. 巻 199
2. 論文標題 Effects of infinitely fast chemistry on combustion behavior of coaxial diffusion flame predicted by large eddy simulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fuel Processing Technology	6. 最初と最後の頁 106226 ~ 106226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fuproc.2019.106226	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 -
1. 著者名 Akaotsu Shota, Matsushita Yohsuke, Aoki Hideyuki, Malalasekera Weeratunge	4. 巻 31
2. 論文標題 Analysis of flame structure using detailed chemistry and applicability of flamelet/progress variable model in the laminar counter-flow diffusion flames of pulverized coals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Powder Technology	6. 最初と最後の頁 1302 ~ 1322
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.appt.2019.12.019	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 該当する

1. 著者名 Yokoi Satoki, Matsukawa Yoshiya, Saito Yasuhiro, Matsushita Yohsuke, Aoki Hideyuki, Malalasekera Weeratunge	4. 巻 51
2. 論文標題 A Modified Boundary Condition of Velocity for Continuity Equation with Non-uniform Density Distribution at Outlet Boundary Plane	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN	6. 最初と最後の頁 641 ~ 645
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1252/jcej.17we178	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 該当する

1. 著者名 横井 智記、齋藤 泰洋、松下 洋介、青木 秀之、Weeratunge MALALASEKERA	4. 巻 61
2. 論文標題 Flamelet approachにおいて用いるデータベースの作成方法に関するレビュー	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本燃焼学会誌	6. 最初と最後の頁 66 ~ 75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20619/jcombsj.61.195_66	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 該当する

1. 著者名 AKAOTSU Shota, ISHIMODA Kengo, SAITO Yasuhiro, MATSUSHITA Yohsuke, AOKI Hideyuki	4. 巻 98
2. 論文標題 Extending Semi-parallel Reaction Model of Pulverized Coal Particle to Various Coal Types	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Institute of Energy	6. 最初と最後の頁 35 ~ 43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3775/jie.98.35	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 Matsushita Yohsuke, Malalasekera Weeratunge, Akaotsu Shota, Matsukawa Yoshiya, Aoki Hideyuki	4. 巻 53
2. 論文標題 Accurate Numerical Integration of -PDF for the Flamelet Approach	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN	6. 最初と最後の頁 494 ~ 497
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1252/jcej.20we078	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 該当する

1. 著者名 Akaotsu Shota, Matsushita Yohsuke, Aoki Hideyuki, Malalasekera Weeratunge	4. 巻 31
2. 論文標題 Application of flamelet/progress-variable approach to the large eddy simulation of a turbulent jet flame of pulverized coals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Powder Technology	6. 最初と最後の頁 4253 ~ 4274
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.appt.2020.09.005	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 該当する

1. 著者名 Matsushita Yohsuke, Ozawa Ryoma, Akaotsu Shota, Matsukawa Yoshiya, Saito Yasuhiro, Aoki Hideyuki, Malalasekera Weeratunge	4. 巻 100
2. 論文標題 Evaluation of the Flamelet/Progress-Variable Approach and Flamelet-Generated Manifolds Method in Laminar Counter-Flow Diffusion Flame	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Institute of Energy	6. 最初と最後の頁 83 ~ 91
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 該当する

[学会発表] 計18件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 宮本潤, 赤尾津翔大, 松下洋介, 青木秀之, Weeratunge Malalasekera
2. 発表標題 多環芳香族炭化水素(PAHs)の生成過程に対するFlamelet/Progress-Variableモデルの適用
3. 学会等名 第21回先端研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮本潤, 赤尾津翔大, 松下洋介, 青木秀之, Weeratunge Malalasekera
2. 発表標題 Flamelet approachを用いた多環芳香族炭化水素(PAHs)の生成過程に関する数値解析的検討
3. 学会等名 第28回日本エネルギー学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shota Akaotsu, Ryoma Ozawa, Yohsuke Matsushita, Hideyuki Aoki, Weeratunge Malalasekera
2. 発表標題 Large eddy simulation of piloted methane/air jet flame using flamelet based tabulated chemistry
3. 学会等名 18th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress, APCCHE 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松下洋介
2. 発表標題 微粉炭燃焼のモデリングと実用シミュレーションへの応用
3. 学会等名 日本エネルギー学会東北支部令和元年度講演会・見学会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 赤尾津翔大, 松下洋介, 青木秀之, Weeratunge Malalasekera
2. 発表標題 Flamelet/progress-variableモデルを用いた微粉炭ジェットバーナーのLarge eddy simulation
3. 学会等名 化学工学会熱工学部会セミナー2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Miyamoto, S. Akaotsu, Y. Matsushita, H. Aoki, W. Malalasekera
2. 発表標題 Prediction of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Formation using Flamelet Approach with Additional Transport Equations
3. 学会等名 16th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 赤尾津翔大, 松下洋介, 青木秀之, Weeratunge Malalasekera
2. 発表標題 Flamelet/progress-variableモデルを用いた微粉炭の層流対向流拡散火炎の数値シミュレーション
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 小澤龍磨, 赤尾津翔大, 横井智記, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之, Weeratunge Malalasekera
2. 発表標題 対向流拡散火炎におけるFPVモデルおよびFGMモデルの比較
3. 学会等名 第18回日本伝熱学会東北支部学生発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小澤龍磨, 赤尾津翔大, 横井智記, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之, Weeratunge Malalasekera
2. 発表標題 異なる Flamelet approach を用いた層流火炎の燃焼特性に関する数値解析的検討
3. 学会等名 第55回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Akaotsu, K. Ishimoda, Y. Saito, Y. Matsushita, H. Aoki
2. 発表標題 EVALUATION OF APPLICABILITY OF SEMI-PARALLEL REACTION MODEL FOR PULVERIZED COAL PARTICLE TO VARIOUS COAL TYPES
3. 学会等名 37th International Symposium on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松下洋介
2. 発表標題 炭化水素熱分解へのTabulated chemistryの適用とCFDへの実装
3. 学会等名 第67回CVD研究会「第29回夏季セミナー」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 赤尾津翔大, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之
2. 発表標題 Large Eddy Simulationを用いた同軸噴流場におけるスカラの輸送特性の検討
3. 学会等名 化学工学会第50回秋季大会(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Ishimoda, S. Akaotsu, Y. Saito, Y. Matsushita, H. Aoki
2. 発表標題 Numerical Simulation for Combustion of a Single Coal Char Particle with Detailed Gas-phase Chemistry
3. 学会等名 15th International Conference on Flow Dynamics
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林優志, 菅野新, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之
2. 発表標題 ナフサを原料とした熱分解におけるtabulated chemistryの適用性
3. 学会等名 第56回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石母田健悟, 赤尾津翔大, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之
2. 発表標題 微粉炭チャー粒子近傍における均一反応を考慮したチャーの反応モデルの構築
3. 学会等名 第56回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 赤尾津翔大, 小澤龍磨, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之, Weeratunge Malalasekera
2. 発表標題 同軸流拡散火炎のLarge Eddy Simulation -FPVモデルとEBUモデルの比較-
3. 学会等名 第56回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiromu Miyamoto, Shota Akaotsu, Yoshiya Matsukawa, Yohsuke Matsushita, Hideyuki Aoki, Weeratunge Malalasekera
2. 発表標題 APPLICABILITY OF PROGRESS VARIABLE INCLUDING ACETYLENE FOR PREDICTING PAHS FORMATION IN ETHYLENE/AIR COUNTER-FLOW DIFFUSION FLAME
3. 学会等名 38th International Symposium on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松下洋介
2. 発表標題 Tabulated chemistryを活用した反応を伴う熱流体解析
3. 学会等名 化学工学会 粒子・流体プロセス部会 熱物質流体工学セミナー2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究内容 https://www.che.tohoku.ac.jp/~tranpo/gallery/

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
研究分担者	青木 秀之 (Aoki Hideyuki) (40241533)	東北大学・工学研究科・教授 (11301)	
研究分担者	齋藤 泰洋 (Saito Yasuhiro) (50621033)	九州工業大学・大学院工学研究院・准教授 (17104)	

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			
英国	Loughborough University			