

最新ディーゼル排出ガス対策技術の違いが実使用時の排出ガス特性に及ぼす影響

- 3台の新長期規制適合車を用いた実験結果とその分析 -

環境研究領域

鈴木 央一

山本 敏朗

藤森 敬子

1. はじめに

重量ディーゼル車における新長期排出ガス規制(以下、05年規制という)は、制定当時、規制値的に世界一厳しい規制とされたほか、試験モードの変更など、従来にない大きな変更を伴うものであった。これら排出ガス規制強化に対応するため、エンジンにおける燃焼改善に加えて、後処理装置が不可欠となっている。メーカーや車両により、後処理装置も含む排出ガス低減技術およびその制御方式は、多様化している。こうした中で、実車両における排出ガス性能がどのように変わり、どのような特性があるのかについて、規制値を用いた相対比較に止まらない実測データを用いた定量的な比較解析や動向調査を行った例は少ない。

今後低公害車のさらなる普及が進むと、様々な角度からみた現実の使用状態で、低排出ガス性が維持できているか、真の環境改善に向けてどういった視点や評価法が必要か、といったいわば「量より質」の議論に移行していくものと考えられる。そうした動きの中で交通研が先導的役割を果たして行くには、現状の排出ガス性能に対する特性や課題を把握しておくことがスタートラインとなる。この観点から、最新ディーゼ

ル車を用いた排出ガス等の計測と分析を行い、性能の現状と課題になりうる点について紹介する。

本稿のデータは、国土交通省からの受託調査「重量車オフサイクルにかかる調査」および「新たな排出ガス検査方法に関する調査」、そして環境省予算による「触媒付きディーゼル車増加に伴う沿道 NO₂ 濃度の影響評価に関する研究」において実施した実車試験から、本目的に適したものを抽出し、まとめている。

2. 試験車両について

表1に使用した供試車両の諸元を示す。車両重量クラスは同一ではないが、いずれも JE05 または D13 モードで認証試験を行う重量車である。各車識別記号には型式の一部を用いて、適合排出ガス規制を示した。05年規制適合車は3台あり、ADG1 および 2 は製造者が異なるが、ともにクールド EGR により NO_x 低減を行い、PM 低減には連続再生式 DPF を採用している。ADG3 はこれらと対照的に尿素 SCR を採用しており、DPF は装着していない。PH1 は PM-NO_x 同時低減後処理装置を装着しており、03年規制値よりも PM85%、NO_x75%という大幅な排出ガス低減

表 1. 試験車諸元表

Vehicle ID	ADG1	ADG2	ADG3	PH1	PB1	PB2	KL1	KC1
Engine type	L4, DI	L6, DI	L6, DI	L4, DI	L6, DI	L4, DI	L6, DI	L6, DI
Intake air management	TCI, EGR	TCI, EGR	TCI, EGR	TCI, EGR	NA, EGR	TCI, EGR	TCI, EGR	NA
Displacement L	5.19	7.7	13.1	4.0	7.2	4.0	13.1	8.0
Max. power kW/rpm	140/2600	199/2700	257/1800	110/3000	140/2900	110/3000	272/1900	147/2900
Injection system	Common rail	Common rail	Unit injector	Common rail	Common rail	Common rail	Unit injector	Jerk in-line
Aftertreatment device	DOC+DPF	DOC+DPF	Urea SCR	DPNR	DOC+DPF	DOC+DPF	None	Retrofit DOC
GVW kg	7985	12265	21980	6035	7995	4435	24930	7965
Total driving distance km	8400	16600	4925	15000	1430	33500	143400	15100
Emission regulation	'05	'05	'05	'03(4)*	'03(4)	'03(4)	'99	'94

* PM85%減(4)に加えてNO_x75%減

を達成している。これら最新レベルの車両に対して、PB1 および 2 は、EGR および連続再生式 DPF を用いた 03 年規制 4 適合車である。KL1 は、EGR のみを行う 99 年（長期、他と同じ GVW<12t では 98 年）規制適合車であり、KC1 は、過給も EGR もコモンレール式噴射系も持たない 94 年（短期）規制のものである。KC1 は、制御因子がほとんどないため、従来レベルを代表するほか、有力な排出ガス低減制御を行わない場合の運転条件などの違いによる基本的な NOx 等排出傾向をみるのにも有効である。

試験はすべて、実車両を用いたシャシダイナモ試験である。排出ガス測定には、試験法に準拠した機器を用いた。NOx 中の NO と NO2 の計測は FTIR 分析計を用いた。シャシダイナモ試験にて求められる仕事率は、車輪がローラを駆動した仕事であり、試験法評価値で用いるエンジン仕事とは異なる。JE05 モード試験法ではデファレンシャルギア伝達効率を 0.95、トランスミッション伝達効率を直結段では 0.98、非直結段では 0.95 としている。エンジン仕事はローラ仕事を、これら 2 つの伝達効率の積から求めた係数で除したものとした。その係数は、変速段のうち直結段のみを用いる D13 モードにおいては 0.93、それ以外も使用する JE05 モードでは 0.91 としている。なお、DPF 装着車における試験評価は、いずれもすす再生が行われていない状況で実施している。

3. 試験結果と考察

3.1. 認証試験モードにおける 05 年規制適合車と従来規制車との違い

3.1.1. NOx、PM の基本的な排出特性

図 1 に、各車両の JE05 および D13 モードでの NOx および PM 排出率を示す。CO、HC は、規制値より大幅に低く、問題ないレベルだった。

まず、PM 排出については、いずれも当該車両の平均規制値と同等かそれを下回り、とくに DPF 装着車では十分に低い値を示した。JE05 モードにおいて、ほとんどの車両で D13 モードと同等以下となったが、KL1 においてのみ、JE05 モードのほうが高い排出率である。これは古いターボ車である KL1 では、加速時のターボラグに対する制御等が十分でないと思われる、より古いながら後付酸化触媒を有する KC1 よりも高い値となった。ただし、KL1 は他車よりも積算走行距離が飛び抜けて長く、劣化といった要素も多少

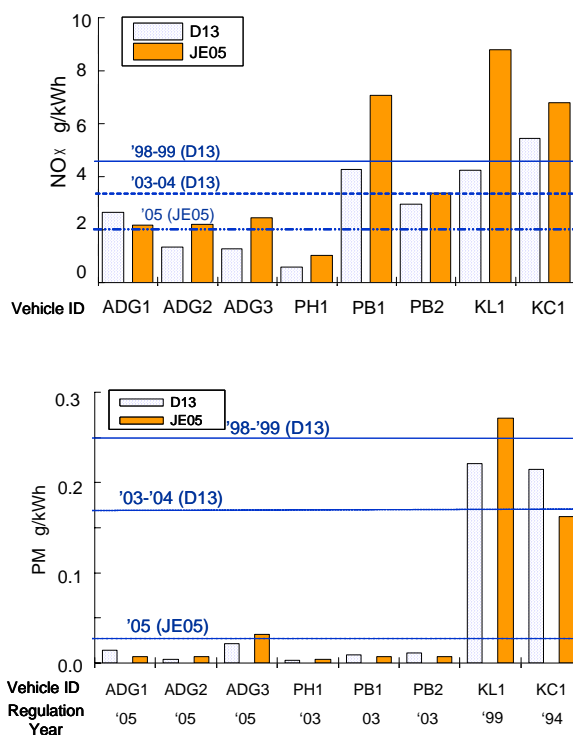


図 1 各車の JE05 および D13 モードにおける NOx、PM 排出率

含まれる可能性がある。こうした例はあるものの、PM 排出については一方のモードの結果のみでも全般的傾向を概ね説明できるものとなった。

それに対して、NOx 排出傾向はより複雑である。ADG の 3 台は、NOx 排出率がほぼ 05 年平均規制値並みだが、いずれもやや上回った。3 台すべてが同じ結果となったことは、評価の本質的なものも含むとみられるので後述する。これら 05 年規制適合車を含む多くの車両で D13 モードよりも JE05 モードのほうが高い NOx 排出率を示しているが、とりわけ PB1 と KL1 においてその差が大きく、JE05 モードではそれ以前の規制レベルの KC1 を上回る NOx 排出を示す。このことは、03 年規制までは、NOx 排出について、規制値の如何によらず、実走行状態では必ずしも NOx が低減しない場合があることを意味している。

こうした従来規制適合車で実走行時の NOx が減少しない要因を調べた。80% 負荷率における各エンジン回転における NOx 排出率を図 2 に示す。JE05 モードで NOx 排出の高い KL1 と PB1 でやはり NOx 排出が高いが、とりわけ 50% および 90% 回転においてそれが顕著である。この理由は、当該負荷率では、定格回転数に対する 60 および 80% 回転が D13 モード

試験点であるため、そこでは NOx 低減制御を行っているものの、それ以外の領域では、EGR 率や燃料噴射時期を変更して低減制御がほぼ停止した状態となるためとみられる。それらの条件では、EGR を行わない KC1 よりも大幅に高く、約 2 倍もの値になった。以上から、より新しいエンジンでは、高圧噴射化などにより、基本的な NOx 排出はむしろ高くなるのを EGR などの制御により低減させており、抑制制御を行わない場合には大幅な NOx 増加につながることを意味している。このような理由から 05 年規制以前では、規制強化が実走行時の NOx 低減に寄与しないケースもみられることとなった。なお、PB1 では、モード点の定常運転においても、わずかな負荷や回転数変動、また運転条件を維持する時間で制御が変わることがあり、本結果では認証モードである D13 モードでも、規制値を超える結果となった。こうした事象は 05 年規制車ではみられず、試験法の改正が実走行排出ガス改善に寄与した面が大きいといえる。

図 3 に、60%エンジン回転の各負荷率における NOx 排出率を示す。図から、同じ 05 年規制車でも NOx 排出特性はかなり異なることがわかる。ADG1 は負荷が高くなると NOx 排出が増加し、95% 負荷では KC1 と同等になる。ADG3 は反対に触媒温度が低いとみられる 20% 負荷では高い NOx 排出を示すが、それ以上の負荷では 1g/kWh を下回る低いレベルとなる。ここで、ADG1 と ADG2 を比較すると、図 1 の D13 モード、図 2、3 のすべての条件において ADG1 の NOx 排出が明らかに高いものの、図 1 で JE05 モード NOx 排出はほとんど変わらない。これら定常条件の結果が JE05 モード全域を代表するとはいえないが、定常部分のデータだけでは JE05 モード NOx 排出率を把握できないことを示唆している。

3.1.2. トランジェントにおける NOx 排出特性

トランジェントを加味した NOx 排出の特徴について把握するため、各車の JE05 モードにおける NOx および CO2 排出を、「発進・加速」、「アイドリング」および「その他（準定常と減速部分）」にわけてそれぞれの排出寄与率を図 4 に示す。加速時の CO2 排出はほぼ 30% 弱となり、車両重量とエンジン出力等の関係から車両により多少の違いはあるものの、大きな違いはない。一方、NOx 排出では一部の車両で加速時の寄与率がより高くなっており、ADG1 と ADG2 を比較すると、加速時の NOx 排出寄与率では ADG2 が

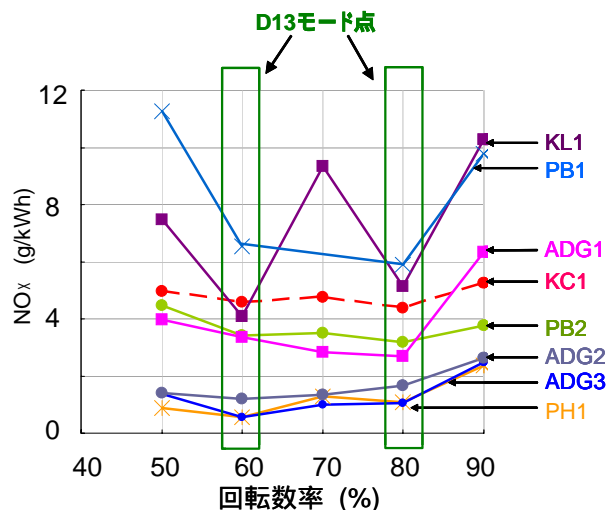


図 2 各車の 80% 負荷率におけるエンジン回転による NOx 排出率

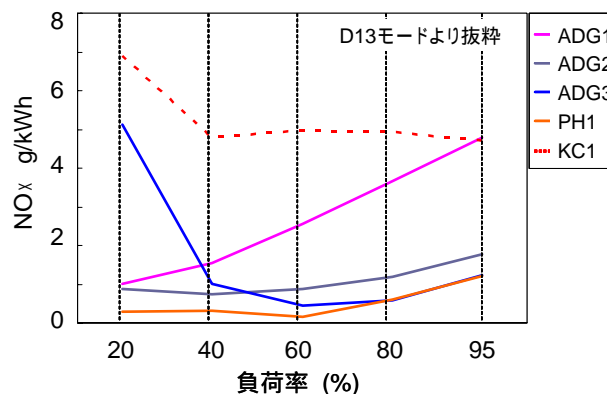


図 3 60%エンジン回転における負荷率による NOx 排出率

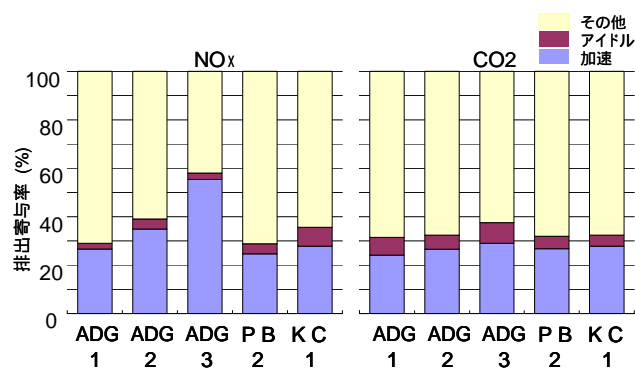


図 4 JE05 モードにおける加速、アイドル、その他の部分における NOx および CO2 の排出寄与率

上回る。図 2、3 において、特に高負荷では ADG2 のほうが 1/2 以下の圧倒的に低い NOx 排出ながら、高負荷運転頻度の高い加速時の NOx 排出が、JE05 モードで増加していることになる。これは定常試験のデータからは説明できないトランジェント特有の現

象といえる。ADG3においては、さらに極端で、定常では低負荷でのみNOxが高かったにもかかわらず、JE05モードでは加速時のNOx排出が他よりも突出して高い。これは負荷と触媒温度がある程度リンクする定常運転と、JE05モードとが根本的に異なることに由来する。現在重量車では燃料消費率表示が行われ、それを実測ではなく、定常試験における燃費マップから瞬時の運転条件における燃費を計算するシミュレーション法がとられている。だがNOx排出特性はより複雑で、同様の手法を適用できず、運転パターンから容易に予測することは不可能である。

図5(a)、(b)は、各車における瞬時NOx排出率(平均仕事あたり)を示す。(a)には、ADG1および2、そしてそれらの同系統のPB1、KC1を、(b)には、NOx低減後処理を有するADG3、PH1、そしてそれぞれの同系統といえるPB2、KL1のNOx排出率を示している。図5(a)より、ADG2では、定常高負荷で低NOxであるにもかかわらず、加速時のNOx排出は必ずしも低くない。ADG1との差はほとんどみられず、加速最初はむしろKC1に近い部分もある。これは加速時に、ターボラグ等による瞬時的なEGRのかかりすぎに伴う、黒煙排出増加を防ぐため、一時的にEGRを減らすことによるとみられる。このような加速時特有の制御が働くため、既述のようにNOx排出が定常マップから把握できないといえる。また、PB1においても加速時のNOxがとくに高いが、これはトランジェントによるものよりも、既述のように低中速高負荷域でとくにNOx排出が高いためである。

図5(b)において、ADG3は加速部分では、JE05モードNOxが最も高いKL1に近いレベルである。それに対して、定常走行に近い1500秒付近ではモードNOxの最も低いPH1をも下回る低レベルの排出となり、全体的な低排出ガス性を維持している。以上から、05年規制クラスの車両になると、一部運転条件におけるNOx排出濃度や排出率と、モード全体のNOx排出率との相関がみられないケースが顕在化しており、使用過程時を想定したNOx排出性能の検証は、より困難になると考えられる。

また、上記のように、05年規制車では加速時のNOx排出比率が高くなるケースが多く、それが図1でJE05モードにおけるNOx排出が高めになった一つの要因とみられる。シャシダイナモ試験では、変速時のエンジン回転やトルク変動はエンジンベンチ試験

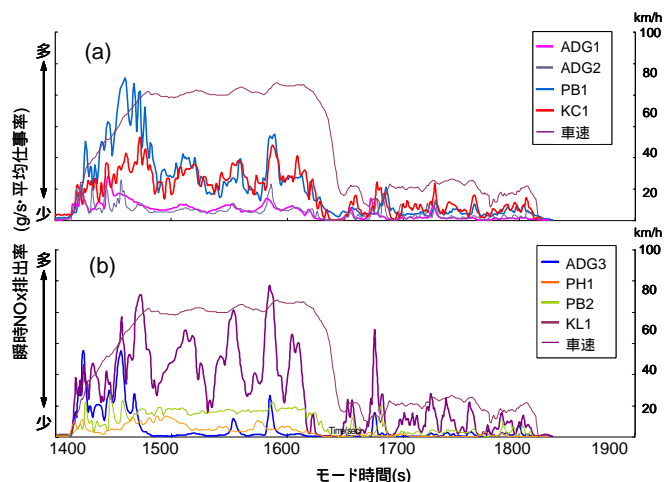


図5 各車のJE05モード最終部分における瞬時NOx排出率(平均仕事あたり)(a)ADG1、ADG2、PB1、KC1 (b)ADG3、PH1、PB2、KL1

よりも大きくなるケースが多い。とりわけ半自動変速機を有するADG3では、変速にやや時間がかかり、それが不可避である。そうした違いは瞬間的な話で、燃費などに及ぼす影響は小さいが、NOx排出性能では無視できなくなっている。シャシダイナモ試験の結果を評価する場合、これらを理解した上で実施する必要がある。

3.2 「目で見た」に近い排出ガス評価

ディーゼル車における「きたない」イメージを作り出す最も重要な要素は、排気煙といえる。そこで、試験車両において、排気煙濃度試験を行った。測定には、光透過式スモークメータ(オパシメータ)を用いた。オパシメータは、黒煙のみならず近年PM中の比率が増加しているSOF、青煙なども含めた測定ができることから、黒煙排出の低い車両におけるPM排出とより高い相関が得られ、今後車検における排気煙濃度試験の測定器として使用が計画されている。試験条件

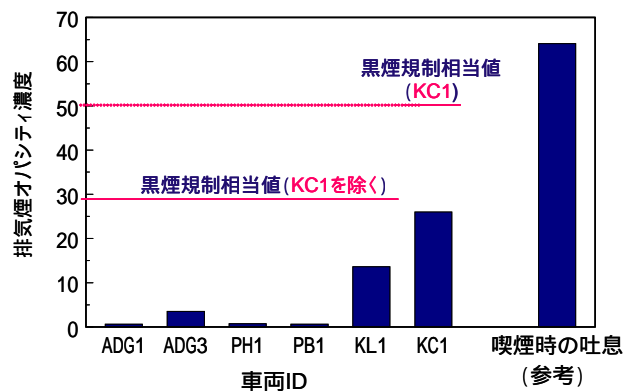


図6 各車排気煙濃度オパシメータ計測値

は、車検時に行われるフリーアクセル試験とし、多少の暖機後3回の測定を行い、その平均値を採用した。また、従来の濾紙式スモークメータにおける規制値を、SAEハンドブックの図を参考にオパシティ濃度に換算し、規制相当値とした。図6に測定結果を示す。PM規制値が大幅に強化されているにもかかわらず、排気煙濃度の規制値は98～99年の規制強化から変更されておらず、ADG、PH、PBのものはいずれも桁違いに低い値となった。本数値が一桁前半であれば、ほぼ目で見てわからない範囲で、現行レベルのものは、目を見た範囲ではほぼ「無煙化」が達成されている。なお、参考までに喫煙時の吐息の濃度も記載した。この違いをみると、濃度的には「たばこは煙を出す、ディーゼル車は出さない」といえるレベルである。

3.3. 実環境改善に向けて

3.3.1. NO₂の排出と環境基準について

現在、NO₂の大気環境基準は、一般大気測定局ではほぼ100%達成され、幹線道路沿いに存在する自動車排出ガス測定局のみに未達成があることから、自動車からのさらなるNO_x低減が09年規制などで計画されているところである。

図7に、自動車排出ガス測定局におけるNOおよびNO₂の経年濃度平均値変化を示す。NO、NO₂ともに改善傾向である。既述では、98～04年の規制に適合した車両では必ずしもNO_xが低減しないとしている。このNO_x低減傾向は、車両単体の排出量低減よりも、活動量の減少に依存する部分大きいとみられる。現在はピークの1995年よりも自動車用軽油消費量が約23%減少しており、その間のNO低減率に近い。そのNOはここ10年で約30%低減しているのに対し、NO₂は1割ほどにとどまる。このことがNO_xとして有意な低減がありながら、NO₂の大気環境基準未達成地域が残る要因の一つと考えられる。このNO₂が、NOから転換したものが主とした場合には、NO濃度がNO₂濃度に直接的影響を与えるはずだが、その傾向はあまりみられない。このことは、車両から排出されるNO_xが従来のNO主体から、NO₂も排出するようになった可能性がある。

図8は、各供試車両におけるNO_x排出率に、NOとNO₂排出割合を含めたものである。図より、尿素SCRを有するADG3を除く05年規制車およびPH1では、NO_x中の50%程度以上がNO₂となっており、高いNO_x排出を示すKL1およびKC1よりもNO₂

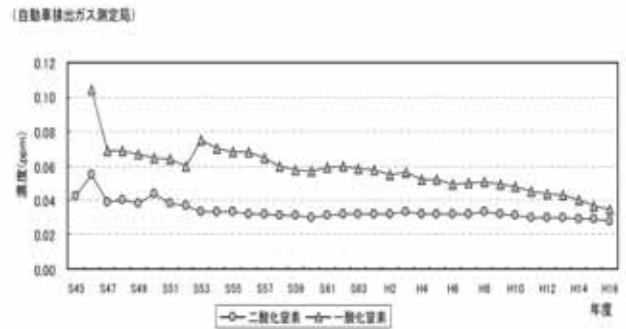


図7 自動車排出ガス測定局における大気NO、NO₂平均濃度の推移（環境省HPより）

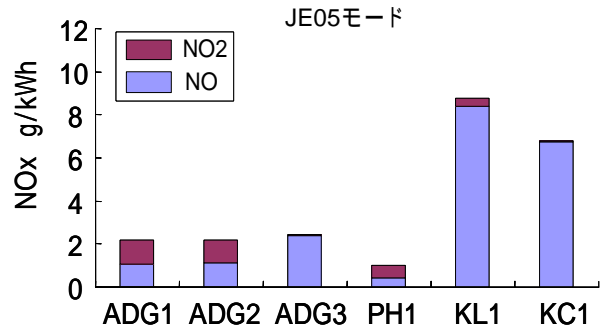


図8 各車のNOとNO₂の寄与率を含めた排出NO_xの比較

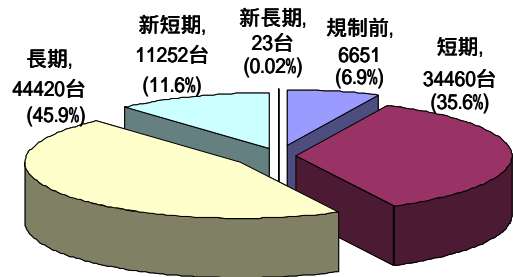


図9 都内営業トラックの適合規制別の割合（東京都トラック協会HP資料より作成）

排出は増加している。このことから、高度な後処理装置を有する車両では、NO_x、PMともに低排出だが、NO₂排出はむしろ増加する傾向にあるといえる。

図9は、都内に拠点を持つ営業トラックの適合規制について台数と割合を示したものである。この図から、実際に走行している重量トラックは、本報のKL1と同等以前のもので依然として全体の9割近くを占めている。したがって、今後これらの世代の車両が新しいものに置き換わっていくと、トータルのNO_x排出については、大幅な低減が期待されるが、NO₂単独の排出ではむしろ増える傾向になると予想される。今後、沿道におけるNO₂濃度がNO_x全体の減少を受けて低減するするのか、NO₂排出増加を受けて増加に転ずるのか動向を調査していく必要がある。ま

た、NOx 排出に止まらず、反応や拡散も含めた環境影響について検討していくことが必要となると考えられる。この点について、今後本年度より開始した「触媒付きディーゼル車増加に伴う沿道 NO2 濃度の影響評価に関する研究」にて解明していく予定である。

3.4.2. より実車両に近い状態での排出ガス評価

JE05 モードの試験条件で想定される車両は製造者出荷時を基準としており、荷台等の架装前の状態で、積載条件は平均的条件として半積載状態としている。しかし現実に最も多いのは多用途の積載に適したバン（箱ものを載せた＝全高が高い）タイプのトラックであり、近年燃料費の高騰などから輸送の効率化が進められ、積載率は上昇する傾向にあると予想される。そうした状況をふまえた試験条件として「バンタイプの車両で全積載」状態として JE05 モード試験を実施した。「バンタイプ」設定では、4 t 積載クラスで現実的な全高 3.5m として、走行抵抗のうち空気抵抗係数を変更した。

図 10 では、ADG1 における標準状態での JE05 モードとバン + 全積載時とで NOx、CO2 および PM 排出率を比較した。仕事率あたりの排出率で比較していることから、積載条件等の違いはほぼ相殺される。PM および CO2 排出をみると、バン + 全積載時のほうが排出率が低くなっている。平均的な仕事率が上がり、エンジンをより効率のよい運転条件で使用することができたため CO2 排出率が減少したとみられる。前記のように、現在国内の総軽油消費量は近年減少傾向にあるが、積載の効率化に伴うエンジン使用条件の変化が要因の一つになっているとみられる。それに対し、NOx 排出については逆にバン + 全積載で排出が増加し、結果的に規制の許容限度値をも上回る結果となった。現実性の高い状態で同じ走行モードにて許容限度値を超えることは、大幅な悪化といえる。輸送効率の向上はコスト、CO2 排出両面から必須とみられるだけに、NOx も含めた低減が望まれる。05 年規制車の普及は NOx 低減に大きく寄与すると思われるが、その上で、必ずしも実際の改善が進まないような場合には、こうした、より現実状態での NOx 等排出についても考慮していくことも検討に値する。

4. まとめ

05 年（新長期）規制適合車 3 台を中心とする重量ディーゼル車計 8 台を用いて、最新技術を含めた現状

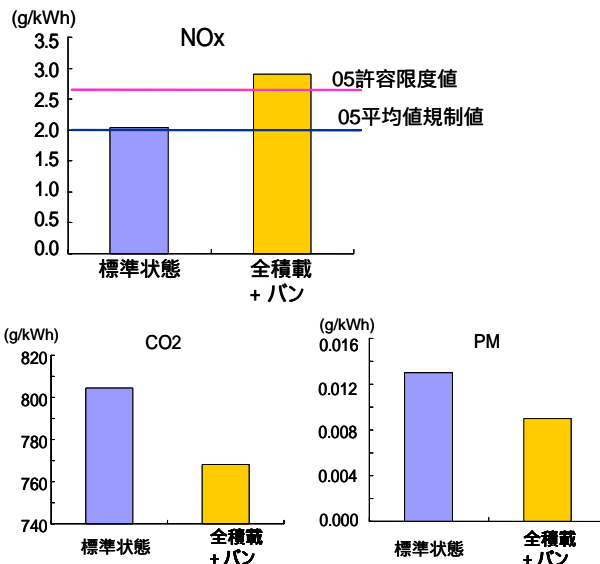


図 10 標準状態と「バン + 全積載」時の排出ガス比較 (ADG1)

における排出ガス等の評価と分析を行った。

- (1) 05 年以前の規制適合車では、必ずしも実走行時における NOx 排出が低減されないが、05 年規制適合車で大幅に低減した。その要因としては試験モードが変更され、排出ガス低減技術の作動が現実的になった部分が多い。
- (2) PM 排出に関しては、試験モードの違いによる変化は小さく、規制値そのものでおおむね傾向が把握できる。
- (3) 05 年規制車では、トランジェントや後処理装置の制御により、NOx 排出傾向には違いがあり、一様に低減しているわけではなく、一部領域・条件のみでは、評価が困難である。
- (4) 低 NOx 化した 05 年規制車において、NO2 単独でみると、むしろ従来のものよりも排出が増加しているものがある。また、全積載時など実使用状態に近い条件で大幅に NOx が増加する場合もあり、今後の大気 NO2 濃度の動向も踏まえた要因と影響調査が必要である。

おわりに

今回の各試験を行うにあたり、派遣職員、契約職員各位の協力に加え、車両手配について財団法人運輸低公害車普及機構、日野自動車工業株式会社ほか内外関係各位の協力を得た。ここに謝意を表する。