

K2-2

低炭素社会に向けた高効率過給 HCCI ガスエンジンの研究 筒内分光測定及び FTIR による燃焼解析

A Study of a High-Efficiency Supercharged HCCI Engine for a Low-carbon Society
Combustion Analysis Using In-cylinder Spectroscopic Measurements and FTIR

○石川芳広¹, 岸雄貴¹, 根本健司¹, 小松聖志², 清水亮介²
飯島晃良³, 庄司秀夫³

*Yoshihiro Ishikawa¹, Yuki Kishi¹, Kenji Nemoto¹, Kiyoshi Komatsu², Ryosuke Shimizu²
Akira Iijima³, Hideo Shoji³

A detailed analysis was made of Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) engine combustion using spectroscopic measurements and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). The results made clear the characteristics of ignition and the main combustion period. Experiments were conducted in which the heating value of the injected dimethyl ether fuel was varied while keeping the intake air pressure and temperature constant. The results revealed that formaldehyde accumulated during the occurrence of a cool flame and was consumed by the carbon monoxide-oxygen glow that occurred when the hot flame developed. The simultaneous application of spectroscopic measurements and FTIR made it possible to measure how the HCCI combustion reactions progressed, which was not possible on the basis of spectroscopic measurements alone.

1. 序 論

低炭素で高効率なエネルギー供給が求められる中、内燃機関には更なる高効率化が求められている。そこで高効率かつ排ガスもクリーンである予混合圧縮着火（以下、HCCI）燃焼に着目した。HCCI 燃焼は、燃焼温度が低く燃料分布も均一なため、窒素酸化物（NOx）及び粒子状物質（PM）の同時低減が可能である。しかし、HCCI は着火が化学反応に起因するため、着火時期の制御が難しく、十分な運転領域の確保が困難である。そのため HCCI 燃焼制御のためには筒内の燃焼状態の把握が重要になる。

そこで本研究では、分光測定とフーリエ変換赤外分光法（以下 FTIR）を用い、HCCI の詳細な燃焼解析を行い、着火及び主燃焼時の特性を明らかにした。吸気圧力および吸気温度を一定とし、燃料はクリーンであり軽油の代替燃料として着目されているジメチルエーテル（DME）を用い、投入熱量を変化させ実験を行った。

2. 実験装置及び実験方法

図 1 は、実験装置の概略である。機関は 4 サイクル空冷単気筒機関をベースとした（行程容積 299 cm³, 圧縮比 11.5 : 1）。DME は、質量流量計により流量制御し、吸気管に気体で投入した。吸気管途中の機械駆動式の過給機とインタークーラを使用することで吸気圧力と吸気温度を調節した。過給を行った際の新気の吹き抜けを最小限とするため、タペット隙間を調節してバルブオーバーラップをゼロとした。燃焼速度の大きな燃焼においては比

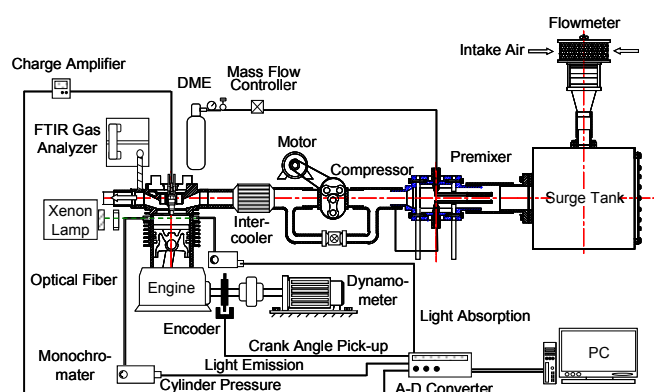


Fig. 1 Configuration of test equipment

熱比変化率が熱発生率の算出結果に影響を与える。そのため熱発生率は、クランク角 θ [deg.] における筒内ガス組成 n_i [mol] と平均ガス温度 T [K] から比熱比 κ (n_i , T) を算出し、比熱比変化率 $d\kappa/d\theta$ と筒内ガス組成の変化を考慮した上で以下の式より計算した。

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{1}{\kappa - 1} \left(V \frac{dP}{d\theta} + \kappa P \frac{dV}{d\theta} \right) - \frac{PV}{(\kappa - 1)^2} \cdot \frac{d\kappa}{d\theta}$$

吸光度の計測にはキセノンランプとレンズを組み合わせて平行光を燃焼室内に照射し、透過光を光ファイバを用いて分光器に導きホルムアルデヒド（HCHO）に特徴的な吸収波長である 293.1 nm に分光した。吸光度 A_{HCHO} の計算には下死点付近の出力電圧の基準を E_0 とし、各クランク角における出力電圧 E を用いて以下の式より算出した。

$$A_{HCHO} = 1 - \frac{E}{E_0}$$

3. 実験結果及び考察

図 2 に吸気圧力および吸気温度を概ね一定に保ち、1 サイクルあたりの DME 投入熱量を変化させて実験を行った結果を示す。図は上から筒内圧力 P 、熱発生率 HRR, CO-O 放射に相当する 395.2 nm の発光強度 E , HCHO に相当する 293.1 nm の吸光度 A である。図 2 の熱発生率 (HRR) と吸光度より、冷炎の発生に伴い吸光度が増加していることがわかる(図 2 の領域 A)。また、熱炎の発生と共に 395.2 nm の発光波長が急増し吸光度は急減していることがわかる。これは冷炎で生成される HCHO が着火と同時に消費されているためだと考えられる。投入熱量が少ない場合 ($Q_{in} = 176$ J/cycle), 吸光度は冷炎開始と同時に増加するが、その後の急減はみられない。また、発光波長に着目すると CO-O 放射は発生していない。これは筒内温度が C と O の再結合反応に必要な温度領域に到達せず主燃焼に至らなかったためである。

図 3 には投入熱量を変化させた場合の最高温度と、FTIR を用いて測定した排気成分の分析結果を示す。図 3 の最高温度と排気成分との関係に着目すると、最高到達温度が 1000 K 付近の温度領域で HCHO の発生量は減少している。これより冷炎は 800~1000 K の温度領域で発生すると考えられる。また 1200 K 付近から CO の排出量は減少し、CO₂ の排出量は増加しているため、この温度領域で CO が CO₂ に酸化する反応が起きはじめていると考えられる。

図 4 に筒内平均ガス温度と熱発生率 HRR, 395.2 nm の発光波長の関係を示す。発光は約 1000~1500 K の温度領域でみられることから、この温度領域で CO-O 放射が起こることが分かる。また、1500 K を超えたあたりで発光がみられない。つまり温度が 1500 K 付近で CO が CO₂ に酸化する反応が終了すると考えられる。

4. 結 論

- (1)冷炎の発生に伴い HCHO が蓄積し、熱炎の発生と共に起こる CO-O 放射により消費されると考えられる。
- (2)冷炎は約 800~1000 K の温度領域で、CO-O 放射は約 1000~1500 K の温度領域で発生すると考えられる。
- (3)分光測定と FTIR を同時に用いることで、分光測定だけでは分からなかった HCCI 燃焼の反応がどのように進行していくかを実測することが可能になった。

5. 謝 辞

本研究は理工学部シンボリックプロジェクト(熱工学システム)の一環として実施した。

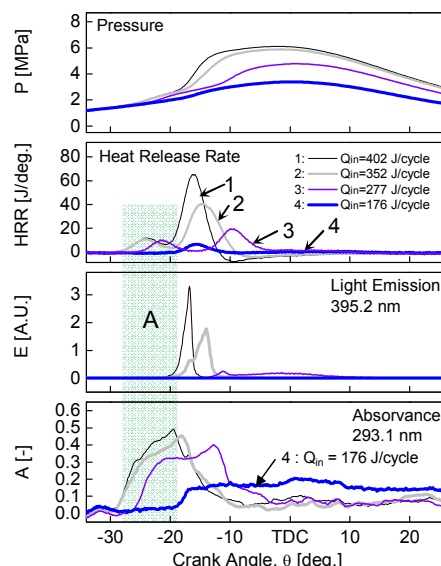


Fig. 2 Measured waveforms during FTIR experiments

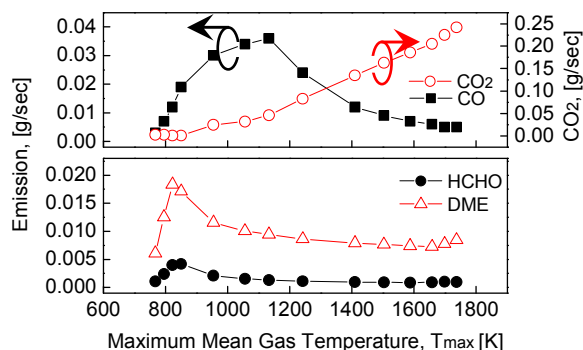


Fig. 3 FTIR analysis of DME HCCI combustion

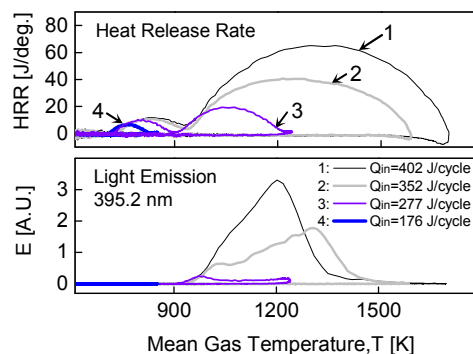


Fig. 4 Temperature dependence on HRR and light emission

6. 参考文献

- [1] 養祖隆, 山川正尚, 田中重行, 草鹿仁: ガソリン HCCI 機関における燃料特性と自己着火に関する検討(第 1 報), 自動車技術会論文集 Vol. 40 No. 1, p.99 -104
- [2] 藤本薫, 大野陽太郎, 梶谷修一, 後藤新一, 金野満, 鹿田勉, 鈴木信市: DME ハンドブック, オーム社, p. 32 (2006)
- [3] 堤優二郎, 飯島晃良, 庄司秀夫: DME を用いた過給 HCCI 機関の研究, 日本機械学会論文集(B 編), Vol.75, No.755, p.166-173