

火花点火過程における初期火炎と放電路の高速度同時撮影

松本 脩¹⁾ 窪山 達也²⁾ 森吉 泰生³⁾

Simultaneous Visualization of Initial Flame and Discharge Channel during Spark Ignition Process

Osamu Matsumoto Tatsuya Kuboyama Yasuo Moriyoshi

Schlieren photography is well known as a visualization method of flame propagation. However, in case of spark ignition, the shape or size of initial flame kernel cannot be distinguished due to density variation caused by the plasma or preheating zone. In this paper, the authors attempted to visualize both the discharge channel and the initial flame kernel formation using both a normal high-speed camera and an infrared high-speed camera. In a constant volume combustion chamber, simultaneous visualizations using a CO band filtered infrared and a normal high-speed camera were conducted. A normal high-speed camera was used for schlieren photography and direct imaging of spark channel. As a result, the possibility to distinguish the initial flame kernel from the spark plasma was suggested by using an infrared high-speed camera.

KEY WORDS: Heat Engine, Spark Ignition Engine, Measurement/Diagnosis/Evaluation, Initial Flame Growth (A1)

1. 諸言

現在の内燃機関技術には地球規模での環境問題やエネルギー資源枯渇の観点から、高効率・低公害な燃焼技術の開発が求められている。火花点火機関においてはスパークプラグでの放電をトリガとし、火炎伝播によって燃焼を完結させる。エンジンの基本諸元に関しては、高圧縮比化、過給ダウンサイジングによる常用運転領域の高負荷化等により熱効率向上が達成される。これらのコンセプトでは、点火放電時の筒内圧力がより上昇する傾向にある。パッシェンの法則によると火花放電の要求電圧は雰囲気圧力と電極間距離の関数であり、電極間距離を一定とすると雰囲気圧力が高いほど要求電圧は高くなる。すなわち高圧縮比化、高過給化による筒内圧増大によりブレイクダウンに達しない可能性を持つ。燃焼技術に関しては、希薄燃焼やEGRによる希釈燃焼等の技術が用いられる。これらの技術では最小点火エネルギー増大や燃焼速度低下により、失火確率やサイクル変動が増大する。初期火炎核の確実な形成のため様々な点火強化手法が検討されているが¹⁾、多くの場合、高エネルギー投入による電極消耗の課題を内包している。また燃焼速度低下によるサイクル変動を抑えるため、タンブルなどの筒内流動強化が積極的に用いられている。しかし流動強化による放電路の吹き消え、火炎核の吹き消え等の課題が残る。以上のように次世代火花点火機関において、点火環境は厳しくなる一方である。

スパークプラグでの放電に必要な高電圧は、点火コイルの自己誘導作用により発生させる。この放電現象は、前駆放電

(pre-breakdown)、ブレイクダウン(breakdown)、アーク(arc)、グロー(glow)の4段階からなる²⁾。放電電極ギャップ間に数kVから数十kVの高電圧がかかることで、電極間の分子が電離し、自由電子が発生する。これにより電極ギャップ間インピーダンスが低下して絶縁破壊が起こり、瞬間的(数ns)に100A以上の電流が流れる。このブレイクダウンは持続期間が短く(20-50ns)熱損失が少ないため、雰囲気へのエネルギー伝達効率が高い。続くアークでは比較的高い電流値(0.1A以上)、低い電圧値(~100V)をとる。持続時間はμsオーダーとなり、供給エネルギーの約半分が熱損失となる。最後のグローは数msオーダーの長い放電であり、供給エネルギーの多くは熱損失となる。電圧値は500V~1kV程度まで上昇するが、電流値は数十~数百mA以下と小さく、やがて0へ収束し放電が終了する。これらの放電形態は火花点火機関が実用化されて以来、変わりなく用いられている。

次世代火花点火機関への点火システム適用のため、様々なアプローチから研究結果が報告されている。従来点火方式では点火コイルの回路定数や二次側抵抗を最適化することにより、放電形態やエネルギー供給量、コイル伝達効率等を調整することが可能である³⁾。将来の高過給エンジンに対応するためには、筒内圧増大による放電ノイズへの対処⁴⁾や高EGR導入に対する放電形態最適化⁵⁾なども急務である。高流動下での放電路挙動についても可視化やシミュレーション結果が多数報告されており⁶⁾⁻⁽¹⁴⁾、放電路挙動と初期火炎核形成およびその後の火炎伝播に与える影響が調査されている。渡邊ら¹¹⁾は圧縮膨張機関および実機関にて、直接撮影により放電及び火炎伝播の同時可視化を行っている。佐山ら、増田ら¹²⁾⁻⁽¹⁴⁾は可視化渦流室を持つ特殊エンジンにて、シャドウグラフ法を用いて放電路及び火炎伝播の可視化を行っている。さらに本実

1) (株)サステナブル・エンジン・リサーチセンター(263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

2)・3) 千葉大学大学院(263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

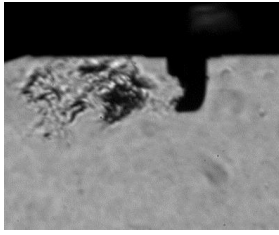


Fig.1 Schlieren image after spark process completed on no fuel flow field

験をもとに詳細な火花放電モデルおよび放電路から着火に至る過程へのモデリングを試みている。以上のように火花放電から初期火炎核形成～火炎成長にかけての観察は、一般に直接撮影およびシュリーレン系手法が広く用いられている。

火花放電から初期火炎核形成に至るメカニズム解明のためには、放電プラズマ等の電磁気論と初期火炎核形成の化学反応論を切り分ける必要がある。高速度撮影による観察では前述の2手法が広く用いられているが、放電プラズマと初期火炎核の分離観察は非常に困難である。直接撮影においては、初期火炎核に比べ放電プラズマの輝度が非常に高く、放電路が維持される期間における両者の分離は難しい。シュリーレン法やシャドウグラフ法は光路中の密度ムラを影として可視化するため、放電そのものによる局所的な高温高圧場も可視化される。また、放電プラズマにより加熱圧縮された雰囲気ガスも影として投影される。図1に市販の自動車用フルトラ式点火コイルとスパークプラグを用い、酸素(21%)・窒素混合気中で火花放電を行ったときのシュリーレン画像を示す。図中右から左に向かって約10m/sの流動がついている。また、図はブレークダウンから2.5ms後の画像であり、放電は既に終了している。これより、燃料が存在せず火炎が形成されない雰囲気中においても、シュリーレン法では火炎と混同するような影が写り込む。以上よりシュリーレン系手法では火花放電による火炎核成長も正確に捉えられない可能性が示唆される。

近年、冷却型赤外カメラの高画素化、高速度化が進んでおり、様々な分野で活用されつつある⁽¹⁵⁾。Mancarusoらは高速度赤外カメラを可視化ディーゼルエンジンのボトムビューに適用し、バイオ燃料等の噴霧燃焼の観察を行っている⁽¹⁶⁾。また、近赤外領域を火花点火機関へ適用した例として、岡部ら⁽¹⁷⁾や武藤ら⁽¹⁸⁾が点火プラグの温度計測を行っている。しかし火花放電から着火燃焼に至る過程を赤外領域で観察した例はない。本稿では、定容燃焼容器内での火花放電点火を高速度赤外カメラで観察することで、火花放電と初期火炎核の分離を試み、放電から燃焼に至る過程を明らかにすることを目的とする。

2. 試験装置

2.1. 定容燃焼容器および周辺装置

燃焼の赤外撮影にあたり、小型の定容燃焼容器を新たに製

作した。容器概略図を図2に示す。燃焼室は直径50mm、奥行き35mmのパンケーキ状であり、上部に市販のスパークプラグを取り付けられるようになっている。容器片面にはサファイア窓が取り付けられており、燃焼室の全面可視化が可能となっている。また、全面窓と直行する向きにも小型のサファイア窓が取り付けられており、X-Y方向での可視化が可能である。背面には容器内流動を発生させるためのファンが取り付けられている。このファン駆動用モータ設置のため、容器上部のみ透過シュリーレンが可能である。ファンを取り付けた際の燃焼室形状はドーナツ形となり、容器内容積は約60cm³となる。容器内壁面は赤外線反射を抑えるため、可能な範囲で $\epsilon=0.94$ の黒体塗装を施してある。容器上部のスパークプラグ周りおよび容器下部には水路が設けられており、温調水を流すことで容器壁面およびガス温度の制御が可能である。また容器側面にはピエゾ型圧力センサ(Kistler 7061B)が取り付けられており、計測ステーション(YOKOGAWA WE800)を介してPCへ燃焼圧力の取り込みおよび指圧解析が可能である。

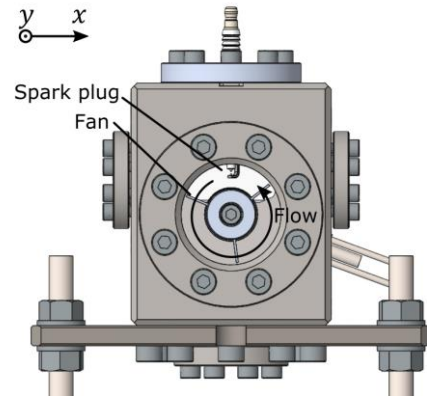


Fig.2 Constant volume combustion chamber

点火系には市販の自動車用スパークプラグ(NGK DILKAR7C9H)およびフルトラ式点火コイルを用いた。スパークプラグ電極は中心電極、接地電極とも針状であり、電極ギャップは0.9mmである。また約5k Ω の内部抵抗を有する。スパークプラグも両電極先端チップ部分を除き、燃焼室に露出する金属、碍子部に黒体塗装を施している。スパークプラグ接地電極は容器内流動方向の45°上流側に向けて設置した。点火コイルから発生した二次電圧・電流波形は、プラグケーブル中間から高電圧プローブ(Tektronix P6015A)にて、スパークプラグ直上からAC電流プローブ(Pearson 3972)にて引き込み、これを高速オシロスコープ(Tektronix DPO4034B)にて計測した。

予混合気は容積約20000cm³の外部混合気容器を用いて作成した。混合気容器上部には攪拌用ファンモータ、下部には混合気の誤爆による容器損傷を防ぐためラプチャーディスクが取り付けられている。また、混合気用ガスとして燃料ガス、酸素、窒素のシリンダが接続されており、分圧法を用いて



Fig.3 Infrared high-speed camera (FLIR X6900sc)

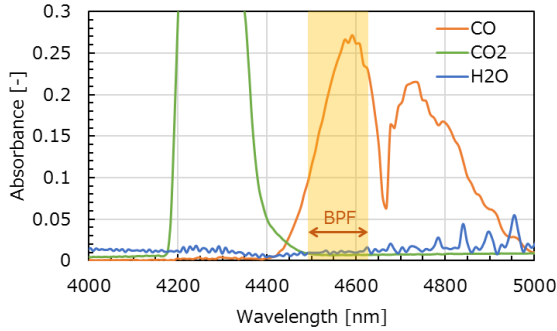


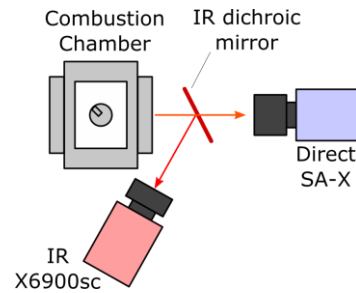
Fig.4 IR absorbance spectrum⁽²⁰⁾

様々な組成の混合気を作成することが出来る。本稿では燃料として純プロパン（純度 99.5%以上）を用いた。

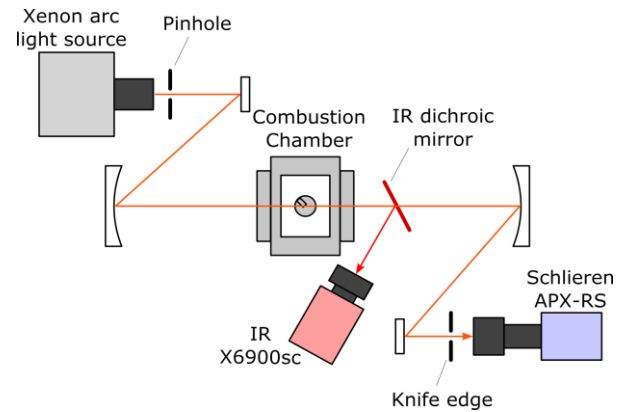
2.2. 高速度赤外カメラおよび光学系

高速度赤外カメラは FLIR X6900sc (図 3) を用いた。本機はインジウムアンチモン(InSb)素子を搭載したセンサ冷却型赤外カメラであり、波長レンジは 3.0~5.0 μm である。フル画素 (640 \times 512px) で 1000fps, 最大約 30000fps での撮影が可能である。また内部に 1 インチフィルタを 4 枚収納可能となっている。本稿では特定の分子が特定の波長の光を吸収・発光する性質を利用し、火炎の可視化を試みる。燃焼生成物中の安定な化学種は赤外域で発光する。これらの化学種は特定の波長域の赤外線を吸収し、さらに高温になると振動励起によりその波長領域の赤外線を放射する⁽¹⁹⁾。図 4⁽²⁰⁾に炭化水素系燃料の主な燃焼生成物（気体）の赤外吸収度を示す。これより CO は 4.6 μm 及び 4.7 μm 付近に、CO₂ は 4.2~4.3 μm 帯に大きな吸収領域が存在する。本稿では中心波長 4560nm, 半値幅 135nm のバンドパスフィルタを用い CO による赤外放射像を撮影した。撮影に当たっては、バンドパスフィルタと後述するダイクロイックミラーをセッティングした状態であらかじめ黒体補正を行うことで、フィルタからの熱放射及び冷却型赤外カメラ特有のナルシサス効果等の外乱を補正した。

本稿では赤外撮影と同時に放電路の直接撮影、シュリーレン撮影を行った。それぞれのセッティングを図 5 に示す。赤外画像は 3~12 μm 帯の反射率 95%, 400~700nm の平均透過率 70%のダイクロイックミラーを用い可視光と分離した。直接撮影にはカラー高速度カメラ(Photron SA-X)を用いた。また、シ



(a) with direct imaging



(b) with schlieren method

Fig.5 Schematics of imaging method

ユリーレン撮影には Xenon arc を光源とし、モノクロ高速度カメラ(Photron APX-RX)を用いた。

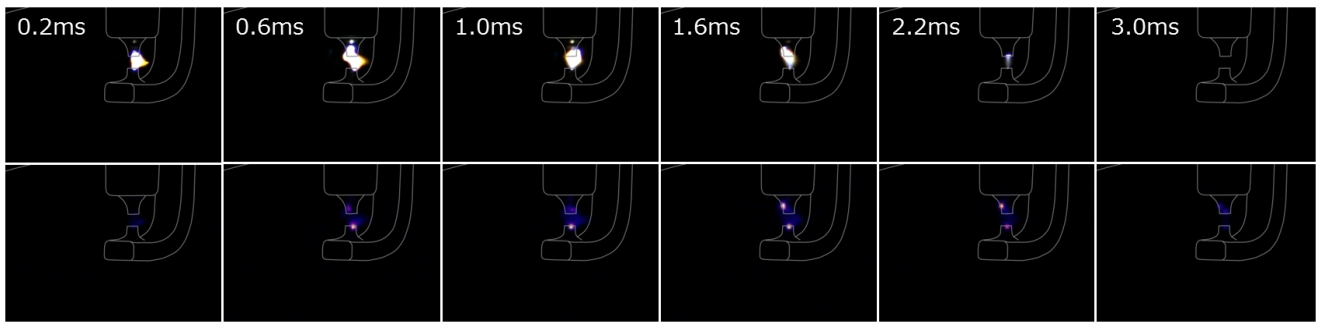
3. 実験結果

3.1. 放電路と初期火炎核の分離

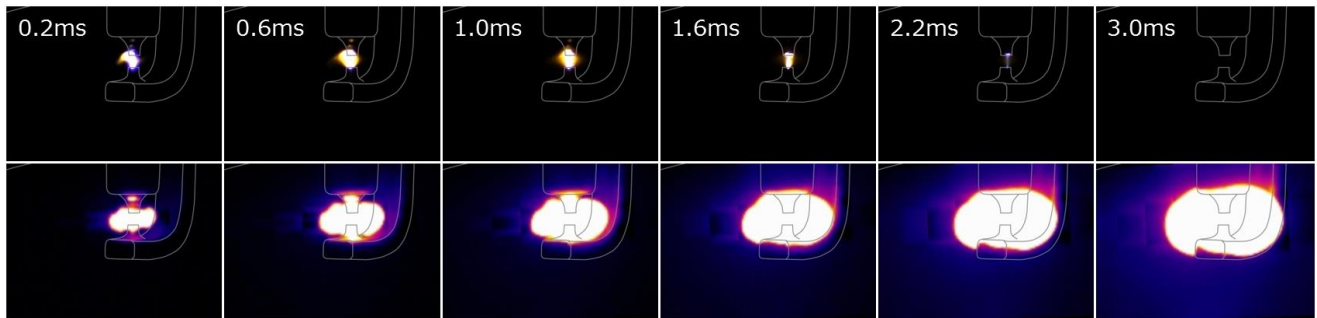
スパークプラグによる火花放電について中～遠赤外領域で発光スペクトルを測定した例は見当たらない。そこで CO 吸収帯である 4560nm 帯において放電路がどの程度写り込むかを調べた。試験条件を表 1 に示す。初期圧力を 400kPa の静止場とし、空気相当の O₂-N₂ 混合気中での放電および燃料(C₃H₈)存在下での放電～燃焼の比較を行った。赤外カメラの撮影周波数は 5000fps, 同時撮影として放電路の直接撮影を 20000fps とした。赤外カメラの露光時間は 80.4 μs を選択した。点火コイルは放電電流値が高く可視域の放電輝度が高い試験用フルトラ式コイルを用いた。それぞれの撮影画像を図 6 に示す。図中上段が放電路の直接画像、下段が赤外カメラからの CO 放射画像である。赤外画像はセンサ分解能 14bit のうちバック

Table 1 Experimental conditions

	With fuel	Without fuel
Mixture composition		
Fuel	C ₃ H ₈	N ₂ + O ₂ [21%]
Equivalence ratio	1.0	
N ₂ dilution ratio	20 %	
Initial pressure	400 kPa	
Initial temperature	25 deg.C	
Flow velocity	0 m/s	



(a) without fuel condition



(b) with fuel condition

Fig.6 Direct and CO radiation images on static fields with/without fuel conditions (upper: direct images / lower: CO radiation images)

グラウンド輝度を基準とした 10bit 分を表示した画像である。これより燃料存在下では赤外面像に初期火炎核が輝度飽和しているのに対し、燃料が存在しない場合、放電ギャップ間に輝度はほとんど確認できない。しかし放電により両電極が加熱されるため、電極先端からの熱放射による発光が見られる。放電ギャップ水平中心断面におけるブレイクダウン後 1ms での輝度を図 7 に示す。本図中はバックグラウンドが 0 となるよう補正を行った修正輝度で示す。また x 軸は電極中心を原点としている。図中において輝度は 1024 までの標記となっているが、燃料が存在し火炎核が形成されている場合、14bit センサ感度を超え飽和している。対して燃料が存在しない場合、中心電極付近にわずかな輝度の立ち上がりが見られるが、燃料が存在する場合の初期火炎輝度に比べれば無視できる程度である。以上より高速度赤外カメラを用いることで、放電路と初期火炎核を分離観察できる可能性が示唆される。

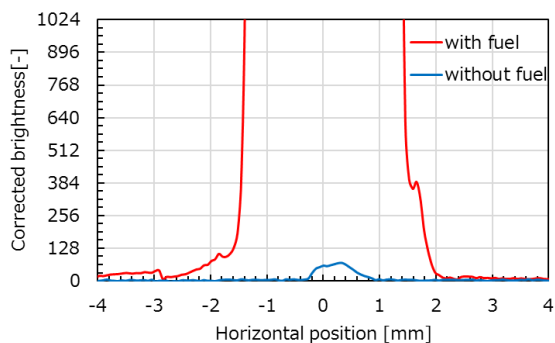


Fig.7 IR brightness at horizontal cross-section of center of both electrodes, 1ms after breakdown

3.2. 流動場におけるシュリーレン撮影との同時撮影

火炎形状の観察などによく用いられているシュリーレン撮影像と CO 放射像の比較を行った。図 5(b) に示すセッティングにてシュリーレンと赤外の同一光路同時撮影とした。赤外カメラの露光時間は火炎核生成時の輝度飽和及び周辺領域のハレーションを防ぐため、 $10.5\mu\text{s}$ を選択した。混合気条件は前節の燃焼試験と同様、 $\phi=1$ 、 N_2 による希釈率 20%とした。初期圧力 400kPa、初期温度 25°C とし、放電ギャップ近傍に約 8m/s の流動をつけた。撮影結果の一例を図 8 に示す。本図は CO 放射像を擬似的に赤く着色し、シュリーレン画像上に合成した図である。図中右から左下方向へ向けて流動がついている。これよりシュリーレン法では CO 放射に比べより広範囲に像が形成されていることがわかる。前述の通りシュリーレン像は気体中の密度ムラを影として可視化するため、放電路による加熱や火炎による予熱により火炎の存在しない領域にも像が生じる。またシュリーレン法では平行光路中の奥行き方向の積算による像であるが、CO 放射像はレンズの被写体深度次第で焦点面での情報加重が大きく奥行き方向の情報は徐々に平滑化される。以上よりシュリーレン像は CO 放射像より広い領域に像が形成される。CO 放射像については化学反応領域を可視化していると考えられるが、火炎面を特定できているかどうかについては、さらなる検証が必要である。

3.3. 放電路直接撮影との同時撮影

前項までに CO 吸収波長帯の赤外撮影を行うことで比較的

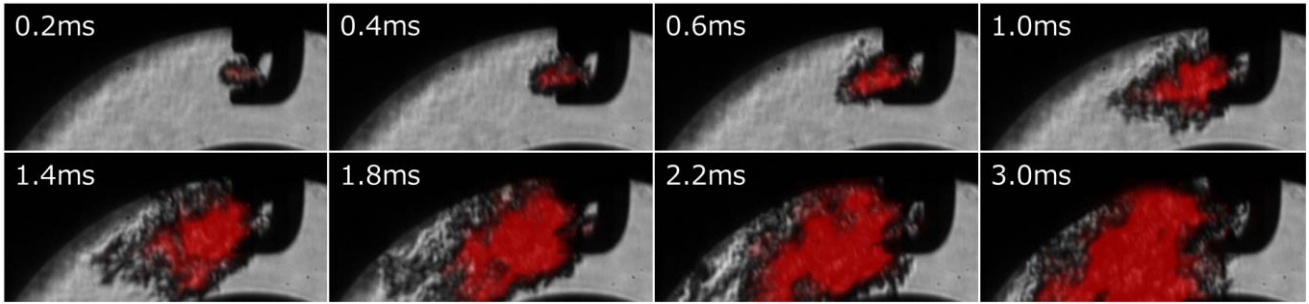


Fig.8 Composite images of schlieren and CO radiation on flow field

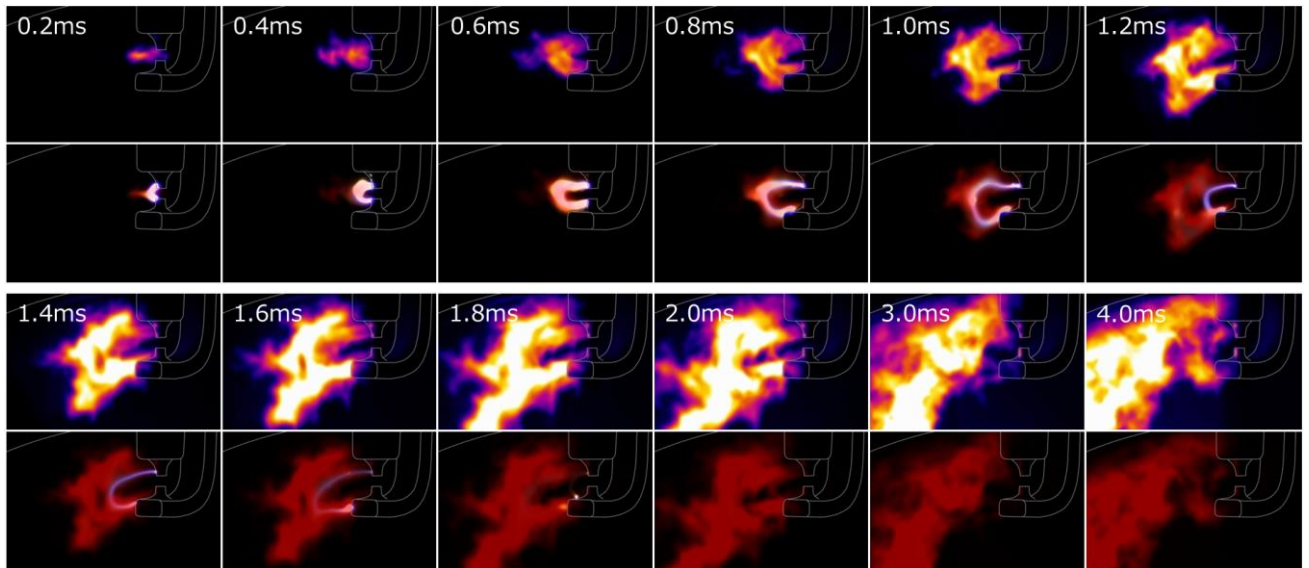


Fig.9 CO radiation and direct images on flow field (upper: CO radiation images / lower: composit images of CO radiation and direct)

精度よく放電路と火炎核の分離，および化学反応領域の可視化が可能であることが示唆された．そこで流動中で放電路伸張がある場合の火炎核形成過程を観察するため，赤外撮影による CO 放射像と放電路の直接撮影の同一光路同時撮影を行った．セッティングは図 5(a)に示す通りである．また，混合気条件，初期条件は前項のシュリーレン撮影時と同様である．撮影結果の一例を図 9 に示す．図中上段は CO 放射画像であり，センサ分解能 14bit のうちバックグラウンド輝度を基準とした 10bit 分を表示した画像である．また分かりやすくするためコンターで示してある．図中下段は CO 放射像を擬似的に赤く着色し，放電路の直接撮影画像上に合成した画像である．放電ギャップ近傍で図中右から左に向かって約 8m/s の流動がついている．ブレイクダウン後，放電路は流動に乗って伸張し，ブレイクダウン後 1.2ms 直前に最初のショートカットが発生している．その後 1.8ms 直前にリストライクが発生し，2ms 手前で放電が終了している．CO 放射画像を見ると，ブレイクダウン直後に火炎先端が放電路から大きく引き離され，下流に流されている様子が見られる．その後放電伸長が進むにつれて火炎も流され，最初のショートカットが発生するまで放電路に沿って初期火炎が成長している様子がわかる．その後

放電路のショートカットが発生し，わずかに火炎形状が電極ギャップ側に崩れるが，放電路が再び伸張するため火炎上流端は放電路に沿った形となる．放電終了後，火炎上流端の形状は次第に崩れてくるが，プラグ両電極側面付近を起点として暫くの間火炎が存在する様子が確認できる．現時点ではこれが火炎生成であるのか単に高温の CO が滞留しているだけであるかは不明である．今回の混合気条件は， $\phi=1$ ， N_2 希釈率 20%と比較的安定して燃焼する条件であることに留意する必要がある．また，前述の通り両電極チップ部以外は $\epsilon=0.94$ の黒体塗装を施してあるが，少なからず赤外反射の影響も存在する．これらの初期火炎生成過程は，混合気条件，温度，流速，乱れなどの雰囲気初期条件，放電形態や燃焼サイクル周期などによって大きく変化するものと考えられる．

4. 結言

本稿ではセンサ冷却型高速度赤外カメラを用い，CO の放射波長帯を可視化し，シュリーレン撮影や放電路の直接撮影との同一光路同時撮影を行うことで，火花放電点火による初期火炎形成過程の観察を試みた．得られた知見を以下に示す．

- (1) 可視領域の放電輝度が強い高電流型フルトラ式点火コイルでの放電においても、CO放射帯域の放電輝度は初期火炎核輝度に比べ無視できるほど十分小さい。そのため、放電路と初期火炎核の分離観察が可能であることが示唆される。
- (2) 流動場での火炎形成過程において、CO放射像とシュリーレン像を比較するとCO放射像に比べシュリーレン像はより広い領域に像が形成される。シュリーレン法では放電による加熱や火炎による予熱により火炎の存在しない領域にも像が形成されるためである。
- (3) 流動場において放電路伸張に沿って初期火炎が形成される。放電路のショートカットやリストライクが発生した場合でもその後の放電路伸張に沿った形で火炎が形成され、放電が終了した後も電極近傍にCO放射像が存在する。

火花放電点火による初期火炎形成過程は、混合気条件や雰囲気初期条件により大きく変化するものと考えられる。より詳細なメカニズム解明のためには様々な条件下での検証が必要である。

謝 辞

本研究において、高速赤外カメラ使用に関して株式会社フオトロンから多大なサポートを受けた。ここに深く謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) J.D.Dale, M.D.Checkel, P.R.Smy.: "Application of High Energy Ignition System to Engines", Prog. Energy combust. Sci. Vol.23, pp.379-398, (1997)
- (2) C.Arcoumanis, T.Kamimoto.: "Flow and Combustion in Reciprocating Engines", Springer, (2009)
- (3) S.Yu, O.Tan, M.Ives, M.Liu, L.Li, X.Chen, M.Zheng.: "Parametric Analysis of Ignition Circuit Components on Spark Discharge Characteristics", SAE Technical Paper, 2016-01-1011, (2016)
- (4) 阿部, 土井, 柴田, 杉浦, 横尾, 中田.: "点火プラグの要求電圧低減手法の開発", 自動車技術会論文集 Vol.46, No.3, pp.603-608, (2015)
- (5) 緒方, 片岡.: "EGR 燃焼エンジン向け高エネルギー点火システムの検討", 自動車技術会論文集 Vol.47, No.2, pp357-362, (2016)
- (6) T.Shiraishi, A.Teraji, Y.Moriyoshi.: "The Effect of Ignition Environment and Discharge Waveform Characteristics on Spark Channel Formation and Relationship between the Discharge Parameters and the EGR Combustion Limit", SAE Technical Paper, 2015-01-1895, (2015)

- (7) 堀.: "火花点火機関における放電経路伸長と再放電のモデリング", 自動車技術会 2016 年秋季大会学術講演会講演予稿集, 20166386, (2016)
- (8) R.N.Dahms, M.C.Drake, T.D.Fansler, T.W.Kuo, N.Peters.: "Understanding ignition processes in spray-guided gasoline engines using high-speed imaging and the extended spark-ignition model SparkCIMM. Part A: Spark channel processes and the turbulent flame front propagation", Combustion and Flame 158, 2229-2244, (2011)
- (9) N.Hayashi, A.Sugiura, Y.Abe, K.Suzuki.: "Development of Ignition Technology for Dilute Combustion Engines", SAE Technical Paper, 2017-01-0676, (2017)
- (10) 井上, 民田, 片岡, 稲田, 棚谷.: "定容燃焼容器を用いた流動場における放電現象の解析", 第 28 回内燃機関シンポジウム, 20178101, (2017)
- (11) 渡邊, 河原, 富田.: "高速度カメラを用いた初期火炎核形成過程の可視化", 第 28 回内燃機関シンポジウム, 20178026, (2017)
- (12) 佐山, 木下, 政所, 冬頭.: "高気流・高希釈条件での点火現象の詳細解析", 第 27 回内燃機関シンポジウム, 53, (2016)
- (13) 佐山, 木下, 政所, 増田, 冬頭.: "高流速条件での放電経路の短縮化現象のモデル化 (第 1 報)", 第 28 回内燃機関シンポジウム, 20178077, (2017)
- (14) 増田, 佐山, 冬頭, 永岡, 野口, 杉浦.: "高流速条件での放電経路の短縮化現象のモデル化 (第 2 報)", 第 28 回内燃機関シンポジウム, 20178123, (2017)
- (15) 矢尾板, 矢ヶ崎, F.Marcotte, V.Farley.: "高速赤外カメラを使用した, 燃焼解析, 流体解析, 衝突破壊試験, 切削加工の温度測定への取り組みとその問題点", 自動車技術会 2017 年春季大会学術講演会講演予稿集, 20175441, (2017)
- (16) E.Mancarusio, B.M.Vaglieco, L.Sequino.: "Using 2d Infrared Imaging for the Analysis of Non-Conventional Fuels Combustion in a Diesel Engine", SAE Technical Paper, 2015-01-1646
- (17) 岡部, 守野, 堀, 端無.: "赤外カメラによる点火プラグの温度計測", デンソーテクニカルレビュー Vol.13 No.1, pp.64-70, (2008)
- (18) 武藤, 木本, 加藤, 中山, 金子.: "プレイグニッション発生時の点火プラグ温度分布計測", 自動車技術会 2017 年春季大会学術講演会講演予稿集, 20175184, (2017)
- (19) 新岡, 河野, 佐藤.: "燃焼現象の基礎", オーム社, (2001)
- (20) NIST Chemistry WebBook, <http://webbook.nist.gov/chemistry/>