二方向撮影による流動中の

火花放電路形状計測の高精度化に関する研究

○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

1. 緒言

近年,地球温暖化への対策としてゼロエミッ ションへの取り組みが進められている. 電気自 動車の世界における販売台数は倍増している 状況であり、今後、ますます増加すると思わ れ,2030年には新車販売台数で電動車 (HEV, PHEV, EV, FCV) が内燃機関車(ICE) を超え るとする予測もある¹⁾.他方で,HEV, PHEVは内 燃機関を含んでおり,電動車用の内燃機関の開 発も進められている.また電動車の普及には充 電するための電力を安定的に供給する必要が ある. 以上のような観点から, 内燃機関におい ては熱効率の向上が今後も求められ続けると 思われる. 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²⁾.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. 既報³⁾にて撮影された放電路画像から放電路の3次元形状の再構築する手法について報告しているが,本報では,より高精度に放電路形状を把握することが可能となったので,その概要について報告する.

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 (Fig.1 ②)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(Fig.1 ④)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から流速は18.5m/s 程度となる. 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.

A Study on Three-Dimensional Measurement of Spark Discharge Path Shape in Flow Keita YAMADA,Osamu IMAMURA,Hiroshi YAMASAKI,Kazuhiro AKIHAMA



①Air cylinder
 ②Buffer tank
 ③Solenoid valve
 ④Test section

SM310High-speed camera
©v2521High-speed camera
⑦lgniter
⑧Orifice

Fig. 1 Experimental device



Fig. 2 Observation system using two highspeed cameras

3. 実験結果及び考察

Fig.3には本研究で得られた典型的な連続写 真を示す. Fig. 3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Fig.3において左から右 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 (Fig.2 の ViewB)からも撮影しており,同時刻 に撮影された放電路の写真の組を示したのが Fig.4 である. 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 開く時刻が近し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いこ とが分かる.



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)



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









76, 86)





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) Grid drawing (c) Discharge path measurement



Fig. 6 Reconstruction and comparison of 3D shapes of discharge paths((a) Discharge path reconstructed in previous research and (b) Discharge path reconstructed in this study)



Fig. 7 Comparison of reconstructed discharge paths





このような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.まず,第一に2方向から観察 された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, プログラムにより,曲線の座標の抽出を行った. 既報³⁾では、10pix毎に座標数値を目視で確認 を行う計測を実施していた.これは、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こと,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 じていたためである.しかしながら,解析者毎 の主観による計測誤差の影響を小さくするた めに、本報では曲線の座標の自動抽出を採用し た. なお二値化の後に、放電路に対してグリッ ドを縦横ともに1pix毎に追加した(Fig.5(b)). グリッド線を追加したのは, 曲線の座標をプロ グラムにより自動で抽出する仕様としている が,前述のよう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点火プラグの影 となって観察できないような場合でも、このよ うにグリッド線を挿入しておけば、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放電路の交点の座標を 抽出し三次元座標を取得した.この3次元的な データをもとに,既報3)(Fig.6(a))と本報 (Fig.6(b))の3次元放電路の再構築を行い比較 したものがFig.6である.本研究では,再構築さ れた3次元放電路のアスペクト比を任意で調 整することにより実際の放電路の形状に近づ けた形で再現することが可能となった. さらに, 既報3)と本報で作成した3次元的なデータを同 空間上に比較した図を, Fig.7に示した. 赤い線 で示されているのが本研究の手法により再構 築された放電路であり,青い線で示されている のが既報によって再構築された放電路である. 既報3)で再構築された放電路が緩やかな曲線を 描いているのに対して、本研究で再構築された 放電路は細部の変形が再現されており,放電路 の形状をより詳細に認識することが可能にな っている.

Fig. 7のように放電路の3次元的な形状が比較できたので、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. 放電路は曲線となっているが、その座標抽出した点の最小幅は撮影の際のピクセル幅である. 今回の実験では30pixが1mmに相当している. 抽出した3次元の座標点を折れ線で結び、その長さの合計を放電路長さとした. しかしながら、この場

合座標間の幅によって見積もられる放電路長 さに任意性が生じる.このため算出に用いる座 標点の間隔を2倍,3倍と変化させて,座標点の 間隔が放電路長さに与える影響について調べ たものがFig.8である. 最小の測定点間距離は 1pix毎の計測に対応している.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 の時が実際の放電路の長さと考え、Fig.8で得 られた近似曲線を延長し、その切片を放電路長 さと定義した.これから、本報で測定された放 電路長さは10.06mmと見積もられた. 既報³⁾で 手法を用いると放電路長が約8.94mmであり、 双方を比較すると既報3による計測手法は 1.12mmほど短く見積もってることが確認す ることが出来た.

このような計測方法の点火モデルへの適用 について簡単に議論する.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,

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

ここで、 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.

$$l_{spk} = d_{gap} + 2L_t \tag{2}$$

このような放電路長さの見積もりはよく用 いられているが、今回、解析によって得ること の出来たデータと、Kim式で見積もる手法との 比較を行った.あわせて既報との比較も行った ものがTable 1である.計測に用いた画像は放 電の初期から伸長している場合であるが、この ような場合には、放電路の長さはKim式による 見積もりに対して本報告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に起 因すると考えられる.また、本報と既報3の比 較では,本報では得られた放電路長は座標測定 間距離が短い事から放電路の細かな変形を表 現できたため、2つと比べて長さが大きくなっ たのだと考えられる.

Table 1 Comparison of discharge path length by Kim's formula, previous research and this

research

	放電路長(mm)	
Kim式	8.34	
先行研究	8.94	
本研究	10.06	

4. まとめ

本研究では、既報³に続いて、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 のより高精度な把握を行うために、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長さの計測において 従前の方法に比べて,座標の自動抽出をする とともに,輝度の差が大きい場所や,形状が 複雑なところ,視野に放電路が入っていない 場所などでの座標抽出の問題点を解決する手 法としてグリッドの挿入による補間機構を採 用することで,放電路の3次元的な形状の把 握が可能となり,また座標の間隔も短くする ことでより高精度に放電路形状の再現が可能 となった.

2. 3次元で抽出された座標から、各点を折 れ線で結び放電路の長さを算出した. 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を確認し,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,より 放電路の特徴を捉えた計測ができていると評 価でき,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) https://response.jp/article/2021/09/28/3498 45.html (2022 年 10 月 13 日アクセス)
- 傳建華他,静電気学会誌,Vol.44 No.1, pp.26-31 (2020) DOI: iesj.2020.44.1.26
- 山田啓太他,第59回燃焼シンポジウム講演 論文集,P209 (2021)