

水素内燃機関の高効率化に向けた 水素噴流の噴孔近傍の混合制御に関する研究

Study on mixing control near nozzle of hydrogen jet
for higher efficiency of hydrogen internal combustion engines

永岡 真 (Nagaoka Makoto)

内燃機関における水素燃料噴射時の噴流および混合制御の検討をしていくための第一ステップとして、基本的なガス噴流特性についてオープン CFD ソフト OpenFOAM による数値シミュレーションの検証と解析を実施した。ここでは、ガス燃料噴射弁から水素の他にもメタン、窒素、ヘリウムガスを大気中に噴射した時の不足膨張噴流の検証のために、ノズルの試作とシュリーレン法による可視化実験装置も構築し、数値シミュレーション結果と比較した。雰囲気圧に対する噴射圧の比であるノズル圧力比 (NPR) は 5 と 7.5 とし、ノズル近傍の噴流特性と下流の混合気形成について解析した。

数値シミュレーションについては、OpenFOAM の rhoCentralReactingFoam を用いて RANS モデルによる計算を実行した。非粘性流束差スキームには Kurganov-Noelle-Petrova (KNP) スキームを使用し、界面内挿時のリミッタは、速度には superbee、密度と温度には Gamma スキーム、質量分率と乱流量には limited linear を使用した。乱流モデルには、 $k-\omega$ SST、RNG $k-\epsilon$ 、標準 $k-\epsilon$ モデルを比較した。ノズルタイプは単孔ストレートノズルで、噴孔径 $D=1.47\text{mm}$ 、ニードルリフトは 0.5mm とした。計算は軸対称を仮定し、計算格子は全体で 103570 セル、ノズル出口付近の最小格子幅は 0.021mm とした。これらの方法による解析から得られた結果を以下にまとめる。

(1) 乱流モデルの比較では、 $k-\omega$ SST モデルが優れていることは既に他の文献でも報告されており、本研究の結果もそれを裏付けるものとなった。噴流境界層の発達過程はモデル間で大きく異なり、RNG モデルではこの領域が狭く、 $k-\omega$ SST モデルと標準 $k-\epsilon$ モデルではジェット全体の広がり角が実験と比較的よく一致した。

(2) 実際のガス燃料噴射弁と同様に噴孔上流にサック室を設けると、噴孔入口で流れはチョークし、噴孔内の流れは超音速となる。また、噴孔入口から下流において膨張波や衝撃波が発生する。これらはノズル形状に大きく依存するため、噴射弁の噴流解析においては実際のノズル形状と境界条件を与えることが必要である。

(3) 実験可視化画像との比較から、数値シミュレーションでは図 1 に示すように、全てのガス種、NPR において、ノズル近傍の膨張不足噴流の特性をよく捉えられていることがわかった。また、マッハディスクの高さは Velikorodny らの理論式とよく一致したが、可視化画像とは若干の違いがあった。これはノズル出口形状の違いによるものと考えられ、今後の検討課題である。

(4) 噴流発達後の中心軸上のガス濃度分布には自己相似性があることを確認し、NPR

の 1/4 乗のスケーリングにより NPR によらず濃度分布は一致することを確認した。

(5) 噴流先端到達距離に対する新たなスケーリング則を導入し、検証した。すべてのガス種と NPR に対する以下の無次元化された先端到達距離は、図 2 に示すように一致する。

$$z_{tip}^* = \frac{z_{tip}}{D} / \left[NPR \cdot \gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \right]^{0.25}$$

ここで、 z_{tip} は噴孔出口からの噴流先端到達距離、 D は噴孔径、 γ は比熱比である。また、先端到達距離は噴射開始からの時間の平方根には比例しないが、ノズル出口流量が安定する $t=0.036\text{ms}$ 付近まではほぼ比例し、それ以降は時間の平方根に比例する。すなわち、噴流先端到達距離は以下の一般式で表すことができる。

$$z_{tip}^* = \begin{cases} C_1 t & (t < \frac{L_c}{C_1}) \\ C_2 \sqrt{t - L_c/C_1} + L_c & (t \geq \frac{L_c}{C_1}) \end{cases}$$

曲線を近似した式の 2 本の破線の交点、すなわち図に示す式の定数 L_c に相当する噴射先端距離は、 $NPR=5$ では $z_{tip}/D=7 \sim 7.2$ 、 $NPR=7.5$ では $z_{tip}/D=7.7 \sim 8$ に相当する。

今回の検討にて、OpenFOAM によるガス噴流の解析可能であることが検証された。今後はこれをツールとして、噴孔近傍の噴流制御に向けた検討を進める。具体的には、本結果で示唆されたように、噴孔近傍の超音速領域内では燃料の混合が進まないため、この領域を短縮する手段として、噴孔形状をストレートノズル以外の形状にすることが考えられ、予備検討では特定の NPR で効果があることが見出されており、今後詳細に検討する予定である。

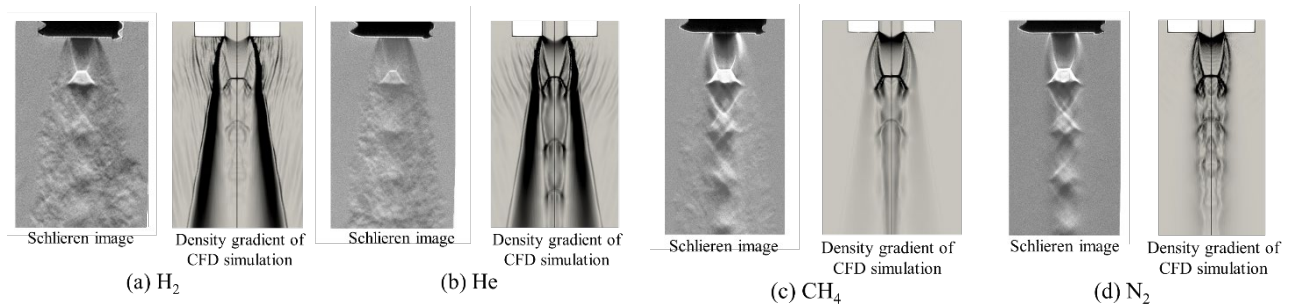


Fig.1 Comparison between Schlieren image and density gradient of the current CFD simulation with NPR=7.5.

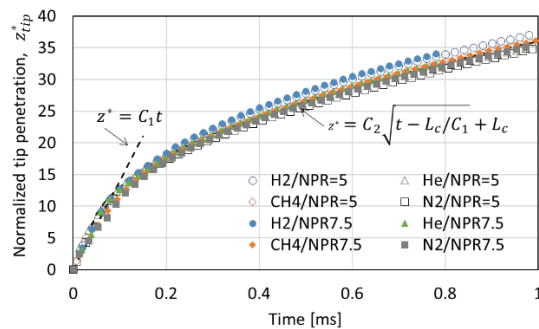


Fig.2 Scaled jet tip penetration versus time.