

## 小型風洞内の高流動場における延伸した火花放電路の計測の高精度化に関する研究

日大生産工(院) ○柴田 亮 日大生産工(院) 傅 建華  
日大生産 今村 幸 秋濱 一弘 山崎 博司

## 1. まえがき

日本は 2015 年のパリ協定で、2030 年度の温室効果ガスの排出量を 2013 年度の水準から 26%削減することが目標として定められた。日本の CO<sub>2</sub> の排出量は運輸部門が全体の 17.9%，その中でも自動車が運輸部門の 86.2%を占めており、CO<sub>2</sub> 排出量削減の目標達成には自動車からの CO<sub>2</sub> 排出量の削減をするための、自動車の熱効率の向上が必須である。

自動車の熱効率を向上させる技術の一つにリーンバーンがあるが、リーンバーンでは層流燃焼速度が低下するため、乱流燃焼速度を高めて燃焼期間を短縮する必要がある。また、点火時期が進角することから、安定した点火が困難である。特に流動がある場合には放電路が複雑な形状に変形し、点火位置や初期の火炎の挙動に影響を及ぼすことが考えられるため、高流動中の火花点火のモデルが必要である。

点火モデルでは、下記の Kim の式<sup>(1)</sup>と呼ばれる関係式が用いられることが多い。

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

$V_{gc}$ 、 $l_{spk}$ 、 $i_s$ 、 $p$  は各々、ギャップ間の電圧、放電路長、電流、圧力を表す。

この式で用いられている放電路長とは、電極間を基点とし、電極間距離を  $d_{gap}$ 、基点から最遠点を  $L_t$  として

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

と矩形近似で定義されている。しかし実際の流動場中の放電路は先述したように複雑な形状をとるため、この放電路長の定義については疑問が残る。

以上のことから、本研究では流動場中の放電路長の計測の高精度化を目的とし、高流動場を生成する実験装置を用いて流動場中の放電路の様子をハイスピードカメラで撮影し、それによって得られた画像から、放電路長の算出方法を検討した。

## 2. 実験装置および実験方法

実験装置の概要図を図 1 に示す。実験手順については、まず cylinder[1]内の任意の圧縮気体を Buffer tank[2]内に任意の圧力になるまで充填、混合気を生成する。その後、ディレイパルスジェネレーターを用いて電磁弁(Solenoid valve)[3]を開放し Test section[4]に流動を生じさせる。Buffer tank 内の圧力  $P_t$  は  $P_t=1\text{MPa}$  と  $P_t=3\text{MPa}$  の 2 パターンで行い、それぞれの場合の test section[4] 内の圧力  $P_c$  は、 $P_c=0.43\text{MPa}$ 、 $P_c=1.60\text{MPa}$  である。またこの時の test section 内の流速は、点火プラグ前後に挿入したオリフィスによって制御されている。今回用いたオリフィス径によって生じた流速  $U_m$  は、 $U_m=18.5\text{m/s}$  である。電磁弁の開の信号からおよそ 1.7 秒後に Ignition Coil[6]に電圧を 4ms 印加し、その後電圧遮断により Test section 内で火花放電が生じる。放電エネルギーはコイルにより、60wJ もしくは 200wJ 程度である。その様子を High-speed camera(Phantom M310)[5]を用いて 35000fps、もしくは 31000fps で撮影し、それによって得られた放電路画像の解析を行った。

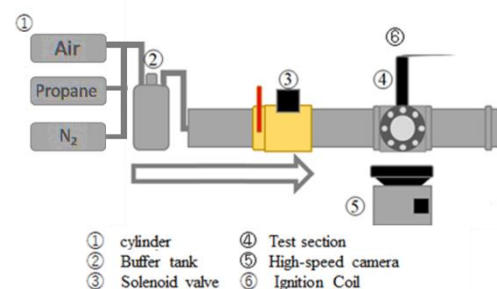


Fig.1 Experimental apparatus

## 3. 実験結果および考察

## 3.1 計測方法の検討

図 2 に典型的な放電路画像を示す。これは、左から右へ流動が流れており、それに伴って変形している放電路の様子を撮影した画像である。放電路はこのように複雑な形状をとるため、そ

## A Study on Precise Measurement of Discharge path length in High velocity Gas

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

の路長の解析は困難である。そこで本研究では放電路長の計測について、Kim の式で用いられる矩形近似のほか、二種の手法を検討した。矩形近似も含め、図 3 にそれら三種の解析の様子を示す。左の画像が、矩形近似による解析の様子である。青い破線によって示されているものが、この手法によって近似された放電路長である。中央の画像は、二階調化法による解析の様子を示している。これは、画像処理ソフトを用いて放電路画像を閉曲線が得られるように二階調化し、その周囲長さの 1/2 を放電路長と定義する。右の画像は、フリーハンド計測法の様子である。放電路をなぞるように線を引き、その線の長さを計測することによって、放電路長を計測する。先行研究から、二階調化法での計測は、画像処理の際に設定する閾値の大小が計測される放電路の面積に影響を及ぼすが、放電路長に関してはそれほど影響を与えないことが分かっている。図 4 が、画像処理の際の閾値により計測される放電路長、及び面積への影響を示すグラフである。グラフの横軸が二階調化を行う際の閾値の値、縦軸が計測された放電路長、及び面積である。フリーハンド計測法では、計測毎にその放電路長の値に誤差が生じると考えられるため、誤差についての検討を行った。一つの画像に対して各 10 回ずつフリーハンド計測法での計測を行い、その誤差を検討した。図 5 がフリーハンド計測法での誤差の検討を行った三種類の放電路画像である。表 1 の上部にその計測結果を示す。いずれの画像でも計測された最大値、最小値の値は平均値から±5%以内に収まっており、フリーハンド計測法での誤差は放電路の状態によらず、それほど大きくないことが分かった。次に、同じ図 5 の放電路画像に対して、矩形近似法、二階調化法での計測を行い、それぞれの手法で計測された放電路長と、フリーハンド計測法によって計測された放電路長の平均値との比較を行った。その結果を表 1 の下部に示す。(a)の画像では、フリーハンドで計測された値との差は矩形近似では 7.5%であるのに対し、二階調化では 44%になっている。一方(c)の画像では、二階調化では 12%の差であるのに対し、矩形近似では 32%である。(b)の画像では、どちらも約 10%程度の差である。

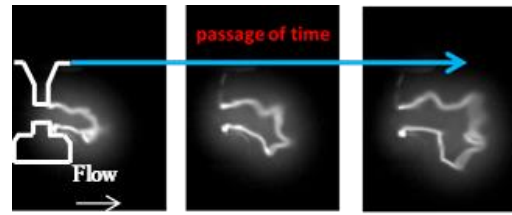


Fig.2 Deformation of discharge path in high velocity gas



Fig.3 Measurement methods of discharge path

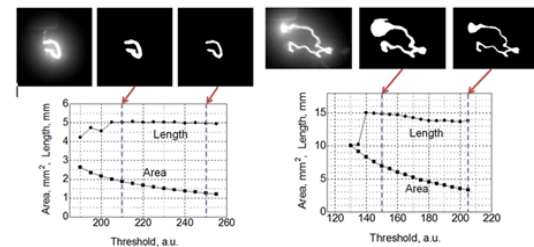


Fig.4 Effect of threshold on the discharge path length and area

Table 1 Error of discharge path length by measurement methods

|  |  | (a)               | (b)               | (c)               |
|--|--|-------------------|-------------------|-------------------|
|  |  |                   |                   |                   |
| Free-hand<br>(10 times<br>measurement) | Mean $L_f$ (mm)                                      | 4.8468            | 6.017             | 4.670             |
|  | Max $L_{fmax}$ (mm)                                  | 4.932             | 6.149             | 4.833             |
|  | Min $L_{fmin}$ (mm)                                  | 4.762             | 5.836             | 4.459             |
|  | $\frac{L_{fmin}-1}{L_f} \sim \frac{L_{fmax}-1}{L_f}$ | -1.76%~<br>+1.75% | -3.01%~<br>+2.20% | -4.52%~<br>+3.50% |
| Rectangle<br>approximation             | $L_r$ (mm)   | 5.21              | 6.570             | 6.182             |
|  | $\frac{L_r-1}{L_f}$                                  | +7.50%            | +9.20%            | +32.38%           |
| Binarization                           | $L_b$ (mm)   | 6.979             | 6.681             | 5.242             |
|  | $\frac{L_b-1}{L_f}$                                  | +44.00%           | +11.04%           | +12.25%           |

### 3.2 放電路長計測手法の適応

これらの原因を追究するため、流動場中の放電路の、変形に影響を与える圧力、発光に影響を与える雰囲気組成の条件をそれぞれ変更し、実験を行った。その後、実験によって得られた放電路画像を三種類の計測法を用いて計測、放電路長の比較を行った。その結果を図6、図7、図8に示す。また、図6の下部に示した画像を左から順に、(1)、(2)、(3)と、図7に示した画像も同様に(4)、(5)、(6)、図8に示した画像も同様に(7)、(8)、(9)と以降呼称する。実験条件はグラフの左上に示した。放電路長が急落している部分は、伸長した放電路が吹き

消え再放電する現象が発生した箇所である。また、グラフの下に示した画像は、それぞれの手法で計測された放電路長に大きく差があった場合、もしくは無かった場合の特徴的な放電路画像である。(3), (5), (8)を見ると矩形近似法における計測結果がフリーハンド計測での計測値と大きく異なる値を取っている場合は、いずれの場合も放電路の末端が点火プラグの側面に移動している事が見て取れる。また、矩形近似は(2)の様に放電路が点火プラグ間よりも大きく膨らむように変形した場合を除き、多くの場合で他の計測結果よりも大きな値を取る。(1), (2)を見ると、二階調化法とフリーハンド計測に大きな差がある場合は、放電路の発光強度にムラがある場合である事が分かる。反対に、(7), (8), (9)の様に雰囲気組成にプロパンを用いた場合は放電路全体がある程度の発光強度を保つため、二階調化法とフリーハンド計測による大きな差はあまり見られない。ほとんど全ての場合においてフリーハンドで計測される値が他の2種類の計測法により計測される値よりも小さくなっているが、これは、矩形近似法では多くの場合、流動によって放電路の末端が流され、点火プラグの側面に移動してしまう事と、比較的放電路が凸型に変形すること、二階調化法ではその計測される長さには太さが含まれることが主な原因であると考えられる。また二階調化法は、閾値の調節によっても適切な閉曲線が得られず、放電路の計測ができない場合があった。

### 3.3 現象の再現性について

高流動場中の放電路の再放電、短絡、及び伸長について、フリーハンド計測を用いて再現性を検証した。図8にその結果を示す。実験条件は、テストセクション内圧力  $P_c=0.43\text{MPa}$ 、雰囲気組成を Air、流速  $U_m=18.5\text{m/s}$  に統一し、ハイスピードカメラの撮影速度は 35000FPS に設定した。

グラフの前半部分に注目すると、再放電が発生する前の段階（特に最初期を除いた、放電の初期段階）においては、ある程度の再現性が見て取れる。しかし一度目の再放電はそれぞれの実験において異なるタイミングで発生しており、特に最も早い場合と最も遅い場合では、0.228ミリ秒ものズレが存在する。以上のように一度目の再放電、短絡のタイミングが異なるため、以降の再現性は低い。また、再放電が発生した時の放電路長に着目しても、その値との関係性は見られない。そのため、時間及び放電路長から再放電、短絡のタイミングを推定することは困難である。放電路長の伸長にのみ注目すると、再放電発生後も実験ごとにそれほど大きな差は生じておらず、再現性は高いと言える。

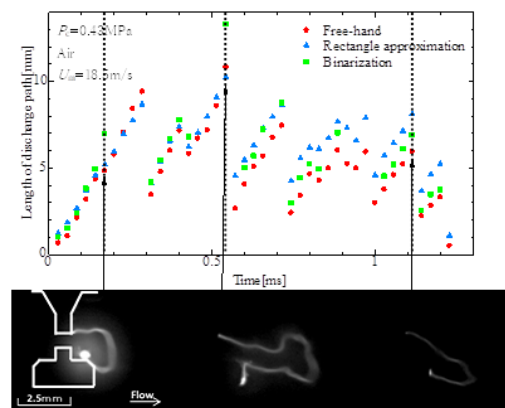


Fig.5 Comparison of measured discharge path length (Air,  $P_c=0.43\text{MPa}$ ,  $U_m=18.5\text{m/s}$ )

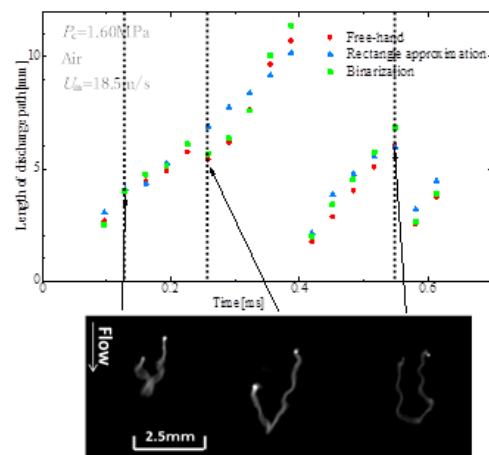


Fig.6 Comparison of measured discharge path length (Air,  $P_c=1.60\text{MPa}$ ,  $U_m=18.5\text{m/s}$ )

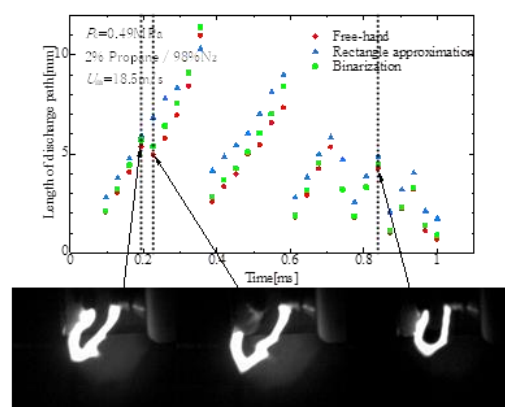


Fig.7 Comparison of measured discharge path length (2% Propane / 98%  $\text{N}_2$ ,  $P_c=1.60\text{MPa}$ ,  $U_m=18.5\text{m/s}$ )

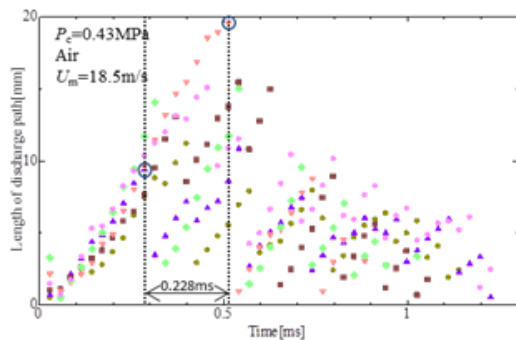


Fig.8 Length of discharge path for the same experimental condition

#### 4. 結言

本研究では、高流動場中の放電路の計測手法について検討した。得られた知見は以下の通りである。

- (1)フリーハンド計測は、放電路の状態によらずその路長を計測できるため、複雑に変形する放電路長の計測に有用である。
- (2)矩形近似では、放電路が流動によって引き伸ばされ凸型に変形することが多い事、放電路の終端が点火プラグの側面に移動し易い事から、値が大きく計測されがちである。
- (3)二階調化法では、放電路の発光具合によっては計測が困難になる場合や、非常に大きく計測される場合がある。
- (4)同一の条件下でも、流動場中の放電路が再放電するタイミングは異なり、また、その時間と放電路長との関係性は見られなかった。

#### 5. 謝辞

本研究の一部は、AICE(自動車用内燃機関技術研究組合)の支援により、次世代自動車等の開発加速化に係るシミュレーション基盤構築に関連した現象解明研究の一環として実施されたものであり、ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) Jaehong Kim and Richard W. Anderson, Spark Anemometry of Bulk Gas Velocity at the Plug Gas of a Firing Engine, (1995) SAE 952459
- 2) 白石 泰介, 寺地 淳, 森吉 泰生, スパーク放電チャンネル形成に関する点火環境および放電波形特性の影響解析, 自動車技術会論文集 46(2) (2015), 283-288
- 3) 今村 宰, 文 鉉太, 岩田和也, 秋濱 一弘, 小型風洞を用いた高速気流中における火花放電の放電特性に関する研究, 自動車技術会論文集50(3) (2019), 737-742.

- 4) 佐山勝悟, 木下雅夫, 政所良行, 増田糧, 冬頭孝之: 高速流条件での放電経路の短縮化現象のモデル化 (第1報) -点火現象の可視化による定量解析-, 第28回内燃機関シンポジウム (2017) 講演番号94, 94-20178077
- 5) 堀司, : 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, 自動車技術会論文集 48(3), (2017) 641-647
- 6) 今村 宰, 文 鉉太, 岩田和也, 秋濱 一弘, 小型風洞を用いた高流気流中における火花放電経路の流速追従性に関する研究, 2018 年度日本機械学会年次大会 予稿集 (2018) J0710104
- 7) 鄭棟元, 佐々木耕作, 菅田健志, 横森剛, 飯田訓正: 火花放電のパターンがリーンバーンSIエンジンにおける燃焼のサイクル変動に及ぼす影響, 第27回内燃機関シンポジウム講演予稿集, (2016) 講演番号6
- 8) 高村 秀一: プラズマ理工学入門, 森北出版社 (1997) 45-149