

# 10. 重量トラックにおけるエンジン・車両の組合せによる CO<sub>2</sub> 排出低減の可能性について

環境研究領域 ※鈴木 央一 石井 素 佐藤 進

## 1. はじめに

重量車に関する CO<sub>2</sub> 低減に向けて、2006 年 3 月に燃費基準が設定され、併せて燃費値が公表されるようになった。それにより低燃費車の導入や CO<sub>2</sub> 排出削減の目安設定などが、より行いやすくなっている。また、交通研が中核となって実施している「次世代低公害車プロジェクト」においても、目標がこれまでの NO<sub>x</sub>、PM 低減および燃料代替性から、CO<sub>2</sub> や燃費の改善をメインとすることで、CO<sub>2</sub> 低減に寄与することを目指している。

一方、そこで得られた知見の実効性を高めていくためには、実際に様々な状態で使用される個々のユーザに適した改善方策を明らかにすることも重要となる。とりわけ商用車においては、一つの車両で、例えば都市内走行のみを行うなど同等の走行状態で継続的に使用されるケースが多く、用途などに適した改善方策を提示できればその効果は大きい。

本報告では、そのステップとして、法定モードを前提にエンジン性能を効果的に車両燃費に反映させるために必要な要素や、改善に向けたポイントを把握することを試みた。そこで、実際に運用される複数の重量ディーゼル車を対象に燃費測定試験を行い、エンジン燃費特性と車両側要素との組合せ等最適化による CO<sub>2</sub> 低減の可能性について検討を行った。

## 2. 車両燃費とエンジン燃費の違い

車両で燃費 (CO<sub>2</sub> 排出) を良くするためには、まずエンジン熱効率が良くなってはならない。それを示す指標として、横軸エンジン回転数、縦軸エンジントルク (またはアクセル開度など) で表される 2 次元マップにおける各点の、仕事率あたりの燃料消費量または CO<sub>2</sub> 排出量 (ともに単位は g/kWh) で表すことができる。これは、車両の違いを除いたエンジン単体の評価ということができ、エンジン自体のポテンシャルを

比較する、といった場合に有効である。

一方、実際には車両に搭載された状態でエンジンは使用される。したがって、エンジン単体での効率の良さが、車両における燃費性能に反映されなくては意味をなさない。自動車用エンジンの一つの大きな特徴として、任意のエンジン回転数と負荷率を任意の時間に使用しうる、という点が挙げられる。したがって、ある限られた運転ポイントで効率の良いエンジンが、車両として燃費がいいとは限らない。ただし、「任意のポイント」といっても、速度などの走行条件と車両の諸元が決まると、一意的に決まる。つまり平坦路を一定速度で走行とする場合、車両諸元から必要仕事量を計算できる。そして使用するギア段が決まれば、デファレンシャルギア比等からエンジン回転数が求まる。仕事と回転数がわかれば、トルクも求まるので、エンジンマップ上の一つの運転ポイントとなることがわかる。したがって、使用頻度の高い車速で使用するエンジン条件において効率の良いことが、車両燃費向上につながる。しかし、実際には、都市内走行と高速走行が存在し、加減速や勾配もあり、一部だけをよくしても全体への効果は限られる。だからといって、過給機が効率よく働く領域にも限りがあり、エンジン運転条件による燃費差が生じる。加えて、排出ガス改善のために技術的に可能な最高熱効率を得られないケースも少なからず存在し、その影響度合いも後処理装置や EGR など採用している技術やその適合の考え方次第で大きく変化する。このような現状から、エンジンごとの運転条件による燃費差は、技術革新による制御要素増加とともに、従来に増して拡大する可能性が高い。

そうした状況を補うものとして、伝達系 (ここでは、トランスミッション、デファレンシャルギア、タイヤを指すものとする) 諸要素との適合が挙げられる。その中心となるギア比などについては、エンジンの最適

燃費点を多く使用する設定とすることが基本となるが、走行中の要求出力は時々刻々変化し、常に最適燃費点を使用することは容易でない。とりわけ余裕出力が小さい重量車の場合、エンジンマップ上の広いエリアを使用するため、それを前提にトータルで、どれだけ当該エンジンの得意な領域を使えるかが燃費を左右する。それには、エンジンのトルク特性とトランスミッションのギア比などと車両との組合せが重要になる。それらに改善の余地がある場合には、特別な技術革新なしにCO<sub>2</sub>低減が行える可能性を有している。

一般的にエンジンでは低・中速回転の高負荷領域で燃費率がよい。このため早めのシフトアップが燃費改善につながるが、その領域では余裕トルクが小さいことから、運転のしやすさとトレードオフになる要素もある。それに対して、変速操作を容易にしつつ、低燃費領域を使用しやすくするものとして、例えば12段の多段機械式自動変速機（以下、12AMTと記載）がある。現行の2015年燃費基準到達車の多くはこうした変速機を有しており、伝達系における改善要素として今回の試験でも取り上げることとした。

### 3. 実験装置など

#### 3. 1. 車両燃費の計測および評価

燃費評価は、実車両をシャシダイナモ上で走行することにより行った。燃費の測定は、JE05モード試験法に準拠した機器を用いて、CVS法によるカーボンバランス法から求めた。

一般に公表される重量車燃費では、架装の違いなどを除いて対等な比較とするために、代表的な諸元のものを対象にエンジンマップよりシミュレーション法を用いて求める。しかし、ここでは実際の諸元を使用して実測した。この場合、各車両で条件的には異なり、例えばJE05モードに準拠し半積載で試験を実施するため、車両重量の違いは、当然ながら燃費に影響する。その一方で、車両軽量化して運用することも燃費向上対策の一つといえ、車両燃費は重量等の違いも含めた当該車両の使用状態で評価をすることが適切と考えた。とくにその影響を除いた比較等を行う必要がある場合には、仕事率あたりの評価を行った。

評価用の走行モードとしては、重量車燃費評価に使用される以下の2つとした。

- ①JE05モード
- ②80km/h都市間モード（以下、「80km/hIC」と記載）

なお、JE05モードをシャシダイナモで実施するにあたっては、国土交通省が告示している「シャシダイナモメータによるJE05モード排出ガス測定方法（国自環第280号、平成19年3月16日付）」を採用した。また、80km/hICについては、シャシダイナモに試験モードの勾配をリアルタイムに設定して実施した。

#### 3. 2. エンジン単体評価

JE05モードでの燃費評価は、車両の評価であり、エンジン単体の燃費ポテンシャルを対等に表現できない。そこでエンジン単体を、現実の使用状態を再現する運転領域で評価するものとしてD13モードを各車両で実施し、エンジン単体評価とするとともに、運転領域別の燃費等の定性把握等に使用した。

#### 3. 3. シミュレーション評価

車両条件を変化させたときのCO<sub>2</sub>低減予測に、シミュレーション計算を行った。計算には国土交通省の提供する重量車燃費シミュレーションプログラムを用いた。ただし、当該プログラムに、車両諸元の違いを反映させる改造を行った。エンジン燃費マップにはD13モード試験結果を用いた。この場合、本来プログラムを適用するのに求められる試験点よりもかなりデータが少ないが、試験結果をほぼ再現できたため、条件を変化させたときの比較には有効と考えた。

表1 試験車両諸元

識別記号	A	B	C	D	E
排気量 (L)	9.84	13.07	12.88	13.07	13.07
最高出力 (kW/rpm)	279/2000	279/1800	257/2000	279/1800	302/1800
最大トルク Nm/rpm	1800/1400	1648/1400	1810/1100	1648/1400	1853/1400
燃料噴射システム	Common rail	Unit injector	Common rail	Unit injector	Unit injector
後処理装置	DPF	Urea SCR	Urea SCR	Urea SCR	Urea SCR
最大積載量 kg	13500	14600	13560	14100	14500
車両重量 kg	11330	10270	9630	10720	10370
車両総重量 kg	24940	24980	23300	24930	24980
試験時車両重量 kg	18135	17625	16465	17825	17675
変速機形式	7MT	7MT	7MT	12AMT	12AMT
試験時走行距離 km	221000	68290	25650	80610	52305
適合排ガス規制 年	'05	'05	'05	'05	'05

#### 3. 4. 試験車両

試験車両には、DPFまたは尿素SCRを搭載した'05年（新長期）排出ガス規制の重量ディーゼル車で、車両総重量（GVW）20t超のもの5台を用いた。いずれもキャブオーバー（平ボディ）タイプのものである。諸元を表1に示す。試験車のうち、3台は7段手動変速機（7MT）を持つ車両である。車両AとBは、ともにGVW25t車だが、車両Aは小排気量ながら出力、

トルクともに車両 B と同等以上であり、ダウンサイジング化を積極的に取り入れた車両ということができる。車両 C は低床型でやや GVW が小さいものである。車両 D および E は、ともに 12AMT を搭載したもので、車両 D は車両 B と同一型式エンジンを、車両 E はその高出力タイプを搭載している。これら 2 台は登録時期の関係で該当していないが、諸元より 2015 年燃費基準到達レベルとみられる。なお、DPF を有する車両 A では、すべて再生を行っていない状態での燃費評価としている。

#### 4. 試験結果及び考察

##### 4. 1. 各車両の D13 モード試験結果

図 1 は、各試験車のエンジンベースの効率を比較するものとして D13 モードの CO<sub>2</sub> 排出率を示す。カーボンバランス燃費には、CO、HC 排出も考慮する必要があるが、すべての車両で 0.1g/kWh 未満であり、これらの成分の影響は十分に小さいので無視した。この結果をみると、7MT の 3 台については、ほぼ同等の結果となったことから、各エンジンにおいて熱率的な差は小さいということができる。ただし、結果的に同等となったものの、運転領域ごとに大きな違いがあった上で総合的に同等となったものである。運転条件の違いについて比較するため、D13 モードの各モードにおける CO<sub>2</sub> 排出率を図 2 に示す。ただし、13 モードのうちアイドリングとごく軽負荷でばらつきの出やすい 1、4、13 モードについては除いている。この結果から、7MT 車に関して、車両 A では、モード 2~6 の低負荷領域で他より低い CO<sub>2</sub> となっているのに対し、60%エンジン回転高負荷領域（モード 9~11）では車両 C が、80%エンジン回転数条件（モード 7、8、12）では車両 B がよい結果となった。車両 B および C では尿素 SCR による NO<sub>x</sub> 低減を行うため、高負荷における EGR 量が車両 A よりも少ないことから、その領域で燃費がよく、それぞれ最大トルク回転数に近い条件でよい結果となったとみられる。それぞれのモードで、CO<sub>2</sub> の高いものと低いものでは、10%を超える差がある条件もあり、実走行においてエンジン使用領域に違いがある場合には、燃費に大きく影響することが予想される。

これらの 7MT 車に対し、12AMT を装備する車両 D、E では、ほぼすべてのモードで低い CO<sub>2</sub> 排出率となった。エンジンファミリーは車両 B と同一であるに

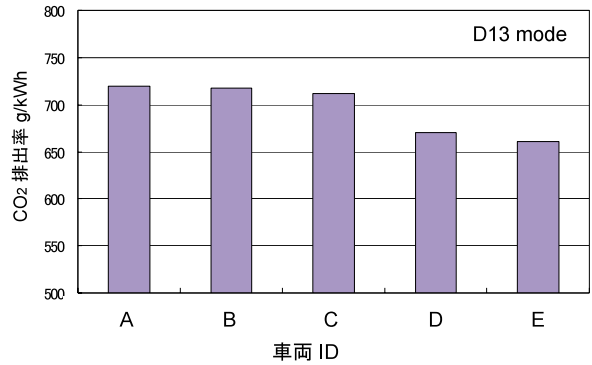


図 1 各車両の D13 モードにおける CO<sub>2</sub> 排出率

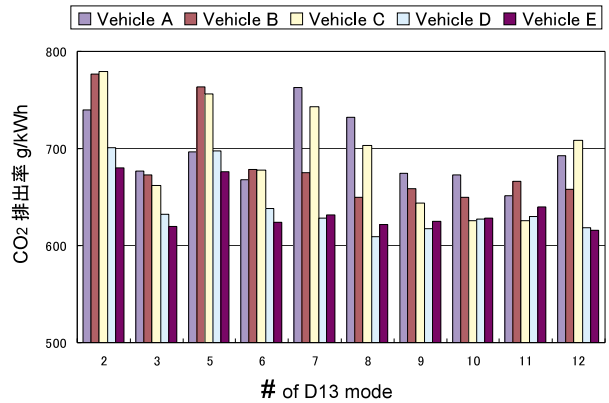


図 2 D13 モードの各モードにおける CO<sub>2</sub> 排出率

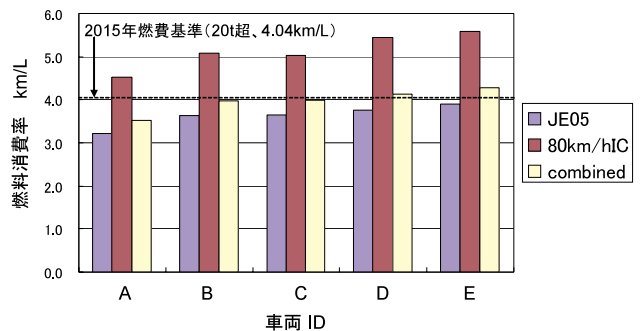


図 3 各試験車の JE05 モード、80km/hIC およびコンバインド燃費

もかわらず、このような結果となった原因について、エンジンのみならず伝達効率を含めたパワートレインとしての性能向上が予想されるが、詳細は明らかでない。

##### 4. 2. 実走行モードにおける燃費測定結果

各試験車の JE05 モード、80km/hIC およびコンバインド（重み付けは JE05:80km/hIC = 7:3）燃費を図 3 に示す。この結果からいえることは、図 1 に示されるエンジンベースの効率でほぼ同等な 3 台の 7MT 車の中で、車両 A が約 10% 燃費が悪いことである。車両 A は車両重量がやや大きい、仕事率の違いは 2~3% 程度であり、それを加味しても効率的に劣って

いる。JE05 モードでは、D13 モードよりも軽負荷を使用する頻度が高く、ダウンサイジング化などにより軽負荷で燃費の良い車両 A が有利とみられたが、結果的に良くない。車両 B と C に関しては、エンジン、車両いずれでも概ね同等な燃費といえる。

車両 D、E は、D13 モードで高い効率を示したとおり、図 3 において、いずれのモードにおいても MT 車を上回る燃費となっている。車両 B と同一型式エンジンを搭載した車両 D では、D13 モードにおける CO<sub>2</sub> 排出率で約 7%改善され、80km/hIC ではそれに近い改善がみられたものの、JE05 モード燃費は約 3%の向上に止まる。12AMT の導入により、エンジン効率の差以上に車両燃費が向上する効果が期待されるが、所期の効果は得られていない。それに対して、車両 E では両モードとも高い燃費率となっている。この値は、当該クラスの現行車両中最高水準とみられる。

そこで、車両 A、D を中心に、D13 モードの CO<sub>2</sub> 排出率で示された性能を、燃費に生かせない原因について解析を行うこととした。

#### 4. 3. エンジン効率と車両燃費の乖離をもたらす原因の解析

エンジンベースの性能が実走行モードの燃費に反映されない原因について、エンジン回転数と負荷からなるエンジンマップの使用領域に実走行で変化がみられるのか、という観点で解析を行うこととした。

まず、JE05 モードでエンジンマップのどの領域を使用する頻度が高いか比較するため、図 4 に示す 6 つの領域に分け、それぞれの領域の使用頻度を調べた。また、図には各車両の最大トルクカーブも示した。使用頻度としては、各領域で行われた仕事がモード全体の仕事に対してどれだけの寄与率を有するかを求めた。各車両におけるエンジンマップ上各領域の仕事寄与率を図 5 に示す。この図より、JE05 モード燃費の低い車両 A では、他の車両よりも領域 3 及び 6 の寄与率が大幅に増加していることがわかる。領域 3 を代表する運転条件として、図 2 中の第 7 モード (80%エンジン回転数-40%負荷率) が挙げられる。車両 A では当該モードにおいて最大の CO<sub>2</sub> 排出率となる。また、領域 6 に含まれる第 8 モードにおいても全車両中最も高い CO<sub>2</sub> 排出率となっている。したがって、この領域を多く使用することは、それだけ燃費の悪化につながる。車両 A のエンジンは、ダウンサイジングの効果などにより、領域 1、2 において優れているも

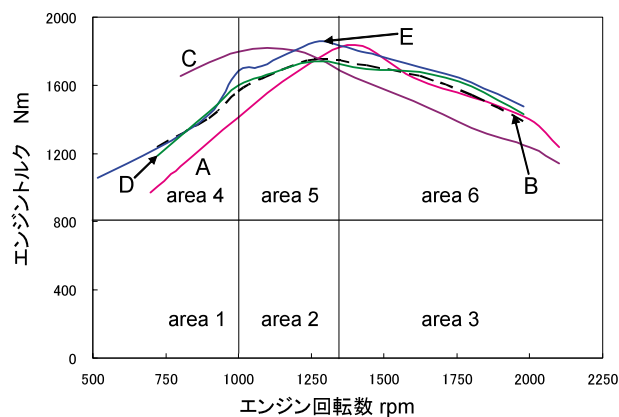


図 4 各車両の最大トルクカーブと解析に用いたエンジン使用領域の分割

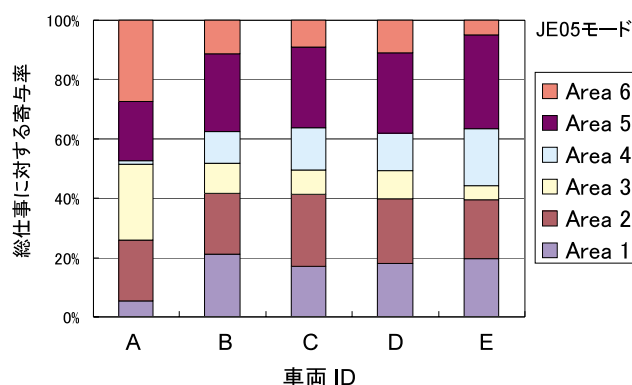


図 5 各車両における各エンジン使用領域の仕事寄与率 (JE05 モード)

の、他のエンジンよりも 1,000rpm 以下のトルクが低いことから、加速中などを中心にエンジン回転数の高い領域を多く使う結果となり、当該エンジンの優位性を生かせていない。小型化した上で最大出力とトルクは水準以上の値を確保しているものの、燃費改善につなげるためには低速トルクの向上が必要といえる。

車両 D の燃費特性を解析するにあたり、図 4 の領域 4 に着目し、同一エンジンファミリーである車両 B、E と比較することとした。図 6 は、車両 B、D、E の領域 4、5 における CO<sub>2</sub> 排出率を車両 B を基準に表示したものである。領域 5 においては、定常燃費の結果がほぼ再現されているのに対し、領域 4 では車両 D で大幅に劣る結果となっている。これには、定常状態と異なる原因が考えられる。領域 4 は加速中に多く使用するが、加速中はターボラグにより、定常状態よりも空気量が少ない状態となりやすい。とくに、当該エンジンはいずれも従来型ウェストゲートタイプのターボチャージャーであるために、排気流量が減少

したときの過給圧力や効率確保が困難であることが予想される。そのため、加速中の低速高負荷状態は、定常状態よりも効率が悪化すると考えられる。とりわけ 12AMT では、シフトチェンジが頻繁に起き、領域 4 を使用する際にそのような加速中の効率悪化状態が増加する。このことから、車両 D においては、12AMT としたことで、伝達系等全体の効率向上より燃費は改善されているが、本車両のエンジン特性にあつては、12 段変速としたことで、加速時に低速高負荷域の使用頻度が増加するのは、かえって不利に働いている。

一方、車両 E では、1,000rpm 付近のトルクが上昇していることから、低中速走行の多くを 1,000rpm 以下で走行することが可能となったため、図 5 に示すとおり領域 4 での仕事が増えている。その結果、領域 4 を定常走行に近い状況で使用する頻度が高くなり、車両 D と異なる結果となったとみられる。7MT 車においては、車両 A では低速トルク不足にあり、車両 B 以上が求められたが、12AMT では、それと同じトルクの車両 D であっても十分に効果を発揮できていない。供試車両の中では、低中速回転で高トルクでかつ燃費がよく、VGT ターボを有する車両 C のエンジンで、多段ミッションを搭載した場合に高い効果を発揮する可能性が高いと予想される。

#### 4. 4. シミュレーションによる組合せ最適化の可能性

これまでの解析から、各車両におけるエンジン特性と車両諸元が必ずしも最適といえない場合のあることが示された。これはさらなる改善の可能性のあることを示唆するが、何をもちいて最適とするかは容易でなく、コストや技術的な制約等も存在する。そこで技術的に確実なものとして、今回供試した 5 台の車両とエンジンの組合せ変更から、両者を適合させることによる燃費改善の可能性をシミュレーションにより検討した。ここでは車両 A のエンジンをエンジン A、車両 B のエンジンをエンジン B 等と呼称する。

まず、シミュレーションの精度を検証するため、各車両の測定燃費とシミュレーション燃費を図 7 に比較する。7MT 車 3 台については、実測と計算の差が 0.1km/L 以内となっており、粗いマップを用いたシミュレーションであるが現実を概ね表現しているといえる。それに対して、12AMT を有する車両 D、E ではやや乖離がある。変速操作等が頻発し、かつ時間を要する 12AMT 車では、定常マップに基づくエンジン使用状態と異なるケースが多くなるためとみられる。

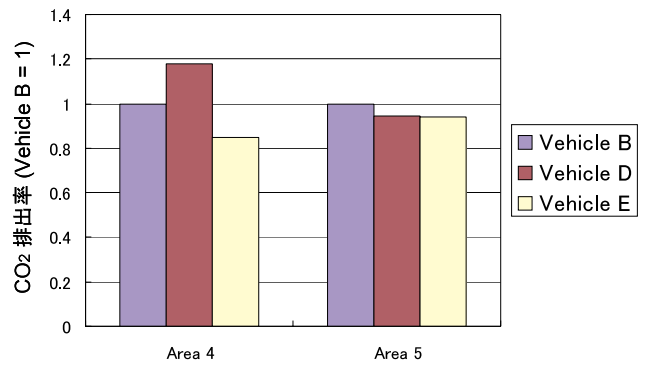


図 6 領域 4、5 における車両 B、D、E の平均 CO<sub>2</sub> 排出率の比較

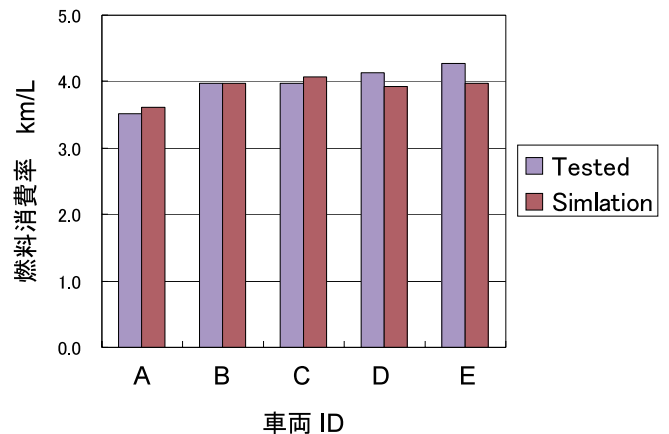


図 7 各車両の測定燃費とシミュレーション燃費比較

これは、定常燃費マップをベースとしたシミュレーションではカバーできない事柄であり、シミュレーションそのものの精度は確保できていると考えられる。

車両とエンジンの組合せ変更による最適化を試みるにあたり、これまでわかっている改善が望まれることは、主に以下の 3 点といえる。

○エンジン A はやや小型で低速トルクの不足などから、重量のやや大きい車両 A を高速エンジン回転で運転しており、燃費を悪化させている。

○エンジン C は、低速トルクが高く低、中速回転高負荷での効率が良いことから、12AMT の特長を生かしやすいと考えられる。

○エンジン B、D、E は、相対的な燃費が高速エンジン回転で良く低速高負荷で悪いことから、むしろマニュアルミッションとの適性が高い。

以上に基づいて、組合せ変更を行ったシミュレーションによる燃費改善効果を試算した。組合せ変更としては、5 台の供試車両のエンジンと車両とが「総当たり」となることとした。その上で、「エンジン」と「車

両トランスミッション」の組合せ最適化を行った。結果を表2に示す。

エンジンBで燃費が向上したのは、主に車両Cがやや軽量であることによる。エンジンCは、逆に重量の大きい車両Eとなったが、12AMTとしたことで、同等以上となり、車両Eからみると2.7%の向上となった。エンジンCが12AMTと組合せることで高い効果が発揮されることが示された。エンジンEは重量の大きい車両Aとしたことで燃費は低下したが、車両Aからみると、トルクと出力の大きいエンジンEとしたことで、大幅に改善した。それらを含め、全体を平均すると1.3%の向上となった。

表3は、さらにトランスミッションも含めた組み合わせ最適化を試みた結果である。ポイントとしては、エンジンAを12AMTとしつつ軽量の車両Cとした。その結果、3%程度仕事量が減少した以上の改善が得られた。また、3台の7MT車では、それぞれ直結段が異なり、ミッションを入れ替えると、ギア比を変えたのと同じ効果がある。エンジンEと車両Aの組合せでは、より高トルク、高出力のエンジンEとしたために、ギア比の低い車両Bのトランスミッションに入れ替えて燃費が向上した。この場合、全体で約2.2%の向上となった。この数値は飛躍的なものではないが、トップランナー技術を集約したものでなく、現状の技術のみで達成可能なものである。

以上より、車両およびトランスミッション等の組合せ最適化が、CO<sub>2</sub>低減の一方策となりうることが示された。今後はより実効性を高めていくために、積載条件の影響や、都市内または高速走行のいずれかに偏重した使用がなされる車両を考慮した影響因子の解明、最適化方策について検討を進めていく計画である。

## 5. まとめ

GVW25tクラスの重量ディーゼル車を対象に、エンジンおよび車両技術、そしてそれらの組合せによる燃費影響について解析を行った。エンジンの異なる7段変速機(7MT)車3台と12段変速機(12AMT)車2台を用いて試験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 7MT車3台について、D13モードのCO<sub>2</sub>排出率は同等であったが、各モードにおける排出率差は10%以上に及ぶことがあり、適合の考え方などにより大きく特性の異なることがわかった。
- (2) 前記3台の車両ではJE05モードなど実走行モー

表2 車両とエンジンの組合せ変更による燃費最適化についてのシミュレーション計算結果

エンジン	T/M	車両	エンジンからみた改善率%	車両からみた改善率%
A	D	D	4.30	-4.16
B	C	C	3.41	0.90
C	E	E	0.20	2.70
D	B	B	1.15	0.08
E	A	A	-2.10	7.66
ave.			1.33	

表3 表2にトランスミッションの組合せも最適化

エンジン	T/M	車両	エンジンからみた改善率%	車両からみた改善率%
A	D	C	10.74	-1.75
B	B	D	1.29	2.37
C	E	E	0.20	2.70
D	B	B	1.15	0.08
E	B	A	-1.51	8.31
ave.			2.21	

下の燃費は大きく異なる場合があり、その差は約10%に及んだ。

(3) 燃費差の生じる原因として、エンジントルク特性とギア比、そしてそれによって生ずるエンジン回転-負荷の使用領域の違いが大きく影響していることがわかった。とくに低速トルクの不足は加速時に高回転低負荷領域を使用する頻度を高め、燃費に不利に働く。ダウンサイジングによる燃費向上を図る際には注意が必要である。

(4) 供試した12AMT車では、伝達系を含めたシステム全体での効率改善から燃費が向上していたが、当該車両のエンジン特性からみると多段化して加速時に低速高負荷を使用することは不利になり、加減速の多い走行モードで効果が減少する場合があった。

(5) エンジンと車両の組合せを変更したシミュレーションを行ったところ、供試車両と同じ5種の車両とエンジンとの組合せながら全体で2.2%の燃費改善が可能となった。今後総合的なCO<sub>2</sub>削減に向け、積載条件等の要素も含めた多面的な改善方策を検討していく。

## 6. その他

供試車両の調達につき、協力いただいた運送会社等関係各位に謝意を表す。また、試験実施にあたっては、技術職員酒井克治、熊澤保子、渡辺敬太郎各氏および派遣職員堤玲子、巽雅之両氏のたいなる尽力があったことを付記する。