

CFD を用いた小型風洞を利用した流動による火花放電路の変形に関する研究

日大生産工(院) ○吉田 斗南
日大生産工 今村 宰 日大生産工 山崎 博司

1. まえがき

近年の地球温暖化対策が喫緊の課題となる中、脱炭素社会の実現に向けた取り組みが急務となっている。再生可能エネルギー由来の燃料がエネルギー・システムの中心となり、その利用には高効率な熱機関、特にリーンバーン（希薄燃焼）技術の活用が不可欠である。リーンバーンは、燃料と空気の混合比において空気を過剰に供給することで、燃焼温度を低減し、熱効率の向上を実現する燃焼方式である。過剰な空気供給により燃焼温度を下げ、熱効率を向上させる一方で、燃焼室内では、20 m/s にも達する流動が生じている場合もあり、高速流動の環境下では、火花放電路が大きく変形し、安定着火が困難になるという深刻な課題が存在する。リーンバーンにおいて安定した点火のために現象をとらえた点火モデルの構築が求められている。既報ではこれまで小型風洞を用いて流動中における放電路の変形を捉え、点火モデルへ資する知見を得てきた⁽¹⁾。最近の活動では流動中に含まれる渦が放電路の変形に与える影響を調べるため、様々な波数を有する流れ場を生成し、その流動場を計測した⁽²⁾。

しかしながら実験的な計測によって得られる流動場の情報は限定的であるため、流動と放電路変形との関係を調べるために数値計算の支援を得て実験条件および現象観察を行うことが好ましいといえる。以上のような観点から、本研究では実験系と同様に小型風洞において、試験部における点火プラグ周りの流れ場について知見を得ることを目的としたものである。実験で用いたような点火プラグ周りに誘起される流動場について検討を行い、LES および格子配列に配慮することにより電極後部での流れ場が再現できる可能性が高いことを、既報⁽³⁾において報告した。

その知見に基づき、次段階として火花放電路を模した離散粒子を投入し、その飛散過程を検討することにより火花放電路切断への流れ場

の影響を検討することとした。本報は、その第1段階であり、乱流モデル等は同じとした系について、放電粒子投入のタイミング、場所を特定することを目的として、より単純化された系であるパンチングメタルがない場合の点火プラグ周りの流れ場について検討したので、その結果について報告する。

2. 解析手法

本解析では実験⁽¹⁾⁽²⁾における現象の再現、比較を目的に、実験で用いた小型風洞設備に類似した計算領域を定義した。実験装置は内径が $\phi 25.4$ mm の円筒状になっており、その内部に流動制御用のパンチングメタル、点火プラグ、流量制御量のオリフィスなどが挿入できるようになっている。実験装置に忠実に流路を円筒座標とした計算領域にて計算も実施したが、計算の負荷が大きくなり計算時間が増加すること、また流路の断面中心部にある点火プラグ付近の流動に興味があることから、ここでは直交座標系を用いた。数値解析は Open FOAM を用いて実施し、非圧縮流れを仮定した。計算モデルについては、離散粒子投入が可能な MP-PIC(Multiphase Particle-in-Cell)法を用い、媒体流体は空気とした。乱流モデルとしては既報と同様に LES を用いた。Fig. 1 に計算領域を示す。このように計算領域は、450 mm \times 24 mm \times 24 mm の長方形形状とした。計算格子は一様格子として、格子間隔は 0.5 mm とした。

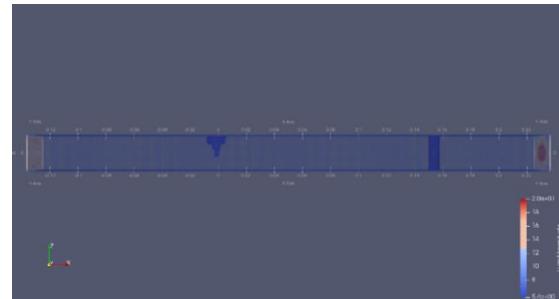
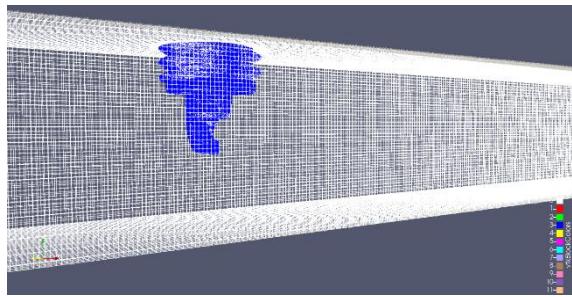
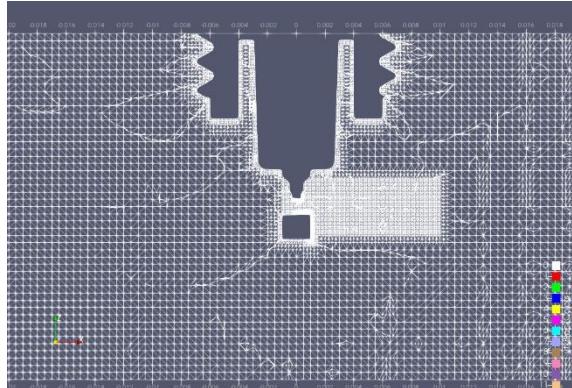


Fig. 1 計算領域



(a) 計算領域における点火プラグ



(b) 点火プラグ周りのメッシュ構造

Fig.2 計算領域における点火プラグと周辺のメッシュ接続と微細化メッシュの配置

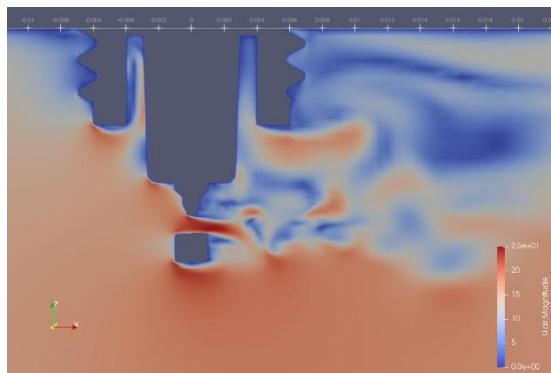


Fig.3 点火プラグ周りの流動場 (x-z 平面)

座標系は点火プラグ間隙の中心を原点として、計算領域は x 方向（主流方向）に $-125 \text{ mm} \sim 225 \text{ mm}$ 、 y および z 方向に $-12 \text{ mm} \sim 12 \text{ mm}$ の座標系とした。解析領域内には、 $x = 155 \text{ mm}$ の位置に直径 6 mm のオリフィスを配置した。実験に用いた点火プラグを模した stl ファイルを snappyHexMesh により計算領域に組み込んだ。ここでは第 2 段階までの重複メッシュの除去と表面メッシュの平滑化のみを設定し、第 3 段階である表面メッシュの追加は行っていない。平滑化レベルおよびグローバルメッシュとの接続設定についてはクーラン条件

などを配慮して過度な微細化は行っていない。そのうえで、 x 方向 $-1 \text{ mm} \sim 10 \text{ mm}$ 、 y 方向 $\pm 1 \text{ mm}$ 、 z 方向 $\pm 2 \text{ mm}$ の領域に微細メッシュを配置した。Fig.2(a) はグローバルメッシュ中では点火プラグ配置、Fig.2(b) に、 x - z 平面における点火プラグ周りおよび電極間下流部に設置した微細化メッシュ領域を示す。境界条件として 4 側面は滑りなし条件とし、電極間隙部の速度を規定することが目的として流入部、流出部は主流速度で規定した。流入部、流出部の条件は乱流モデルなどの条件は既報⁽³⁾と同様とした。

非定常計算の実行にあたっては、ここでクーラン数で時間ステップを制御した。クーラン数の最大値が 0.8 を超えないように時間間隔を制御する設定とした。この時間間隔は初期状態を除き $1.19 \times 10^{-7} \text{ s}$ であり、その場合の平均クーラン数は 0.0049 であった。これらの条件で計算実行し、出力ファイルを 0.00001 s ごとに出力した。

3. 解析結果および考察

Fig.3 に本解析で得られた計算結果の一例を示す。結果は 0.0024 s での結果である。図は点火プラグ付近を拡大して示しており、3 方向の合成速度の強度分布を表示したものである。図から点火プラグ電極間隙部に速度の速い部分が生じ、その後方で流れ場が乱れている様子が確認できる。点火プラグ先端部広報に流動構造が存在し、電極間隙を通過した流れの先端部に影響を及ぼしていることが強く示唆される。

これらの速度変動の詳細について調べるために、点火プラグ付近に 8 つの観測点を設定して、その位置における速度変動の時間履歴を調べた。設定した観測点の位置を Fig.4 に示す。① は原点 ($0.0, 0.0, 0.0$ 、電極間隙中心) とし、その x 方向下流 3.5 mm に観測点②、その z

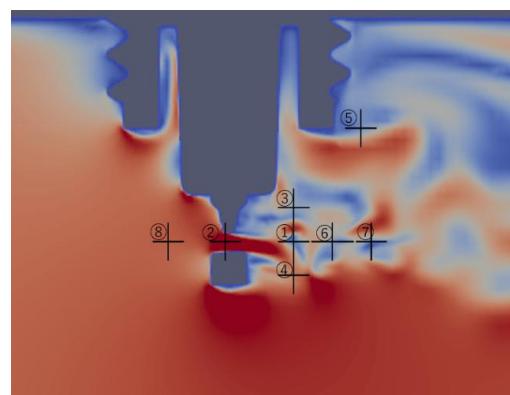


Fig.4 設定した速度観測点の位置

方向±1.4mmとして上方に③、下方に④を配置した。これらに加え、②の下流方向 6mmに観測点⑤、9mmに観測点⑥を配置した。そのうえで、⑦は①の上流部3.5mm、そしてプラグネジ部先端の影響を調べる目的として $x=7.5\text{mm}$, $z=0.6\text{mm}$ に観測点⑧を配置した。

Fig. 5は電極間隙中心位置における速度の計算結果を示す。横軸は初期状態からの時間であり、左縦軸は主流方向 U_x 、および x , y , z 方向の速度から算出した合成速度 U である。右縦軸は y 方向、 z 方向の速度成分である。図から主流方向は初期状態から漸減し、0.001sを過ぎた時点からゆっくりと増加する。これらに対し、 y 方向、 z 方向の速度成分は負の値を有し、初期に減少し、その後揺動状態に入ることがわかる。既報⁽²⁾において参照してきた実機実験では、スーパーリンバーンを目指した高タンブル状態での電極間隙流れが 23.5m/s が設定してあることから、ここでの流れ状態は高タンブル流れに相当した状態を実現していることが確認できる。一方で、 y 方向、 z 方向の速度成分から計算初期には一方への単調減少であり、初期条件として計算領域全体に主流方向への一様流を与えたことにより、流れ場構成への変遷時間と考えられる。以後について $t=0.0012\text{s}$ について検討することとする。ここでは位置同士の相関関係を明らかにすることを目的として、3 方向速度成分を合成した U により各位置での速度変化の比較を行っていくこととする。

Fig. 6に電極間隙中心から下流方向における各観測点における速度変化を示す。主流方向下流 $x=3.5\text{mm}$ における z 方向に配置した②、③、④における速度変化を示したものである。図か

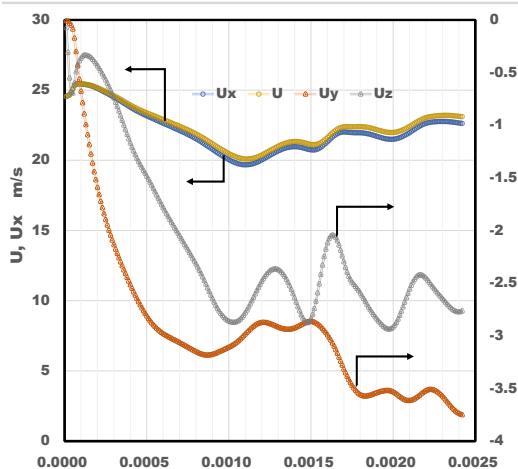
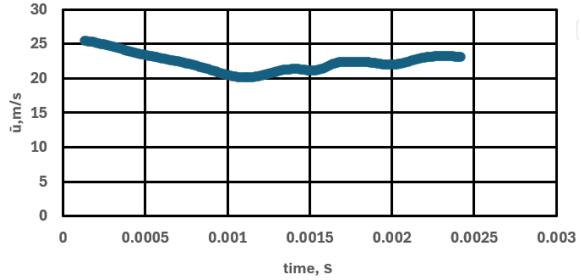
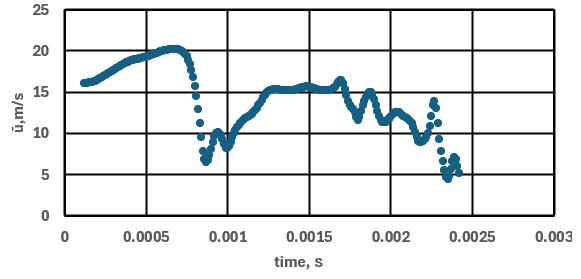


Fig.5 電極間隙中心位置①における速度変化

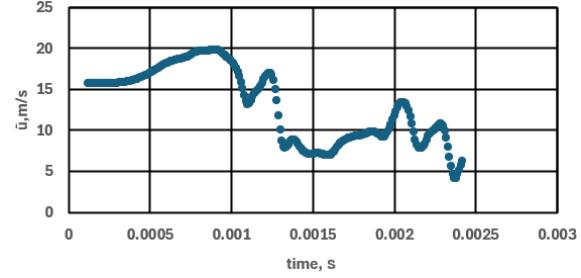
ら電極間隙部分では大きな変動は確認できないが、下流部3.5mm、6mm部分では平坦部分と変動部分があることがわかる。かつ平坦部分は3.5mmのほうが速度は大きい。前者では電極間隙部で增速された流れが到達する期間とそれが離れる期間が交互に現れることと一致したものを言え、後者では平坦部分の速度が低く、間隙から到達した流れは分散し、減速している



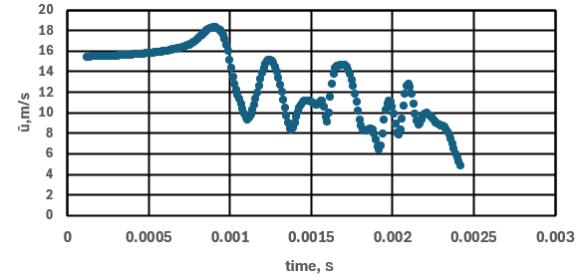
(a) 観測点② ($x=0\text{ mm}$)



(b) 観測点① ($x=3.5\text{mm}$)



(c) 観測点⑥ ($x=6\text{ mm}$)



(a) 観測点⑦ ($x=9\text{ mm}$)

Fig.6 電極間隙中心から主流下流方向における速度変化の比較

ことが予測できる。両者ともに平坦部の後ろに現れる揺動部があり、間隙からの流れはこの部分に到達せず、他の部分からの流れがきていると考えられる。また観測点⑦では②⑥における平坦部分は存在せず、揺動部分のみであることから、間隙流は⑦は到達していないものと判断できる。

Fig. 6 は主流方向下流 $x=3.5$ mmにおける z 方向に配置した③, ④における速度変化を示したものである。前図(a)の ②の変動に比べ、計算した期間内では上部③の大きな速度変化は変動は大きくない。一方で、下方にある④では大きな変動が確認できる。電極間隙下方には解放された空間にこの接地電極があり、その後方に発生する流動構造は上部とは明らかである。

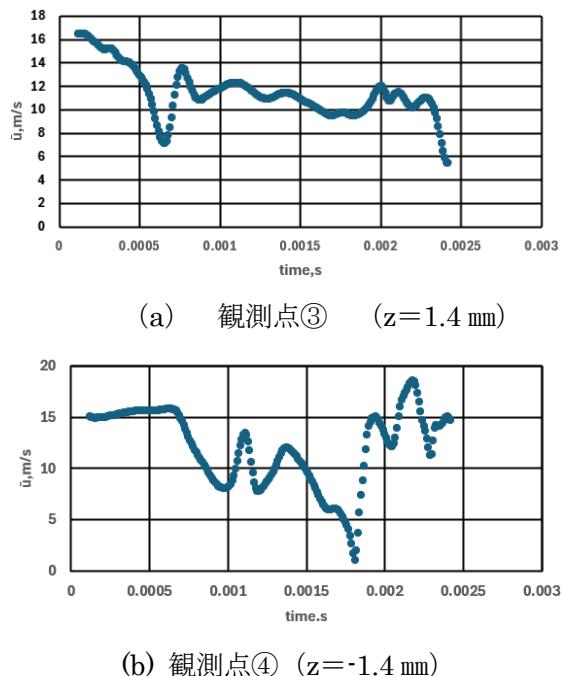


Fig.6 電極間隙中心下流 3.5 mm 位置における速度変動の比較

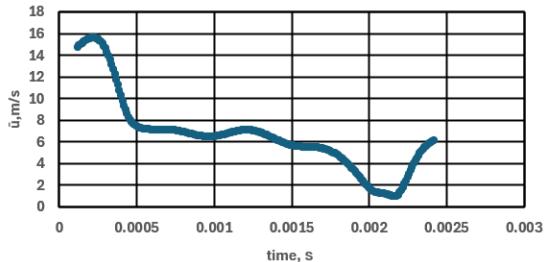


Fig.7 電極間隙中心下流 3.5 mm 位置⑤における速度変動

ことから、その流れ場構造が電極間隙後方の流れよりも大きな構造であることを示唆するものと推察できる。この点を確認するために点火プラグ上部位置下流部⑦の速度変動を調べた結果を Fig. 7 に示す。図から前図(b)④に比べ、変動は急峻ではないものの、長い周期と思われる変動が確認できる。電極部分に比べ、大きな構造であることから、この部分にも流動構造が存在することが考えられるものの、これが電極間隙下流部に影響を及ぼすものであるかについて今後の検討課題といえる。今後さらに異なるケースにおいて、実験および数値計算の結果を比較して、このような流動場が放電路の形状変化に及ぼす影響について検討を進める予定である。

4. まとめ

点火プラグ周りの流れ場と放電路変形との関係について調べるために、実験による計測だけでは十分でない流動場の条件について、実験条件を模擬した CFD を実施した。その結果、得られた結論は以下の通りである。

- ・点火プラグの上流では流れ場の速度変動は小さい。
- ・電極間隙においては、流れ場は乱れていないが、その流速は周囲よりも大きくなる。
- ・点火プラグの下流においては、同じような周期の速度増加、低下がみられ、定期的に渦が生じていることを示唆している。
- ・実験では点での計測しかできていないが、このような多地点における相関が数値シミュレーションで明確になれば実験の計測点まわりの流れ場推定可能であると思われる。

参考文献

- 1) 今村 宰, 文 鉢太, 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第 50 卷 3 号 (2019), pp. 737-742, DOI: 10.11351/jaeronbun.50.737 00.
- 2) 吉田 斗南, 今村 宰, 秋濱 一弘, “小型風洞を利用した点火プラグまわりの流動計測に関する研究”, 日本機械学会 2024 年度年次大会 (2024 年 9 月) J071p-06
- (1) 吉田 斗南, 今村 宰, 秋濱 一弘, “小型風洞を利用した流動による火花放電路の変形に関する研究”, 日本機械学会 2025 年度年次大会(2025 年 9 月) J061p-18