

特集 CNG燃料の燃焼効率向上に向けた混合気形成要件の検討*

Improvement of CNG-Air Mixture Formation for High Combustion Efficiency

竹村 優一 和田 実 溝渕 剛史 河野 正顕
 Yuichi TAKEMURA Minoru WADA Takeshi MIZOBUCHI Masaaki KONO

CNG (Compressed Natural Gas) has been attracting increasing attention in the automotive industry as a petroleum alternative fuel because of its low CO₂ and toxic emissions. However, when CNG is used in current vehicle engines, it causes a critical problem of a short cruising distance due to the low thermal efficiency of the CNG engine. This paper presents our research to improve the thermal efficiency of a CNG engine by homogenizing the mixture formation of CNG and air. The data of our initial engine test results and CFD (Computational Fluid Dynamics) simulations have shown that the turbulence in the cylinder was insufficient to mix CNG and air homogeneously. From analysis of this data, we have verified that technology mixing CNG and air in the intake port was a key element to realize homogeneous mixture formation in the cylinder and improve the thermal efficiency of CNG engines. Finally, we found that the thermal efficiency was improved by spreading the surface area of the diffused volume of the CNG injection jet.

Key words : heat engine, natural gas, mixture formation, port injection

1. 序論

石油代替燃料として注目されているCNGは、ガソリン燃料に比べCO₂およびエミッション排出量が少ないという長所がある一方、エネルギー密度が低いため、航続距離が短いことが大きな課題である。この課題払拭の有効な手段の一つとして、熱効率改善が挙げられる。

CNGエンジンの熱効率向上には、予混合圧縮自着火燃焼や希薄燃焼など様々な取り組みが行われている^{1) 2)}が、現在普及が進んでいるCNGエンジンは、吸気ポート噴射による予混合火花点火機関が主流であり、三元触媒を利用するため理論空燃比に制御されている。その熱効率は、ガソリンエンジン同様、燃焼室内の混合気形成（混合気の均質性、乱流強度）の影響を受ける。そこで本研究では、吸気ポート噴射のCNGエンジンを対象とし、熱効率向上に必要な混合気形成要件を、実機評価およびCFDを活用して明確にすると共に、左記要件の実現に向けた吸気ポート内への燃料供給方法とその熱効率向上効果について確認した。

2. 高熱効率化に向けた混合気形成要件の検討

2.1 CNGの燃焼特性評価

CNGはガソリンに比べ、その組成上比熱比が高く高熱効率化が期待できる一方、燃焼速度が低い³⁾ため等容度低下による効率悪化が懸念される。そこで、こ

れら燃料の燃焼特性の違いが熱効率に与える影響を確認するため、両燃料での混合気濃度に対する熱効率、主燃焼期間（燃焼割合10%から90%までのクランク期間）を比較した。評価用エンジンは、Table 1およびFig. 1に示すガソリン用ポート噴射エンジンを流用し、既設のガソリン用インジェクタ上流にCNG用インジェクタを設置するとともに、均質な混合気を形成可能とするため、十分な混合時間が確保できるスロットル上流にも同インジェクタを設置した。なおCNG用インジェクタは、市販されている単孔ノズル仕様を用いた。

評価条件は、回転数1600rpm、トルク55Nm一定とし、本節では、均質混合気における混合気濃度の影響をガソリンとCNGで比較するため、スロットル上流に設置したインジェクタから燃料を供給した。

Table 1 Specifications of test engine

Number of cylinders	4
Displacement [cm ³]	1798
Bore × Stroke [mm]	80.5 × 88.3
Compression ratio	10.0
Tumble rate	0.5

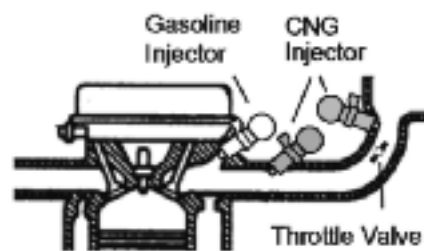


Fig. 1 Schematic of test engine system

* (社)自動車技術会の了解を得て「2013年秋季大会学術講演会前刷集」No.116-13 より一部加筆して転載

Fig. 2に評価結果を示す。CNGはガソリンに対し、理論空燃比付近での熱効率は高いが、理論空燃比から乖離するに従って差が縮まっている。これはFig. 2右に示したように、理論空燃比から乖離するほど急激に燃焼速度が低下するCNGの燃焼特性に起因していると考えられる。この結果は、燃焼室内に完全に均質なCNGの理論混合気を形成できればガソリン以上の熱効率が期待できるが、不均質領域が発生した場合は、熱効率が大きく低下することを意味する。つまり、CNGは混合気の均質性に対する熱効率への影響がガソリンよりも大きく、混合気の均質性向上が高熱効率化実現の主要件であると考えられる。

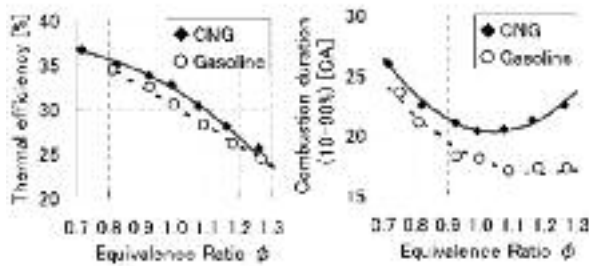


Fig. 2 Effect of fuel-air equivalence ratio

2.2 吸気ポート噴射条件下でのエンジン性能比較

次に、一般的なCNG車と同様、ポート噴射条件下での熱効率および排気成分を比較した。その結果をFig. 3に示す。評価条件は前項評価と同じとし、理論空燃比であるA/F=16.8で運転した。また、噴射圧力はガソリン=0.3MPa, CNG= 0.5MPaとした。均質性を確保した場合、理論空燃比におけるCNGの熱効率はガソリンを上回ることを前節で述べたが、本評価ではほぼ同等となった。排気成分を比較すると、THCはガソリンより低いものの、O₂排出量は多く、燃焼で消費されるはずのO₂が不完全燃焼により消費しきれず排出されていると考えられる。COも、燃料中の炭素比率の差異から理論的にはガソリンに対し約21%の低減代があるが、結果は14%の差にとどまった。

前項の燃焼特性をふまえ上記結果を考察すると、CNGはガソリンに対し、吸気ポート噴射条件下では混合気が不均質な状態になっており、燃焼効率が悪化していると考えられる。そこで、CNGの均質性向上に向けた燃料供給方法について次章で検討する。

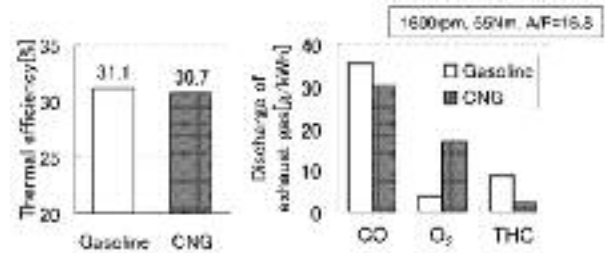


Fig. 3 Performance comparison between CNG and gasoline (port injection)

3. CNGの均質性向上に必要な供給方法の検討

ポート噴射エンジンの燃焼室内混合気形成を決定づける要素として、燃料噴射によって形成される吸気ポート内の混合気状態と、吸気行程中での燃焼室内への混合気流入挙動が挙げられる。特に、ガス燃料であるCNGは、ガソリンの様に吸気ポートやバルブ壁面への燃料付着も蒸発過程も無いため、燃料供給方法の違いが、燃焼室内の混合気形成に直接影響するものと考えられる。そこで、上記2つの現象を切り分けて検討するため、以下の進め方とした。

- ①燃焼室内への混合気流入挙動（流入期間、流入時期）が燃焼室の混合気均質性に及ぼす影響を調査
- ②上記流入挙動の影響度をふまえ、吸気ポートへの燃料供給方法の検討

3.1 混合気流入挙動が混合気均質性に及ぼす影響

前述のとおり、まず、吸気ポートからの混合気流入挙動が燃焼室内混合気の均質性に及ぼす影響を調査する。本調査にはFig. 4に示すような、評価エンジンの吸排気ポート、燃焼室形状を模擬し、エンジンの吸気、混合および圧縮挙動を再現可能なCFD解析用エンジンメッシュを用いた。混合気流入挙動は、計算初期状態（吸気バルブ開時期直前）の吸気ポート内混合気の配置位置および体積を変化させることで変更し、Fig. 5およびFig. 6に示すように、燃料の配置位置により吸入タイミングを、体積により吸入期間を調整し、吸気ポート間の燃料偏りは、両吸気ポートの混合気濃度を変えることで模擬した。

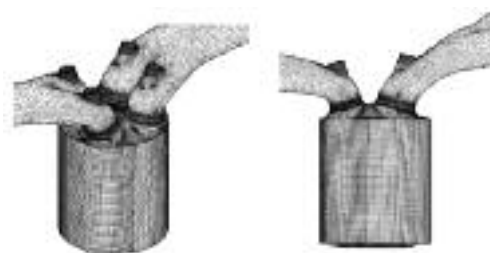


Fig. 4 Engine model for CFD simulation

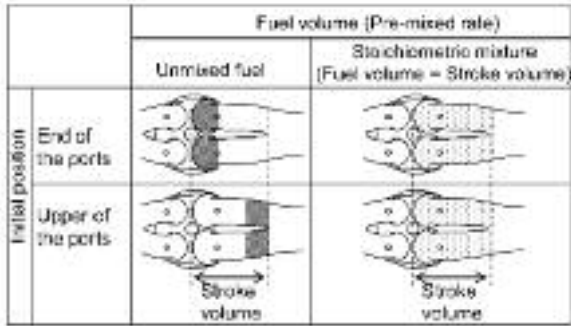


Fig. 5 Analysis conditions (effect of fuel volume and position)

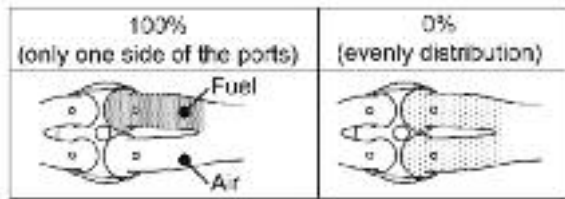


Fig. 6 Analysis conditions (effect of fuel distribution balance between two intake ports)

Fig. 7は、上記解析により得られた燃焼室への混合気流入期間が圧縮上死点での混合気均質度に及ぼす影響を示す結果である。流入期間の指標として吸気行程期間に対する混合気流入期間の割合（＝混合気体積/行程容積）を横軸に取り整理した。また、縦軸の均質度は、均質性を示す指標であり、1に近いほど均質性が高いことを示す。この結果より、吸入タイミングによる傾向は異なるものの、吸気ポート内の混合気体積を大きくし、吸入期間を長くするほど混合気均質度が向上した。一方、Fig. 8は、両吸気ポート間での燃料分配偏りの影響を評価した結果であり、偏りが増大するほど、均質度が直線的に低下した。

以上から、燃焼室内の混合気均質性を向上するために、次のことが重要であることが確認できた。

- ・吸気ポート内で燃料と空気の混合を促進しつつ、広く混合気を配置
 - ・両吸気ポート間での混合気濃度の偏りを抑制
- そこで、実際のCNG用インジェクタの噴流の特徴を確認し、これらの要件を満たすための課題と対策を次節で検討する。

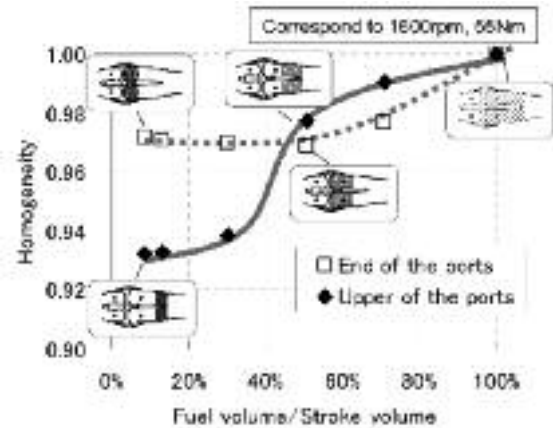


Fig. 7 Effect of fuel supply period

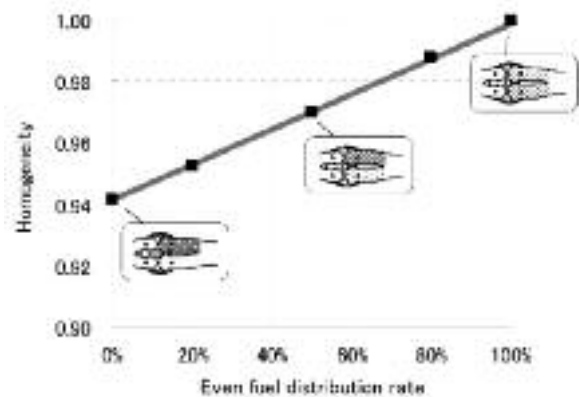


Fig. 8 Effect of fuel distribution balance between two intake ports

3.2 混合気均質性向上に向けた燃料供給方法の検討

前述の結果より、混合気均質性向上のためには吸気ポート内で燃料と空気の混合を促進し、混合気を広く形成することが重要であることを述べた。そのためには、噴射された燃料が速やかに拡散され、噴流内に空気が効率よく取り込まれる必要がある。上記実現方法を検討するにあたり、まず、CNG用インジェクタから噴射されたCNG噴流挙動をCFD解析により分析した。その結果をFig. 9に示す。噴射圧は0.50MPa、雰囲気気圧は大気圧とした。図の左はシュリーレン法で撮影した実噴流挙動であり、右に示すCFD解析結果は、概ねその形状を再現できている。本結果より、CNG噴流の中心部に燃料の過濃領域が集中しており、空気との混合は噴流表面部分でしか生じていない。これは、ガス噴流は隙間のない連続的な塊状であることに加え、ノズルから音速以上の高速（約700m/s）で噴射されることで噴流自身の随伴流により縮流が生じ、噴流方向に引き寄せられる空気によって燃料の拡散が阻害されるためである。以上より、CNGと空気の混合を促進するためには、噴流表面積を増加させ、空気との接触面積

を拡大する必要があると考えられる。

噴流表面積を向上する手段として、幾何学的に噴流を分割する方法、噴射流量を下げて噴射期間を長期化する方法等が挙げられるが、本評価では、噴射期間を長期化する方法を例にとり、その効果をCFD解析により検証した。Table 2に示すように、噴射流量を低下させ噴射期間を長期化する方法として、等噴射圧で噴孔面積を縮小する場合と、等噴孔面積で噴射圧力を低下させる場合の双方で、同一噴射量あたりの噴流内への空気取り込み量を比較した。Fig. 10に各条件の噴流形状を、Fig. 11に噴流表面積に対する噴流内の空気量を示す。ここで噴流表面積は噴流の濃度分布において当量比0.1で囲まれる境界面の面積とし、空気取り込み量はその内部に含まれる空気量とした。

Table 2 Static flow rate in each injection condition

		Fuel Pressure		
		0.10MPa	0.25MPa	0.50MPa
Area of nozzle hole	Normal × 1/2	0.69g/s	1.25g/s	2.11g/s
	Normal	1.46g/s	2.56g/s	4.38g/s
	Normal × 2	2.89g/s	5.08g/s	8.71g/s

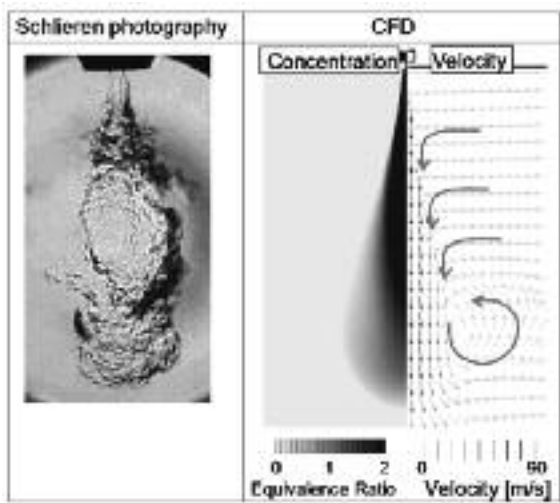


Fig. 9 CNG jet shape

Fig. 10より、いずれの手段においても、噴射流量を低減し噴射期間を長期化するほど空気取り込み量が向上し、噴流中心部の過濃領域が縮小した。またFig. 11からは、噴流表面積が増加するほど空気取り込み量が比例的に増加することが確認できた。以上の結果より、吸気ポート内での燃料と空気の混合を促進するためには、噴射した燃料噴流の表面積を拡大可能な燃料供給手段を選定することが有効であると考えられる。

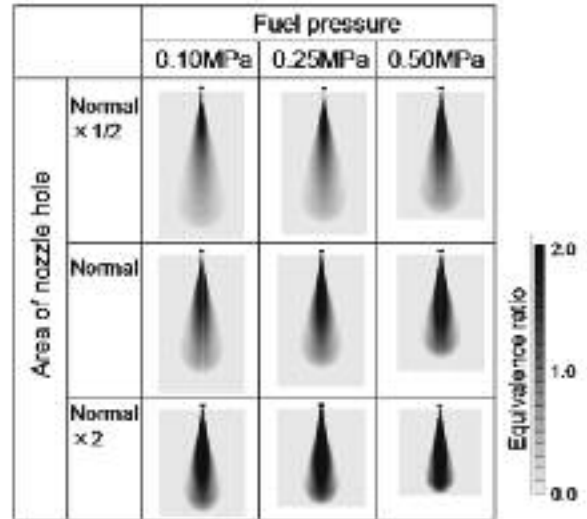


Fig. 10 (CFD) CNG jet shapes in each injection condition

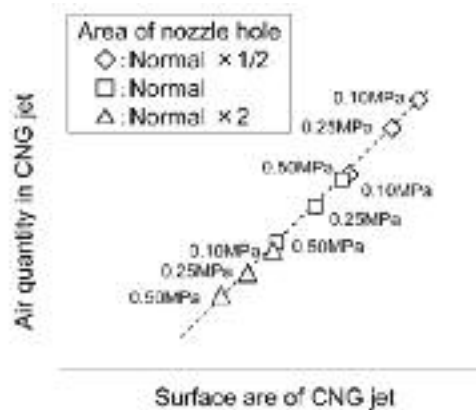


Fig. 11 (CFD) Air quantity in CNG jet

4. エンジン実機評価結果

前章までに検討した燃料供給手段の効果を確認するため、エンジン実機にて熱効率改善効果を検証した。評価条件は、これまでと同様の、回転数1600rpm、トルク55Nmとした。また、燃料噴流の表面積向上手段として、噴射圧力0.5MPaに対し、低噴射圧化(0.1MPa)により噴射期間を長期化した場合と、インジェクタの先端に両吸気ポート方向に噴流を分割するアダプタを取り付け、幾何学的に表面積を拡大すると同時に両吸気ポート間の燃料偏りの抑制を狙った場合の3パターンで評価を行った。

評価結果をFig. 12およびFig. 13に示す。噴射圧力0.5MPaに対し、0.1MPaまで低圧化したことで、O₂排出量およびCO排出量が低減し、熱効率が1.8%改善した。噴流を2方向に分割した条件でも同様の改善を示し、均質混合気形成を狙ってスロットル上流から燃料

を供給した条件に迫る性能が得られた。

以上の検討から、CNGエンジンの性能は、吸気ポートへの燃料供給手段に大きく影響を受け、高効率化のためには燃料噴流の表面積を拡大して空気との混合を促進し、吸気ポート内の均質性を向上させることが重要であることが分かった。

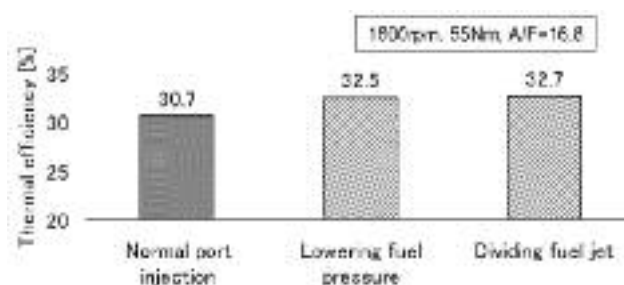


Fig. 12 Comparison of thermal efficiency among CNG injection jet types

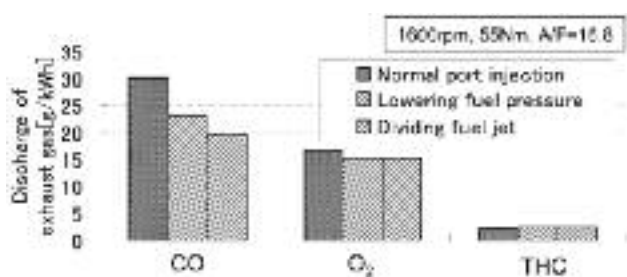


Fig. 13 Discharged amount comparison of exhaust gas components among CNG injection jet types

<参考文献>

- 1) 石山拓二：天然ガス高圧縮比機関に関する研究，自動車技術会シンポジウム，No.09-05, p.1-6 (2005)
- 2) 潮路昌宏：天然ガスエンジンの高効率化に向けて，自動車技術会シンポジウム，No.02-09, p.50-55 (2009)
- 3) 日本化学会編：改訂5版化学便覧 基礎編Ⅱ，丸善出版社，p.235-246, 438 (2004)

5. 結論

エンジン実機評価およびCFD解析を活用することで、CNGエンジンの熱効率改善に向けた混合気形成要件を調査し、以下の知見を得た。

- (1) CNGはガソリンに対し、過濃領域での燃焼効率が大幅に低下するため、エンジンの高効率化のためには、燃焼室内に均質な混合気を形成する必要がある。
- (2) 燃焼室内の均質混合気形成のためには、吸気ポート内で燃料と空気の混合を促進しつつ、吸気ポート内の広範囲に混合気を配置すること、および両吸気ポート間の燃料分配の偏りを抑制することが重要である。
- (3) 吸気ポート内に噴射された燃料と空気の混合を促進するためには、燃料噴流の表面積を向上可能な燃料供給手段を選定することが有効である。

<著 者>



竹村 優一
(たけむら ゆういち)
パワトレインシステム開発部
エンジンシステム開発に従事



和田 実
(わだ みのる)
パワトレインシステム開発部
エンジンシステム開発に従事



溝渕 剛史
(みぞぶち たけし)
ガソリン噴射事業部
ガソリン噴射システム開発に
従事



河野 正顕
(こうの まさあき)
日本自動車部品総合研究所
研究1部
エンジン内燃焼システムの解析に
従事