Copyright©2016 一般社団法人 日本機械学会

G0700203

小型天然ガスデュアルフュエル機関の燃焼改善に関する研究

加藤 大輝[*1]，吉岡 杏月[*1]，堀部 直人[*2]，石山 拓二[*2]，佐古 孝弘[*3]，田中 大樹[*3]

Study on Combustion Improvement of a Small Natural Gas Dual-Fuel Engine

Daiki KATO[*1], Atsuki YOSHIOKA, Naoto HORIBE,
Takuji ISHIYAMA, Takahiro SAKO and Hiroki TANAKA

[*1] Graduate School of Energy Science, Kyoto University
Yoshida-honmachi, sakyo-ku, Kyoto, 606-8501, Japan

This study aims at improving exhaust emissions and thermal efficiencies in a natural-gas engine with diesel-fuel pilot injection. Performances and exhaust emissions were measured for various pilot injection conditions under a supercharged condition using a single cylinder small-bore test engine. Two-stage pilot injection was examined varying first/second pilot injection timings and quantities. The results show that two-stage injection offers lower NOx and HC emissions, while the available range of equivalence ratio is restricted. Advanced second injection lowers NOx emission, while it increases HC emission for a fixed BMEP. The smaller amount of second injection is preferable for lower NOx; however, the available range of equivalence ratio is narrower.

Key Words : Heat Engine, Natural Gas, Performance, Emissions, Dual Fuel, Two-stage Injection

1. 緒　　言

天然ガスデュアルフュエル機関は，天然ガス予混合気を吸気し，パイロット燃料噴霧の自着火により予混合気を燃焼させる．この燃焼方式は定置式発電機関に用いられており，バスやトラックなどの重負荷ディーゼル機関の代替としても研究が進んでいる．この機関では，予混合気の当量比が高いときには高い熱効率が得られるが，低当量比においては未燃物質の排出と熱効率の低下が問題となる．

著者らのこれまでの研究結果によると，二段パイロット噴射を用い，一段目の噴射を早い時期に行って軽油蒸気を広く分布させたうえで，少ない量の二段目の噴射により着火時期を制御すれば，単段噴射に比べ，未燃物質と NOx のトレードオフ関係を改善できることが分かった(1)．また，トロイダル燃焼室の口径を大きくすることで，単段噴射においては，比較的早い噴射時期で未燃物質排出を減らせることや，二段噴射においては，一段目噴射量が多い場合には燃焼室口径の影響が弱くなることなどを示した(2)．これらの結果により，無過給運転において噴射条件，ノズル仕様(3)，ならびに燃焼室形状の選択についてある程度の知見を得ることができた．

本研究では，デュアルフュエル燃焼の改善に関する研究の次の段階として，過給条件下での燃焼パラメータの選択方針を求めるため，外部過給を施した単気筒試験機関を用いてデュアルフュエル運転を行って基本的な燃焼の特性を明らかにするとともに，二段噴射を行い各段の噴射時期，噴射量などのパラメータの影響を調べた．

2. 試験装置および方法

実験に用いた試験機関は表 1 に示す主要諸元を持つ．燃料噴射系は，ソレノイド方式のインジェクタを含むコモンレール式燃料噴射システムである．レール圧力，噴射時期，噴射期間などを専用コントローラにより制御す

[*1] 学生員，京都大学（〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町）
[*2] 正員，京都大学（〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町）
[*3] 大阪ガス（株）（〒541-0046 大阪府大阪市中央区平野町 4 丁目 1 番 2 号）
E-mail: kato.daiki.54s@st.kyoto-u.ac.jp

る．サプライポンプは電動機で駆動しているが，その駆動トルクは，熱効率，平均有効圧力の計算には考慮していない．噴射ノズルは，噴孔径 0.12 mm，噴孔数 6，噴射角度 140° のものを使用し，燃料噴射圧力（レール圧力）を 80 MPa とした．パイロット燃料には JIS 2 号軽油（セタン指数：58）を使用した．試験には図 1 に示すくぼみ口径 55 mm のトロイダル型燃焼室を使用した．圧縮比は 12.5 である．

図 2 に試験装置全体の概略を示す．吸気系はスクリューコンプレッサ（田邊空気機械製作所 TASK-1011E），除湿機（CKD GX5022），流量計（アズビル CML050），サージタンクからなる外部過給のシステムとした．過給空気は電気ヒーターで加熱し，シリンダヘッド吸気孔から上流 50mm の位置で吸気温度を所定の値に制御した．今回の試験では，排気絞り弁の調整により，吸気圧力と排気圧力を常に等しく設定した．主燃料には 13A 天然ガス（CH_4 88%，C_2H_6 6%，C_3H_8 4%，C_4H_{10} 2%：体積比）を用い，吸気ポート上流約 300mm の吸気管内に設けたノズルから連続的に投入した．その流量は熱線式流量計（エステック SEC-4600R）により計測した．機関回転速度を 1200 rpm，吸気温度を 40°C，オイルパン内潤滑油温度を 70°C，冷却水機関入口温度を 80°C 一定として定常試験を行った．吸気圧力 p_s は全ての試験条件で 0.19MPa である．

排気中の窒素酸化物（NOx），全炭化水素（THC）の濃度は，それぞれ CLD 分析計（日本サーモ製，MODEL42iHL），加熱 FID 分析計（堀場製作所 MEXA-1170HFID 型）を用いて計測した．筒内圧力は圧電式圧力センサ（KISTLER 6052A）で計測し，50 サイクルの平均波形より熱発生率などを求めた．

Table1　Engine specifications

Engine type	Direct-injection diesel engine, Single cylinder, Water-cooled
Bore/Stroke	88/84mm
Displacement	511cc
Compression ratio	12.5:1
Combustion chamber	Toroidal type (Bowl dia.=55.0 mm)
Pilot fuel supply	Common-rail system 0.12mm×6 holes 140ºnozzle
Main fuel supply	Continuous supply into an intake pipe

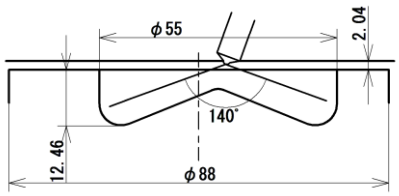

Fig.1 Combustion chamber

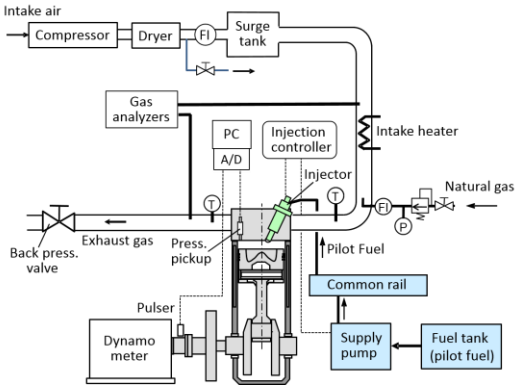

Fig.2 Experimental system

3.　実験結果および考察

3.1　単段噴射における性能・排気特性

図 3 に軽油の噴射時期 θ_j が性能・排気特性に与える影響についての実験結果を示す．噴射量 q_j＝3 mm^3/cycle，一定のもと，θ_j を–5 から–25°ATDC の範囲で変化させたときの性能・排気特性を，天然ガスと軽油を合わせた総括当量比 ϕ_t に対して示した．排気中の THC 濃度が 10000ppmC に達するときを下限当量比，筒内最大圧力 p_{max} が 10MPa に達するかノックが発生するときを上限当量比としてその間を運転範囲と呼び，運転範囲内のデータを表示した．なお，今回の条件設定では，p_{max} の制限値が比較的低いこともあり，実験した範囲内では，ノックが発生する前に p_{max} により運転が制限された．

それぞれの θ_j において高い ϕ_t では，THC 濃度は低くなり正味平均有効圧力 p_e，正味熱効率 η_e の高い運転が可能となるが，NOx 濃度が増加する．低い ϕ_t ではこれと逆の傾向となる．θ_j を早くすると運転範囲は狭くなる．特に θ_j=–20，–25°ATDC では早期の噴射で軽油蒸気の希薄化が過度に進行し，着火性が悪化して下限当量比が高くなったと考えられる．θ_j=–5，–10，–15°ATDC においては θ_j が早い方が THC 濃度は低く，NOx 濃度は高くなる．図 4 に，図 3 をもとに作成した，p_e=0.8MPa のときの θ_j が η_e および排出物質濃度に与える影響を示す．NOx の排出は θ_j が早い条件と遅い条件で低減できるが，早い条件でより大きく低減することができる．しかし，THC の濃度は急増する．このように，単段噴射では，NOx 排出の低減に有利な早い噴射時期を選択することが難しい．

3.2　二段噴射における性能・排気特性

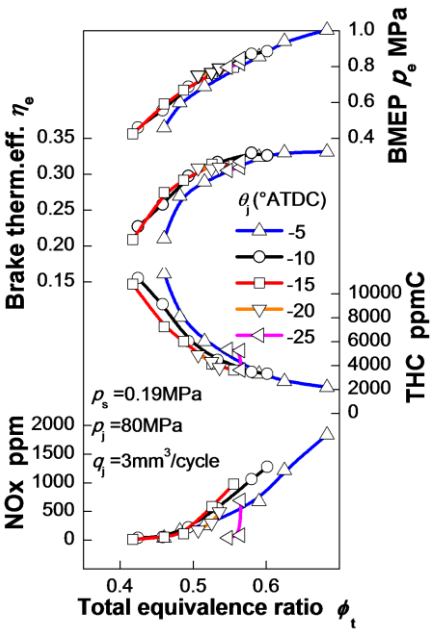

Fig.3 Performance and emissions for single injection (ϕ_t sweep)

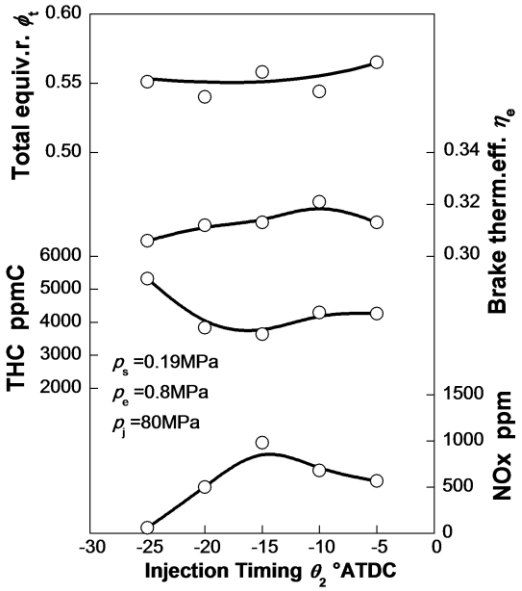

Fig.4 Performance and emissions for single injection (θ_j sweep)

次に，軽油の二段噴射を適用することによる燃焼改善の可能性を調査した．単段噴射において低 NOx をねらい噴射時期を早期化すると，噴霧の希薄化が過度に進行し，天然ガス予混合気の着火が不十分となる．ここで二段噴射を適用し，二段目に噴射した軽油噴霧に着火の役割を担わせることができれば，一段目の噴射を早めつつ天然ガス混合気の燃焼を活発化し，低 NOx および低い未燃物質排出量を得ることができると考えられる．

そこで，軽油の総噴射量を 5mm^3/cycle とし，一段目，二段目の噴射時期 θ_1，θ_2，それぞれの噴射量 q_1，q_2 を変化させて運転を行い，燃焼および排気特性に与える影響を調査した．図 5 に θ_1=–40°ATDC，θ_2=–10°ATDC，q_1=4 mm^3/cycle，q_2=1 mm^3/cycle における性能・排気特性を総括当量比に対して示す．比較のため，θ_j=–10°ATDC，q_j=5 mm^3/cycle とした単段噴射の結果も表示した．

二段噴射では運転範囲は狭くなる．総括当量比を上げると，同じ軽油の総噴射量の単段噴射と比べ，η_eは上昇し，THC，NOxは減少する．二段噴射での熱発生率dQ/dθ，筒内圧力pおよび平均温度Tを単段噴射と比較して図6に示す．主燃焼の熱発生率ピークが遅い時期に現れており，これが低いNOx濃度に対応している．

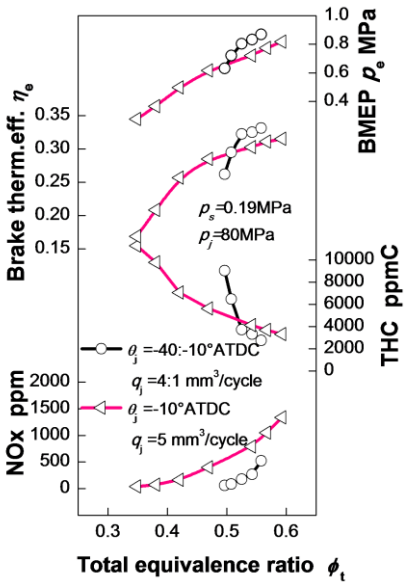

Fig.5 Comparison of performance and emissions (ϕ_t sweep)

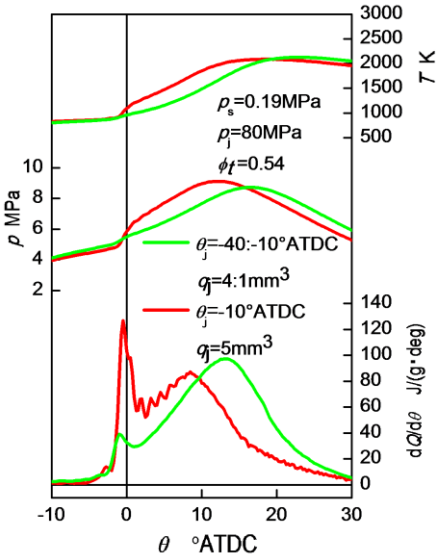

Fig.6 Comparison of in-cylinder pressure and heat release rate

このように，二段噴射を行うことで，η_eが上昇し，THC，NOxを低減できることが明らかとなった．そこで，噴射時期，噴射量の配分を変化させることで性能・排気のさらなる向上を試みた．

3.3　二段噴射における噴射時期・噴射量の影響

図7，8はθ_1を–40°ATDCに固定してθ_2を–5から–20°ATDCの範囲で変化させたときのϕ_tに対する性能・排気を示す．図7はq_1=4 mm^3/cycle，q_2=1 mm^3/cycle，図8はq_1=3 mm^3/cycle，q_2=2 mm^3/cycleとしたときの結果である．図7，8より，いずれのq_1，q_2の組み合わせでも，θ_2が遅い条件では上限当量比が上昇する．これは着火時期が遅いためである．また，ϕ_tが低いと着火の遅延のためにTHCの増加が顕著となり，下限当量比が高くなる．同じ軽油噴射時期の条件では，q_2が多い図8の条件で希薄条件での運転が可能となる．

図9に，図7，8をもとにp_e=0.8MPaの時の総括当量比，η_eと排出物質濃度をθ_2に対して示す．図10には同様にθ_1を変化させたときの結果を示す．図11に，p_e=0.8MPaに最も近い条件でのdQ/dθ，p，Tを示す．q_1=3 mm^3/cycle^3，q_2=2 mm^3/cycleのθ_2=–15，–20°ATDCの条件は運転範囲外となったため図示していない．図9より，θ_2を早めていくとη_eが上昇する．これは図11より熱発生時期が早まり等容度が増加したためである．このときTHCの濃度は低下

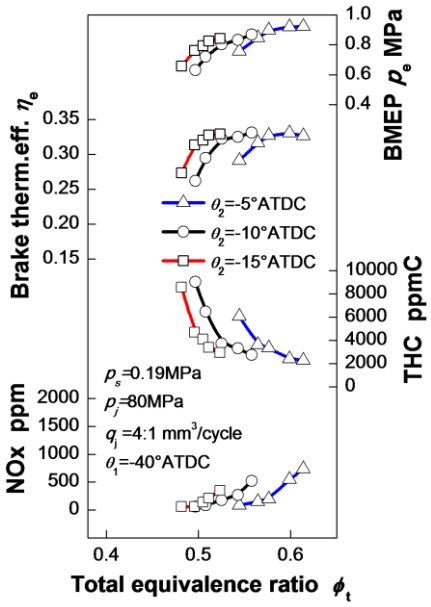

Fig.7 Effects of 2nd injection timing on performance and emissions (4/1mm^3/cycle)

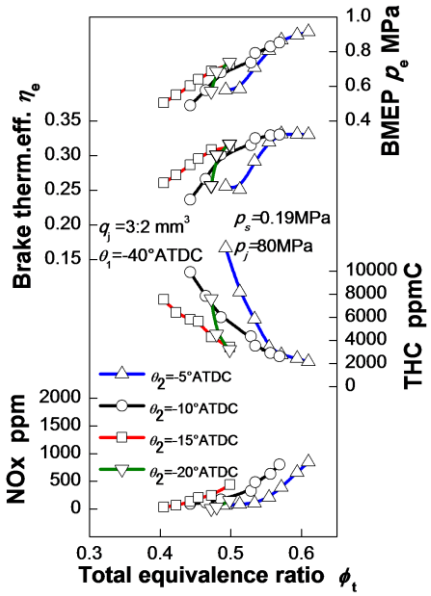

Fig.8 Effects of 2nd injection timing on performance and emissions (3/2mm^3/cycle)

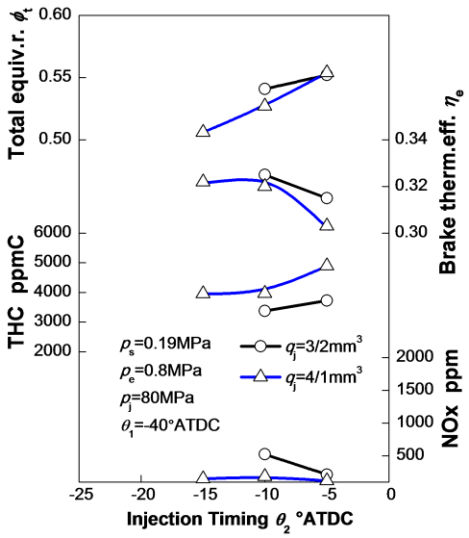

Fig.9 Effects of 2nd injection timing on performance and emissions (p_e =0.8MPa)

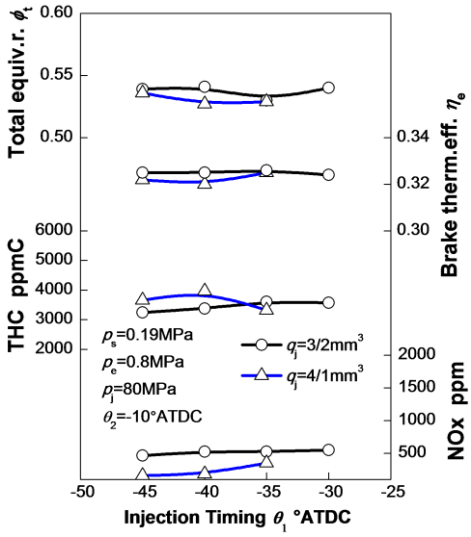

Fig.10 Effects of 1st injection timing on performance and emissions (p_e =0.8MPa)

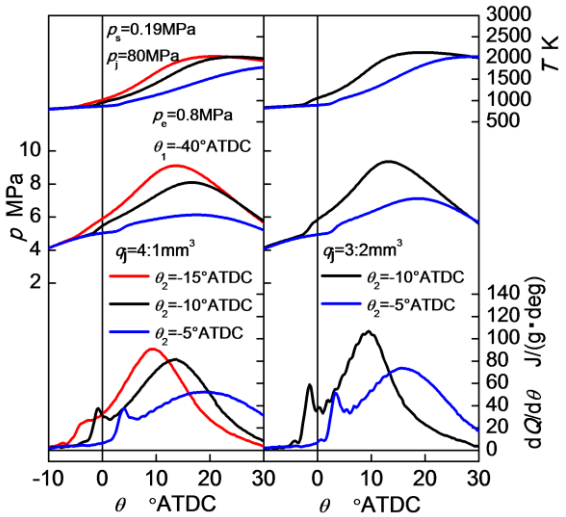

Fig.11 Effects of 2nd injection timing on heat release rate, pressure and temperature (p_e =0.8MPa)

するが，NOxの濃度は増加する．また，q_2が多い条件ではη_eが高く，THCの濃度は低いがNOxは増加する．このように，噴射時期と噴射量の変化に対して，性能・排気特性にトレードオフの関係が見られた．図9と図10を比較すると，θ_1を変化させた場合は，θ_2を変化させたときと比べて性能・排気特性に与える影響は大きくないが，二段目噴射量の少ないq_1=4 mm^3/cycle，q_2=1 mm^3/cycleの条件において一段目の噴射時期を早めていくとNOxの排出量を低減することが可能となる．ただし，q_1=3 mm^3/cycle，q_2=2 mm^3/cycleの条件に比べて運転範囲が狭く，THC濃度は高い．二段目噴霧の着火性確保が課題と考えられる．

4. まとめ

外部過給を施した単気筒試験機関を用いて，天然ガスデュアルフュエル運転を行い，軽油噴射条件が性能・排気に及ぼす影響を調べた．得られた主な知見を以下に示す．

(1) 単段噴射において，高い当量比では，THC 濃度は低くなり，正味平均有効圧力，正味熱効率の高い運転が可能となるが，NOx の排出が増加する．正味平均有効圧力一定の条件で，噴射時期を早めると NOx を大きく低減できるが THC 濃度の急増を招く．

(2) 二段噴射を行うと，単段噴射と比べて運転範囲は狭くなる．高当量比では熱効率は上昇し，THC，NOx 濃度は低減する．

(3) 正味平均有効圧力一定の条件において二段目の噴射時期を早めるとTHC濃度が減少して正味熱効率は向上するが，NOxは増加する．二段目の噴射量が多い条件では熱効率が高く，THC濃度は低減できるがNOx排出量は増加する．また，二段目の噴射量が少ないとき，一段目の噴射時期を早めるとNOxを低減できるが．二段目噴射量が多い時と比べてTHC濃度が高い．

最後に，実験に協力いただいた本学学生，佐藤 優人氏に感謝の意を表する．

5. 参考文献

(1) Ishiyama,T., Kang,J., Ozawa,Y. and Sako,T., Improvement of Performance and Reduction of Exhaust Emissions by Pilot-Fuel-Injection Control in a Lean-Burning Natural-Gas Dual-Fuel Engine, SAE Paper No. 2011-01-1963, SAE International Journal of Fuels and Lubricants, January, pp.243-253, (2012-5).

(2) 姜・小澤・小縣・石山・佐古，噴射条件ならびに燃焼室形状が天然ガスデュアルフュエル機関の性能および排気特性に及ぼす影響，自動車技術会論文集，Vol.43 No.2, pp.473-478, (2012).

(3) 吉田・姜・小縣・石山・佐古，天然ガスデュアルフュエル燃焼の改善に関する研究（燃料噴射条件および燃焼室形状の選択），第23回内燃機関シンポジウム講演論文集（CD-ROM），Paper No.C2-01，(2012).