

平成 21 年 5 月 25 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19860073
 研究課題名（和文） 火花放電の発光スペクトルを用いた局所混合気濃度計測法の開発
 研究課題名（英文） Development of Local Mixture Strength Measurement Method with Spark Discharge Spectra
 研究代表者
 桑原 一成（KUWABARA KAZUNARI）
 大阪工業大学・工学部・准教授
 研究者番号：00454554

研究成果の概要：ガソリン機関の火花放電に伴う発光は OH 帯と CN 帯のスペクトルによって特徴づけられる。両者の強度の比と混合気濃度の間には良好な相関関係が成立することに基づき、点火位置、点火時期の混合気濃度を求める方法を提案した。強度の絶対値ではなく比を用いることによって、一般的に光学的計測法を実機に適用する際の制約となる光学系の汚れの問題を解決することができる。本方法によってシリンダー毎、サイクル毎の情報を得ることができ、緻密な混合気制御による高効率化を実現することができる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,320,000	0	1,320,000
2008年度	1,310,000	393,000	1,703,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,630,000	393,000	3,023,000

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：内燃機関，ガソリン機関，火花放電，混合気濃度，光学計測

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化、石油資源の枯渇、地域の大气汚染など、内燃機関が関与する問題が年々深刻化している。2006 年末の時点で世界の自動車保有台数は 9 億 2000 万台、2007 年の世界の新車登録台数は 6600 万台であった⁽¹⁾。世界の自動車保有台数は 10 億台を越えようとしている。内燃機関はそのパワートレインのほとんどを占め、今後、電気モーターや燃料電池への置換が段階的に進められるであろうが、当分は主役の座を取って代られることはないであろう。内燃機関にとって、熱効率の

向上によって燃料消費量を低減すること以外に二酸化炭素の排出を抑制する方法はない。今後も、内燃機関の熱効率向上が重要な課題であることに変わりはない。

ガソリン機関は自動車用機関の主役であり、2007 年の世界の新車登録台数の 76.4 % に搭載されている⁽²⁾。

ガソリン機関には、直噴化や希薄燃焼化の普及による熱効率の改善の余地が残されている。これらのためには、シリンダー内現象の最適化、すなわち流動、乱れ、混合気分布、火炎伝播の一段と緻密な制御が求められる。

このためには、実機のシリンダー内からシリンダー毎、サイクル毎に情報を得ることが効果的である。特に直噴化の進展にとって、シリンダー毎、サイクル毎、さらに局所の混合気濃度を評価することが求められる。

これまでにシリンダー内現象の理解のために様々な計測法が開発されてきたが、発火運転中の実機への適用が有効なものはほとんどない。混合気濃度の計測法については、排気管内の排気ガスのサンプリングによって得られる情報は、シリンダー間、サイクル間で平均化されている。レーザー誘起蛍光法では、機関に二つの光学窓を取付ける大改造が必要であり⁽³⁾、実機の現象の再現が困難である。赤外レーザー吸収法による情報は光路長平均であるが、光学系を局所空間に構成し局所計測に成功した例⁽⁴⁾もある。これらの光学的方法では、発火運転による光学系の汚れが問題となる。

炭化水素・空気予混合気の中で行われる火花放電に伴う発光は、近紫外から可視短波長域にかけて OH 帯、NH 帯、CN 帯等のスペクトルによって特徴づけられる⁽⁵⁾。ガソリン機関の中の火花放電に伴う発光では、OH 帯、CN 帯のスペクトルおよび NO-O の連続スペクトルが顕著である⁽⁶⁾。CN 帯のスペクトル強度は燃料濃度の増大に伴って増大する傾向がある⁽⁵⁾、⁽⁶⁾。

2. 研究の目的

本研究では、ガソリン機関で必然的に行われる火花放電に伴う発光を用いて、実機の発火運転中に点火位置、点火時期の混合気濃度をシリンダー毎、サイクル毎に求める方法を提案する。CN 帯のスペクトル強度でなく、CN 帯と OH 帯のスペクトル強度比に着目し、この強度比と混合気濃度の間の相関関係を明らかにする。この関係を用いた混合気計測法の可能性について検討を加える。

本計測法には、以下のような特長がある。

- (1) 従来の光学的計測法のようにレーザー光源を必要とすることはない。
- (2) このため光学系が簡素であり、光学系と点火プラグを一体化することが容易である。これによって無改造の実機に適用することができる。
- (3) 発光強度の絶対値ではなく、強度比を用いるため、光学系の汚れが計測結果に影響を及ぼすことは本質的にない。

3. 研究の方法

図 1 に実験装置の概略を、表 1 に供試機関の諸元を示す。単シリンダー機関のシリンダーヘッドを取り除き、燃焼室上壁の全域を石英製光学窓に置き換えた。点火プラグを燃焼室側壁に移設した。燃焼室側壁には圧力センサーも設置した。機関燃焼室と機関外部の予

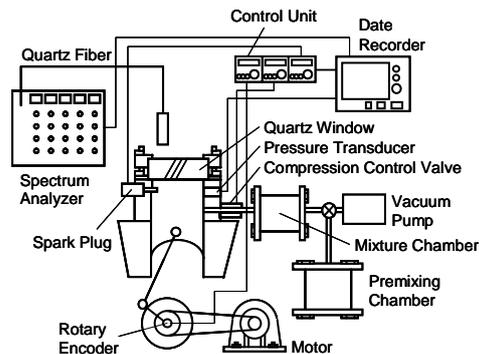


図1 実験装置の概略

表1 実験条件

Bore x stroke	87 x 84 mm
Displacement	500 cm ³
Fuel	LPG
Equivalence Ratio	0.6 - 2.0
Wall Temperature	373 K
Engine Speed	240 min ⁻¹
Incylinder Pressure at Spark Discharge	0.25 MPa 0.31 MPa 0.36 MPa

表2 LPGの成分

C ₂ H ₆	1.2 vol. %
C ₃ H ₈	96.8 vol. %
i-C ₄ H ₁₀	1.5 vol. %
n-C ₄ H ₁₀	0.5 vol. %

表3 バンドパスフィルターの波長特性

	Center Wavelength [nm]	Half Band Width [nm]
OH Band	306	14
CN Band	388	10
Adjacent Band to CN Band	410	9.4

混合気容器の間に連絡通路を設け、機関をモーター駆動する最中に電磁弁によってこの通路を遮断し、燃焼室の中で一度だけ圧縮、点火を行った。機関回転速度を 240 min⁻¹ に設定した。

表 2 に成分を示す LPG を燃料とし、疑似空気 (O₂: 21 vol. %, N₂: 79 vol. %) との予混合気の当量比を 0.6~2.0 と変化させた。自動二輪車用のイリジウムチップ付点火プラグ (NGK 社製 DR7HIX) と自動車用のコイルアセンブリー (DENSO 社製) を用い、プラグ中心電極を陰極側、ドエル時間を 3.0 ms として圧縮上死点で火花放電を行った。点火時期の燃焼室内圧力を 0.25, 0.31, 0.36 MPa

に設定した。いずれの圧力でも可燃範囲は当量比 0.8~1.8 であった。

火花放電に伴う発光を石英製ファイバーを介して分光装置に導いた。表 3 に特性を示す三組の帯パスフィルターと光電子増倍管を用いて、OH 帯、CN 帯および CN 帯の裾野のスペクトル強度を検出した。同時に、高電圧プローブ (Tektronix 社製 P6015A)、電流プローブ (Tektronix 社製 TCP303) を用いて放電電圧、放電電流を測定した。これらのデータをサンプリング周期 1 MHz で記録した。

また、マルチチャンネル分光器 (Ocean Optics 社製 QE6500) を用いて、全放電期間に亘って時間積分したスペクトル強度の波長特性を求めた。

4. 研究成果

(1) 火花放電に伴う発光スペクトルの波長特性

図 2 に火花放電に伴う発光スペクトルの波長特性を示す。放電の全過程に亘る時間積分値であり、5 イベントのデータの平均値であるため、各スペクトルが放電過程のいかなるタイミングで、いかなるスペクトルと同時に発現するのか、は不明である。

当量比 0.6 の場合には、短波長側から順番に OH 帯 (波長 306.3 nm)、NH 帯 (波長 336.0 nm)、N₂ 帯 (波長 355 nm 付近)、CN 帯 (波長 388.3 nm)、CH 帯 (波長 431.4 nm) のスペクトルが顕著に見られる。

当量比を 2.0 に増大すると、これらのスペクトルに加えて、C₂ 帯のスペクトル (波長 473.7, 516.5, 563.6, 558.6 nm) が見られる。

当量比が各スペクトル強度に及ぼす影響については、当量比の増大に伴って OH 帯の強度は若干低下し、NH 帯、N₂ 帯の強度はほぼ変化せず、CN 帯、CH 帯の強度は大幅に増大する。

以上の傾向は、当量比の変化に対する混合気中の C 原子、H 原子、O 原子、N 原子の割合の変化を概ね反映している。

実機内では、放電に伴う発光は主に OH 帯、CN 帯のスペクトル、NO-O の再結合による連続スペクトルによって構成され、NH 帯や N₂ 帯のスペクトルは確認されない、という報告がある。実機内は、供試機関内と比べてより高温、高圧となるため、再結合による発光が顕著になる、と考えられる。NH 帯、N₂ 帯のスペクトルはブロードニングによって顕著でなくなるのかもしれない。

実機への適用を前提とした計測法の確立が目的であるため、OH 帯と CN 帯のスペクトル強度比と当量比の間の相関関係に着目することが妥当である。このため、波長帯を特定してスペクトル強度の時間履歴を取得する際には、OH 帯、CN 帯、CN 帯に隣接する波

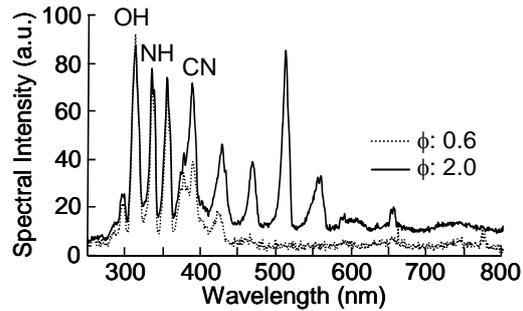


図2 発光スペクトルの波長特性 (p_g: 0.31 MPa)

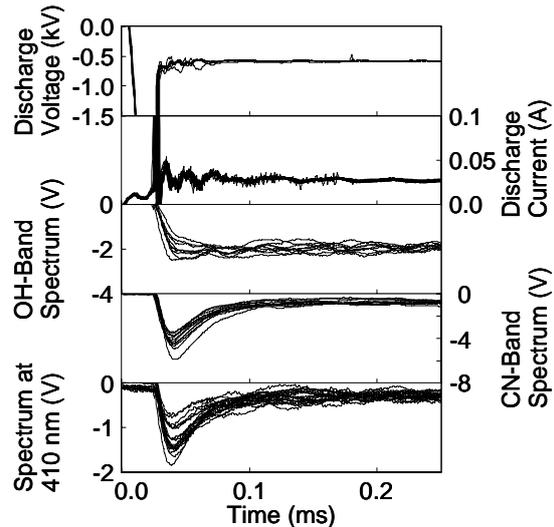


図3 放電電圧、放電電流、スペクトル強度の履歴 (p_g: 0.25 MPa, phi: 1.0, 20イベント)

長帯を対象とした。

(2) スペクトル強度の時間履歴

図 3 に、当量比 1.0 における放電電圧、放電電流、各スペクトル強度の時間履歴を示す。20 イベントのデータの重ね合わせである。各スペクトル強度の検出感度は異なるため、これらの絶対値を比較することに意味はない。

放電電圧、放電電流によると、放電は、絶縁破壊後 3.5 ms 程度の期間継続され、最初数 μ s の短期間の容量放電成分と、その後長期間に亘る誘導放電成分に分類される。この特性は当量比によらず同様である。放電電圧、放電電流のイベント間変動は小さい。

CN 帯のスペクトル強度によると、発光の過程は、最初数十 μ s の期間の発光が強い過程と、その後弱い発光が継続される過程に分類される。OH 帯ではこれらの過程を明確に分類することは困難である。スペクトル強度のイベント間変動は、放電電圧、放電電流のイベント間変動に比べて大きい。

(3) スペクトル強度比と当量比の間の相関関係

特定のゲート期間だけスペクトル強度を

時間積分した値を新たにスペクトル強度として定義する。ここでは、ゲート期間を、発光が強い過程に相当する放電開始後 35~70 μs に設定する。

図 4 に、CN バンド、OH バンドのスペクトル強度と当量比の間の相関関係、これらの強度比と当量比の間の相関関係を示す。20 イベントのデータの平均値とばらつきを示す。点火時期の雰囲気圧力は 0.25 MPa である。

当量比の増大に伴って CN 帯の強度は増大し、OH 帯の強度は低下する傾向にある。したがって、当量比の増大に伴ってこれらの強度比は増大する。イベント間ばらつきが大きいことが問題であるが、平均値が示す直線関係の勾配に着目すると、強度比と当量比の間の関係が最も良好である。

CN 帯と CN 帯に隣接する波長帯のスペクトル強度比と当量比の間の相関関係にも着目

したが、当量比の増大に伴う強度比の変化はわずかである。

放電エネルギーによって CN 帯のスペクトル強度を除した値と当量比の間の相関関係にも着目したが、CN 帯と OH 帯の強度比と当量比の間の関係と比べて良好ではない。イベント間ばらつきの縮小も見られない。

(4) ゲート期間が相関関係に及ぼす影響

図 5 に、CN 帯と OH 帯のスペクトル強度比と当量比の間の相関関係を、異なるゲート期間で求めた結果を示す。放電開始後 60~100 μs は、発光が強い過程から弱い発光が継続する過程への遷移過程に、95~105 μs は、弱い発光が継続する初期過程に相当する。ゲート期間を後方に移動すると、直線関係の勾配は小さくなる。

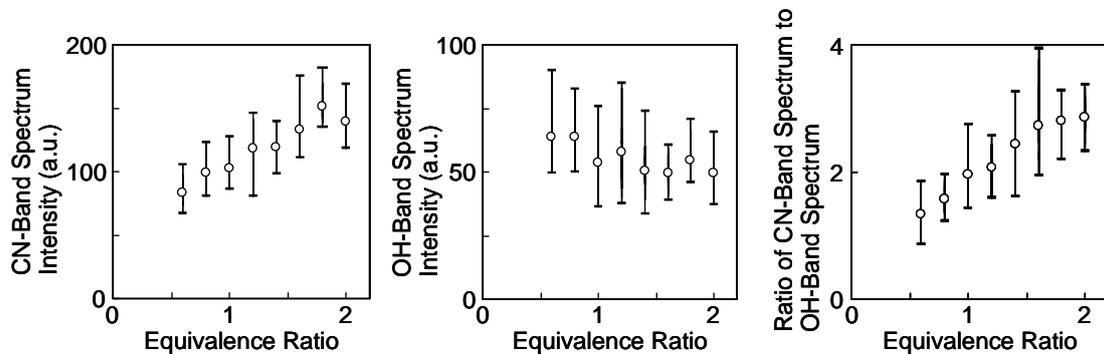


図4 スペクトル強度、スペクトル強度比と当量比の相関関係 (ゲート期間: 0.035-0.07 ms, p_{ig} : 0.25 MPa, 20イベント)

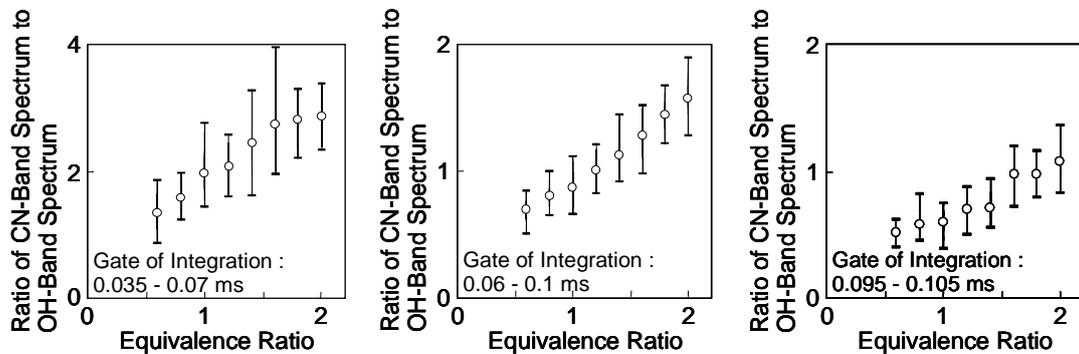


図5 ゲート期間がスペクトル強度比と当量比の間の相関関係に及ぼす影響 (p_{ig} : 0.25 MPa, 20イベント)

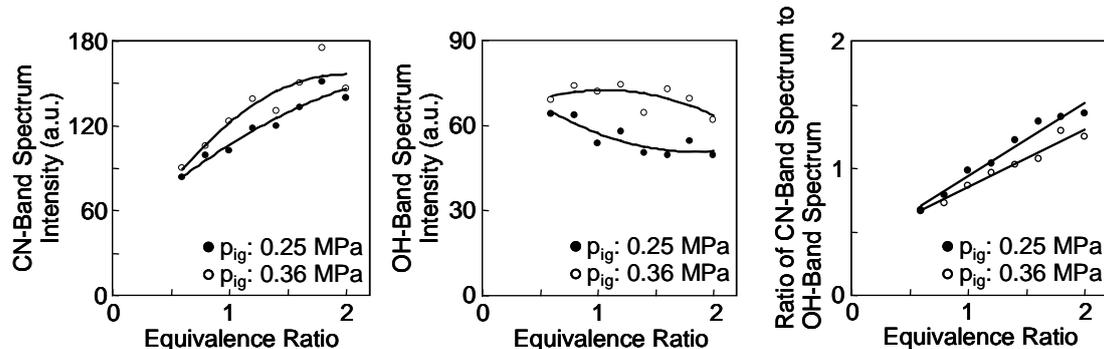


図6 圧力がスペクトル強度に及ぼす影響 (ゲート期間: 0.035 - 0.07 ms, 20イベント)

(5) 雰囲気圧力が相関関係に及ぼす影響

図6に、雰囲気圧力がCN帯、OH帯のスペクトル強度と当量比の間の相関関係、これらの強度比と当量比の間の相関関係に及ぼす影響を示す。いずれの関係でも雰囲気圧力の影響が見られる。強度比と当量比の関係によると、雰囲気圧力の変化に伴って直線関係の勾配が変化する。この関係を用いて実機内の混合気濃度計測を行うためには、圧力がこの関係に及ぼす影響を明らかにし、この影響に基づいて運転条件に応じて直線式を補正することが必要である。

(6) CO₂添加がスペクトル強度に及ぼす影響

当量比1.0の混合気をベースとして、モル分率でLPGの三倍のCO₂を添加し、このCO₂と同量のN₂を除去した混合気を形成した。すなわち、LPGに含まれるC原子とCO₂に含まれるC原子がほぼ同数にした。

図7に放電の初期過程のデータを示す。CO₂添加によってCN帯、OH帯のスペクトル強度は増大する。これは、CO₂添加による混合気中のC原子、O原子の割合の変化を反映している。このため、CO₂添加によって相関関係の勾配も変化する。実機内では、EGRが相関関係に及ぼす影響も考慮することが必要である。

(7) まとめ

混合気の当量比の増大に伴って、OH帯のスペクトル強度は若干低減し、CN帯のスペクトル強度は顕著に増大する。このため、CN帯とOH帯のスペクトル強度比と当量比の間に直線関係が成立する。しかし、強度比のイベント間ばらつきによって有効な計測精度を得るには到っておらず、このばらつきを抑制するための点火系の改良が必要である。また、混合気圧力、混合気へのCO₂添加によって直線関係の勾配が変化するため、これらの影響の補正項を組み込んだ関係式を求める必要である。

参考文献

- (1) 社団法人自動車工業会ホームページ, http://www.jama.or.jp/world/world/world_2t1.html
- (2) J.D. Power Asia Pacific 報道資料 (2008)
- (3) 藤川, 勝見, 秋浜, ガソリンLIFを用いた筒内混合気分布の計測, 自動車技術会論文集, Vol. 27, No. 2, pp.144-148 (1996)
- (4) 吉山, 浜本, 南, 3.39 μ m赤外吸収法による炭化水素燃料濃度の計測, 第12回内燃機関シンポジウム講演論文集, pp.443-448 (1995)
- (5) 河原, 富田, 竹本, 池田, 火花誘起ブレイクダウン分光法を利用した燃料濃度計測, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 89-08,

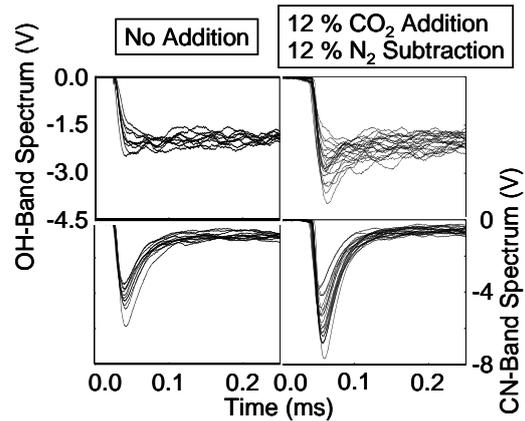


図7 CO₂添加がスペクトル強度に及ぼす影響
(ϕ : 1.0, P_{ig} : 0.31 MPa, 20イベント)

Paper No. 20085824, pp. 7-10 (2008)

(6) Kuwahara, K., Ueda, K. and Ando, H., Mixing Control Strategy for Engine Performance Improvement in a Gasoline Direct-Injection Engine, SAE Paper No. 980158 (1998)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計2件)

- ① 榎山裕行, 金子誠, 桑原一成, 火花点火に伴う発光スペクトルを用いた局所混合気濃度の計測, 日本機械学会東海支部第58期総会講演会, 2009年3月17日, 岐阜大学
- ② 本田雄大, 金子誠, 千田二郎, 藤本元, 桑原一成, 火花点火機関の局所混合気濃度計測, 日本機械学会関西支部第83期総会講演会, 2008年3月15日, 大阪大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

桑原 一成 (KUWABARA KAZUNARI)
大阪工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 00454554