高温高圧場における CNG 噴流の可視化と解析

環境エネルギー部 ※安 乗一 成澤 和幸 佐藤 由雄

1. はじめに

近年,エネルギー問題や環境問題が大きく取り上げ られており,将来,石油燃料の枯渇化に対して有効な 石油代替燃料として天然ガスが有望視されている。さ らに自動車燃料として用いた場合, 粒子状物質の排出 が極めて少なく、二酸化炭素の排出も少ないことか ら, クリーンエネルギーとして高いポテンシャルを持 っている。現在実用化され普及促進が図られている天 然ガスエンジンは燃料と空気の予混合気を気筒に供 給するものが主流で、ディーゼル並みの熱効率の達成 は困難である。最近, 高圧縮比のもとで天然ガスを筒 内に直接噴射し、点火プラグやグロープラグによる点 火方式で,高出力時にディーゼル機関と同等の熱効率 が得られている。しかし,高負荷の場合,筒内最高圧 力が高く,NOxの排出量が多くなり,低負荷において は燃焼効率が低く,未燃炭化水素の排出と共に,熱効 率が低下するなどの問題点が指摘されている。(1)~(3)

この要因として筒内噴射された燃料の周辺空気と の混合特性が考えられるが,詳細な観察が行われた例 が少ない。そこで、本研究では、実機を模した高温高 圧場の定容容器内に直接噴射した圧縮天然ガス(CNG) の噴流を対象に、レーザーシュリーレン法と高速度カ メラを用いて撮影を行い、噴流特性と周囲空気との混 合特性を調べた。

2. 実験装置および方法

図1にレーザーシュリーレン法による可視化装置の 概略を示す。可視化用の定容容器,燃料供給系,シュ リーレン装置,高速度カメラおよび画像処理装置によ り構成される。可視化用の定容容器の両面には直径× 厚み(120mm×50mm)の石英ガラスを装着し,天然ガス インジェクタからの噴流を観察できるようにした。観 測部における雰囲気圧力は外部の窒素ボンベから供 給し,減圧レギュレータで調節した。また,高温 (1200℃)に耐えられるカンタル線(φ1.4)を円筒形の セラミック内に埋め込み,高温用のヒータを製作し, これを用いて雰囲気温度を調節した。ヒータの制御は サイリスタ式の単相動力調整器および温度調整器,電 流計を用い,試験温度に設定した。

図2に高温用のセラミックヒータの概略を示す。観 測窓の石英ガラス部分とインジェクタの周りには溝 を切って冷却できるようにした。インジェクタは最高 20MPaまでの供給ガス圧力に対して動作可能な電磁弁 式であり、パルス制御装置により任意の噴射時期と噴 射期間の設定が可能である。燃料供給には、13A天然 ガス(CH₄88%, C₂H₄6%, C₃H₈4%, C₄H₁₀2%)を用い、外部 の高圧ボンベから高圧レギュレータを用いて減圧し、



図1 可視化実験装置の概略



図2 セラミックヒータの概略図

実験条件 表1 Injection pressure MPa 10, 15 Nozzle diameter mm 1.0 Number of hole 1 Injection duration ms 2.0 Ambient pressure MPa 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 300, 373, 473, Ambient temperature K 573, 673, 773



図3 雰囲気圧力変化による CNG 噴流の シュリーレン画像



図4 雰囲気圧力変化による噴流輪郭の軌跡

噴射ノズルに供給した。CNG 噴流の撮影に当たっては, 密度勾配を可視化できる Ar+レーザ(Spectra-Physics 社)によるシュリーレン法を適用した。撮影に使用し た高速度カメラ (PhantomV5.0, Vision Research 社製) は、シャッタスピードが 10 µ s,撮影速度が 5000bps (画像度 256x512) である。その際、インジェクタ制御 信号と高速度カメラの信号を同期させて撮影時期を 調節した。撮影した画像は、画像解析ソフト (DIPP-MACRO, DITECT 社) に入力し、画像処理を行った。

表1に実験条件を示す。可視化実験に用いた噴射ノ ズル径はφ1.0mmの単噴孔であり、噴射期間は2msと 一定にした。これは実機において低負荷から中負荷に 相当する。雰囲気圧力は1MPaから4MPaとし、噴射圧 力を10MPa,15MPa,雰囲気温度を常温から500℃まで 100℃づつ変化させて撮影を行った。

3.実験結果および考察

3.1 雰囲気圧力の影響

図3はCNG 噴流の時間変化に対する雰囲気圧力の影響を示す。また、図4には時間変化による噴流輪郭の 軌跡を示す。この画像は噴射期間 2ms,噴射圧力 15MPa の条件とし、雰囲気圧力を 1MPa から 4MPa まで変化し た場合の結果である。



図5 雰囲気圧力変化による噴流の到達距離と体積



図3と図4から,雰囲気圧力1MPaの場合は,時間変 化に伴って噴流の広がり,到達距離ともに大きくなる 傾向が見られる。一方,雰囲気圧力が高くなるにつれ て噴流の到達距離が抑えられる。雰囲気圧力4MPaで は噴射後期の先端部において,噴流形状が変形する傾 向が見られる。ガス燃料は液体燃料と異なって蒸発過 程がないことから,雰囲気圧力の上昇に伴い雰囲気密 度が増大することにより雰囲気ガスの抵抗を受けや すくなると考えられる。

図5にはCNG 噴流の到達距離と体積を示す。噴流体 積の計算は高速度カメラにより撮影した画像をノイ ズ除去,二値化処理した後,図4に示した二次元噴流 の輪郭を求め,その輪郭からY軸の1ピッセルことに スライスした円盤の体積を求めて,すべてのピッセル を足し合わせた。図5から,雰囲気圧力の上昇に伴っ て雰囲気ガスの影響を受け,噴流の到達距離,体積と もに大幅に減少することが認められる。雰囲気圧力 4MPa 以上の高負荷条件ではより噴射圧力を高くする 必要があると思われる。







図8 雰囲気温度変化による噴流の到達距離と体積

3.2 雰囲気温度の影響

図6は噴射圧力15MPaの場合,CNG 噴流の時間変化 に対する雰囲気温度の影響を示す。その時間変化によ る噴流輪郭の軌跡を図7に示す。図3と図4に示すよ うに,CNG 噴流の形状に対する雰囲気圧力の影響が大 きかったので,ここでは,雰囲気圧力を2MPaと一定 にし,噴射圧力15MPaで雰囲気温度の影響を調べた結 果を示す。時間変化による噴流の画像と軌跡から見る と,雰囲気温度の上昇に伴う到達距離の変化はあまり



図9 噴射圧力 15MPa と 10MPa の場合, CNG 噴流のシュリーレン画像比較



図10 噴射圧力 15MPa と 10MPa の場合, 噴流輪郭 の軌跡比較

見られなく、十分なペネトレーションを維持できる。 しかしながら、噴流の画像から、高温側に移るほど噴 射後期の噴流先端部において噴流の画像が薄くなる 傾向が見られる。この傾向に関しては、以下のような ことが考えられる。一つ目は、雰囲気圧力 2MPa の条 件で、雰囲気圧力を調節したため、雰囲気温度 500℃ の場合、密度が半減して雰囲気と噴流の密度差が小さ くなり、シュリーレン画像に影響を及ぼしたと思われ る。二つ目は、雰囲気密度が低下することにより、噴 射後期の噴流先端部において運動量が低下した CNG燃 料ガスが高温の雰囲気ガスにより加熱され,拡散が進 んだため生じた現象ではないかと思われる。これは, 今後の課題として,詳細に調べる必要があると考えら れる。図8に示した噴流の到達距離と体積結果から見 ても,雰囲気温度による影響はあまり大きく現れない ことが確認できた。

3.3 噴射圧力の影響

図9は噴射圧力15MPaと10MPaの場合,時間変化に 対する噴流画像を比較した結果を示す。図 10 には時 間変化による噴流輪郭の軌跡を比較した結果を示す。 噴射圧力 10MPa 場合, CNG 噴流の画像から分かるよう に、雰囲気温度が高くなるにつれて噴流の到達距離が 少々短くなるものの,大きな変化は現れない。 噴射圧 力 15MPa, 10MPa の噴流画像と軌跡を比べて見ると, 雰囲気変化に対して同様の傾向が見られる。また,図 11には噴射圧力 15MPa と 10MPa の場合,時間変化に対 する噴流の到達距離と体積を比較した結果を示す。こ の図から,噴射圧力が高いほど,噴流の到達距離およ び体積ともに若干増加する傾向が見られる。これは, 噴射圧力の増加により, 噴流の速度が増大して導入さ れる燃料量が多くなるためであるが,噴射圧力15MPa, 10MPaの噴射量が1パルス当たり46mg, 41mgとなり, その差があまり大きくないことから噴流の形状には 大きな変化が見られないものと思われる。しかしなが ら, 噴射圧力が増加するほど高い運動量の投入になる ため、CNG 噴流と雰囲気ガスとの混合気形成が進み、 より安定した燃焼が得られるものと期待される。



図11 噴射圧力 15MPa と 10MPa の場合, CNG 噴流 の到達距離と体積比較

4. まとめ

実機を模した定容容器内の高温高圧場に直接噴射 した圧縮天然ガス (CNG)の噴流を対象に,Ar+レーザ ーによるシュリーレン法と高速度カメラを用いて,写 真撮影とその解析を行った結果,以下のような知見が 得られた。

(1) 高温用のセラミックヒータを製作し,高温高圧 場でのシュリーレン撮影を可能とした。

(2) 雰囲気圧力の増加により抵抗力が増大し,噴流 の到達距離および体積ともに大きく減少し,雰囲気圧 力が 4MPa 以上の高負荷条件では,さらに噴射圧力を 高くする必要がある。

(3) 噴流の到達距離および形状に及ぼす雰囲気温度の影響は雰囲気圧力の影響に比べてより少ない。

(4) 噴射圧力 15MPa と 10MPa の場合で比較すると, 噴流の形状に対する影響はあまり大きくないが,噴射 圧力の高いほどより混合気形成が進む。

参考文献

(1) Kichiro, K., Kohei, I., Michihiko, M., Katsuji, O., et al., Development of Engine for Natural Gas Vehicle, SAE Paper 1999-01-0574
(2) 石山,塩路,田中,奥村,グロープラグ着火天 然ガス直噴機関の性能および排気特性の改善,自動車 技術会講演前刷集 114-01, p5-10, 2001.10
(3) 後藤雄一・佐藤由雄,成澤和幸,筒内直接噴射 式天然ガス機関の燃焼改善と排気特性に関する研究, 第 1 回交通安全環境研究所研究発表会講演概要, No.11, p197-202