

3. 自動車から排出される亜酸化窒素の排出傾向について

—最近の技術革新による排出特性の変化—

環境研究領域 ※鈴木 央一 石井 素 山本 敏朗

1. はじめに

亜酸化窒素（または一酸化二窒素、 N_2O ）は、有害性は低いものの、 CO_2 の約300倍に上る地球温暖化効果を有すると同時に、上空で分解される過程でオゾン層を破壊し、米国海洋大気局（NOAA）の試算ではフロン対策が進んだ現在最も影響度が大きいとしている。運輸分野における N_2O の温暖化寄与率は、メタンを上回り CO_2 に次ぐものとなっているが、近年着実な改善傾向にあり、2009年度の排出量は CO_2 換算2,667Ggで、温暖化ガス（GHG）に占める寄与率は1.1%強である。この N_2O の低減については、ガソリン乗用車における、排出ガス規制強化にともなう冷始動対策や空燃比制御の精緻化などにより、 N_2O 排出が大幅に低減した影響が大きく、その状況についてフォーラム2008にて報告¹⁾した。しかし、その後現在に至る3年間で取り巻く状況は大きく変化している。

米国では、オバマ大統領が2009年に、地球温暖化防止に真剣に取り組み、その分野から産業の活性化を図るグリーンニューディール政策を打ち出した。GHGを健康や財産に脅威を及ぼしうる危険物質とみなし、環境保護庁（EPA）などでは新たな燃費基準を定めた。 N_2O とメタンに関しても2015年以降測定を義務づけ、基準値も設けている（乗用車クラス）。

一方、国内に目を転じると、近年の地球温暖化防止に対する関心の高まりなどから、燃料消費率（燃費）改善技術の進歩が顕著にみられる。中でも電気ハイブリッド自動車（以下、「HEV」という）は、2010年には車種別の年間販売台数が1位になるなど、急速に普及が進んでおり、 N_2O 排出動向を予測していくにあたり、その存在を無視できなくなっている。また、ディーゼル車においては、ポスト新長期（'09-'10）排出ガス規制が施行され、尿素SCRシステム（以下、「尿素SCR」という）がディーゼル粒子フィルタ（DPF）

と併用されるなど、 N_2O 生成に影響する排気後処理装置の構成に変化がみられている。

このような昨今の急激な技術革新が N_2O の生成と排出にどのような影響を及ぼすのか、最新のデータを用いてみていくこととしたい。

2. N_2O 生成、排出原因と最新技術の特性による N_2O 排出変動の予測

2. 1. ガソリンHEV

ガソリン車における N_2O 生成にはいくつかのプロセスがあるが、ポイントとなるものとして燃料過濃状態（リッチ）で生成したアンモニアが、希薄状態（リーン）で酸化されて N_2O となる過程がある。この反応はリッチとリーン両方が必要であることから、当量比に制御されている空燃比に変動がある場合に起こる。また、触媒温度が常用温度域よりも低い（約350℃以下）場合に起こることから、 N_2O 生成のポイントとしては、触媒温度低下と空燃比変動の2つが挙げられる。その観点から、 N_2O 生成に関して最新のHEVのうち代表的なものを考慮した場合

有利な点：

- ・アクセル開度の急変などによる負荷変動の一部を、モータで補うことが可能となる。
- ・減速時やアイドルなど触媒温度が低下しやすい状況ではエンジンを停止させることが行われ、エンジン作動時は負荷が高い状態で運用される。

不利な点：

- ・高膨張比エンジンを採用しているため、排気温度が全般的に低下する。
 - ・エンジンの停止と始動の回数が増加することから、瞬時的な空燃比変動が避けられない面がある。
- と、増減両方の可能性があり得ることから、動向を予測していくには、実測データの取得が不可欠となる。

表1 試験車両諸元（ガソリン車）

記号	A	B	C	D
排気量 (L)	1.5	2.0	1.5	1.5
後処理装置	なし	3WC	3WC	3WC
適合規制(年)	'78	'78	'78	'00
形状	バン	ワゴン	セダン	セダン
記号	E	F	HEV1	HEV2
排気量 (L)	3.0	1.5	1.8	1.3
後処理装置	3WC	3WC	3WC	3WC
適合規制(年)	'05(4☆)	'05(4☆)	'05(4☆)	'05(4☆)
形状	バン	ハッチバック	ハッチバック	ハッチバック

2. 2. 尿素 SCR ディーゼル車

尿素 SCR は、尿素水から生成されるアンモニアを用いて NOx を選択的に還元するもので、最新ディーゼル車における NOx 低減後処理の主流となっている。しかし、新長期排出ガス規制適合の尿素 SCR 車では非常に高い N₂O 排出がみられることを既報で示している。ただし新長期規制適合車は、2010～11 年度で生産が終了することから、今後台数は増加しない。今後の動向は、ポスト新長期規制適合尿素 SCR 車における N₂O 排出が鍵となる。尿素 SCR における N₂O 生成も、アンモニアの酸化に由来するものが多く、SCR 触媒から脱離したアンモニアが、後段の酸化触媒で酸化されて N₂O となる。既報¹⁾ ではポスト新長期規制が開始されると、より積極的な NOx 浄化が必要のため、尿素水添加量の増加などが見込まれ、さらなる N₂O 増加の懸念を著している。また、規制強化にともない、従来は排他的に用いられていた尿素 SCR と DPF の併用など、後処理装置構成に変化が見られ、N₂O 生成に影響を及ぼすことが想定される。

3. 測定結果

3. 1. HEV を含むガソリン車

HEV における N₂O 排出傾向を調査するにあたり、製造者の異なる代表的な HEV2 台について試験を行った。比較対象として既報で使用した車両も含めた諸元を表 1 に示す。車両 A は後処理装置を持たないので、燃焼による N₂O 排出の水準を示すものといえる。車両 E と F は同じ新長期規制適合だが、F の方が 3 年以上後に登録された車両で、より燃費向上を意識した設定となっていると予想される。

図 1 は、各試験車の N₂O 排出について比較したものである。過去に行った試験では評価試験サイクルとして 11 モードと 10-15 モードとの重み付け平均値を採用したが、新しい車両では、JC08 モードで測定を実施した。両評価モードの関係を示すものとして、車両 E においては、両方を実施しその結果を掲載した。図より、新短期規制以降の車両においては、N₂O 排出が大幅に減少しており、その中で車両 E では極めて低い排出となっているのに対し、車両 F および HEV ではそれよりやや増加した。その結果、環境省温室効果ガス排出量算定方法検討会が実測結果を基に設定した新長期規制車の排出源単位を、いずれも超過する水準となっている。HEV のみならず、近年のガソリン

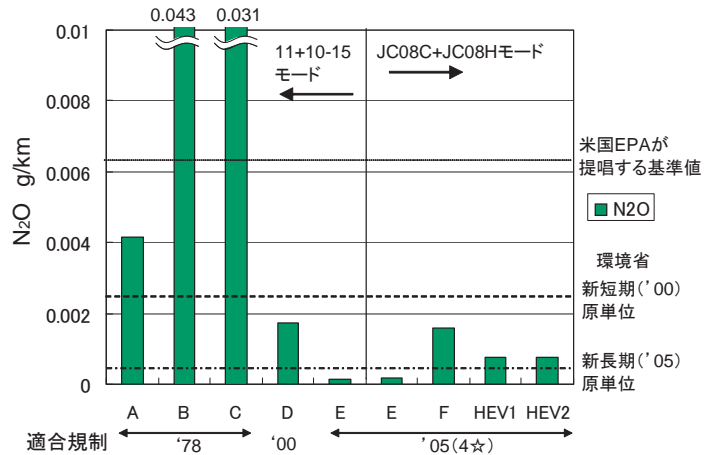


図1 各車両の N₂O 排出量の比較

車においては、燃費向上のため、燃料カットの増加やアイドルストップなどが進められており、空燃比変動の起こりやすくなる要素があるとみられる。したがって今後、原単位の見直し等を考慮していくべきである。一方、図中には米国で公表されている基準値も示した。評価モードが異なるので単純な比較はできないものの、新短期規制以降の乗用車であれば十分満たせるレベルであり、その基準値を考慮して、新たな処置が求められることは必要ないといえる。

図 1 で HEV において N₂O 排出がやや増加することを示したが、HEV では同時に燃費の大幅な向上がみられ CO₂ 排出は大幅に低減している。したがって N₂O の排出量増加以上に、GHG に対する N₂O 寄与率が高まる恐れがある。そこで、排出 N₂O の GHG に対する寄与率を比較することとした。

図 2 は、各車両の N₂O の GHG 排出全体に対する寄与率を比較したものである。N₂O が 5%前後の寄与率を有する昭和 53 年規制車に対し、新短期規制以降の車両はその 1/10 以下である。2 台の HEV は車両 E より N₂O の寄与率が高まるが、それでも約 0.3%に止まっている。N₂O の寄与率は全体で 1.1%であることから、HEV 等の増加がただちにトータル N₂O の増加につながることはない。ただし、これまでの N₂O 減少傾向をやや抑制することが予想される。

3. 2. ポスト新長期規制の尿素 SCR 車

ポスト新長期規制適合の尿素 SCR 車として、表 2 に示す諸元の車両およびエンジンをを用いた。車両 A は一般的なカーゴトラックであるのに対し、車両 B1、B2 としたのは、エンジンベンチ試験で同一のエンジンに異なる車両諸元(車両 A と同クラスのトラックおよびそれ以上の重トラクタ)を設定して測定したものである。評価モードとしては、認証モードである JE05 モードと 2016 年規制以降採用が予定されている WHTC とした。

図 3 は、各車両の各モードにおける N₂O 排出率を比較したものである。図中には GHG の 5%寄与率となる水準を記載したが、それを概ね下回る結果となっており、N₂O の寄与率が 15~20%にも及んだ新長期規制車からは大幅な減少傾向となった。その理由は後述するが、本結果から得られる課題として、車両 B1 と B2 で、WHTC では同一ながら、JE05 モードで 2 倍以上の差がみられたことが挙げられる。WHTC は、試験条件がエンジンの最大トルクなどにより決定されるため、車両の違いを反映できない。それに対して JE05 モードでは、車両の諸元を含めて試験条件が決定されるため、当該車両に即した排出性能が得られる。今回の試験で、B1 と B2 では試験時の車両重量が約 8t 異なることなどにより、N₂O 排出率が 2 倍以上変化する結果となった。近年では、ダウンサイジングとして、同一エンジンをより大きな車両に搭載するケースが多くみられる。したがって車両 B2 で高い N₂O 排出となったことは、今後 WHTC を用いて N₂O を評価するとした場合に過小評価する恐れがある。

図 4 は、今回の試験車の結果を従来車のものと GHG として比較したものである(なお、メタンはほぼゼロである)。ポスト新長期規制車で大幅に N₂O の寄与が減少しているが、まだ後処理装置を持たない車両よりは明らかに高い水準であり、改善されたといっても終息しつつあるとはいえない状況にある。

N₂O 排出の要因解析として、図 5 に、車両 B1 (=B2) における WHTC (ホットサイクル) での N₂O 排出濃度と触媒出口温度の時間履歴を示す。WHTC では試験が進むにつれて車速の高い走行を再現することから、1350 秒付近より触媒出口温度が大きく上昇する。その部分を黄色の帯で示すが、同じ時間帯で相対的に高い N₂O 排出が観察される。ゼオライト系の SCR 触媒では、アンモニア等還元剤を触媒上に吸着させるこ

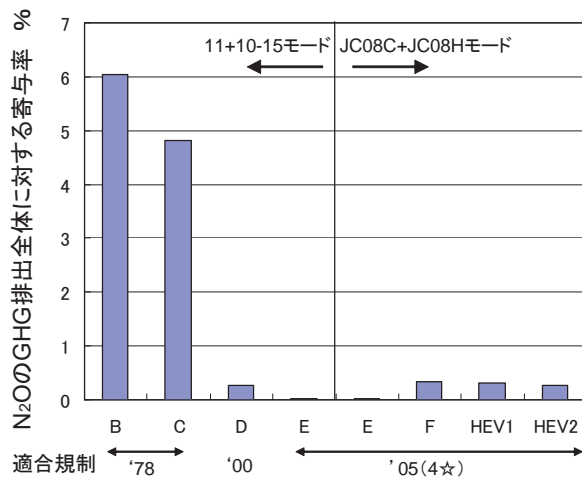


図 2 各車両の N₂O 排出の GHG 排出に対する割合

表 2 試験車両諸元 (ディーゼル車)

識別記号	A	B1	B2
排気量 L	9.8	10.8	←
最高出力 kW/rpm	279/1800	302/1800	←
最大トルク Nm/rpm	1800/1200	1814/1200	←
燃料噴射システム	Common rail	Unit injector	←
後処理装置	尿素SCR+DPF	尿素SCR+DPF	←
車両総重量 kg	24980	24405	37204
試験時車両重量 kg	17375	16585	24662
適合排ガス規制 (年)	'09	'09	←

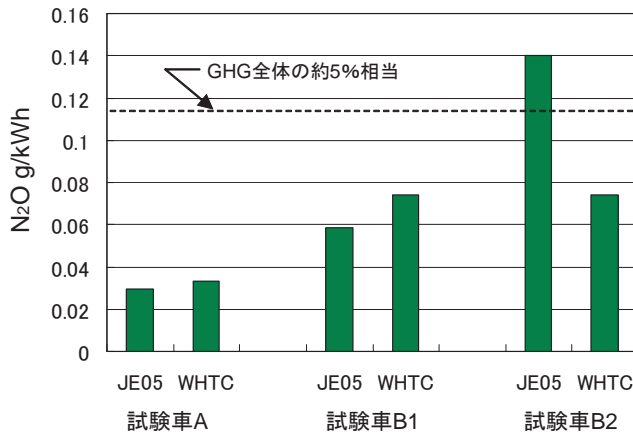


図 3 各車両の N₂O 排出率の比較

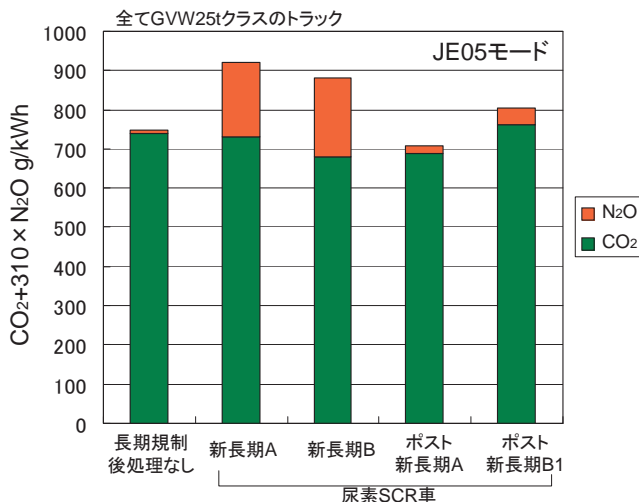


図 4 大型トラックにおける GHG 排出比較

とで NO_x 浄化性能が向上するため、吸着を前提とした制御が行われる。しかし、触媒上の吸着許容量は、温度が上昇すると減少するため、短時間で触媒温度が上昇した場合、吸着していたアンモニアがスリップするケースが起こる。そのアンモニアが後段酸化触媒で酸化されて一部が N₂O となって排出される。このような触媒温度変化に着目して、新長期規制車とポスト新長期規制車について比較を行うこととした。

図 6 は、車両 A と過去に試験を行った同等諸元の尿素 SCR 車における JE05 モードでの排気管出口温度を比較したものである。車両 A では、始動直後に約 200°C まで上昇した後は、±20°C の範囲の限られた変化に止まる。新長期規制車と比較した場合、とくに 1500 秒前後における高速走行時にその違いが顕著になる。新長期規制車では、それ以前の低速走行により触媒温度が低下した状態から高速走行に移行して 100°C 以上上昇していくのに対し、車両 A ではそこに至るまでの温度低下が少ない一方で、高速走行による温度上昇の開始が 100 秒以上遅れた上で変化幅が大きく減少している。このような違いが SCR 触媒からのアンモニアスリップと、それによる N₂O 生成に変化をもたらしたとみられ、N₂O 排出が低減した一つの理由とみられる。なお、SCR 触媒温度変化が抑制された理由は、車両 A では、ポスト新長期規制に適合するため、熱容量の大きい DPF が SCR 触媒上流に配置されたことによるものである。

この尿素 SCR 車における N₂O 排出傾向の変化は、ガソリン車において昭和 53 年規制に適合するための三元触媒の導入が N₂O 排出の急増を招き、その後の規制強化で急激に減少したことと重なる。2016 年にさらなる規制強化が予定されているが、それに向けて改善傾向となるのか、燃費向上技術の導入などで増加に転じるのか、引き続き注視していく必要がある。

4. ま と め

ガソリンハイブリッド (HEV) 車の増加やディーゼル車におけるポスト新長期規制の施行なども含めた最新の N₂O 排出動向について以下にまとめる。

(1) HEV を主とした近年の燃費向上技術が盛り込まれた車両では、空燃比のずれが起こる頻度の増加が見込まれ、N₂O 排出がそれ以前のものより増加する傾向がある。しかし GHG 排出の 0.3% 前後の寄与に止まり、影響は限定的で、米国で提唱されている

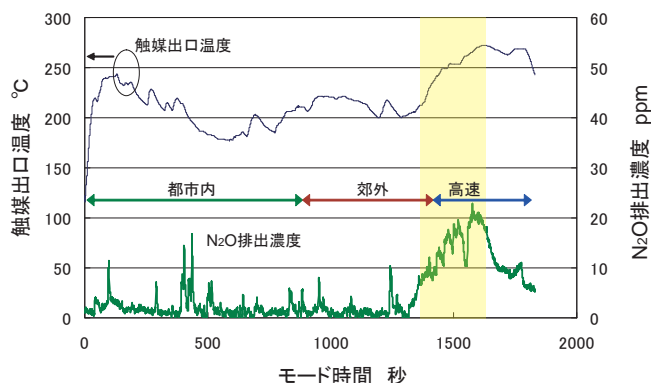


図 5 WHTC における N₂O 排出濃度と触媒出口温度

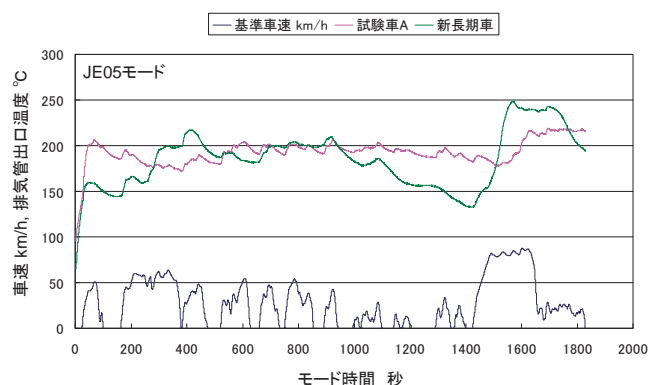


図 6 新長期およびポスト新長期規制尿素 SCR 車における JE05 モードでの排気管出口温度の比較

基準値を意識する必要などはないとみられる。

- (2) ポスト新長期規制適合の尿素 SCR 車では、新長期規制のものよりも大幅に N₂O 排出は抑制され、GHG 排出の 1~6% 程度の寄与率となったが、依然として後処理装置のない車両より増加しており、引き続き注視していく必要がある。
- (3) 上記 N₂O 排出抑止理由の一つとして、DPF を搭載したことによる熱容量増加で SCR 触媒温度の変化が小さくなったことが挙げられる。また課題として、同一エンジンを異なる車両で試験した場合には 2 倍以上も異なる結果が得られたことから、評価を行うにあたっては、車両諸元等を反映させた形が望まれる。

5. 参考文献

- (1) 鈴木ほか, 交通研フォーラム 2008 講演資料, <http://www.ntsels.go.jp/forum/2008files/08-03k.pdf>