

PIV を用いた定断面積風洞内の流動計測

日大生産工 ○今村 宰 日大生産工(院) 文 鉉太 池本崇記
日大生産工 岩田 和也 山崎 博司 秋濱 一弘

1 まえがき

昨今のエネルギー、環境問題から更なるエネルギー効率の向上が求められており、自動車用のエンジンについても環境適合性ととも到低燃費化が求められている。自動車用として広く用いられているガソリンエンジンにおいては、近年、PHEVや電動化へのシフトがなされるなど多様化しているが、電気自動車であっても発電機としてエンジンを備えているものもあり、その基本となるガソリンエンジンについては更なる高効率化や環境適合が今後も必要であると言える。ガソリンエンジンの熱効率の向上策としてリーンバーンがあるが、リーンバーンでは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。特に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、安定して点火することが困難になってくる。点火においては火花放電によって予混合気に加えられたエネルギーがプラズマを介して予混合気に火炎核を生成するわけであるが、この過程におけるプラズマの挙動は、現象の理解のために必要である。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、その後に再放電するような現象も観察される。リーンバーン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、火花放電の後期の放電路の変形についても、リーンバーンの点火を考える上で、理解が必要な現象である。流動による放電路の変形は、抵抗値の増加をもたらすため放電中における電圧、電流プロファイルや放電時間に時間を与える。しかしながら、このような流動が火花放電に及ぼす影響に関する基礎研究は、一部¹⁾を除いて系統的には行われていない。このような観点から、著者らは流動が放電経路の変形にあたる影響について着目し、一様な断面積を持つ定断面積風洞を

構築し、その中における火花点火挙動を観察し、その変形の様子について調べた²⁾。しかしながら、流動条件については上流の圧力他の計測値から算出しており、実際に流動を計測しているわけではない。このような観点から本報では、定断面積風洞内における流動をPIVを用いて計測することを試みた。流動の計測結果が得られたので、以下に報告する。

2 実験方法および測定方法

実験装置の全体図を図1に示す。この図に示されるように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、バッファータンクから定断面積の流路内に混合ガスを導入し、その流路内で火花放電を行える実験装置となっている。実験の開始は流路に挿入されている電磁弁の開閉で実施し、直径25mmの円形断面積である。流量は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。温度や気体種が一定でオリフィスでチョークしていれば、質量流量 m_{dot} は圧力 p に比例するため、体積流量 V_{dot} すなわち流速はオリフィス径 d_o によって決まる。オリフィスの面積を $A_o(=\pi d_o^2/4)$ 、臨界定数を $\sigma(=0.685, \kappa=1.4)$ 、流量係数を C と書くと、 $m_{\text{dot}}=C\sigma p A_o/(RT)^{1/2}$ である。 R は気体定数、 T は温度である。密度を ρ とすると、 $\rho=p/RT$ であり、体積流量 $V_{\text{dot}}=m_{\text{dot}}/\rho$ である。体積流量をテストセクションでの断面積 A_t で除せば、テストセクションでの流速 V_t が求まる。以上から $V_t=C\sigma A_o/A_t (RT)^{1/2}$ と求まる。

でこの場合、本報では上流側にはオリフィスを挿入せず、下流側にのみオリフィスを挿入して実験を行った。点火プラグは長さ230mmの定断面積区間の交流に設置されている。点火プラグは文献³⁾に示されているものと同様なものを用いており、NGK社製のPSPEプラグである。

PIVの実施する際のセットアップの概要を図2に示す。図1に示された配管において電磁

Flow Field Measurement of the Constant Cross-section Wind Tunnel Using PIV

Osamu IMAMURA, Genta BUN, Takaki IKEMOT
Kazuya IWATA, Hiroshi YAMASAKI and Kazuhiro AKIHAMA

弁下流にオイルミストを導入し、PIVのトレーサーとしている。図ではトレーサー用のバッファタンクを挿入し、この中に予めオイルミストを充填させておき、これがテストセクションに流れこむような構造とした。オイルミスト生成のためのシーディングジェネレーターにはPivPart14-NUI(西華産業株式会社)を用い、専用の気流計測用シーディング剤とともに用いた。レーザーはダブルパルスYAGレーザー(532nm, 15Hz, 200mJ/plus, Nano PIV, Litron Lasers社製)であり、レーザーシートにして下流側から窓ガラスを通さずに導入している。撮影側は、レーザと垂直方向から、サファイア窓を介して、2MピクセルPIVカメラ(CCD, 1600×1200 pixels, 14bit階調モノクロ, 最小 Δt 120ns, pco.1600, PCO AG社製)にて撮影した。逆方向からは、同時に高速度カメラ(Phantom M310)にて、放電の様子をモノクロ撮影できるようにしている。レーザーおよびカメラはタイミングコントローラー(LabSmith LC880)を介してPCに接続され、PCからコントロールできるようになっている。撮影のレンズには焦点距離50mmの単焦点レンズ(Nikon Ai Nikkor 50mm F1.4)に接写リング(PK-11)を2つ装着して用いた。

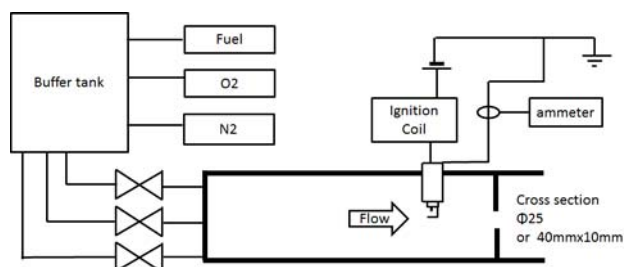


図1 実験装置の全体図

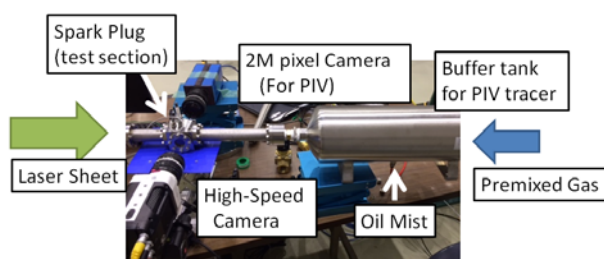


図2 PIV計測時のセットアップ

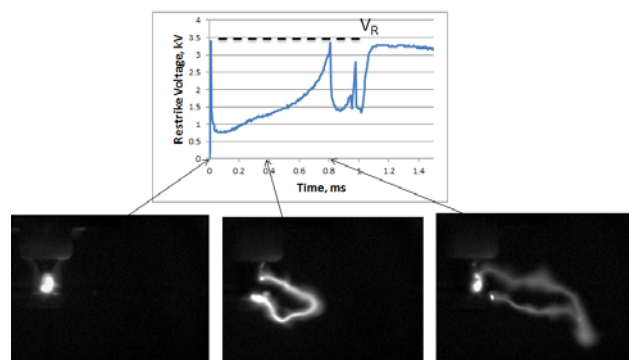


図3 流動による放電路の変形とそれに伴う電極間電圧の変化の様子

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。下流のオリフィス径は $\phi 5\text{mm}$ から $\phi 9\text{mm}$ の間で変化させ、計測位置についてはプラグ近傍を計測した。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。

3 実験結果および考察

まず放電の様子を見るため、高速度カメラによる撮影画像を示す。図3には、電極間の電圧の時間履歴と、その期間における高速度カメラによって撮影された放電経路の様子を示す。図においては左方向から右方向に向かい空気流速が流れており、この図に示されるように一様な空気流れによって放電路が空気流動の下流側に流れていることがわかる。放電路の先端の流れ方向の移動速度はほぼ時間に対して線形であり、一定の速度で放電路は下流側に移動している²⁾。

次に点火プラグまわりの流速を大気圧条件において計測した例を図4に示す。この撮影系では空間分解能は、およそ $18\mu\text{m}/\text{pixel}$ となっており、PIVは $32\times 32\text{pixel}$ を一単位として実施しているので、流速ベクトルの空間の解像度はおおよそ 0.58mm である。図では左方向から右方向に向かって空気流れが流れている。プラグによる反射を避けるため、この図では電極のやや奥(後ろ)をレーザーシートが通るように調整している。この図に示されるようにおおよそ右向きに 1m/s 程度の均一な流れが生じていることがわかる。

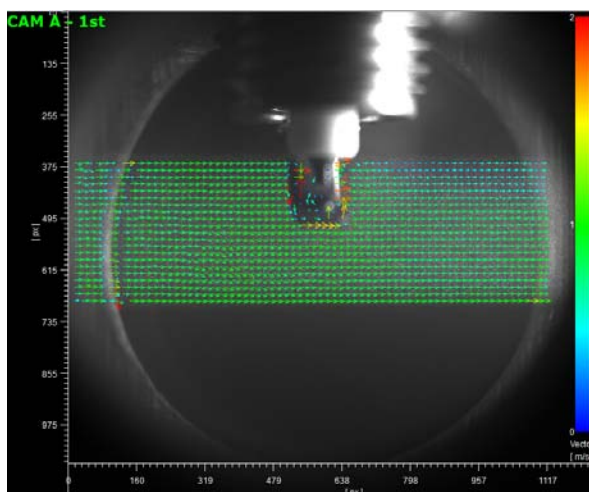


図4 点火プラグ後方の流速（大気圧）

図5には点火プラグがない場合の流速分布を示す。この図に示されるように、点火プラグなければ、乱れの影響はみられるものの、流速ベクトルはほぼ一様に右後方に向いている。これは圧力が上昇した状態であっても同様であった。この結果をもとに、図4をもう少し詳細にみる。まず上流側ではやや下向きに流れが転向している。この傾向は下流側では見られず、上方では流速が周囲に比べて遅くなっていることが見受けられる。点火プラグは流路内に突き出した状態になっており、図4で上部に見えるねじ部はM12×1.25であり、この下部（すなわち電極間の中心から直径12mmの円を横切る形で）レーザーシートが通過していると考えることができる。これから、この突出したねじ部によって管路の断面積が一時的に小さくなり、このため点火プラグ上流では流れ場下側に転向、下流ではそれに伴い、ねじ部近傍での流速が減少していると予測される。また点火プラグの近傍では、誤ベクトルも含まれていると思われるが、図では分散による誤ベクトルの処理をしており、全体として点火プラグ近傍では大きな流速が観察される傾向が見て取れる。これは、特に電極間で流路が狭くなり、その後、流路が相対的に広がることで、空気流れが加速している現象であると推測できる。

図6には、同様な条件で点火プラグのギャップ近傍における流速の測定結果を示す。プラグによる反射により、またプラグによって遮られ上流側の情報は無いが、図4とほぼ同様に上流側ではやや下向きに流れが転向してこと、また点火プラグの近傍、特に下流側では大きな流速が観察される傾向が見て取れる。

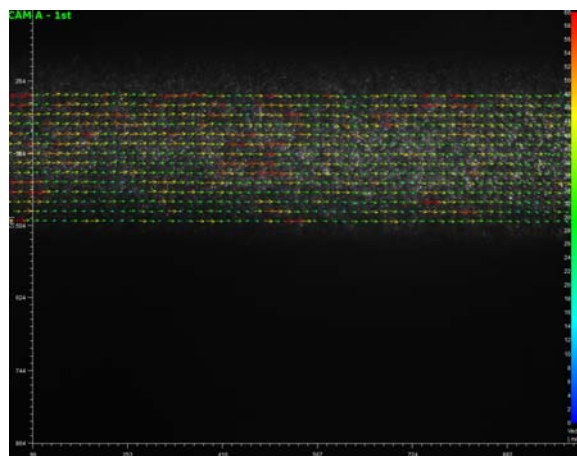


図5 点火プラグなしの流速分布

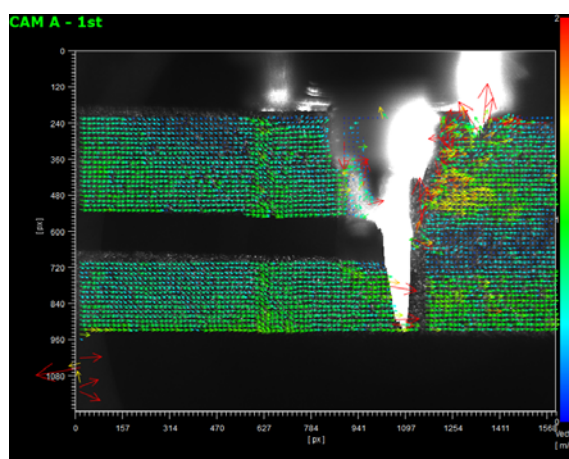


図6 点火プラグギャップ付近の流速（大気圧）

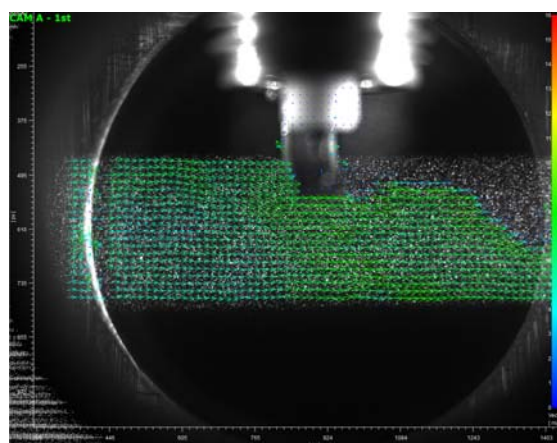


図7 上流圧が0.3MPaの流速分布

図7には上流圧を0.3MPaとしたときの流速分布を示している。この図に示されるように流速の分布は、およそ7～8m/sとなっている。実験の方法で述べた $V_f = C\sigma A_0/A_t (RT)^{1/2}$ から図7の条件における平均の流速を見積もると、8.0m/s となりおよそ一致していることがわかる。実際

には、流量係数やテストセクションでの断面積が一定ではない効果などが相まって必ずしも計算値と一致しないものと考えられる。

4 まとめ

一様流速を生じさせることができる小型風洞を製作し、空気流動中における火花放電の放電回路の変形挙動について実験的に把握するために、PIVにおける点火プラグまわりの流速計測を行った。その結果として明らかになったことは以下のとおりである。

点火プラグがない状態では流速はおよそ空間的に一様であるが、点火プラグが挿入されると、それに伴う断面積の変化から流れが下向きに転向し、また点火プラグ近傍で加速するような現象が観察された。圧力を上げた場合であっても現象は同様であった。また流速の絶対値であるが、簡単な考察から求めた流速とほぼ一致しており、本小型風洞は設計どおりに始動していることが確認された。

謝辞

本研究は、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。また研究実施にあたり、本学部学生の中村健人氏、榊原泰史氏、御子柴直希氏、井本龍希氏、市川優斗氏にご協力頂いた。ここに記して謝意を表する。

「参考文献」

- 1) 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, 池本 崇記, 秋濱 一弘, 定断面積一様流中における流速が火花放電の放電回路形状に及ぼす影響, 2017 年度日本機械学会年次大会予稿集 J0710104 (2017)
- 3) 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)