

機関番号：34406

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21810034

研究課題名（和文）吸気への成分注入を用いた新規PM・NO_x後処理技術の開発研究課題名（英文）The Development of Novel Aftertreatment System for NO_x and PM Using Injection of Exhaust Gas Components into Engine Intake

研究代表者

吉田 恵一郎 (YOSHIDA KEIICHIRO)

大阪工業大学・工学部・講師

研究者番号：80549048

研究成果の概要（和文）：

高濃度の一酸化窒素 (NO) をディーゼルエンジンの吸気に吸入することで、NO_x と CO の発生を抑制することが出来、さらに単位出力当たりの燃料消費量をわずかに低減できることを見出した。そして、温度スイング吸着 (TSA) と組み合わせて、排気ガス中の NO_x から高濃度 NO を生成するシステムを構築し、吸気への高濃度 NO の注入によって、実際に排気ガス浄化を行うことができた。本手法は燃費増加や還元剤購入による運転コストの増加を伴わないため、ディーゼルの低燃費性をより生かせる技術であり、社会的意義は大きいと言える。

研究成果の概要（英文）：

It was found that NO_x and CO are reduced by the injection of NO highly concentrated into an engine intake. The injection was also found to slightly reduce the specific fuel consumption of the engine. Moreover, the exhaust-gas purification system for a real engine was developed with a TSA that made highly concentrated NO from NO_x in exhaust gas. The purification of the exhaust gas succeeded with such the system. Because is not accompanied with the increase in fuel consumption or purchasing cost of reducer chemical, this technique is the one that can utilize the high thermal efficiency of diesel engines and has a large social meaning.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2009年度 | 1,070,000 | 321,000 | 1,391,000 |
| 2010年度 | 810,000 | 243,000 | 1,053,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 1,880,000 | 564,000 | 2,444,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：環境技術・環境材料

キーワード：ディーゼル、排気ガス、窒素酸化物、粒子状汚染物質、吸着、TSA、燃料消費率、後処理

1. 研究開始当初の背景

自動車、建設機械、発電機、船舶に広く使用されるディーゼルエンジンは、高い熱効率のため、化石燃料の節約、CO₂排出削減に効果

的であり、今後さらなる普及が予想される。しかし、ディーゼルエンジンには窒素酸化物 (NO_x = NO + NO₂ とする) や微粒子状物質 (PM: particulate matters) が発生しやすいとい

う短所がある。これらは、酸性雨や光化学スモッグの原因となり、人体への悪影響も考えられるため、年々厳しい規制値が設定されてきている。一般にエンジンの燃焼を精密に制御することで従来は規制をクリアしてきたが、今後のより厳しい規制に対しては後処理による排気ガス浄化が必要になると考えられる。

排気ガス後処理技術としては、PM に対してはセラミックフィルタでろ過した上で、間欠的に排気ガスを昇温し、フィルタ上に蓄積された主成分の炭素を燃焼するという方法が一般的である。NO_x に関しては、ディーゼルエンジンは空気過剰条件で作動するため、三元触媒による処理は不可能という理由から、尿素を還元剤として供給し、触媒上で NO_x を還元分解するという手法（尿素 SCR）や、希薄燃焼時に NO_x を蓄積しておき、間欠的にリッチバーン状態を作り出して触媒によって還元分解する手法（LNT: lean NO_x trap）が研究されている。しかし、尿素 SCR の場合は尿素を購入する分ランニングコストが上昇する。またアンモニア流出などの問題がある。LNT の場合には触媒が硫黄被毒を受けやすく、また燃費悪化の懸念もある。そのため、これらはまだ完全には満足の出来る技術とはいえない。重油を燃料とする場合には硫黄対策は重要である。

そこで、本研究代表者は、本課題研究を実施する以前から、NO_x 処理技術のブレイクスルーを目指し、NO_x を一旦、吸着剤に吸着・蓄積し、間欠的にこれを脱着、窒素雰囲気の下で非熱プラズマ（NTP: Nonthermal Plasma）によって還元・大気中に放出する方法を考案し、実現可能性を実証してきた。

この方法において還元剤として用いる窒素ガスは、大気中から選択透過膜で生成することができる。あるいは、非常に安価な液体窒素を用いても良いので、尿素 SCR のような課題は小さい。また、硫黄被毒の問題も小さいので、重油を燃料とする産業用の利用分野で広く使用できる可能性がある。（この方式では、吸着剤の温度を上下させることでガスを吸脱着する。このようなシステムは温度スイング吸着（TSA）と称するが、本報告書では以後、この用語を用いる。）

ところで、蓄積された NO_x の脱着のために加熱を行うので、再度 NO_x を吸着するためには、吸着剤を冷却する必要がある。そのため、本研究代表者はエンジン吸気の負圧を利用して大気を吸着層に導入して冷却する方法を考案し、後処理システムに組み込んでいた。この吸着塔の冷却法では、吸気に熱脱着した水蒸気も導入されるため、エンジンでの NO_x 発生量が低減される。ところが、排気ガス中の一酸化炭素（CO）と総炭化水素（THC）濃度が予想に反して、あまり増加しなかった。

水蒸気の導入は燃焼温度の低下を引き起こし、通常は CO や THC など燃料の不完全酸化物の増加を招くが、この場合は導入された NO_x（この場合、NO が大部分）が何らかの反応経路で未燃分を酸化する方向に働いていると考えられた。PM は燃料の不完全燃焼から生じるので、この現象は PM の抑制にも寄与していると予想された。

もし、NO_x の吸気への導入を積極的に用い、PM を抑制することができれば、外部から何ら還元剤を供給することなく、NO_x と PM の両方の低減を同時に実現できることになる。本件研究代表者は、このような技術を実現すべきであると考え、この課題研究を行うに至った。

なお、ある種のガスを「積極的に」吸気に導入することをより適切に表現するため、以後は「導入」ではなく「注入」という用語を用いる。

2. 研究の目的

研究の全体構想は、ディーゼルエンジン排気ガス中の窒素酸化物（NO_x）および微粒子状物質（PM: particulate matters）をゼロに近づけるために、エンジン吸気への高濃度ガスの注入と TSA を活用した排気ガス浄化システムを完成させることである。TSA の熱源としてはエンジンの排熱を利用する。

吸気へ注入するガスとしては、本課題研究開始以前に考えられていた水蒸気、NO_x の他に、酸素ガスやオゾンも考えられる。酸素ガスやオゾンは、酸化性を持つため未燃物質である CO や PM を抑制するのに効果があると予想される。この研究全体の中での本課題研究の目的は、エンジン吸気に各種のガスを注入し、その排気ガスや燃料消費量への影響を把握するとともに、PM と NO_x を同時抑制できるような、注入ガス濃度条件を見出し、前記浄化システムの成立性を実証することにある。

3. 研究の方法

図 1 に、本研究が目指している排気ガス浄化システムの構想図を示す。まず、排気ガス中の NO_x は吸着塔 1 に吸着・蓄積されることで除去される。一方、一旦蓄積された NO_x はエンジン排熱による熱脱着によって濃縮される（吸着塔 2）。熱脱着された NO_x は少量の空気または窒素ガスによって塔外へと抽出される。この抽出ガスに含まれる高濃縮 NO_x と水蒸気によって、NO_x・PM を抑制する。場合によっては、吸気注入時にオゾンを混合して酸化性を高め、未燃物質である PM の抑制効果を高める。以上のような工程を吸着塔 1 と 2 とで定期的に切り替え、連続的な排気ガス処理を実現する。

本課題研究では小型の定置式ディーゼル発電機をモデルとして用いる。実験は防振・防音および換気を十分に施した室内で行う。

H21 年度中はガスボンベを用いてエンジン吸気へのガス注入を模擬して実験をおこなう。H22 年度には排気ガス処理システムの基本部分を製作し、浄化システムとしての成立性を調べる。

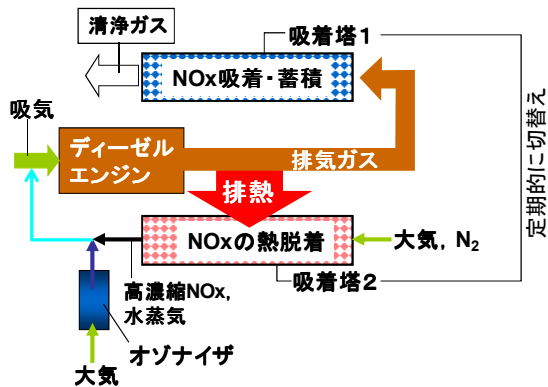


図1 本研究が目指す排気ガス浄化システムの構想

まず、エンジンへのガス注入に関する H21 年度の実験方法について説明する。

排気量 200cc の小型ディーゼル発電機を対象とする。一部改造を施して、燃料タンクを発電機の外に移し、マンメータによって、燃料の消費量を測定できるようにする。エンジンが消費する空気は実験室内から供給され、排気ガスは屋外へと排気される。エンジンの吸気ダクトに注入するガスとして NO をガスボンベからマスフローコントローラを通して供給する。あるいは、オゾナイザを用いてオゾンを提供する。場合によっては窒素ガスを用いて酸素濃度の調節も行う。さらに水をポンプによって供給し吸気ダクト内に噴霧する。これによって、エンジンに吸い込まれる水蒸気量を調節する。

排気ガスの測定項目としては、NO, NOx (NO+NO₂), O₂, CO, PM とする。PM 以外の成分はガス分析計で測定する。PM に関しては、排ガス主流からエアポンプでサンプリングし、メンブレンフィルタで PM を捕集する。捕集前後の重量差から、排気ガス中の PM 濃度を算出する。サンプリング配管はリボンヒータによって一定温度に加熱しておく。

次に、システム成立性に関する H22 年度の実験方法について述べる。本課題研究では、吸着塔を 1 体のみ用い、模擬する。作動条件としては、H21 年度の結果から導き出されたガス条件を用いる。すなわち、加熱・熱脱着の過程において、適した量の濃縮 NOx・水蒸気を供給できるようにする。その他の装置類と実験方法は H21 年度と共通である。実験装置の写真を図 2(a), (b) に示す。

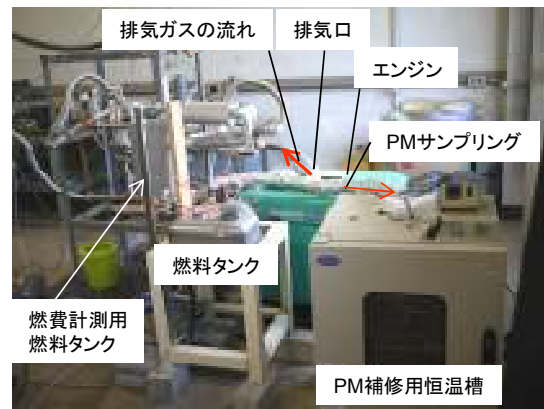


図 2 (a) 実験装置 (全体写真)

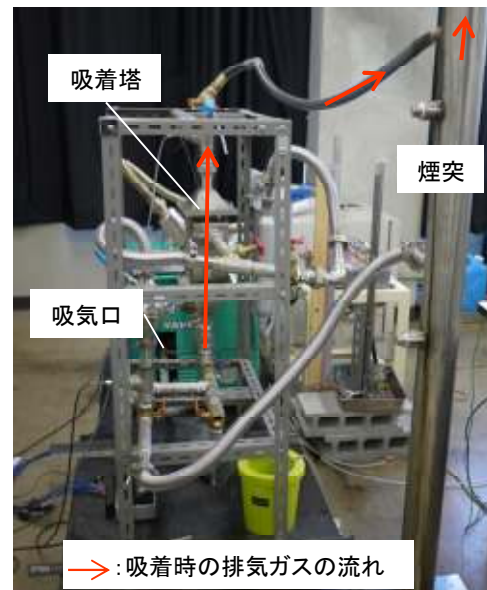


図 2 (b) 実験装置 (吸着塔周辺)

4. 研究成果

研究開始当初は、吸気ガス注入によって NOx が減少する原因を水蒸気に求めていたが、各種ガスの注入実験の結果、NOx (大部分は NO) そのものに NOx の発生を抑制する作用があることが分かった。水蒸気によっても NOx の抑制は確認されたが、CO が増加するという問題が大きかった。NO を注入する場合、CO はむしろ減少するため、NOx 抑制には、高濃度 NO の注入が、より効果的であるということが分かった。

図 3 に純度 99.999% の NO を吸気に注入した場合の代表的な結果を示す。このグラフはエンジン負荷を定格値 2 kW とした場合の結果を表す。横軸は注入した NO ガスの流量である。単位 slm (standard liter per minute) は、1 気圧、0°C でのガス体積に換算した体積流量を表す。エンジン排気ガス流量は約 300 slm であるので、例えば、NO 注入量が 0.1 slm の時、吸気 NOx (NO+NO₂) 濃度は約 350 ppm となる。吸気に注入された NO は排気ガスに混入

し、排気 NO_x (NO+NO₂)濃度を高めるが、注入された NO がそのまま混合された値よりは低くなる。図 3 縦軸の NO_x 低減率とは、注入された NO 質量に対して低減された NO_x 質量の割合を示す。例えば、NO_x 低減率が 1.0 ならば、NO が注入されても排気 NO_x 濃度が上昇しないことを示す。実験から、注入量 0.1~0.72 slm の時、注入量に対して約 35%の NO_x が抑制されることが分かった。0.1 slm 以下の注入量では NO_x 低減率が低くなることから、注入 NO_x 量を 0.1slm 以上に保つことが、処理装置の NO_x 注入条件と言える。

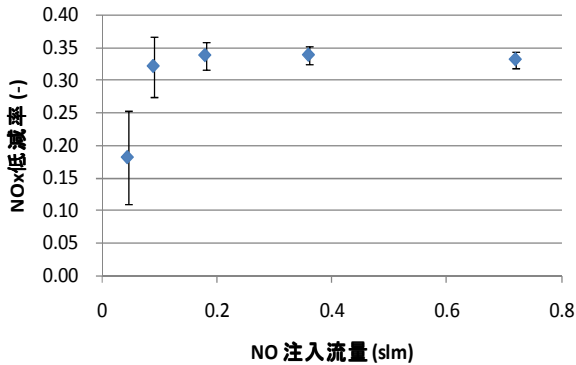


図 3 吸気への NO 注入による発生 NO_x の低減

この結果は、図 1 のようなシステムを用いて、排気ガス中の NO_x を一旦捕集し、少量の空気や窒素ガスとともに脱着させて吸気に注入すれば、エンジンにおいて発生する NO_x 量と抑制される NO_x 量が均衡する可能性を示唆する。この手法の考え方は、従来から存在する EGR (exhaust gas recirculation) とは全く異なる。EGR では NO_x による NO_x 発生抑制の効果はほとんど見られない。なぜなら、EGR によって吸気に注入される NO_x 量は非常に小さく、図 3 から分かるようにその様な場合の NO_x 低減率は零に近づくからである。また、EGR では、吸気酸素濃度の減少により NO_x 発生を抑制する効果が顕著だが、酸素濃度が低下すると CO などの未燃物質が増加する。それに対し、本課題研究の NO 注入では CO は減少する。

エンジン内での NO 発生は高温による窒素の酸化によると考えられており、ある程度理論が確立しているが、NO を注入することで、その発生速度が低下するということが、反応速度の理論計算から示唆された。この結果については論文投稿し、現在審査中である。

一方、PM 発生量については、O₂、オゾン注入によっては顕著な違いが見られず、NO 注入の場合はやや増加する傾向が見られた。従って、現時点では吸脱着システムとは別途に処理システムを導入する必要があることが分かった。PM 発生機構は未だ世の中で十分に解明されていない項目であり、今後、理論的

な研究を進めていきたいと考える。

図 4 に NO および酸素ガス注入と単位出力当たりの燃料消費量の変化率の関係を示す。注入量 0.72 slm の時、燃料消費量は約 0.4% 減少した。酸素ガスの注入によっても燃費はわずかに抑制されるが、NO よりも明らかに効果は小さい。また、NO と窒素ガスを同時に注入しても燃費改善がなされることが分かる。エンジン内の NO 生成は吸熱反応であることから、NO_x 発生が抑制されると燃焼熱が節約される。また、NO 注入による CO 発生抑制 (0.72 slm の NO 注入で約 250 ppm の減少) が、CO の CO₂ への酸化によると考えると、燃焼熱は増加する。NO_x および CO 減少量から理論的に予想される燃費減少量は、実験結果とほぼ一致する。0.4%の燃費減少は一見わずかであるが、従来の NO_x 処理技術では、%オーダーの燃費増加か、あるいは尿素水購入のための%オーダーのランニングコスト上昇が伴うことを考えれば、無視できない燃費改善効果であると言える。

なお、総炭化水素 (THC) も NO の注入によって減少したが、CO の減少量に比べるとわずかであった。

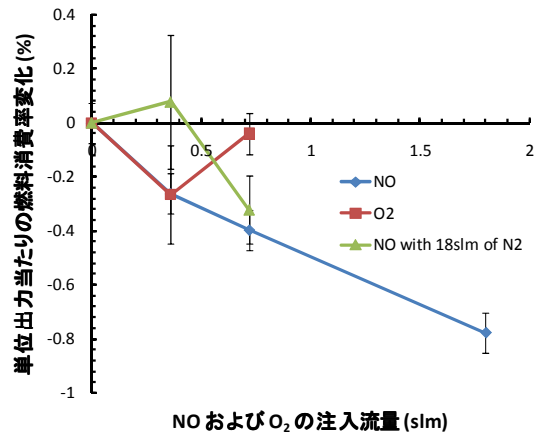


図 4 NO および O₂ 注入による燃料消費量の変化

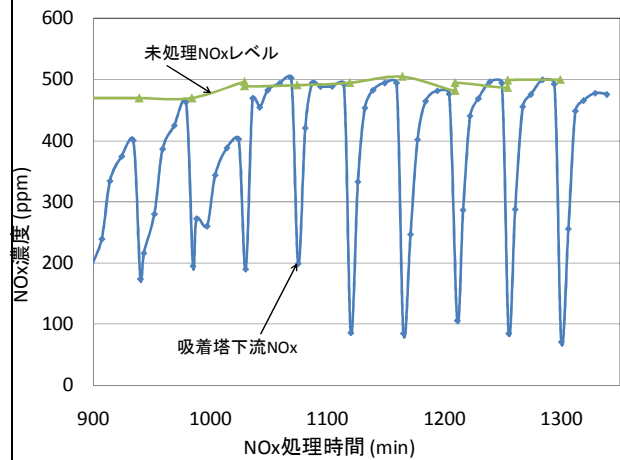


図 5 吸脱着システムによる NO_x 処理実験

図5に1つの吸着塔で図1のシステムを模擬した排気ガス NOx 処理実験の結果を示す。吸着剤の嵩(かさ)体積は 2.3L である。エンジン負荷は 1.5kW とした。吸着塔が脱着過程にある時、少量の窒素ガスとともに脱着した高濃度の NOx をテドラーバッグ(化学的に不活性な材質で作られた捕集袋)に蓄え、それを次の吸着過程においてエンジン吸気に注入する。NOx の吸気への注入量は約 0.5 s1m となっており、H21 年度の研究から導いた前記の条件に合致する。図5は、吸着過程における吸着塔下流で測定された NOx 濃度を連続的に表示したものである。横軸の時間は2つの吸着塔を交互に作動させた場合の連続運転時間に相当する。吸着過程においては、エンジン吸気に注入された高濃度 NOx によって、排気 NOx 濃度が高まっているが、それでもなお、吸着塔下流の NOx 濃度は減少している。吸着塔下流の NOx 濃度が上下しているのは、各回の吸着過程において、吸着剤の吸着能力が NOx の蓄積とともに低下するためである。吸着能力はグラフには表されていない脱着過程によって回復し、下流 NOx 濃度は再び低下する。未処理の NOx レベルと比較すると、吸着塔下流の NOx 排出量は平均で 20%以上減少しており、確かに NOx 処理に成功している。処理効率は吸着塔の容積を大きくすることにより上昇すると考えられる。この処理実験では、脱着時に使用する少量で安価な窒素ガス以外に何ら追加的に外部から還元剤やエネルギーを与えておらず、本手法の狙い通りの結果と言える。

以上の成果を以下にまとめる。

- (1) 目標：PM と NOx を同時抑制できるような、NOx の濃縮度、オゾン、水蒸気濃度の条件を見出すこと。→吸気注入によって PM を有意に抑制する条件は本研究の範囲では存在しなかったため、処理のためには別途のシステムが必要であることが分かった。一方、NOx の抑制については、NO の注入が、水蒸気やオゾンよりも適しており、300 s1m の排気ガス流量に対して 0.1 s1m 以上の NO の注入量が最適条件であることを見出した。さらに、NO 注入が燃費低減効果を持つことを見出した。
- (2) 吸脱着と吸気へのガス注入を併用した排気ガス処理システムの成立性を実証すること→(1)で見出した NO 注入条件を満たす吸脱着システムを構築し、NOx 処理が可能であることを実証した。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計3件)

- ① 吉田 恵一郎, ディーゼルエンジン吸気への排ガス成分濃縮注入の燃費および排ガス組成への影響, 平成 22 年電気関係学会関西連合大会, 2010 年 11 月 14 日, 立命館大学びわこ・草津キャンパス(滋賀)
- ② 吉田 恵一郎, 桑原 択也, 黒木 智之, 大久保 雅章, ディーゼルエンジン吸気への排ガス成分濃縮注入の燃費および排ガス組成への影響, 第 21 回内燃機関シンポジウム, 2010 年 11 月 11 日, 岡山大学創立五十周年記念館(岡山)
- ③ 吉田 恵一郎, 桑原 択也, 黒木 智之, 大久保 雅章, ディーゼルエンジン吸気への排ガス成分濃縮注入の燃費および排ガス組成への影響, 第 20 回環境工学総合シンポジウム, 2010 年 6 月 28 日, パシフィコ横浜(神奈川)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 恵一郎 (YOSHIDA KEIICHIRO)
大阪工業大学・工学部・講師
研究者番号：80549048

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし