

旋回流動場におけるフランジ付き電極周りの流動解析

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

燃料消費率や有害排出物の低減化などを目的として採用されている希薄燃焼技術では、スワール、タンブル流などに伴う強い乱れを利用した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ことから、点火は静止場よりも困難であり失火に至ることがある。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等の影響が懸念される。以上のことから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、希薄燃焼機関にとって重要な課題の一つである。

著者らの一部は、既報⁽¹⁾⁽²⁾において定容燃焼容器内の静止混合気場および主流のない乱れ場において、火花電極先端にフランジを設置して点火実験を行い、火花放電時に発生する衝撃波のエネルギーをフランジによって反射、回収することが、点火エネルギーの低減に有効であることを明らかにした。本研究は、その一環であり旋回流動場に配置したフランジ付き電極の点火機構解明を目的としたものである。ここではその第一段階として密閉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配置し、その周りの流れ場を位相ドップラー流速計および数値解析により検討した。

2. 実験方法および数値解析手法

本実験で使用した燃焼容器を 図 1 に示す。燃焼容器はステンレス鋼 (SUS303) 製で、外径 150mm、燃焼室直径 60mm、燃焼室幅 25mm の円筒形である。燃焼容器側面には流速測定用の石英ガラス (厚さ 15mm) 製観察窓が取り付けられ、燃焼容器側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 10mm のガイシを用いており、フランジは黄銅製で直径 9mm、厚さ 1.6mm の円板型である。フランジ間隔は 4mm であり、電極間隙は 1mm である。

実験装置の概略を 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、および位相ドップラー流速計 (PDA)、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。旋回流はエ

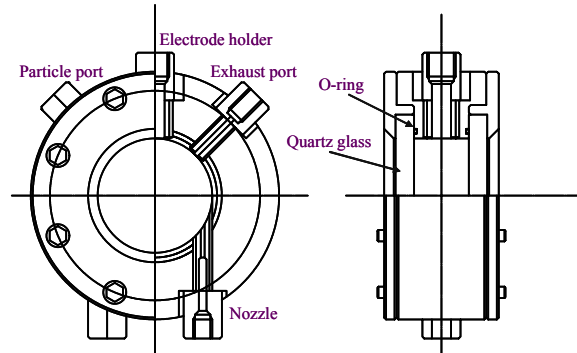


Fig.1 Combustion chamber

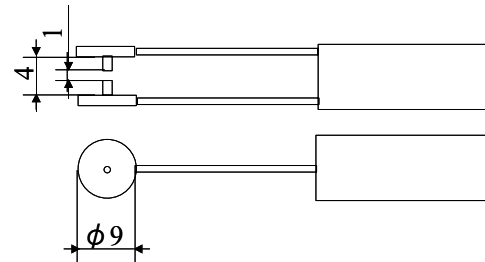


Fig.2 Dimension of flanged electrode

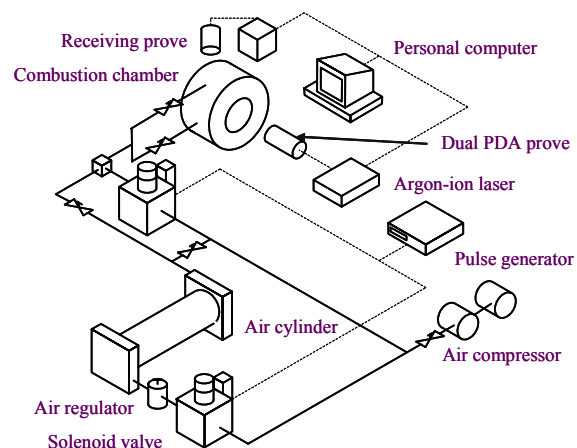


Fig.3 Schematics of experimental apparatus

Flow analysis around flanged electrode in swirling flow field

Kenichi OKAMOTO, Keita ENDO,

Hiroshi YAMASAKI, Hiroshi NOMURA, Yasushige UJIIE,

エアシリンダの圧縮行程を利用して生成した。エアシリンダにより押し出された空気は、流速調整用の微量流量調整弁を通り、ノズルから噴射される。電極の取り付け位置は、燃焼容器内旋回角 θ_s (円筒形燃焼容器中心より垂直上向きを 0°) $= 90^\circ$ であり、燃焼室中心から 20mm の位置にフランジ付き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、燃焼容器内を複数の測定点で計測を行い、旋回流動場を検証した。次にフランジ付き電極を取り付けた場合についての計測を行った。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 4 点である。エアシリンダへの供給空気圧および流量調整弁開度はそれぞれ 0.54MPa, 0.5% として実験を行った。

数値解析には、CHAM 社の PHOENICS Ver3.5.1 を使用した。解析領域を図 4 に示す。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 - ϵ 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、壁関数には乱流流れで使用される対数則を使用した。格子数は、X, Y, Z 方向に 30, 13, 30 であり、特にフランジ周りについては格子数を 3 倍とした。燃焼容器内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、実験と同寸法、同配置でフランジ付き電極を設置し、フランジ間領域の流れを検証するとともに、旋回流に対する対向角 θ_c (垂直上向きを 0° とし時計回りを正) を変化させて電極間隙での平均速度および乱れ強さを調べた。

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 5、図 6 に $\theta_s=90^\circ$ における半径 $r=5, 10, 15, 20, 25\text{mm}$ の位置での平均流速および乱れ強さを示す。ここでは旋回流動場での火花点火実験での点火時期と同時刻における結果である。横軸は半径位置 r 、縦軸は平均流速 $\bar{u}$ と乱れ強さ u' であり、旋回流の周方向速度成分および半径方向速度成分の 2 成分から算出された値である。図には、同条件下において数値解析によって求められた、平均流速および乱れ強さが示されている。図から、燃焼室中心 ($r=0$) において流速は小さく、容器壁面に向かうに従い、流速は漸増した後、フランジ設置付近でノズルからの噴流の直接的影響により急増する。乱れ強さも噴流による影

響を直接受ける容器壁面付近で、燃焼室中心に比べ乱れ強さは若干高くなっていることがわかる。その一方で、噴流の影響を直接受けていない領域 ($r=0\sim15$) では変化は小さい。数値解析による速度分布、乱れ強さ分布ともに実験結果とほぼ一致しており、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動場が数値的に実現されていることが確認できる。

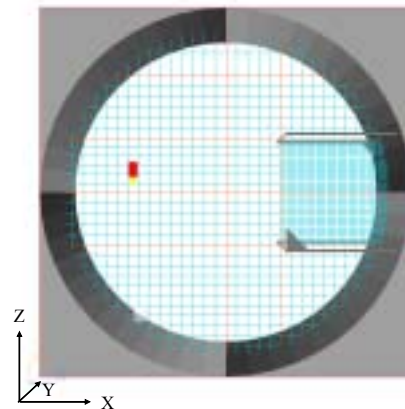


Fig.4 Schematic of Numerical Domain

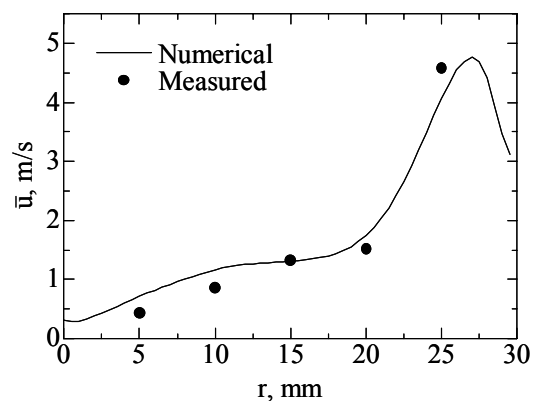


Fig.5 Velocity profile of swirling flow in the chamber

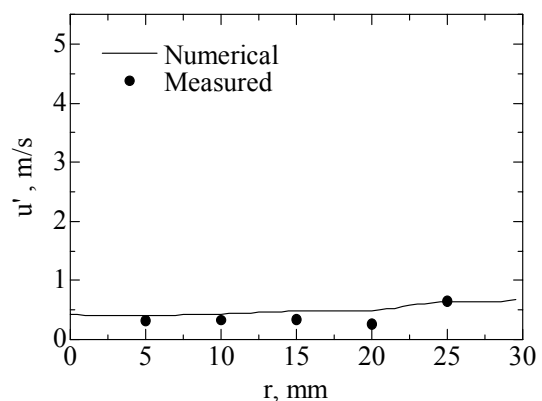


Fig.6 Turbulent intensity profile of swirling flow in the chamber

フランジを設置した場合の流れ場を検証することを目的として、フランジ対向角 $\theta_c=90^\circ$ にフランジを設置して、フランジ対称軸上について PDA 測定を行い、数値解析との比較を行った。図 7 および 図 8 に結果を示す。横軸は $\theta_s=90^\circ$ での半径位置 r であり、図 7 および 図 8 の縦軸はそれぞれ平均流速 $\bar{u}$ 、乱れ強さ u' である。図では、電極位置 $r=20\text{mm}$ を中心として、半径方向に $\pm 6\text{mm}$ の領域が示されている。また図中の破線はフランジを取り付けていない場合の計算結果である。図 7 の結果より、フランジを設置した場合、フランジ間領域の流速はフランジを取り付けていない状態に比べ小さくなり、流れが抑制されていることがわかる。電極中心位置では、電極がない場合に比べ約 1/2 の流速となっている。また平均流速 $\bar{u}$ の測定結果と数値結果はフランジ無しの場合と同様に比較的良好に一致したものとなっている。一方、図 8 に示された乱れ強さについてはフランジ付き電極の設置による大きな変化は認められず、流れの抑制効果が乱れの抑制効果を直接的に引き起こしていないことが確認できる。なお、ここでのフランジの効果は相対的に小さいものの、フランジ無しの場合に比べ、実験結果では大きくなる傾向を示しているのに対して、数値解析では小さくなる傾向が見受けられる。これらについては、使用した乱流モデルの適用性も含め、今後詳細に検討する必要があるものと考えられる。

図 9 および 図 10 に、フランジ対向角 $\theta_c=90^\circ$ における燃焼容器中心断面上の、フランジ周りの速度ベクトル分布および乱流エネルギー分布を示す。図 9 では、旋回流は上流側フランジ上部に衝突し、容器中心に向かう流れと容器壁面に沿う流れに分流されており、フランジ間領域で分流した流れを巻き込んで容器中心に向かう流れを作り出している。これにより、電極間隙部は噴流の直接的影響を受けおらず、その結果として、フランジ間領域の流れが抑制されていることがわかる。図 10 から、噴流主流と直接接触し、分流、剥離を引き起こすフランジ外側部に乱流エネルギーの高い領域が存在していることが確認できる。またフランジ間領域は、フランジ外側に比べ、乱流エネルギーの値は小さくかつ図 9 で確認できる上流側フランジ下部の剥離渦による乱れエネルギー生成も大きなものではなく、むしろ上流側フランジにより分流された噴流主流が下部フランジに衝突することによって、エネルギー分布が形成されていることが確認できる。

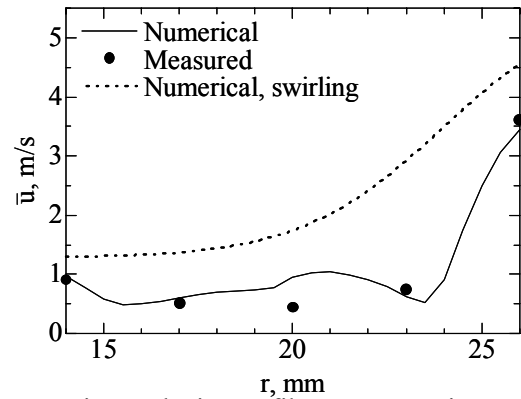


Fig.7 Velocity profile on symmetric Axis of flanged electrode

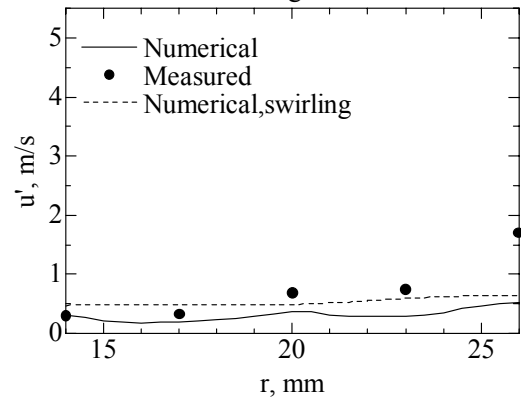


Fig.8 Turbulent intensity profile on symmetric axis of flanged electrode

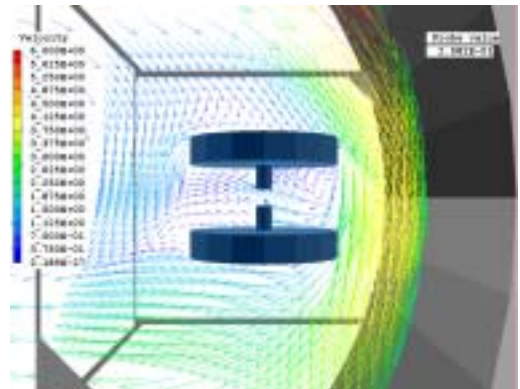


Fig.9 Vector map around flanged electrode (on x-z plan, $\theta_s=90^\circ$, $\theta_c=90^\circ$)

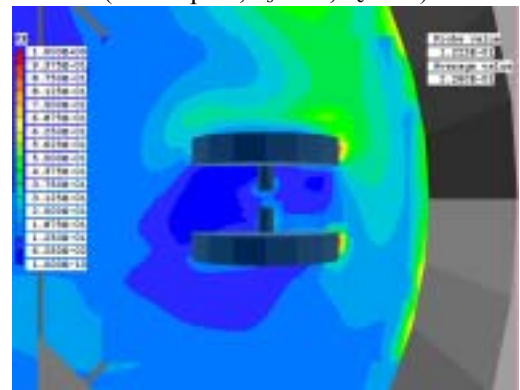


Fig.10 k-contour around flanged electrode (on x-z plan, $\theta_s=90^\circ$, $\theta_c=90^\circ$)

図 11 に電極間隙中心における平均流速 $\bar{u}$ および乱れ強さ u' に対するフランジ対向角の影響を、数値解析によって検討した結果を示す。図において両縦軸はそれぞれ平均流速 $\bar{u}$ と、乱れ強さ u' であり、横軸はフランジ対向角である。図より対向角 $\theta_c = -75^\circ$ において流速、乱れとも最も低い値を示し、 $\theta_c = 45^\circ$ において最も高い値を示す。図 12 に、旋回流へのフランジ対向角 $\theta_c = -75^\circ$ の場合の燃焼容器中心断面上におけるフランジ周りの速度ベクトル分布を示す。図から旋回流は上流側のフランジにあたり容器中心に向かう流れと容器壁面に沿う流れに分流されている。図 9 におけるフランジ対向角 $\theta_c = 90^\circ$ の結果との比較から、フランジ対向角 $\theta_c = -75^\circ$ においては、フランジ間の流れは内側の弱い流れを巻き込み容器壁面に向かう流れが形成されており、噴流主流の運動量の影響を直接的には受けていないことがわかる。また、フランジ間領域の主流は半径正方向に向かっており、 $\theta_c = 90^\circ$ の場合とは逆向きであることがわかる。すなわち、対向角の変化によりフランジ間の流れ方向の制御が可能であることがわかる。図 13 に $\theta_c = 45^\circ$ とした場合の燃焼容器中心断面上におけるフランジ周りの速度ベクトル分布を示す。図から旋回流は上流側フランジに衝突し、その後、容器中心に向かう流れと容器壁面に沿う流れに分流されている。下流側フランジにおいても同様の分流が見られ、フランジ間には下流側フランジの上流側に分流された流れが容器中心方向に向く強い流れを作り出している。またフランジ対向角 $\theta_c = 45^\circ$ という角度は最も下流側フランジに噴流の直接的影響を受ける角度である。そのため乱れが最も高い値となっている。このことから旋回流に対するフランジ対向角はフランジ間領域の流れ現象に大きく影響することがわかる。

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 PDA 測定および数値解析を用いて検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) フランジ付き電極の旋回流に対する流速抑制効果を確認した。またフランジ間領域の流れ場は、フランジ対向角に大きく影響される。
- (2) 電極間隙部における平均流速、乱れ強さは、フランジ対向角 -75° の場合に小さく、 45° において極大値を示す。

5. 参考文献

- 1) 氏家, 野村, 江間, 鳥居, フランジ付き点火プラグの基本特性と天然ガスエンジンへの応用, 機論(B 編) 70 巻 694 号 No.03-0280, pp218-223 (2004)
- 2) 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, 機講論 III No.96-1, pp.559-560 (1996)

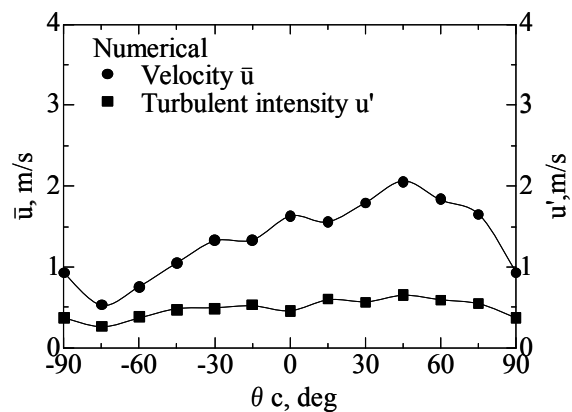


Fig.11 Effect of cross flange angles on velocity and turbulent intensity at the clearance center

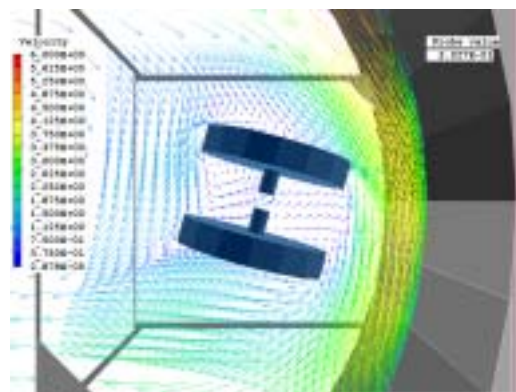


Fig.12 Vector map around flanged electrode (on x-z plan, $\theta_s = 90^\circ$, $\theta_c = -75^\circ$)

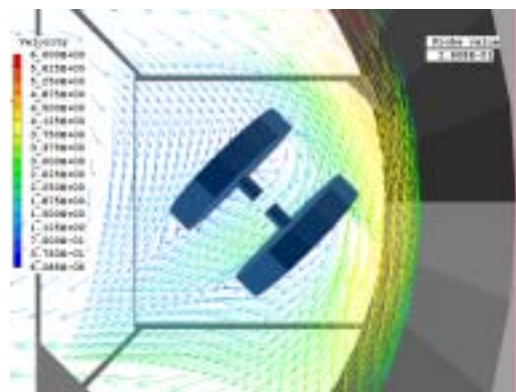


Fig.13 Vector map around flanged electrode (on x-z plan, $\theta_s = 90^\circ$, $\theta_c = 45^\circ$)