J. Inst. Electrostat. Jpn.

論文

# ガソリンエンジン用点火プラグにおける 流動により延伸した火花放電の直径に関する考察 傅 建華\*, 今村 宰\*\*.<sup>1</sup>, 秋濱 一弘\*\*, 山崎 博司\*\* (2019年9月12日受付: 2019年12月16日受理)

# A Study on the Diameter of Elongated Spark Discharge Chanel in Flow Field in the Ignition Plug for Gasoline Engine

Chien-hua FU\*, Osamu IMAMURA\*\*, Kazuhiro AKIHAMA\*\* and Hiroshi YAMASAKI\*\*

(Received September 12, 2019; Accepted December 16, 2019)

From the global CO<sub>2</sub> reduction trend, improvement in thermal efficiency is required for the powertrain of automobiles. A promising direction for gasoline engine is lean burn. In the lean burn, since the laminar burning velocity decreases, the turbulent flow is intensified to shorten the burning time. Stable ignition in the high velocity and turbulent flow is required in combination with the advance ignition timing. At this time, since the discharge path at the spark plug gap is elongated by the flow and it is assumed that the elongation of the discharge path affects the behavior of the ignition to flame propagation, it is important to understand the phenomena and to model the effect of such discharge path elongation on the ignition behavior. From this background, the discharge characteristics at spark plug gap in the flow were investigated using a small wind tunnel. The deformation of the discharge path in the flow was observed using a high-speed camera, and the current and voltage at the spark plug were measured. The relationship between them was investigated and compared with previous works. Especially in this report, the relations between the electric current and diameter of discharge path were discussed analytically.

# 1. はじめに

パリ協定による世界的な CO<sub>2</sub> の低減の方向性から,内 燃機関においても熱効率の向上が求められている. ガソ リンエンジンにおいては,リーンバーンが熱効率の向上 策として有望視されている. 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 縮する必要があるが,空気過剰率の増加に伴って要求さ れる流動が強くなり,あわせて点火時期が進角すること から,安定して点火することが困難になってくる. 特に 流動がある場合には,放電した放電路が流動によって引 き伸ばされ,場合によっては放電が維持できなくなり, 放電路が短絡したり,再放電するような現象も観察され

 キーワード:火花放電,着火,プラズマ
 \*日本大学大学院生産工学研究科機械工学専攻 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)
 Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Industrial Technology, Nihon University, Chiba, 1-2-1, Japan
 \*\*日本大学生産工学部環境安全工学科

(〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1) Department of Sustainable Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University, Chiba, 1-2-1, Japan

imamura.osamu@nihon-u.ac.jp

DOI: https://doi.org/10.34342/iesj.2020.44.1.26

ている.流動による放電路の変形は放電路の抵抗値の増加をもたらし、電流、電流プロファイルが変化する他、放 電路の変形により、点火位置や初期火炎の拳動に影響を 及ぼすことが考えられる.ガソリンエンジンにおける筒 内の燃焼をモデル化する上で、このような放電路の延伸 と再放電を含めた点火のモデリングが必要であり、その モデル化を目指して、定容容器を主として用いた実験<sup>10</sup> や、小型風洞を用いた実験<sup>20</sup>、渦流式の燃焼室を用いた 実験<sup>31</sup>などが近年実施されている.他方で点火モデル<sup>40</sup> においては、Kimの式<sup>50</sup>と呼ばれる電極間の放電路長を 加味した以下のような電圧、電流の関係式が用いられて いることが多い.

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

*Vsc, lspt, i, p*は, 各々, ギャップ間の電圧, 放電路長さ, 電流, 圧力を表す. Kim の式は, そもそもは自動車用の 点火プラグ周りの流動について調べるために, 点火プラ グ間の電圧と電流を測定することで点火プラグ周りの流 動を見積もるために作られた実験式であるが, 今村らの 実験の結果<sup>2)</sup>もこの式に沿うものとなっている. 他方で (1)式については, 電圧の増加とともに電流がおよそ 1/3 乗で減じていくことに関しての物理的な解釈がない. ま た(1)式から放電路にどの程度のジュール熱が加わって いるかについての示唆は得られるが, 放電路の太さの情 報がなくそのエネルギー密度が不明である.エンジン筒 内では放電により雰囲気の予混合気が点火し火炎伝播す るが,球状の火炎が外側の未燃部に向かって伝播するに あたり,未燃部を火炎面からの伝熱で予熱する必要があ るため,火炎面の曲率が大きい時は火炎伝播に関しては 不利な状況となる.放電路を円柱状とし,このプラズマ の周りから火炎の伝播が始まるとすると,プラズマが細 く曲率が大きい場合に比べて,プラズマが太く曲率が小 さい場合の方が初期火炎の曲率が小さいと想像され,火 炎伝播しやすいと考えらえる.このような観点から放電 路の径を点火モデルのパラメータとして加えることは意 義があるものと思われる.

以上の観点から,本報では小型風洞を用いて,放電路 の延伸の様子について,特に放電路の太さについて着目 し検討を行ったものである.その概要を以下に報告する.

#### 2. 実験装置および方法

実験装置の全体図を図1に示す.実験装置は文献<sup>2)</sup>に 示されるものと同様である. ガスボンベからバッファー タンクに混合気が一度貯められた後、電磁弁を開くこと でバッファータンクから定断面積の流路内に混合ガスが 流れ込む、その流路内で火花放電を行い、その様子を観 察できる実験装置となっている. 流路は直径 25 [mm] の円形断面積であり、点火プラグ前後にオリフィスを挿 入することで流量の調整を行っている.火花放電が行わ れるテストセクションでの平均の流速はオリフィスの面 積が一定であれば圧力によらず、理想的にはオリフィス 径を定めることで圧力によらず一定流速下における試験 が実施できる. 流速の分布および絶対値については, PIV を用いた計測により検討を行っている<sup>®</sup>.本報では 流速として、オリフィス径を基に算出された流速 Um, を用いて記述する。なお本報で示す実験結果は主に Um =18.5 [m/s] の場合である.

点火プラグは NGK 社製の PSPE プラグ, 点火コイルは 10個のコイルを 2直 5並列に接続しており, 文献"に示



図 1 実験装置概略図 Fig.1 Experimental apparatus.

されているものと同様なものである。本実験では、10個 のコイルに同時に4[ms]の充電を行っている. 点火プ ラグはプラグのギャップがちょうど直径 25 [mm]の流 路の中心になるように設置されている.オリフィス間の 距離は 360 [mm] であり、点火プラグは上流側のオリフ ィスから 230 [mm] の位置に設置されている. また点火 プラグの中心から18[mm]下流の内壁に圧力孔を設け、 そこでの圧力をテストセクションの圧力として計測した. 電磁弁が開き流動が生じてからテストセクション部の圧 力が立ち上がるのに1秒程度かかるため、電磁弁の開の 信号から1.7秒後にイグニションコイルに充電し、放電、 燃焼の様子を観察した. 電磁弁の開の信号から 2.0秒後 に電磁弁を閉止し、実験を終了している. 放電の様子は 高速度カメラ(Phantom M310)にて、35000 fps でモノク 口撮影を行った. 解像度は320×240で視野は12.6 [mm] × 9.5 [mm] 程度である. 電流, 電圧の計測については, テクトロニクス社の TCPA300 および P6015A をプロー ブとして用い、オシロスコープを用いて計測した.本報 では予混合気としてはプロパン空気の予混合気であり, では放電路からの発光の分布が強く、本報で紹介する結 果の多くは空気を作動流体として用いた場合である. テ ストセクションの圧力は最大で 2.5 [MPa] 程度である.

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 電圧および電流計測の結果

図2には典型的な電圧および電流波形を示す. 雰囲気 流体の条件は、当量比φ=0.8のプロパン空気予混合気 で平均流速が Um = 18.5 [m/s] である. 放電時の圧力は 図2に示されるようにおよそ0.8 [MPa] である。時間 軸の0はプラグギャップ間の放電が始まった時刻を0 [ms] として取っており、放電時間はおよそ1 [ms] 程 度である。時刻0[ms]において、電流、電圧とも大き く立ち上がっているが、この部分には本報では着目をし ていないため時間分解能が十分ではない. その後, 電流 は緩やかに減少する一方で電圧は急上昇、急降下を繰り 返している.これは、放電路の短絡や再放電に起因して おり、その時刻で電流値にも変化が見られる、電圧の上 昇は放電路が伸長することによって放電路の抵抗値が上 昇することに起因している. その後, 放電路が短絡もし くは再放電による放電路長さの減少によって、放電路の 抵抗値が低下することから、電圧は急激に減少する.電 流が0[mA]となったところで放電は終了し、その時刻 以降, 高速度カメラでも放電路は観察されない. それ以 降はプラグ間の電荷はコイルに流れるなどして電圧が低



図 2 典型的な電流,電圧,圧力のプロファイル(当量比 0.8, 平均流速 18.5 [m/s])

Fig.2 Typical profile of electric current, voltage and pressure in the test section ( $\phi = 0.8$ ,  $U_m = 18.5 [m/s]$ ).

下している.図2には点火プラグから18[mm]下流の 地点に設けた圧力孔で測定した圧力も示している.圧力 孔は下流オリフィスから上流に112[mm]の位置にあ り,点火プラグ近傍の圧力を代表していると考えらえる. 3[ms]付近から徐々に圧力が上昇しており,これは点 火によるものである.

#### 3.2 放電路径に関する検討

次に得られた放電路の写真から、放電路の径(太さ) を算出することを試みた、図3に検討の結果を示す、実 験条件は当量比 Ø = 0.66. プラグ付近の圧力が 1.57 [MPa]の場合である.図3の(a),(b)は撮影した時間が 異なっており、各々上段の左側に示したものが高速度カ メラにより撮影された画像である.図3においては、流 動は左手から右手に向かって流れており、それに伴って 放電路形状が右手側に向かって大きく変形している様子 がわかる.この放電路形状を評価するため、画像を 8bit のビットマップとして保存後,輝度を基に二値化し,そ の閉曲線で囲まれた部分の面積と周囲の長さの1/2を計 測した.二値化の閾値を変えて,閾値がその面積と周囲 長さの1/2に及ぼす影響について検討したものが図3の グラフである.図中の上部の右側2つの画像は二値化し た後の画像であり、二値化の際の閾値は、下記のグラフ の点線部分に対応している.図3(a)および(b)において 放電路の形状は大きく異なっており, 面積は閾値を下げ ることにより大きく上昇している. 周囲長さの 1/2 につ いてみてみると、図3(a)において閾値が200以下のとこ ろでは周囲長さの1/2が急落しているが、これは上部と 下部の湾曲した部分は結合してしまうことによる.図3 (b)における閾値が140以下のところの急落も同様な理 由である.図3(b)においては閾値が210以上では単一 の閉曲線が得られず,計測が行えなかった.閉曲線が得 られている閾値の範囲では、広い範囲で周囲の長さの 1/2 は大きな変化をしていないことがわかる.他方で放







電路の面積については閾値に対して大きく変化してい る.また図3(a),(b)からわかるように同一の実験であ っても,時刻によって閉曲線を与える閾値の範囲が異な ることがわかる.

以上の見積もりから、本報においては、撮影された画 像から、放電路の周囲長の1/2を放電路長の長さとし、 放電路の面積を放電路長の長さで除したものを放電路径 (太さ)として定義することとした.図3に示す通り、 放電路長については、二値化の閾値の影響を受け、また 放電開始時と放電の終了時では閉曲線を生じる閾値が異 なることから、各実験において一つの閾値を定め、その 実験における放電開始から放電終了までの放電路径につ いて比較することを試みた.図4にその例を示す.放電 時間は1[ms]程度であり、35000 fps で測定しているの で、30枚強の撮影画像が得られており、それらを放電

(a) шш

0.6

開始からの時刻とともに、上段に並べた. これらを閾値 を輝度70として二値化した画像が下段である.

二値化後の画像から、適切な閉曲線が得られているも のを抽出した. 例えば時刻が171.4 [µs] のものは, 放

電路が結合しているために除外,また時刻が 600.0 [μs] のものは、放電路が切断されているために除外した. 図 4においては時刻の前に◎を付したものが, 適切な閉曲 線が得られたと判断したものである.図4では適切な閉





- れた放電路画像(下段) (空気,平均流速18.5[m/s], 圧力 0.43 MPa (abs)) Fig.4 Observed original images (Upper rows) and binarized
- images at 70 a.u. threshold (Lower rows) of discharge path  $(Air, U_m = 18.5 [m/s], p = 0.43 \text{ MPa} (abs)).$
- 図 5 Fig.5 Relationships between electric current and diameter of
  - discharge path for various pressure.

曲線が得られていると判断されたものは、6枚である. 各実験において、閉曲線が得られる画像が多くなるよう に閾値を調整した.なお空気でなく、当量比が0.5~1.0 の場合についての検討も行ったが、放電の発光の分布が 強く、二値化によって撮影された画像で適切な閉曲線が 得られていると判断できるが画像が取得できなかったこ とから、本報では作動ガスが空気の場合についてのみ述 べる.

このような手法を用いて, 空気の圧力が 0.24 [MPa] (abs)~0.82 [MPa](abs)の条件における放電路の径を, その時刻における電流値の関数として示したものが図5 である、各グラフにおいては、採用した閾値をあわせて 示している. 図4の画像は、図5(b)に対応している. 図5では電流を横軸とした. 放電路長 law, 電極間電圧 V<sub>ec</sub>, 電流 *i* は時刻により、また雰囲気条件により異なる が、これらの間には実験式である Kim の式<sup>5)</sup> が成り立 つとする. Kim の式からプラズマが放電経路に沿って一 様であるとして、単位長さあたりの電気抵抗である線抵 抗Rを算出すると、 $R = V_{sc} / (l_{spk} i) \propto i^{-1.33}$ となり、線抵 抗は電流のみの関数となる.線抵抗Rが雰囲気の組成 や流速を変化させても、電流のみ関数として整理できる ことは、著者らの過去の実験<sup>2)</sup>でも実験事実として確か められている. 線抵抗Rに寄与する要素としては、プ ラズマの断面積と電気伝導率が考えられるが、線抵抗R が電流のみ関数として整理できることという実験結果か ら,ここではプラズマの断面積が電流 i だけの関数であ ると仮定し、解析を行った、図5からは、電流値に対し て放電路径をプロットすると電流値が大きいほど、放電 路径が大きい傾向が見て取れ、電流値と放電路径の間に は相関があることが示唆される. 図5の各グラフは両対 数グラフで示しており,図から電流 iと放電路径 dとの 間の関係を

 $d \propto i^a$  (2)

と書くと、aは両対数グラフの傾きであり、0.5から 0.75の範囲にあることがわかる。

#### 3.3 考察

3.2 にて示されたように, 放電路径の径と電流値の間 には相関があることが示唆されたので, これをもとに(1) 式の Kim 式について考察を行う. 先ずは電流密度 *j* につ いて考える<sup>8</sup>. ここでは *x* 座標の 1 次元のみを考える. 電流密度 *j* は以下で与えられる.

$$j = -nev \tag{3}$$

nは電子の密度, eは電気素量, vは電子の速度である.

またポアソンの式は,

$$\frac{d^2}{dx^2}(V) = \frac{ne}{\varepsilon} \tag{4}$$

であり、Vは電圧、 $\varepsilon$ は誘電率である.速度vは、ここで は簡単に電子の衝突を考えず、電子の質量をmとして

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV \tag{5}$$

これから, vと ne を消去して

$$\frac{d^2}{dx^2}(V) = -\left(\frac{j}{\varepsilon}\right)\left(\frac{m}{2e}\right)^{\frac{1}{2}}V^{\frac{-1}{2}}$$
(6)

jが一定として、x=0でdV/dx=0、V=0の境界条件を与えて、積分すると、

$$j = -\left(\frac{4\varepsilon}{9}\right) \left(\frac{2e}{m}\right)^{\frac{1}{2}} V^{\frac{3}{2}} x^{-2}$$
(7)

の関係が得られる (チャイルド・ラングミュアの式). 式(7)から,

$$j \propto V^{\frac{3}{2}}$$
 (8)

である. 電流 i は電流密度に面積 S を乗じればよいから,

$$i = jS \tag{9}$$

面積*S*は放電路径*d*を用いて,  $S = \left(\frac{\pi}{4}\right) \vec{d}$ と書けるとすると, 式(2)および(8)を用いると,式(9)から,

$$i \propto V^{\frac{3}{2}} \times i^{2a} \tag{10}$$

すなわち,

$$V \propto i^{\frac{2(1-2a)}{3}} \tag{11}$$

式(11)における *i* の指数は, *a* = 0.5 で 0, *a* = 0.75 で(-1) /3となる.仮に*a* = 0.75 であれば, *V*と*i*との関係は式(1) によく似ていることとなる.

以上から,式(7)に示されるように電流密度は電圧の 増加に伴って増加するが,式(1)のKim式では電流は電 圧の増加に伴って減少している.この一見相反する効果 は,式(2)において実験結果から*a*>0であったこと,す なわち放電路の直径は電流の増加に伴って増加する効果 を考慮することで,定性的にではあるが説明可能である.

上記のモデルが定量的に適応できるかどうかについて 考察する. 電流密度  $j \, \varepsilon \, \mathrm{zt}(7) \, \varepsilon \, \mathrm{fl}$  いて算出してみる. 図 2 を参考に  $V = 2 \, [kV], \, x = 1 \, [mm]$  とし,電流密度 が $j = 2.1 \times 10^5 \, [\mathrm{A/m}^2]$  であり,図 5 から  $d = 0.5 \, [mm]$ を代入すると、 $i = 41 \, [\mathrm{mA}]$  となる.オーダーとしては 図 5 と合致しているものの、電流値としては図 5 よりも 小さい値となっている.上記では電子は無衝突としてい るが、実際には電子の速度は分子などとの衝突によりこ の見積もりよりも小さくなっているであろうから,この 部分については今後修正が必要である.また本報では高 速カメラの撮影画像から閾値を用いて放電路径を算出し たが、3.2で述べた通り、輝度の分布の差が大きく、単 純に一様な放電路径となっているかについては、疑問の 余地がある.そのため、放電路径の見積もりについては、 今後異なる手法を検討し、高精度化を図っていくことが 必要と思われる.

最後に放電路長について考察する.式(1)の Kim 式で は、放電路が延伸すると、それに伴って抵抗値が上昇す ることから、放電路長 *l*<sub>spt</sub> は電圧 *V*<sub>sc</sub> に比例するモデル式 となっている.上記で式(11)を導出した過程が正しいけ れば、*V*と *x* の関係も同様に考えると、式(7)からは、

 $V \propto x^{\frac{4}{3}} \tag{12}$ 

となり、必ずしも放電路長の長さは電圧に比例しないこ とが想定される.

Kim の式 (式(1)) で算出に用いている放電路長さ<sup>5)</sup>は 点火プラグのギャップから放電路の最遠点を計測し、ギ ャップから最遠点までの距離の2倍にギャップ長を加え た、いわゆる放電路長を矩形にて近似したものである。 過去の報告<sup>14)</sup>もこの手法を踏襲しているが、図3に示 しているとおりで、実際の放電路は湾曲しており、この 方法では放電路長の見積もりに誤差があることが予測さ れる. また湾曲の効果の他にも. 図3は一方向から観察 しているため、観察の奥行方向への変化については観測 できておらず、これも放電路長の見積もりに誤算が生じ る一因であると想像される.本報で展開した議論は, Kimの式(式(1))における電流の指数を合理的に説明 できる可能性があるものであるが、放電路長の指数につ いては Kim の式 (式(1)) と合致していない. これから放 電路長については、湾曲部、3次元変形を含めて精度よ く計測し、吟味し直す必要があることを示している.

#### 4. まとめ

ー様流速を生じさせることができる実験装置を用い て、流動中における火花放電の電流、電圧プロファイル の取得、および高速度カメラを用いて放電路の変形挙動 について実験的に把握を行い、特に放電路径の変化に着 目して検討を行った、その結果、明らかになったことは 以下のとおりである。

流動によって延伸した放電路の写真を一定の閾値を決 め二値化し,閉曲線が得られる場合について周囲長さ, および投影面積を算出した.周囲長さの1/2を放電路長 とし、投影面積を周囲長さで除したものを放電路径(太 さ)として定義した. 放電路径 d はその時刻の電流 i と の間に  $d \propto i^{a}$  の関係が認められ、a は 0.5 から 0.75 の間 の値であった. チャイルド・ラングミュアの式を用いる と a = 0.75 の場合に電圧が電流の(-1)/3乗の比例する ことになり、点火プラグ間の放電における実験式である Kim の式を定性的に説明することができた. なお電流の 絶対値については、誤差が大きく、放電路径の見積もり の高精度化が必要である. これに加えて Kim の式の放 電路長が電圧に比例するという関係についても、改良の 余地があることが示唆された.

## 謝辞

本研究の一部は,総合科学技術・イノベーション会議 の SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「革新 的燃焼技術」(管理法人 JST)の支援により実施された ものであり,ここに記して謝意を表す.

#### 参考文献

- 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
- 2) 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
- 3) 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講演番号 94, 94-20178077 (2017)
- 4) 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
- Jaehong Kim and Richard W. Anderson, Spark Anemometry of Bulk Gas Velocity at the Plug Gas of a Firing Engine, SAE 952459 (1995)
- 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, J0710104 (2018)
- 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,講演番号6 (2016)
- 8) 高村秀一:プラズマ理工学入門, pp145-149, 森北出版 社 (1997)