

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760174

研究課題名(和文)低温酸化反応を伴う着火核伝ばの単純化と火炎伝ば形態の理論体系の新展開

研究課題名(英文) Simplification of ignition kernel propagation with low-temperature oxidation and investigation on new regime of flame propagation

研究代表者

中村 寿 (NAKAMURA, Hisashi)

東北大学・流体科学研究所・助教

研究者番号：40444020

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：ガソリン基準燃料であるノルマルヘプタンとイソオクタンを燃料とし、高圧下の温度勾配を有する系における着火核の伝ばを高速度カメラで撮影した。イソオクタンの場合、火炎が上流の低温域に伝播するにつれて、単調に火炎位置の移動速度が減少した。ノルマルヘプタンの場合、火炎が上流の低温域に伝播している途中で、火炎位置の移動速度が急激に増減した。数値計算の結果、着火核の上流側に低温酸化反応に起因する熱発生が観察された。これらのことから、ノルマルヘプタンの場合における火炎位置の移動速度の急激な変化は低温酸化反応に起因する再着火が起きたと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Ignition kernel propagation in the system with a temperature gradient at high pressures was recorded by a high-speed camera for n-heptane and iso-octane, which are primary reference fuels of gasoline. In the iso-octane case, as a flame propagated to the upstream (low-temperature region), the propagation speed monotonically decreased. In the n-heptane case, on the other hand, on the way of the ignition kernel propagation, the propagation speed showed rapid increase and decrease. In the numerical simulation, small heat release in the upstream of the ignition kernel due to the low-temperature oxidation was observed. Therefore, the rapid variation of the propagation speed in the n-heptane case would be due to re-ignition by the low-temperature oxidation.

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：燃焼 着火 冷炎 低温酸化反応 火炎伝ば

1. 研究開始当初の背景

次世代内燃機関として研究・開発が進められている HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) エンジンには、燃料と酸化剤の予混合気を圧縮着火させることで高い熱効率と低 NOx・低すす排出を両立させるが、急峻な燃焼過程の制御が難しく、運転条件が狭いという欠点がある。予混合気に温度勾配を形成すると運転条件を拡大できることが知られており[1]、このとき着火核の伝ばと、着火に先立つ低温酸化反応が発生する。すなわち、低温酸化反応を伴う着火核の伝ばが形成されるが、これはエンジン内のいたるところで発生するため、基礎的特性を調べることは難しく、伝ばメカニズムについてほとんど何もわかっていない。本研究では申請者らが独自に開発した温度分布制御マイクロフローリアクタ(以下、マイクロリアクタ)[2][3][4]を改良して単純化された系を実現し、低温酸化反応を伴う着火核の伝ばメカニズムの解明を目的とする。

マイクロリアクタでは、消炎直径(多くの炭化水素燃料で 2.5 mm 程度)以下の細い石英管に外部熱源で壁面温度勾配を形成し、予混合気を流入させる。管径が小さく石英管の熱容量が予混合気に比べて十分に大きいため、流入予混合気は温度は所与の壁面温度分布に強く拘束されながら上昇する。ここで管内入口平均流速を 5~30cm/s にすると、着火と消炎を周期的に繰り返す非定常火炎 FREI (Flames with Repetitive Extinction and Ignition) が観察された。流入予混合気は高温の下流側で着火し、着火核が上流に向かって伝ばする。低温の上流側では熱損失の増大により消炎が起こり、次の流入予混合気は下流側で着火する。このサイクルを高速に繰り返す。

これまでにマイクロリアクタを用いた研究で、着火核の分岐を見出した。また、極低流速条件では FREI ではなく定在微弱火炎が形成され、低温酸化反応が観察された[2][3]。大気圧下の実験では FREI に低温酸化反応は観察されなかったが、低温酸化反応は圧力上昇に伴い強くなることから、マイクロリアクタで高圧下の FREI を詳細に調べることで、低温酸化反応を伴う着火核の伝ばメカニズムを解明できると期待される。

2. 研究の目的

本研究では、既存のマイクロリアクタを改良することで高圧条件下における FREI を実現し、低温酸化反応を伴う着火核の伝ばについて以下のことを実験および数値計算により調べる。

- ・高速度カメラで低温酸化反応と着火核からの化学発光を撮影し、両者の動態およびどのように相互干渉するかを調べる。
- ・着火核の伝ば速度および低温酸化反応と着火の開始温度を計測し、これらが圧力の上昇に伴いどのように変化するかを調べる。

- ・実用炭化水素燃料の基準成分であるノルマルヘプタンとイソオクタンを燃料に用いる。低温酸化反応を形成しやすいノルマルヘプタンと低温酸化反応を形成しにくいイソオクタンを用いることで、低温酸化反応の有無が着火核の伝ばに及ぼす影響を調べる。

3. 研究の方法

マイクロリアクタの概略図を図 1 に示す。内径 1 mm、外径 3 mm の石英管をリアクタとして用いた。水素/空気予混合平面火炎を外部熱源として用い、373 K から 1300 K に上昇する壁面温度分布をリアクタ内壁に与えた。気化した燃料と空気の予混合気を流入させ、管内に形成される FREI を高速度カメラで観察した。燃料には n-heptane と iso-octane の二種類を用いた。事前に燃料/窒素予混合気を 373 K に温調した容器に封入し、高温マスフローコントローラにより流量制御した。燃料/窒素予混合気流に常温マスフローコントローラで流量制御した酸素を混合し、当量比(ϕ)1 の燃料/空気予混合気を形成した。リアクタ出口に背圧調整弁を設置し、FREI の圧力応答を観察した。このとき、大気圧条件で管入口平均流速(U)が 25cm/s の流量条件を維持しながら圧力を上昇させた。

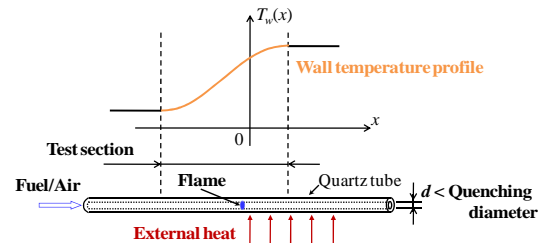


図 1 マイクロリアクタの概略図

マイクロリアクタの系を模擬した数値計算も実施した。数値計算は CHEMKIN-II の一次元平面火炎計算コード PREMIX に壁面との熱伝達項を付与して実施した。壁面温度分布には計測結果を用いた。また、非定常数値計算が実施できるように、計算コードを修正した。反応機構には LLNL の簡略化 n-heptane 反応モデルを用いた。ただし、既存の数値計算コードは n-heptane のように規模の大きい反応機構を用いた非定常数値計算を実施することが現実的に不可能であるため、並列化と最適化を実施した。

4. 研究成果

(1) 計算コードの非定常化と並列化

既存の PREMIX コードで非定常計算ができるように修正し、大規模反応機構が利用できるように並列化および最適化を実施した。修正したコードを用いて、メタンの FREI を対象に検証を行った。

図 2 に熱発生速度ピーク位置の x-t ダイア

グラム、図3に熱発生速度ピーク値とピーク位置の関係を示す。いずれの図も FREI の一サイクルをプロットしてある。前サイクルの FREI の未燃側と既燃側の界面に小さい熱発生速度ピークが形成されており、これが P0 として表わされている。P0 の上流側に新しい熱発生速度のピークが形成されており (P1), このときを $t=0$ と定義した。P1 の位置は時間経過とともに下流に移動し、P1 のピーク値は急速に増加し、着火に至っている。このとき、着火核が分岐し、新たな熱発生速度のピーク (P2) が現れた。この着火核の分岐は過去の実験においても観察された[4]。P2 は下流に向かって移動し、最終的には系外に流出した。P1 の位置は急速に上流に向かって移動し、 $t=25.2\text{ms}$ を境にゆっくりと下流に向かって移動している。このとき、P1 のピーク値は急速に低下し、消炎に至っている。消炎時も分岐が発生し、新たな熱発生速度ピーク (P3 と P4) が観察された。時間経過とともに P4 の位置は下流側にゆっくり移動し、次サイクルの P0 として表記される。

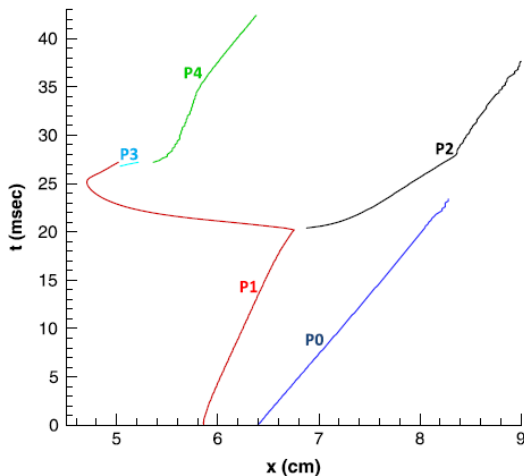


図2 熱発生速度ピーク位置の x-t ダイアグラム

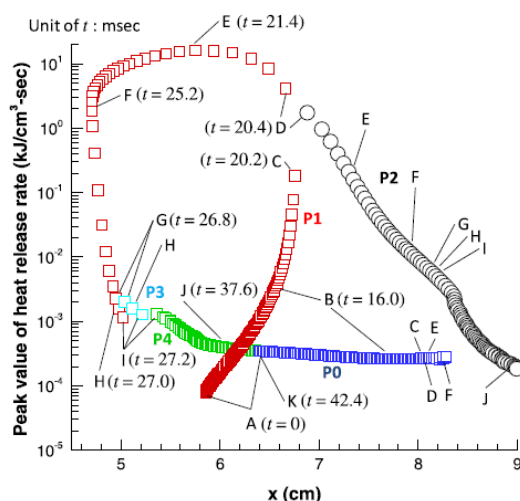


図3 熱発生速度ピーク値とピーク位置の関係 (200 μs 間隔でプロット)

改良した計算コードで FREI の特徴を良く再現することができた。

(2) 実験結果

n-heptane と iso-octane を燃料とし、5 気圧で FREI を高速度カメラで撮影した。得られた火炎画像から、火炎位置と火炎位置の移動速度を取得し、両者の関係を図4にまとめた。iso-octane の場合に最初に火炎が観察された点を $x=0$ とし、そこから火炎位置が上流に向かって移動するときの火炎位置の移動速度をプロットしている。現在の撮影系で火炎が明確に判別できる範囲をプロットしているため、図4の右端と左端がそれぞれ着火と消炎の位置を示すわけではない。

iso-octane の場合、火炎位置が低温側に移動するにつれて、火炎位置の移動速度は単調に減少している。一方、n-heptane の場合、iso-octane の場合よりも早く火炎位置の移動速度が一旦減少し、急増加・減少した後、iso-octane の場合と同様に単調減少している。

大気圧における実験では、両燃料について火炎位置とその移動速度の関係に有意な差は見られなかった。極低流速域における weak flame を対象とした別の研究で、5 気圧で iso-octane では冷炎が観察されず、n-heptane では冷炎が観察された[5]。これらのことから、図4の n-heptane の場合における急激な火炎移動速度の変化は、低温酸化反応による熱発生で再着火しているためと考えられる。

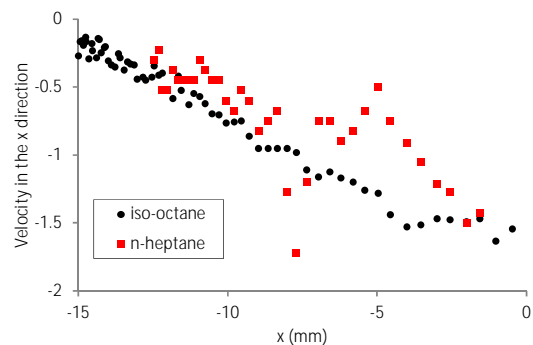


図4 火炎位置とその移動速度の関係

(3) 数値計算結果

図5に n-heptane の FREI の数値計算結果から、伝播時の気相温度分布を示している。 $x=5\text{cm}$ に急峻な温度上昇が観察され、これが急速に上流に向かって移動している。一方、 $x=4.5\text{cm}$ に小さな温度上昇が観察される。反応解析の結果、これは低温酸化反応に起因する温度上昇であることが分かった。主の反応帯がこの領域に到達することで再着火が起こるため、実験で観察されたような火炎移動速度の急激な変化が観察されたと推察される。一方、iso-octane は本研究の条件においては低温酸化反応を示さないため、図5に示

されるような低温酸化反応由来の温度上昇は確認されなかった。

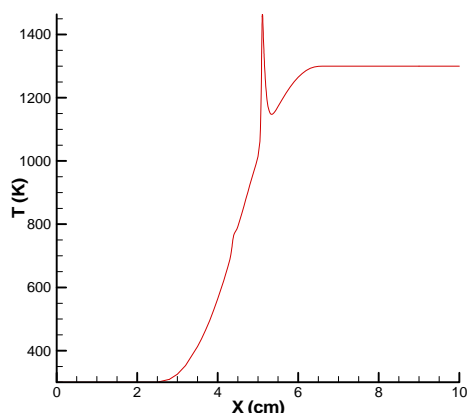


図5 火炎伝播時の温度分布

参考文献

- [1] M. Yao, Z. Zheng, H. Liu, "Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines," *Progress in Energy and Combustion Science* 35 (2009) 398-437.
- [2] Akira Yamamoto, Hiroshi Oshibe, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Kaoru Maruta, "Stabilized three-stage oxidation of gaseous n-heptane/air mixture in a micro flow reactor with a controlled temperature profile," *Proceedings of the Combustion Institute* 33 (2011) 3259-3266.
- [3] Hiroshi Oshibe, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa and Kaoru Maruta, "Stabilized three-stage oxidation of DME/air mixture in a micro flow reactor with a controlled temperature profile," *Combustion and Flame* 157(8) (2010), 1572-1580.
- [4] A. Fan, S. S. Minaev, E. V. Sereshchenko, Y. Tsuboi, H. Oshibe, H. Nakamura and K. Maruta, "Dynamic Behavior of Splitting Flames in a Heated Channel", *Combustion, Explosion, and Shock Waves* 45(3) (2009) 245-250.
- [5] Mikito Hori, Akira Yamamoto, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa and Kaoru Maruta "Study on octane number dependence of PRF/air weak flames at 1-5 atm in a micro flow reactor with a controlled temperature profile" *Combustion and Flame* 159(3)

(2012) 959-967.

5. 主な発表論文等 (研究代表者には下線)

[雑誌論文](計 1件)

Hisashi Nakamura, Aiwu Fan, Sergey Minaev, Evgeniy Sereshchenko, Roman Fursenko, Yosuke Tsuboi, Kaoru Maruta, "Bifurcations and negative propagation speeds of methane/air premixed flames with repetitive extinction and ignition in a heated microchannel" *Combustion and Flame*, 査読有, Vol. 159, Issue 4, (2012), 1631-1643, DOI: 10.1016/j.combustflame.2011.11.004

6. 研究組織

(1)研究代表者

中村 寿 (NAKAMURA, Hisashi)
東北大学・流体科学研究所・助教
研究者番号：40444020