

ディーゼルエンジン用水素アシスト技術の評価に関する研究

エンジンベンチ試験による燃費向上及び CO₂排出削減効果の検証

西松建設株式会社
西松建設株式会社
久留米工業高等専門学校
久留米工業高等専門学校
株式会社アクティオ

○ 戸田 泰彰
石渡 寛之
坂田 瑠璃
中武 靖仁
山口 利治

1. はじめに

水素アシスト技術とは、既存のディーゼルエンジンに後付けで吸気口（エアインテーク）から燃焼室に水素を送り込み、燃料と混焼させることで、燃費向上と CO₂排出量の削減を行うものである。本技術はディーゼルエンジンを動力源とする発電機や重機といった建設機械だけでなく、バス、トラック、船舶等の輸送機械へも幅広く利用可能であり、また後付け（レトロフィット）可能で、装置取付け直後から軽油や重油の使用量を抑制し、CO₂排出量が削減できる。また吸気に水素を混ぜるため、万が一水素の供給が停止してもエンジンの異常や故障に繋がることはない安全な技術である。本技術に関する燃費向上の実験結果等が報告されているが、定量的な評価としては十分ではなく、また様々なエンジン形式（排気量、燃料噴射方式）に対する最適な水素供給量やその効果については実験、検証がなされていない。

本研究ではエンジンベンチ試験機を用いて、小型ディーゼルエンジンを対象とした負荷試験を実施する。さらに排出ガス測定により、排出ガス基準項目（CO、HC、NO_x、黒煙）と CO₂の排出量から、水素供給時のエンジンの燃焼効率を評価する。

2. 実験装置および方法

2.1 水素アシスト技術

ディーゼルエンジン用水素アシスト技術（図-1）は、水電解により水素を生成し吸気部から供給することで、燃費向上と CO₂排出削減を実現する。海外における既出の報告りでは、排気量 10000cc のディーゼルエンジンに対して 4L/min の水素を供給することで、最大で約 10%の燃料消費量が低減（燃費向上）された事例がある。さらに付随する効果として、水素供給によりエンジン内部のカーボンラッジ等の堆積物を低減させ、エンジンや排気システムの高寿命化、排気再循環バルブの交換など

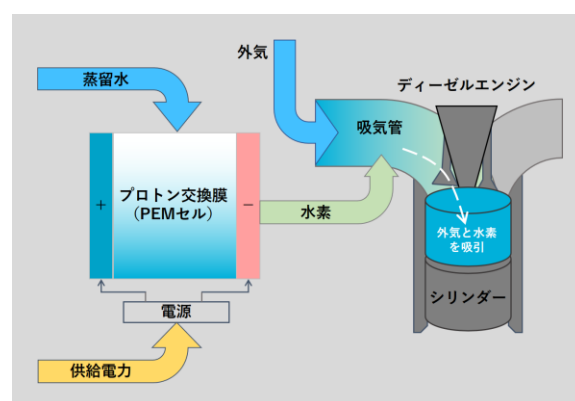


図-1 ディーゼルエンジン用水素アシスト技術

のメンテナンス頻度、コストの削減が期待される。

2.2 実験装置

実験装置（図-2）は供試機関、動力計、排ガス測定機器、電子天秤、および水素供給装置等で構成される。動力計には吸収動力 150 PS の水動力計を用いた。燃料消費量は燃料タンクの質量を電子天秤で測定した。また本実験では電気分解による水素生成・供給ではなく、水素ボンベから減圧し流量を制御して供給する方式とした。

2.3 供試機関

(1) 機械式燃料噴射方式

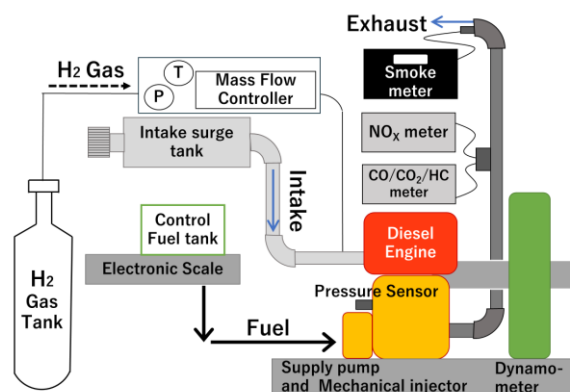


図-2 実験装置概略図

機械式の供試機関として使用した、ヤンマー社製水冷単気筒ディーゼル機関 NF-19SK（排気量：1,007cc）の外観（写真-1）を示す。

(2) コモンレール式燃料噴射方式

コモンレール式の供試機関として使用した、ヤンマー社製水冷単気筒機関 NDF150-E（排気量：760cc）の外観（写真-2）を示す。



写真-1 ヤンマーディーゼル NF19SK

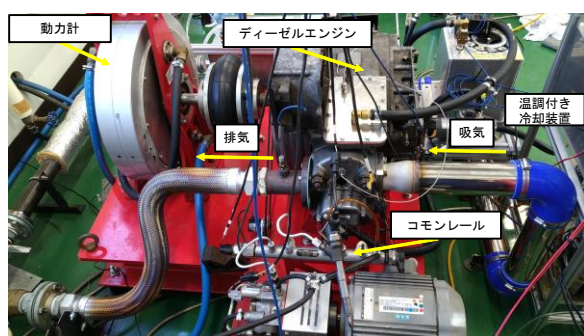


写真-2 ヤンマーディーゼル NFD150-E

2.4 実験方法

(1) 機械式燃料噴射方式

吸気管から水素を供給し、空気と水素の予混合気を用いて性能実験を行った。燃料は軽油を使用し、回転数 2,000 rpm において負荷 75% (荷重 120N)、50% (80N)、25% (40N)、12.5% (20N)、6.25% (10N) での軸出力や燃料消費量、排ガス成分量を計測した。計測データからエンジンのサイズに依存しないエンジン負荷に相当する正味平均有効圧力 P_{mec} [kPa]、燃料消費率 BSFC [g/kWh]、正味窒素化合物 BSNOx [g/kWh] を算出した。

水素供給量は供試機関の排気量 1,007cc に対して 0.4L/min を基準として、最大で 20L/min まで供給量を増加させて評価を行った。ここでエンジン吸気量に対する水素供給量（水素濃度）としては、20L/min の供給で 1.986vol% であり、水素の希薄可燃限界濃度 $2.4\text{vol}\%$ と比較して十分低い値である。

さらに本実験では、燃料にバイオディーゼル燃料（BDF）を使用して性能実験を行った。

(2) コモンレール式燃料噴射方式

前述の機械式と同様に水素を供給し、回転数

2,000rpm、燃料噴射時期 BTDC 10° において負荷 87.5% (荷重 175N) から負荷 12.5% (25N) での軸出力や燃料消費量、排気ガス成分量を計測した。水素供給量は供試機関の排気量 760cc に対して 0.3L/min を基準として供給量を変動させる。

2.5 水素供給方法

吸気管への水素供給部（写真-3）を示す。水素供給装置は FC デザイン社製 GFC-KRM-2023 である。

2.6 排ガス測定装置

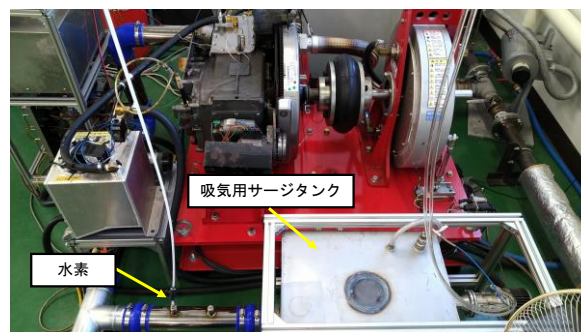


写真-3 吸気管への水素供給部

排気ガスは CO, CO₂, HC, NOx, オパシティ（光透過式黒煙）の 5 種類を測定した。CO, CO₂, HC の計測には HORIBA 製の MEXA-1170HNDIR を用いた。測定原理は非分散赤外線吸収法（加熱式）であり、測定範囲は CO : 0-1/3/6/12 vol%, CO₂ : 0-10/16/20/25 vol%, HC : 0-1000/2000/3000/5000 ppmC6（ヘキサン換算）である。

NOx の計測には HORIBA 製 MEXA-720NOx を用いた。測定原理は直挿式ジルコニアセラミックセンサであり、測定範囲は 0-3000 ppm である。

オパシティに関しては HORIBA 製オパシメータ MEXA-60SW を用いて計測した。測定原理は光透過方式（パーシャルフロー排圧式）であり、測定範囲は 0-99.9% である。

2.7 エンジン燃焼圧計測装置

エンジン燃焼圧計測装置（YOKOGAWA 製スコープコーダ DL850E）を使用し、取得データからエンジン燃焼圧解析パッケージにより燃焼圧、平均熱発生率を算出した。

2.8 燃料

本実験では、JIS2 号軽油とバイオディーゼル燃料（BDF）の 2 種類の燃料を使用して（表-1）、水素アシスト技術に与える影響を調査した。

表-1 軽油と BDF の成分

項目	JIS2 号軽油	BDF
密度 kg/m ³ @15°C	823.2	882.8
粘度 cSt@40°C	2.68	4.4
引火点 °C	63.5	65
流動点 °C	-12.5	-7.5
低位発熱量 MJ/kg	43.1	37.01

3. 実験結果

3.1 機械式燃料噴射方式

燃焼性能の評価結果として、縦軸に正味燃料消費率 BSFC、横軸に機関の負荷を示す平均有効圧 P_{mec} のグラフ (図-3) を示す。水素供給量 0.4~1.2L/min 程では、低負荷 12.5% (平均有効圧 89.4kPa) で若干の消費燃料の低減 (燃費向上) が見られるが、高負荷を含めた全域ではほとんど影響が見られない。

次に水素供給量を 10 倍の 4~12L/min に増やした結果を図-4 に示す。さらに横軸は同様とし、縦軸に正味二酸化炭素排出量 $BSCO_2$ (図-5) としたグラフを示す。この条件では負荷変化のほぼ全域で水素供給による燃費向上の効果が認められる。また図-5 から燃費向上とともに CO_2 排出量の低減が確認できる。

燃料に BDF を使用した場合の燃焼性能を図-6 に示しており、軽油と同様に負荷変化の全域で燃費向上の効果が確認できる。

水素供給時の軽油と BDF の燃費性能の比較 (図-7) を示す。縦軸に Control を基準とした燃料消費変化率、横軸を水素供給量とし、正味平均有効圧は負荷 12.5% (89.4kPa) である。この結果から水素が燃料としての役割を果たし、軽油や BDF の消費量を低減させたと考察される。また軽油と比較した場合に BDF の方が若干高い燃料消費変化率を示しており、20L/min の水素を供給した場合には、14.7%の BDF 消費量の削減効果が得られた。

次に水素の発熱量を基に、水素 1L 当たり BDF0.29g と換算して燃料消費変化率を示す (図-8)。結果として水素供給量の増加に伴って変化率も増加 (損失が増加) しており、20L/min 供給時には約 25%の水素が燃焼に使われていないことを示している。これはディーゼルエンジンの特性であるバルブオーバーラップ (排気時に排気弁と吸気弁が同時に開いている状態) が関与したと考えられ、吸気で取り入れた水素と空気の予混合気の一部が排気弁から放出され、燃焼に使用される水素量が減少している可能性がある。

燃焼中の筒内燃焼圧と平均熱発生率を示す (図-9)。仮説として、燃費向上は水素混入によって燃焼温度が上昇したためと考えていた。しかしこの結果から、水素供給時には燃焼圧が低下し、燃焼温度も低下、また燃焼圧の微分である熱発生率のピーク値も低い。これにより水素はあくまで燃料を代替する役割を果たしていると考えられる。

さらに燃焼温度の低下によって、 NO_x 排出量の低減も確認された。BDF 燃焼時には水素供給によって、最大 8.9%の NO_x 排出削減効果が得られた。

3.2 コモンレール式燃料噴射方式

水素供給量を 3~9L/min としたときの燃焼特性

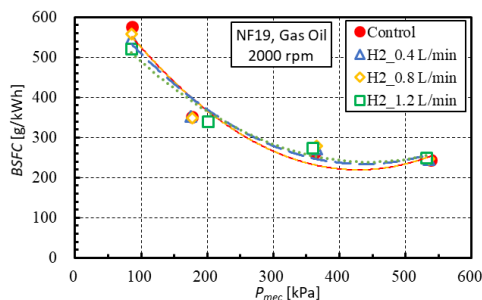


図-3 燃料消費率 BSFC (機械式, 軽油)

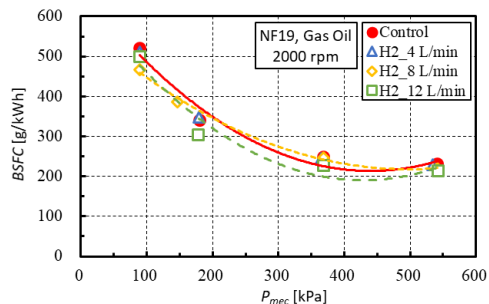


図-4 燃料消費率 BSFC (機械式, 軽油)

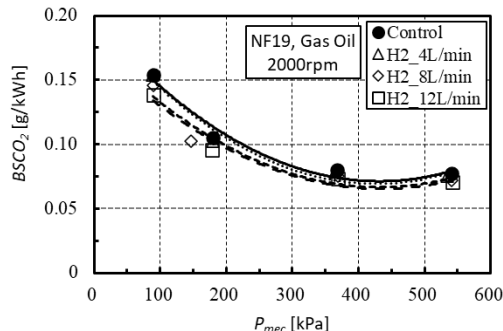


図-5 二酸化炭素排出量 $BS CO_2$ (機械式, 軽油)

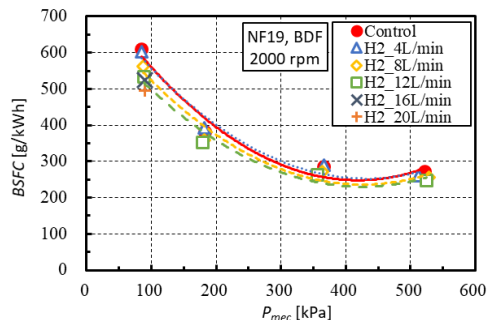


図-6 燃料消費率 BSFC (機械式, BDF)

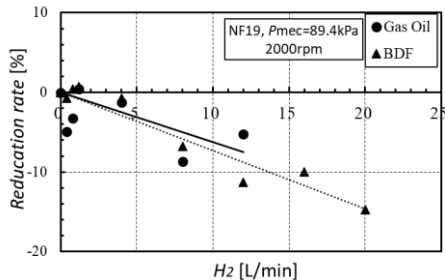


図-7 軽油/BDF の燃料消費変化率の比較 (機械式)

(縦軸：正味燃料消費率 BSFC) を示す (図-10)。機械式燃料噴射方式の結果と同様に、負荷変化の全域で燃費向上の効果が確認できる。

水素供給量に対する燃料消費変化率を示す (図-11)。図-8 と同様に、水素を燃料として換算 (水素 1L 当たり軽油 0.25g) した場合の変化率を破線で示している。平均有効圧は負荷 12.5% に当たる 93kPa とした。コモンレール式においては、水素供給量 9L/min に対して燃料消費削減率が約 6% (線形近似) となり、燃費向上の効果は機械式よりも低い。また機械式と同様に、供給した水素の一部が燃焼されずに排気されていると考えられ、9L/min 供給時には約 20% の損失が生じている可能性がある。

4. まとめ

4.1 成果

本研究では、水素アシスト技術の燃費、排ガス及びエンジン燃焼圧に対する影響を調査するため、エンジンベンチ試験機による評価を実施した。

(1) 吸気に水素を供給することでディーゼルエンジンの燃費が向上する。

- 機械式 (1,007cc) で軽油を使用、水素供給量 12L/min のとき約 7% の燃費向上
- コモンレール式 (760cc) で軽油を使用、水素供給量 9L/min のとき約 5% の燃費向上

(2) 水素アシスト技術はエンジン低負荷条件の方が燃費向上の効果が高い。

(3) 水素アシスト技術により CO₂ 排出量を削減できる。一方で NO_x 排出量は増加しない。

(4) 水素アシスト技術は燃料の消費量を低減できる一方、供給した水素が未燃分として排出されている可能性がある。そのため、供給した水素の発熱量を軽油分として換算した全体としては、燃費が悪化する傾向が見られた。

4.2 建設機械等へ本技術の適用に向けた課題

建設工事における CO₂ 排出削減に向けて本技術の適用を検討する場合に、水素供給の実装上の課題が挙げられる。重機、発電機等の建設機械では 5000cc 以上の大型のディーゼルエンジンが一般的に使用され、そこで今回程度の燃費向上を狙う場合には、50L/min 程の水素供給が想定される。こういった方法 (水電解または水素ポンプ) で大量の水素供給が実現可能か、さらに全体のコストメリットを考慮した供給方法を選定する必要があり、水素サプライチェーンの整備に関わる部分は業界全体で取り組むべき重要な課題と考える。

参考文献

1) Whitaker, Richard · Rechberger, David · Jokinen, Kristian : Innovative Dual Fuel Aftermarket Emissions Solution, USDOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy,

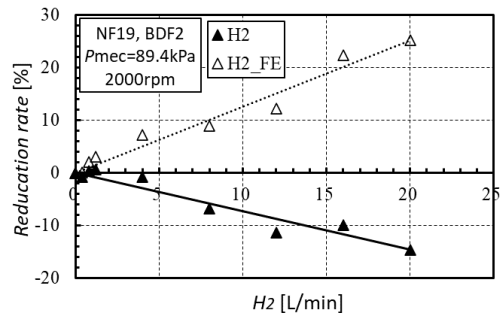


図-8 燃料消費変化率 (機械式, BDF)

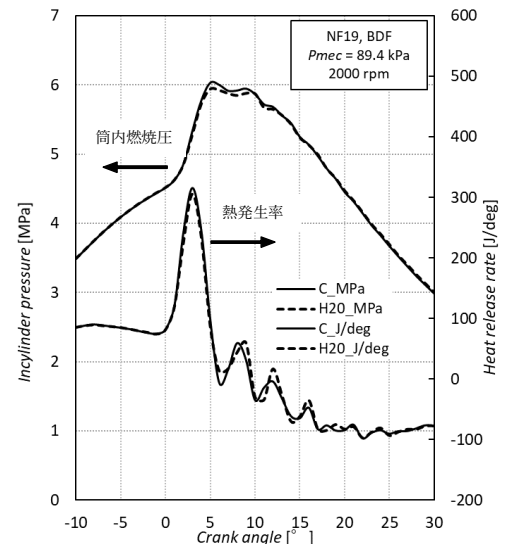


図-9 筒内燃焼圧と熱発生率 (機械式, BDF)

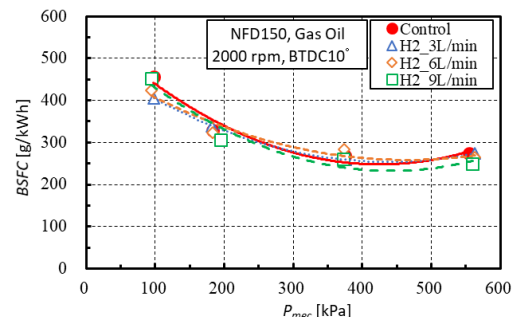


図-10 燃料消費率 BSFC (コモンレール式, 軽油)

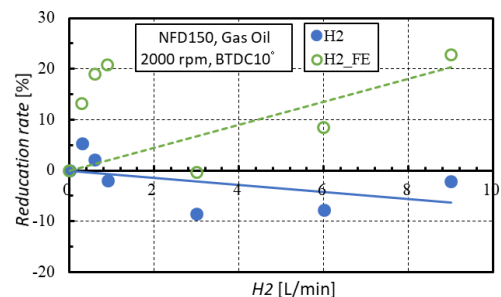


図-11 燃料消費変化率 (コモンレール式, 軽油)

EE0007800, 2019

2) 小林伴星・宮本亨・三上真人・小嶋直哉・柁島一・島崎勇一: ディーゼルエンジンにおける少量水素添加時の燃焼・排気特性, 日本機械学会講演論文集 No.085-1, 2008