

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17981

研究課題名(和文) レシプロエンジン燃焼過程ビューアの開発

研究課題名(英文) Development of a Viewer for Combustion Process in Reciprocating Engine

研究代表者

上道 茜 (Uemichi, Akane)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教

研究者番号：10734155

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではレシプロエンジン内で生じる着火燃焼現象を捉える方法として、マイクロフローリアクタ(MFR)を取り上げ、着火遅れ時間を簡便に推定する手法を検討した。具体的には、「Livengood-Wu積分」を用いて着火位置情報と着火遅れ時間とを結びつける推定手法を提案した。燃料にノッキングを評価する際の標準燃料であるノルマルヘプタンとイソオクタンとの混合燃料を用いた実験を行った。これらの実験の結果、MFRでは非常に希薄な予混合気でも着火画像を得ることができ、他の数値計算や実験では得ることが難しい、スーパーリーンバーン条件での着火遅れ時間の見積りが可能になるのではないかと示唆された。

研究成果の概要(英文)：In this study, we focused on a microflow reactor (MFR) as a method to capture the ignition phenomenon occurring in a reciprocating engine and examined a method to easily estimate the ignition delay time. Specifically, we proposed an estimation method that combines ignition position information and ignition delay time using "Livengood - Wu integral." We conducted experiments using a mixed fuel of normal heptane and iso-octane, which is a standard fuel for evaluating knocking in engine. As a result of these experiments, it is possible to obtain an ignition photograph even with very lean premixture in MFR, that is difficult to obtain in other numerical calculations and experiments. This leads that it is possible to estimate the ignition delay time under the super lean burn condition.

研究分野：エネルギーシステムモデリング

キーワード：燃焼 着火遅れ時間 マイクロフローリアクタ Livengood-Wu積分

1. 研究開始当初の背景

ガソリンエンジン、ディーゼルエンジンおよびガスエンジンといったレシプロエンジンは、乗用車をはじめ、船舶や発電など広範囲にわたる用途に用いられる熱機関である。熱効率向上や低環境負荷の観点から、これらのエンジンにおける着火から火炎伝播に至る燃焼過程について詳細に理解することは、エンジン制御を行う上で欠かせない。特に、排ガスに含まれるNOxや粒子状物質は燃焼過程の影響を大きく受けるため、低環境負荷を実現するためには、着火や火炎の状態を把握する必要がある。

レシプロエンジン筒内の燃焼現象は非常に複雑かつ高速であるため、現象の理解が難しい。しかしながら、これらの現象は非常に複雑かつ高速な現象であるため、実エンジンを用いた実験計測にはコストがかかり、数値計算は時間を要するため、これまでのエンジン燃焼過程の研究においては、着火、火炎伝播などの燃焼現象をいくつかの段階に分けた研究が行われてきた。例えば、着火現象の理解のために急速圧縮機や衝撃波管が用いられているが、これらの実験設備は大がかりであるだけでなく、着目した現象のみを再現するものであるため、エンジン燃焼過程すべてを再現したことはない。

2. 研究の目的

エンジン筒内でクランク角とともに進む、非定常な燃焼現象を管軸方向の空間分布に置き換えることができる「レシプロエンジン燃焼過程ビューア」の開発を行うことを最終的な研究の目的とする。エンジン内の着火から乱流火炎伝播に至る過程を一次元空間に置き換えて観察することができ、エンジン制御ユニットへも実装可能な範囲の燃焼モデルを提供することができるフレームワークとして機能する。また、本ビューアを用いてレシプロエンジンの燃焼過程についての直感的理解を促すことが挙げられる。

そのために、本研究計画では、着火遅れ特性を簡便に把握するため、マイクロフローリアクタ (以下、MFR) 中に形成される火炎の着火位置情報と着火遅れ時間との関係を結びつけ、着火遅れ時間を推定する手法を提案する。

3. 研究の方法

本研究では、ある燃料の着火位置情報を得るために MFR を用いる。MFR は東北大学・丸田教授らのグループによって開発された実験装置であり、各種燃料の化学反応モデルの妥当性検証に用いられている。図 1 に本研究で用いた MFR 実験装置の概略図を示す。この装置は平面水素バーナーを石英細管の下方に設置し、管軸方向に温度分布を与え、予混合気が着火温度に達することで自己着火を発生させる。この着火火炎画像をカメラで撮影し、予め計測した石英管内の軸方向温度分布 (図

2) を参照して予混合気が着火に至るまでに経験した熱を知ることができる。

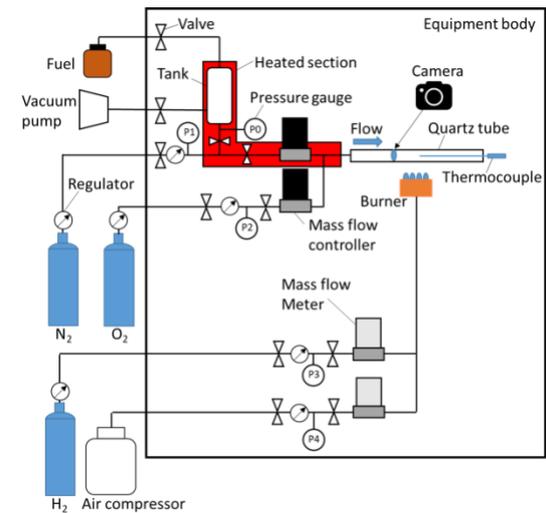


図 1 実験装置の概略図 (液体燃料を用いる場合)。

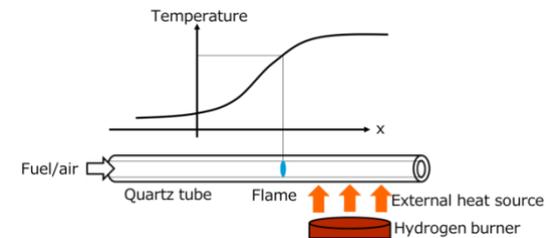


図 2 石英管軸方向温度分布。

4. 研究成果

主要な成果として、本研究で構築した着火遅れ時間の簡便な推定手法および標準燃料を用いた推定結果を中心に述べる。

(1) 着火遅れ時間の簡便な推定手法の構築

本研究では、着火遅れ時間を簡便に推定するため、エンジン内の着火遅れ時間を算出するための経験式として知られる「Livengood-Wu 積分 (以下、LW 積分)」を用いた。LW 積分は、時間に関する積分であるが、先述のとおり、MFR から取得可能な火炎の情報、石英管内における温度分布に対する位置情報である。そこで、石英管内を流れる気体の流速を用いて、LW 積分での時間を位置に変換し、MFR によって得られた実験結果から着火遅れ時間を推定する手法を考案した。

考案した推定手法を以下に簡単に述べる。

- ① アレニウス型で表された着火遅れ時間 $\tau = A_{\phi} \exp(E_a/RT)$ を LW 積分 $\int_0^{t_{ign}} (1/\tau) dt = 1$ に代入する。LW 積分は自己着火時期 t_{ign} と時間積分の関係で表される。

$$\int_0^{t_{ign}} \frac{1}{A_{\phi}} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) dt = 1$$

ここで、 A_{ϕ} は定数、 E_a は活性化エネルギー、 R は気体定数である。

- ② 石英管中の予混合気流速 v を用いて時間 t を位置 x に変換する. LW 積分は着火位置 x_{ign} と空間積分の関係で表される.

$$\int_0^{x_{ign}} \frac{1}{A_\phi} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \left(\frac{dx}{v}\right) = 1$$

- ③ 流速 v を変化させた実験結果から, 未知の定数 A_ϕ および活性化エネルギー E_a を求める.

(2) 推定に用いる着火画像の検討

考案した手法に対して, 用いる着火画像を用いるかを検討した.

MFR では, 燃料と予混合気流速によって, 火炎の強い発光を伴う Normal flame (図 3(a)) と微弱な発光を伴う Weak flame (図 3(b)) の火炎画像を取得することができる.

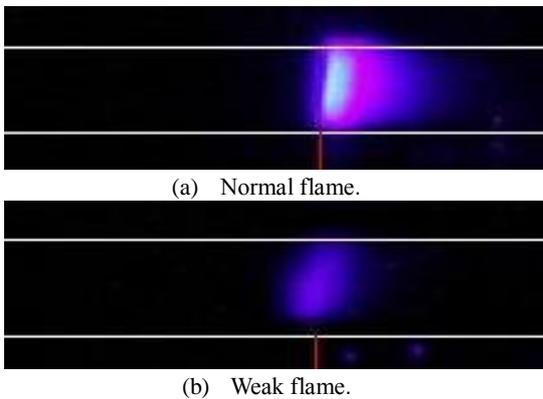


図 3 MFR で得られる火炎画像の違い.

まず, メタン, プロパン, ブタンを燃料として, Normal flame および Weak flame の定在火炎を用いて推定を行った. Normal flame は約 50 cm/s 以上の高流速領域, Weak flame は約 2~5 cm/s の低流速領域で形成される.

Normal flame の形成過程は, 観察によれば, より高温の下流で自着火後, 自身の発熱により上流に伝播して定在火炎となることがわかった. したがって, Normal flame の定在火炎は着火現象ではなく, 着火後十分に時間の経過した伝播火炎に相当すると考えられる. 一方, Weak flame は着火した位置で定在するため, 着火現象に相当する火炎であると考えられるが, Weak flame が得られるのは低流速領域であるため, 得られる着火位置がほとんど変化せず, 推定に用いるには不適切であると判断した.

そこで, Normal flame の着火の瞬間を含む長時間露光写真を用いることにした. これは, 着火から定在火炎に至るまでを長時間露光撮影したもので, 下流側の着火位置を推定に用いることとした. 燃料にメタンを用いて実験を行い, 後述する画像処理により最下流位置を定めた.

(3) 着火画像の処理方法

着火画像は, 炭化水素系燃料が燃焼する際に発生する中間生成物である CH ラジカルの主な発光スペクトルの 430 nm を中心波長に

持つナローバンドパスフィルターを通して撮影した.

撮影した画像は, 石英管や塵の発光の影響を除外するため, 火炎画像からそれらを減算し, 火炎のみの画像を取得する. これをグレースケール処理し, 下流側の輝度が一定値以上をとる位置を着火位置と定義した. なお, 先述した長時間露光で撮影した着火画像から着火位置を求めるにあたっては, 着火後,十分に時間経過した定在火炎画像も撮影して用いた. これは, 定在火炎画像の輝度値を着火位置を定義する際の閾値として用いるためである.

(4) 標準燃料の着火遅れ時間推定

実際のエンジンのノッキングを評価する際に用いられる, 標準燃料を用いた実験を行った. 本研究では, ノルマルヘプタン 10vol.% とイソオクタン 90vol.% の混合燃料を用いた. これは RON (リサーチオクタン価) 90 に相当する. これは, 日本で販売されているレギュラーガソリンとハイオクガソリンのちょうど中間の耐ノッキング特性を有する燃料であるといえる.

この混合燃料は, 液体燃料であり, 図 1 に示す装置のタンクで気化させたものを空気を模擬した酸化剤と混合させ, 石英管に流入させた.

図 4 に, 当量比 0.6 のとき, 実験で得られた着火位置画像と事前に計測した石英管軸方向温度分布の例を示す. 同じ流速に対して, 長時間露光撮影による着火画像 (上) および着火後,十分に時間経過した定在火炎画像 (下) を得た. 図より, 流速が大きくなるほど着火および定在火炎の形成位置は下流になることがわかる.

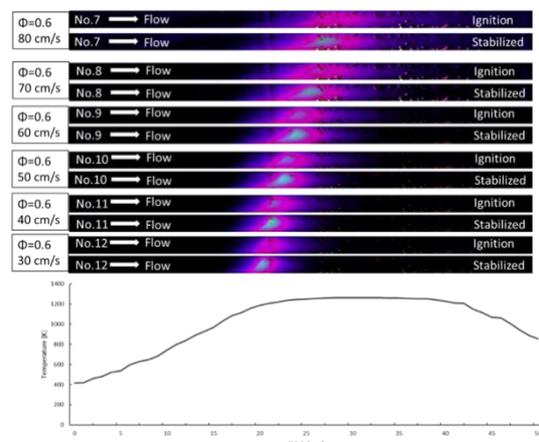


図 4 当量比 0.6 における着火位置画像 (上図) および事前に計測した石英管内温度 (下図).

図 4 のように取得された着火画像を処理し, 図 5 に示したような着火位置を得ることができる. 座標は石英管の上流から下流にかけてを正方向としている. 図より, 化学量論比 (つ

まり、当量比 1) に近づくほど上流側で着火していることがわかる。これは、着火遅れ時間が短くなることを意味しており、定性的には他の研究から得られた結果と一致する。

特に、MFR 実験では、当量比 0.1~0.3 という非常に希薄な予混合気を用いても比較的安定して着火画像を得ることができた。このような希薄条件では、通常、実験だけではなく数値計算の解を得ることも難しい。

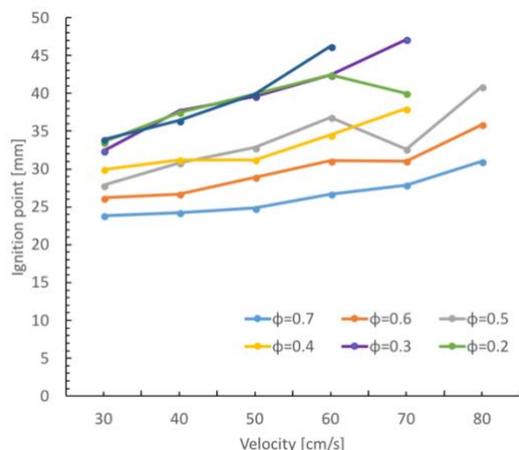


図5 マイクロフローリアクタで得られた標準燃料の着火位置.

得られた着火位置情報から、先述した方法で、LW 積分を用いて着火遅れ時間を求めた。なお、実験で得られた着火現象は、石英管内の温度が十分に高いため、高温酸化反応に相当すると考えられる。

図6および図7に着火遅れ時間の推定結果を示す。図より、本研究で提案した手法を用いて、着火遅れ時間の推定ができた。

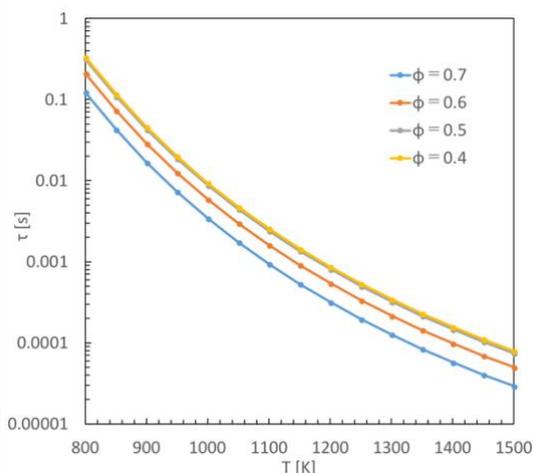


図6 標準燃料の着火遅れ時間の推定結果.

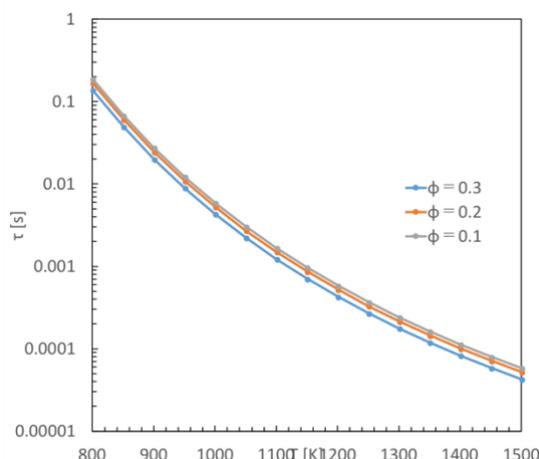


図7 標準燃料の着火遅れ時間の推定結果 (希薄条件).

(1) まとめ

MFR では、標準燃料の高温酸化反応相当の着火画像が得られ、LW 積分を用いて着火遅れ時間の推定をすることができた。非常に希薄な予混合気でも着火画像を得ることができ、他の数値計算や実験では得ることが難しい、スーパーリーンバーン条件での着火遅れ時間の見積りが可能になるのではないかとということが示唆された。

ただし、MFR 中で形成される火炎は、他の実験あるいは数値計算で得られるものとは形成メカニズムが異なるため、これらを比較することは不適當であることを述べておく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者は下線)

[学会発表] (計4件)

- ① 林卓哉, 上道茜, 山崎由大, 金子成彦, マイクロフローリアクターによる排気再循環を伴う予混合気の自己着火特性の把握, 日本機械学会年次大会 2015.
- ② 上道茜, 山崎由大, 金子成彦, 旋回流中で形成される超過濃火炎, 第53回燃焼シンポジウム, 2015.
- ③ 福田豊, 上道茜, 山崎由大, 金子成彦, マイクロフローリアクターを用いた予混合気着火遅れ時間の推定, 日本機械学会年次大会 2016, 2016年.
- ④ 福田豊, 竹島康貴, 上道茜, 山崎由大, 金子成彦, マイクロフローリアクターを用いた予混合気着火遅れ時間の予測方の検討, 第54回燃焼シンポジウム, 2016年.

6. 研究組織

(1)研究代表者

上道 茜 (UEMICHI, Akane)

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号: 10734155