

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390128

研究課題名(和文)大規模詳細反応機構に基づく高効率反応性熱流体シミュレーション技術の確立

研究課題名(英文)An efficient methodology for combustion flow simulations with large detailed chemical kinetics

研究代表者

寺島 洋史(石原洋史)(Terashima, Hiroshi)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：20415235

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：大規模詳細反応機構を用いた反応性流体シミュレーションを効率的に行う解析手法を提案した。提案手法は、硬直性の強い化学反応方程式に対する高速陽的時間積分法と多成分流体輸送係数に対する化学種バンドル法から構成されている。それぞれの手法は、従来法に対し、解の精度を大きく損ねることなく、2桁から3桁の高速化を可能とした。提案手法は、自動車ノッキング現象、高圧ロケットエンジン燃焼現象、予混合火炎不安定性現象と、幅広い燃焼現象に適用され、新しい知見の創出に貢献した。

研究成果の概要(英文)：An efficient methodology for simulations of reactive flows (CFD) with large detailed chemical kinetics has been successfully proposed. The present method consists of a fast explicit time integration method for stiff chemical reaction equations and a species bundling technique for efficient calculations of transport properties of mixture. The present method, in particular, the fast explicit time integration method, provides much faster performance with the order of two or three when compared to a conventional approach, enabling an efficient application of large detailed chemical kinetics in CFD simulations. The method has been successfully applied to a wide range of combustion problems such as knocking phenomena of n-heptane (373 chemical species and 1071 reactions) in internal combustion engines, providing the detailed mechanism of strong pressure wave generation and development associated with end-gas autoignition.

研究分野：反応性流体力学

キーワード：反応性流体 燃焼 詳細化学反応 流体シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

炭化水素燃料による燃焼の高効率化やクリーン化は、再生可能エネルギーの促進と共に、持続可能な低炭素エネルギー社会を目指す上で非常に重要かつ緊急を要する課題である。また、実用炭化水素燃料の化学成分は多様化する傾向にあり、バイオ燃料やシェールガスなど従来の化石燃料以外の燃料が使われるようになってきている。これらを背景に、多様化する燃料や化学成分かつ様々な燃焼形態に対する高効率・クリーンな燃焼を実現する技術開発が望まれている。

これまで、高効率・クリーンな燃焼を実現する技術として、内燃機関では、スワールやタンブルといった流体混合に基づく燃焼制御が行われてきたが、その適用には既に限界が来ている。すなわち、極限的な条件下、例えば、超希薄条件下での着火タイミング制御などは、流体制御のみでは達成できず、流体と同時に化学反応現象の理解に基づく燃焼制御が必要不可欠である。

近年、実用燃料を模擬する化学反応機構の研究が精力的に実施されており、詳細反応機構を自動的に生成することが可能になってきた。このような詳細反応機構の適用により、着火タイミングの予測など有用な情報を得ることが可能となる。一方で、このような詳細反応機構を流体解析と同時に扱うことは容易でない。これは、詳細反応機構が、結果として数百数千の化学種と数千数万の素反応から構成されることに起因し（ヘプタンで400化学種程度、混合燃料の場合10,000化学種程度になることもある）、大きく2つの問題が存在する。

問題の1つ目は、化学反応方程式の硬直性である。考慮する化学種の増加は、幅広い時間スケールを発生させるため、詳細反応機構に基づく化学反応方程式は、その硬直性が非常に強くなる。そのため、流体と反応を同時に解く際、使用できる時間刻み幅が極めて小さくなる問題が発生する。2つ目は、大規模詳細反応機構では、考慮すべき化学種数の移流拡散方程式を解く必要があり、計算負荷が増大することである。同時に輸送係数評価の計算負荷も莫大に増加する問題が発生する。

これらの問題を解決するため、個々の問題に対して様々な方法が提案され、世界中で活発に研究が進められているが、実用炭化水素系燃料のような大規模詳細反応機構を効率的に流体解析に組み込む方法論は確立していない。そのため、実用燃料を用いた燃焼解析を行う際には大幅な簡易化が必要となり、結果として得られる情報は非常に限定的であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、大規模詳細反応機構に基づいた反応性熱流体シミュレーションを高効

率に実現するための高速・高効率解析手法を提案、確立することにある。上記したそれぞれの問題に対して、有効となる手法の研究開発を行う。具体的には、強い硬直性を持つ化学反応方程式に対する高速時間積分法、多成分流体輸送係数計算の高速化手法、の研究開発を通して、大規模詳細反応機構を用いた反応性熱流体シミュレーションの高効率な実施を可能とする。

3. 研究の方法

大規模詳細反応機構を用いた反応性流体シミュレーションにおいて、従来用いられてきた陰解法（例えば、VODE）では、約90%以上の計算時間が、化学反応方程式の計算に占有される。そのため、まず、計算高速化において、最も重要となる化学反応方程式の高速化に関する研究を実施した。一方で、化学反応方程式の高速化が可能となった場合、次に大きな問題となるのが多成分流体輸送係数の計算である。これは、化学種数 N に対して、一般的な輸送係数モデルでは、計算時間が N^2 に比例するためである（相互係数計算のため）。この問題を解決するため、化学種バンドル法に着目し、その性能や妥当性検証を実施した。最終的に、高速時間積分法と化学種バンドル法を組み合わせることで、解の精度を損なうことなく、反応性流体シミュレーションの高速化を試みる。

4. 研究成果

本研究では、大規模詳細反応機構を用いた反応性流体解析を効率良く実施するため、化学反応方程式に対して、高速陽的時間積分法[雑誌論文1, 3, 6]を、多成分輸送係数計算に対して、化学種バンドル法を組み合わせた独自の数値解析手法を提案した。この数値解析手法は、自動車エンジンノック現象[雑誌論文2, 6]、高圧メタンロケット燃焼現象[学会発表11, 21]、水素予混合火炎不安定性現象[雑誌論文4]、など幅広い問題に適用され、新たな知見を得ることに成功した。

4.1 高速時間積分法の提案

上記したように、大規模詳細反応機構を用いた反応性流体解析では、化学反応方程式の計算時間が約90%以上を占めることが知られてきた。主な原因は、従来から使用されてきた陰解法VODEの計算時間によるもの（流体解析と連成させる際の初期化の必要性、ヤコビ行列計算など）で、より高速な時間積分法が必要とされてきた。陽解法は、その代替候補であるが、これまで提案されてきた手法は、堅牢性という点で問題があり、その適用範囲が大きく制限されていた。そこで、陽解法をベースとして、新たな時間積分法の構築を試みた。まず、過去に提案されたマルチタイムスケール(MTS)法に着目した。MTS法は、

VODE に比べて、一桁程度の高速化が可能であるが、堅牢性に問題があった。そこで、我々は、新たに準定常仮定 (QSSA) の考えを導入することで、より堅牢な時間積分法 (MTSQ) の提案を行った[雑誌論文 1]。MTSQ により、従来の MTS 法では困難であった高圧や純酸素燃焼条件においても堅牢に計算することが可能となった。一方で、これら MTS の考えに基づく方法では、各時間ステップで化学種のグループ化が必要であり、劇的な高速化が困難であった (500 化学種で、20 倍程度に留まる)。

以上の問題や他の陽解法を踏まえ、本研究によって新たに構築した方法が、Extended Robust Explicit Numerical Algorithm (ERENA) 法である。ERENA 法は、ラグランジュ未定乗数法に基づき、以下の定式化から成る。

$$\sum_{i=1}^N \frac{(y_i^{n+1} - y_i^*)^2}{2y_i^*} + \lambda \left(\sum_{i=1}^N y_i^{n+1} - 1 \right) = \varepsilon$$

この方程式は、何らかの時間積分法によって予測された質量分率 y_i^* と質量保存を満足する質量分率 y_i^{n+1} との最小化を実現することを意味している。N は化学種数、 λ はラグランジュ未定乗数、 ε は、 λ と y_i^{n+1} の任意関数である。最終的に、上式の最適解として、質量分率は、以下のように得られる。

$$y_i^{n+1} = \frac{y_i^*}{\sum_{i=1}^N y_i^*}$$

この表式は、得られた予測解を再スケール化する形式と見ることができる。質量保存則にある閾値を設定し、質量分率がそれを満足するまで反復を繰り返す。また、予測解 y_i^* を得るためには、いずれの時間積分法を適用することが可能であるが、本法では、堅牢な QSSA による積分式を採用している。ここで、QSSA による積分自体は、線形化のため、保存則を満たさないことに注意する。更なる詳細や閾値の設定などは、提案論文[雑誌論文 3]を参照いただきたい。

ERENA 法の高速度や精度を検証するため、既存の方法との比較を行った。既存の方法として、よく使用される陰解法 VODE を参照解として用いた。また、陽解法として、MTS 法 (MTSQ 法はほぼ同じ結果となるため示さない) に加え、QSSA に基づく CHEMEQ2 法を比較対象とした。比較検証は、0 次元定容容器着火問題によって行った。詳細反応機構は、自動生成ソフト KUCRS によって行った。以下の結果は、全て当量比 1.0 で得られたものである。以下の結果で用いた時間刻み幅は、1.e-8 秒である。

図 1 に、ヘプタン酸素 (373 化学種、1071 反応；初期圧力 0.1 MPa、温度 1100 K) による温度の時間変化分布を示す。ここでは、参照解 VODE と ERENA の比較を行った。ERENA の結果は、参照解と非常に良く一致していることがわかる。自着火時の急激な変化もよくとらえている。他の条件 (圧力 1.0

MPa など) でも同じような一致を得ている。

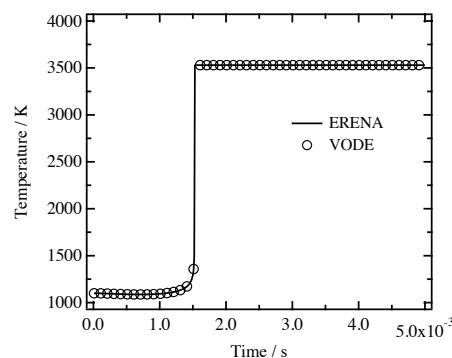


図 1 VODE と ERENA による温度時間履歴の比較 (ヘプタン酸素予混合気)

図 2 は、計算時間について、参照解 VODE と他の陽解法の比較を行ったものである。縦軸の値は、参照解 VODE で必要とした計算時間 t_{VODE} と他の陽解法で要した時間 t_* の比 t_*/t_{VODE} を表している。ヘプタンに加え、メタン (68 化学種、334 反応)、ブタン (113 化学種、426 反応)、デカン (839 化学種、2126 反応) 燃焼問題を加えて比較を行った。公平な比較を行うため、計算した物理時間は、5.e-3 秒で統一した。VODE では、流体計算との連成を考慮し、初期化という操作を意図的に入れていることに注意いただきたい。

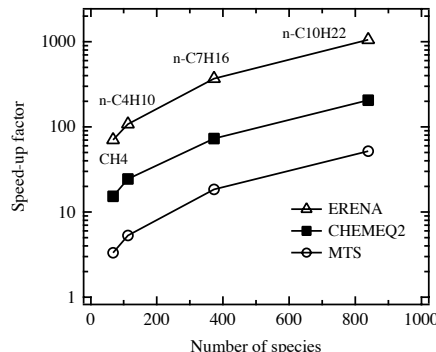


図 2 各時間積分法と参照解 VODE との計算時間比較

図 2 により、ERENA により劇的な高速化が可能であることがわかる。参照解 VODE に対しては、2 桁から 3 桁の高速化が可能であり、ブタンで 70 倍、ヘプタンの場合、400 倍弱の高速化を実現している。大きな反応機構となるデカンの場合には、1,000 倍近い高速化となる。他の陽解法 CHEMEQ2 や MTS 法に対しても、1 桁から 2 桁の高速性を示していることがわかる。MTS 法は、陽解法の中では最も低速であるが、これは、化学種グループ化の操作が各時間ステップで行われるためである。

ERENA の高速性を調べるため、図 3 に、各時間ステップに要した計算時間履歴を示す。ERENA は、自着火が生じている時間帯

(2.6e-3 秒付近) 以外において、非常に短時間で計算を行っていることがわかる。これが ERENA の高速性をもたらすものである。一方、自着火時には、急激な温度変化のもと、質量保存を満足させるため、反復が多くなり、計算時間も急激に増加している様子もわかる。VODE や MTS 法は、各時間ステップで実施される初期化等のオーバーヘッドが存在するため、計算時間の増加につながる。CHEMEQ2 と ERENA は QSSA を使っているという点で同じアルゴリズムとなるが、EREANA が質量保存という大局的な量で収束を行っている点で、違いが生じていると考えられる。ここには示さないが、着火遅れ時間や層流燃焼速度の評価によって、EREANA が、参照実験値をよく再現していることも確認している。

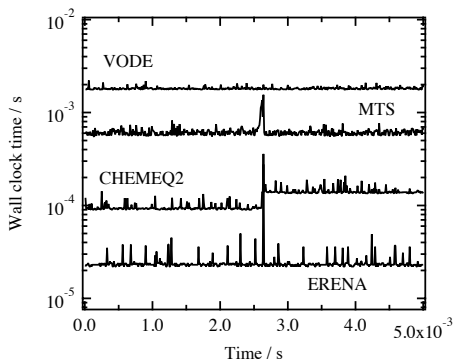


図3 時間ステップ毎の計算時間の履歴

4. 2 多成分流体輸送係数の効率的計算法：化学種バンドル法

化学反応方程式の解法に VODE など用いた場合には、常に化学反応方程式の計算時間が全計算時間のほとんどを占有する。一方で、上記したような高速時間積分法で反応方程式を計算すると、流体輸送係数の計算時間占有率が大幅に増加するようになる。ブタンを用いたある燃焼問題を例にすると、VODE では化学反応方程式の計算が全体計算時間の約 95% を占めていたが、EREANA で計算を行うと、約 23% まで減少することがわかっている。一方で占有率を大きくするのが、流体輸送係数の計算時間となり、約 68% を占めることになる。これは、化学種数 N に対して、一般的な輸送係数モデルでは、計算時間が N^2 に比例するためである。つまり、高速時間積分法を使用することを前提にすると、大きな反応機構ほど、流体輸送係数計算の効率化が有効であることを示唆する。

そこで本研究では、拡散係数モデルに対して、化学種バンドル法を適用して、流体輸送計算の高速化を試みた（粘性係数と熱伝導率は、化学種数 N に比例するモデル式を用いる）。化学種バンドル法は、化学種 i と化学種 j で定義されるバイナリ拡散係数 D_{ij} を用い、類似した拡散係数を持つ化学種同士をグループ化

するものである。グループ化された場合、グループ内の代表化学種のみを対象とした拡散係数計算へと集約できるため、計算時間の短縮が可能となる。以下の式に従い、グループ化の判断を行う。

$$\epsilon_{ij} = \max_{\substack{k=1,N \\ T_{\min} < T < T_{\max}}} \left| \ln \frac{D_{i,k}}{D_{j,k}} \right| < \epsilon$$

ここで、温度 T は、対象となる燃焼場の最小 T_{\min} と最大温度 T_{\max} を予測し、事前に与えることになる。 ϵ は、ユーザーが指定する閾値（許容エラー値）である。

図4に、化学種バンドル法による計算速度結果を示す。メタン、ブタン、そしてヘプタンを用いた。いずれの反応機構においても、閾値の増加と共に、少ないグループ数でまとまるため、計算速度が上昇する。

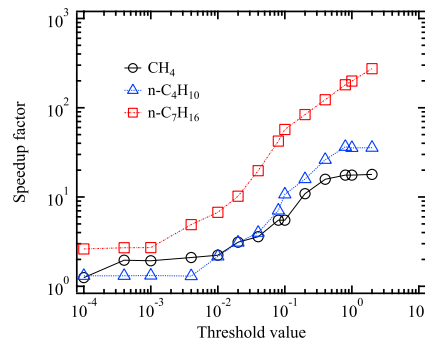


図4 化学種バンドル法による高速化

例えば、精度として問題が無いことを確認している閾値 0.1 の場合、ヘプタン（373 化学種）で、21 グループが生成され、約 57 倍の高速化が実現できる。大きな炭化水素ほど、異性体が増加するため、同じ閾値でもグループ化される割合は大きい。バンドル法は、条件指定のもと、前処理として行われるため、確実な高速化が期待できる。

図5に、層流燃焼速度（1 次元層流火炎計算）を用いて、化学種バンドル法の検証を行った結果を示す。異なる 2 つの閾値の結果は、いずれもバンドル無しの結果（これは実験値と良く一致する）と良く一致しており、バンドル法の妥当性が確認できる。

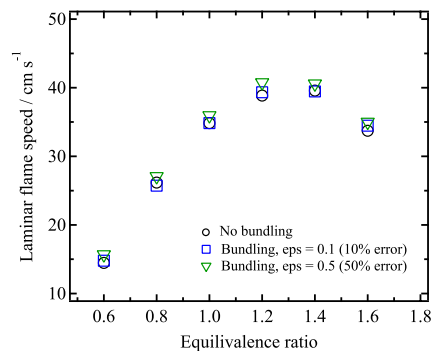


図5 バンドル法の層流燃焼速度への影響

4. 3 ERENA/化学種バンドル法

化学種バンドル法と ERENA の併用により、例えば、ノッキング解析[雑誌論文 3]では、ブタンの場合、従来法（陰解法 VODE とバンドル無し）に比べ、約 30 倍（ERENA で約 15 倍；バンドル法で約 2 倍）、ヘプタンの場合、約 75 倍（ERENA で約 15 倍；バンドル法で約 5 倍）の高速化が実現されている。つまり、本解析手法の採用により、ヘプタンの場合、従来約 2 ヶ月半かかっていた計算が、解の精度を損なうことなく、約 1 日で達成できることを意味する。

本解析手法は、詳細反応機構を適用する利点を活かし、様々な燃焼問題に適用され、新たな知見を得ることに成功している。エンジンノッキング現象の解析では、末端ガス自着火に起因する圧力波発達過程のメカニズムを明らかにすることができた[雑誌論文 3]。ロケットエンジンを対象とした高圧メタン酸素燃焼解析では、噴射器ポスト背後の燃焼場を対象として、噴射条件に応じて、どのように燃焼場が遷移していくかを明らかにした[学会発表 11, 21]。水素空気予混合気中を伝播する火炎不安定性の解析では、火炎近傍で発生する化学反応構造を明らかにしている[雑誌論文 4]。

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 7 件）

1. H. Terashima, Y. Morii and M. Koshi, A robust multi-time scale method for stiff combustion chemistry, *International Journal of and Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 14(3), 177-196 (2015).
[10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.2015011226](https://doi.org/10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.2015011226)
2. H. Terashima and M. Koshi, Mechanisms of strong pressure wave generation in end-gas autoignition during knocking combustion, *Combustion and Flame*, 162, 1944-1956 (2015).
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2014.12.013>
3. Y. Morii, H. Terashima, M. Koshi, T. Shimizu and E. Shima, ERENA: a fast and robust Jacobian-free integration method for ordinary differential equations of chemical kinetics, *Journal of Computational Physics*, 322, 547-558 (2016).
<https://doi.org/10.1016/j.jcp.2016.06.022>
4. A. Matsugi and H. Terashima, Diffusive-thermal effect on local chemical structures in premixed hydrogen-air flames, *Combustion and Flame*, 179, 238-241 (2017).
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.02.013>

5. H. Terashima and M. Koshi, Numerical simulations of mixing under supercritical pressures of a shear coaxial injector using a high-order method: effect of outer jet temperature, *Progress in Propulsion Physics*, 8, 25-42 (2016).
<https://doi.org/10.1051/eucass/201608025>
6. 寺島洋史, ノッキング現象における末端ガス非一様自着火と圧力波発生機構, 日本燃焼学会誌, 特集 不安定な燃焼, 第 57 巻 181 号, 206-213 (2015).
<http://ci.nii.ac.jp/naid/40020563353>
7. 森井雄飛, 寺島洋史, 詳細化学反応機構を用いた反応性流体解析における高効率解析手法, ガスタービン学会誌, 特集: 燃焼現象, 44(2), 96-101 (2016).
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110010050758>

[学会発表]（計 23 件）

1. Y. Morii, H. Terashima, M. Koshi, T. Shimizu, E. Shima, Fast and robust time integration method for stiff chemical kinetic ODEs, AIAA Propulsion and Energy Forum, AIAA Paper 2014-3920, 2014.7.28-30, Cleveland, OH, USA.
2. H. Terashima, Y. Morii and M. Koshi, "A robust multi-time scale method for stiff combustion chemistry," *Proceedings of 10th international symposium on special topics in chemical propulsion (10-ISICP)*, Paper #091 (2014), Poitiers, France.
3. H. Terashima, Y. Morii and M. Koshi, Strategy for efficiently simulating reactive flows with large detailed chemical kinetics, *2015 SIAM Conference on Computational Science and Engineering*, 2015, Salt Lake, UT, USA.
4. Y. Morii, H. Terashima, M. Koshi, T. Shimizu, E. Shima, Simple yet fast integration method using QSS for stiff chemical kinetic ODEs, *2015 SIAM Conference on Computational Science and Engineering*, 2015, Salt Lake, UT, USA.
5. H. Terashima, M. Koshi, Mechanisms of strong pressure wave generations during knocking combustion: compressible reactive flow simulations with detailed chemical kinetics, American Physical Society 67th Annual DFD Meeting, 2014, San Francisco, CA, USA.
6. H. Terashima and M. Koshi, Influence of equivalence ratio on the mechanism of pressure wave generation during knocking combustion, APS 68th annual DFD meeting, 2015.11.22-24, Boston, MA, USA.
7. H. Terashima and M. Koshi, Investigations on pressure wave generation and chemical kinetics during end-gas autoignition on knocking combustion, *15th International Conference on Numerical Combustion*,

- 2015.4.19-22, Avignon, France.
8. Y. Morii, H. Terashima, M. Koshi, T. Shimizu, E. Shima, Simple and fast time integration method for stiff chemical kinetic ODEs, *15th International Conference on Numerical Combustion*, 2015.4.19-22, Avignon, France.
 9. H. Terashima and M. Koshi, Effects of negative temperature behavior on pressure wave generations during knocking combustion, *Frontiers in Computational Physics: Energy Sciences*, 2015.6.3-5, Zurich, Switzerland.
 10. H. Tani, Y. Umemura, Y. Daimon, H. Terashima and M. Koshi, Interface-Tracking Simulations of Droplet Vaporization and Burning of Hypergolic Propellants AIAA-2016-1685, AIAA SciTech, 2016.1.4-8, San Diego, CA, USA.
 11. H. Terashima and Y. Daimon, Generations of unstable combustion in a non-premixed GCH₄/GOX rocket injector, AIAA2016-4894, 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2016.7.25-27, Salt Lake, UT, USA.
 12. H. Terashima, An Efficient Methodology for Combustion Flow Simulations with Detailed Chemical Kinetic Mechanisms, International Seminar on the Development and Application of Chemical Kinetics Models for Combustion, 2016.7.19, 日本橋ライフサイエンスビルディング (東京都中央区).
 13. H. Terashima, A. Matsugi, Origins of a hot spot for inhomogeneous end-gas autoignition in a knocking simulation, 16th International Conference on Numerical Combustion (NC17), 2017.4.3-5, Orlando, FL, USA.
 14. 寺島洋史, 森井雄飛, 越光男, 大規模詳細反応機構の適用を可能とする高効率反応性流体解析手法の提案, 第46回流体力学講演会/第32回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 弘前文化センター (青森県弘前市), 2014年7月3日~4日.
 15. 寺島洋史, 越光男, ノック現象における末端ガス圧力波発生メカニズムについて, 第52回燃焼シンポジウム, 岡山コンベンションセンター (岡山県岡山市), 2014年12月3日~5日.
 16. 寺島洋史, 詳細反応と流体を一体化する高効率解析モデルと手法の構築 -ノッキング現象の解明を目指して-, 第25回内燃機関シンポジウム, 先端技術フォーラム, 産業技術総合研究所 (茨城県つくば市), 2014年11月26日~28日.
 17. 寺島洋史, ノック現象における末端ガス自着火・圧力波強度の当量比依存性, 第53回燃焼シンポジウム, つくば国際会議場 (茨城県つくば市), 2015年11月16日~18日.
 18. 寺島洋史, 大門優, メタン酸素同軸型噴射器における拡散火炎燃焼場の不安定化メカニズム, 第29回数値流体力学シンポジウム, 九州大学筑紫キャンパス (福岡県春日市), 2015年12月15日~17日.
 19. 森井雄飛, 寺島洋史, 清水太郎, 青野淳也, 爆燃・爆轟伝播現象に対する ATF/詳細反応機構を用いたモデリング, 第53回燃焼シンポジウム, つくば国際会議場 (茨城県つくば市), 2015年11月18日.
 20. 寺島洋史, 詳細化学反応とCFD:高速計算手法の提案と燃焼流への適用例, 日本機械学会研究分科会 RC-D15, 東京理科大学神楽坂キャンパス (東京都新宿区), 2016年2月17日.
 21. 寺島洋史, 大門優, 高圧メタン酸素ロケット噴射器近傍の非定常燃焼流れ場構造:詳細反応機構を用いたCFD解析, 日本機械学会熱工学コンファレンス2016, 2016年10月22日, 愛媛大学城北キャンパス (愛媛県松山市).
 22. 寺島洋史, 松木亮, ノック現象におけるホットスポットの源について, 第54回燃焼シンポジウム, 2016年11月23日~25日, 仙台国際センター (宮城県仙台市).
 23. 佐藤伴音, 寺島洋史, 大島伸行, 着火遅れ時間特性と末端ガス自着火・圧力波強度の関係:容器圧力条件を変化させたノッキング解析, 第54回燃焼シンポジウム, 2016年11月23日~25日, 仙台国際センター (宮城県仙台市).
- [図書] (計 0件)
[産業財産権]
○出願状況 (計 0件)
○取得状況 (計 0件)
- [その他]
ホームページ等
6. 研究組織
(1)研究代表者
寺島 洋史 (TERASHIMA, Hiroshi)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 20415235
- (2)研究分担者 無
- (3)連携研究者
越 光男 (KOSHI, Mitsuo)
横浜国立大学・環境情報研究科・非常勤教員
研究者番号: 20133085
- 森井 雄飛 (MORII, Youhi)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員
研究者番号: 50707198
- (4)研究協力者 無