

小型風洞を用いた流動場における
放電特性に関する研究

傅 建 華

目次

第一章 緒論	
1.1 内燃機関を取り巻く現状	1
1.2 自動車用ガソリンエンジンの環境適合性と希薄燃焼	2
1.3 流動中における火花点火放電に関する従来の研究	3
1.4 本研究の目的	4
第二章 実験装置と実験方法	
2.1 緒言	6
2.2 小型風洞の設計製作と検証試験	6
2.3 実験装置と実験方法の概要	13
2.4 結論	15
第三章 既存実験式の適用および適用範囲拡張の検討	
3.1 緒言	16
3.2 流動場における放電路変形と電圧電流の変化	16
3.3 雰囲気気体の影響	28
3.4 結論	33
第四章 既存実験式の高精度化の検討	
4.1 緒言	34
4.2 画像解析による放電路長さの見積もりの高精度化に対する取り組み	34
4.3 既存実験式の解釈に向けた検討	48
4.4 放電路の断面積に関する検討	50
4.4.1 二値化処理を用いた放電路太さの検討	50
4.4.2 放電路撮影における露光時間の影響	58
4.4.3 放電路撮影における輝度値の影響	66
4.5 放電路延伸における3次元変形の影響	68
4.6 結論	76
第五章 総合考察	
5.1 放電輝度からの放電エネルギー分布に関する検討	77
5.2 電荷が移動する場におけるポアソン式の適用の検討	82
5.3 結論	87

第六章 結論	88
参考文献	90
謝辭	93

Study on Discharge Characteristics in Flow Field

Using Small Wind Tunnel

CHIEN-HUA FU

Lean burn is a well-known combustion method which has been studied for the purpose of improving the efficiency of gasoline engine in recent years. For lean burn in gasoline engines, combustion in high flow field is demanded and steady spark ignition in high velocity flow is required in advanced ignition. The flow field stretches discharge channel in the ignition phase and it affects the voltage and current profile. From this background, experimental studies were conducted focusing on the discharge channels stretched by the flow. The small wind tunnel which controls the flow velocity using orifices is used for experiments. Deformation of discharge path and electric current and voltages were measured and its characteristics were discussed to expand and improve the ignition model.

This thesis consists of six chapters including introduction and conclusion. Chapter 1 is introduction and the background and motive of research, recent advances of other researcher's works, fundamental treatment of lean burn are described. In chapter 2, the detail of experimental apparatus and experimental method are described. The small wind tunnel was made to achieve the natural flow field and the characteristic of experimental apparatus is shown. In Chapter 3, using the experimental equipment described in Chapter 2, the fluid conditions of the existing researches, such as gas composition, flow velocity and current, are expanded to lean burn condition the applicable range of the existing equation was discussed. In Chapter 4, to improve the ignition model, the improvement of the discharge path length measurement method was performed and the detail relations between discharge path length and the electric characteristics are reported. Based on the relations, theoretical analysis was performed, and thickness and intensity of discharge path are measured and discussed. Furthermore, the three-dimensional deformation of the discharge path was researched. In Chapter 5, discussions and supplementary experiments described based on the discussions in chapter 4. Chapter 6 is conclusion and the content above was summarized.

第一章 緒論

1.1 内燃機関を取り巻く現状

産業革命以降、人類は科学の力で目覚ましい発展を遂げた。この発展をエネルギー面で支えてきたものは、石油の化石エネルギーや電力網による電気エネルギーの利用であった。その電力も主に火力発電によるものであることを考えれば、1960年代に生じた流体革命以降、20世紀の飛躍的な科学技術の発展は石油、天然ガスといった化石由来の液体燃料、気体燃料によって支えられてきたものといえる。特に自動車などの移動体については、ガソリンを燃料とした内燃機関が発明されてから100年以上が過ぎた21世紀になり、世界中のいたるところに浸透し、現代社会の基盤の一つになっている。

今日においても内燃機関利用は当面必要不可欠ではあるが、環境問題と燃費についての時代の要請は変化しつつある。このような中で理論熱効率を考えるならば、内燃機関においては圧縮比などをあげることによって効率の増加は可能である¹⁾。しかし燃焼温度が上昇するなどの影響でNO_x濃度は増加することや、ガソリンエンジンにおいてノッキングなどが発生し、圧縮比向上には限界がある。他方、圧縮比向上により熱効率を高くできるディーゼルエンジンでは、完全燃焼させるとNO_xが増えてしまううえに、NO_xとPMを両方同時に減少させるための燃焼条件は限られる¹⁾。NO_xとPMの人体への有害性は従来から指摘されている²⁾。NO_x排出に関しては、排気ガス再循環(EGR)と低温燃焼(LTC)と呼ばれる制御技術がある。EGR(Exhaust Gas Recirculation)は排出された排気ガスを再度吸気ポートに戻し、燃焼室に循環させる手法である。NO_xの生成原因となる温度領域に達成しないため、熱、希釈、化学的な効果、および着火遅れによって、より低い火炎温度を達成することから、NO_x排出削減について既に様々な研究が報告されている³⁻¹¹⁾。しかしながらシリンダー内の温度と酸素濃度の低下により燃焼が不完全となりエネルギーの効率は低下し、排出ガスが増加する場合もある^{5,11,12,13)}。LTCは噴射のタイミングを制御して排出ガスの改善^{13,14)}を目指したものであり、その結果としてLTCはディーゼルエンジンの燃焼において燃料と空気の混合が改善されることで、NO_xとすすの生成を抑制することができるとされる¹⁵⁻¹⁸⁾。いずれにしても、排出ガスに対する留意が必要である。

一方で燃焼時に排出される二酸化炭素については、2015年のパリ協定で日本は2030年度の温室効果ガスの排出量を2013年度の水準から26%削減することを目標とし、さらに2022年に閣議決定された第6次エネルギー基本計画では2030年にまでに46%の温室効果ガスの削減と目標が修正されている¹⁹⁾。日本のCO₂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、CO₂排出量削減の目標達成には自動車からのCO₂排出量の削減が必要である。このような問題の解決のため、電気自動車やハイブリット自動車などの次世代型自動車の研究が行われ、21世紀に入ってからはいより加速度を増している。しかし、電気自動車の場合においては、蓄電池容量、エネルギー密度、耐久性の課題、充電時間や設備などのエネルギーデリバリーの課題など多くの

課題を有している。先に述べたとおり 20 世紀の世界的な発展で形成された化石燃料の基盤とした移動体のすべてを完全に転換するのではなく、順次転換をしながら、次世代自動車を普及させ、環境負荷、エネルギー問題を改善していく方法が現実的な選択肢といえる。これらのことから、現在から 2030 年までのエネルギー源として、交通・輸送部門においては石油が 70%以上のシェアを持つと予想されている。このことから、当面の間は従来から用いられている火花点火機関や圧縮点火機関などの内燃機関が動力源の中心とならざるを得ず、自動車がクリーンな次世代推進システムに移行するためには、内燃機関そのものさらなる改善が必要であり急務であるといえる。

1.2 自動車用ガソリンエンジンの環境適合性と希薄燃焼

以上述べてきたように、内燃機関の効率の向上は今後も求められる課題である。内燃機関のうち、自家用車に多く使われているガソリンエンジンに着目すると、ガソリンエンジンは火花点火機関であり、その熱サイクルはオットーサイクルまたは定容サイクルとも呼ばれている。その理論熱効率 η_{th} は圧縮比 ε 、作動流体の比熱比 κ とすると以下で示される。

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \quad (1.1)$$

式(1.1)からエンジンの理論熱効率の向上には ε の増大、すなわち高圧縮比化、また κ の増大、すなわち動作ガスの比熱比を高めることが重要である。現在、この観点からは圧縮比向上を狙ったミラーサイクルの採用やノック改善と冷却損失低減を両立させるための Cooled EGR 技術^{20,21)}などが採用されてきており、吸入空気量増大を狙った燃焼室の高速タンブル流の改善や可変バルブタイミング・リフト機構、ボア・ストローク比のロング化なども相まって、現在のガソリンエンジンの熱効率は、40%を超えるものも出てきている。さらに熱効率を高めるためのアイテムとして比熱比を高めるという観点から、希薄燃焼（リーンバーン）が着目されている。

希薄燃焼では混合気が薄いことから、理論空燃比における混合気の比熱比よりも空気に近づき比熱比が上昇することにより理論熱効率の上昇が見込まれ、高圧縮比についても期待できる。また希積燃焼においては、希薄燃焼限界を拡大させることで火炎温度が下がるため、窒素酸化物や冷却損失の低減に繋がる。しかし、希積割合の増加に伴い燃焼が不安定となり、サイクル間の燃焼変動は初期火炎の形状やサイズ、位置など燃焼初期の特性に大きく影響を受ける^{22,23)}。希薄燃焼の実現方法としては、GDI (Gasoline Direct injection) の成層燃焼やプリチャンバーを用いる方法、また SPCCI (Spark Controlled Compression Ignition) などが一部ですでに実用化されている。また電動化とも組み合わせという観点からも、例えば熱効率 50%を実現する「STARC」(Strong Tumble and Appropriately stretched Robust ignition Channel) コンセプトも提案²⁴⁾されており、燃焼器内の流動を積極的に利用して、放電路を

積極的にたなびかせることを利用した燃焼コンセプトが提案されている。

他方、現在、さまざまな分野でモデルベース設計 (MBD) が多く取り入れられている。エンジン設計においても重要な手法となりつつあり、Fig. 1.1 にエンジンのモデルベース設計に必要な要素モデルの概要を示している。このように MBD には様々な要素モデルが必要であり、現状すでに広く使われているものから、そもそもモデルが存在しないもの、より高精度化されたもの、もしくは適用条件の拡張が求められるものなど様々な要求がある。特に希薄燃焼においては、ストイキでの燃焼では想定されなかったモデルが必要となっている場合もありえる。本研究では、希薄燃焼で困難とされる点火に着目する。予混合気の点火には、予混合気に空間内の点でエネルギーを与え、着火に至ることができればよいが、流動によりたなびく放電路による予混合気にエネルギーを付与する体積の増加を考慮したり、もしくは火炎伝播が遅い場合に火炎内に含まれるたなびく放電路からのエネルギーの付与を考慮して点火現象を考える場合が、特に希薄燃焼では考えられる。しかしながら、放電路がたなびく様子を表現するモデルは、その精度や適用範囲を含めてよく知られているわけではない。そのため、本研究では、ガソリンエンジン内の点火モデルについて着目して検討を行うこととした。

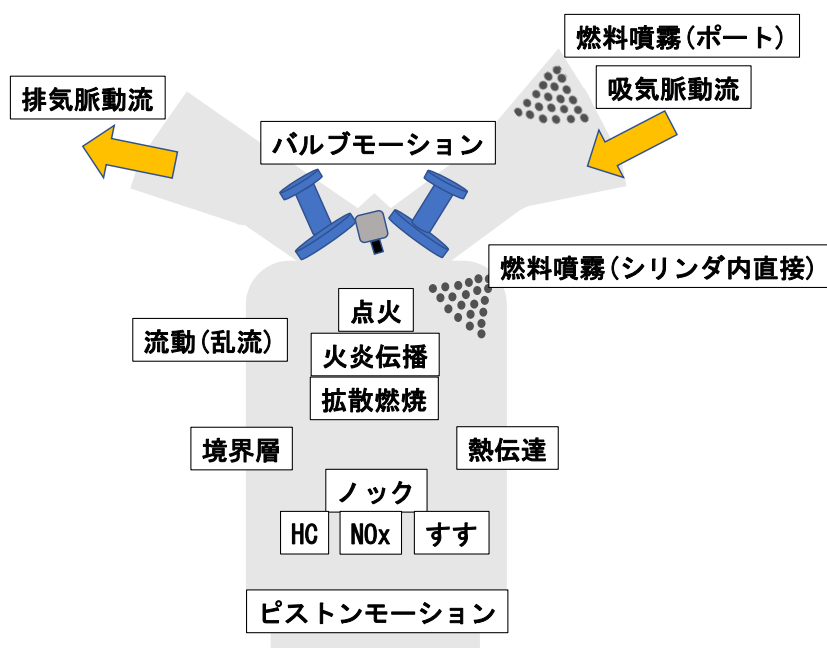


Fig. 1.1 エンジンのモデルベース設計に必要な要素モデル

1.3 流動中における火花点火放電に関する従来の研究

リーンバーン燃焼においては燃焼速度が低下するために、燃焼時間の短縮のために流動を強くする取り組みがされている。高希釈化が進むと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、点火プラグ付近に 20m/s を超えるような流動が生じている場合もある。エンジンの燃焼室内にタンブル流を起こすことが最近の主流であり、これを最適化し実機内に導入することが強く求められる²⁵⁾。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、たなびくような放電路が観察される。この放電路体積の増加を、初期火炎核の増大に積極的に使うような取り組みも見られる。しかし放電路が大きくなると放電が維持できなくなり、その後には再放電するような現象も観察される^{26,27)}。リーンバーン状況下においては点火から火炎伝播に至るまでの時間が相対的に長いと予想され、再放電を含めた火花放電の挙動、放電路の変形について考慮する必要があると考えられる。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すことから、放電中における電圧、電流プロファイルや放電時間に影響を与え、これは単位時間あたりの放電路の電力消費に影響を与え、結果として放電時間に影響を及ぼすことになる。

これらに着目した研究としては、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²⁸⁾や、渦流式の燃焼室を用いた実験²⁵⁾などが近年実施されている。他方で点火モデルにおいては、Kim の式²⁹⁾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。

$$V_{gc} = 40.46 l_{spk} i_s^{-0.32} p^{0.51} \quad (1.2)$$

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、放電路長さを変化させて実験式を構築しているわけではなく、また電圧の増加とともに電流がおおよそ 1/3 乗で減じていくことについての物理的な解釈がない。また近年では点火モデルの構築において放電路の伸長および変形については様々な手法によるモデリングが行われている中³⁰⁻³⁴⁾、それらの現象の物理的解釈としては不十分なものが多い。

1.4 本研究の目的

以上からガソリンエンジンにおける点火モデルにおいては、旧来、その目的以外に作られた既存式(1.2)が使われている状況にあり、またリーンバーンにおいては高流動であるため、流動によって放電路が大きく変形するに対応した点火モデルの構築が必要である。従来の点火モデルに関しては多くの場合について空間的に加熱された領域と時間的に加熱される領域が異なるため、それらの効果が考慮されていない。また実験的知見の蓄積、現象の物理的な解釈も含めて十分と言える状況ではない。この点を鑑み、本研究では流動中における火花放電を実験的に調べ、既存式(1.2)の検証と適用範囲の確認、またこの改善提案を行うことを目的とする。これを含めてリーンバーンにおける放電路の変形の予測モデルと変形に伴

う火花点火(放電路)のエネルギーを見積るモデルの高精度化への貢献を目指すものである。

本論文の内容は、第一章は緒論であり本研究の背景と目的について述べている。第二章では、従来の渦式燃焼器²⁵⁾と定容容器²⁸⁾を用いた研究との違いを示し、新たに小型風洞を構築し、放電期間中にピストンの移動による圧力、温度が変化せず、またはファンによる乱流場への影響もなく、小型風洞の利点を利用し、放電期間中に一様な圧力、温度を保ち、なだらかな乱流スペクトルを持つ流れ場において実験したので、その概要について示す。第三章では、第二章で作成した実験装置を用いて、既存式(1.2)について流体の条件を空気から可燃ガス、高 EGR への対応とした窒素雰囲気へ拡張し、併せて従来の研究では流速 10m/s 程度であったものを、リーンバーンで想定されている 20m/s 程度まで拡張し、幅広い条件において既存式(1.2)の適用範囲の拡張について議論した。第四章では、既存式(1.2)より精度良い予測モデルの構築のための取り組みを示した。既存式(1.2)では放電路が延伸すると共に、それに比例して電圧も上昇するという仮定を基に作成された式である。併せて、物理的なモデルと解釈が不十分である。将来的な次世代の熱機関への適用を考えると放電現象に対する理化学的な理解を積み重ねた上で、それに基づいたモデルの構築が必要である。本研究では、静電場の理論を基に、まずは放電路長さの計測法の改善と、それに伴う既存式モデルの改善提案、また見かけの太さに着目し、その物理的な意味の解明を実施した。さらに放電路の3次元変形の様子を把握を行い、得られた知見を3次元シミュレーションに適用する知見を得た。第五章では第四章までの考察を踏まえた上で、放電路内の電界が一様ではなく、変化があるとして検討を行うことで幾つかの課題について高精度化に道筋をつけ、その検証と拡張について述べる内容である。第四章での解析の仮定について、放電路の輝度の解析、電場中を電荷を有したものが移動する例として静電微粒化を取り上げ、その解析から、第四章での解析の仮定が妥当であることを示している。以上をまとめた内容が第六章としている。

第二章 実験装置と実験方法

2.1 緒言

ガソリンエンジンにおける希薄燃焼では進角に伴って、主流速が小さく乱流強度の強い流動中での火花放電、点火というよりも、むしろタンブルが崩壊しておらず、主流速が大きく乱れ強さはさほど大きくない状況で火花放電、点火現象が生ずる場合が予測される。その際の主流速は 20m/s ほどにも達し、さらに希薄化が進むとより高速の流動となる場合もある。このような主流速が大きい流動中での火花放電に関する研究は多く行われてきており、流動を生じさせるために渦式の燃焼室²⁶⁾が用いられる場合も多い。ただし圧縮行程の途中であるため、圧力、温度が時々刻々と変化すること、またそれに伴う流速の変化もあり、基礎的な放電現象の把握という意味では解析の条件が複雑になる。他方で定容容器を用いた実験も多く行われている²⁸⁾が、この場合は、通常流動を生じさせるためにファンなどを用いている。これにより所定の流動を与えることはできるが、乱流の観点からみると装置固有の周波数や波数のエネルギーが大きい乱流場となり、実際のエンジン内に存在するであろう。せん断等によって生じる乱流場とは異なるエネルギースペクトルを持つ場合が多い。以上のような観点から本研究では、一定の条件下で、“自然な”乱流を生成できる実験装置として、小型の風洞を選択した。本章では、流動を生じさせるために本研究で用いた小型風洞の設計の方針と、その PIV 計測による検証試験についてまず述べる。それに加えて、実験装置の概要について述べる。

2.2 小型風洞の設計製作と検証試験

実験に用いた小型風洞の概略を Fig. 2.1 に示す。このようにバッファータンクに貯めた気体を電磁弁を開放することによって、一気にテストセクション部に放出できる機構としている。流れの条件は、バッファータンクに貯めた気体の圧力と、流路に設置されているオリフィスのみで制御している。以下、その概要について簡単に述べる。

作動流体の温度と気体種を一定として、テストセクション内は 1 次元で上流の圧力変化が無視できる準定常とする。このときオリフィスでの質量流量 m_{dot} をすると、定常であるから、この質量流量は風洞全域で一定である。オリフィスの面積を A_0 とすると、オリフィスでチョークしているから、質量流量は

$$m_{dot} = C \sigma p A_0 / (RT)^{1/2} \quad (2.1)$$

である。ここで C は流量係数、 p はオリフィス上流の圧力、 R は気体定数、 T は温度である。 σ は臨界定数であり、

$$\sigma = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (2.2)$$

である。空気の場合、比熱比 $k=1.4$ なので、 $\sigma=0.685$ となる。なおオリフィス径を d_o とすると、

$$A_0 = \pi d_o^2/4 \quad (2.3)$$

である。テストセクション部での気体の密度を ρ とすると状態方程式から $\rho=P/RT$ であり、テストセクション部の体積流量 V_{dot} は $V_{dot} = \rho m_{dot}$ である。テストセクションでの断面積 A_t で V_{dot} を除せば、テストセクションでの平均の流速 V_t が求まる。これから V_t は、

$$V_t = C \sigma (A_0/A_t) (1/RT)^{1/2} \quad (2.4)$$

と求まる。このようにオリフィスによるチョークで流量が決まる場合には、試験部での平均流速は圧力に依存しない。そのため流速を固定して、異なる圧力における試験を実施することが可能と想像される。本研究ではこのような観点から、同一のオリフィスにおいて、圧力が変わっても同等な流速が実現されているかどうかについて検証を行った

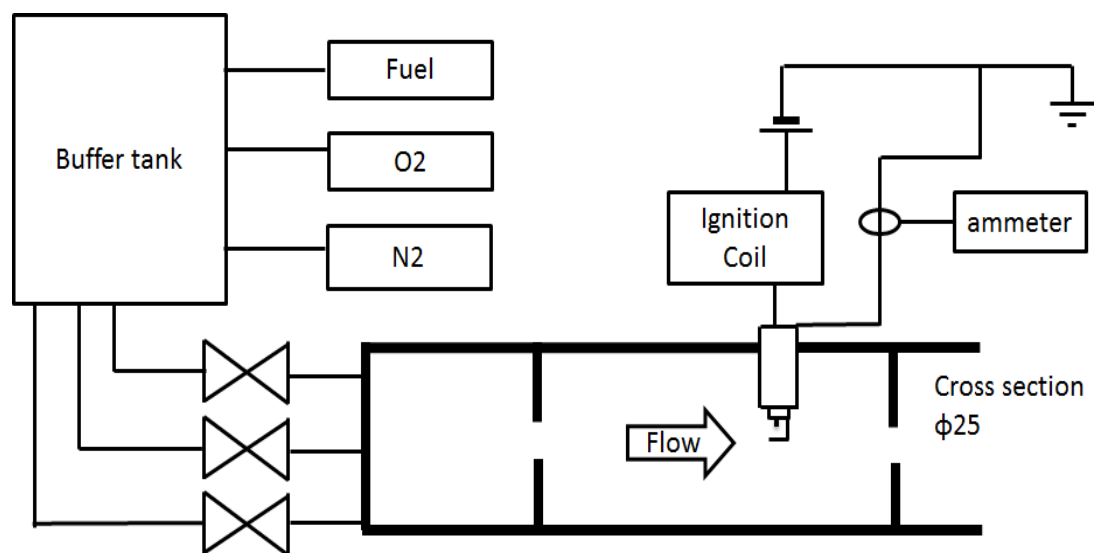


Fig. 2.1 実験装置概略図

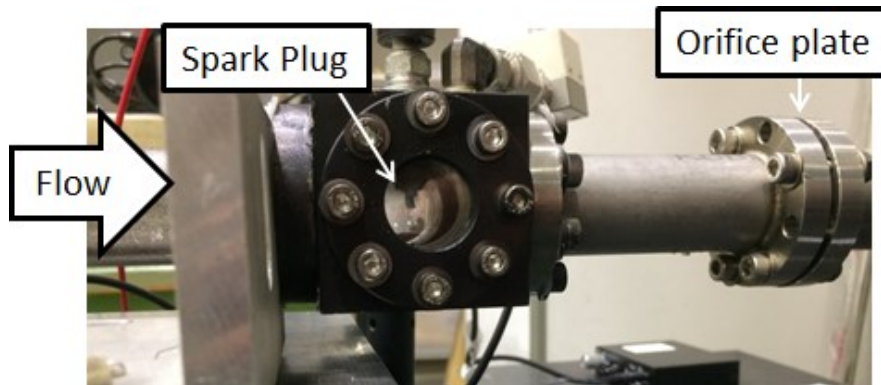


Fig. 2.2 テストセクション

流れ場の検討には粒子画像流速計測法 (Particle Image Velocimetry, 以下 PIV) を用いた. PIV は流体に追従する粒子にレーザーを照射し可視化, PIV カメラで撮影しフレーム間の微小時間における粒子の変位ベクトルを画像処理によって求め, 流体の局所速度ベクトルを算出する計測法である. この計測法を用いて小型風洞内における流動について調べた. PIV 装置概略図を Fig. 2.3 に示す.

実験に使用した PIV 用カメラは PCO AG 社製の pco1600 であり CCD1600 x 1200pixel, 14bit 諧調モノクロ, 最小 $\Delta t = 120\text{ns}$ である. 光源にはダブルパルス YAG レーザー装置 (532nm, 15Hz, 200mJ/pulse, Nano PIV, Litron Lasers 社製) とタイミングコントローラー (Labsmith 社 LC880) を用い, PC からの制御により光源とカメラを同期させた. シーディングジェネレーター (PivPart14-NUI 西華産業株式会社) から専用の気流計測用シーディング剤を混入させたオイルミストはバッファータンクに蓄えられ, 作動流体とともにテストセクションに送られる. 撮影された PIV 画像の解析には, KoncertoII を用い, アルゴリズムは single pass interrogation, バリデーションとしては Max Disp Validation を基本的に用いて解析を行った. 実験では, 作動流体を空気とし, テストセクションにおける圧力を大気圧から 0.5MPa 程度になるように変化させた. ここでは試験部の下流のみにオリフィスを挿入して実験を実施した. 下流のオリフィス径は $\phi 5\text{mm}$ から $\phi 8\text{mm}$ の間で変化させ, 計測カメラから奥行き方向の計測位置, およびレーザー強度, カメラの撮影時間差については, 実験条件に伴い, PIV を実施できる最適な条件を探索して計測を行った. 代表的な値として, 2つの画像の時間差は $10\ \mu\text{s}$ である. 空間解像度については, 前述の光学系の構成から, $8\ \mu\text{m/pixel}$ 程度であり, $32 \times 32\ \text{pixel}$ を PIV のグリッドとして設定した場合, 流速の空間解像度

は、0.26mm 四方である。点火プラグを含む 5mm 程度の幅について計測を実施した。これは、本研究では最終的には火花放電を対象としているが、火花放電の伸長を考えても高さ 5mm、横幅 15mm 程度の領域について検討することができればよいと考えたからである。これに応じてマスク処理を施した。解析ソフトウェアの **Koncerto II** を用いて、流速ベクトルを計算した後に、バリデーション処理にて妥当性が低いと思われる値の大きいベクトルを除去した。バリデーション処理の処理後の流速ベクトルの表示を Fig. 2.4 に示す。図から流体の向きや速さの観測が可能である。このようにして、同条件下で行われた測定結果画像の内、複数の画像を用いて、各条件における流速の平均、および乱れ度を取り数値化した。

Fig. 2.5 はプラグを設置して測定した結果である。プラグを挿入するとレーザー光がプラグ自体に反射し、白飛びしてしまうため、プラグ付近が上手く測定出来ていないことが分かる。また、プラグへ向かう流れがプラグ手前で流速が下がっている事が分かる。これは流れが電極方向へ向かわず、画像奥側の電極間よりも広い空間へ流れていることが考えられる。

Fig 2.4 の結果をもとに、オリフィス径 5mm および 6mm とした場合の平均流速と圧力との関係を示したものが Fig. 2.6 である。縦軸は平均流速 m/s、横軸はテストセクション内の圧力であり、0.3MPa から 0.9MPa の範囲で測定した結果である。また図中に示される点線は、式 (2.4) から計算される流速の予測値である。このグラフから、平均流速の測定値は、予測値に近い値であることがわかる。また予測値が示すと同様に平均流速はおおよそ圧力に依存しないことがわかる。このことから本装置での流路系は、オリフィス径 5mm のとき、式 (2.4) を満足した流れ場であるといえ、流量係数 $C=0.9$ とすると実験結果とよく合致するといえる。また、流速を算出するにあたって、本報では流れ方向のベクトルの絶対値を使用して平均を出しているため、流れに垂直方向のベクトルも合わせて検討を行ったが、有効数字 2 ケタの条件では結果は同一であった。また併せて乱れ (u' / \bar{U}) については、10%程度であった。

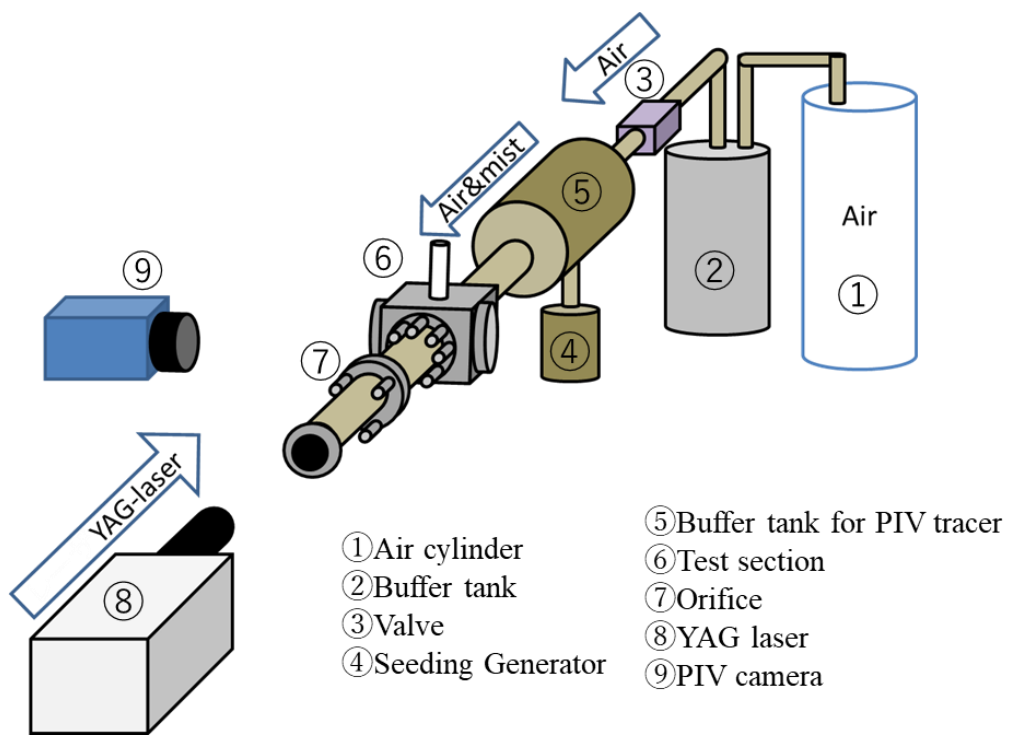


Fig. 2.3 PIV 実験装置概略図

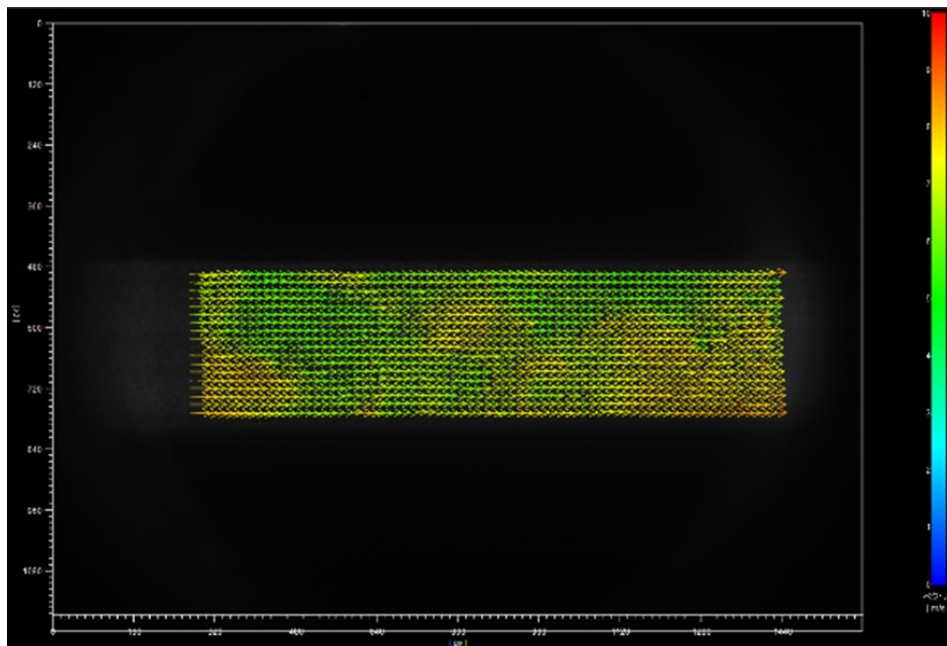


Fig. 2.4 演算処理後の PIV 画像

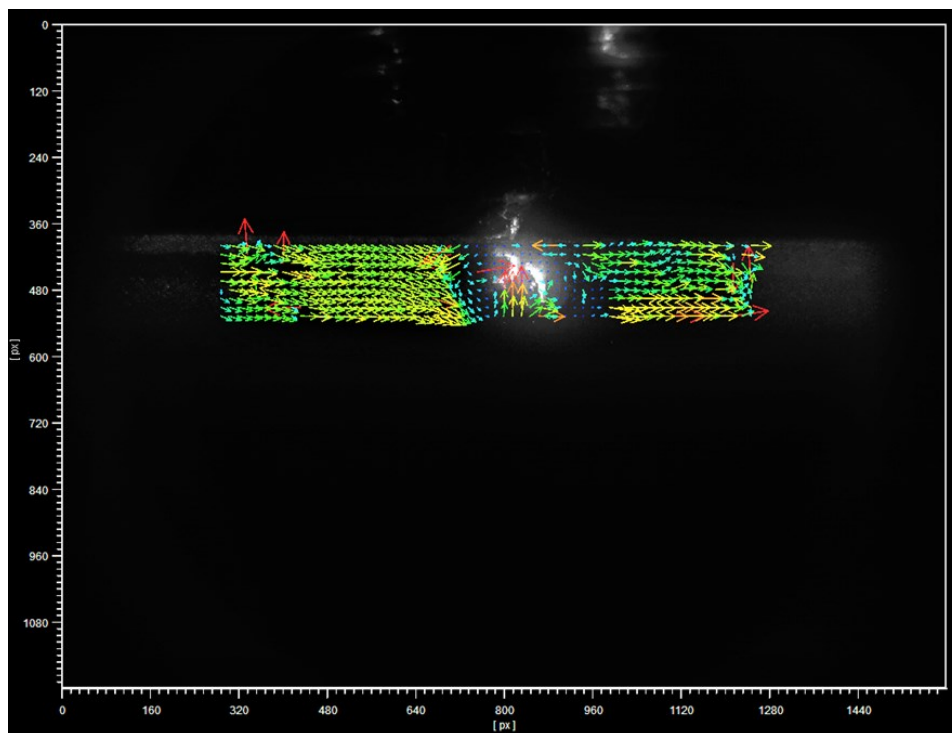


Fig. 2.5 プラグ挿入時の PIV 画像

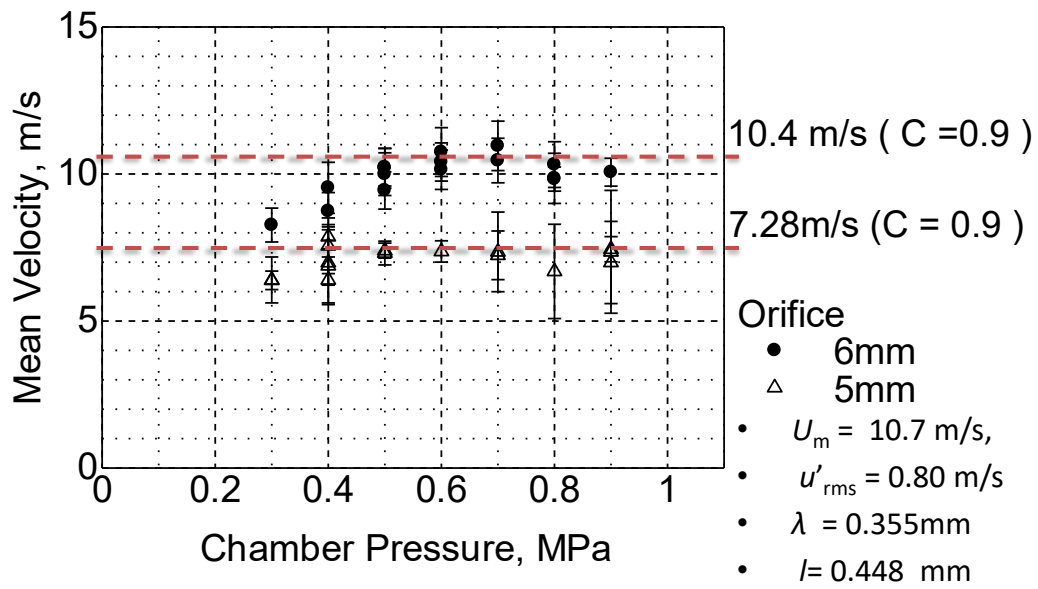


Fig. 2.6 平均流速と圧力の関係

2.3 実験装置と実験方法の概要

実験装置の概要については Fig. 2.1 に示している。前節で述べた小型風洞と、その中で放電を生じさせるとともに、電流や電圧を測定する放電系、さらに放電路の延伸を観察する観察系などからなる。

小型風洞は電磁弁を介してバッファータンクに接続されており、直管ステンレスパイプ部分の内径は 25 mm である。排気は大気条件とし、作動流体流れは圧力差のみにより駆動される。作動流体は空気、または窒素、プロパンと空気の予混合気、プロパン空気予混合気の酸素を窒素で置換したものなどを用いた。本研究はガソリンエンジンを対象としているが、燃料としてプロパンを用いたのは、気体であり扱いが容易なこと、また直鎖の炭化水素でありガソリンの主成分である直鎖の炭化水素と同様な点火特性を示すことが予測されたからである。なお混合気はバッファータンク内の分圧によって調整した。オリフィスはテストセクション部の下流に設置しているもので制御しているが、テストセクション部の上流にフレイムトラップを設置しており、その部分断面積は下流のオリフィスよりも大きい。圧力計測の結果はダブルチョークに近い状況になっている。フレイムトラップと下流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フレイムトラップから 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、そこでの静圧を計測しテストセクションの圧力とした。電磁弁の開信号発出からテストセクション部の圧力上昇までに 1 s 程度の遅れがあることから、放電開始は電磁弁会信号発出後 1.7 s とした。ほとんどの実験では、電磁弁の開信号から 2.0 秒後に電磁弁を閉じて実験を終了させた。

放電系については、点火プラグにイグニッションコイルを接続しており、電源を 12V のバッテリー、イグニッションコイルの 1 次側に 5V の 4ms~6ms のパルス信号にて充電することで、コイルの 2 次側に接続されている点火プラグのギャップ間に放電を生じさせた。5V のパルス信号は、ディレイジェネレーター (DG535) の他、実験によっては Arduino の端子よりコイルに供給している。放電時の電流と電圧値の測定には、グラウンドに流れる電流を Tektronix TCPA300 型電流プローブおよび高電圧プローブ (Tektronix P6015A)、オシロスコープ (Tektronix TBS1154) を用いた。実験に使用した点火プラグは一般四輪車、二輪車用点火プラグ (NGK 製 PSPE type) であり、点火プラグとしては、Fig. 2.7 で計測されるような放電エネルギーを用いた。この他に強力点火系として 10 個のコイルを 2 直 5 並列に接続したものも用いており、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。この場合の放電エネルギーは 200mJ 程度と見積もられる。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。

観測窓は、サファイアガラス製であり、φ25 の視野を確保している。Fig. 2.2 にテストセクションを示す。観測部は立方体として観測窓が設置してある。火花放電の撮影には、高速カメラ Phantom M310 を主として用い、状況に応じて Phantom v2512, veo1310 などを用いた。撮影開始トリガは放電信号開始もしくは終了の信号と同期させた。Phantom M310 を用いた

観測での主な撮影条件は、35000 fps でモノクロ撮影で、解像度は 320×240 、視野は概算で $12.6 \text{ mm} \times 9.5 \text{ mm}$ である。

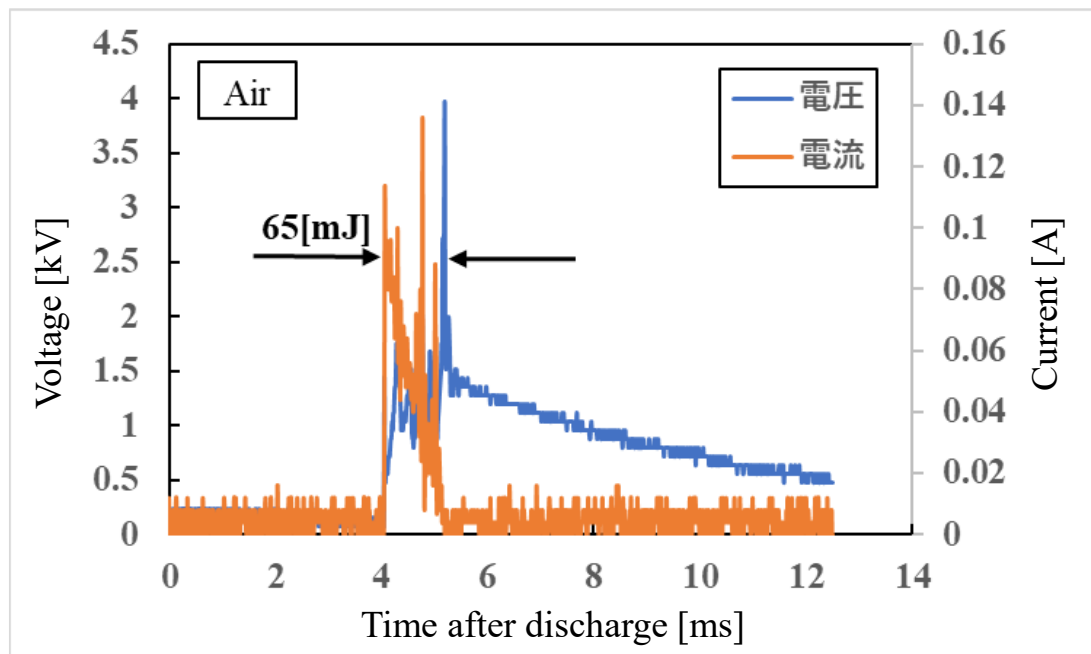


Fig. 2.7 流動場における火花放電エネルギー

2.4 結論

放電現象を検討するための流動場として小型風洞を構成し、その流路内の流れ場を検討した結果、以下の結論を得た。

1. バッファータンクとオリフィスで流動を制御する小型風洞を作成した。オリフィスの径を固定することでテストセクション内での主流速度は圧力に関わらずほぼ一定の値を示すことが明らかとなった。また流量係数を 0.9 とすることで、単純計算で見積もられた平均流速と PIV で測定された流速はよい一致を示した。
2. テストセクション内での流れ場の乱れ強さは主流の 10%程度であることが確認された。

以上の結果から、本研究で構成した装置系では、一定の速度条件、圧力条件下においては良好な流れ場を実現できていることを確認した。以後は本章で明らかとなった条件下において放電実験を行うこととした。

第三章 既存実験式の適用および適用範囲拡張の検討

3.1 緒言

第一章で述べたように、流動中における放電路の延伸を伴う放電路の電圧、電流の関係式としては、Kim の式²⁹⁾があるが、この既存式は、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り、適用範囲が明確でないなどの課題がある。また希薄燃焼に適用させるために、流速 20m/s 程度くらいまでは、その適合性について確認する必要がある。以上のような観点から、第二章で製作した小型風洞を用いて、様々な条件で流動中における火花放電実験を行い、主として Kim の式の適用範囲について検討した。ここでは主に Kim の式の適用条件の拡張について述べる。また火花放電の延伸の周囲流動への追従性、火花放電路が短絡もしくは再放電する際の電圧も、点火モデルを構築する上では必要であるため、それに関して得られた知見についても本章で述べる。

3.2 流動場における放電路変形と電圧、電流の変化

小型風洞を用いた実験により得られた放電路画像を Fig. 3.1 に示す。ここで放電エネルギーは 200mJ、撮影速度は 31000fps、各画像間は 0.057ms である。Fig. 3.1 の 5 枚目と 6 枚目の画像間で放電路が繋ぎ変えられていることが確認できる。このような放電路の繋ぎ変えの現象をここでは短絡(ショートカット)と呼称する。また、Fig. 3.2 に示すように放電路が切断され、再度放電路がつながる現象を再放電(リストライク)と呼称する。Fig. 3.2 の放電の際の放電エネルギーは 60mJ、撮影速度は 35000fps、各画像間は 0.029ms である。

Fig. 3.3 には典型的な電圧および電流波形を示す。第二章で示した実験システムにより行った放電実験の結果である。雰囲気流体は 当量比 $\phi=0.8$ のプロパン-空気予混合気であり、平均流速は $U_m=18.5\text{m/s}$ である。図において左縦軸は電圧値、右縦軸は電流値、および圧力測定結果を示している。放電開始時の圧力は約 0.8MPa である。横軸の起点はプラグギャップ間の放電が始まった時刻を 0 として取っており、放電時間はおよそ 1ms 程度である。時刻 0 において電流、電圧とも大きく立ち上がる容量成分が観察されているが、この部分に関しては時間分解能が十分ではなく、かつ本章では着目をしない。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。Fig. 3.3 には点火プラグから 18mm 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 112mm 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れる。3ms 付近から徐々に圧力が上昇しており、これは点火に起因したものと考えられる。

Fig. 3.4 は前図で示した電流電圧プロファイルを当量比を変化させた場合について重ねて表示したものである。放電時の圧力は 0.5MPa 程度であり、平均流速は 18.5m/s である。図から当量比を変化させても電流値は大きくは変化しないことがわかる。それに対して、電圧の値は当量比とともに異なる挙動を示している。これは後述の放電路の短絡や再放電の挙動が当量比によって異なることに起因するためと考えられる。

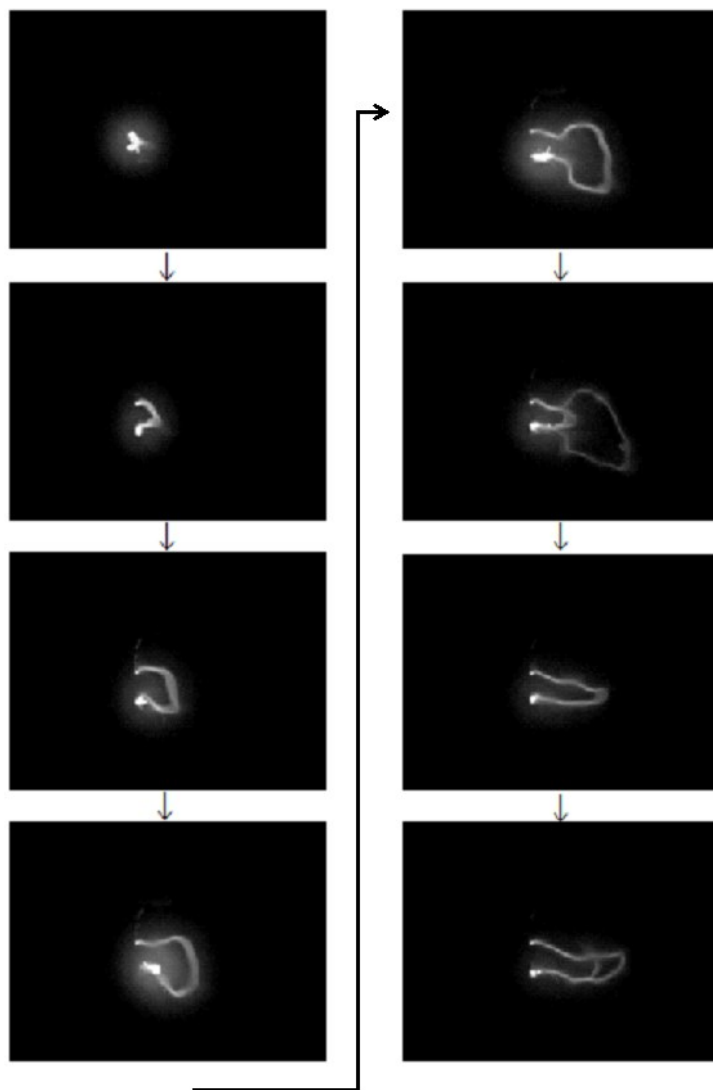


Fig. 3.1 流動場中の放電路画像 (200mJ, 31000fps, 0.057ms 間隔)

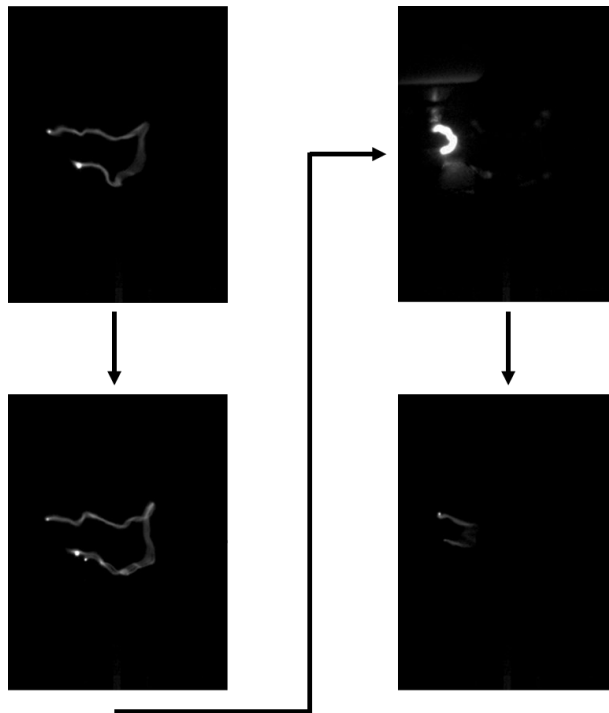


Fig. 3.2 リストライクの様子 (60mJ, 35000fps, 0.029ms 間隔)

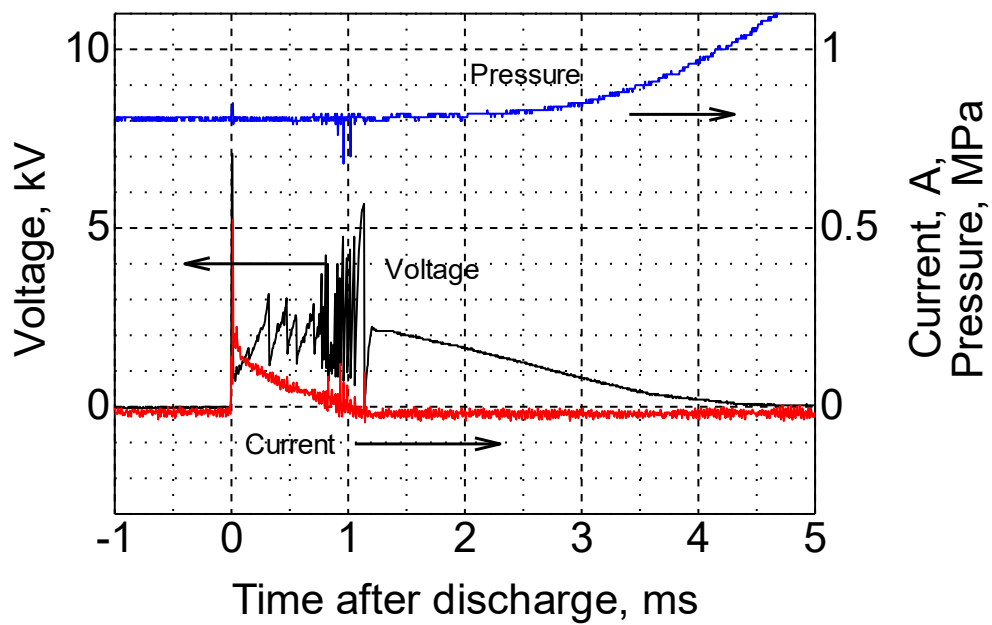


Fig. 3.3 テストセクションにおける典型的な電流, 電圧および圧力のプロファイル
($\phi=0.8$, $U_m=18.5\text{m/s}$)

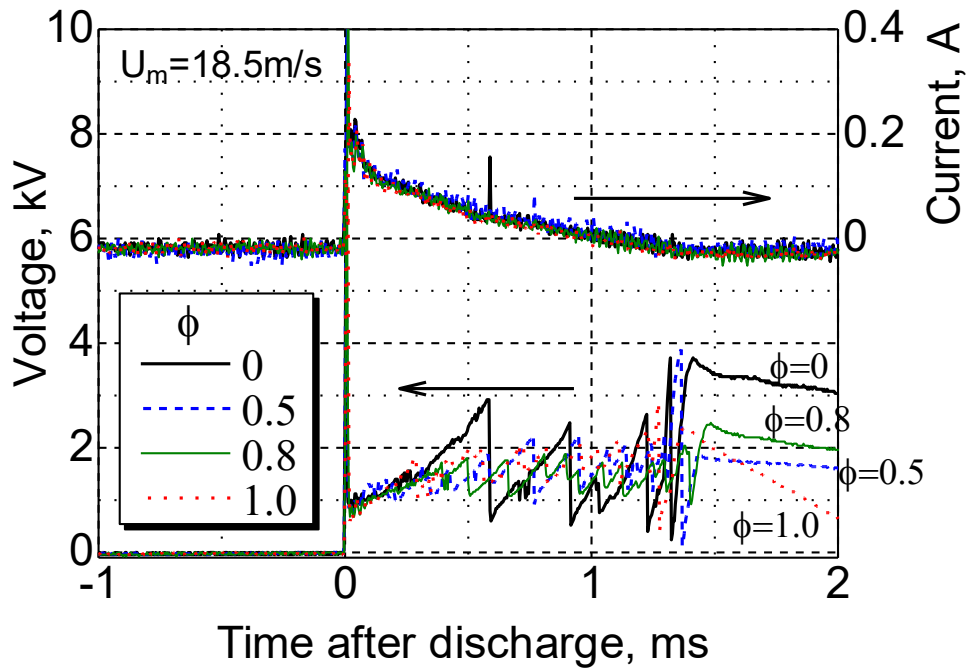


Fig. 3.4 当量比による電流と電圧プロファイルの影響
(at 0.5 MPa)

このような電圧の変化の特徴を把握するために鋸形に変化している電圧値の極大値と極小値を用いて特徴をつかむことを試みた。Fig. 3.5 は当量比 0.8, 圧力 0.5MPa の場合の 3 回の実験の電圧プロファイルを重ねて描画した結果である。図から実験ごとに電圧値の変化の様相は異なるものの、およそある特定の極大値と極小値の間で電圧波形は変動する傾向を有していることがわかる。点火に関しては、特に初期の電圧波形の予測が重要であると考え、第 1 回目の鋸形状の極大値、極小値に着目した。ここでの極大値を V_{p1} 、極小値を V_{p2} と定義した場合の 1 例を図中に示している。現象としては極大値 V_{p1} はその電圧に達すると放電路が短絡もしくは再放電が生ずる電圧である。この電圧は、特に短絡が生じる場合には、その時の放電経路のうち最も短い距離とその点の間における電圧、さらにその周辺における荷電粒子の拡がりに依存すると思われ、それを加味した解析もなされている²⁶⁾。これにより V_{p1} の値が定まれば、後述の電流、電圧、放電路長の関係式が定まっているとすると、放電路がどこまで延伸するかを予測することができる。同様に極小値 V_{p2} も短絡が生じた後に、放電路がどの程度の長さになるのかに関連しており、 V_{p2} が定まれば短絡後に放電路の長さを予測することができるものと考えられる。

以上のような観点から、 V_{p1} 、 V_{p2} の値を圧力の関数としてまとめたものが Fig. 3.6 である。図には流速 10.5m/s, 14.2m/s, 18.5m/s とし、空気 ($\phi=0.0$) およびプロパン - 空気予混合気 ($\phi=0.5$, および 0.66 または 0.8) とした結果を示している。図の結果より V_{p2} については大きな圧力依存性は見受けられず、かつ空気の場合は少し低い値をとるものの、当量比や流速に関しても大きな感度は見受けられないことがわかる。一方で V_{p1} については、圧力の増加とともに増加していることがわかる。また $\phi=0$ (空気) に比べて、燃料成分を混入させた予混合気ではその値が減少していることが明らかである。これは多原子分子の炭化水素燃料が混合することで混合気の電気伝導率をはじめとした電気特性が、二原子分子のみでなる空気に比べて大きくことなることに起因しているためと考えられる。そのためより低い電圧で短絡や再放電が生ずるものと推測される。他方で当量比に関しては本実験条件の範囲では明確な依存性は確認されない。また、流速については流速が大きくなると V_{p1} は大きくなっているように見受けられる。これは放電路が流速によって引き伸ばされる時間が速いため、短絡や再放電が生ずるために必要な流速に対して垂直方向の荷電粒子の拡がり時間が相対的に短くなるためと考えられる。

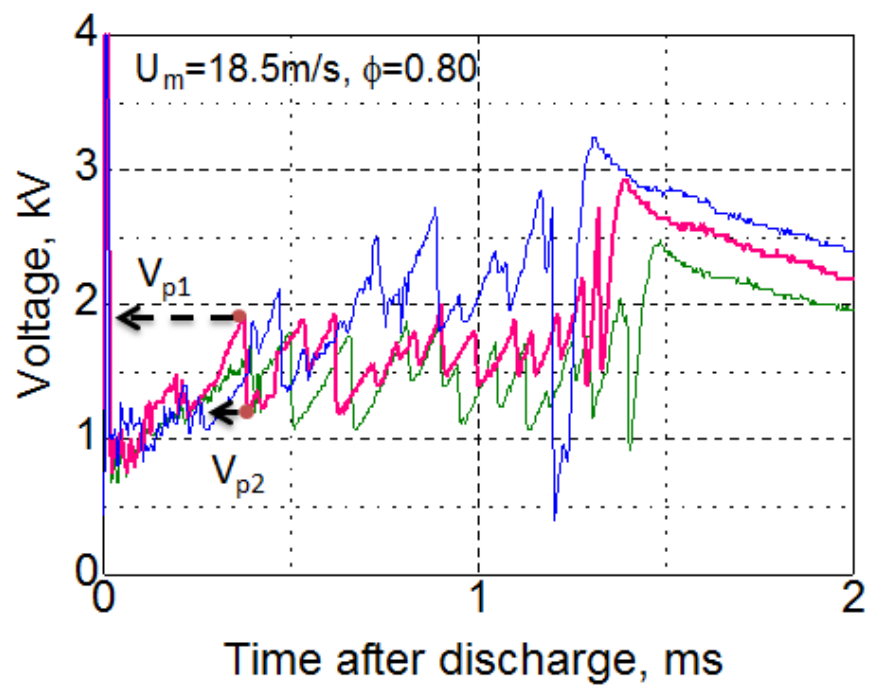
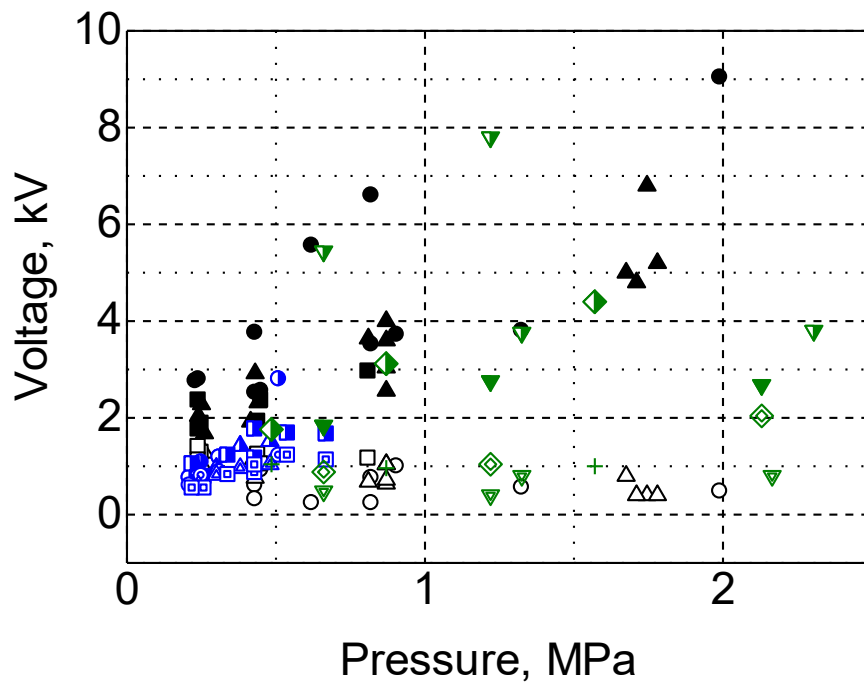


Fig. 3.5 電圧プロファイル
(at 0.5 MPa)



- | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| V_{p1}
● $U_m=18.5\text{m/s}, \phi=0.00$
▲ $U_m=18.5\text{m/s}, \phi=0.50$
■ $U_m=18.5\text{m/s}, \phi=0.80$
○ $U_m=10.5\text{m/s}, \phi=0.00$
△ $U_m=10.5\text{m/s}, \phi=0.50$
□ $U_m=10.5\text{m/s}, \phi=0.80$
▼ $U_m=14.2\text{m/s}, \phi=0.00$
▼ $U_m=14.2\text{m/s}, \phi=0.50$
◆ $U_m=14.2\text{m/s}, \phi=0.66$ | V_{p2}
○ $U_m=18.5\text{m/s}, \phi=0.00$
△ $U_m=18.5\text{m/s}, \phi=0.50$
□ $U_m=18.5\text{m/s}, \phi=0.80$
⊙ $U_m=10.5\text{m/s}, \phi=0.00$
▲ $U_m=10.5\text{m/s}, \phi=0.74$
⊠ $U_m=10.5\text{m/s}, \phi=0.78$
▼ $U_m=14.2\text{m/s}, \phi=0.00$
◆ $U_m=14.2\text{m/s}, \phi=0.50$
+ $U_m=14.2\text{m/s}, \phi=0.66$ |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Fig. 3.6 テストセクションにおける圧力の関数が最大と最小電圧 V_{p1} , V_{p2} に示す

Fig. 3.7 は放電路延伸に関する高速度画像であり、当量比 0.5, 平均流速 18.5m/s, 圧力 0.44MPa についての結果である。図において流れは左から右側に向かって流れており、その流れに伴って放電路は左側から右側に向かって延伸している。放電開始後 28.8 μ s ではプラグギャップの間に放電による発光が観察されるが、200 μ s になると流れに伴って、右側に延伸していることがわかる。このときプラグギャップの midpoint とその点から最も離れた点を求め、その 2 点間の距離を L_t として定義した。また図では 400 μ s, 429 μ s, 457 μ s の連続写真を示しており、ここでは短絡が生じていることが観察できる。

Fig. 3.7 に定義したプラグギャップから放電路先端までの距離 L_t を時間に対してプロットした結果を Fig. 3.8 に示す。図の結果は Fig. 3.4 で示した波形と同じ条件である。Fig.3.8 には異なる当量比の場合を示してあるが、その雰囲気流動に対する追従性については、大きな差異はない。他方で、 $\phi=0$ (空気) の場合には L_t の振れ幅が他の場合に比べて大きいことが見てとれる。これは Fig.3.6 で議論したとおりで、空気の場合、短絡が生じる電圧が燃料を含む場合よりも大きいことから、その電圧に達するまで放電路が十分に延伸できるためであると考えられる。

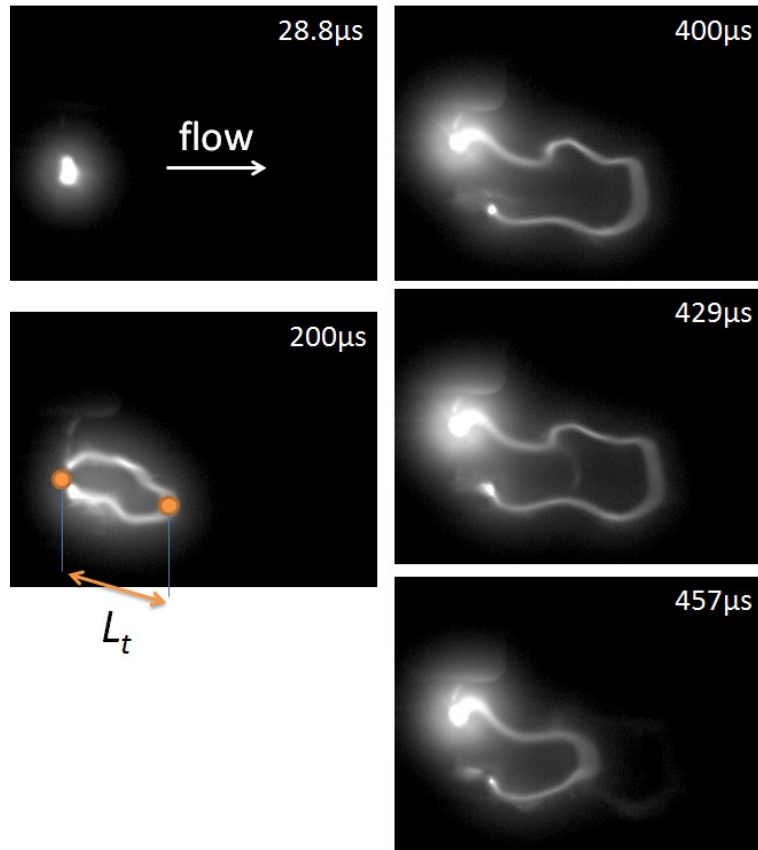


Fig. 3.7 放電写真
 ($\phi = 0.5$, $U_m = 18.5$ m/s, $P = 0.44$ MPa)

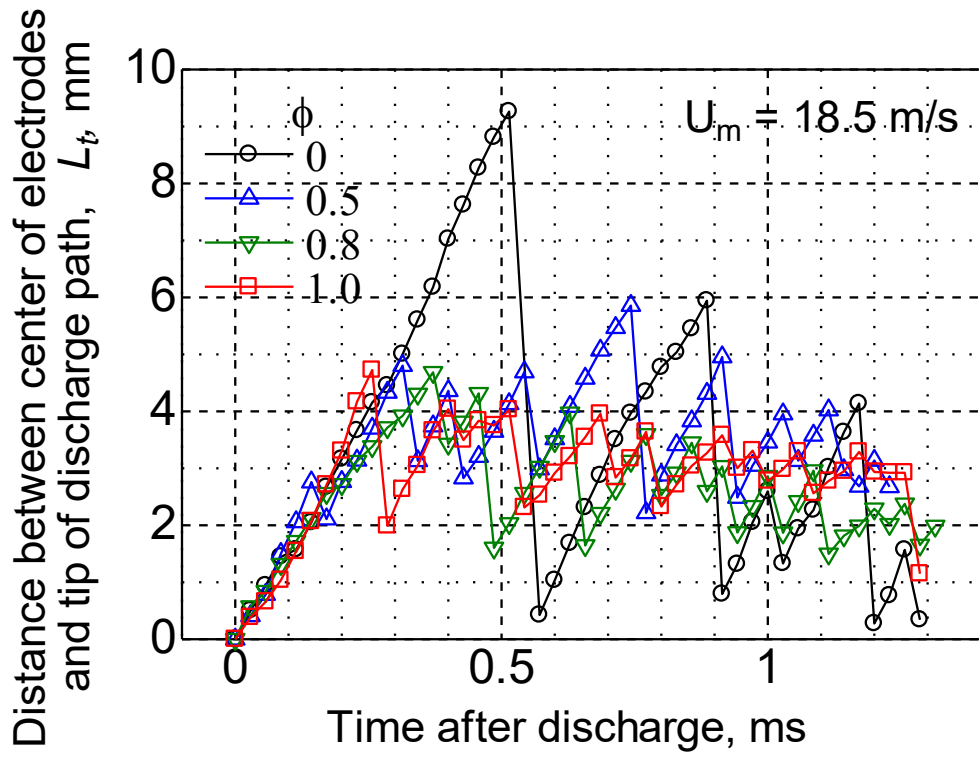
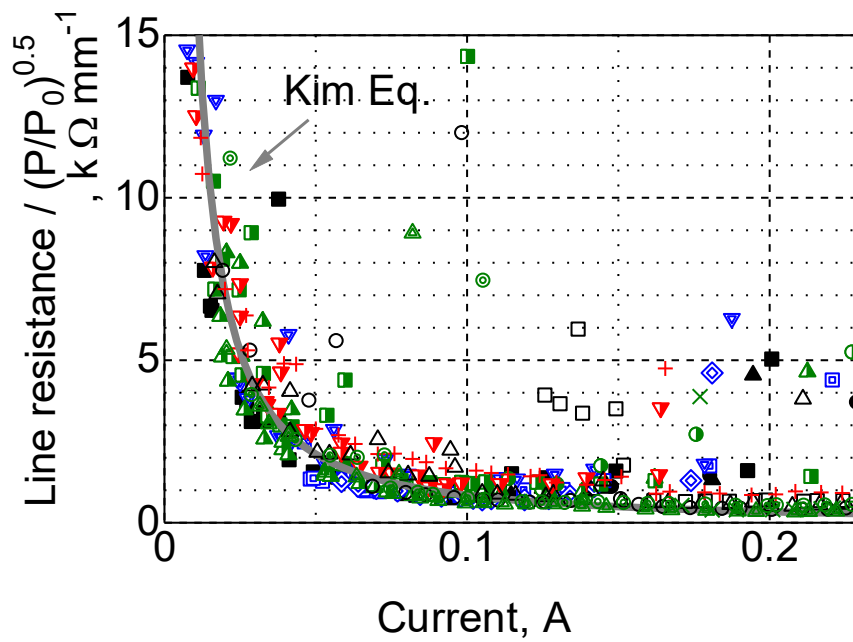


Fig. 3.8 当量比の影響による電極間中心距離から放電経路の延伸
(at 0.5 MPa)

以上の結果を踏まえ、放電路の長さ、電流、電圧の関係式について検討する。Fig. 3.6 から短絡や再放電前後の電圧が決まるとすると、この関係式が一意に決まれば、放電路がどの程度の長さまで延伸し、また短絡後のどの程度の長さになるかという Fig. 3.7 を予測することができるようになる。ここでは放電路の長さについては矩形で近似した。すなわち Fig. 3-5 で示した L_t に対して、 $2L_t$ にプラグのギャップ間距離を加えたものを用いた。放電路長の写真は 35000fps で、 $28.57\mu\text{s}$ おきに取得されている。Fig. 3.4 に示されるような電流、電圧プロファイルについては、高速度カメラへ送られているトリガー信号の時刻を基準として $28.57\mu\text{s}$ おきに $\pm 14.2\mu\text{s}$ の間で平均値をとり、その平均値を I_m 、 V_m として定義した。放電がグロー放電であれば、アノードおよびカソード近傍での電圧降下が大きいと予想されるが、文献²⁸⁾からカソードおよびアノード近傍における電圧降下については、ここでは小さいと仮定しアノードからカソードまでの放電路内の電界分布が一樣と仮定して、 V_m/I_m を放電路の抵抗値として見積もった。この抵抗値を放電路の長さ $2L_t + 1\text{ mm}$ で除すことで、放電路の線抵抗を求めた。圧力の影響については、電界強度が $p^{0.5}$ に比例するとして、無次元化を行った。この線抵抗を電流の関数として示した結果を Fig. 3.9 に示す。図中には、既存式である Kim の式 (式 1.2) を合わせて記載している。図の実験条件下では圧力の指数に伴う誤差は 2% 以下であった。また図に示されるように、ばらつきはあるものの Kim の式は現象をよく捉えていることがわかる。Kim らでは 60mA 以下の電流を対象とされているが、本章で試験した当量比や流速の範囲において、100mA 程度でも適用可能な場合があるといえる。ただし図から 100mA 以上の電流値の領域では大きく離脱しているところが見受けられ、改良の余地があるといえる。このような解離は放電の初期の状態であり、アーク放電からグロー放電へと変わる過渡期にあるものと思われる。これから Kim の式の適用範囲についてもグロー放電であれば電流値が大きくとも、また大きな流速であっても現象を捉えられていると推察される。仮に高い電流においてもこの関係式が成立するとすれば、電流を大きくしていくと線抵抗が減少していくことを示しており、すなわち電流を増加させても予混合気に投入されるエネルギーは電流の増加に応じて増えないことを意味している。よって点火の観点からは、適切な電流値が存在する可能性を考察することが可能であるといえる。



- $U_m=10.4\text{m/s}$ $\phi=0$ $P=0.53\text{MPa}$
- △ $U_m=10.4\text{m/s}$ $\phi=0$ $P=0.31\text{MPa}$
- $U_m=10.4\text{m/s}$ $\phi=0$ $P=0.25\text{MPa}$
- + $U_m=10.4\text{m/s}$ $\phi=0.84$ $P=0.24\text{MPa}$
- × $U_m=10.4\text{m/s}$ $\phi=0.75$ $P=0.38\text{MPa}$
- △ $U_m=10.4\text{m/s}$ $\phi=0.78$ $P=0.67\text{MPa}$
- ⊙ $U_m=10.4\text{m/s}$ $\phi=0.78$ $P=0.33$
- $U_m=18.5\text{m/s}$ $\phi=0$ $P=0.82\text{MPa}$
- ▲ $U_m=18.5\text{m/s}$ $\phi=0$ $P=0.43\text{MPa}$
- $U_m=18.5\text{m/s}$ $\phi=0$ $P=0.24\text{MPa}$
- ⊠ $U_m=18.5\text{m/s}$ $\phi=0.50$ $P=0.44\text{MPa}$
- ▽ $U_m=18.5\text{m/s}$ $\phi=0.50$ $P=0.24\text{MPa}$
- ◇ $U_m=18.5\text{m/s}$ $\phi=0.50$ $P=0.44\text{MPa}$
- $U_m=18.5\text{m/s}$ $\phi=0.80$ $P=0.81\text{MPa}$
- △ $U_m=18.5\text{m/s}$ $\phi=0.80$ $P=0.45\text{MPa}$
- $U_m=18.5\text{m/s}$ $\phi=0.80$ $P=0.24\text{MPa}$
- ▽ $U_m=18.5\text{m/s}$ $\phi=1.00$ $P=0.25\text{MPa}$

Fig. 3.9 平均した放電経路の線抵抗が電流の関数として示す

3.3 雰囲気気体の影響

前節では空気とプロパン空気予混合気に検討し、特に短絡や再放電が生じる電圧について差異があることを示した。本節では雰囲気気体が火花放電にどのような影響を与えることを調べるため、流動気体として空気、窒素、プロパン-窒素混合気の3種類について実験を行った。テストセクションにおける圧力は、空気、窒素、プロパン窒素混合気はそれぞれタンク圧のおよそ1/2がテストセクションの圧力である。平均流速は15m/s程度(14.2m/s)、撮影速度は35000fpsである。解析はFig. 3.7と同様に放電路が最も点火プラグから離れた場所を計測することで、放電路の移動について把握した。

Fig. 3.10とFig. 3.11は各々テストセクション部の圧力が0.5MPaで、雰囲気気体がそれぞれ空気と窒素の場合である。3回の実験を重ねて記してある。これらのグラフを比較すると、空気雰囲気の方が放電路は大きく延伸しており、その後電極の近くまで放電路が戻ってきていることが見て取れる。他方、窒素雰囲気では、電極近くにまで放電路が戻らず、放電路のつなぎ変えが頻繁に発生していることがわかる。また放電時間は空気雰囲気の方が短かった。

Fig. 3.12とFig. 3.13は0.8%プロパンと窒素の混合気(窒素を空気で置換すると、当量比0.2程度に相当)、1.6%プロパンと窒素の混合気(窒素を空気で置換すると、当量比0.4程度に相当)の場合である。プロパンの濃度を変えて同様の実験をしたが、大きな変化はみられなかった。そのため、0.8%のプロパン窒素混合気のみ空気雰囲気と比較した。Fig. 3.10とFig. 3.12の結果から、テストセクション部の圧力0.5MPaの空気雰囲気とプロパン窒素の混合気では、プロパン窒素の混合気では、空気雰囲気と放電初期は同様に延伸したが、放電路が短絡後の様子は異なっていた。

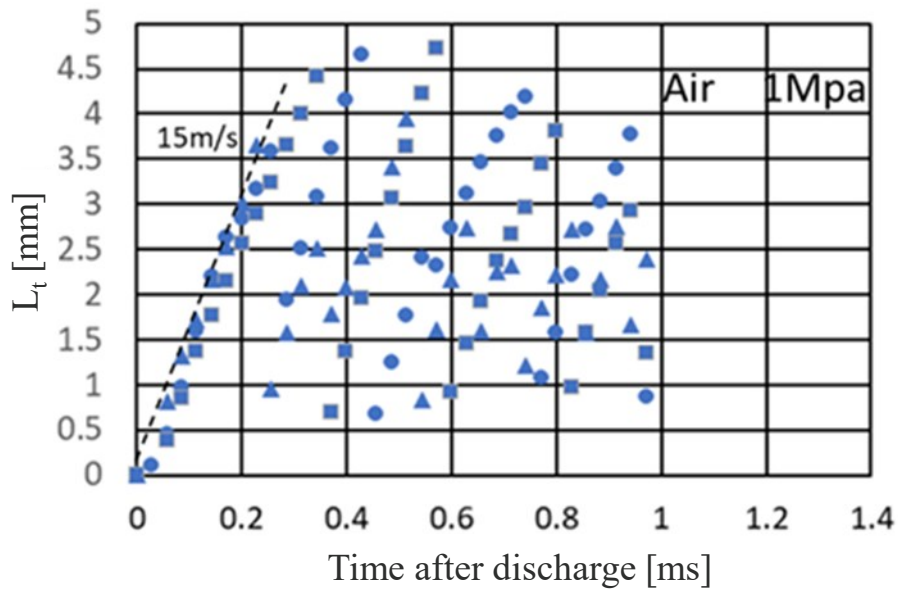


Fig. 3.10 空気での放電路先端の移動距離
(1MPa, テストセクション部の圧力 0.5MPa)

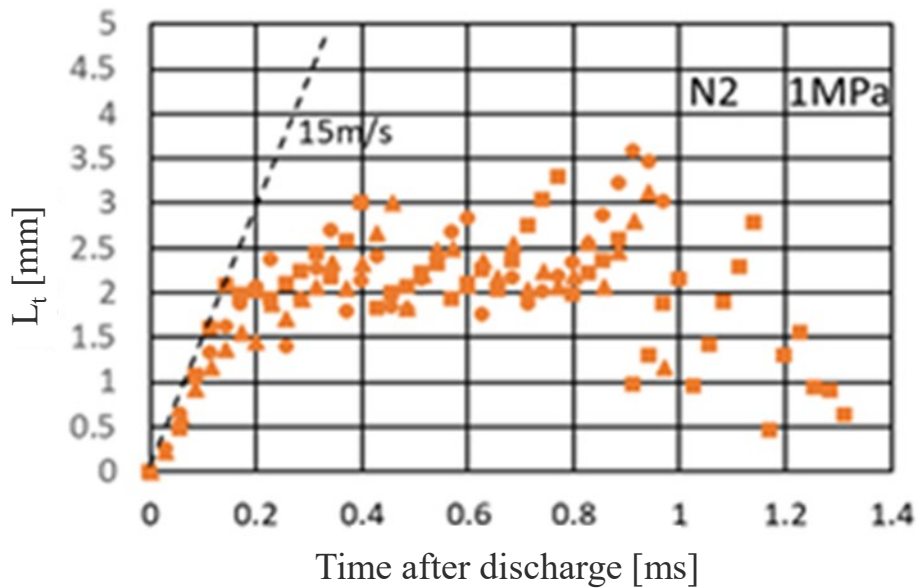


Fig. 3.11 窒素での放電路先端の移動距離
(1MPa, テストセクション部の圧力 0.5MPa)

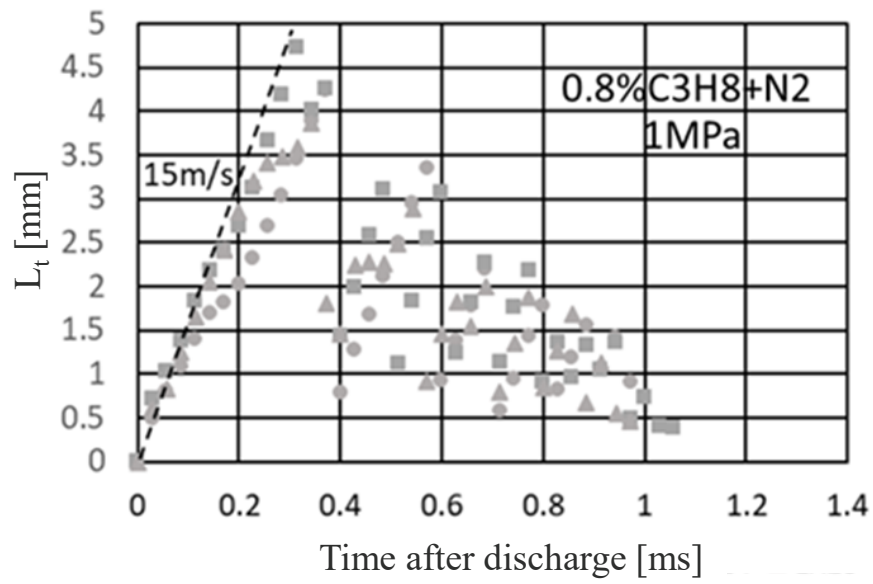


Fig. 3.12 0.8% C₃H₈+N₂ での放電路先端の移動距離
(1MPa, テストセクション部の圧力 0.5MPa)

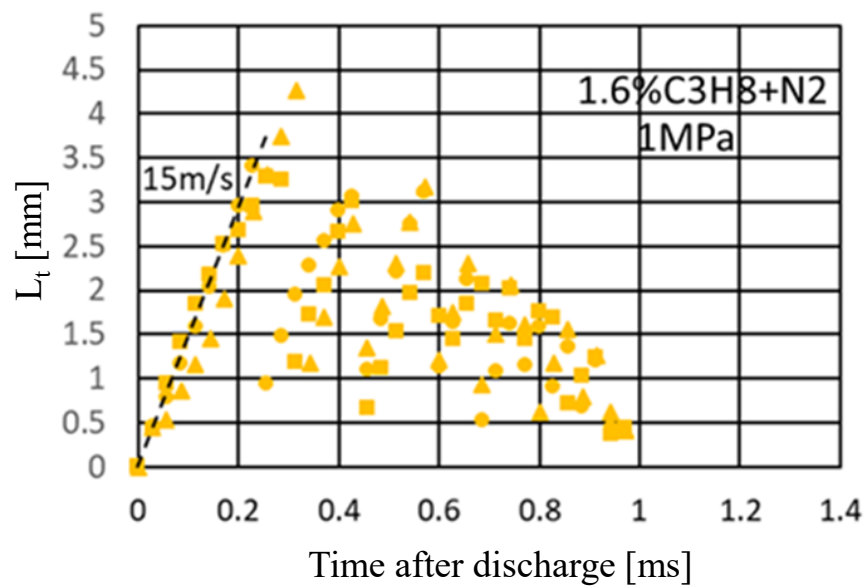


Fig. 3.13 1.6% C₃H₈+N₂ での放電路先端の移動距離
(1MPa, テストセクション部の圧力 0.5MPa)

Fig. 3.14 に Fig. 3.10 と Fig.3.11 の条件下での放電路の連続写真を示す. これにより火花放電経路が窒素雰囲気に対して, 空気雰囲気の方が放電路が伸びていることが撮影写真からも観察される. また各々の条件における放電路が短絡するときの電圧を圧力関数としてプロットしたものが Fig. 3.15 である. 図にはパッシェンの法則から得られる放電電圧の 1/10 の値を実線で示している. 火花放電が起こる電圧に関するパッシェンの法則³⁵⁾は以下であり, 火花電圧は気圧と電極間距離の積の関数で決まる.

$$V_{gc} = Ed = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln\left[\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right]} \quad (3.1)$$

ここで, V_{gc} は火花電圧, p は気圧, d は電極間距離, A と B は気体の種類によって異なる定数, γ はカソードの状態, 電界, イオンの種類で変化する値である.

この結果から, 電極形状などの影響があるものの空気雰囲気と窒素雰囲気の差異にはその気体の放電特性に起因していることが示唆される.

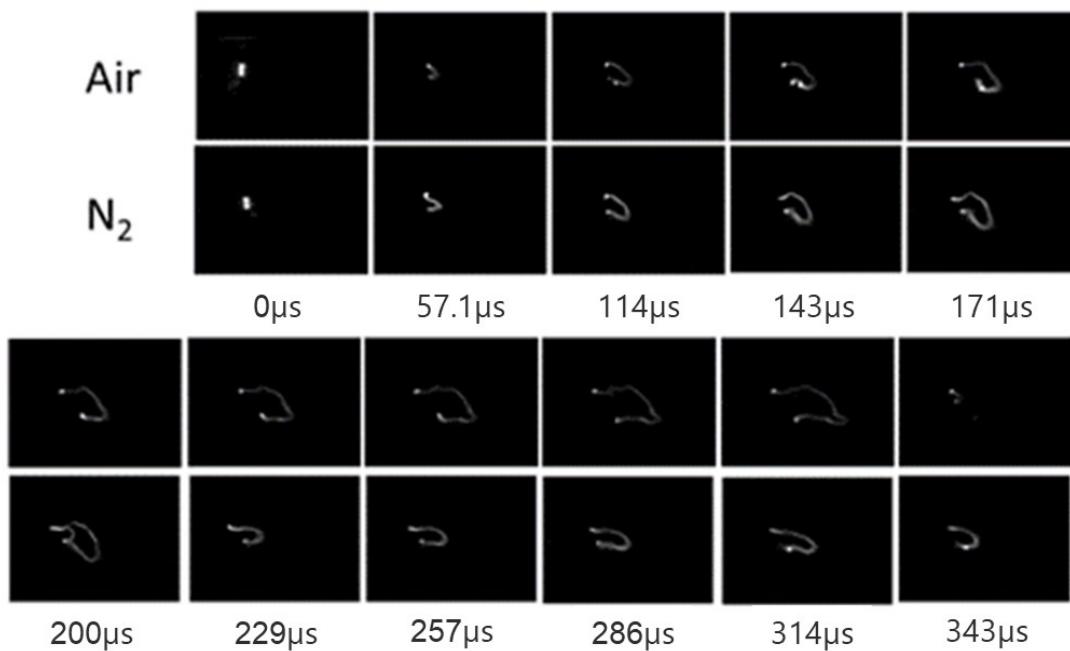


Fig. 3.14 空気と窒素の放電路の変形の様子

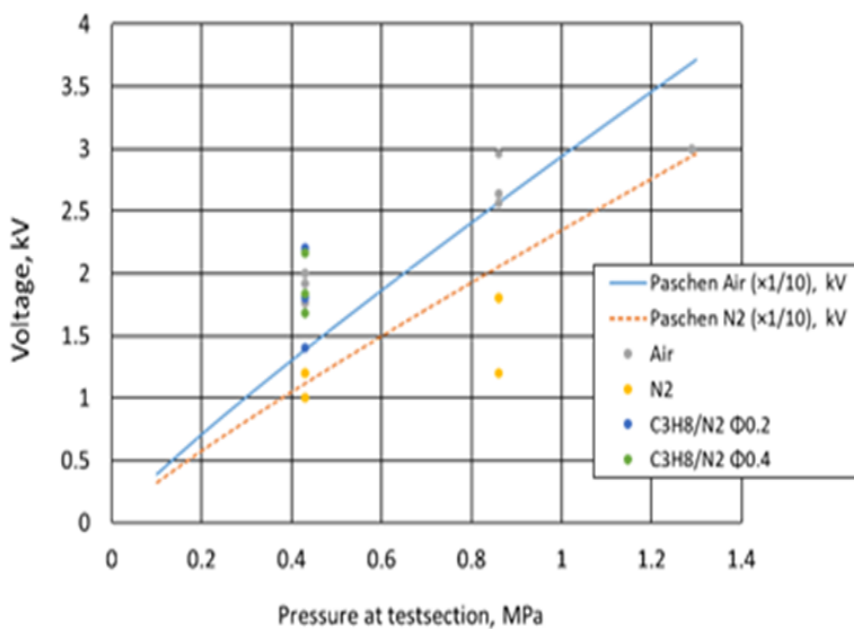


Fig. 3.15 各気体種における最大延伸時の電圧と圧力の関係

3.4 結論

一様流速の流動場を得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放電路の変形挙動について実験的に把握を行い、電流、電圧、放電路長を含んだ実験式に関する検討を行い、以下の結論を得た。

- 1) 流動によって放電路が延伸することによる電圧の上昇、放電路の短絡、再放電が観察された。
- 2) 放電路が延伸した場合の、放電路の線抵抗を整理したところ、既に知られている関係式が希薄条件の当量比、流速が 10.4m/s ~18.5m/s、圧力が 0.25~0.81MPa の条件で幅広く成立することが明らかとなった。
- 3) 電圧値は放電路の短絡もしくは再放電によって鋸型の極大値および極小値を取り、その電圧値のデータを提供することができた。
- 4) 電圧値の極大値は圧力に対して上昇するが、空気の場合に比べて燃料を含む場合はその絶対値が小さくなる。また流速の依存性も見受けられた。

第四章 既存実験式の高精度化の検討

4.1 緒言

第三章では既存式 (式(1.2)) が幅広い当量比, 流速, 圧力条件においても適用可能であることを示した. しかしながら, より精度よいモデルの構築のためには, 予測の精度向上とともに, 今後の適用範囲の拡張を考えると, 理化学的な理解を深めることが必要である. このような観点から第三章での議論を見直すと, まずは放電路が曲線上に変形しているにもかかわらず, 直線と矩形でその長さを見積もっていることに, 改善の余地があると思われる. このため, まずは得られた放電路の画像に画像処理を施すことで放電路の長さをより正確に見積もり, 予測精度のよいモデル構築のための知見を得ることを考えた. 本章ではその取り組みについて示す. 次に, 理化学的な知見を深めるために, 物理的に単純なモデルに立ち返って, 既存式 (式(1.2)) が再構築できないかについて考察した. その際に, 放電路の“みかけの太さ” ようなものをパラメーターに加えることで既存式をより理化学的に理解できる可能性が示されたため, これらを観測するために様々な実験を行った. これにより既存式の解釈が深まったので, その考察について報告する. さらに通常の撮影では放電路の2次元な変形しか把握できないが, 数値シミュレーションでは3次元的な情報が必要となるため, 放電路の3次元的な変形についても計測, 考察を実施した.

4.2 画像解析による放電路長さの見積もりの高精度化に対する取り組み

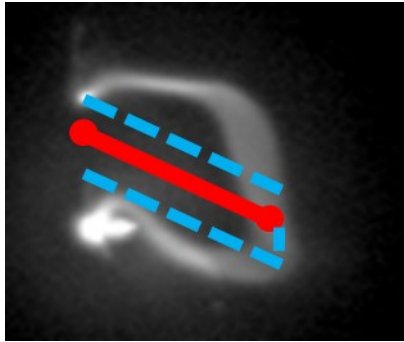
まず放電路長さをより正確に見積もる方法について検討した. 従前の Kim の式においては, 放電路の長さ l_{spk} は点火プラグのギャップ d_g と, 点火プラグ間から放電路が下流に移動した距離 L_t を用いて評価している. すなわち,

$$l_{spk} = d_g + 2 L_t \quad (4.1)$$

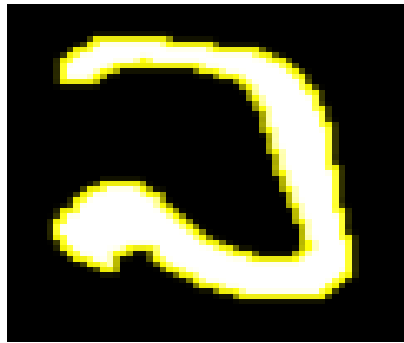
これは簡便ではあるが, 特に放電路が曲線的に変化している様子については評価できていない. そのため, 放電路長さをより高精度に計測する手法についてまずは検討した. ここでは流動場中の放電路長の計測について, Fig. 4.1 に示すような矩形近似法, 二値化法, フリーハンド計測法の三種類の手法を考え, 検討および比較を行った. 矩形近似法は Kim の式での計測方法とほぼ同様であるが, 放電路の必ずしも点火プラグ間の流れ方向下流にのみ変形するわけではないので, 電極間の中点を基点とし, 基点から放電路の最遠点までを距離を L_t として $l_{spk} = 2L_t + d_g$ の矩形形状の近似によって放電路長を計測した. これは第三章でも投入している手法である. 二値化法は画像処理ソフトを用いて放電路画像に輝度をもとに二値化処理を行い, それによって得られた放電路の周囲長さの二分の一を放電路長と定義した. フリーハンド計測では, 画像処理ソフトを用いて放電路の中心部をなぞるように線を引き, その線の長さを放電路長と定義した. Fig. 4.1 にそれぞれの手法での計測手法の様子を示す.

3手法のうち、特にフリーハンド計測は放電路長さを比較的正しく計測できる可能性があるが、計測者による任意性があるので、計測者毎または計測回毎に誤差が生じると考えられる。よって、各計測法の比較を行う前にまずフリーハンド計測での誤差について検討した。

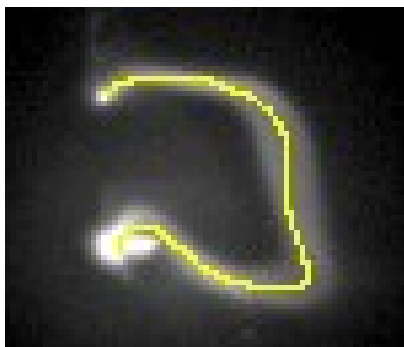
長さや形状の異なる放電路画像を選び、それぞれの画像の放電路に対して10回ずつフリーハンドでの計測を行いその計測毎の放電路長を比較した。計測した放電路画像を Fig. 4.2 に示す。併せて10回のフリーハンド計測の結果を Table 4.1 に示す。いずれの放電路画像の計測結果でも最大値、最小値は平均値から±2%以内に収まっており、これによりフリーハンド計測によって生じる誤差を評価することができた。



(a) 矩形近似法



(b) 二値化法



(c) フリーハンド計測

Fig. 4.1 放電経路の計測手法

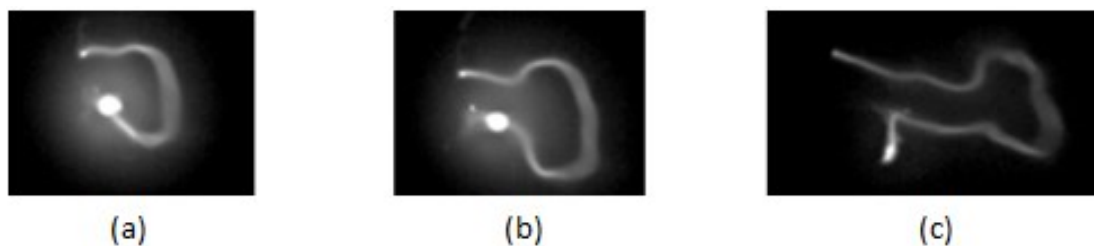


Fig. 4.2 フリーハンド計測を行った画像

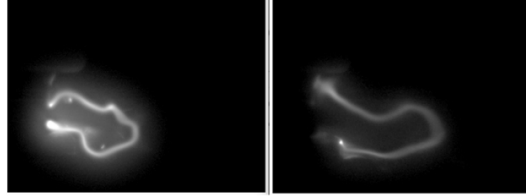
Table 4.1 フリーハンド計測結果

計測回数	放電路長(mm)		
	(a)	(b)	(c)
1回目	4.932	6.965	10.843
2回目	4.791	7.075	10.999
3回目	4.817	7.062	10.97
4回目	4.839	7.061	10.85
5回目	4.903	7.035	10.692
6回目	4.762	7.122	10.909
7回目	4.875	7.135	10.754
8回目	4.823	7.125	10.826
9回目	4.925	6.962	10.743
10回目	4.801	7.061	10.787
最大値	4.932	7.135	10.999
最小値	4.762	6.962	10.692
平均値	4.847	7.060	10.837

次に二値化法についてである。二値化法では画像処理ソフトを用いて放電路画像に輝度をもとに二値化処理を行った。Fig. 4.3 は一連の放電において異なる時間の放電路の画像に二値化処理を行った結果である。閾値を 60 に設定して二つの画像に二値化処理を行うと、右の画像では適切な閉曲線を得られるが左の画像では適切な放電路画像が得られない。閾値を 135 に設定して二値化処理を行うと、左の画像では適切な閉曲線が得られるが右の画像では放電路がほとんど見られなくなってしまう。このように同じ一連の放電でも時間によって二値化処理を行った際に適切な閉曲線を得られる閾値が異なるため、同一の閾値ですべての時間の放電路の太さを比較することができない。そのため、まず二値化の際の閾値が放電路の周囲長および面積に与える影響について調査した。Fig. 4.4 が閾値に対する検討の結果である。Fig. 4.4 の実験条件は当量比 $\phi = 0.66$ の場合である。Fig. 4.4 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分かる。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 Fig. 4.4 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 (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により大きく上昇している。周囲長さの 1/2 については、図 (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 (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 (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。またこれらの図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。

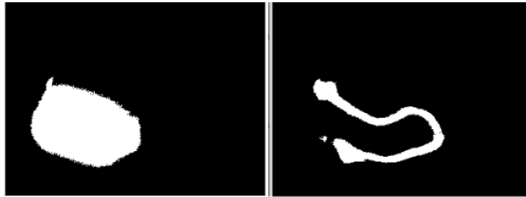
本節においては、撮影された画像から、放電路の周囲長の 1/2 を放電路長の長さとして取り扱うこととした。放電路の面積の取り扱いについては後述する。

二値化前



放電エネルギー200mJ
35000fpsで撮影

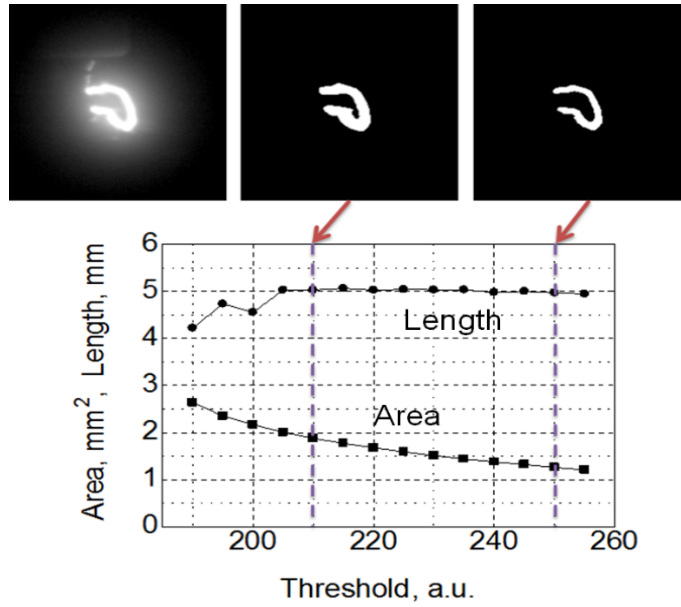
二値化後
閾値60



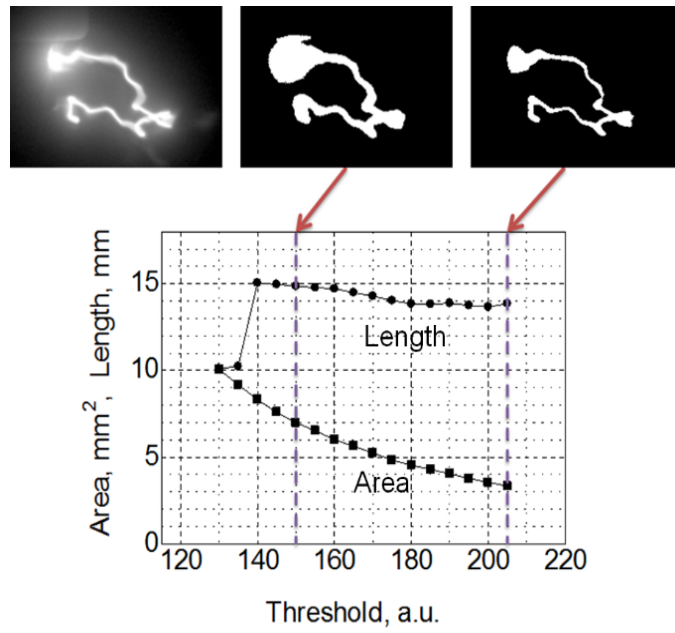
二値化後
閾値135



Fig. 4.3 異なる閾値での二値化



(a)



(b)

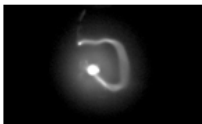
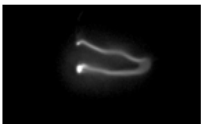
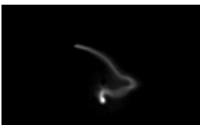
Fig. 4.4 閾値による放電経路の長さおよび面積に対する影響

以上示してきた3種類の計測法の比較を行った。Table 4.2には(a), (b), (c) 各々の画像に対して、フリーハンド法、矩形近似法および二値化法を適用した結果も合わせて示している。まず(b)の画像では、フリーハンド法に対して、矩形近似法および二値化法どちらも+10%程度の差である。フリーハンド法が放電路をなぞっていることから、撮影された画像の放電路の長さを一番忠実に再現しているとする、矩形近似法については、放電路に変曲点が少ない曲線であるのに対して、これを矩形形状に近似するために、矩形近似法の方が長く放電路長さを見積もっていると考えられる。他方で、二値法については放電路の周囲長さの1/2として定義している、放電路の中心を通るフリーハンド法に対して放電路の太さの分だけ遠回りしていることになり、放電路の太さに対応する長さだけ長く見積もっていると推察される。これに対して(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、二値化法では44%もの大きな差になっている。特に二値化法との差異が大きいのは、放電路中の明暗の濃淡が大きい場合に、二値化法では放電路長を極端に大きくもしくは小さく見積もってしまう可能性があることを示している。一方(c)の画像では、二階調化では(b)の画像と同じくフリーハンド法に対して10%程度の誤差であるのに対し、矩形近似では32%の差になっている。これは流動によって放電路と電極との接触部分が移動した場合に、最遠点のみを用いた矩形近似法では誤差が大きくなってしまふことが一因と考えられる。以上が各計測手法に関する特徴である。

Table 4.2 に示したような見積もり方法において、特にフリーハンド法の平均値に対して矩形近似法および二階調化法の値が大きく異なる場合は、実際の現象のどのような場合であるかを確認することは、本手法の適用性また過去に得られているデータの再構築を考える上で有意であると考え、これらの差異がどのような条件の場合に生じるかについて検討したものが、Fig. 4.5 および Fig. 4.6 である。なお Fig. 4.5 に示している3つの画像は、Table 4.2 で解析した表中の(a), (b), (c)の画像に対応している。Fig. 4.6 は、流動場中の放電路の変形に影響を与えると考えられる圧力、放電路の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、実験を行ったものである。これらの図において、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。Fig. 4.5 を見ると、放電開始からの数コマにおいては、どの手法を用いても大きさ差異は見受けられない。時刻が0.18msあたりから、電極部分に発光が強くなりそれに伴い、二値化法で大きな誤差を生じるようになっていく。0.20ms以降では発光の明暗が大きすぎて二階調化法では閉曲線が得られず、放電路長さを計測できていない。Fig. 4.6 の下図は雰囲気気体がプロパンと窒素の混合ガスの場合であり、発光が全体的に強くなり放電路の太さが太く観察されるようになる。この場合は放電路の発光のムラが少なく、二値化法で安定して計測できており、またフリーハンド法との差異は、矩形近似法と比べて小さい。次に矩形近似法に着目すると、Fig. 4.5 の後期では、フリーハンド法に対して矩形近似法の差異が大きくなっている。また Fig. 4.6 においても、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が見受けら

える。これらは、いずれの場合も放電路の終端が点火プラグの側面に移動している事の他、比較的放電路が凸型に変形することに起因するようである。また Fig. 4.6 は Fig. 4.5 に対して、圧力が高い場合であるが、この場合、放電路はより多くの変曲点を持つように変形するようであり、この場合もフリーハンド法と矩形近似法の乖離が大きくなる。Fig. 4.6 の上図場合については、極端に明るい発光箇所がないため、フリーハンド法と二階調化法との差異は限定的である。以上から、二値化法については、放電路の輝度が極端に変化している場合を除けば、フリーハンド法との誤差は、その測定原理に起因すると思われる差異の中に収まっているといえる。

Table 4.2 検討した各放電路長さの計測方法による算出された長さの差異

		(a)	(b)	(c)
				
Free-hand (10 times 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%~ +1.75%	-3.01%~ +2.20%	-4.52%~ +3.50%
Rectangle 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%

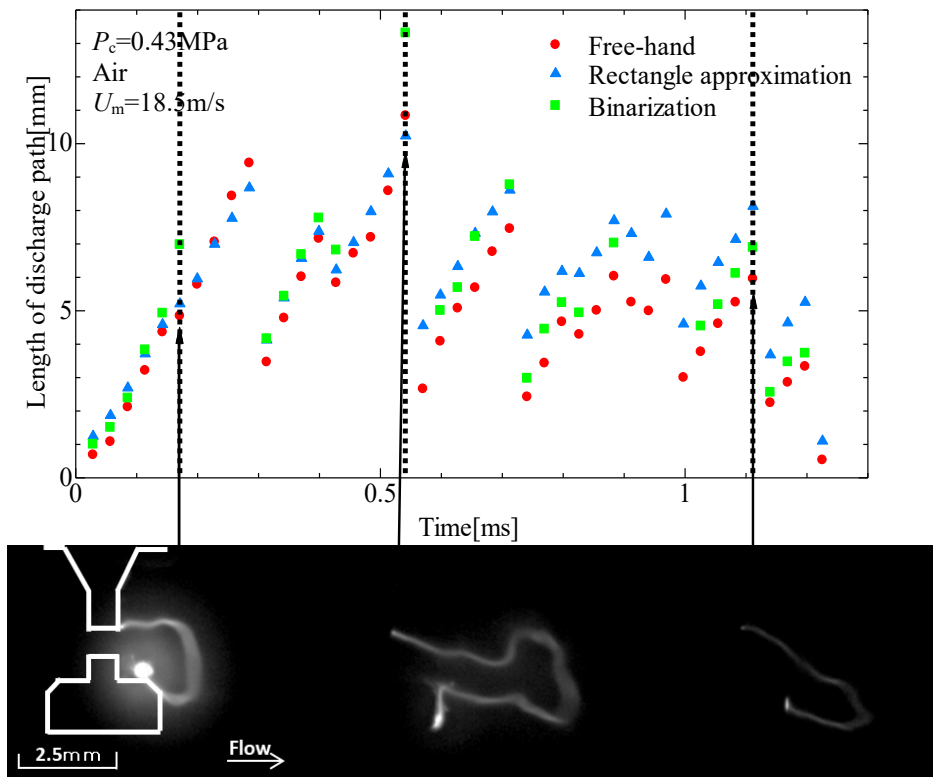


Fig. 4.5 各見積りにおける放電路長さの時間履歴
 (Air, $P_c = 0.43\text{MPa}$, $U_m = 18.5\text{m/s}$)

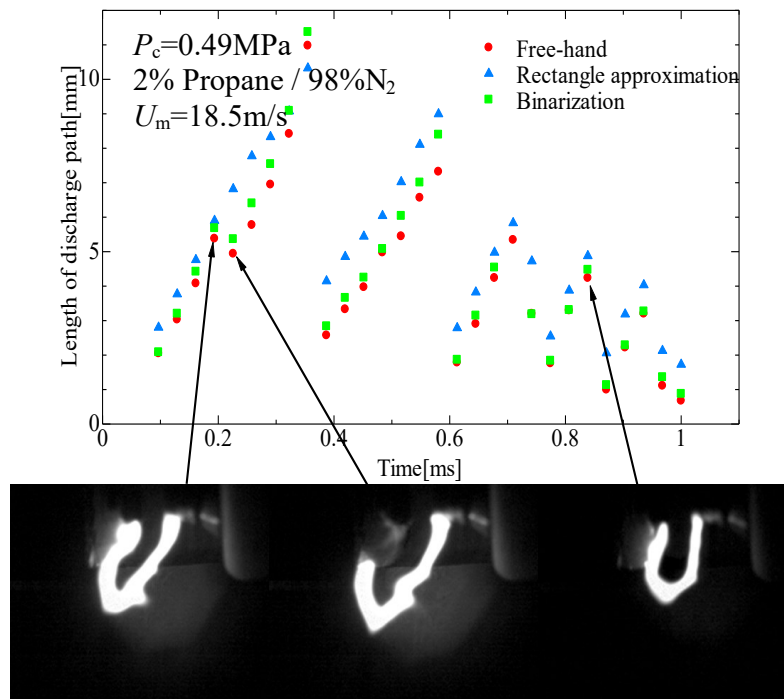
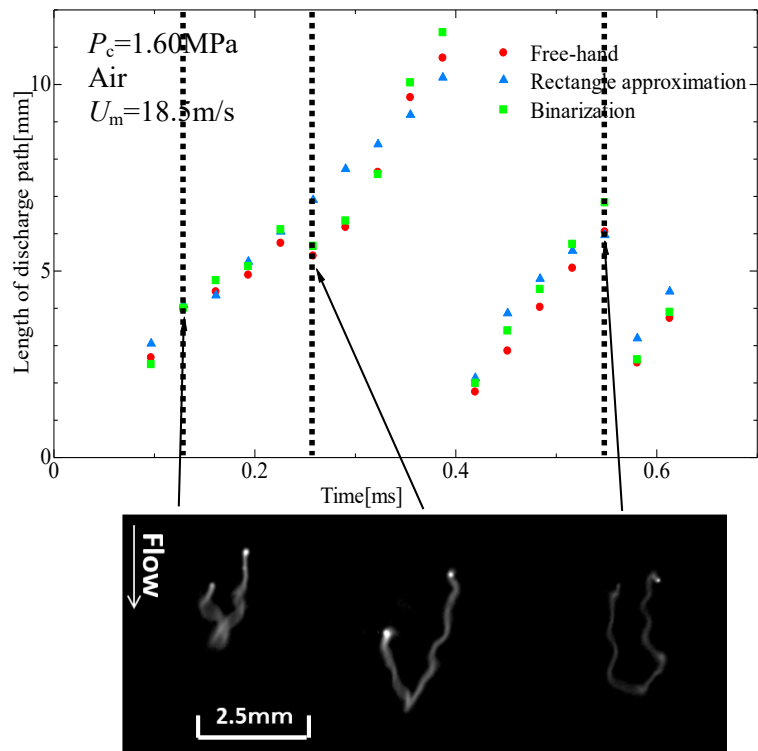


Fig. 4.6 各見積りにおける放電路長さの時間履歴

このような二値化法計測により放電路長さを算出することとして、その放電路長さ、測定された電流、電圧値をもとに放電路の電気特性の把握を行った。Fig. 4.7 に電流および電圧の計測の概要を示す。電圧、電流値はオシロスコープで計測している。イグニッションコイルに充電されたコイルのエネルギーは放電を伴いながら減少する。この際、計測された電流は点火プラグの内部抵抗(4.5kΩ)による電圧降下、陽極および陰極における電圧降下を含んだ値となる。陽極および陰極における電圧降下については、文献²⁸⁾を参照して見積もった。高速度カメラから撮影した画像との比較として、高速度カメラの露光時間の中心の時刻における、電圧、電流値を、その撮影写真における電圧、電流値とし Fig. 4.8 に示す。中心時刻の前後の2つの計測データを線形補間することで電圧、電流値を求めた。Fig. 4.9 はこのようにして求めた電流、電圧、放電路長さの関係を、圧力で正規化された放電路の線抵抗として示したものである。すなわち式 (1.2) から

$$V_{gc} i_s^{-1} l_{spk}^{-1} p^{-0.51} = A i_s^{-0.32} \quad (4.2)$$

このように変形した場合の左辺が Fig. 4.9 の縦軸である。ここでは A は定数、 p は圧力である。圧力や撮影条件の異なる 27 実験をまとめてプロットしている。Fig. 4.9 中の線は式 (4.2) に相当する。このように放電路長さの計測を高精度化しても既存式は、おおむねの傾向を把握できていることがわかる。他方で電流が大きな部分での誤差が大きい。特に点火では放電初期の延伸が点火現象に与える影響は大きく、この部分の高精度が必要である。そのため放電路が延伸し、1 回目に切断されるまでの放電路の変形に着目して、放電路長さと放電路の抵抗値との関係を示したのが Fig. 4.10 である。このように抵抗値は放電路長さに比例しているというよりは、およそ放電路長さの 1.8 乗に比例して増加していることが明らかとなった。このように放電路の初期について、既存式を用いているよりも放電路の抵抗を放電路長さの関数として示した方が、より精度よい予測ができることが明らかとなった。

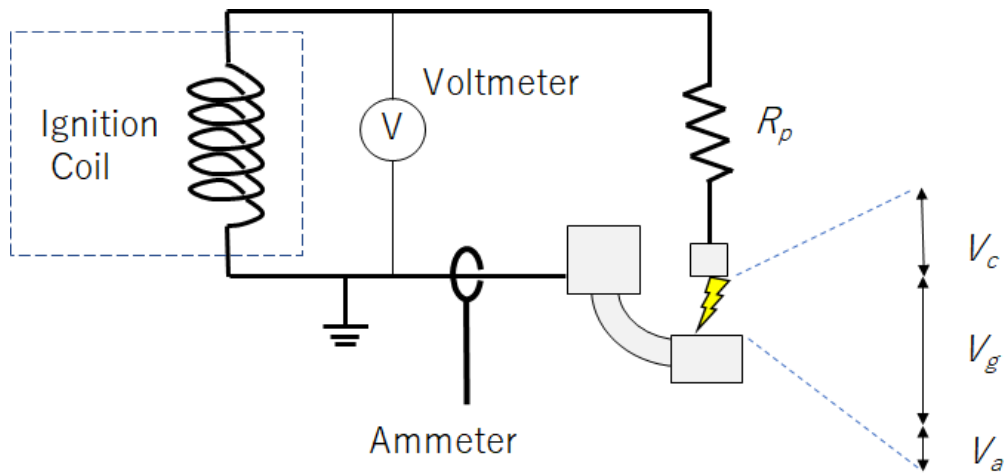


Fig. 4.7 電圧と電流測定の概要図

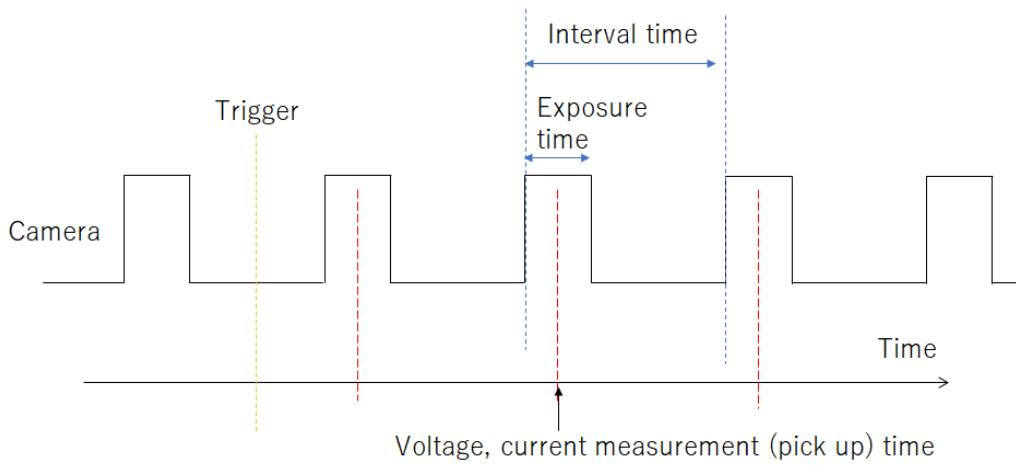


Fig. 4.8 電気的特性における測定タイミングの比較

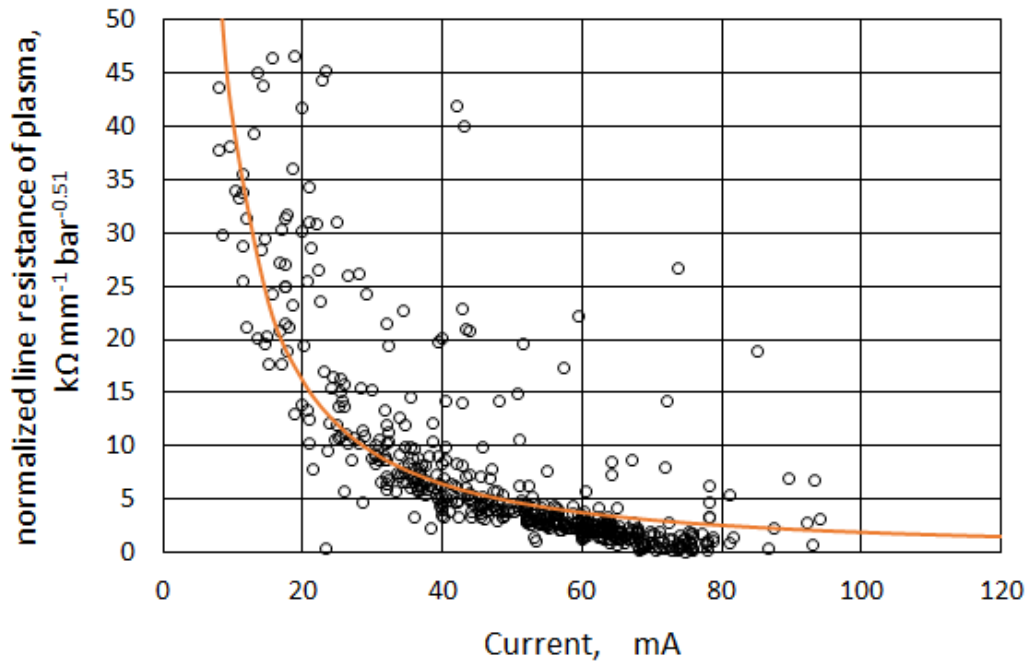


Fig. 4.9 放電長さの二値化による既存の式と電気的特性の比較

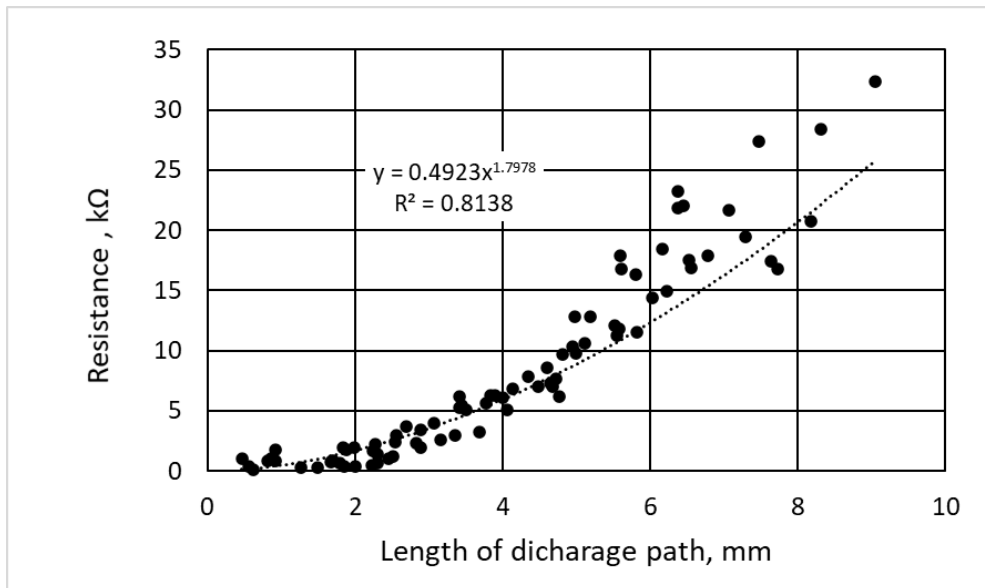


Fig. 4.10 電気抵抗と放電経路長の関係 ($P = 0.5\text{MPa}$)

4.3 既存実験式の解釈に向けた検討

前節において、特に放電初期においては放電路の線抵抗は電流のおよそ 1.8 乗に比例するという実験結果が得られた。これはそもそもの式 (1.2) が構築された際の「放電路の長さが長くなると、それに伴い電気抵抗が増加するので、放電路長さ ξ と放電路の抵抗値は比例する」という仮説を否定している。また式(1.2)の電流の指数 (-0.32 乗) に関しても、静止場雰囲気の実験的に求められた値であり、これに関する物理的な解釈はない。これらの観点から、放電路内のプラズマの状況において、再度検討を行った。

ここでは放電路に沿った 1 次元定常問題を考え、放電路に沿って x 座標をとる。電流密度 j は以下で与えられる³⁶⁾。

$$j = -nev \quad (4.3)$$

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、

$$\frac{d^2}{d\xi^2}(V) = \frac{ne}{\varepsilon} \quad (4.4)$$

であり、 V は電圧、 ε は誘電率である。速度 v は、ここでは電子の衝突を考えず電子の質量を m とし、以下として取り扱う。

$$\left(\frac{1}{2}\right)mv^2 = eV \quad (4.5)$$

これから、 v と ne を消去して、

$$\frac{d^2}{d\xi^2}(V) = -\left(\frac{j}{\varepsilon}\right)\left(\frac{m}{2e}\right)^{\frac{1}{2}}V^{-\frac{1}{2}} \quad (4.6)$$

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

$$j = -\left(\frac{4\varepsilon}{9}\right)\left(\frac{2e}{m}\right)^{\frac{1}{2}}V^{\frac{3}{2}}\xi^{-2} \quad (4.7)$$

の関係が得られる (チャイルド・ラングミュアの式)。式 (4.7) から、

$$j \propto V^{\frac{3}{2}} \quad (4.8)$$

である。電流 i_s は電流密度に面積 S を乗じればよいから、

$$i_s = -(j)S \quad (4.9)$$

であるから、放電路の長さを l_{spk} として書き直すと、

$$i_s = \left(\frac{4\varepsilon}{9}\right) \left(\frac{2e}{m}\right)^{\frac{1}{2}} S V_{gc}^{\frac{3}{2}} l_{spk}^{-2} \quad (4.10)$$

V_{gc} について解くと、

$$V_{gc} = \left(\frac{9}{4\varepsilon}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{m}{2e}\right)^{\frac{1}{3}} S^{-\frac{2}{3}} i_s^{\frac{2}{3}} l_{spk}^{\frac{4}{3}} \quad (4.11)$$

となる。放電路の抵抗値は V_{gc}/i_s は、

$$\frac{V_{gc}}{i_s} = \left(\frac{9}{4\varepsilon}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{m}{2e}\right)^{\frac{1}{3}} S^{-\frac{2}{3}} i_s^{-\frac{1}{3}} l_{spk}^{\frac{4}{3}} \quad (4.12)$$

となる。この解析では放電路の抵抗値は、放電路長さ l_{spk} の $4/3$ 乗に伴って大きくなっている。前節では、放電路の抵抗値と放電路長さの関係は、放電路の 1.8 乗であった。いずれの場合も、放電路の長さに抵抗値が比例するという単純なモデルを否定している。放電路の長さの指数が異なるのは、式(4.10)では電流の大きさも放電路の抵抗値に影響を与えている。また放電路の断面積 S も考慮する必要がある、前節の実験結果はこれらの影響を分離できていないために、指数の値に差異が生じているものと考えられる。

4.4 放電路の断面積に関する検討

前節の議論から、放電路の断面積も放電の電気特性に影響を与えることが明らかとなった。放電路の断面積は放電路の太さを見積もればよいと考えられる。このため以下ではこれについて、主に3つの観点から検討を実施した。第一には、Fig.4.4にて議論したように画像処理によって、放電路の面積を算出することができるので、放電路の面積を放電路の長さ（周囲長の1/2）で除すことで放電路の太さを評価することを考えた。ただし、Fig.4.4に示したとおりで、放電路の面積は二値化の閾値の影響を受ける。そのため、ここでの解析で求められるのは、撮影条件、解析の閾値によって求まる「みかけの太さ」であり、これの物理的な解釈には仮定した条件を考慮する必要があることに留意しなくてはならない。「みかけの太さ」の解釈は難しいが、この解析により得られる示唆もあったために、以下ではその概要について示す。第二および第三には、この「みかけの太さ」に影響を与えるものとして、露光時間中の放電路の移動と、放電路の輝度を想定して、それらが電流などどのような関係にあるかについて調べた。これらをもとに「みかけの太さ」の要因について議論をした。

4.4.1 二値化処理を用いた放電路太さの検討

ここでは、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（みかけの太さ）として定義することとしたが、Fig. 4.4に示すとおり、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、各一連の放電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。Fig. 4.11にその例を示す。放電時間は1ms程度であり、35000fpsで測定しているので、30枚強の撮影画像が得られており、それらを放電開始からの時刻とともに、上段に並べた。輝度閾値を70として二値化した画像が下段である。

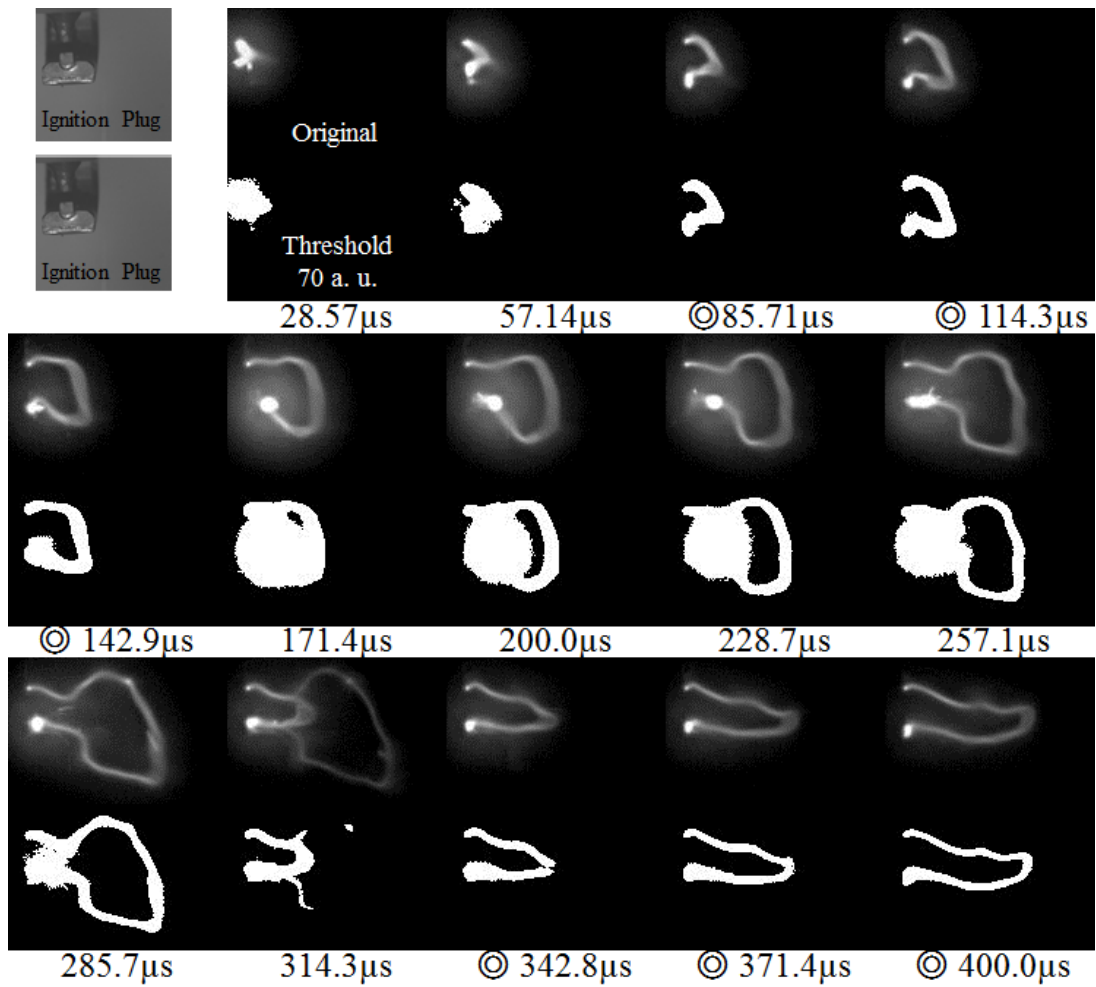


Fig. 4.11 (1) 上段はオリジナル放電写真，下段は二値化（閾値 70 a.u.）した放電写真
 (Air, $U_m = 18.5$ [m/s], $P = 0.43$ MPa(abs))

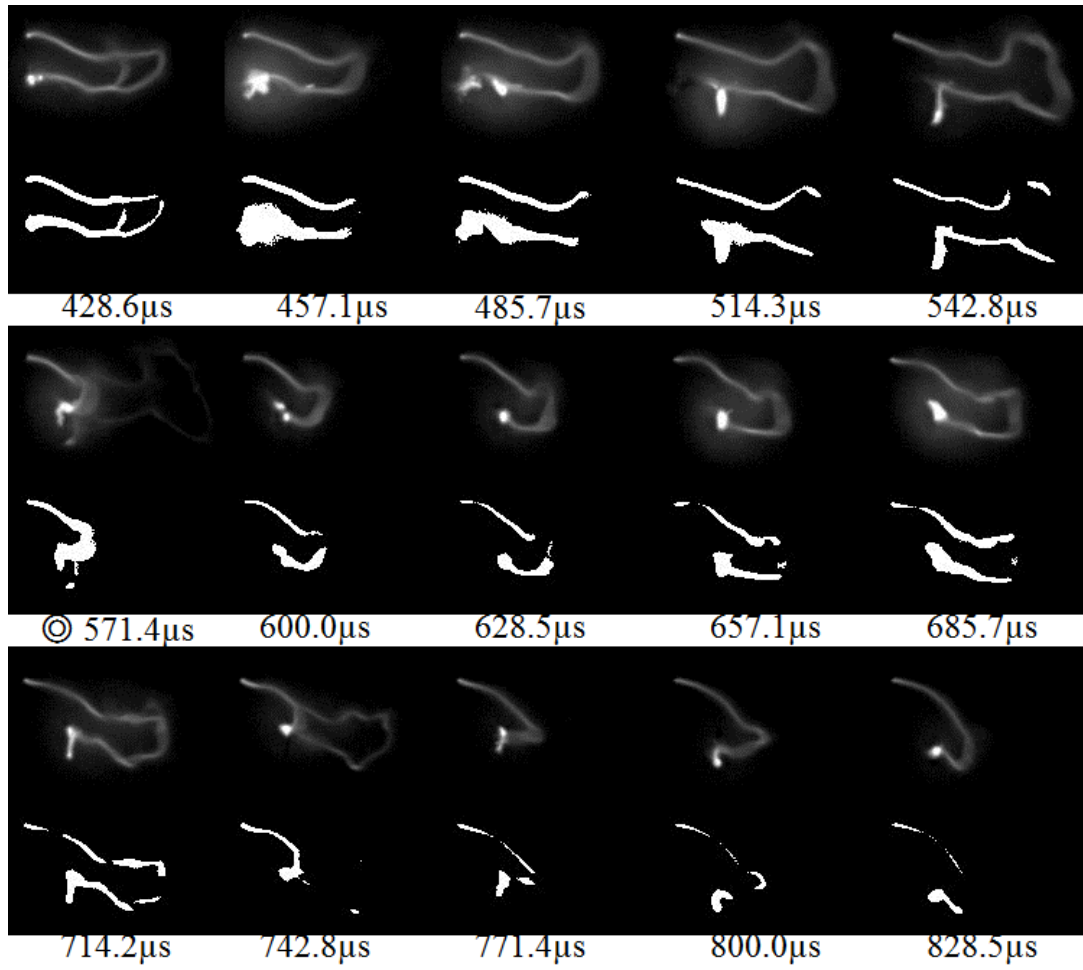


Fig. 4.11 (2) 上段はオリジナル放電写真，下段は二値化（閾値 70 a.u.）した放電写真
 (Air, $U_m = 18.5$ [m/s], $P = 0.43$ MPa(abs))

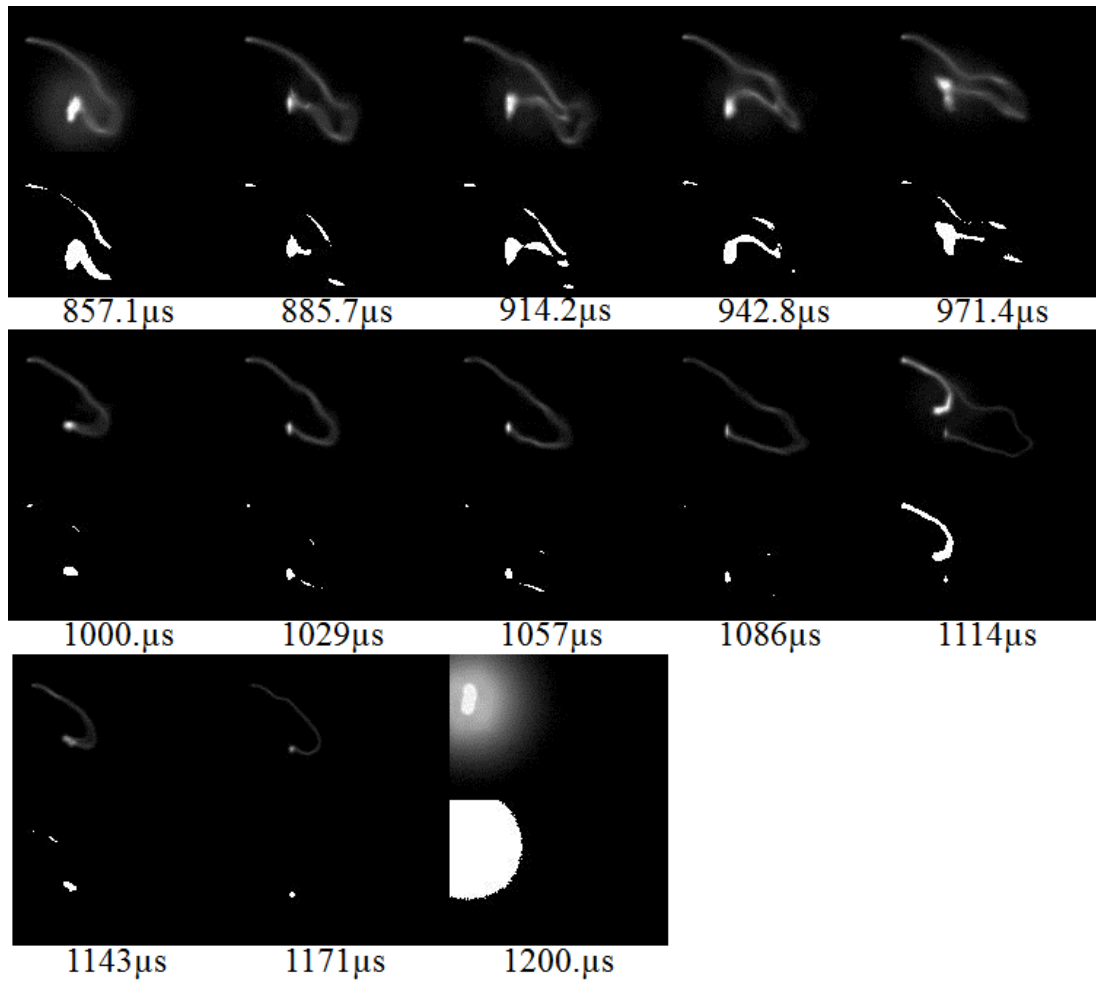


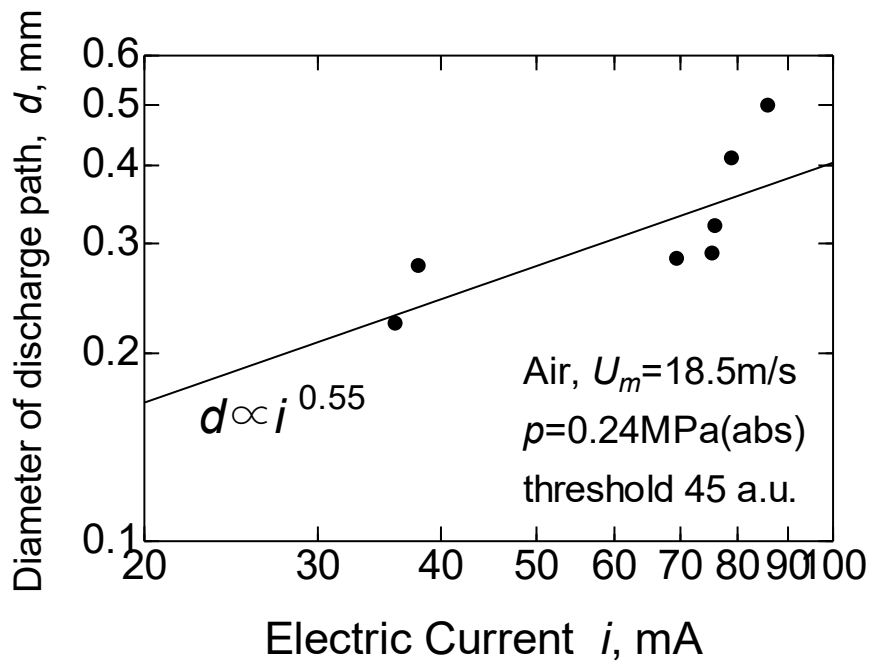
Fig. 4.11 (3) 上段はオリジナル放電写真, 下段は二値化 (閾値 70 a.u.) した放電写真
 (Air, $U_m = 18.5$ [m/s], $P = 0.43$ MPa(abs))

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 $171.4 \mu\text{s}$ のものは、放電路が結合しているために除外、また時刻が $600.0 \mu\text{s}$ のものは、放電路が切断されているために除外した。Fig. 4.11 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り、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。なお空気以外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つたことから、作動ガスが空気の場合について検討を行った。

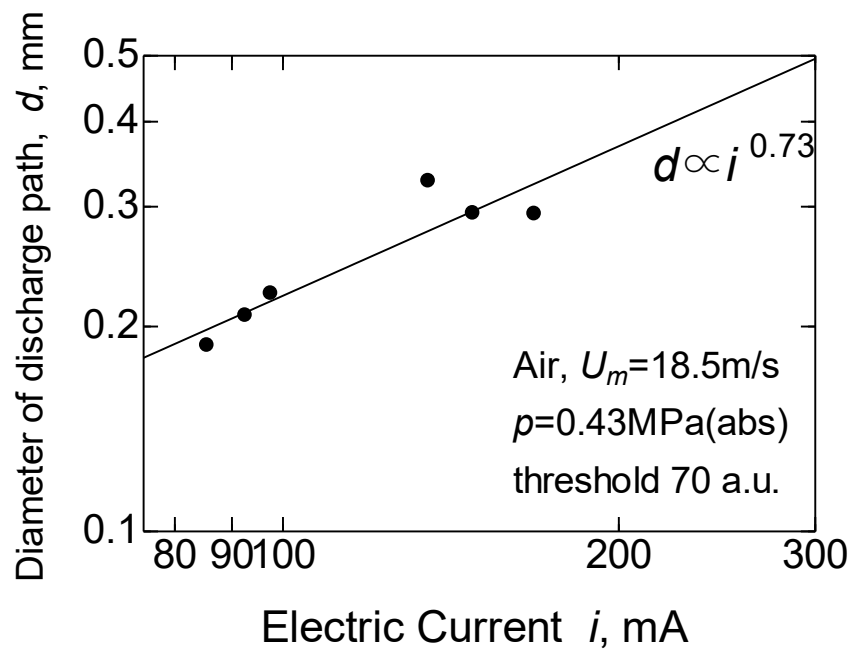
上記の手法を用いて、圧力条件が $0.24 \text{ MPa (abs)} \sim 0.82 \text{ MPa (abs)}$ における放電路のみかけの太さ d を、その時刻における電流値の関数として示したものが Fig. 4.12 である。各グラフにおいては、採用した閾値をあわせて示している。Fig. 4.11 の画像は、Fig. 4.12(b)に対応している。ここでは、横軸を電流 i として整理した。Fig. 4.12 からは、電流値に対して放電路径をプロットすると電流値が大きいほど、放電路径が大きい傾向が見て取れ、電流値と放電路径の間には相関があることが示唆される。図の各グラフ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

$$d \propto i^a \quad (4.13)$$

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分かる。

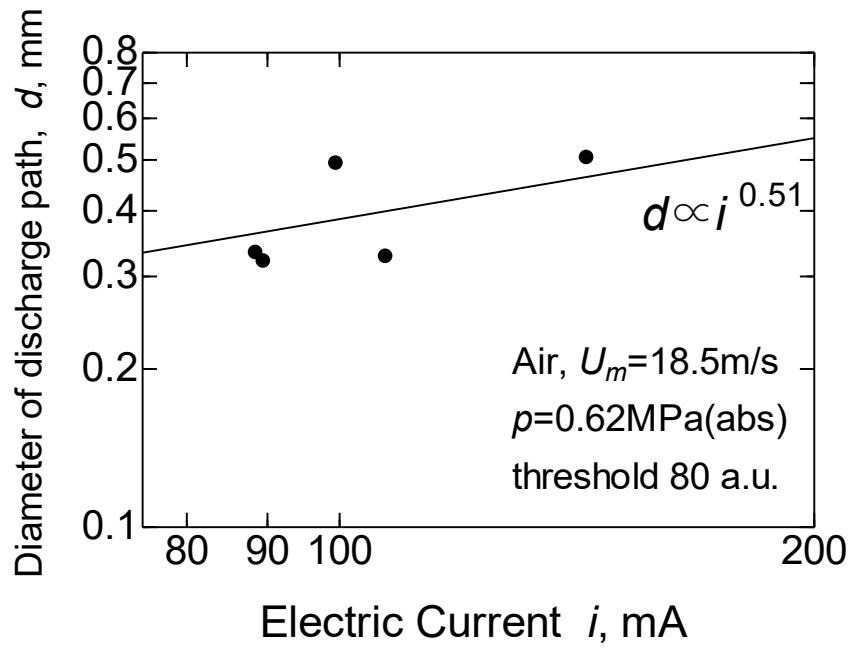


(a)

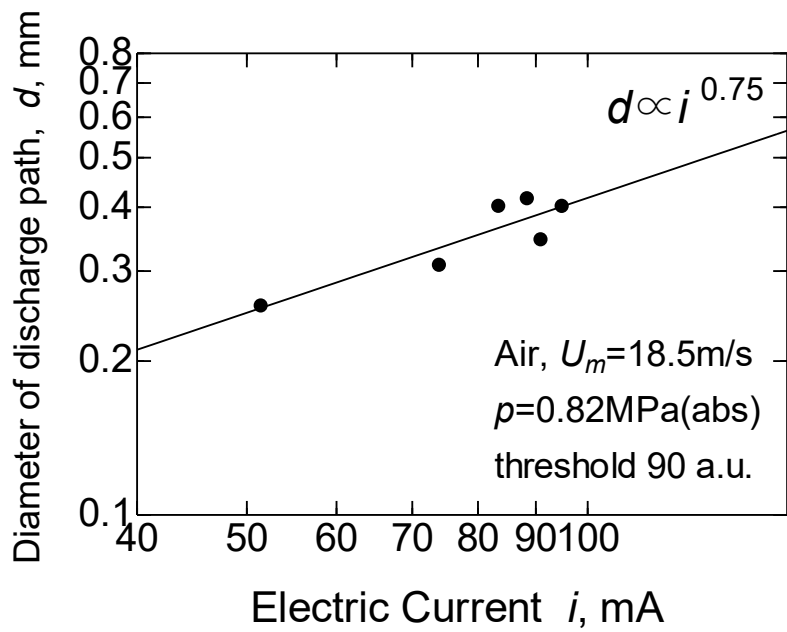


(b)

Fig. 4.12 (1) 各圧力における電流と放電経路のみかけの太さとの関係



(c)



(d)

Fig. 4.12 (2) 各圧力における電流と放電経路のみかけの太さとの関係

放電路の断面積 S は放電路徑を円形とみなし、ここで計測された見かけの放電路徑 d を用いて $S = \left(\frac{\pi}{4}\right) d^2$ と書けるとする。式(4.12)から、 d は i のみの関数と大胆に仮定して、比例定数を C とかくと

$$d = C i^a \quad (4.14)$$

である。これらを式(4.11)に代入すると

$$V_{gc} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{-\frac{2}{3}} \left(\frac{9}{4\epsilon}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{m}{2e}\right)^{\frac{1}{3}} C^{-\frac{4}{3}} i_s^{\frac{2}{3}(1-2a)} l_{spk}^{\frac{4}{3}} \quad (4.15)$$

となる。Fig. 4.12 において、 a は 0.5 から 0.75 程度の値を取っており。式(4.15)における i_s の指数 $2(1-2a)/3$ は、 $a=0.5$ で 0、 $a=0.75$ で $-1/3$ となる。式(1.2)における i_s の指数は -0.32 であるから、仮に $a=0.75$ であれば、 V_{gc} と i_s との関係は式(1.2)によく似ていることとなる。ここで計測している d はあくまで、見かけの太さであり、放電路の太さそのものではない。撮影条件 (撮影速度) や閾値にも依存するため、放電路の移動速度、放電路の発光強さ、放電路内の発光分布を含んだ測定の結果となっている。また、この解析の中でも、 d は i のみの関数という大胆な仮定をしている。しかしながら、偶然にも式(1.2)をよく再現する値が計測されるということは、これらの仮定が部分的には支配的な現象を含んでいると考えられ、今後の現象解明の足掛かりになると思われる。

もう少し測定結果と、式(4.15)の関係について考察する。式(4.7)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(1.2) 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(4.13) において実験結果から $a > 0.5$ であったこと、すなわち放電路のみかけ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、定性的に説明が可能である。

また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 を式(4.7)を用いて算出してみる。 $V_{gc} = 2 \text{ kV}$ 、 $\xi = 1 \text{ mm}$ とし、電流密度が $j = 2.1 \times 10^5 \text{ A/m}^2$ であり、Fig. 4.12 から $d = 0.5 \text{ mm}$ を代入すると、 $i = 41 \text{ mA}$ となる。オーダーとしては Fig. 4.12 の結果と合致しているものの、電流値としては小さい値となっている。前節のモデルは 1 次元であり、分子等との衝突は考慮してない。またここでは高速度撮影画像から閾値を用いて放電路徑を算出したが、これはあくまで見かけの太さであり、放電路徑の見積もりについても、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。

4.4.2 放電路撮影における露光時間の影響

火花放電の発光は重要なパラメーターの一つであり、かつ放電路の直径（画像上では幅に相当するが、放電路が円形であると仮定し直径と表記）は撮影時の露光条件によって変化する可能性がある。ここでは露光条件の影響を検討した。Table 4.3 は実験条件であり、同一条件下において露光時間を3種類として実験を行った。

Table 4.3 露光時間の影響把握実験の実験条件

気体条件	空気
バウファ圧	1MPa
Test section 内の圧力	0.43MPa
流速条件	14.2m/s
露光時間	24 μ s, 10 μ s, 4 μ s
フレームレート	40000fps

実験により得られた放電路画像を Fig. 4.13 に示す。この実験では Phantom veo1310 というカメラを用いており、M310 よりもより短い露光時間で観察が可能であった。放電路は左から右に向けて流れており、流れに沿って放電路が延伸している様子が確認される。実験より得られた画像の一部を Fig. 4.14 を示す。この図に示されるように先端と上と下の根元の3点の太さに着目して、露光時間を変化させて計測した。Fig. 4.15 に露光時間を変化させた場合の各実験における電流電圧値の時間変化を示す。このように露光時間を変化させ、他の設定した実験条件が同一であっても電流電圧値にはばらつきが生じることわかる。一方で放電初期においては、電流、電圧は含めて同様な値であり、異なる実験ではあるが、放電初期では露光時間の影響を抽出できると考えられる。

Fig. 4.16 に放電路の延伸先端位置の時間変化に対する露光条件の影響を示す。図には2次元計測におけるx方向変化、y方向変化を示している。図から放電初期の位置移動は概ね一致しており、これらは前図の電圧電流変化と合致した結果といえる。主流方向への移動に比べ、y方向（主流垂直方向）への移動は大きくなく、放電路延伸が流動場の流れに大きく影響されていることが確認できる。初期の延伸における位置移動はほぼ直線的あり、速度を算出すると、露光時間 24 μ s の場合に x 方向では初期 4 mm までで 13.3m/s、y 方向では 1mm までが 5.0 m/s と見積もられる。x 方向、y 方向を合成すると主流速度とほぼ一致しており、放電路延伸の駆動力が流動であることを示唆している。またこの範囲でいずれの露光条件でも延伸の位置移動については露光時間の影響はないといえる。Fig. 4.17, Fig. 4.18 および Fig. 4.19 に各露光時間における先端 Tip、放電路の根本の上部 Cathode side、放電路の根本の下部 Ground side の直径計測の結果を示す。先端については、露光時間によって大きくその

値が異なっている。露光時間における主流方向の流速(14.2m/s)は、露光時間が $24\mu\text{s}$, $10\mu\text{s}$, $4\mu\text{s}$ の場合でそれぞれ 0.34mm, 0.13mm, 0.057mm と見積もられる。これらの図の結果は、 $10\mu\text{s}$, $4\mu\text{s}$ での結果とおおよそ同じ値となることから、先端部太さ計測には露光時間の影響が大きいと考えられる。一方で根元部分に関しては露光時間を変化させても大きな差異はなく、電流値が時間とともに大きく変化しているにも関わらず、放電路太さの変化は小さいことから、放電路太さの電流への依存性は低いものと結論付けられる。

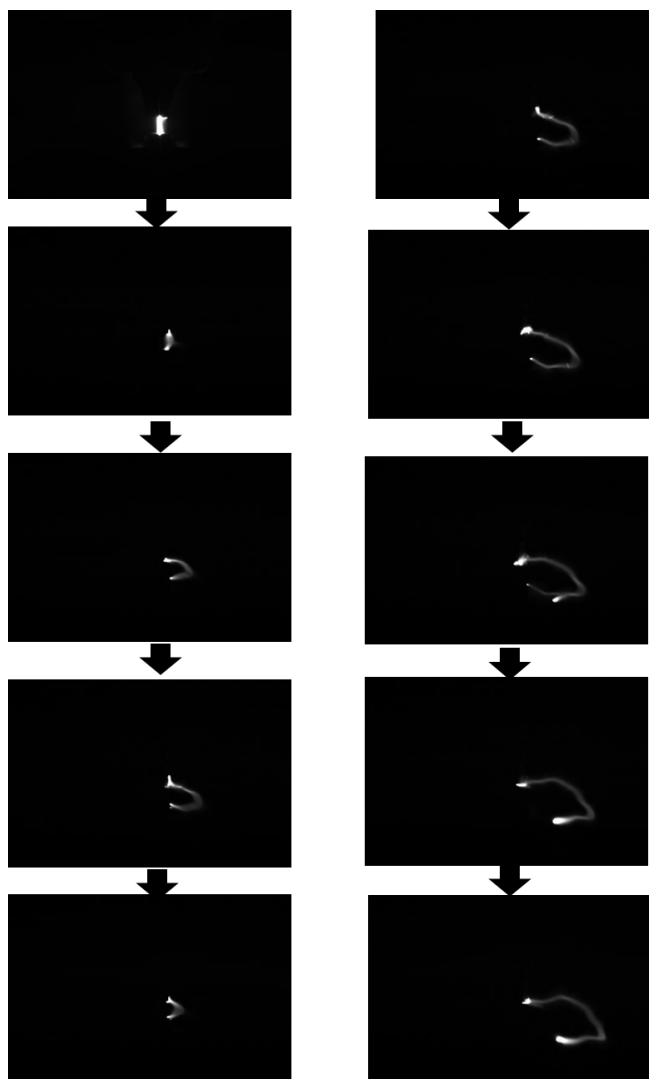


Fig. 4.13 流動場中の放電路画像
(40000fps, $U_m=14.2\text{m/s}$, 0.43MPa)

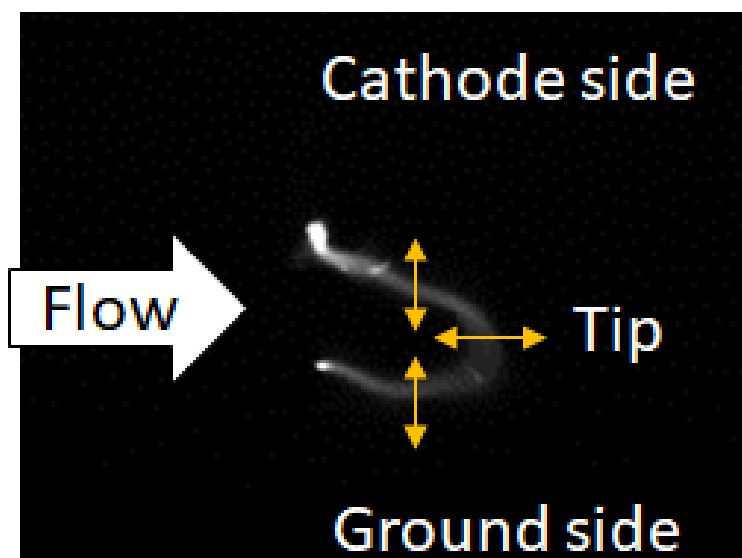


Fig. 4.14 計測方法の画像一部

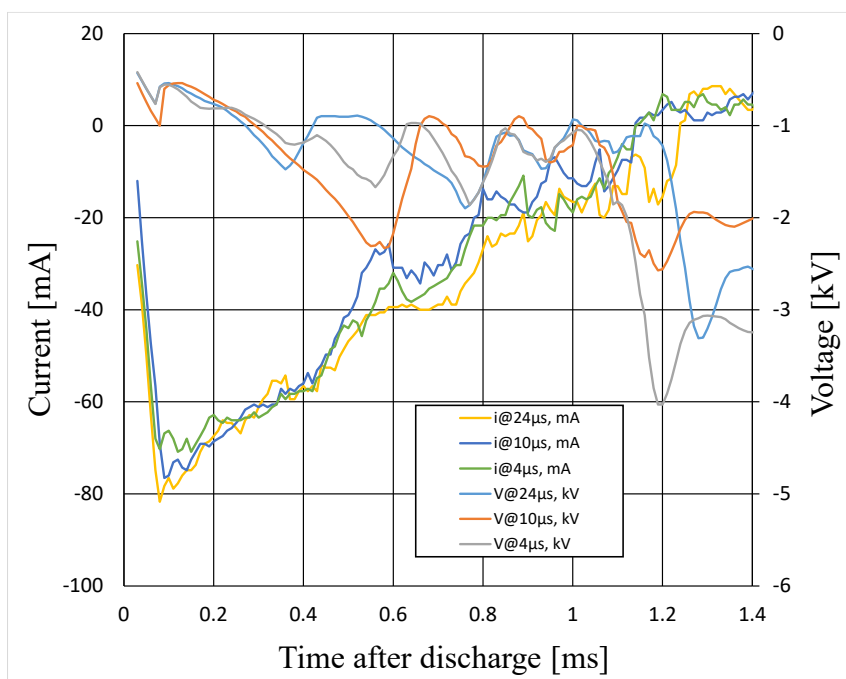


Fig. 4.15 露光時間実験における電流電圧値変化

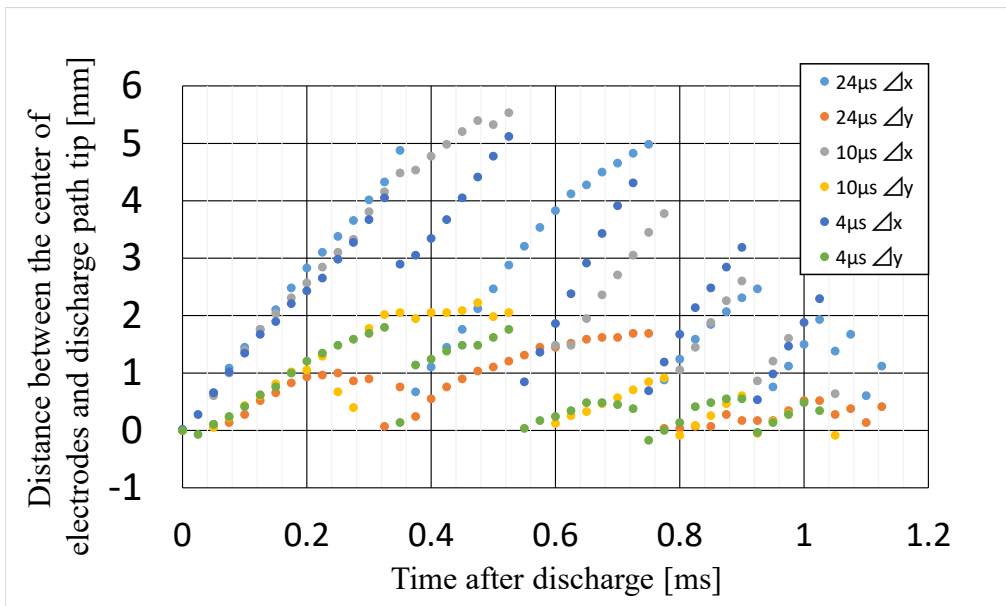


Fig. 4.16 放電路先端位置 (x 方向, y 方向) の時間変化 (露光時間の影響)

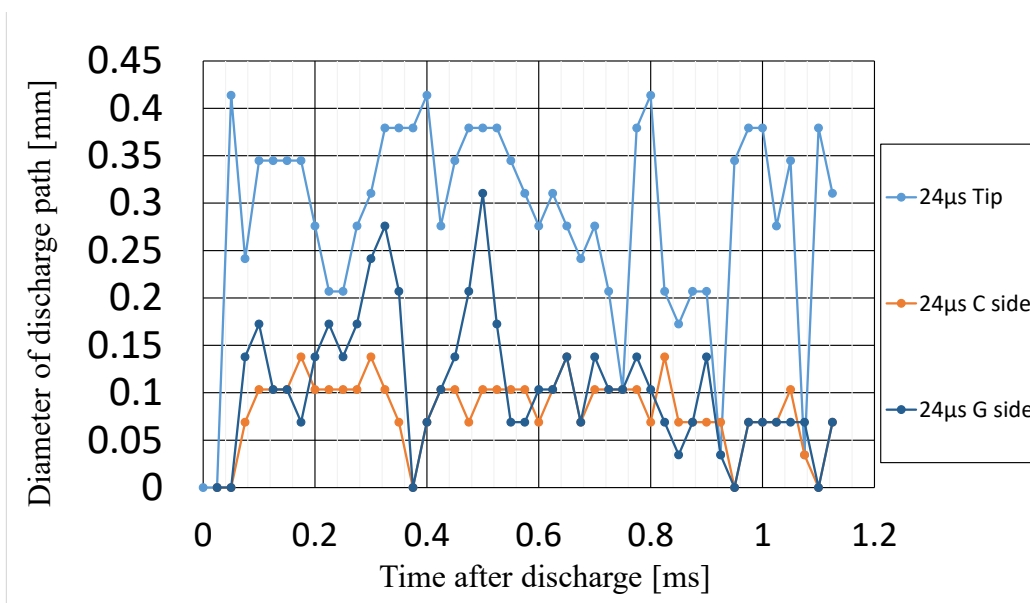


Fig. 4.17 放電路直径と時間の関係 (露光時間 24 μ s)

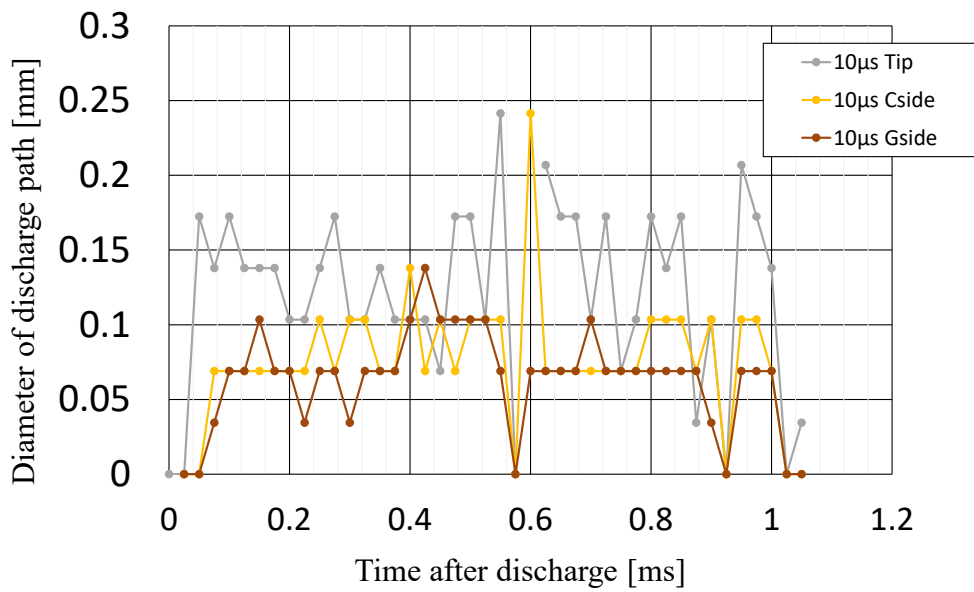


Fig. 4.18 放電路直径と時間の関係（露光時間 10 μ s）

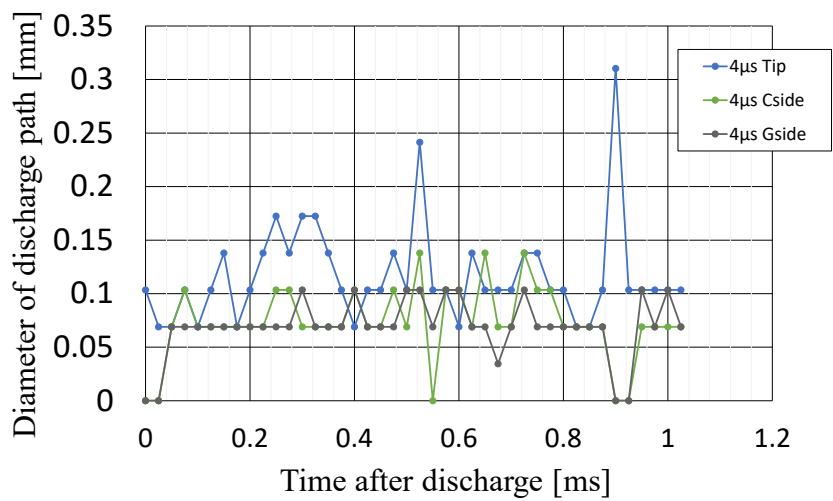


Fig. 4.19 放電路直径と時間の関係（露光時間 4 μ s）

放電路太さについて、さらに考察を深めるため Fig. 4.20 には放電路直径方向の輝度分布を示す。図の横軸は放電路の中央を 0 として、放電路長さ方向に直交する直径方向に長さを計測している。図上部は、放電路の根本の下部 **Ground side** の結果である。露光時間が変化していても、半値幅はほぼ一致した分布を示していることから、放電路直径への露光時間の影響は大きくないことがわかる。図下部の放電路の根本の上部 **Cathode side** の輝度分布はその幅が変化しているように見受けられる。これは Fig. 4.13 に示したように、**Cathode Side** については、露光時間中に y 方向に放電路が移動していることが要因と思われた。その移動速度は Fig. 4.16 からおよそ 5m/s と見積もられる。このため放電路がその流速で移動したとした解析を行った。基準として露光時間 $1\mu\text{s}$ のときの輝度分布仮定し、それが移動しなければ、撮影時間中に時間とともに幅が変わらずに輝度値が上昇していくが、移動する場合には、撮影時間中に幅が広がりながら輝度値が上昇していくと仮定した。Fig. 4.21 (a)にその積分イメージをしめす。このイメージに基づき、露光時間 $1\mu\text{s}$ のときの輝度分布を半値幅 0.055mm の輝度分布として仮定して、これが速度 5m/s で移動したとした場合の各露光時間における輝度分布を、実験値とともに Fig. 4.21(b)に示す。このようにこの仮定は実験結果をよく再現しており、露光時間により輝度分布の幅が異なるのは、露光時間中における放電路の移動が主要因であると推察される。

以上の議論から、放電路の太さは放電期間中に大きく変化しないと予測される。

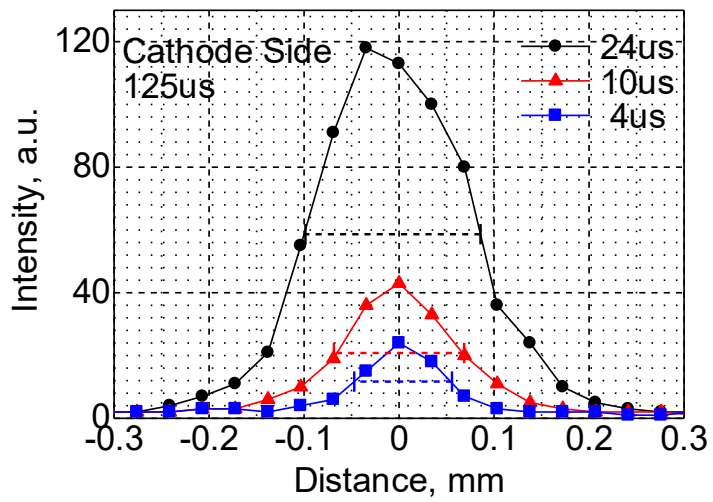
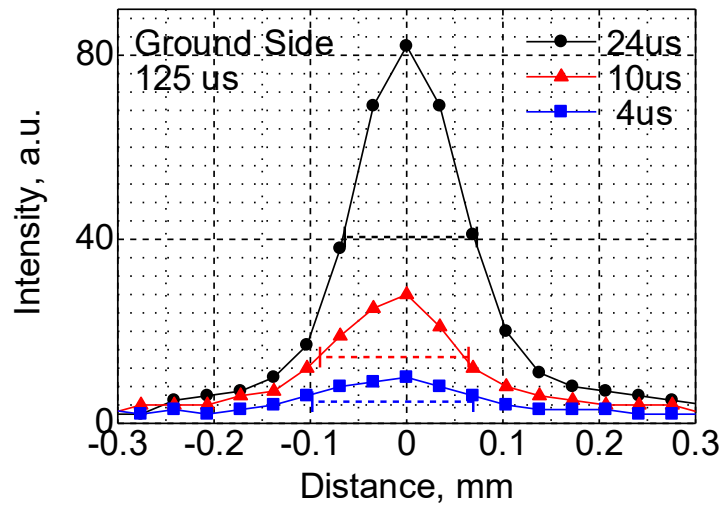


Fig. 4.20 異なる露光時間による放電路直径方向の輝度分布

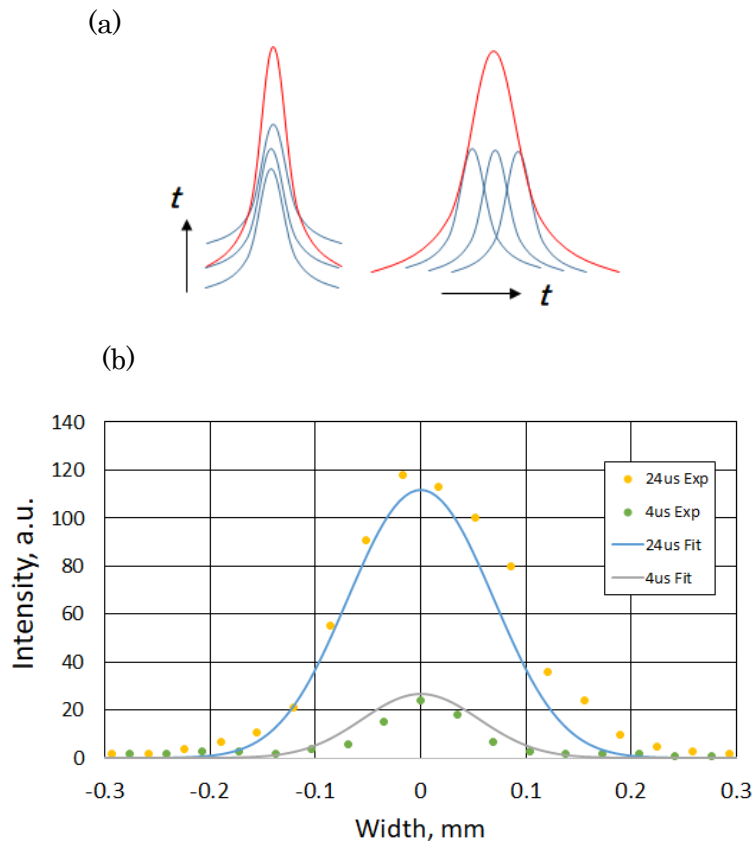


Fig. 4.21 露光時間 $1\mu s$ のときの輝度分布仮定とその仮定のもとでの露光時間 $4\mu s$ および $24\mu s$ のとき輝度分布 (a) 輝度分布の積分イメージ (b) 半値幅 0.055mm の輝度分布(露光時間 $1\mu s$)が速度 5m/s で移動したとした場合の各露光時間における輝度分布 (曲線) と実験値 (プロット) の比較

4.4.3 放電路撮影における輝度値の影響

4.4.1 で議論したみかけの放電路太さを議論するにあたっては、撮影された放電路自体の輝度値も影響を与える。そのため撮影された放電路の輝度値について簡単に考察を実施した。ここでは実験で得られたビットマップ画像から、その画像内の輝度値が最大値 255 に達していない画像を抽出した。そのような画像において、輝度値が 10 以上の場所を放電路として認識し、輝度値 10 以上のピクセルの輝度値の算術平均を算出した。この平均値を、その画像が撮影されたタイミングの電流値の関数として示したものが Fig. 4.22 である。図はテストセクション部の圧力が 1MPa であり、2つの露光時間の場合についてプロットをしている。この図に示されるように、電流が増加するにつれて平均の輝度値は上昇していることがわかる。図にあわせて、0mA で、輝度値が 10 となるような直線を加えており、最小二乗近似で求めたその直線の傾きは、露光時間の増加に伴い増加しており、その増加率 $0.4235/0.1857 = 2.28$ は露光時間の増加率 $10/4 = 2.25$ とおよそ等しい。これから電流値と平均の輝度値にはほぼ線形の一定の相関があることが明らかとなった。輝度値については、前節の議論から、それ自体の発光とともに、放電路が移動している効果も含まれており、これ自体の物理的意味は明確ではない。ただしこれは発光に関連することであるから、放電路の出力 $P = (\text{電流}) V \times (\text{電圧}) i$ に関係する量であると推察される。

式(4.15)にもどり $V_{gc} \times i_s$ を算出すると、

$$P = V_{gc} i_s = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{-\frac{2}{3}} \left(\frac{9}{4\epsilon}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{m}{2e}\right)^{\frac{1}{3}} C^{-\frac{4}{3}} i_s^{\frac{1}{3}(5-4a)} l_{spk}^{\frac{4}{3}} \quad (4.16)$$

となる。仮にこれで、 $a = 0.5$ とすると、

$$P = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{-\frac{2}{3}} \left(\frac{9}{4\epsilon}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{m}{2e}\right)^{\frac{1}{3}} C^{-\frac{4}{3}} i_s l_{spk}^{\frac{4}{3}} \quad (4.17)$$

となり、 P は電流 i に対して線形に変化することになる。この物理的な意味は明確でないが、Fig. 4.12 で観察された効果のうち、 $a = 0.5$ に近い現象については、このような輝度変化の影響を受けているものと推察される。

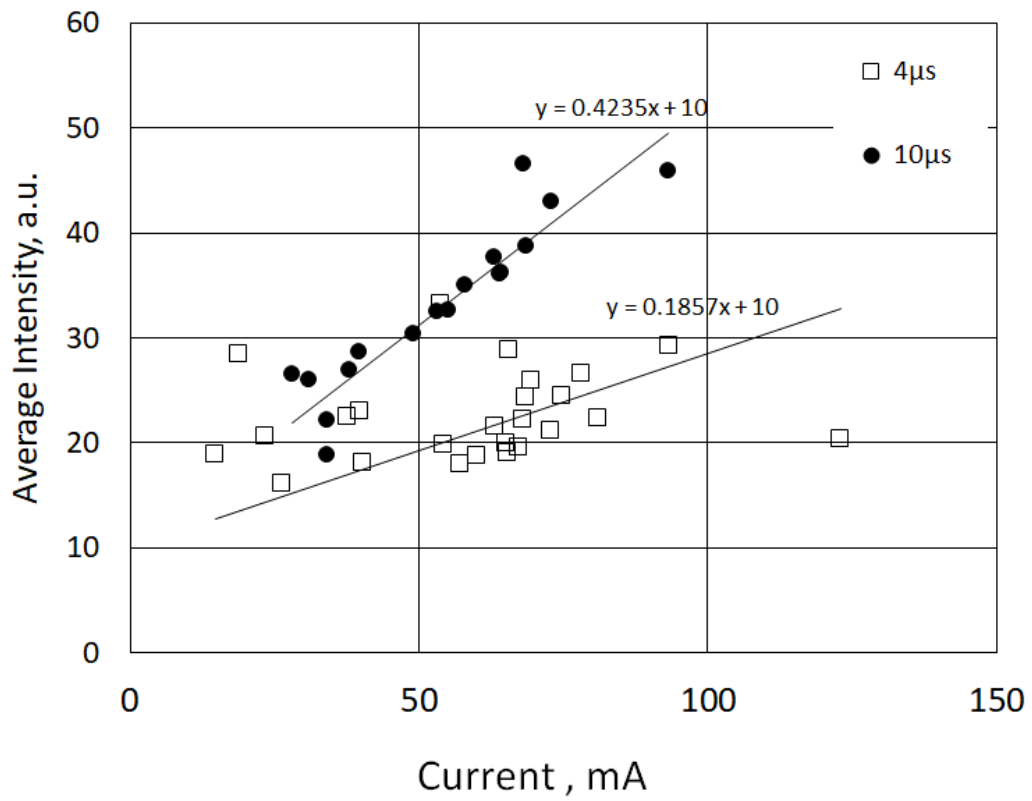


Fig. 4.22 電流値と平均輝度値（輝度値 10 以上）の関係（1MPa）

4.5 放電路延伸における3次元変形の影響

前節までの可視化は点火プラグ電極間を基準とした主流に垂直な視野を対象として可視化により検討を行ってきた。放電過程では放電路は主流に平行な平面内においてその形状は湾曲、ゆがみを有しており、また再放電や短絡を繰り返すが、これらの過程では観測している主流平面に垂直な変形も生じている。この影響に関する考察は、現状までに得られている2次元の計測結果の知見と、数値シミュレーションでなされる3次元的な放電路の変形の過程を接続する上で重要である。以上から2カメラ同時撮影による放電路の3次元計測を実施し、これにより放電路の3次元的な変形に関する知見を得ることを試みた。前節までの高速度カメラ(Phantom M310, 以後 Front)に加え、点火プラグの下方直交方向に高速度カメラ(Phantom v2512, 以後 Bottom)を設置し2台のカメラを同期させて放電路の変形を撮影した。Fig. 4.23 に電極部に対する可視化方向および可視化装置の外観を示す。2台のカメラの撮影速度は35000fpsであり、それぞれの解像度はPhantom M310 (Front) が320x240 pixel, Phantom v2512 (Bottom) が640x480 pixelとした。ここでは実験に供する流体は空気、窒素ガスおよびプロパン-窒素予混合気であり、バッファータンクでの圧力は1MPaとした。試験期間中のオリフィス径は8mmである。燃焼室にある点火プラグの付近での平均流速は18.5 m/sであり、テストセクション内圧力は0.5 MPaである。

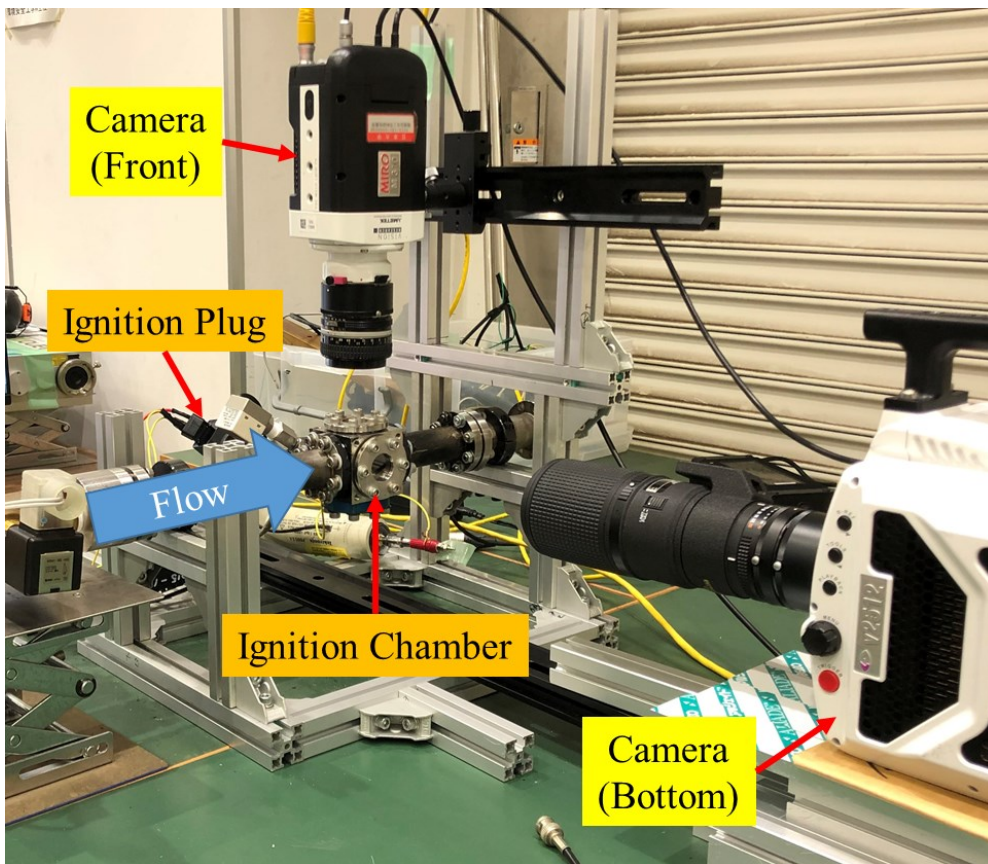
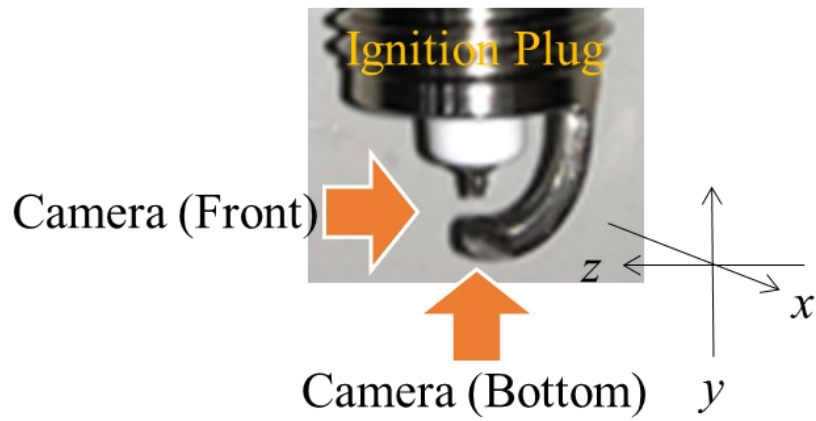


Fig. 4.23 二つのカメラによる直交撮影実験装置

Fig. 4.24 には 2 台のカメラによる放電路挙動の可視化結果を示す。図において①から③はそれぞれ、空気、窒素ガスおよび当量比 $\phi = 0.2$ 相当プロパン窒素予混合気 ($\phi = 0.2$ のプロパン空気予混合気の酸素を窒素で置換したもの) である。前節等と同じ方向 (Front) 方向から撮影された画像により、放電路が流動によって大きく引き伸ばされ、放電路が点火プラグのギャップから延伸する過程が示されている。点火プラグの底面 (Bottom) からの画像では放電路が流動により点火プラグから大きく引き伸ばされるとともに、放電路と電極の接触場所も大きく変化していることがわかる。これにより放電路が流動により 2 次元ではなく 3 次元的に変形することが確認された。空気、窒素ガス、当量比 $\phi = 0.2$ プロパン窒素予混合気においても同様に 3 次元的な変形があり、作動流体における大きな差異は見受けられなかった。

以下では、3 次元的な放電路の長さの計測を試みた。既往の研究である Kim らの手法では、放電路長さの見積もりは電極間ギャップから最遠点まで矩形の形で長さに基づく。ここではこのような矩形計測に加え、放電路上の点を考え、その点の座標を算出することで 3 次元変形を加味した放電路長さを求める評価手法について考察した。Fig. 4.25 のように正面から得た画像に座標軸 x, y を定める。Fig. 4.25 は放電路が長く伸長している画像であり、Fig. 4.24 の◎を付したものに対応している。流動の流れ方向を x 軸、それと垂直方向に y 軸を定義した。参考までに Fig. 4.25 には、Kim らの手法をあわせて示しており、この手法では図中の赤い線により放電路長さを計測した。窒素、プロパン窒素予混合気の場合に計測された値は、それぞれ 8.952mm, 6.921mm, 9.238mm であった。Fig. 4.26 は Fig. 4.25 の視野の正面からの画像に加えて、下方向からの画像も併せて示してある。二つの視野の画像に対して、原点 (絶対座標) を電極のカソード上に定め、さらに x 方向の最も下流の点を算出し、これらの点が 2 つの視野で同じ x 座標となるように座標を調整した。Fig. 4.27 は、Fig. 4.26 で示した原点と最遠点との間を 0.2mm 間隔でプロットしている様子を示しており、このプロットされた点をもとに各点の (x, y, z) 座標を算出した。算出した点を折れ線で結ぶことにより放電路を再構築し、その長さを放電路長さとして算出した。なお xy 平面への投影線、 zx 平面への投影線の長さもここでは参考までに算出している。正面 (x, y) の場合は空気、窒素ガスおよびプロパン窒素予混合気の放電路長さがそれぞれ 8.295mm, 6.770mm, 8.236mm であった。また底面 (x, z) の場合における放電路長さは 7.770mm, 5.620mm, 7.697mm である。これをまとめたものが Table 4.4 である。いずれの場合も 3 次元的な放電路長さは、2 次元画像から求めたものよりも長いことがわかる。Kim の式については、条件により 3 次元の折れ線長さに対して長い場合、短い場合があることがわかった。Fig. 4.28 には一連の放電において、2 次元の矩形近似および 3 次元の折れ線近似を用いた場合の放電路長さの見積もり例を示す。このように、3 次元長さのおよそ 9 割の値が、2 次元の矩形近似の長さとなっている。これから、数値シミュレーションで求められた 3 次元の放電路長さにおいては、多くの実験式では 2 次元の放電路長さに基づいて構築されていることを考慮する必要がある。この報告の範囲内では、3 次元長さのおよそ 9 割が、2 次元長さに対応しているといえる。

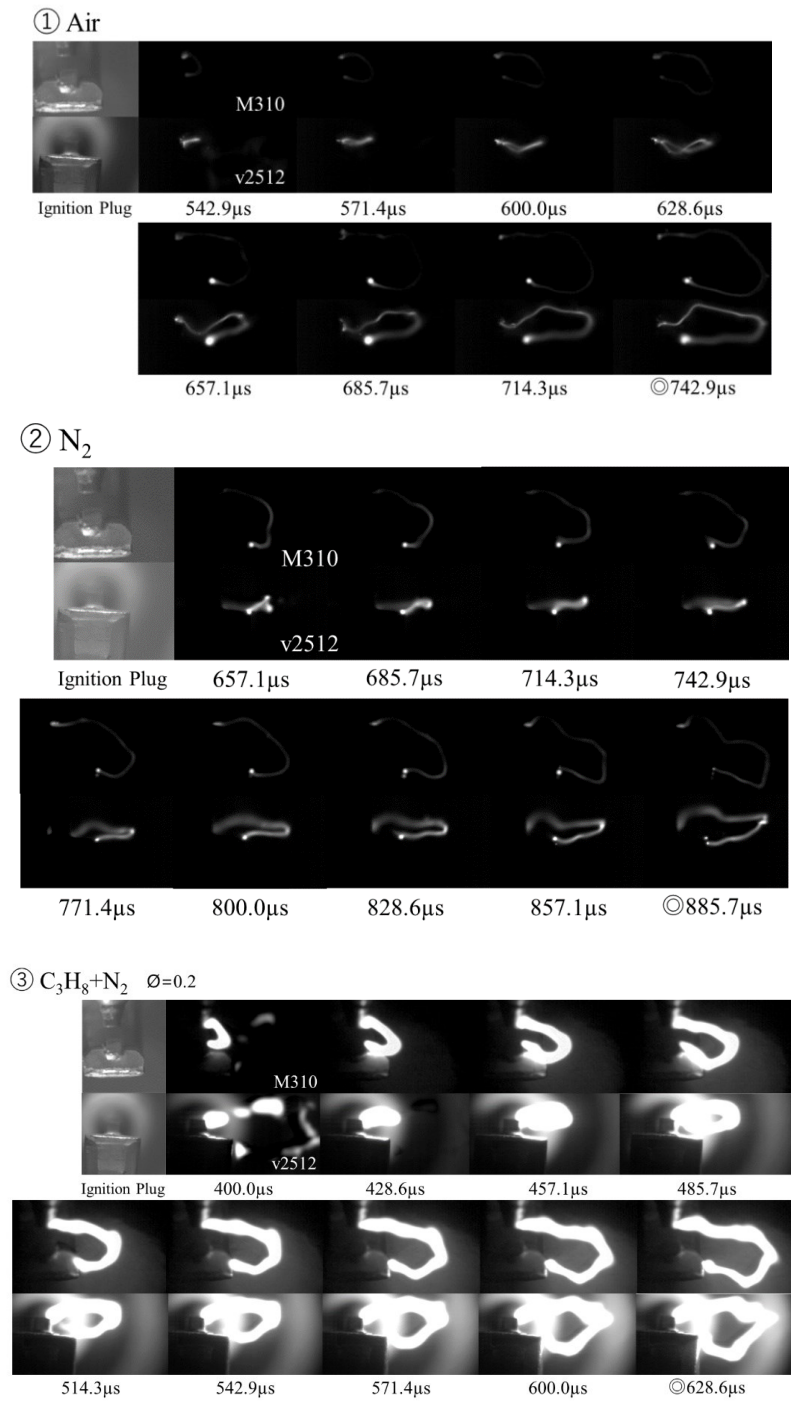


Fig. 4.24 流動場における放電挙動
 (① 空気, ②窒素, ③プロパン窒素予混合気 $\phi=0.2$)

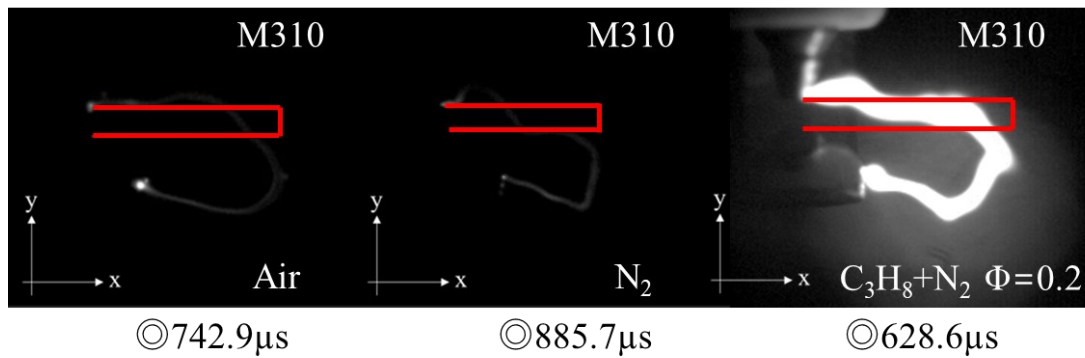


Fig. 4.25 放電経路の計測方法 (矩形)

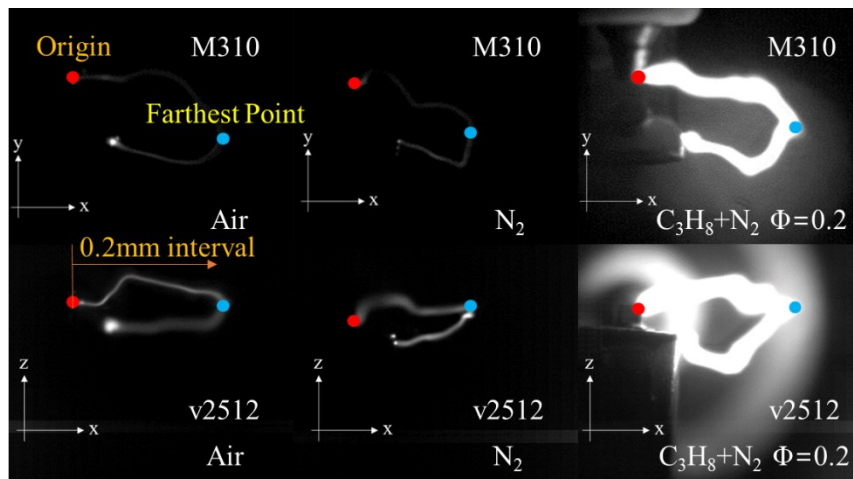


Fig. 4.26 原点と最遠点の定義

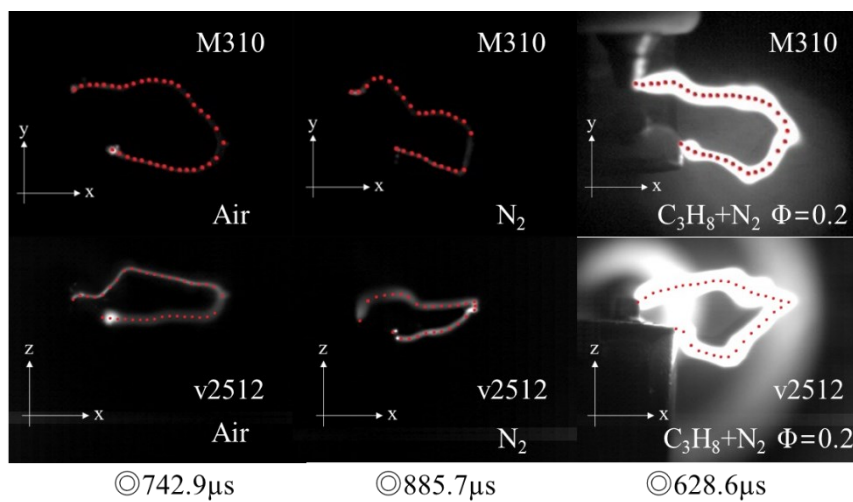


Fig. 4.27 放電経路の計測方法 (0.2mm 間隔)

Table 4.4 二方向計測により算出された放電路長さ
(空気, 窒素, プロパン窒素予混合気 $\phi=0.2$)

xy射影(折れ線) (3次元折れ線比)	8.295mm (94.8%)	6.770mm (91.8%)	8.236mm (92.8%)
xz射影(折れ線) (3次元折れ線比)	7.770mm (88.8%)	5.620mm (76.2%)	7.697mm (86.8%)
3次元(折れ線)	8.748mm (100%)	7.374mm (100%)	8.872mm (100%)
最遠点利用矩形近似 (3次元折れ線比)	8.952mm (102.3%)	6.921mm (93.9%)	9.238mm (104.1%)

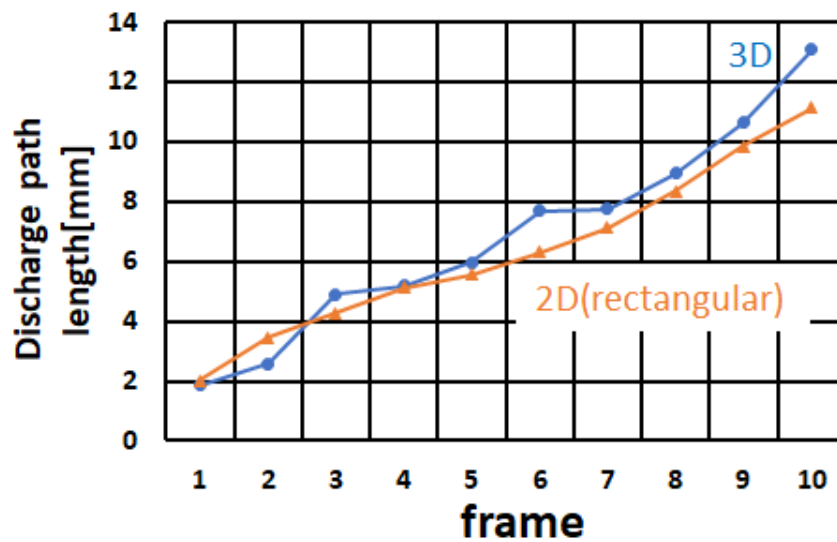


Fig. 4.28 一連の放電における2次元と3次元の放電路長さの見積もり

次に、これらの計測された放電長さをもとに、 (x, y) 正面画像のみの情報, (x, z) 底面画像のみの情報, 三次元座標 (x, y, z) および Kim らの算出方法に基づき放電路長さを算出し、その時刻における電流電圧データから放電路の線抵抗を算出した。線抵抗と電流値との関係を Fig. 4.29 と Fig. 4.30 に示す。Kim らの研究では、放電路長さの算出は電極間隙から最遠点までを矩形の形で近似して長さを算出している。流動の流れ方向を x 軸とし、点火プラグのギャップから最遠点の x の距離を計測した放電経路である。各座標系が Kim 式に対して、それぞれ差異が見られる。空気の場合では、 (x, y, z) , (x, y) , (x, z) が Kim 式に対してはおおよそ -7.02%, 0.516%, 12.2%であった。窒素ガスの場合では、 (x, y, z) , (x, y) , (x, z) が Kim 式に対して凡そ 1.46%, 6.95%, 32.3%であった。これは放電路長さの見積もりの際に起因するものである。

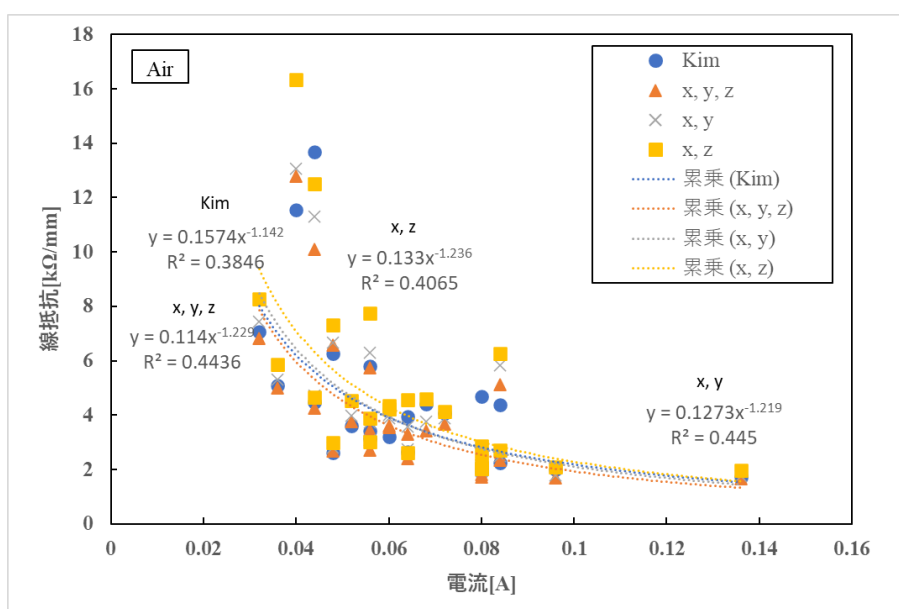


Fig. 4.29 流動場における放電経路の線抵抗

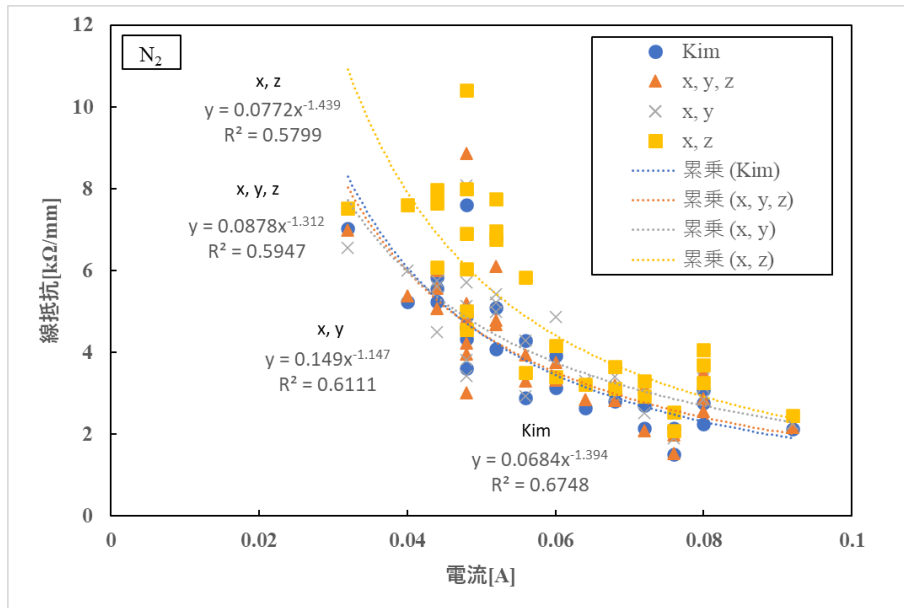


Fig. 4.30 流動場における放電経路の線抵抗

4.6 結論

流動により延伸した放電路に対して、より精度良い予測モデルの構築のため、また関連する既存式の理化学的な理解を深めるために各種計測を実施した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 放電路の長さを画像解析によりより正確に求める方法について検討した。結果として、電流値が比較的小さいところでは既存式に合致することが確かめられたが、点火に重要と思われる電流が大きいところでは、かならずしも既存式の精度はよくなかった。そのため、1回目に再放電が生じるまでの放電路長さに着目して解析したところ、線抵抗は放電路長さの1.8乗に比例するという結論が得られた。これは既存式が放電路長さに比例して放電路の抵抗値が上昇するとしている仮定とは異なる知見であり、今後流動にて延伸した放電路の抵抗値を考える上で、有意な知見であるといえる。
- 2) 既存式を電荷の保存式とポアソン式から単純な仮定を用いて再構築できる可能性を示した。
- 3) 既存式に含まれるパラメーターと物理モデルとの関係について、実験的に調べた。加増処理した際の“見かけの太さ”の電流依存性を考慮することで、既存式を物理モデルを用いて再構築できる可能性について示した。また“見かけの太さ”は、放電路の露光時間内における移動距離と、放電路からの発光（輝度）に関連していることを示した。
- 4) 2方向からの同時に計測することで3次元的な放電路形状を把握したが、3次元的な放電路長さは、Kimの見積り方法に対して実験範囲内で約10%の差があることを示した。

第五章 総合考察

第四章，特に 4.3 節の議論においては，放電路に沿ってその電氣的な性質は 1 次元的であると，その中を電荷が移動するとして解析を行っている．これに基づいて放電路の電氣的な特性について考察を進めてきたわけであるが，このような仮定が実験事実と矛盾していないかについて検討を行う．本章は，前章までの検討過程で得た知見を補足する役割である．

5.1 放電輝度からの放電エネルギー分布に関する検討

本節では放電路の輝度情報をもとに，放電路に沿った電氣的な性質の一様性について議論を行う．Fig. 5.1 は複数の放電路の写真において，放電路に沿って輝度値をプロットしたものである．横軸は放電路の全長さで正規化されている．この計測では，放電路長さが長くなるとそれに伴って輝度が低くなる傾向がある．放電路の端点の部分では，輝度値が大きく上昇しているが，これは陰極における電圧降下によるものであると推察される．

輝度値はその放電路からの放出エネルギーに比例していると考えられ，放出エネルギーはその場所の電力に関連していると想定される．これから輝度値をもとに放電路の電氣的な性質についての考察を行う．電流については放電路を含む電気回路内部を流れているので，放電路内で電流 I を空間的に一定と仮定してよいと思われる．長さ ΔL の放電路における電位差を ΔV とすると， ΔL の放電路における出力 P がジュール熱に等しいとすると，以下となる．

$$P = \Delta V \times I \quad (5.1)$$

ここで ΔL の放電路からの放射エネルギー E_L は出力 P に比例するとする．

$$E_L \propto P \quad (5.2)$$

式(5.1)および式(5.2)から，電流が空間的に一定であるから，

$$E_L \propto P \propto \Delta V \quad (5.3)$$

放射エネルギー E_L は，カメラでは輝度 w として観察されていることから，輝度は放射エネルギーの対数で表されると仮定する．

$$\log E_L \propto w \Leftrightarrow E_L \propto e^w \quad (5.4)$$

以上から長さ ΔL の放電路における電位差 ΔV は以下のように表現できる.

$$\Delta V \propto e^w \quad (5.5)$$

これから Fig. 5.1 のように軸を考えた場合, その軸にそって $x=L_1$ から $x=L_2$ まで積分することで, その間の電位差 V が求まる.

$$V = C \int_{L_1}^{L_2} e^w dx \quad (5.6)$$

ただし C は比例定数である. 以上の過程と考察に基づき式(5.4)を用いて放電路長に沿った放射エネルギーの分布を示したものを Fig. 5.2 に示す. ここでは, この放電路距離を 10 分割し, その放電路素における相対的な放射エネルギーを算出した. なお算出にあたり輝度値は輝度 100 を基準に正規化し処理を行った. 一番右側の点が大きく上昇しているのは, 陰極による電圧降下に起因するものであると思われる. Fig.5.2 が得られている場合の放電路の写真を Fig. 5.3 に示す. Fig. 5.2 で放射エネルギーが上昇している箇所がみられるが, Fig. 5.3 中の丸印部分 (発光がある部分) とおおよそ一致しており, このような解析は放電路画像は 2 次元での観測であり, ねじれの位置にある可能性があることを本来は加味しなければならないことを示している. そのような現象が, Fig.5 にも表れているといえる. ここでは, このようなねじれ現象は考慮せずに, Fig. 5.1 の測定値をそのまま利用して, 式(5.6)を用いて電位分布の算出を行った. その結果が Fig. 5.4 である. 図から, 電極近傍の電圧降下については精度の問題はあるものの, ほぼ大きな屈曲のない滑らかな電位分布となっていることものと推察される. これは, 放電路内の電気的な性質が放電路な長さ方向に沿って, 極端に大きく変化しているところはないと仮定してよいことの傍証であるといえる.

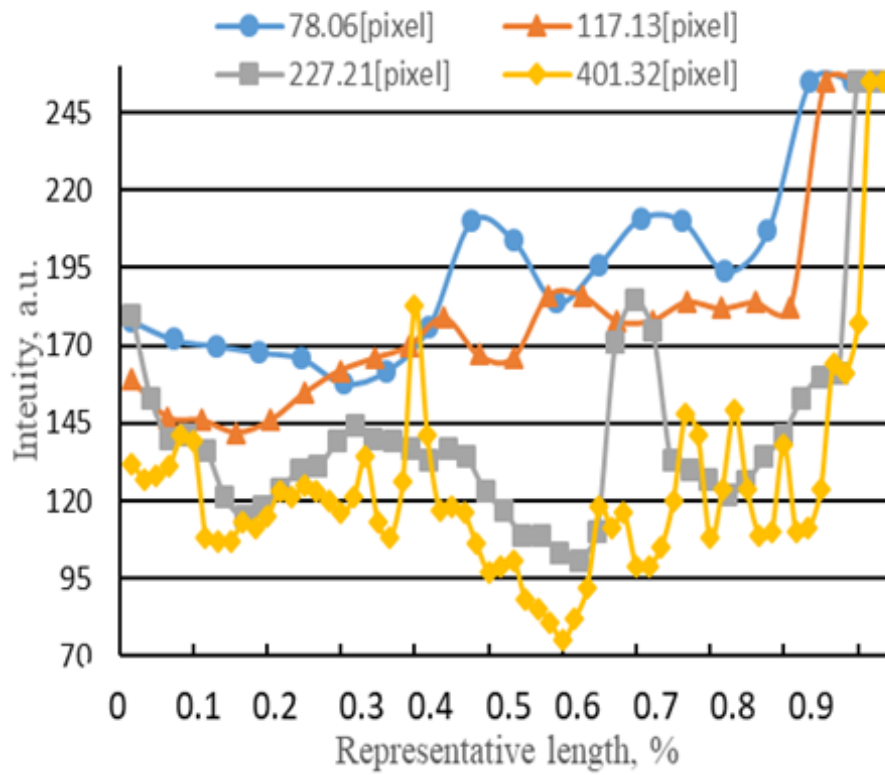
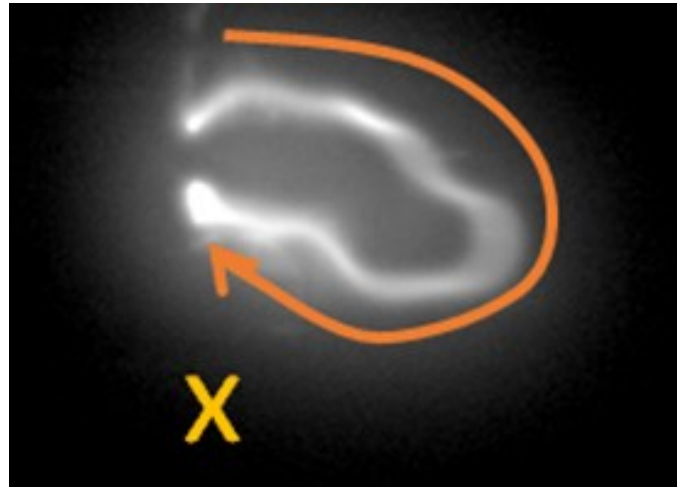


Fig. 5.1 放電路長別の輝度

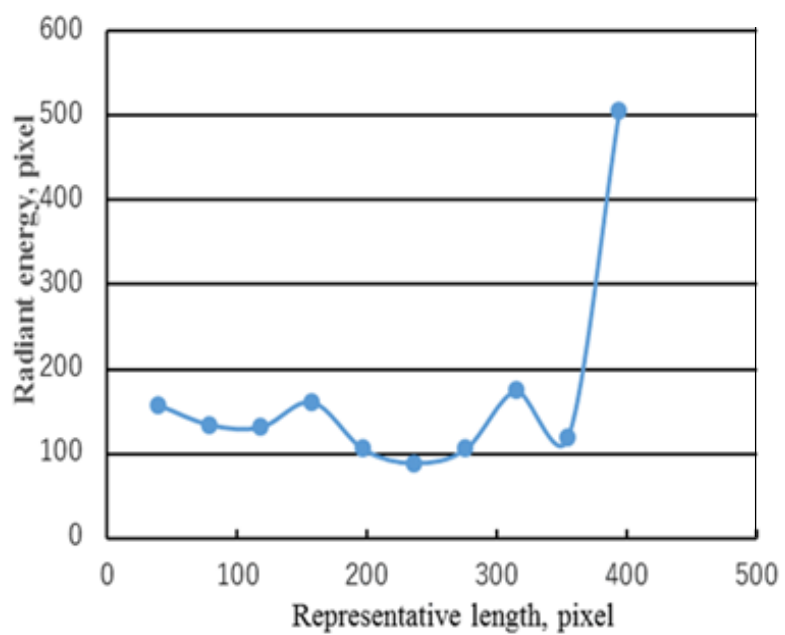


Fig. 5.2 放電路に沿った放射エネルギー変化

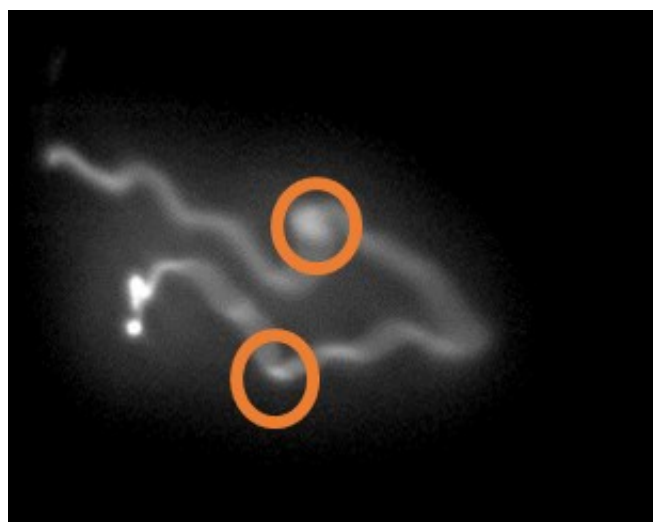


Fig. 5.3 Fig.5.2 に対応する放電路写真 (空気, 圧力 0.9MPa, 0.34ms)

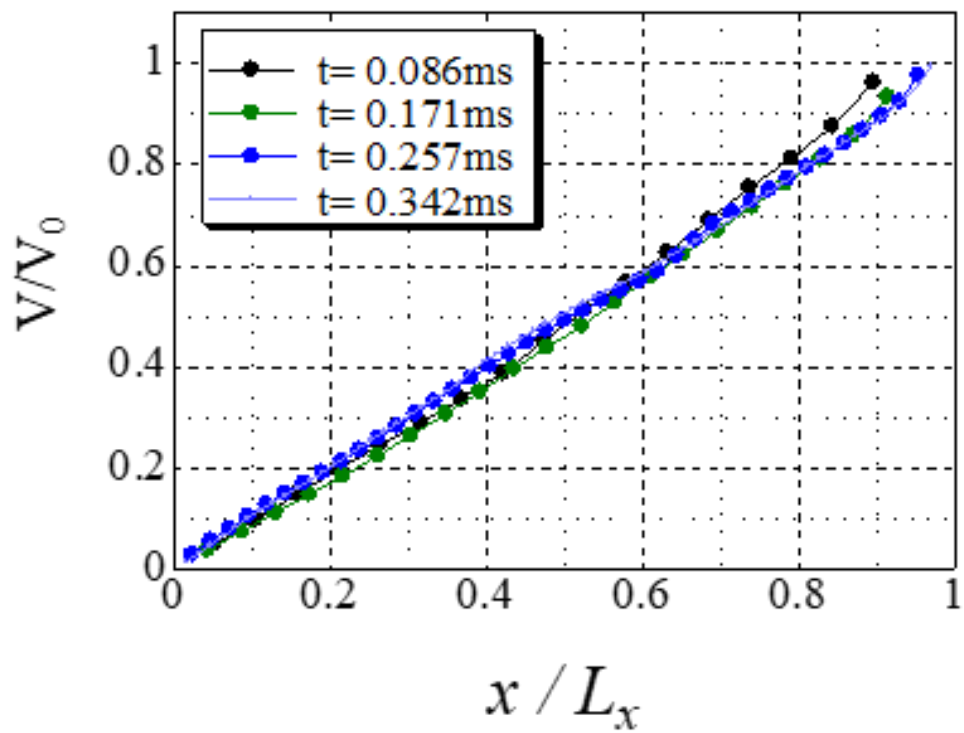


Fig. 5.4 放電路に沿った電位分布

5.2 電荷が移動する場におけるポアソン式の適用の検討

4.3 節では、電場内での電荷の移動する場にポアソン式を適用している。この場合、それらの電荷の移動により電場が変化し、結果として電位分布に影響を与えることになる。他方で、電子やイオンの放電路中での移動を確認できていないわけではないので、それに対する疑問が残る。そこでここでは電荷の移動を目視できるように、電極間での電荷の担体として液滴を考え、その液滴の移動について考察することで、今回適用したモデルが適切かどうかを検討することにした。

実験に用いた装置の概要を、Fig. 5.5 に示す。この図のように作成した燃料をステンレス鋼タンクに入れ、窒素ガスのガス圧によって燃料を押し出し、エタノール、BDF 燃料を細管（内径 $170\ \mu\text{m}$ ）から上方の金網に向けて噴霧した。BDF 燃料については静電微粒化しやすくするため、BDF 燃料の主成分として考えられるオレイン酸メチル（OME）をベースとし、その含有率（体積）を $C_{\text{OME}}=0.70$ とし、これに界面活性剤（レオドール）の含有率を $C_s=0.03$ 、純水の含有率を $C_w=0.27$ となるように混合した。以上の燃料を小型ホモジナイザー（IKA T10 basic ULTRA-TURRAX）を用いて攪拌混合し、水/OME エマルジョンを作成した。静電場を形成するために、細管の上方に金網状の電極を用意し、細管と電極間に金網側が負電極になるように直流電界を印加した。ハイスピードカメラと一眼レフカメラを用いて液滴の微粒化の現象を撮影した。今回の研究における電界印加には GRENTECHNO GS50N Model を使用し、4kV から 24kV までの電圧を印加した。電極間距離の変化も条件にし、30mm から 10mm 間隔で広げ、60mm まで変化させた。画像解析には、一眼レフカメラ NikonD7100 を利用し、最大画像解析度は 24 メガピクセル(6000x3368)、ISO は Hi2.0(=ISO25600)、最大シャッタースピードは 1/8000 s である。一眼レフカメラのレンズは Nikon lens (AF-SDX NIKKOR 18-300mm f/3.5-6.3 G ED VR)を使用した。高速現象の観察は Phantom 社製のハイスピードカメラで 120000fps の 128x128 解析度の条件で現象の観察を行った。実験を行い液滴噴霧の様子を撮影後、ハイスピードカメラで撮影した現象のデータを取り込み解析を行った。

実験データの解析については、ハイスピードカメラで撮影したデータを ImageJ 用いて解析を行った。Fig. 5.6 に OME エマルジョンの静電微粒化の様子を示す。このようにノズルから放出後に液滴が微粒化している様子がわかる。このような液滴の移動について、各画像における座標を把握し、それを時間ごとに並べることで、液滴の移動について把握した。た。Fig. 5.7 は、エタノール液滴の陰極である金網の近傍における液滴の移動を示している。このように液滴はほぼ等速度で移動していることがわかり、その速度はおおよそ 2m/s 程度である。他の同程度の大きさの液滴についても同様な現象が観察された。

このように Fig. 5.7 で観察された液滴の運動について以下に考察を行う。まず液滴の運動を解析するにあたりレイノルズ数 Re を求める。

$$Re = \frac{vd}{\eta} \quad (5.7)$$

v は粒子の速度, η は動粘度, d は代表長 (ここでは粒子の直径) である. 上記の式に各数値を代入すると $Re = 57.59$ となる. また, 球の抗力係数 C_d を $C_d=1.5$ と見積もると, 抵抗力 D は, 以下の式となる.

$$D = \frac{\rho v^2 C_d}{2} \times \frac{d^2 \pi}{4} \quad (5.8)$$

ρ は雰囲気気体の密度である. 上記の式に計測から見積もられる各数値を代入すると以下の通りになる.

$$\frac{1.205 \times 1.997^2 \times 1.5}{2} \times \frac{(4.36 \times 10^{-5})^2 \pi}{4} = 5.3801 \times 10^{-7} (N) \quad (5.9)$$

次に電界について検討を行う. 印加電圧 $V = 4\text{kV}$, 電極間距離 $L = 30\text{mm}$ とした場合, 電界強度が電極間で一様とすれば, 電界強度 E は $E = \frac{V}{L}$ と表せる. 粒子は等速で運動しているから, 電界からの電磁気力が空気抵抗と釣り合っていると仮定する. $E = 1.3 \times 10^5 (\text{V/m})$ であるから, 液滴の持っている電荷を q とすると, $D = qE$ から $q = 4.036 \times 10^{-12} \text{C}$ となる.

次に微粒化の過程を考える. 液滴が有する電荷が前述の結果から明らかになったが, 電荷量 q は液滴生成時から大きくは変化していないと仮定する. この場合, 微粒化に際して電磁氣的に表面を引っ張る力は, 上述の議論から $0.538\mu\text{N}$ 程度と見積もられる. これで表面張力に打ち勝って微粒化が行われていると仮定してみる. エタノールの表面張力 γ は, 温度 20°C と仮定した場合, $\gamma = 22.4\text{mN/m}$ であり, ノズル出口の細管直径は $d_n = 0.17\text{mm}$ であるから, 微粒化するにあたり打ち方なければならぬ表面張力 F をノズル内径程度の引き伸ばしが必要と考えて $F = \gamma d_n \pi$ と表すと, $F = 11.963\mu\text{N}$ となる. 先ほど算出した電磁気力はこの表面張力に対して約 5% にしか相当しない. すなわちこのような見積もりで微粒化が生じていることを表現できないこととなる. これは電極間で電界が一定という仮説が間違っていると結論づけられる. すなわち微粒化にあたり, ノズル出口近傍で電界集中が起こり, それにより微粒化していることが予測される. その場合, 本研究で観察された液滴の観測域においては, 電界場がより弱い状況であることが想定され, 空気抵抗と釣り合うためにはより大きな電荷を有していると考えられる. このように, 空間的に電位が変化していることが予測される.

このような現象の傍証として, Fig. 5.8 にエタノール液滴の静電微粒化モードに及ぼす電極間距離と印加電圧の依存性を示す. この図は図中の上部に示されるような 3 つのモード

にエタノール液滴の微粒化の様子を分類し、それがどのような電極間隔や印加電圧によって生じるかを調べたものである。仮に電極間の電界が一様であれば、印加電圧を電極間隔で除した値によってモードの変化は整理できるはずであるが、Fig. 5.8 では各モードの境界は必ずしもそのようになっている。これから電極間での電場は一様ではなく、それが微粒化のモードに影響を与えていることが予測される。これは電荷をもった液滴が電極間を移動していることに起因する。このように、電極間を電荷が移動することを考慮することで、液滴の微粒化については定性的にその現象を説明することができた。4.3 節の議論においても、雰囲気電場の変化までを考慮して電荷に移動を考えることは、妥当であると結論づけることができる。

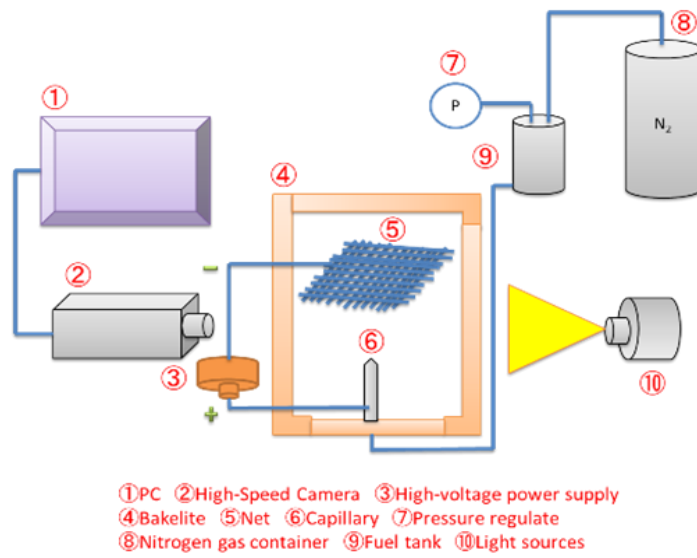


Fig. 5.5 静電微粒化の実験装置の概略図

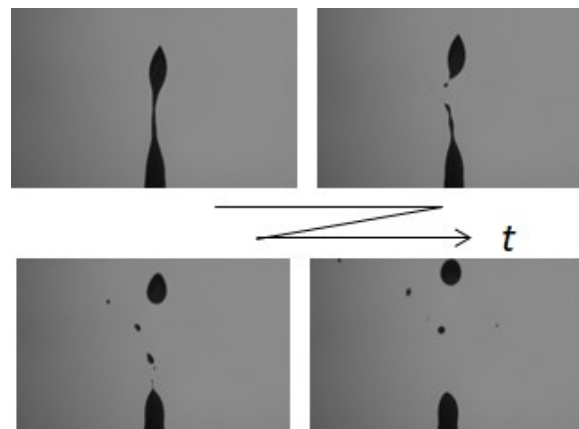


Fig. 5.6 OME エマルジョンの静電微粒化の様子 (電圧 6kV)

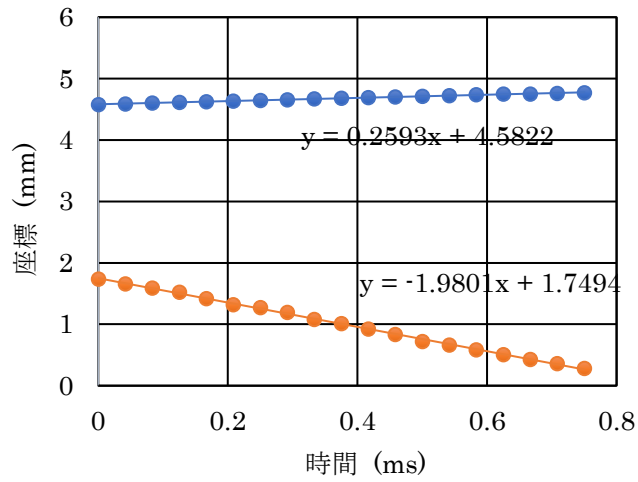


Fig. 5.7 エタノール液滴の移動の様子

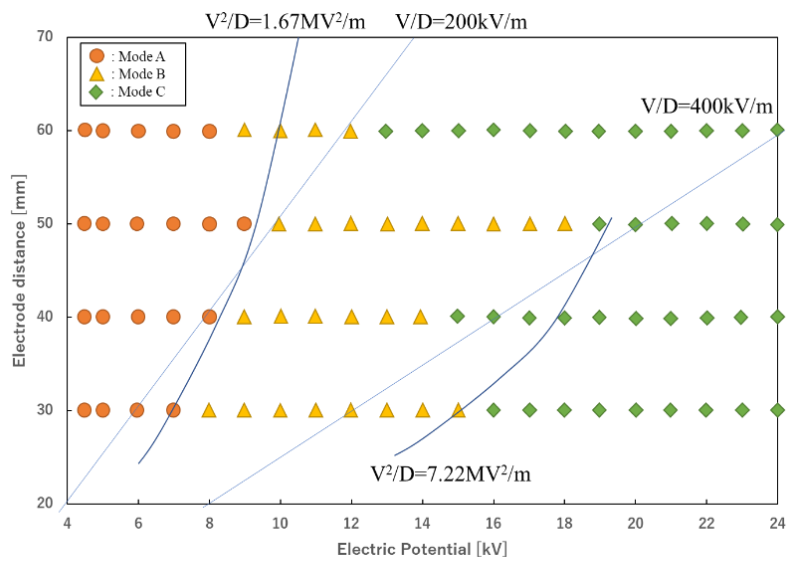
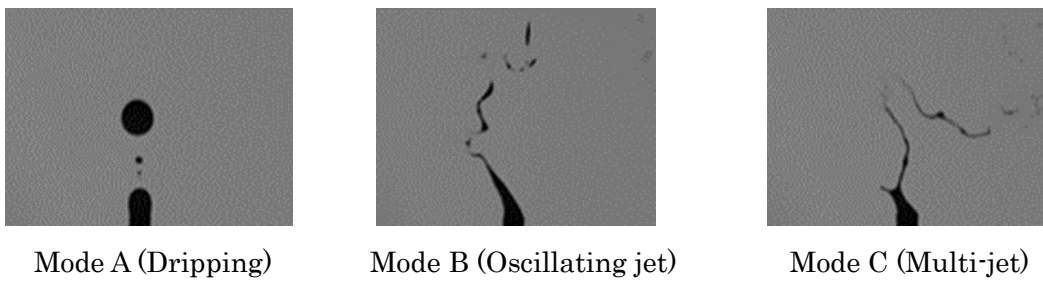


Fig. 5.8 電極間隔と印加電圧がエタノール液滴の微粒化モードに及ぼす影響

5.3 結論

前章までの検討過程では、放電路に沿ってその電氣的な性質は1次元であり、またその中を電荷が移動するとして解析を行っている。このような仮定が実験事実と矛盾していないかについて本章では検討を行った。得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 放電路に沿った輝度分布を解析することによって、放電路内の電位分布について考察した。その結果、電極近傍の電圧降下については精度の問題はあるものの、ほぼ大きな屈曲のない滑らかな電位分布となっていることものと推察された。これにより、放電路内の電氣的な性質が放電路な長さ方向に沿って、極端に大きく変化しているところはないと仮定してよいといえる。
- 2) 電界中を電荷が移動すれば、それに伴い周囲に電界にも影響を与えるはずである。これについて電極間で静電微粒化された液滴の挙動を把握することで、電界中での電荷の移動について考察した。電気力や表面張力などの見積もりから、ノズル出口近傍での微粒化過程について考察し、空間的に電場が一様でないことを示した。またエタノール液滴の静電微粒化モードに及ぼす電極間距離と印加電圧の依存性の関係から、そのモードの変化は印加電圧を電極間隔で除した値によってモードの変化は整理できず、これから電極間での電場は一様ではなく、それが微粒化のモードに影響を与えていると結論づけられた。

以上の結果から、前章までの解析の過程を否定する事実は確認されなかった。

第六章 結論

リーンバーンにおける点火モデルへの貢献を目指して、特に火花放電路の延伸を含む電氣的なモデルの検証とモデルの改善提案を行った。実験設備として小型風洞を用い、その中で得られた実験事実をもとに検討、考察を行った。得られた知見は以下のとおりである。

1.

小型風洞の作成においては、バッファータンクとオリフィスで流動を制御する機構とした。オリフィスの径を固定することでテストセクション内での主流速度は圧力に関わらずほぼ一定の値を示すことが明らかとなった。また流量係数を 0.9 とすることで、単純計算で見積もられた平均流速と PIV で測定された流速はよい一致を示した。またテストセクション内での流れ場の乱れ強さは主流の 10%程度であることが確認された。

これから、本研究で構成した装置系では、一定の速度条件、圧力条件下においては良好な流れ場を実現できていることを確認した。

2.

一様流速の流動場を得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放電路の変形挙動について実験的に把握を行い、電流、電圧、放電路長を含んだ実験式に関する検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

1) 流動によって放電路が延伸することによる電圧の上昇、放電路の短絡、再放電が観察された。

2) 放電路が延伸した場合の、放電路の線抵抗を整理したところ、既に知られている関係式が希薄条件の当量比、流速が 10.4m/s ~ 18.5m/s、圧力が 0.25~0.81MPa の条件で幅広く成立することが明らかとなった。

3) 電圧値は放電路の短絡もしくは再放電によって鋸型の極大値および極小値を取り、その電圧値のデータを提供することができた。

4) 電圧値の極大値は圧力に対して上昇するが、空気の場合に比べて燃料を含む場合はその絶対値が小さくなる。また流速の依存性も見受けられた。

3.

流動により延伸した放電路に対して、より精度良い予測モデルの構築のため、また関連する既存式の理化学的な理解を深めるために各種計測を実施した。その結果、以下の知見が得られた

1) 放電路の長さを画像解析によりより正確に求める方法について検討した。結果として、電流値が比較的小さいところでは既存式に合致することが確かめられたが、点火に重要と思われる電流が大ききところでは、かならずしも既存式の精度はよくなかった。そのため、1 回目に再放電が生じるまでの放電路長さに着目して解析したところ、線抵抗は放電路長

さの1.8乗に比例するという結論が得られた。これは既存式が放電路長さに比例して放電路の抵抗値が上昇するとしている仮定とは異なる知見であり、今後流動にて延伸した放電路の抵抗値を考える上で、有意な知見であるといえる。

2) 既存式を電荷の保存式とポアソン式から単純な仮定を用いて再構築できる可能性を示した。

3) 既存式に含まれるパラメーターと物理モデルとの関係について、実験的に調べた。加増処理した際の“見かけの太さ”の電流依存性を考慮することで、既存式を物理モデルを用いて再構築できる可能性について示した。また”見かけの太さ”は、放電路の露光時間内における移動距離と、放電路からの発光（輝度）に関連していることを示した。

4) 2方向からの同時に計測することで3次元的な放電路形状を把握したが、3次元的な放電路長さは、Kimの見積もり方法に対して実験範囲内で約10%の差があることを示した。

4.

上の結論では放電路に沿ってその電気的な性質は1次元的であり、またその中で電荷が移動するとして解析を行っている。このような仮定が実験事実と矛盾していないかについて検討を行った。得られた知見は以下のとおりである。

1) 放電路に沿った輝度分布を解析することによって、放電路内の電位分布について考察した。その結果、電極近傍の電圧降下については精度の問題はあるものの、ほぼ大きな屈曲のない滑らかな電位分布となっていることもと推察された。これにより、放電路内の電気的な性質が放電路な長さ方向に沿って、極端に大きく変化しているところはないと仮定してよいといえる。

2) 電界中を電荷が移動すれば、それに伴い周囲に電界にも影響を与えるはずである。これについて電極間で静電微粒化された液滴の挙動を把握することで、電界中での電荷の移動について考察した。電気力や表面張力などの見積もりから、ノズル出口近傍での微粒化過程について考察し、空間的に電場が一様でないことを示した。またエタノール液滴の静電微粒化モードに及ぼす電極間距離と印加電圧の依存性の関係から、そのモードの変化は印加電圧を電極間隔で除した値によってモードの変化は整理できず、これから電極間での電場は一様ではなく、それが微粒化のモードに影響を与えていると結論づけられた。

3) 以上の結果から、前章までの解析の過程を否定する事実は確認されなかった。

5.

以上から、本研究では流動中における火花放電について、既存の電圧・電流・放電路長さに関する関係式の適用範囲の検証、またその修正の方向性の明示、既存式の物理的な意味の考察、数値シミュレーションとの適合に関する検討を実施することができた。以上は、今後のリーンバーンにおける点火モデルへの貢献を期待できるものと言える。

参考文献

- 1) 秋濱一弘, 津江光洋, 友田晃利, 野村浩司, 松村恵理子, 最新内燃機関改訂版, 朝倉書店, 2021.3, p.7-21
- 2) Walsh MP. Mobile source related air pollution: effects on health and the environment. In: Nriagu JO, editor. Encyclopedia of environmental health. Burlington: Elsevier; 2011: p. 803-9
- 3) Jacobs T, Assanis D, Filipi Z. The impact of exhaust gas recirculation on performance and emissions of a heavy-duty diesel engine. SAE international; 2003
- 4) Maiboom A, Tauzia X, Hetet J-F. Experimental study of various effects of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions of an automotive direct injection diesel engine. Energy 2008; 33: 22-34
- 5) Hountalas DT, Mavropoulos C, Binder KB. Effect of exhaust gas recirculation (EGR) temperature for various EGR rates on heavy duty DI diesel engine performance and emissions. Energy 2008; 33: 272-83
- 6) Kreso AM, Johnson JH, Gratz LD, Bagley ST, Leddy DG. A study of the effects of exhaust gas recirculation on heavy-duty diesel engine emissions. SAE international; 1998
- 7) Maiboom A, Tauzia X, Hetet J-F. Influence of EGR unequal distribution from cylinder to cylinder on NO_x-PM trade-off of a HSDI automotive Diesel engine. Appl Therm Eng 2009; 29: 2043-50
- 8) Peng H, Cui Y, Shi L, Deng K. Effects of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions during cold start of direct injection (DI) diesel engine. Energy 2008; 33: 471-9
- 9) Yao M, Zhang Q, Lin H, Zheng Z-q, Zhang P, Lin Z, et al. Diesel engine combustion control: medium or heavy EGR?: SAE international; 2010.
- 10) Zhang Y, Boehman AI. Impact of biodiesel on NO_x emissions in a common rail direct injection diesel engine. Energy Fuel 2007; 21: 2003-12.
- 11) Maiboom A, Tauzia X. NO_x and PM emissions reduction on an automotive HSDI Diesel engine with water-in-diesel emulsion and EGR: an experimental study. Fuel 2011; 90: 3179-92
- 12) Thornton M, Webb CC, Weber PA, Orban J, Slone E. Fuel sulfur effects on a medium-duty diesel pick-up with a NO_x absorber, diesel particle filter emissions control system: 2000-Hour Aging Results. SAE international; 2006.
- 13) Chang YC, Lee WJ, Yang HH, Wang LC, Lu JH, Tsai YI, et al. Reducing emissions of persistent organic pollutants from a diesel engine by fueling with water-containing butanol diesel blends. Environ Sci Technol 2014; 48: 6010-8
- 14) Zhou N, Huo M, Wu H, Nithyanandan K, Lee C-ff, Wang Q. Low temperature spray combustion of acetone-butanol-ethanol (ABE) and diesel blends. Appl Energy 2014; 117: 104-15
- 15) De Ojeda W, Bulicz T, Han X, Zheng M, Cornforth F. Impact of fuel properties on diesel low temperature combustion. SAE Int J Eng 2011; 4: 188-201
- 16) Han S, Shim E, Jang J, Park J, Bae C, et al. Operating range of low temperature diesel combustion

- with supercharging. SAE international; 2009.
- 17) Kumar R, Zheng M. Fuel efficiency improvements of low temperature combustion diesel engines. SAE international; 2008.
 - 18) Li T, Suzuki M, Ogawa H. Characteristics of smokeless low temperature diesel combustion in various fuel-air mixing and expansion of operation load range. SAE international; 2009.
 - 19) 経済産業省ホームページ (2022年1月20日アクセス)
<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005.html>
 - 20) Nakata, K.; Nogawa, S.; Takahashi, D.; Yoshihara, Y.; Kumagai, A.; Suzuki, T.: Engine Technologies for Achieving 45% Thermal Efficiency of S.I. Engine, SAE Int. J. Engines. Vol.9, No. 1, p.179-192 (2015)
 - 21) Takahashi, D.; Nakata, K.; Yoshihara, Y.; Ohta, Y.; Nishiura, H.: Combustion Development to Achieve Engine Thermal Efficiency of 40% for Hybrid Vehicles, SAE Technical Paper, 2015-01-1254 (2015)
 - 22) Pischinger, S.; Heywood, J. B., How Heat Losses to the Spark Plug Electrodes Affect Flame Kernel Development in an SI-Engine, SAE Technical Paper, No. 900021 (1990)
 - 23) Johansson, B., Cycle to Cycle Variations in S.I. Engines - The Effects of Fluid Flow and Gas Composition in the Vicinity of the Spark Plug on Early Combustion, SAE Technical Paper, 962084 (1996)
 - 24) 日産自動車ニュースルーム (2022年1月20日アクセス)
<https://global.nissannews.com/ja-JP/releases/release-27e779be9766a0ad5ef748eac51b39b7>
 - 25) 横森剛, 松田昌祥, 飯田訓正, 横尾望, 中田浩一, 浦田泰弘, 高効率ガソリンエンジンのためのスーパーリーンバーン研究, 自動車技術会 2016年春季大会 学術講演会 講演予稿集, No.59-16, p.1413-1418 (2016)
 - 26) 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)
 - 27) 柵谷公彦, 筒内における火花放電現象の可視化への取り組み, 自動車技術会 シンポジウムテキスト, No.09-13, p.1-5(2013)
 - 28) 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), 283-288 (2015)
 - 29) Jaehong Kim, Richard W. Anderson, Spark Anemometry of Bulk Gas Velocity at the Plug Gas of a Firing Engine, SAE 952459 (1995)
 - 30) 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), 641-647 (2017)
 - 31) Duclos, J-M; Colin, O.: Arc and Kernel Tracking Ignition Model for 3D Spark-Ignition Engine Calculations, the proceedings of COMODIA 2001, p.343-350 (2001)

- 32) Dahms, Rainer N.; Drake, Michael C.; Fansler, Todd D.; Kuo, T.-W.; Peter, N.: 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*, Volume 158, Issue 11, p. 2229-2224 (2011)
- 33) Dahms, Rainer N.; Drake, Michael C.; Fansler, Todd D.; Kuo, T.-W.; Peter, N.: Understanding ignition processes in spray-guided gasoline engines using high-speed imaging and the extended spark-ignition model SparkCIMM. Part B: Importance of molecular fuel properties in early flame front propagation, *Combustion and Flame*, Volume 158, Issue 11, p.2245-2260 (2011)
- 34) Lucchini, T.; Cornolti, L.; Montenegro, G.; D'Errico, G. et al.: A Comprehensive Model to Predict the Initial Stage of Combustion in SI Engines, *SAE Technical Paper*, 2013-01-1087 (2013)
- 35) 藤田文太郎, 放電管 (共立全書), 共立出版, 1954
- 36) 高村秀一 : プラズマ理工学入門, pp145-149, 森北出版社 (1997)
- 37) Wang H, Deneys Reitz R, Yao M, Yang B, Jiao Q, Qiu L. Development of an n-heptane-n-butanol-PAH mechanism and its application for combustion and soot prediction. *Combust Flame* 2013; 160: 504-19
- 38) Liu S-H, Lin Y-C, Hsu K-H. Emissions of regulated pollutants and PAHs from waste-cooking-oil biodiesel-fueled heavy-duty diesel engine with catalyzer. *Aerosol Air Qual Res* 2012; 12
- 39) Chang Y-C, Lee W-J, Lin S-L, Wang L-C. Green energy: water-containing acetone-butanol-ethanol diesel blends fueled in diesel engines. *Appl Energy* 2013; 109: 182-91
- 40) Ithnin AM, Noge H, Abdul Kadir H, Jazair W. An overview of utilizing water-in-diesel emulsion fuel in diesel engine and its potential research study. *J Energy Inst* 2014; 87: 273-88
- 41) Attia AMA, Kulchitskiy AR. Influence of the structure of water-in-fuel emulsion on diesel engine performance. *Fuel* 2014; 116: 703-8
- 42) Ghannam MT, Selim MYE. Stability behavior of water-in-diesel fuel emulsion. *Petrol Sci Technol* 2009; 27: 396-411
- 43) M. Castela, B. Fiorina, A. Coussement, O. Gicquel, N. Darabiha, CO. Laux. *Combustion and Flame* 166, 133-147, 2016.

謝辞

本研究を遂行するにあたり、日本大学大学院生産工学研究科機械工学専攻教授並びに日本大学生産工学部環境安全工学科、山崎博司教授、秋濱一弘教授、今村宰教授、高橋栄一教授、同学部の教養・基礎科学系、大熊康典教授から熱いご指導とご教鞭をお受けできましたこと、心より感謝申し上げます。また研究遂行にあたり、高速度カメラの利用に関しては、(株)ノビテックにご協力いただきました。、(株)ノビテックのご厚意に御礼申し上げます。

私は大学3年生の後半から環境安全工学科のエネルギーゼミに所属し、大学院機械工学専攻博士前期課程および後期課程も同じ研究室に約6年半に過ごしたことが私の人生にとってはとても有意義な時間でした。学部4年の時から大学院博士後期課程までずっと側にいてくださった指導教員である今村宰教授のご指導により、日本国内をはじめとする、アメリカ合衆国、中国、韓国、の国際学会に参加し研究を発表することができ、心から深く感謝を申し上げます。研究室にいる約6年が今村先生と共に過ごした時間が一生忘れにくい楽しい研究ライフでした。卒業したら、しばらく今村先生はいない環境が寂しさを感じ、慣れるまでは時間がかかりそうです。同じ指導教員の山崎博司教授は両親とほぼ同じ年で、いつも暖かく私の研究ライフをサポートしてくださった先生であり、私にとっては大学のお父さんのような存在です。新型コロナウイルスが流行っている頃は優しくマスクとアルコールなどの対策グッズを家まで送ってくださって、心から感謝申し上げます。同専攻の野村浩司教授及び松島均教授には、博士前期課程の論文の副査を担って頂き、お忙しい中にも関わらず、本論文に対するご指導を賜りました。また今回の博士後期課程修了に向けて、同専攻の秋濱一弘教授及び野村浩司教授には、本論文の副査を担って頂き、お忙しい中にも関わらず、本論文に対するご指導を賜りました。私にとっては、秋濱先生、野村先生及び松島先生は、本論文の副査だけではなく、私の研究人生に知恵を与えてくれた先生でもあります。大学院博士前期及び後期課程にそれぞれの先生方から大変貴重な知識を学ぶことができました。ここに感謝の意を表します。野村先生、二度目の副査を担って頂き、心から感謝申し上げます。大学院博士前期の2年間において、直接に研究のご指導を受けていないが、研究に色々なアドバイスを頂けたことについて、株式会社デンソーの顧問である徳田寛様、同専攻の元教授大久保通則先生並びに環境安全工学科の元教授神野英毅先生に礼を申し上げます。そして私の人生の歩み道に色々なアドバイスおよび人生経験などの貴重な知識を教えてくださいました元日本大学副総長兼生産工学部元学部長である大谷利勝先生に心から深甚なる感謝の意を申し上げます。大谷先生の教えはこれから私の人生に共に歩きながら、国際社会に自分の力を貢献できるよう、頑張りたいと存じます。日本台湾交流協会にも感謝を申し上げたいと存じます。博士前期および後期の5年間、日本台湾交流協会の奨学金のおかげで、有意義な研究生活を送ることができました。心から深く礼を申し上げます。最後に私の留学生生活をずっと一緒に歩いてきた両親に深甚なる感謝の意を申し上げます。両親のおかげで、高校時代からカナダ留学することができ、大学の学部時代から日本に留学し、国際社会に貢献できる大人まで育ててくださったことを心から深く感謝申し上げます。