

氏名 (本籍)	NUR SAIFULLAH BIN KAMARRUDIN (マレーシア)
学位の種類	博士 (工学)
学位授与番号	甲第483号
学位授与日付	平成27年9月30日
専攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	Non-intrusive measurement of temperature distribution in the engine cylinder and its effect on knocking phenomena (エンジン筒内温度分布の非接触計測とノッキング現象に与える影響)
学位論文審査委員	(主査) 板谷義紀 (副査) 高橋周平, 小林信介, 小宮山正治

### 論文内容の要旨

自動車用エンジンにおいては、近年、一層の環境負荷低減が求められており、既存のエンジンの高効率化・クリーン化と同時に、新しい燃焼方式を採用した技術ニーズも高まっている。このような要求の中で、均質予混合圧縮自着火(Homogeneous Charge Compression Ignition: HCCI)燃焼を利用したエンジンサイクルが注目されている。ガソリンエンジンは、ガソリン-空気予混合気を火花点火させるが、分子レベルで燃料と空気が混合しているため均質な予混合燃焼が生じ、3元触媒による排ガス処理を行うことで、排ガス中の環境汚染物質を非常に低いレベルとすることができる。一方で、圧縮中の異常燃焼を避けるため、エンジンの圧縮比を高くすることができず、熱効率は低い値となる。ディーゼルエンジンでは、圧縮により高温となった空気中に、高沸点燃料を噴霧状に噴射する。このため、圧縮比が高く設定でき熱効率は高いが、燃焼過程は燃料液滴と周囲空気との間に生じる非予混合燃焼となり、燃料希薄領域と燃料過濃領域が混在するため、窒素酸化物(NOx)とすすの同時低減が大きな問題となる。このような既存のサイクルに対して、HCCI燃焼サイクルではガソリン-空気の希薄予混合気を高圧縮比条件で自着火させる。高圧縮比が実現できるため熱効率が高く、また希薄予混合気を利用するため燃焼温度が低くNOx生成量が低減できると同時に、すすなどの未燃炭化成分も少なくなるというメリットがある。しかしながら、HCCI燃焼においては圧縮自着火による燃焼開始であるため、点火タイミングの制御が難しく、また高負荷運転時にはノッキングが発生することが課題となっている。このようなHCCI燃焼における着火現象およびノッキング挙動の解明には、燃料-空気予混合気の反応初期における温度分布の詳細な計測が重要である。

そこで本研究では、エンジン筒内の温度分布を計測する手段として、CO<sub>2</sub>を媒質としたふく射法による温度計測法を新たに確立し、エンジン内燃焼を模擬する急速圧縮機(Rapid Compression Machine: RCM)を用いて、新たに開発された温度計測法の検証を行っている。また、高負荷燃焼時のノッキング強度低減の手法として用いられる、予混合気中に濃度勾配を与える方法に対して、その効果を同計測法を用いて検証し、予混合気内に形成される温度分布とノッキング強度の関係について考察している。本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) CO<sub>2</sub>を媒質としたふく射法をRCM内の予混合気温度計測に適用したところ、圧縮後の代表的な筒内ガス温度である700Kに対して、±10K程度の変化を計測することに成功し、たとえばピストンの圧縮によって生じるRoll up vortexによるリング状の温度分布、また当量比の異なる予混合気の比熱比の違いによる、圧縮端温度の違いをとらえることが可能であることを示した。
- (2) 高速度赤外センサーと組み合わせて計測することで、約3600Hzのサンプリングレートでシリンダー内の自着火過程における温度分布の時間履歴をとらえることに成功した。均質希薄予混合気の圧縮自着火現象に対して本計測法を適用したところ、温度分布情報を平均化して得られた平均温度の時間履歴は、筒内圧力センサーから推算される平均温度とよく一致した。また、高温酸化反応による熱炎が発生する前段階の、低温酸化反応に伴う100K程度の温度上昇を精度良く計測できることを示した。
- (3) 濃度勾配を与えた希薄予混合気の圧縮自着火現象においては、均質予混合気に比べてノッキング強度が低下することがわかった。この時の温度分布の時間変化を調べると、低温酸化反応による冷炎は常に圧縮端温度がより高温となる希薄側領域から開始することが明らかになった。また、冷炎が進行すると、圧縮直後にもともと形成されていた温度差が増大し、その後の熱炎発生に大きな影響を及ぼす。熱炎は、濃度勾配が小さい場合には、冷炎同様に希薄側領域から発生するが、濃度勾配が大きい場合は、反対に当量比の高い領域から発生することを明らかにした。これは、局所当量比と局所温度によって決まる点火遅れ時間によって説明され、これらの現象は数値計算によっても確認した。
- (4) 温度勾配を付与した条件においても、熱炎が筒内中央部から発生する場合は、ノッキング強度の低減

効果が小さいことがわかった。このため、ノッキング対策として濃度勾配を付与する場合には、冷炎発生後の温度分布に注意を払う必要があることを示した。

### 論文審査結果の要旨

本論文は、エンジン筒内の圧縮自着火過程における温度分布を高精度・高空間・高時間分解能で計測する手法を開発し、濃度分布を有する希薄予混合気の HCCI 燃焼において、濃度勾配の大きさとノッキング強度の関係を解明しようとするものである。エンジン筒内の温度計測は、時間変化が速いため接触式では応答性が不十分であることや、その後の熱炎による焼損、または希薄燃焼であるため計測プローブによる消炎などの多くの課題があり、これまで満足な結果が得られていなかった。また、温度分布を計測するためには、プローブを用いる 1 点計測ではほとんど不可能であったが、本論文では高速度赤外センサーと CO<sub>2</sub> を媒質としたふく射温度計測法を組み合わせることにより、非常に高い時間空間分解能を有する温度計測法の開発に成功している。本手法では、冷炎が進行する低温酸化反応ではほとんど CO<sub>2</sub> が生成されないことを利用して、あらかじめ既知量の CO<sub>2</sub> をドーピングして計測に利用している。また、CO<sub>2</sub> からのふく射エネルギーを理論モデルからあらかじめ計算して、各条件における巨大スペクトルデータベースを構築し、これを用いて温度の算出を行っている。計測結果は、圧縮端温度が予想しやすい均質場の条件を用いて、圧力センサーからの推算値と比較検討している。また、濃度勾配を有する予混合気に対して本手法を適用し、温度分布の詳細な時間変化とノッキング強度との関係について明らかにしている。このような、エンジン筒内の高分解能温度計測と、温度分布とノッキング強度の相関関係に関する知見は、本研究において初めて得られたものであり、HCCI 燃焼における着火時期制御およびノッキング制御に大いに貢献するものと考えられる。このように、本論文は有用な知見を数多く見出し、新規性、有用性の点で優れていると評価できることから、学位審査委員会は、審査の結果、この論文を学位論文に値するもの判定した。

### 最終試験結果の要旨

学位審査委員会は、提出論文の基礎となる発表論文（査読付き論文 2 編）の内容を確認し、平成 27 年 7 月 23 日に開催された学位論文公聴会における論文提出者との質疑応答と口頭試問などに基づいて審査を行い、最終試験に合格と判定した。

---

発表論文（論文名、著者、掲載誌名、巻号、ページ）

発表論文（学位論文に直接関係するもの）

- 1) Temperature Distribution Measurement during Low Temperature Reaction in Auto-ignition Process, KAMARRUDIN, Nur Saifullah, TAKAHASHI, Shuhei, IHARA, Tadayoshi, Journal of the Combustion Society of Japan, Vol. 57, No.179, pp. 82-89, (2015)
- 2) Behavior of Temperature Profile during Low Temperature Oxidation of Auto-ignition Process with Fuel Concentration Gradient, KAMARRUDIN, Nur Saifullah, TAKAHASHI, Shuhei, IHARA, Tadayoshi, Journal of the Combustion Society of Japan, Vol. 57, No. 180, pp. 134-141, (2015)

参考論文

- 1) Correlation between Cool Flame Profile and Temperature Distribution in a Cylinder with Hydrocarbon Fuel, TANAKA, Shogo, KAMARRUDIN, Nur Saifullah, TAKAHASHI, Shuhei, IHARA, Tadayoshi, 第 50 回燃焼シンポジウム講演論文集, pp. 366-367, 2012.
- 2) Measurement of Temperature Profile during Ignition Delay in the Cylinder with Fuel Concentration Gradient, KAMARRUDIN, Nur Saifullah, TANAKA, Shogo, TAKAHASHI, Shuhei, IHARA, Tadayoshi, Proc. 9<sup>th</sup> ASPACC, pp. 121-124, 2013.
- 3) Behavior of Temperature Profile during Low Temperature Oxidation with Fuel Concentration Gradient, KAMARRUDIN, Nur Saifullah, TANAKA, Shogo, TAKAHASHI, Shuhei, IHARA, Tadayoshi, 第 24 回内燃シンポジウム講演論文集, 20130707, 2013.
- 4) Behavior of Cool Flame and Hot Flame in the Charge with Fuel Concentration Gradient during Compression Ignition Process, KAMARRUDIN, Nur Saifullah, TAKAHASHI, Shuhei, IHARA, Tadayoshi, 第 52 回燃焼シンポジウム講演論文集, pp. 38-39, 2014.
- 5) 高オクタン価異種燃料成層吸気による HCCI 燃焼時のノック挙動, 大矢武明, KAMARRUDIN, Nur Saifullah, 高橋周平, 井原禎貴, 第 52 回燃焼シンポジウム講演論文集, pp. 530-531, 2014.