

流動中の火花放電路形状の三次元的計測に関する研究

日大生産工(院) 山田 啓太 日大生産工 今村宰 日大生産工 山崎博司
日大生産工 秋濱一弘 日大生産工(院) 傅 建華 日大生産工(院) 柴田 亮

1. 緒言

近年, 地球温暖化への対策として環境適合性に優れた高効率エンジンの開発が進められている. ガソリンエンジンの熱効率は40%を超えているものも市販されているが, 更なる熱効率の向上策として, リーンバーンが注目されている. リーンバーンのメリットは低温燃焼により熱損失を抑えることができること, 作動流体の比熱比の向上により理論熱効率を向上させることが可能な点などが挙げられる.

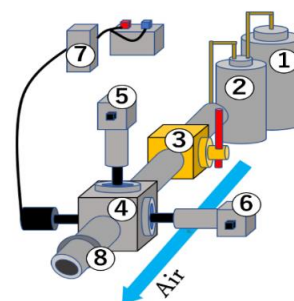
他方でリーンバーンでは層流燃焼速度が低下するため, 流動を強めて乱流燃焼速度を高め燃焼期間を短縮する必要がある. 特に高希釈化が進むと要求される流動が強くなり, 安定した点火が困難になってくる. 最適な点火形態を考える時に放電路すなわちプラズマの状態を把握することは非常に重要である. このような観点から, 流動中における火花放電の放電路長と線抵抗の関係について, 先行研究では火花放電路の路形や放電の輝度などをハイスピードカメラで撮影し, 分析を行ってきた¹⁾. 他方で, 3次元的に複雑に変形する放電路を1つのカメラで撮影するのでは, その撮影方向の正射影の情報のみを得ていることになり, 特に放電路の長さの見積もりや放電路の移動速度の見積もりについては実際の長さ, 速度より小さく見積もっている可能性がある. 本研究ではこのような背景から, 高流動場中における放電路形状のより高精度なモデル化を目指し, 伸長された放電路の三次元的な長さの計測の検討を行った. 本報告では主に撮影された放電路面像から放電路の3次元形状の再構築する手法について述べる.

2. 実験装置及び実験方法

実験装置の概要をFig.1に示す. 実験装置は高流動場中における火花点火を模擬できるものとなっており, 高圧ガスをバッファータンクに充填した後, 電磁弁を急開放することによって高流動を生成することができる. テストセクション部に点火プラグを設置して, 流動中での

火花放電の様子を高速度カメラを用いて二方向からの観察を行った. 本実験の手順では, ガスボンベ内の圧縮空気をバッファータンクに任意の圧力になるまで充填しディレイパルスジェネレーターからの信号により, 電磁弁を急開放し, テストセクション部に流動を与える. テストセクション部の上流及び下流にあるオリフィスによって流速が制御されテストセクションの圧力は, バッファータンク内の圧力が1MPaの時0.43MPa程度となり, 設定されたオリフィスカ径ら流速は18.5m/s程度である. 電磁弁が開放されてから1.7秒後にイグニッションコイルに4ms充電し, 一次コイル側の電流を遮断することで点火プラグに接続されている2次コイル側に高電圧を印加し放電させる. 放電エネルギーは60mJ程度となっている. 放電路の様子は可視化窓を通して観察を行った.

Fig.2に本研究で用いた観察系を示す. このように直交する2方向から2つの高速度カメラ(Phantom Miro M310, Phantom v2512)を用いて, 35000fpsで放電路の3次元的な変形について観察を行った. 同時刻に得られた2つの画像をOpenCVを用いて処理することで放電路を3次元に再構成し, 放電路の変形の様子を把握した.



①Air cylinder ⑤M310High-speed camera
②Buffer tank ⑥v2512High-speed camera
③Solenoid valve ⑦Igniter
④Test section ⑧Orifice

Fig. 1 Experimental device

A Study on Three-Dimensional Measurement of Spark Discharge Path Shape in Flow

Keita YAMADA, Osamu IMAMURA, Hiroshi YAMASAKI, Kazuhiro AKIHAMA
Chien-hua FU, Ryo SHIBATA

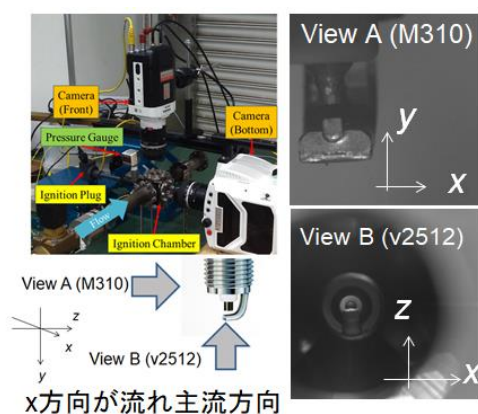


Fig. 2 Observation system using two high-speed cameras

3. 実験結果及び考察

Fig. 3には本研究で得られて典型的な連続写真を示す。



Fig. 3 Typical series of images in the bottom view

(The mainstream flows from left to right.

Camera is phantom Miro M310 and frame rate is 35000fps. Gas is Air and Tank Pressure is 3.0 MPa. Orifice diameter is : 8mm)

図は Fig. 2 における ViewA の方向から, phantom Miro 310によって撮影されたものであり, 主流は左から右方向に流れている. このように流れ方向に放電路は大きく変形している. 同時刻に直交方向からも撮影しており, 同時刻の放電路の写真を示したのが Fig. 4 である.

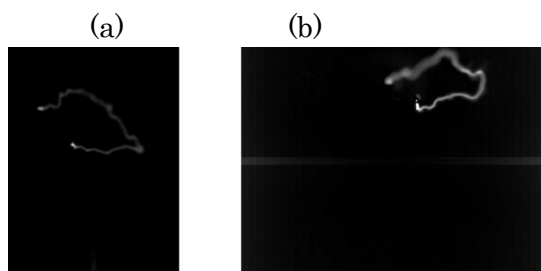


Fig. 4 Typical a set of captured image with two cameras ((a) view A (phantom m310) and (b) view B (phantom v2512))

本実験では, 実験セットアップの関係で実験ショット毎に2つのカメラのシャッターの開く時刻にわずかに違いが生じており, 解析においてはできる限りシャッターの開く時刻が近いものを選んで解析している. Fig. 4から, 流れに沿って点火プラグ付近から放電路が延伸し, 複雑な曲線となっており, その変形は特定の平面内にとどまっていなかったことが分かる. この3次元的な曲線形状の把握及び測定のために, Fig.5 に示すような手法を用いて解析を行った.

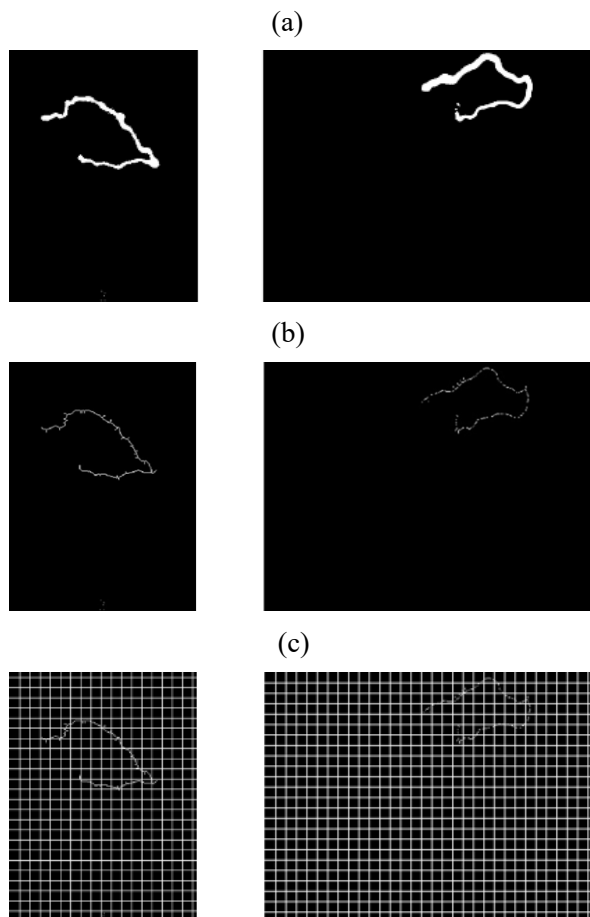


Fig. 5 Method of image processing in this study (a) Binarization (Threshold is 25 a.u. in left figure and 70 a.u. in right figure) (b) Center line detection (c) Grid drawing

まず, 第一に二つの画像に対して任意で設定した閾値によって二値化処理(Fig.5(a))を施した後, 放電路に対して中心線を書き出した(Fig.5(b)). さらにグリッドを縦横ともに10pix毎に追加した(Fig.6(c)). グリッド線を追加したのは曲線を自動で認識しているが, まず第一に画像の明暗が大きいところや放電路がねじれているところでは自動での認識が難し

く, そのような点を解析者が画像をクリックすることで座標を記録しやすくするためである. また放電路の一部が, 特に点火プラグの近傍で点火プラグに影となって観察できないような場合も生じる. このような場合もおよその点を推察して放電路形状を決定することが可能である. このような工夫を施して得られた画像から, 描画されたグリッドと中心線の交点の座標を抽出し三次元座標の取得した. この3次元のデータをもとに, 3次元放電路の再構築を行ったものがFig.6である.

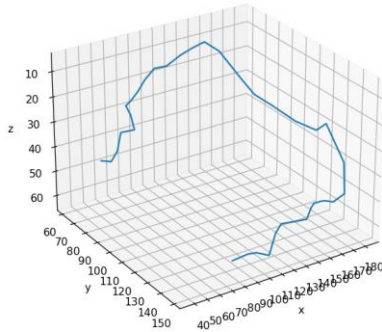


Fig. 6 Reconstruction of 3D shape of discharge path

このようにして放電路の3次元の形状の把握をすることが可能となった. さらに, 三次元的に放電路が変形していく時間履歴を観察するために, Fig.6 に示した3次元の放電路の形状を, 時系列に沿って描画したものがFig.7である. このように時系列に沿って描画することによって, 放電路がどの面に沿って移動しているのかの検証が可能となった. 今後, このデータを基に放電路の移動速度について検討を行う予定である.

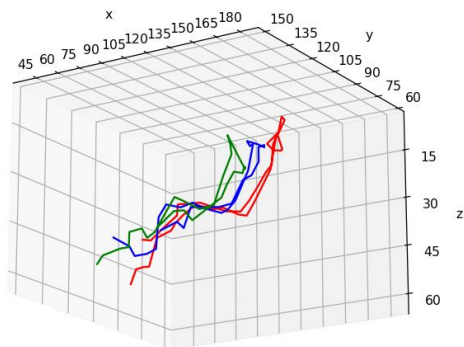


Fig. 7 A series of three-dimensional deformation of the discharge path

Fig. 6のように放電路の3次元の形状が把握できたので, これをもとに放電路長さの計測を試みた. Fig. 8 にその概要を示す.

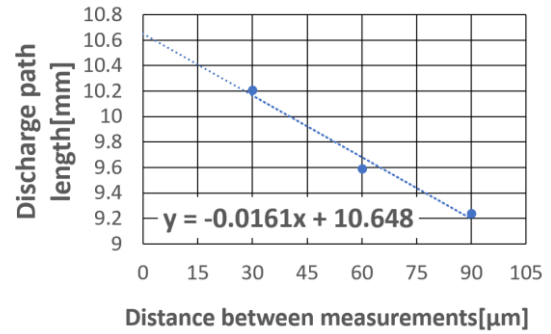


Fig. 8 Effect of gap of measurement points on total length of discharge path

放電路は曲線となっているが, その計測された点の最小幅は撮影の際のピクセルである. 今回の実験では30pixが1mmに相当している. それらの点を折れ線で結び, その長さの合計を放電路長さとした. しかしながら, この測定幅によって見積もられる放電路長さに任意性が生じる. このため測定する点の間の距離を変えて放電路長さを算出したものがFig.8である. 最小の測定点間距離は1pixに対応している. このように測定点間距離を大きくしていくと放電路長さが短く見積もられる傾向が見られ, その傾向は測定点間距離に対してほぼ線形であった. 実際の放電路は曲線であるから, 測定点間距離が無限小の時に実際の放電路の長さと考え, 傾向から各プロット点間の距離を求め. 以下に毎点, Fig.8で得られた近似曲線を延長し, その切片を放電路長さとして定義した. これから, 今回の伸長された放電路長さは10.65mmほどであると予測することが可能となった. これにより3次元に変形した放電路長さを定量的に見積もることが可能となった.

次に, 点火モデルを考える際に用いられる, 下記のKimの式(1)と呼ばれる関係式では,

$$V_{gc} = 40.46 l_{spk} i_s^{-0.32} p^{0.51} \quad (1)$$

V_{gc} , l_{spk} , i_s , p は各々ギャップ間の電圧, 放電路長さ, 電流, 圧力を表しており, この式で用いられている放電路長さは, 電極間を基点とし, ギャップ間距離を d_{gap} , 基点から最遠点を L_t として式(2)で表される.

$$l_{spk} = d_{gap} + 2L_t \quad (2)$$

解析によって得ることの出来たデータから Kim 式で考えられる放電路長さと、3次元形状の把握によって得た放電路長さを各画像で比較を行った Fig.9 から放電の初期から、伸長にかけて放電路の大きさは、Kim 式で考えられていた放電路長さより三次元計測で得た長さのほうが大きいことが分かる。これは Kim の式では放電路を計測する際に平面的かつギャップ間の距離と放電路の先端のみを考慮して計測していることから、流動により伸長された放電路の波打つような複雑な曲線や流れ方向に垂直方向への伸長の計測が考慮されていないことから、三次元計測との放電路長さに差が出たのだと考えられる。

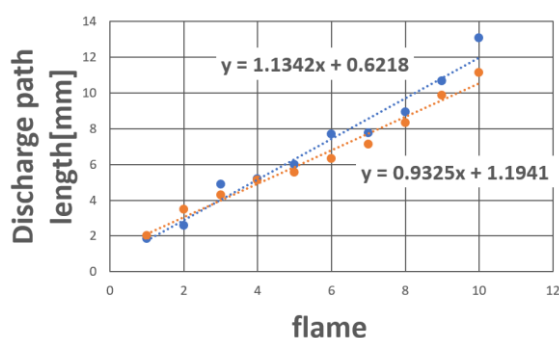


Fig. 9 Comparison of discharge path length with Kim's formula

4. まとめ

本研究では、高流動場中によって伸長された放電路の3次元的な形状の把握を行うために、直交する二方向から同時に撮影を行い、その画像の3次元の再構築の方法について検討した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 伸長された放電路の輝度によっては形状の把握が困難な場合がある。また放電路の一部がプラグの影に入り込み放電路長の測定に影響を及ぼす恐れがあることが明らかとなった。それを解決するために、グリッドを画像に追加して人間の目による追加計測も実施した。これにより3次元的な形状の把握が可能となり、放電路の時間経過に伴う変形についても可視化することが可能となった。
- (2) 3次元的な放電路形状から放電路の長さを算出した。折れ線で近似して放電路長さを算出する場合、測定点間距離に放電路長さが依存することから、そ

の傾向を調べ放電路長さを定義することができた。

- (3) 点火モデルを考慮する際に用いられる Kim の式における放電路長さと今回の手法で測定した三次元長さを比較した結果、後者の放電路長さがより長く計測されたことから、Kim の式のさらなる高精度化への可能性を確認できた。

参考文献

- 1) 傅建華他、静電気学会誌
Vol.44 No.1 pp.26-31
(2020)DOI:10.34342/iesj.2020.44.1.26