

噴流による水素エンジンの混合気均質性向上に関する研究*

Study on Improvement of Mixture Homogeneity of Hydrogen Engine by Jet

佐久間 岳志
Takeshi SAKUMA

青柳 賢司
Kenji AOYAGI

山口 顕央
Akichika YAMAGUCHI

武内 あづ彩
Azusa TAKEUCHI

曾我部 康浩
Yasuhiro SOGABE

丹野 史郎
Shiro TANNO

Hydrogen engines are attracting attention as one of the carbon-neutral power sources. Direct injection in the cylinder after closing the intake valve is effective from the viewpoint of higher output, but NOx becomes a problem due to the short mixing time and inhomogeneity. This paper analyzes the air-mixture formation mechanism and proposes design guidelines for jets that achieve a homogeneous mixture. The following insights were obtained through this research. In a tumble flow environment, coordinating the jet with the flow and utilizing wall impingement to actively enhance longitudinal vortices improves fuel transport and turbulent diffusion, enabling homogeneous mixture formation even within the short mixing time. In a swirl flow environment, injecting fuel from the cylinder head toward the piston and actively rolling up the jet on the piston wall to form longitudinal vortices helps transport fuel along the piston sliding direction and compensates for turbulent diffusion, allowing homogeneous mixture formation. By increasing the scale of longitudinal vortices formed by high-penetration jets, turbulent energy can be enhanced while suppressing decay, improving diffusion effects at the end of compression. Additionally, reducing jet travel distance and preventing post-collision interference between jets helps suppress the required penetration force.

Keywords :

Heat engine, Hydrogen, Mixture formation, Direct injection, Emission gas, Numerical calculation

1. まえがき

カーボンニュートラル社会実現に向けて再生可能エネルギーを活用した動力源の開発が世界各国で進められている。水素エンジンは高出力運転が可能、燃料補給に要する時間が短い、既存エンジン技術を多く流用できる等の利点があり、電動化が比較的困難な大型商

用車への適応が検討されている⁽¹⁾⁽²⁾。

水素は体積当たりのエネルギー密度が低く⁽³⁾、低圧で非常に着火し易い特徴を持つ⁽⁴⁾。よって、高出力化には充填効率の向上と異常燃焼（バックファイア）抑制の観点で吸気バルブ閉弁タイミング（IVC）以降の筒内直接噴射が有効な手段の1つである⁽⁵⁾。一方、水素の噴射期間がIVC以降に限られる為、空気との混合時

間が十分に得られず燃焼時の混合気が不均質になり易い。点火時期まで不均質が解消されず局所的なリッチ領域が残ると水素は燃焼温度が高い為、高濃度のNOxが発生する。NOxは環境負荷やエミッション規制のみならず水素の着火を促進する性質がある⁽⁶⁾。更に、局所的な高温燃焼は冷却損失の増大や、熱境界層の薄さからくる局所的な熱ストレス増大等を誘発する為、均質な混合気形成が重要な開発課題の1つとなる。

本研究では、ガソリンやディーゼルの流動環境に於ける気体水素噴流の混合気形成を分析し、IVC後の短時間で十分な混合気の均質度を得る為の噴流コンセプトを検討した。

2. 気体混合の均質化要件

まず、燃料と空気の混合過程と均質化の要件を整理する。直噴エンジンでは噴流の貫徹力と流動の作用によって燃料が筒内の隅々まで輸送され、分子運動と乱流渦運動による拡散を経て均質な混合気が形成される。液滴噴霧と異なって水素は常温で気体であり、連続的な流れである為、噴流の中心部まで空気が導入され難い⁽⁷⁾。また、ガソリンやディーゼルでは高圧噴射の活用が検討されたが⁽⁸⁾、気体水素では体積当たりのエネルギー密度が小さく、タンクに充填された燃料を使い切って稼働時間を稼ぐ為に低圧噴射で混合気を均質化出来ることが望ましい。

よって、IVC後噴射の短時間で均質な混合気形成を実現するには、燃料の輸送と拡散（分子拡散と乱流拡散）の向上が混合気の均質化要件になると考えた。先行研究に依ると特に乱流拡散の寄与度が大きい⁽⁷⁾。

3. 流動が混合気形成に及ぼす影響

2章で述べた均質化要件に影響する因子としてエンジン流動と噴流の挙動が挙げられる。まず、エンジン流動が混合気形成に及ぼす影響を整理し、噴流で解決すべき課題を検討する。

3.1 タンブル流動環境

主にガソリンエンジンで採用されるタンブル流動環

境では、燃料は縦方向の渦流によって筒内の隅々まで輸送される。更に、圧縮端での渦崩壊に伴う乱流拡散を活用して均質な混合気形成を実現する。従来燃料の液体噴霧はタンブル流に沿って噴射し、タンブル流の阻害を防止することが多い⁽⁹⁾。

ここで、水素噴流でも同様の考え方で均質混合気形成が可能か3D-CFDで検証した。計算に使用したモデルと条件をTable 1に示す。計算は1800rpm、吸気圧290kPa（以下、圧力は絶対圧）、燃圧は3MPaとした。噴流は単噴孔でFig. 1に示す噴射方向に設定し、燃料流量は実測した噴射率を境界条件に与えた。NOx排出量に対する混合気形成の評価指標として、式1に示す筒内の燃料質量分率分布の統計量である均質度を用いた。単気筒エンジンで噴射時期を変化させ、混合気の均質性を変化させた際の圧縮端での均質度とNOx排出量の関係をFig. 2に示す。これより均質度とNOx排出量の相関が確認できた為、本指標をNOx評価指標として採用した。

Table 1 CFD Conditions

Solver	CONVERGE
Turbulence Model	RNE k-ε Model
Engine Speed [rpm]	1800
Boost Pressure [kPa]	290
Engine Displacement [cc]	1500
Lambda [-]	2.0
Stroke/Bore Ratio[-]	1.34
Compression Ratio [-]	14
Tumble Ratio [-]	1.3 @ 1800rpm
Injector Mounting Position	Side
Fuel Pressure [MPa]	3

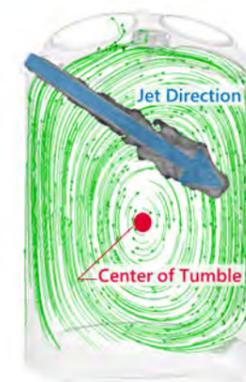


Fig. 1 Airflow and Jet Direction

*（公社）自動車技術会の方了承を得て、「2023年秋季大会学術講演会予稿集」文献番号 No. 20236045 より一部加筆して転載

$$\text{均質度} = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_{nh}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (x - \bar{x})^2}$$

σ : 燃料質量分率の標準偏差

σ_{nh} : 燃料が空気と完全分離した時の (式 1)

燃料質量分率の標準偏差

N : 総セル数

x : 各セルでの燃料質量割合

\bar{x} : 燃料質量割合の平均値

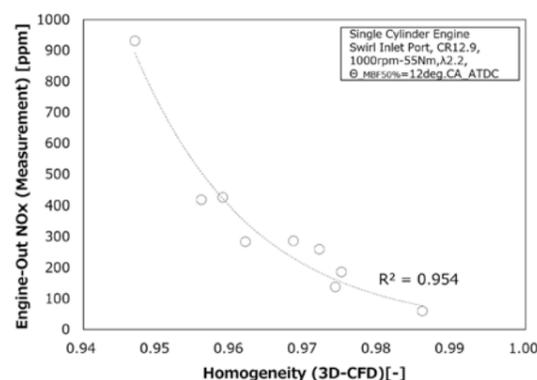


Fig. 2 Correlation between CFD Indicators and NOx Emissions

Fig. 3に筒内物理量の時間履歴を示す。(a) (b) (c) (d)の縦軸はそれぞれタンブル比、乱流エネルギー、乱流拡散係数、均質度を示す。まず、Fig. 3 (a)に示すタンブル比が噴射開始と同時に向上した。これより、噴流で縦渦が強化されたと考えられる。次に、Fig. 3 (b)に示す乱流エネルギーとFig. 3 (c)に示す乱流拡散係数が圧縮端で上昇した。これより、容積が狭くなってボア径スケール程度の縦渦が崩壊し、小さな渦運動、すなわち乱流エネルギーに変換されて乱流拡散効果が得られたと考えられる。その結果、Fig. 3 (d)に示す均質度が0.993まで上昇した。

Fig. 4に筒内の当量比分布を時間履歴で可視化した結果を示す。筒内に噴射された噴流がシリンダ壁面に沿って正タンブル方向に大きく周回している。また、圧縮端で混合気は均質である。従来の液体燃料ではシリンダ壁面に付着した燃料がエミッション悪化の要因となるが⁽⁶⁾、気体燃料の場合は壁面で付着しない為、

噴流の貫徹力や噴射方向を制御することで、より積極的な流動強化が可能であると考えられる。

以上のことから、タンブル流動環境では噴流で積極的に縦渦を強化することで燃料輸送と乱流拡散効果を高め、IVC後の短時間でも均質混合気形成が可能となることがわかった。

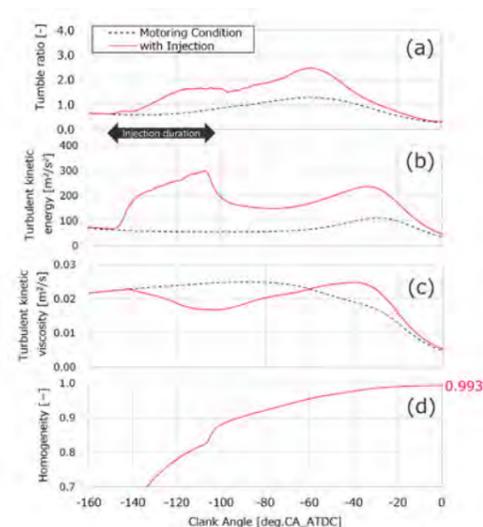


Fig. 3 Time History of In-Cylinder Physical Quantities

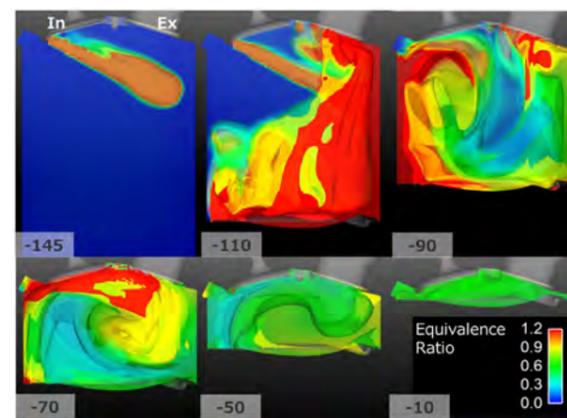


Fig. 4 Time History of Equivalence Ratio Distribution in Cylinder

3.2 スワール流動環境

主にディーゼルエンジンで採用されるスワール流動ではFig. 5のように燃料は筒内を旋回するスワール流に直交する方向に噴射することが多い。噴霧は自身の持つ貫徹力と流動の筒内周方向の移流作用により、空気利用率を高めている。

水素の混合過程に於いても、噴流のスワール流によ

る移流効果で後続の噴流周囲の濃度勾配を高めて拡散を促進する作用が期待できる。加えて、スワール流はライナやピストンキャビティに沿った横方向の流れで、圧縮端付近でも渦運動可能な径が変化しない。そのため、流動の減衰が小さく、長期に渡って移流効果が得られる。一方、渦崩壊がなく乱流拡散効果が得られない為、タンブルに対して均質混合気形成が困難であることが先行研究で指摘されている⁽⁷⁾。

以上のことから、スワール流動環境は商用車で多く採用され、水素エンジン化に際して既存技術流用の観点で優位だが、乱流拡散が不足する為に均質混合気形成が課題となる。

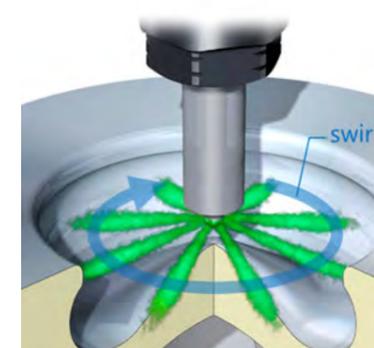


Fig. 5 Relationship between Airflow and Spray in Diesel Engines

4. スワール場における最適噴流コンセプトの検討

3章で検討した課題を解決する為、2章で述べた均質化要件に噴流が及ぼす影響を分析し、スワール流動環境で均質混合気形成を実現する噴流コンセプトを検討した。

4.1 噴流が気体混合に及ぼす影響

2章で示した均質化要件に対する噴流の影響を整理する。まず、噴射時の燃料噴出速度や燃料密度が変化させると貫徹力が変化し、噴射方向に対する燃料の輸送を制御できる。貫徹力を高めて壁面に衝突させると、衝突により燃料が筒内の広範囲に分散して濃度勾配が大きい領域が増加し、拡散が向上する。更に貫徹力を高めると衝突後に巻き上がった噴流が筒内に縦渦を形

成し、筒内の乱れを高められる。

次に、噴射方向を変化させることで3.1節での検討のように流動と協調させて流動を加速させたり、逆に不要な方向の流れに干渉させたりすることで燃料の輸送や拡散に影響を及ぼすことができる。

最後に、噴流の形状や噴孔数を変化させることで空気との接触面積が変化し、噴射直後から濃度勾配の大きい領域を増やして拡散を促進できる。

4.2 スワール流動環境での混合促進手法

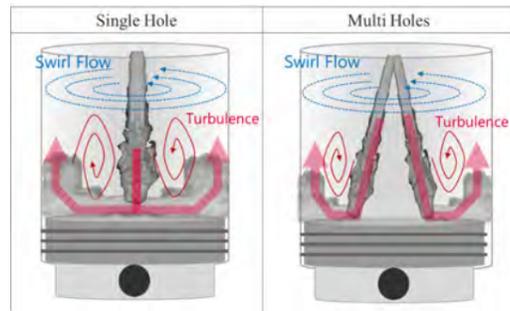
3.2節で述べたようにスワール流は圧縮端付近でも渦崩壊しない為、気体水素のような予混合燃焼でも長期間に渡って移流作用を受けて周方向の燃料輸送と拡散が向上する。一方でスワール流のみに頼った場合にはピストン摺動方向への燃料輸送が不足する。また、筒内中央部から燃料を噴射すると外周部への燃料輸送がスワール流に遮られて難しい。逆に外周部から燃料を噴射した場合も同様の理由で中央部への輸送が課題となる。更に、圧縮端で乱流拡散効果を得られない点が混合気の均質化を困難にしている。

以上のスワール流動特有の課題と、4.1節で整理した噴流の性質を踏まえて噴流でスワール流の欠点を補うコンセプトを検討する。検討したアプローチをTable 2に示す。まず、燃料輸送の観点でピストン摺動方向への輸送能力を補う為に噴射方向はヘッドからピストン摺動方向に設定した。また、筒内中央部から外周部への燃料輸送は積極的に噴流をピストン壁面に衝突させて外周部に分散することを考えた。

次に、乱流拡散を補う観点で壁面衝突後の噴流を大きく巻き上げて筒内にボア径半分程度のスケールの縦渦を形成することを考えた。ここで、燃料を外周部から噴射した場合、外周部はスワール流の速度が高い為に噴流が曲げられ易く、壁面までの移動距離が長くなって縦渦を形成しにくいことが考えられる。そこで、流速が低く噴流と流動が干渉しにくいヘッド中央部を燃料噴射の起点に選択した。点火プラグはグロー穴等の流用を想定した。これにより噴流の衝突後までスワール比も大きく残すことができ、衝突後に外周部へ分散して巻き上がった噴流が移流効果を受けて周方向にも拡散する利点が得られると考えた。

最後に、噴射開始から衝突までの期間でも拡散を促進する目的で多噴孔での同コンセプトも選択肢とした。多噴孔の噴射方向は噴流同士の干渉による縮流を避けられる噴流間隔を確保しつつ、衝突後の噴流が最も大きく巻き上がるピストン衝突位置を探索して設定した。

Table 2 Mixing Promotion Concept in Swirl Flow



5. エンジン筒内計算での検証と考察

4章で検討したコンセプトを検証する為、3D-CFDで比較・評価した。Table 3に計算に使用した計算条件を示す。

まず、Fig. 6に単孔噴流、Fig. 7に多孔噴流の噴射開始から圧縮端に至る過程での筒内の当量比分布を示す。ボア中心断面の当量比コンタ図に、当量比の等値面を重ね書きしている。どちらのコンセプトも筒内に噴射された水素噴流がピストン壁面に衝突して外周部に分散して巻き上がっている。圧縮端で混合気は均質度はそれぞれ0.982、0.988に達した。

Fig. 8に同条件に於ける筒内物理量の時間履歴を示す。(a)(b)(c)(d)の縦軸はそれぞれタンブル比(+), 乱流エネルギー, 乱流拡散係数, 均質度を示す。ここで、タンブル比(+)は時計回り成分のタンブル比を示す。噴流で形成する縦渦は筒内中心軸に関して対称であり、通常のタンブル比で評価すると相殺し合っその強さを評価できない為、本指標を採用した。Fig. 8(a)より、どちらのコンセプトもタンブル比(+)が上昇した。このことから、噴流で縦渦が形成できたと考えられる。Fig. 8(b)に示す乱流エネルギーとFig. 8(c)に示す乱流拡散係数が圧縮端で上昇した。このことから、縦渦が圧縮端で崩壊して渦運動が乱流エネルギーに変

換され、乱流拡散効果が得られたと考えられる。その結果、Fig. 8(d)に示す均質度が0.98以上に達した。

次に、噴孔数の違いを考察する。Fig. 8(a)に示すタンブル比(+)は、単孔の方が強い。Fig. 8(b)に示す乱流エネルギーは、単孔の方が高く、かつ緩やかに減衰している。Fig. 8(c)に示す乱流拡散係数は単孔の方がより早い時期から大きくなった。Fig. 6とFig. 7を比較すると、多孔の場合は噴流1本あたりの貫徹力が低下した。これは、噴流1本あたりの質量が低下した為である。更に、噴孔がピストンに衝突する際、筒内中心方向にも噴流が分岐している。分岐して更に貫徹力が失われることで-90deg.CA ATDCのタイミングを見ると多孔は単孔と比較して巻き上がった噴流の当量比が小さい。以上より、多孔は噴孔1本あたりの貫徹力低下と、ピストン衝突後の分岐によって更に貫徹力の一部を失い、形成する渦が弱まったことで乱流拡散効果が低下したと考えられる。この結果から、乱流拡散効果を得る観点では単孔の方が優れていると言える。

一方、Fig. 8(d)より多孔でも最終的な均質度は同等の値である。多孔は単孔と比較して-140deg.CA ATDC程度の均質度が大きい。これが、水素を噴射直後から分散したことでピストン衝突までの期間に空気の接触面積が増加した為だと考えられる。その結果、乱流拡散効果の低下分を相殺したと推測する。

Table 3 CFD Conditions

Solver	CONVERGE
Turbulence Model	RNE k-ε Model
Engine Speed [rpm]	1800
Boost Pressure [kPa]	290
Engine Displacement [cc]	2500
Lambda [-]	2.0
Stroke/Bore Ratio[-]	1.07
Compression Ratio [-]	14
Tumble Ratio [-]	1.4 @ 1800rpm
Injector Mounting Position	Center
Fuel Pressure [MPa]	3

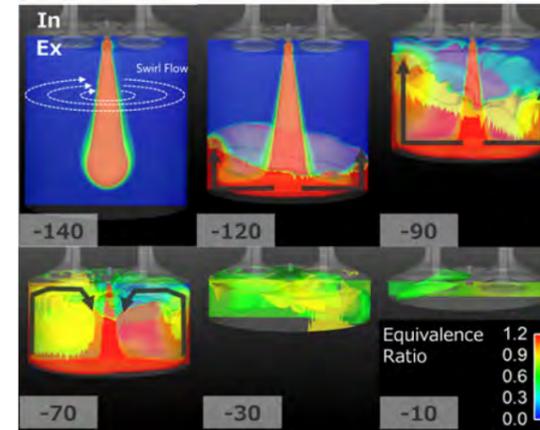


Fig. 6 Time History of Equivalence Ratio Distribution in Cylinder by Single Hole Injection

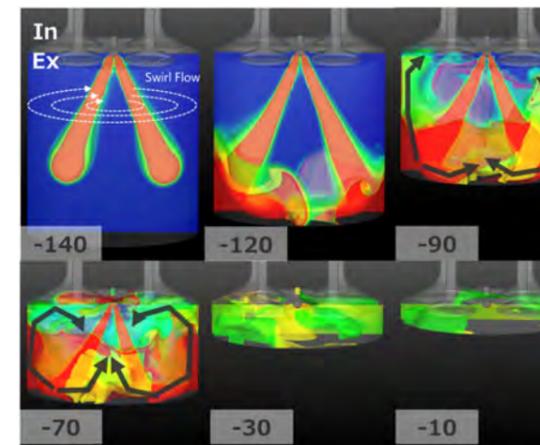


Fig. 7 Time History of Equivalence Ratio Distribution in Cylinder by Multi Hole Injection

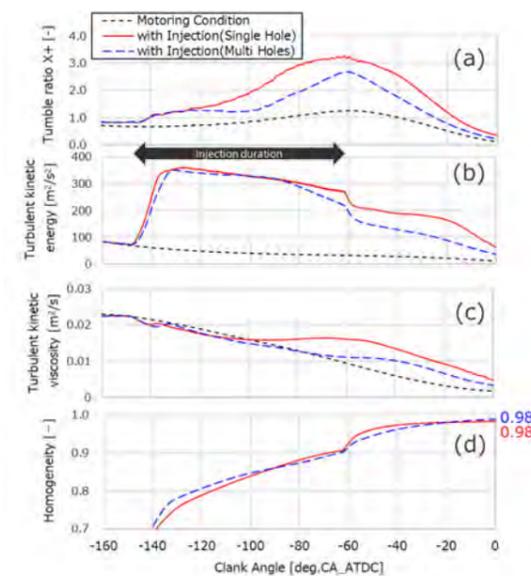


Fig. 8 Time History of In-Cylinder Physical Quantities

次に、両コンセプトの運転領域やエンジン諸元に対する環境ロバスト性を評価した。ここでは、幾何学的な影響が噴流の衝突拡散と縦渦形成に影響が大きいと考えてエンジンのS/B比を変化させた。排気量を固定したままS/B比を1.07から1.34に変更し、多孔噴流はピストン衝突時の位置関係が維持されるように噴射角度を調整した。その他はTable 3と同条件で計算した。

Fig. 9に圧縮端での均質度を示す。どちらのコンセプトもエンジンのS/B比が大きくなると均質度が低下した。これは、筒内に縦渦を形成する為に必要な移動距離が長くなった為である。単孔と多孔を比較すると、多孔の低下度合いが著しい。Fig. 10に多孔でS/B1.34に変更した際の当量比分布の時間履歴を示す。Fig. 7に示すS/B1.07の場合と比較するとピストン衝突後の巻き上がりが大きく低下し、ヘッドまで巻き上げて縦渦を形成できていない。先に述べた様に多孔は噴流1本あたりの貫徹力が低い。また、斜め噴射の為にピストン衝突までに移動距離が長く、スワール流の影響も受けやすい。よって、高S/B比化のように縦渦形成に必要な移動距離が長くなった場合にはより高い貫徹力が求められると考えられる。

以上のことから、多孔は運転条件やエンジン諸元の変化によって混合気形成が安定しない欠点があり、その解消の為には都度噴射角度の調整や貫徹力の強化が必要となることがわかった。一方、単孔は幾何学的な位置関係や流動の干渉を受けにくい経路でピストンに衝突する為、運転条件やエンジン諸元が変化しても混合気形成が比較的安定し、環境ロバスト性の観点で優位性があると考えられる。



Fig. 9 Time History of the Degree of Homogeneity in the Cylinder

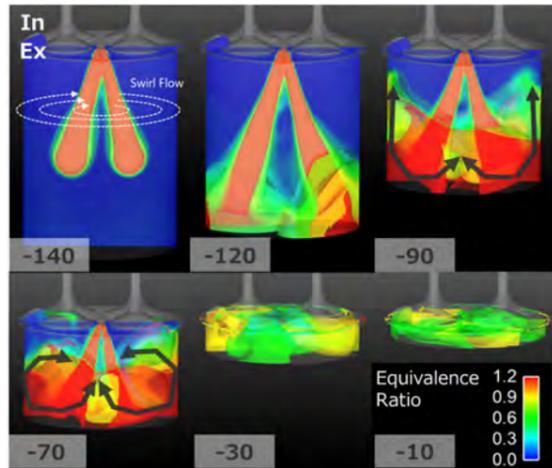


Fig. 10 Time History of Equivalence Ratio Distribution in Cylinder

6. 噴流指針構築

5章のコンセプトで得られる効果を向上する噴流指針を検討する。まず、5章の検討結果からピストン衝突までは流動の影響を避けつつ最短距離を選択し、衝突後は分散した噴流同士の干渉を避けることが有効だと言える。次に、Fig. 8 (b) に示した単孔と多孔の乱流エネルギーの推移から、より大きなスケールの縦渦を形成した単孔の方がより強い乱流エネルギーを得られ、かつ減衰挙動が緩やかな点に着目した。式2と式3に乱流エネルギーの輸送方程式と乱れの散逸項の関係を示す⁽¹⁰⁾。この関係から、噴流の貫徹力を更に高めてピストン衝突後に噴流が形成する縦渦のスケールを拡大することで、乱流エネルギーを大きく生成し、かつ散逸を抑制する事を考えた。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k u_j}{\partial x_j} =$$

$$P_k - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} (J_j^{T^k} + J_j^{P^k} + J_j^{V^k})$$

k : 乱流エネルギー

u : 平均流速

P_k : 乱流生成項

ϵ : 粘性散逸項

$J_j^{T^k}$: 乱流拡散項

$J_j^{P^k}$: 圧力拡散項

$J_j^{V^k}$: 粘性拡散項

(式2)

$$\epsilon \propto \frac{u^3}{L}$$

ϵ : 粘性散逸項

u : 平均流速

L : 渦スケール

(式3)

貫徹力を高めるには噴流の運動量を大きくする必要があり、それには噴射速度が質量流量の向上が必要であり、質量流量の向上には密度あるいは流路断面積の向上が必要である。まず、噴射速度はIVC直後の雰囲気圧を想定すると水素の臨界圧力比は約0.53であることから3MPaの低圧噴射でも音速に達しており、インジェクタ内の流路で更に超音速まで加速することは難しい。よって、噴射率を大きくして質量流量を向上することを検討した。これはシート部の流路断面積を拡大することに相当する。

噴流の噴射率を変化させて5章と同様の評価を行った。噴射率を5章での計算と比較して1.3倍、1.5倍に設定し、その他の条件はTable 3と同様の条件で計算した。

Fig. 11に噴射率を1.5倍にした際の当量比分布の推移を示す。Fig. 6と比較すると噴流の貫徹力が高まり、より早く大きく巻き上がってスケールの大きな縦渦を形成している様子が確認できる。Fig. 12に同条件に於ける筒内物理量の時間履歴を示す。(a) (b) (c) (d)の縦軸はそれぞれ渦スケール、乱流エネルギー、乱流拡散係数、均質度を示す。Fig. 12 (a)から、形成した縦渦の渦スケールが上昇した。Fig. 12 (b)とFig. 12 (c)から、乱流エネルギーと乱流拡散係数が大きく上昇した。このことから、圧縮端の乱流拡散効果が高まったことがわかる。Fig. 12 (d)に示す圧縮端での均質度も噴射率に伴って上昇した。

以上のことから、高貫徹噴流で形成する縦渦のスケールを拡大することでコンセプトの効果を高められることが分かった。一方で、高噴射率は微小噴射量の精度悪化等の欠点も伴う。よって、本章冒頭で述べた様に噴流の移動距離を低減し、かつ衝突後の噴流同士の干渉を防ぐ等の工夫によって必要な貫徹力を抑制することが重要になると考える。

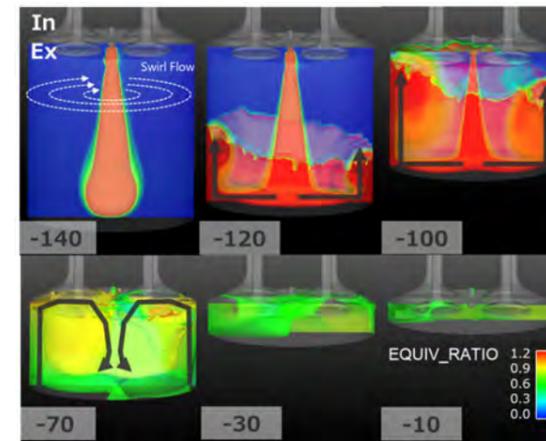


Fig. 11 Time History of Equivalence Ratio Distribution in Cylinder

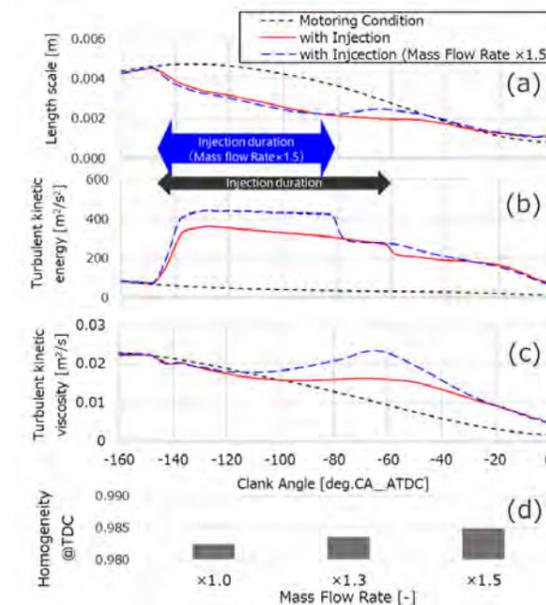


Fig. 12 Time History of In-Cylinder Physical Quantities

7. むすび

水素エンジンの高出力運転で課題となるIVC後のDI噴射での均質混合気形成について、タンブル・スワール流動環境での水素噴流の混合気形成を分析し、均質混合気を実現する噴流指針を検討した結果、以下の知見を得た。

1. タンブル流動環境では噴流と流動と協調させ、壁面衝突を活用しながら積極的に縦渦を強化することで燃料の輸送と乱流拡散効果を高められ、IVC後噴射の限られた時間でも均質混合気

形成が可能となる。

2. スワール流動環境ではヘッドからピストン方向に燃料を噴射し、積極的に噴流をピストン壁面で巻き上げて縦渦を形成することで、ピストン摺動方向への燃料輸送と乱流拡散効果を噴流で補って均質混合気形成が可能となる。
3. 高貫徹噴流で形成する縦渦のスケールを大きくすることで乱流エネルギーを強化しつつ減衰を抑制でき、圧縮端の乱流拡散効果を高められる。また、噴流の移動距離を低減し、かつ衝突後の噴流同士の干渉を防ぐ等の工夫によって必要な貫徹力を抑制できる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、産業技術総合研究所に水素エンジン評価の技術協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1) L. Walter, et al. : The H2 Combustion Engine—The Forerunner of a Zero Emissions Future, 42nd Internationa ; Vienna Motor Symposium, 2021-06 (2021).
- (2) R. Dreisbach, et al. : The Heavy-Duty Hydrogen Engine and its Realization until 2025, 42nd Internationa ; Vienna Motor Symposium, 2021-04 (2021).
- (3) 山根公高：レシプロ方式水素内燃機関の技術現状と今後、水素エネルギーシステム Vol. 31, No. 1, (2006).
- (4) 越光男：水素安全の基礎 水素の燃焼・爆発化学反応機構、水素エネルギーシステム Vol. 36, No. 3, (2011).
- (5) 松原直義ら、水素エンジンにおける異常燃焼の発生メカニズムの解析、自動車技術会 2022 年秋季講演会予稿集、講演番号 028 (2022).
- (6) Olivier Mathieu, et al. : Effects of NO2 addition on hydrogen ignition behind reflected shock waves, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 34, No. 1 (2013).
- (7) 丹野史朗ら：噴流 MBD 活用による水素直噴エンジン混合気形成の改善、自動車技術会 2023 年春季大会学術講演会予稿集、講演番号 387 (2023).
- (8) 青柳賢司ら：ノッキング抑制のための超高燃圧リタード噴射による混合気形成技術、第 30 回内燃機関シンポジウム、講演番号 20194718 (2019).
- (9) 小池誠：直噴ガソリンエンジンにおける混合気形成と燃焼、豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol. 33, No. 4, (1998).
- (10) H. Tennekes : 乱流入門, 東海大学出版会, p.75-88 (1998).

著者

佐久間 岳志

さくま たけし

噴射機器技術部
水素内燃システム開発に従事
(原文執筆時)

青柳 賢司

あおやぎ けんじ

噴射機器技術部
水素内燃システム開発に従事
(原文執筆時)



山口 顕央

やまぐち あきちか

噴射機器技術部
水素内燃システム開発に従事



武内 あづ彩

たけうち あづさ

噴射機器技術部
水素内燃システム開発に従事



曽我部 康弘

そがべ やすひろ

噴射機器技術部
水素インジェクタ設計開発に従事



丹野 史郎

たんの しろう

トヨタ自動車株式会社