

# フランジ付き電極の点火特性に及ぼす流れ場の影響

日大生産工(院) 岡本 健一 日大生産工(院) 遠藤 恵太  
日大生産工 山崎 博司 日大生産工 野村 浩司 日大生産工 氏家 康成

## 1. 緒言

自動車用火花点火機関において、燃料消費率や有害排気ガスの低減を目的として希薄燃焼技術が採用されている。希薄燃焼を行う際、燃焼室内にスワールやタンブルに伴う強い乱れを発生させて火炎伝播速度の促進がはかられている。しかし強い乱れにより火炎核の熱損失が増大するため失火に至ることがある。火花点火エネルギーの増大により失火を回避することが考えられるが、点火系の早期劣化や電磁波障害の影響が懸念される。以上のことより点火エネルギーを低減させ、なおかつ確実に点火させることは、火花点火機関にとって重要な課題の一つである。

過去の研究より、フランジを火花電極先端に取り付け、定容燃焼容器内の静止混合気場において点火実験を行った結果、フランジには火花放電時に発生する衝撃波の熱エネルギー回収による、点火エネルギーの低減効果の存在があることが明らかとなった<sup>1)2)</sup>。本研究はフランジ付き電極の点火機構解明を目的とし、密閉定容燃焼容器内に生成された旋回流動場内にフランジ付き電極を設置し、その周りの流れ場を LDV (Laser Doppler Velocimetry) および数値解析により検討した。またフランジの衝撃波エネルギーの回収効果確認のため、点火実験を行った。

## 2. 実験方法および数値解析手法

本実験で使用した旋回流動燃焼容器を図 1 に示す。燃焼容器は外形 150 mm のステンレス鋼 (SUS303) 製で、燃焼室は 60 mm、幅 25 mm の円筒型である。燃焼容器側面には流速測定用の石英ガラス製観察窓 (直径 80 mm、厚さ 15 mm) が取り付けられている。燃焼容器周面には旋回流を生成するためのノズルが燃焼室円周面に沿うように取り付けられている。

図 2 にフランジ付き電極の概略を示す。電極支持部には直径 10 mm のガイシを用いている。フランジは黄銅製で直径 9 mm、厚さ 1.6 mm の円板型である。フランジ間隔は 4 mm、電極間隙は 1 mm とした。

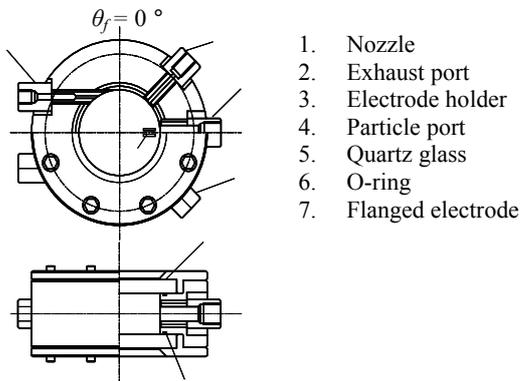


Fig.1 Combustion chamber

流速測定の実験装置概略を図 3 に示す。実験装置はエアコンプレッサ、ソレノイドバルブ、エアレギュレータ、エアシリンダ、流量調整弁、パルスジェネレータ、ノズル、燃焼容器からなる旋回流生成系、LDV (DANTEC 製)、パーソナルコンピュータからなる計測装置系の 2 系統で構成される。エアシリンダにより空気を燃焼室内に押し出し旋回流を生成した後、LDV により 2 次元流速計測を行った。電極の取り付け位置は、燃焼容器内取付角  $\theta_f$  (フランジ壁面が流れと直行する方向) = 90° であり、燃焼容器中心から半径方向に 20 mm の位置に電極間隙の中心を設置した。燃焼室に電極を設置しない状態で、燃焼容器内の複数の測定点で計測を行い、旋回流動場を検証した。その後、フランジ付き電極を取り付けた場合の計測を行った。測定位置は電極間隙中心の 1 点とその点を対称点とする半径軸方向の  $\pm 3, 6$  mm の 5 点とした。エアシリンダへの供給空気圧は、0.54 MPa とし、流量調整弁開度は 0.5% ~ 3.0% とした。

数値解析には、CHAM 社の PHOENICS Ver 3.6 を使用した。計算格子は三次元直交格子であり、乱流モデルには単純 k- $\epsilon$  モデルを使用した。差分法は二次精度風上差分法を用いて、壁関数には乱流モデルで使われる対数則を用いた。格子数は、X, Y, Z 方向に 80,

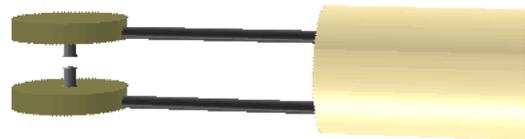
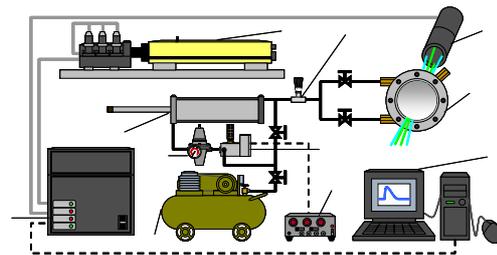


Fig.2 Configuration of flanged electrode



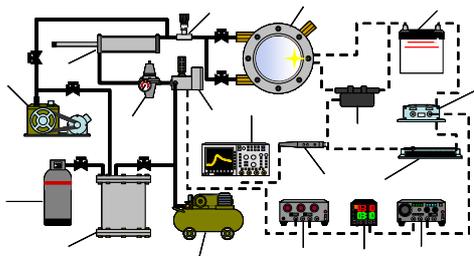
- |                        |                      |
|------------------------|----------------------|
| 1. Argon-ion laser     | 2. Air cylinder      |
| 3. LDV detector unit   | 4. Air regulator     |
| 5. Air compressor      | 6. Solenoid valve    |
| 7. Pulse generator     | 8. Personal computer |
| 9. Chamber             | 10. LDV probe        |
| 11. Flow control valve |                      |

Fig.3 Experimental setup of flow measurements

30, 80 とした。燃焼容器内の旋回流動場は解析領域内のノズル中心軸延長線上に、速度場を与える Fan 関数を配置して旋回定常流動場を形成させた。この旋回流動場内に、実験と同寸法、同配置でフランジ付き電極を設置しフランジ間領域での流れを検証した。

点火実験装置概略を図 4 に示す。実験装置は、旋回流動生成装置系、点火装置系および計測装置系の 3 系統で構成される。旋回流動生成装置系は、エアコンプレッサー、プロパンボンベ、真空ポンプ、混合気タンク、ソレノイドバルブ、エアレギュレーター、エアシリンダー、流量調整弁、ノズルおよび燃焼容器から構成される。点火装置系は、電流遮断式点火装置、バッテリー (12V)、可変抵抗、パルスジェネレーター、ファンクションジェネレーターおよびディレイタイマーから構成される。点火実験での最小点火エネルギーは可変抵抗により一次電流を変化させて、火花放電回数 30 回における点火確率が 50 % の場合の点火エネルギーと定義した。

図 5 に流量弁開度  $\phi_c = 2.0\%$  における電極中心位置での流速測定結果の一例を示す。縦軸は周方向の流速  $u$ 、横軸は LDV 装置の流速測定が可能になってからの時間である。約 2000 ms に電磁弁を開いて、エア



- |                         |                        |
|-------------------------|------------------------|
| 1. Chamber              | 2. Flow control valve  |
| 2. Air cylinder         | 4. Vacuum pump         |
| 5. Air regulator        | 6. Solenoid valve      |
| 7. Propane gas          | 8. Mixture tank        |
| 9. Air compressor       | 10. Oscilloscope       |
| 11. Current probe       | 12. Pulse generator    |
| 13. Delay generator     | 14. Function generator |
| 15. Variable resistance | 16. Igniter            |
| 17. Ignition coil       | 18. Battery            |

Fig.4 Schematic diagram of experimental apparatus

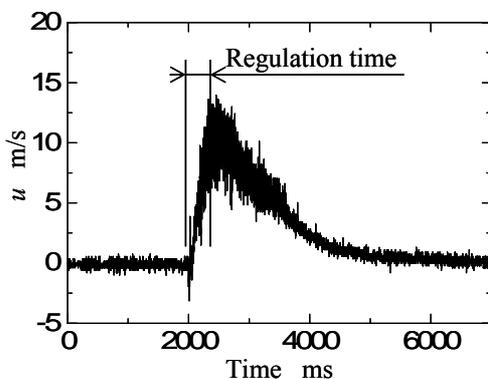


Fig.5 An example of the typical temporal variation of flow velocity at the center of electrodes in the swirling field ( $\phi_c = 2.0\%$ )

シリンダに一定圧力をかけて旋回流は生成されている。約 2000 ms から 2300ms に、急激に流速は大きくなり、その後、時間の経過とともに流速は緩やかに小さくなり、約 5000ms に流速はほぼ 0 になる。ここでは混合気の噴射を開始してから電極中心位置での流速が最大となる時刻までを点火のための規定時間と定義した。規定時間の $\pm 50$  ms 範囲内の測定値を平均して、各成分の平均流速を求めた。

### 3. 結果および考察

燃焼容器内に生成された旋回流動場の検証を行うため、フランジを設置しない場合について検討を行った。図 6, 7 に  $\theta_f = 90^\circ$  における半径位置  $r = 5, 10, 15, 20, 25$  mm の位置での平均流速  $u_s$  を示す。この結果は点火実験での点火時期と同時刻における結果であり、横軸は半径位置  $r$ 、縦軸は平均流速  $u_s$  と乱れ強さ  $u'_s$  である。副変数に流量弁開度  $\phi_c$  を示す。図 6 から流速は流量弁開度に関係なく燃焼容器中心付近 ( $r = 0$ ) において小さく、燃焼容器壁面 ( $r = 30$ ) に向かって従い、漸増した後、フランジ設置付近 ( $r = 20 \sim 25$ ) でノズルからの直接的影響により急増する。乱れ強さも噴流による影響を受ける容器壁面付近で、燃焼容器中心に比べ若干高くなっている。流量弁開度を上げることにより、流速、乱れ強さの高い旋回流動場を生成できることが確認できる。

図 8 に数値解析により求められた旋回流動場の速度分布の結果を示す。図には流量弁開度 1.0, 2.0, 3.0 % の LDV 測定結果も示されている。横軸と縦軸

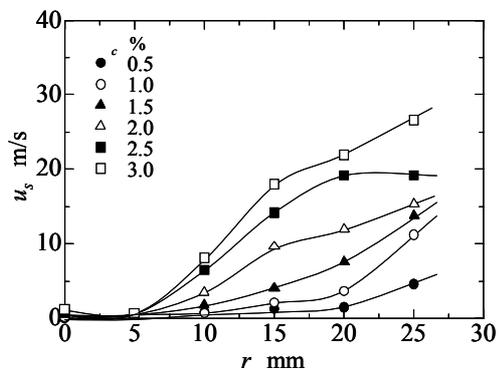


Fig.6 Radial velocity profiles at  $\theta_f = 90^\circ$  in the combustion chamber

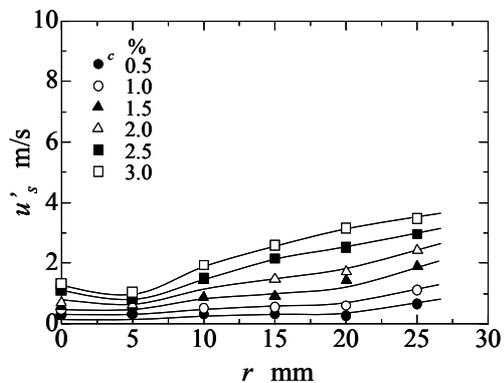


Fig.7 Radial profiles of turbulent intensity at  $\theta_f = 90^\circ$  in the combustion chamber

は図 5 と同じである。数値解析で求められた速度分布は実験結果と比較的一致していることがわかる。このことより本研究で用いた計算手法、条件により実験で得られる旋回流場が数値的に実現されていることが確認できる。

フランジを設置した際のフランジ間領域の流れ場を検証することを目的として、フランジ対称軸上について LDV で測定した結果を図 9,10 に示す。横軸は  $\theta_f = 90^\circ$  における半径位置  $r$  であり、電極中心位置  $r = 20$  mm を中心として、半径方向に  $\pm 6$  mm の領域が示

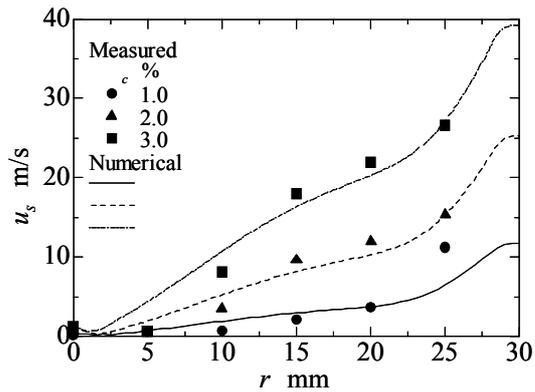


Fig.8 Comparison between the measured and numerical velocity profiles of swirling flow in the combustion chamber

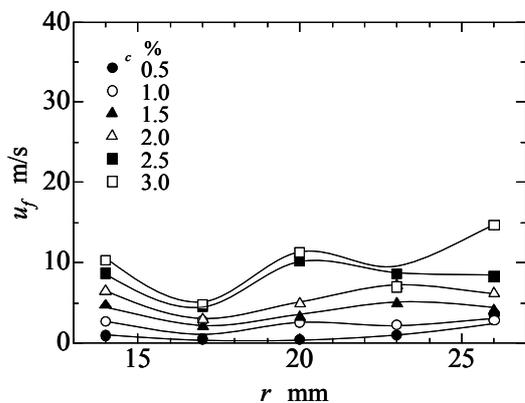


Fig.9 Mean velocity profiles on symmetric axis of flanged electrode

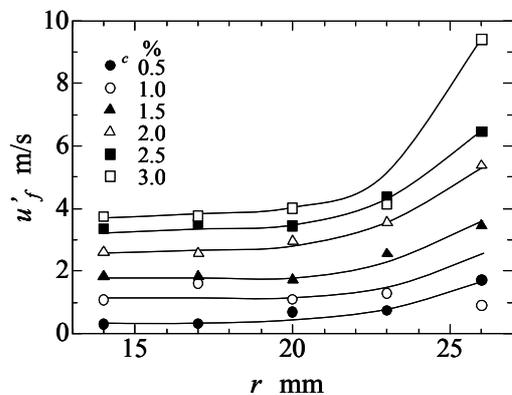


Fig.10 Turbulent intensity profile on symmetric axis of flanged electrode

されている。縦軸は平均流速  $u_f$ 、乱れ強さ  $u'_f$  である。副変数は流量弁開度  $\phi_c$  を示す。図よりフランジを設置した場合のフランジ間領域の流速は、流量弁開度に関係なくフランジを取り付けていない場合に比べ小さくなり、抑制されていることが確認できる。フランジ間領域の乱れ強さは流量弁開度に関係なく、フランジを取り付けていない状態に比べ若干高くなっている。流れの抑制が乱れの抑制を直接引き起こしていないことがわかる。

図 11 に数値解析で作成された旋回流場にフランジを設置した際のフランジ間領域の速度分布を示す。また図中の破線はフランジを設置しない場合の計算結果であり、流量弁開度 2.0% の時の LDV の測定結果も同時に載せてある。縦軸と横軸は図 9 と同じである。計算結果においてもフランジ間領域の流速は、フランジを取り付けていない場合に比べ抑制されていることがわかる。電極中心位置では、フランジを取り付けることにより約 1/2 の流速となっている。フランジ間領域の流速の速度分布は、LDV の測定結果と比較的一致した結果となった。

図 12 に電極中心位置のフランジによる流速の抑制効果を示す。横軸は電極中心位置 ( $r = 20$  mm) のフランジを設置しない場合の平均流速  $u_s$ 、縦軸は  $u_s$  と電極中心位置のフランジを設置した場合の平均流速  $u_f$  との差  $\Delta u_f (=u_s - u_f)$  である。図には流量弁開度 0.5% ~ 3.0% の LDV の測定結果と計算結果の両方が示されている。図よりフランジによる電極中心位置の流速の減少は周囲流速に比例していることがわかる。フラン

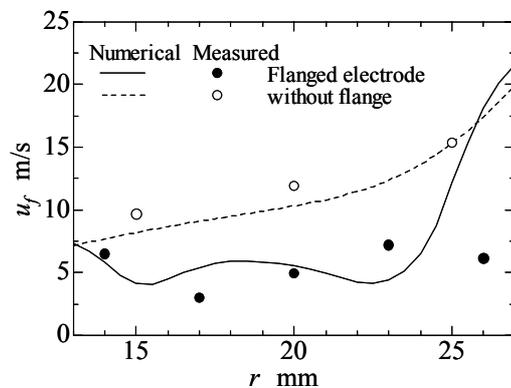


Fig.11 Comparison of flow velocity between the flanged and normal electrode on symmetric axis

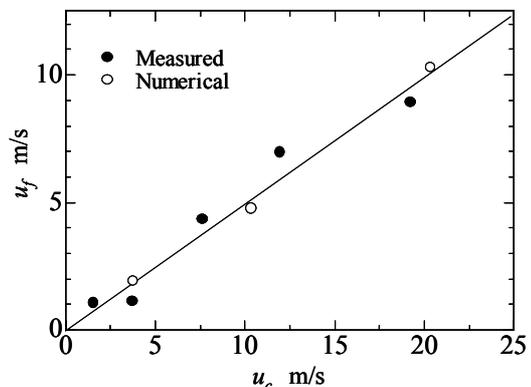


Fig.12 Reduction effect of mean velocity caused by mounting the flanges on the electrode

ジには周囲流速に関係なく電極中心位置の流速を約 1/2 に抑制する効果があることが確認できた。

図 13 にフランジによる最小点火エネルギーの低減効果を調べた結果を示す。横軸は  $\theta_f = 90^\circ$  におけるフランジを取り付けた場合、フランジを取り付けていない場合 (通常電極) の電極中心位置での平均流速  $u_c$ 、縦軸は電流遮断式点火装置の最小一次電流  $I_M$  を示す。図より静止混合気場および旋回流動混合気場において、通常電極に比べフランジ付き電極の方が最小一次電流を低減できていることが確認できる。静止混合気場において、フランジ付き電極が通常電極に比べ最小一次電流を低減できたことは、フランジによる衝撃波エネルギーの回収効果によるものと考えられる<sup>1)2)</sup>。通常電極フランジ付き電極ともに流速が 5 m/s 付近で最小一次電流が最も低減できていることが確認できる。旋回流動混合気場において最小一次電流を低減できたのは、流速の増大により火炎核が電極の周りに長時間存在しないため電極からの冷却作用が低減できていると考えられる<sup>3)</sup>。

流れ場での点火によって与えられる熱の輸送を数値解析にて検討した。図 14(a) に計算領域を示す。計算格子は三次元直行格子であり、計算領域のサイズは、X, Y, Z 方向に 12 mm, 4 mm, 4 mm とした。格子数は、X, Y, Z 方向に 60, 20, 20 とした。電極の寸法と電極間は実験と同寸法とし、境界条件として電極間に、火花エネルギーに相当する球体の熱源をおいた。また電極からの冷却損失を考慮した。流入境界条件は LDV 測定結果を参考とし、計算は非定常計算で行った。図 14(b) に数値解析結果の例を示す。この図は 4 m/s の流速を与えたときの 0.9 ms 後の結果である。高温領域は流れによって電極間から輸送され、大きく広がっていることが確認できる。図 15 に電極周りにおける最高温度の時間履歴を示す。横軸は電極中心位置における流速  $u_c$ 、縦軸は解析領域内における最高温度である。図より最高温度のピークは 4 ~ 5 m/s 付近に存在し、ほぼ同じ流速にピークがあることがわかる。点火実験において通常電極、フランジ付き電極ともに流速が 5 m/s 付近で最小一次電流を最も低減できている。この結果から熱輸送は点火エネルギーを低減するための要素の一つであると考えられる。

#### 4. 結言

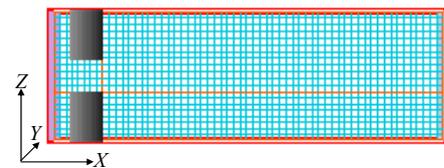
旋回流動場におけるフランジ付き電極周りの流動特性を LDV 測定および数値解析を用いて検討した。点火実験においてフランジによる最小点火エネルギーの

低減効果を調べた。また点火によって与えられる熱の輸送を数値解析にて検討した結果、以下の結論を得た。

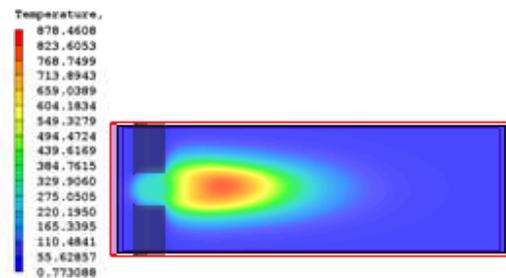
- (1) フランジ付き電極を使用することにより旋回流動混合気場および静止混合気場において、点火エネルギーは低減する。
- (2) フランジ付き電極と通常電極の点火エネルギーは、流速と共に減少して極小値をもち、その後、緩やかに単調増加する。
- (3) フランジを取り付けることで、電極中心位置での流速の減少は、周囲流速に比例する。
- (4) 熱輸送解析による最高温度はほぼ同じ流速でピークを持つ。

#### 参考文献

- 1) 三森, 平沼, 青木, 野村, 氏家, 河野, 強乱れ場におけるフランジ付き電極の点火特性, 機構論 No.96-1, (1996) pp.559-560
- 2) 三森, 佐藤, 野村, 氏家, 河野, フランジ付き電極の火花点火エネルギー低減に関する研究, 機構論 No.97-1, (1997) pp.43-44
- 3) 河野, 角田, 藤本, 氏家, 最新内燃機関, 浅倉書店 (1995) pp.39-40



(a) Numerical domain



(b) An example of numerical results

Fig.14 Numerical analysis of supplied heat dissipation around the electrode

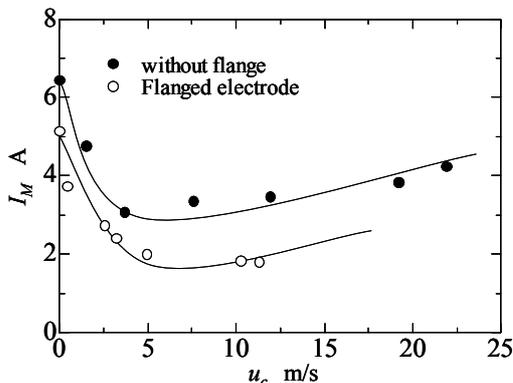


Fig.13 Measured result of the minimum primary current

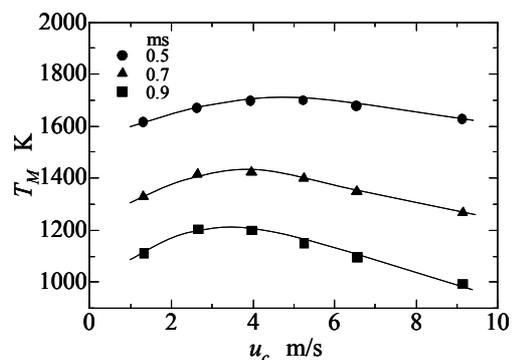


Fig.15 Time histories of maximum temperature around the flanged electrode