酸素および不活性ガス給気による直接噴射式ディーゼル 機関の微粒子と NO_x の低減効果*

飯田 訓正^{*1}, 渡辺 潤二郎^{*2}
津幡 義道^{*3}, 佐藤 豪^{*4}

Influence of Intake Oxygen and Carbon Dioxide Concentration on NO_x and Particulate

Norimasa IIDA, Junjiro WATANABE,
Yoshimichi TUBATA and G. Takeshi SATO

The effects of intake oxygen and carbon dioxide concentration on both the flame temperature and emission of NO_x and particulates from a direct injection diesel engine are reported. Nitrogen oxide emission from a D. I. diesel engine is correlated with calculated flame temperature, yielding -143 000 cal/mole for the overall activation energy for the processes involved. It is found that when the particulate emission index, EI_{pe}, is plotted against the inverse of flame temperature, the values $\ln(\text{EI}_{pe})$ are linear. The slope indicated a positive apparent activation energy for oxygen- and nitrogen-enriched charging. But the correlation of $\ln(\text{EI}_{pe})$ with flame temperature for carbon dioxide-enriched charging shows a smaller or negative activation energy than that for oxygen- or nitrogen-enriched charging.

Key Words: Internal Combustion Engine, Diesel Engine, Combustion, Combustion Product, Thermal Equilibrium, NO_x , Particulate, Soot, SOF, Flame Temperature, Oxygen, Nitrogen, Carbon Dioxide

1. はじめに

本研究の目的は、直接噴射式ディーゼル機関を対象に、吸気中の酸素濃度、EGR ガスの濃度などいわゆる給気ガス組成および温度が燃焼と微粒子排出の特性に及ぼす影響を実験的に明らかにし、窒素酸化物と微粒子、特に SOF 低減のための基礎的情報を得ることにある。

著者らは、微粒子低減策の一方法として、吸気の酸素濃度を高めることで燃焼改善を図った酸素富化給気を提案し、その実現可能性について検討している⁽¹⁾⁽²⁾。酸素富化給気による微粒子低減効果は主に微粒子の酸化過程の促進によるものと考えられ、微粒子中の dry-soot の低減は、酸素富化給気によりほぼ完全に行える。しかし SOF の低減には必ずしも効果的でないなどの面があり⁽³⁾、微粒子低減の機構および低減を促進する要因は明らかでない。機関の吸入空気を窒素ない

しは二酸化炭素で希釈すると火炎温度が低下し、窒素酸化物の排出量が低減することはよく知られている。また吸気中に混入した二酸化炭素は排気煙を抑制する効果を持つことが報告されている⁽⁴⁾。しかし微粒子(drysoot と SOF)の排出量については、火炎温度をパラメータとして系統的に調べた研究例はなく、微粒子生成のメカニズムを検証するうえで極めて重要な情報が期待される。そこで、本研究では指圧線図の3領域モデルによる熱力学的解析により、熱発生率と火炎温度履歴を求め、これらと酸素および二酸化炭素富化時の排気特性との関連について検討する。

2. 実験装置および方法

2・1 供試機関および運転条件 自動車用機関に近い条件で運転のできる比較的高速の小形単気筒四サイクル直接噴射式ディーゼル機関を供試機関とした。機関諸元を表1に示す。燃料は市販の軽油(比重0.837/19°C)を用いた。図2に示すシステムにおいて、ポンペより機関の吸入空気中に酸素 O_2 、窒素 N_2 、二酸化炭素 CO_2 を供給し所定の組成に設定した。給気温度を設定値に調節した。機関の運転条件として、動的噴射時期を 6°BTDC と 12°BTDC の2設定、冷却水温度を 80°C 一定、回転速度は定格回転数の2200 rpm

* 平成2年1月25日 第8回内燃機関合同シンポジウムにおいて講演、原稿受付 平成2年1月31日。

^{*1} 正員、慶応義塾大学理工学部(〒223 横浜市港北区日吉3-14-1)。

^{*2} 学生員、慶応義塾大学大学院。

^{*3} 正員、(株)本田技術研究所(〒321-33 栃木県芳賀郡芳賀町)。

^{*4} 正員、金沢工業大学(〒921 石川県金沢市南区内野々市)。

とした。

機関の負荷条件については、供試機関を空気で運転した場合に、連続定格出力時 (14.2 kW/2 200 rpm)、空気過剰率 $\lambda=1.52$ の送油量 (1.0 g/s) を基準とし、その値を一定に保ち一連の実験を行った。以下、この燃料噴射量条件を $r_f=100\%$ と表示する。

2.2 排気測定 排気ガス中の有害成分 (NO_x, THC), CO₂, 排気煙濃度, 微粒子状排出物を調べた。排気は全量を希釈トンネルに導き、EPA の規定に準拠し、微粒子質量濃度 P_E を求めた。微粒子はソックスレ抽出法により炭素状微粒子 (dry-soot) と可溶性有機物 (SOF) に分離しひょう量した。

2.3 給気組成の設定 給気の組成は、機関の圧縮終了時の圧力、温度、燃料の組成、発熱量などから定まる断熱火炎温度を考慮して系統的に設定した。設定条件とそのときに予想される量論断熱火炎温度の推算値の関係を図 3 に示す。

- (1) 酸素濃度の影響を調べるための設定
[Air+N₂+O₂] ……(◎)
- (2) 二酸化炭素の影響を調べるための設定
[Air+CO₂] ……(●)
- (3) 酸素濃度一定で CO₂ の影響を見る設定
[Air+CO₂+O₂] ……(○)
- (4) 吸気温度の影響を調べるための設定

図 1 供試機関燃焼室

図 2 実験装置の概要

[Temperature] ……(Ⓢ)

- (5) 断熱火炎温度がほぼ一定となる組合せ

3. 排気特性に対する給気組成の影響

3.1 [Air+N₂+O₂] 図 4 に排気ガス中に含まれる微粒子濃度 P_E , 排気煙濃度, 窒素酸化物 NO_x, 未燃炭化水素 THC と給気酸素濃度との関係を示す。図 4 中◎印が空気に N₂ を混入した場合および O₂ を混入した場合を示しており、給気酸素濃度を 17% から 25% まで変化させた場合である。給気酸素濃度の低下は微粒子の増加, NO_x の減少, THC の増加をもたらす。特に P_E については炭素状微粒子 (dry-soot) と可溶性有機物 (SOF) が共に増加する。

3.2 [Air+CO₂] 図 4 中で●印は吸入空気を二酸化炭素で希釈した場合を示す。二酸化炭素の場合、窒素で同一の酸素濃度まで希釈した場合に比較して、微粒子の増加が顕著でない。このことは dry-soot と SOF についても同様である。また THC の排出量も N₂ で希釈した場合に比較して少ない傾向にある。

3.3 [Air+CO₂+O₂] 図 5 に酸素濃度を一定 (21%) に保ち、空気中の N₂ を CO₂ に置き換えた場合の影響を○印で示す。図 5 の横軸を CO₂ 濃度で表現しており、CO₂ 濃度が変化しても機関の総当量比は一定である。CO₂ 濃度の増加とともに NO_x が単調に減少する。同時に排気煙濃度もほぼ単調に減少しており、同時低減が実現している。微粒子質量濃度は CO₂ 濃度

表 1 供試機関の仕様

製 作	ヤンマーディーゼル	型 式	TS230R
種 類	横型 OHV 4サイクル	燃焼方式	直接噴射式
燃焼室形状	深型ストロイダル形	シリンダ数	1
総排気量	1131 cc	内径×行程	112 × 115 mm
圧縮比	16.3	連続定格出力	14.2 kW/2200 rpm
噴射ポンプ	ボッシュ式	最大出力	17.5 kW/2200 rpm
噴射弁型式	ホールノズル (4-0.33)	噴射時期	可 変
潤滑圧	18.6 MPa	スワール比	1.3 ± 0.1
冷却方式	水冷	潤滑方式	圧注式
吸気弁開	6° BTDC	吸気弁開	41° ABDC
排気弁開	48° BBDC	排気弁開	14° ATDC

図 3 給気組成の設定条件と想定した火炎温度

が零から10%まではほぼ一定であるが、その後は顕著な低減効果が見られる。

4. 燃焼特性に対する給気組成の影響

4.1 着火遅れ 吸入空気に N_2 ないしは O_2 を添加し吸気酸素濃度を17%から25%と変化させた場合(○)および CO_2 を添加し吸気酸素濃度を17%から21%と変化させた場合(●)の着火遅れを図6に示す。酸素濃度の減少にともない、着火遅れは指数関数的に増加する。この増加割合は N_2 希釈に比べ、同量の CO_2 希釈のほうが顕著である。

酸素濃度を21%一定に保ち二酸化炭素濃度のみを変化させた場合を図7に示す。同一酸素濃度の条件下でも二酸化炭素濃度の増加により着火遅れは増す。

4.2 熱発生率 図8に熱発生率経過を示す。また

図9に定義される燃焼の諸特性値を図10に示す。酸素分圧が減ると着火遅れの増大でスパイク状の初期燃焼、いわゆる予混合的燃焼に関与する熱発生 Q_p が大きくなる。 Q_p の増加割合は N_2 希釈に比べ、同量の CO_2 希釈のほうが顕著である。同一の着火遅れ期間を与える N_2 の条件と CO_2 の条件を選択して比較すると、熱発生率経過は希釈ガスによらずほぼ同一となる。しかし微粒子の排出量は CO_2 で希釈したほうが少ない。

5. 排気特性に対する断熱火炎温度の影響

5.1 窒素酸化物に対する影響 Sawyerら⁽⁵⁾は、ガスタービン形燃焼器において NO_x は主に燃焼器内の量論比の領域で生成されるとし、 NO_x 排出量は量論断熱火炎温度 T_f と強い相関を持つことを推論し

図4 排気特性と給気酸素濃度
[Air + N_2 + O_2] および [Air + CO_2]

図5 排気特性と二酸化炭素濃度
[Air + CO_2 + O_2] (酸素濃度一定)

た。実際にNO_xの排出指数の対数 $\ln(EI_{NOx})$ を $1/T_f$ に対してプロットし、見掛けの活性化エネルギー136 000 cal/molという値を得ている。この値は拡大Zeldovich機構で与えられる式(1)の値に近い値となっている⁽⁵⁾。

$$[NO] \propto [O_2]^{1/2} [N_2] \exp(-134\,630/RT) \cdots \cdots (1)$$

窒素酸化物NO_xに対する火炎温度の影響を見るために、NO_xの排出指数(g/kg-fuel)の対数と火炎温度の逆数 $1/T_f$ との関係を図11に示す。噴射時期12° BTDCの場合で、2・3節に述べた給気組成と吸気温度のすべての設定条件についてプロットした。 T_f は量論比における断熱火炎温度で、指圧線図データを用い、3領域モデル(未燃焼領域と火炎領域と既燃焼領域)により熱力学的解析[例えば文献(6)~(8)]を行い、火炎領域の断熱火炎温度の履歴を調べ、その最高値で代表させた(図13参照)。なお、断熱火炎温度を算出する平衡計算はOlikaraら⁽⁹⁾の開発した計算方法によった。こうして計算された T_f は、ディーゼル燃焼による全窒素酸化物排出量を定量的に精度良く推算する目

的には十分でないが、排出指数と火炎温度との相関を調べる目的には十分である。

NO_xの排出指数の対数 $\ln(EI_{NOx})$ と火炎温度の逆数 $1/T_f$ とは線形関係にある。吸入空気に混入したガスの種類(O₂, N₂, CO₂)や吸気温度の変化によらず、右下がりの直線上に分布する。NO_xの排出量は、酸素分圧でなく火炎温度に依存する。機関の吸入空気を窒素ないしは二酸化炭素で希釈すると、窒素酸化物の排出量が低減するのは火炎温度の低下による。特に二酸化炭素の場合はCO₂の比熱が大きいことと、CO₂自体の熱解離による火炎温度低減効果が顕著なことから、窒素と同量の混入でも低減率は大きい。吸気の酸素濃度を21%一定に保ち二酸化炭素を混入する場合にも、顕著なNO_xの低減が見られたが、これもCO₂による火炎温度の低減効果によることが理解される。

5・2 微粒子状排出物質に対する影響 図12に、吸入空気にN₂ないしはO₂を添加し吸気酸素濃度を17%から25%の範囲で変化させた場合(○)の断熱火炎温度 T_f と微粒子排出指数 EI_{PE} の相関を示す。噴射

図6 着火遅れと酸素濃度

図7 着火遅れと二酸化炭素濃度

図8 熱発生率経過

図9 燃焼特性値の定義

図 10 燃焼特性

図 11 窒素酸化物排出指数と断熱火炎温度の関係
(図 3 に示したすべての給気組成設定条件)

図 12 微粒子排出指数と断熱火炎温度の関係
(噴射時期 12°BTDC と 6°BTDC の 2 条件で
酸素・窒素を混入)

時期を標準の 12°BTDC の場合と遅延した 6°BTDC の場合の 2 条件について実験を行いプロットした。噴射時期の変化によらず EI_{PE} と火炎温度に強い相関が認められる。 EI_{PE} は火炎温度の上昇にともなって減少の傾向を示し、 $\ln(EI_{PE})$ と $1/T_f$ は窒素酸化物とは逆の傾きを持つ直線関係にある。すなわち空気を窒素で希釈し火炎温度を下げると、NO_x は低減するが、逆に

微粒子は増大するというトレードオフの関係が火炎温度をパラメータとして見た場合にもうかがえる。今回設定した比較的高負荷の範囲では、微粒子状物質の成分のほとんどを炭素状微粒子が占める。SOF と断熱火炎温度の関係については、測定誤差の範囲内で明確な相関は見いだすに至らなかった。

二酸化炭素を混入した場合の断熱火炎温度 T_f と

図 13 断熱温度履歴の解析例

微粒子排出指数 EI_{PE} の相関を図 14 に示す。機関条件は噴射時期 12°BTDC の場合で、 N_2 ないしは O_2 を添加した場合(●)は直線関係がある。二酸化炭素で空気を希釈した場合(○)の T_f と微粒子排出指数 EI_{PE} の相関は全く異なる。すなわち、断熱火炎温度が低下しても微粒子の増加は顕著ではない。特に吸気酸素濃度を 21 % 一定に保ちながら二酸化炭素を混入した場合(○)には、火炎温度が下がると同時に微粒子が低減するという関係が見られる。すなわちこの場合 NO_x と同じ右下がりの相関が認められ、微粒子と窒素酸化物の同時低減が実現している。このように吸気に二酸化炭素を混入した場合を含めて考えると、微粒子と火炎温度の間には、一義的な相関は認められない。

以上のことから NO_x および微粒子生成に及ぼす吸気中の酸素濃度の効果は、火炎の温度上昇を通じてのものであると考えられ、酸素自身の触媒的效果は認められない。しかし、 CO_2 添加の効果は温度のみならず CO_2 自身の触媒的效果が認められ、この点については今後十分な検討が必要である。

6. ま と め

直接噴射式ディーゼル機関の吸入空気中に酸素、窒素および二酸化炭素を供給し、火炎温度をパラメータとした系統実験を行い、微粒子と NO_x の低減効果について検討した。本研究により得られた知見を要約すると以下のとおりである。

(1) 吸入空気中に酸素ないし窒素を混入し酸素濃度を変化させると、酸素濃度の低下にともない着火遅れが指数関数的に増加する。その結果、予混合的燃焼量(初期燃焼量)が増大し、全燃焼期間は短縮する。また、吸気酸素濃度の低下は微粒子の増加、窒素酸化物の減少、未燃炭化水素の増加をもたらす。

図 14 微粒子排出指数と断熱火炎温度の関係
(酸素、窒素、二酸化炭素、酸素濃度一定)

(2) 吸入空気中に二酸化炭素を混入すると、着火遅れが著しく増大する。 O_2 と CO_2 を同時に混入し酸素濃度を一定に保った比較実験でも、二酸化炭素濃度の増加にともない着火遅れがやや増大する。同時に予混合的燃焼量の増大が見られるが、全燃焼期間はさほど変化しない。二酸化炭素の混入は、吸気酸素濃度によらず、窒素酸化物の減少、炭素状微粒子の減少をもたらす。

(3) N_2 ないし CO_2 の混入で、同一の着火遅れ期間を与える条件を選択比較すると、熱発生率経過は希釈ガスによらずほぼ同一となる。しかし、微粒子の排出量は CO_2 を混入した場合のほうが少ない。

(4) 窒素酸化物の排出指数 EI_{NO_x} は、本研究の範囲では、吸気の組成および温度によらず、火炎温度と正の強い相関を持つ。逆に微粒子の排出指数 EI_{PE} は火炎温度との間に負の相関が認められる。しかし、酸素濃度を一定に保ち二酸化炭素を混入した場合には、断熱火炎温度の低下にともなう微粒子の減少が認められ、この相関は認められない。 CO_2 の添加による燃焼および微粒子への影響については、今後十分な検討が望まれる。

おわりに、実験の遂行にあたり本学学生 秋間和洋君(現(株)本田技術研究所)の協力を得た。ここに感謝の意を表す。なお本研究の一部は、日本機械学会 RC 86(主査 松岡 信)および昭和 63 年度文部省重点領域研究補助金によった。

文 献

- (1) 佐藤・ほか2名, 自技論, No. 35(1987), 36.
 - (2) 飯田・ほか3名, 自技論, No. 40(1989), 41.
 - (3) Iida, N., ほか1名, *SAE Trans.*, 880424(1988).
 - (4) 池上・ほか2名, 機講論, No. 730-10(1973).
 - (5) Sawyer, R. F., ほか2名, *AGARD*, CP-125(1973).
 - (6) 宮本・ほか1名, 内燃機関, 18-224(1979), 9.
 - (7) 村山・ほか2名, 機論, 44-381(1976), 1706.
 - (8) Whitehouse, N. D., ほか1名, *SAE Paper*, No. 770410(1977).
 - (9) Orikara, C. and Borman, G. L., *SAE Paper*, No. 750468(1975).
-