

## 光学計測及び反応数値解析による予混合圧縮着火 (HCCI) 燃焼メカニズムの研究

### Study of Homogeneous Charge Compression Ignition Combustion Mechanisms by using Optical Measurements and Chemical Kinetic Analysis

○飯島晃良<sup>1</sup>\*Akira Iijima<sup>1</sup>

Using an optically accessible engine, we visualized Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) combustion and conducted spectroscopic analyses of light emission and absorption behavior. In addition, we analyzed the HCCI combustion process at the elementary reaction level by means of chemical kinetic simulations. The results of analyses of the light emission and absorption spectra in the combustion chamber revealed the characteristics of low-temperature oxidation reactions and the autoignited flame. Moreover, we also made clear the effects on HCCI combustion of the fuel composition, exhaust gas recirculation and supercharging and clarified the mechanisms involved. Furthermore, an analysis of images of the entire combustion chamber obtained with a high-speed imaging system revealed the conditions for the occurrence of strong pressure oscillations in the combustion chamber and their characteristics.

#### 1. まえがき

地球環境問題等を背景に、高効率・低炭素なエネルギー変換が求められている。発電、輸送等、大量のエネルギー変換を行う機器においては、その殆どを燃焼に依存している。この本質的な理由は、エネルギー変換を「大量に・高速応答で・安く」行えるのが「燃焼」であるためだと考えられる。

輸送によるエネルギー変換においては、その殆どを内燃機関（ガソリン機関、ディーゼル機関）が担っているが、上記の理由により、今後も自動車用動力源の主力は内燃機関であると考えられる。世界的に見れば、新興国を中心に自動車の普及台数が増加を続けると考えられる。つまり、世界全体での内燃機関搭載車の総数は、今後更に増加すると言える。

以上の背景から、内燃機関の徹底的な高熱効率化・低炭素化・クリーン化が急務である。それが実現できる理想的な燃焼形態の一つとして、予混合圧縮着火 (HCCI: Homogeneous Charge Compression Ignition) 燃焼が注目されている<sup>[1]</sup>。基本的には、圧縮比（圧縮前容積/圧縮後容積）及び作動ガスの比熱比を向上（希薄燃焼など）させることが、内燃機関の高効率化に重要である。図 1 に、ガソリン機関（火花点火 [SI] 機関）、ディーゼル機関、HCCI 機関の燃焼形態を模式的に示す。SI 機関は、予混合気（燃料と空気の混合）に火花点火で局所的にエネルギーを与え、火炎伝播燃焼を行う。ノッキングなどの異常燃焼が発生するため、圧縮比を高くできない。また、伝播火炎の安定性及び排ガス後処理（三元触媒）による窒素酸化物 (NOx) 浄化効率の確保のために、希薄

燃焼を行うのが困難である。ディーゼル機関は、高温高圧の圧縮空気中に軽油等の燃料を噴射し、自着火させ、拡散燃焼させる。高圧縮比かつ燃焼室内全体では希薄燃焼であるため、高い熱効率を実現できる。しかし、拡散燃焼による局所的に不均一（温度や燃料濃度）な燃焼が不可避のため、燃料過濃部から粒子状物質 (PM)、高温部から NOx が生成され、その同時低減が困難である。HCCI は、希薄な予混合気を高い圧縮比で自着火で燃焼させる。そのため、高い熱効率が期待できると同時に、均一な希薄低温燃焼により NOx と PM の排出量をゼロレベルにすることが可能である。

HCCI は、予混合気をピストン圧縮で自着火させるため、着火時期の制御が困難である。また、着火後の燃焼状態も、不完全燃焼や急激な燃焼を避けた「適正な」燃焼である必要がある。特に、高級炭化水素燃料を用いるため、低温酸化反応などと呼ばれる複雑で非線形性が強い反応素過程が着火現象を支配している。そのため、当該機関の実用化のためには、HCCI 機関の反応や燃焼メカニズムの解明が必要である。

著者らは、実機を用いた燃焼実験、燃焼室内の可視化や分光測定、反応の数値解析を用いて、HCCI 燃焼メカニズムを研究してきた。本稿ではその概要を述べる。

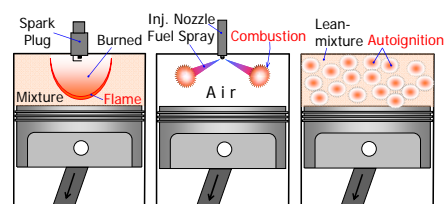


Figure 1. Characteristics of HCCI combustion

1 : 日大理工・教員・機械

## 2. 分光測定による HCCI 燃焼メカニズム解析<sup>[2]-[4]</sup>

HCCI の反応素過程では、複雑な化学反応に応じて、様々な化学種の生成及び消費が行われる。そこで、着火前から着火後に至る一連の過程において、燃焼室内ガスからの発光及び吸光の分光分析を行い、HCCI 燃焼機構を調べた。分光測定の概要を図 2 に示す。小型の石英窓を燃焼室に取付け、燃焼室内の光を取出し、分光器で分光し、光電子増倍管で検出する（発光測定）。キセノン光源からの光を燃焼室内に照射し、透過光を分光器に導き、光電子増倍管で検出する（吸光測定）。

一例として、オクタン価 50 の正標準燃料 (n-heptane 及び iso-octane を容積比 1:1 で混合した燃料) を用い、吸気圧 (圧縮開始圧力) 100 kPa, 150 kPa で HCCI 燃焼を行った場合の結果を示す。図 3 に、代表的な燃焼室内圧力 P 及び熱発生率 HRR を示す。ここで、熱発生率とは、燃焼室内圧力 P [Pa] とピストン変位に伴う容積 V [m<sup>3</sup>] の変化を元に、閉じた系の熱力学第一法則の式から算出した、1 クランク角度当たりのみかけの発生熱量であり、式 (1) で表される。この値が大きいほど、大きな発熱反応が起こっていることを示す。

図 3 の熱発生率波形に着目すると、二段階の熱発生が確認できる。一段目の小さい熱発生は、冷炎と呼ばれる低温酸化反応によるものである。二段目の熱発生は、主燃焼による熱発生である。冷炎の発生により温

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{1}{\kappa - 1} \left( \frac{dP}{d\theta} + \kappa P \frac{dV}{d\theta} \right) \quad (1)$$

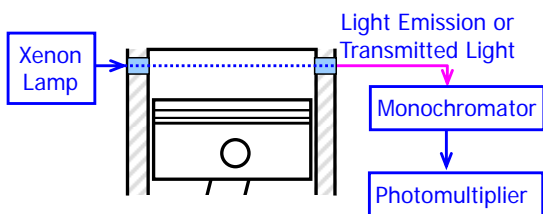


Figure 2. Configuration of in-cylinder spectroscopy system

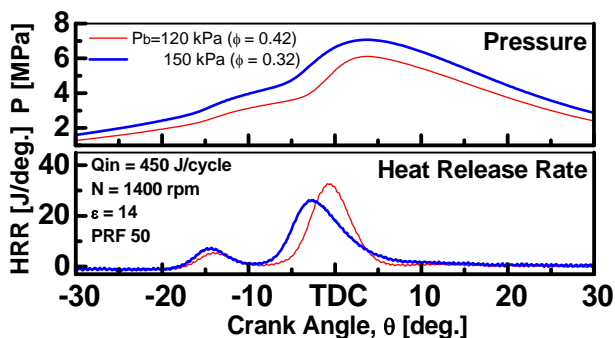


Figure 3. Typical measured waveforms

度は上昇するものの、その後熱発生は一度低下する。この現象は負の温度係数などと呼ばれ、着火前の反応に強い非線形性を有する主たる要因である。

吸気圧力 120 kPa での発光スペクトルの測定結果を図 4 に、吸光スペクトルの測定結果を図 5 に示す。これらの図は、各測定波長λにおける、クランク角度θと発光強度 E または吸光度 A の関係を並べたものである。図 4 の発光スペクトルに着目すると、概ね 300~500 nm にかけての連続スペクトルが主であることが分かる。これは、CO と O の再結合反応による連続スペクトル (CO-O 放射)<sup>[5]</sup> によるものである。また、CO-O 放射の発生前に、380~480 nm 付近に極めて微弱な発光帯が確認できる。これは、冷炎反応で生成されたホルムアルデヒド (HCHO) のスペクトル<sup>[5]</sup> だと考えられる。

図 5 の吸光スペクトルに着目すると、冷炎発生時に概ね 270~320 nm 付近に強い吸光が確認される。これは、HCHO の吸収帯<sup>[5]</sup> と一致しており、主に HCHO によるものと思われる。その後、主燃焼の発生と共に吸光度が急激に減少する。つまり、冷炎で生成された HCHO が消費されつつ主燃焼に至ることを意味する。また、310 nm 付近においては、主燃焼の発生後も吸光がしばらく続いている。これは、OH ラジカルの吸光である。着火後には、燃焼室内にしばらく OH が存在することが分かる。

これらの結果をまとめると、図 6 のようになる。このように、実際のエンジン燃焼室内での HCCI 燃焼火炎スペクトルを詳細に測定・解析することで、HCCI 燃焼の基礎的特性を明らかにした。また、冷炎反応などの複雑な現象を検知・評価する一手法を構築した。

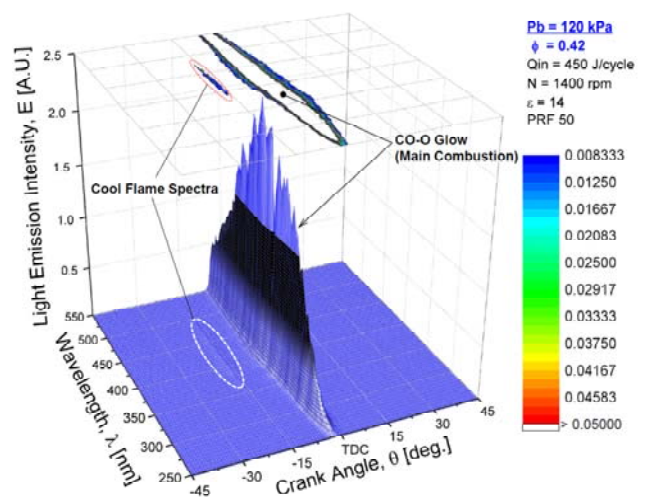


Figure 4. Light emission spectra of HCCI

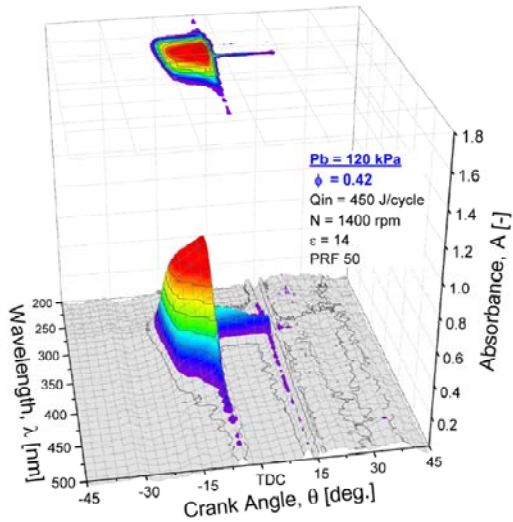


Figure 5. Light absorption spectra of HCCI

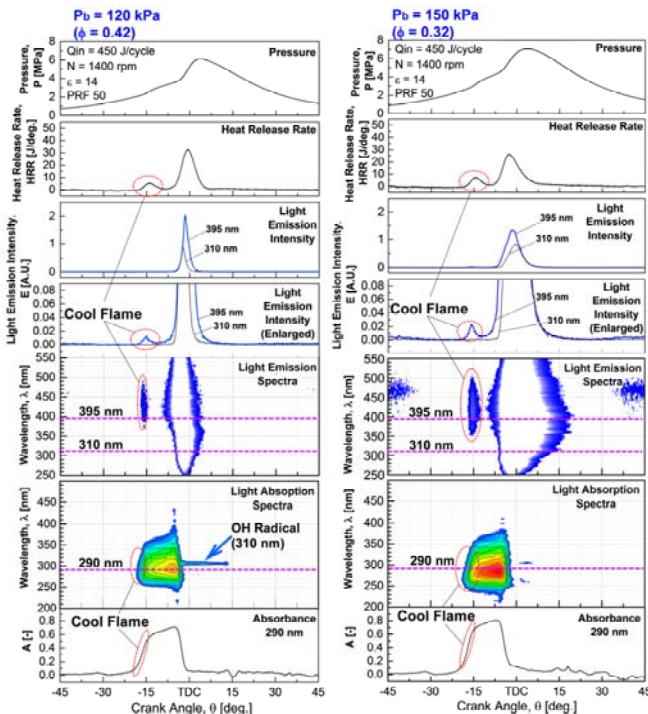


Figure 6. Light emission and absorption spectra of HCCI

図 7 に, DME とメタンを発熱量割合で 50% ずつ混合した燃料の投入量を一定に保ち, 吸気圧を変化させた際の実験結果を示す. 左図は, 各吸気圧力における燃料成分及び生成物の生成量を示す. 右図は, (1)~(4)で示す吸気圧における, 筒内平均ガス温度と熱発生率, 最大圧力上昇率, 395.2 nm の発光強度 (CO-O 放射) である. 図に示すように, 吸気圧が増加し, 希薄になることで, CO<sub>2</sub> が CO や HCHO として排出される. つまり, 反応の途中で凍結して排出される. 同時に, 燃料成分である DME やメタンも, 消費されずに排出される. この時, メタンは DME よりも低吸気圧側で排出量が増大している. つまり, メタンは DME よりも高温域で反応すると考えられ, これが, 主燃焼が二段に発生するメカニズムだと考えられる. この反応機構を明らかにするために, 反応数値解析を行った例を図 8 示す. この解析により, メタンは DME よりも高温側で CO になりつつ発熱することで, 主燃焼が二段に生ずる事を明らかにした.

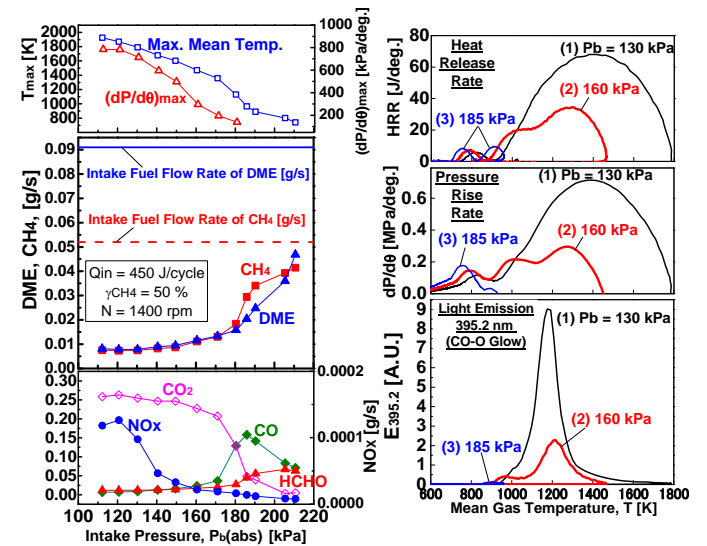


Figure 7. FT-IR analyses of multi-stage heat release in HCCI

### 3. FT-IR ガス分析と反応数値解析による HCCI の多段熱発生機構解析例 [6]-[7]

HCCI は, 多点同時着火による急速に燃焼を行うことが利点の一つではあるが, 高負荷時には許容範囲を超えた急激な燃焼を起こすため, むしろ燃焼を緩慢化させる必要がある. 例えば, 着火しやすいジメチルエーテル (DME) と着火しにくいメタンを混合し, HCCI 燃焼させると, ある条件下では主燃焼が二段階に生じ, 燃焼が緩慢になる. この現象の発生理由を明らかにするため, FT-IR ガス分析による中間生成物分析と反応数値解析による素反応レベルでの機構解明を行った.

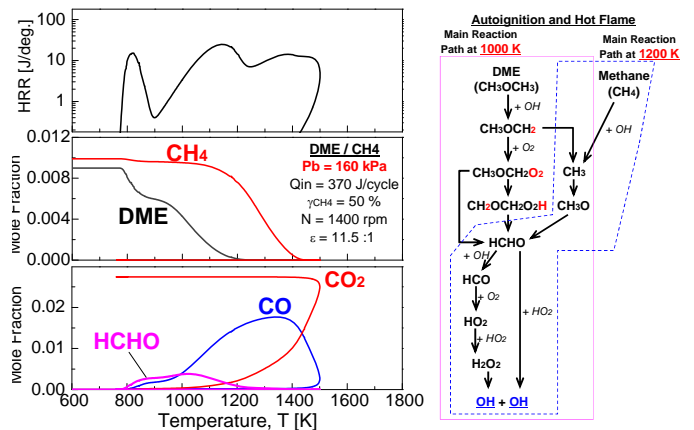


Figure 8. Chemical kinetic analyses of HCCI reactions

#### 4. 燃焼室内全域可視化による筒内圧力振動を

伴う急激な HCCI 燃焼発生機構の解析<sup>[8]-[10]</sup>

前述の通り, HCCI は高負荷時に急激な燃焼が生ずる。条件によっては, 燃焼室内に強い圧力振動が生じるようなノッキング燃焼に至る。この現象の発生機構を明らかにするため, 燃焼室内全域を可視化できるエンジンを構築し, HCCI のノッキング時における火炎発生挙動を高速度撮影で調べた。可視化エンジンの概要, 測定波形, 可視化結果を図 9 にまとめる。図 9 の圧力波形に示す通り, 強い圧力振動が生じる条件で運転し, その際の火炎発生挙動を毎秒 60000 コマで撮影した。その結果, 自着火がある程度進行した状況において, 未燃部分により急速な自着火が起こり (領域 A'), 強い圧力振動が生じること等が明らかになった。

#### 5. まとめ

本研究では, 次世代高効率クリーンエンジンの燃焼方式として注目される, 予混合圧縮着火 (HCCI) 燃焼における, 様々な未知現象を明らかにするため, 独自の光学計測エンジンを構築し, 実際のエンジン燃焼室内で起きている HCCI 燃焼のメカニズムを詳細に調べた。まず, HCCI 燃焼の可視化及び発光・吸光分光分析を行い, 火炎スペクトルを明らかにした。加えて, 反応数値解析を行うことで, HCCI の燃焼過程を素反応レベルで明らかにした。低温酸化反応や自着火など, キーになる現象の詳細なメカニズム解析により, HCCI の着火や燃焼を制御するための基盤的知見を得ることができた。また, 燃料の組成, 排ガス再循環 (EGR), 過給等が HCCI に及ぼす影響とそのメカニズムを明らかにした。加えて, 燃焼室全域の高速度可視化解析により, 燃焼室内に強い圧力振動が生じる様子を明確に捉え, その特性を明らかにした。

これらの知見は, HCCI 機関の実用化や, 従来型機関の徹底的な高効率クリーン化開発を行う上で, 有効活用が期待できる。

#### 文献

- [1] Zhao, H. (Editor), HCCI and CAI engines for the automotive industry, Woodhead Publishing, 2007.
- [2] 飯島晃良, 庄司秀夫, 発光・吸収計測による予混合圧縮着火燃焼の研究, 自動車技術会論文集, Vol. 38, No. 6, pp. 83-88, 2007.
- [3] 飯島晃良, 吉田幸司, 庄司秀夫, 予混合圧縮着火機関の着火に関する分光学的研究, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 74, No. 724, pp.1433-1442, 2008.

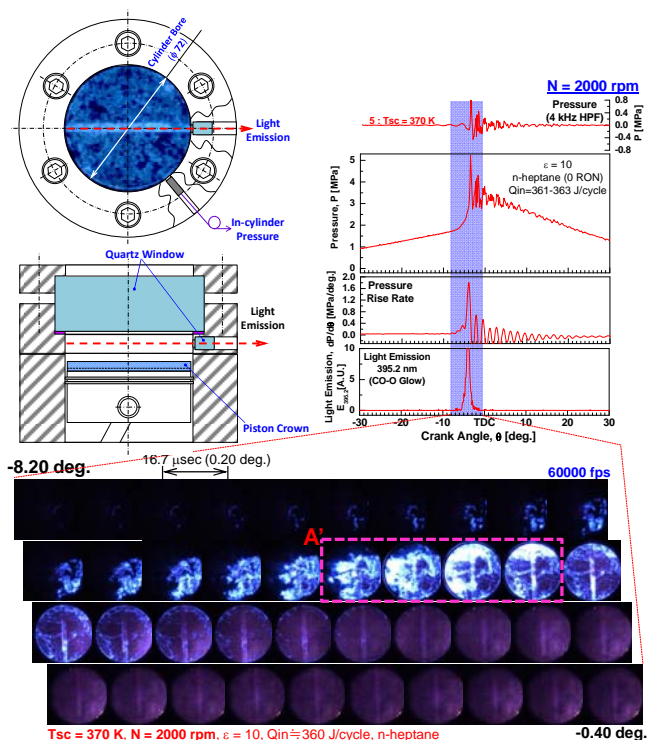


Figure 9. Visualization of knocking combustion in HCCI

- [4] Akira Iijima, Yasuhide Abe, Yuma Ishizawa, Go Emori, Hideo Shoji, Kazuhito Misawa, Kenji Yamamoto, Hiraku Kojima, Nakama Kenjiro, A Study of Autoignition and Combustion Behavior in a Supercharged HCCI Engine by using In-cylinder Spectroscopic Measurements, Proceedings of the The 35th FSITA World Automotive Congress, 2014.
- [5] Gaydon, A. G., The Spectroscopy of Flame -2nd Edition, London, Chapman and Hall Ltd., 1974.
- [6] 飯島晃良, 浅沼光雄, 小松聖志, 清水亮介, 吉田幸司, 庄司秀夫, 混合燃料を用いた過給 HCCI における多段熱発生機構の研究—FTIR による中間生成物測定, 筒内分光測定, 素反応数値計算を用いた反応解析—, 自動車技術会論文集, Vol. 43, No. 2, pp. 337-343, 2012.
- [7] 飯島晃良, 石川芳広, 江森剛, 浅沼光雄, 庄司秀夫: 分光測定と反応数値解析を用いた HCCI 機関の自着火燃焼研究, 第 50 回燃焼シンポジウム講演論文集, 2012.
- [8] Akira Iijima, Mitsuaki Tanabe, Koji Yoshida, Hideo Shoji, et al., Visualization and Spectroscopic Measurement of Knocking Combustion Accompanied by Cylinder Pressure Oscillations in an HCCI Engine, SAE International Journal of Engines, Vol. 6, No. 4, pp. 2150-2163, 2003
- [9] 飯島晃良, 伊藤直也, 寺島昂, 東條智也, 須山謙太, 田辺光昭, 吉田幸司, 庄司秀夫, ボア全域可視化による筒内圧力振動を伴うガソリン HCCI 燃焼の研究, 自動車技術会論文集, Vol. 45, No. 1, pp. 49-54, 2014.
- [10] Akira Iijima, Naoya Ito, Takashi Shimada, Masanori Yamada, Hideo Shoji, A Study of HCCI Knocking Accompanied by Pressure Oscillations Based on Visualization of the Entire Bore Area, SAE International Journal of Engines, Vol. 7, No. 4, pp. 1863-1874, 2014.