

1. 次期重量車用試験サイクルの概要と 排出ガス性能評価法としての特徴

環境研究領域 ※鈴木 央一 山口 恭平 石井 素
自動車基準認証国際調和技術支援室 成澤 和幸

1. はじめに

国連欧州経済委員会自動車基準調和世界フォーラム (UN-ECE/WP29) において、圧縮自己着火 (ディーゼル) エンジン等を対象とした排出ガス試験法 (検討を始めたときのインフォーマルグループの名前から WHDC (World-wide harmonized Heavy Duty Certification) と呼ばれることが多い) およびオフサイクル試験法 (OCE: Off-Cycle Emission) が議論され、それぞれ GTR (Global technical regulation) No.4 (2006 年 11 月) および No.10 (2009 年 6 月) として成立、発効した。なお、GTR No.4 の正式タイトルは非常に長く略称もないことから、本稿では便宜上 WHDC と記載する。

WHDC では、排出ガス評価を行う試験サイクルとして、実走行に近い運転を表現した過渡試験サイクル WHTC (World-wide Harmonized Transient Cycle)、および WHTC と同等のエンジン運転条件で行われる定常試験サイクル WHSC (World-wide Harmonized Steady-state Cycle) が定められた。また、WHDC を補完するものとして、上記試験サイクルの条件以外での排出ガス性能確保を図るものとして、OCE が定められ、欧州では WHDC、OCE とともにユーロ VI より導入が始まっている。

国内では環境省中央環境審議会「今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について (第十次答申、平成 22 年 7 月) ⁽¹⁾」 (以下、「中環審第十次答申」という) において、2016~18 年にディーゼル重量車を対象とした排出ガス規制強化 (以下、「次期規制」という) を行い、その際に評価試験方法についても現在の JE05 モードから WHTC に変更する、としている。この部分を見る限り、WHDC を国内に導入するというのではなく、過渡試験サイクルで評価を行っている現状を踏襲しつつ、試験サイクルのみを変更する、という形式をとっている。一方 2011 年に、ある国内メーカーの重量車で特定条件にて排出ガス制御の無

効化 (デフィートストラテジー) が行われたことがあり問題となったが、定常走行後一定時間が経過した後デフィートストラテジーが作動したことなどを背景に、定常状態での排出ガス低減対策の検証を WHTC と合わせて行うこととしており、その評価方法として WHSC、OCE が導入される。したがって結果的に WHTC、WHSC、OCE の 3 種類の試験サイクルで評価試験を実施することとなり、世界統一基準を取り入れたのと同じこととなった。現在では国土交通省が WHTC 等を踏まえた国内基準の整備を進めている。

本稿では次期規制の重量車用試験サイクルとして採用された WHTC、WHSC、OCE がそれぞれどのようなものであるのか。また、現行の JE05 モードにより排出ガス認証試験が行われた実際のエンジンにおいて、これらの試験サイクルになった場合にどのような性能が発揮されるのか、これまで当研究所において実施した試験調査等の結果などから、国際統一基準導入による影響や変化についてみていくこととする。

2. 試験サイクルについて

まず、各試験サイクルについて紹介し、その特徴などについて解説する。

2. 1. JE05 モード

国内で初めての過渡試験サイクルとして、平成 17 年 (新長期) 排出ガス規制から採用され、現在に至っている。最大の特徴は、重量車用試験サイクルでは世界で唯一車速で定められていることである。その車速パターンを図 1 に示す。JE05 モードが議論された 2000 年代初頭は、都市部の環境汚染がとくに深刻化した時期だったこともあり、都市内走行に比重を置いた走行パターンとなっている。エンジン単体で行われる試験時には、当該エンジンが搭載される標準的な車両において、図 1 の車速パターンを走行した時の 1 秒ごとのエンジン回転、トルクを車速変換プログラム ⁽²⁾ により算出し、その結果を設定して試験が行われる。

同一カテゴリーの車両に搭載するエンジンであっても、例えば最大トルクが異なるものだと、同じ加速をしても余裕駆動力が異なることから、加速中のシフトアップ時期が変わるなど、実車の走行を良く反映したものとなっている。また、実車を前提とした設定となっているため、任意の車両でシャシダイナモ試験を行う場合にあっては、図1のパターンをシャシダイナモ上で走行すれば概ね対等な評価を行うことができる、という点から、使用過程車の性能検証に用いるにも好適なものである。

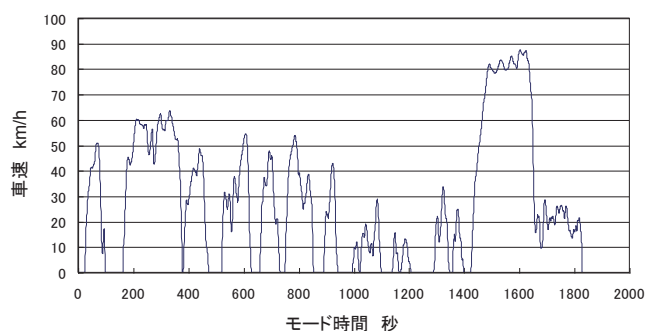


図1 JE05 モード車速パターン

2. 2. WHTC

WHTC においても、当然ながら実走行を反映することが意識されており、日米欧の走行実態調査の結果から車速パターン WHVC (World-wide Harmonized Vehicle Cycle) が作成された。ただし、その後の過程は JE05 モードと大きく異なり、WHTC では WHVC を実際に走行していたときの瞬時のエンジン出力を正規化し、それに合わせた瞬時のエンジン回転数、トルクが設定される。WHVC および WHTC の正規化されたエンジン回転数とトルクの履歴を図2に示す。前記の「WHVC を実際に走行していたとき」というのは、ショートトリップ（発進してから停止するまでの一つの山）毎に地域も車両も異なって勾配があるパートも含まれ、実車で WHVC を走行しても再現することはできない。例えば後半の高速走行部分は重量の大きいトレーラートラック等で取得されたデータが採用されたとみられ、定常走行部分に対して加速部分の仕事が非常に大きく、これを他の車両で再現しようとしても事実上不可能である。

図3は、JE05 モードと WHTC におけるサイクル全体の瞬時のエンジン回転数とトルクをプロットしたもので、小型、大型エンジンそれぞれについて示し

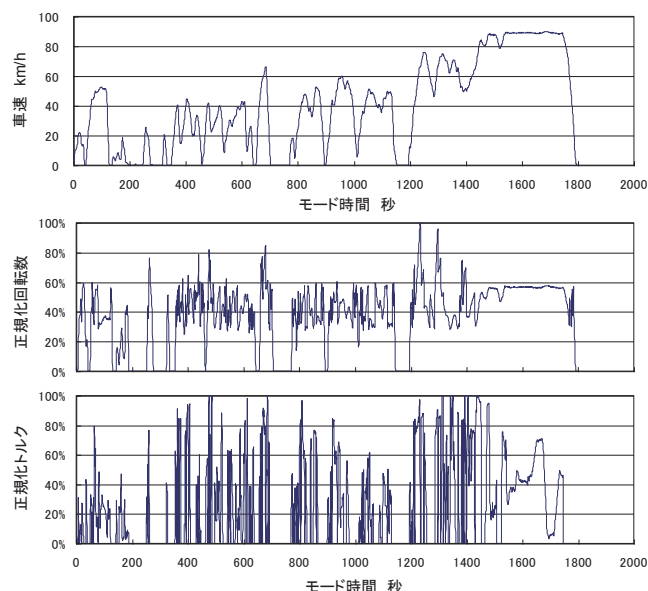


図2 WHTC のベースとなった車速パターン(WHVC)および WHTC におけるエンジン回転数とトルク割合

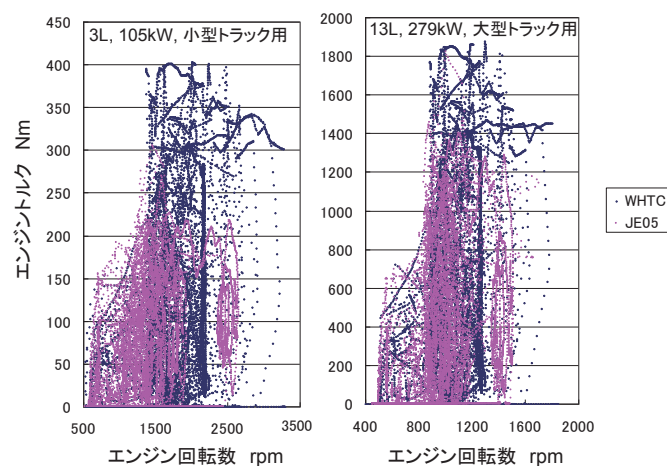


図3 WHTC と JE05 モードにおける瞬時のエンジン回転数とトルクの比較

ている。大型エンジンでは両サイクルで重なる部分が多いが、小型エンジンでは、JE05 モードで多く使用する 1400rpm 以下の領域を WHTC ではほとんど使用しないなど JE05 モードの方が低速、軽負荷側によったプロットとなっている。これは小型トラック等では重量あたりの出力（比出力）が大きく、比較的低い出力レンジで通常の走行が行えるため、重量車を前提とした WHTC では小型トラック等については実態と合わない面があり、JE05 モードの方がより実走行を反映している。しかし世界的にはエンジンメーカーと車両メーカーが必ずしも一致しておらず、エンジンメーカーは特定の車両を前提とせず開発し、車両メーカーはいくつかの選択肢の中からエンジンを選択す

る、といったケースも多い。このような場合、車両を前提とした評価より、エンジン出力等に合わせた評価の方が現実的であり、WHTC は JE05 モードと重なる時期に検討されたものの、JE05 モードのような車両を意識した斬新な概念は取り入れられていない。

WHTC 導入で規制強化になる点として、コールドスタート（冷機）試験の実施が挙げられる。冷機時には、触媒等後処理装置が活性温度以下であることに加え、燃焼安定性確保等の観点から EGR（排気再循環：Exhaust Gas Recirculation）を停止または減少させるケースがあり、NO_x 等排出が増加する傾向にある。それを加味した評価試験の方法として、冷機試験を実施後 10 分の停止状態（ソーク）を挟んで引き続き暖機状態での試験を実施し、両試験結果を荷重平均（コンバインド）した値が総合的な評価値となる。重量車では一度の運行時間が長い傾向にあり、加重平均する際の重み付けとして、冷機：暖機＝1:6 となっており、軽・中量車を対象とした JC08 モードで同 1:3 となっているのに対して冷機試験の重みは小さい。

2. 3. WHSC

WHSC は WHTC と等価な定常試験サイクルとして定められたものである。一定状態で運転することは、加減速などで回転数や負荷率が時々刻々変化する過渡運転よりも一般に制御は容易である。しかしながら、さらなる排出ガス低減に向けて精密な制御が求められる場合、仮にずれても瞬時的なものであれば許容範囲でも、その状態が継続すると NO_x、PM 等の大幅増加につながる可能性もある。そこで WHTC を補完する定常試験サイクルが必要とされた。

図 4 に、サイズの異なる 2 機種エンジンにおける WHSC の試験ポイントを、JE05 モード以前に日本の認証試験サイクルとして用いられた D13 モードの試験ポイントとともに示す。プロットの大きさは重み付けに比例している（ただしアイドルは 1/2 とした。WHSC では他にモータリングが 24%の重み係数を持つ。）。それぞれ設定されるエンジン回転数は、D13 モードでは定格回転数に対する割合（ただし 1000rpm 未満となる場合は 1000rpm）であるのに対し、WHSC では、全負荷トルクカーブに基づく計算から求められる。そのために、両モードで各試験ポイントの相対位置はエンジン毎に異なる。図を見ると、WHSC のほうが低負荷領域の重みが大きいことがわかる。高負荷

領域については、全負荷の評価ポイントが 3 点あるものの、それ以外は高速部分も含めてほとんど測定対象外となっている。その部分に関しては、後述の OCE でカバーされる。

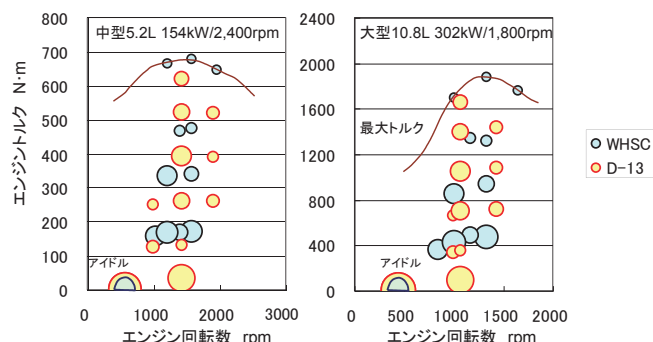


図 4 WHSC と D13 モードの測定運転条件の比較

2. 4. OCE

排出ガス等評価用の試験サイクルは実走行を「代表する」ものとして作成されるが、それに含まれないような出現頻度の低い運転であっても、そこで NO_x 等の排出が桁違いに増加する場合には総合的な環境負荷を評価する際に考慮することが必要になる。とりわけ排出ガス抑止制御が進むと、制御が働く条件とそうでない条件での排出量差は拡大し、過去にはそれが意図的に行われたケースもあった。そこで以前は必要性の少なかった認証試験サイクルの外の領域における性能維持検証の必要性が出てきた。このような「オフサイクル」評価試験を行うにあたっての考え方としては、一定出力以上などいくつかの条件を満たす連続的な運転において、排出ガス成分がある閾値以下であることを検証することとなっている。その評価対象となるエンジン運転領域は WNTe（World-harmonized Not-To-Exceed）領域として定義されている。

図 5 は、排気量 13L の大型エンジンにおける WNTe 領域を示した例である。図中に黄色でハッチングした部分が該当する。中速以上で、かつ最大トルクの最大値、または最大出力の 30% を超えるトルクとなるエリアが対象となる。GTR では OCE の評価に車両を用いた試験も言及されているが、本エンジンの場合、これを搭載する標準的な車両で 80km/h 一定走行をしても WNTe 領域を使うことにはならず、車両による試験は、エンジン単体試験で認証試験を行っている現行法規上の扱いもさることながら、技術的にも現実的と

はいえない。そこで、試験室内でエンジンベンチによる試験が想定されている。エンジンベンチ試験では図5に示すように、WNTC 領域を回転数方向、トルク方向それぞれに3分割した9のエリアに分け(ただし定格回転数が3000rpm以上の場合は回転数方向を4分割した12エリア)、その中から選ばれた3エリア内において、任意に定めた回転数とトルクで表される各エリア5条件について定常試験を行う。これまでの認証試験では、技術基準等にしがった手順で実施すれば、理論上常に同じ結果が得られるものとして行われてきているが、OCE では、評価対象エリアやそのエリア内の運転ポイントを選択する行為が含まれるため、試験毎に結果が異なることが想定される。

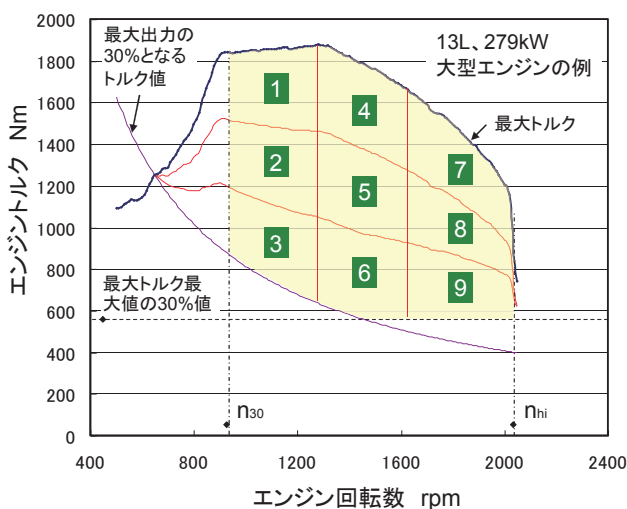


図5 OCE 試験の対象となる WNTC 領域の例

OCE の規制値は、WHTC の規制値を元に係数を乗ずる等の処理を行ったものが GTR に記載されていて、例えば NOx に関しては、

$$\text{WNTC 規制値} = \text{WHTC 規制値} \times 1.25 + 0.1 \text{ (g/kWh)}$$

となっており、WHTC 規制値を 0.4 g/kWh とすると 0.6g/kWh となる。暖機後かつ定常試験であるものの、WHTC 規制値から桁違いに高いわけではなく、エリアによっては厳しいものとみられる。

3. 現行エンジンにおける各試験サイクルでの性能の比較

試験サイクルの違いについて見てきたが、実際に現行規制に適合したエンジンシステムにおいてそれらの変更がどのような違いをもたらすことになるのか、測定試験を行った結果からみていくこととする。

3. 1. 比較試験に用いた供試機関

各試験サイクルの評価を行うにあたり、表1に示す3種のエンジンシステムを使用した。いずれも2009年(ポスト新長期)排出ガス規制に適合した重量車用ディーゼルエンジンで、排出ガス後処理装置として、粒子捕集フィルタ(DPF)および尿素水を使用するNOx 選択還元システム(尿素 SCR: Selective Catalytic Reduction)が搭載されている、異なる製造者のものである。排出ガス等の測定は、JE05 モードの試験法に準拠した装置等を用いた。

表1 供試エンジン諸元

	エンジンA	エンジンB	エンジンC
シリンダ配置	直6	直6	直6
吸気系統	TCI+EGR	TCI+EGR	TCI+EGR
排気量 L	10.8	12.9	7.5
最高出力 kW/rpm	302/1800	279/1800	199/2500
最大トルク Nm/rpm	1814/1200	1912/1100	785/1100-2400
燃料噴射システム	Unit injector	Common rail	Common rail
後処理装置	尿素SCR+DPF	尿素SCR+DPF	尿素SCR+DPF
適合規制	ポスト新長期	ポスト新長期	ポスト新長期
主な採用車種、クラス	12~14t積載トラック、トラクタの一部	12~14t積載トラック	7~10t積載トラック、70人乗り路線バス

3. 2. WHTC、WHSC と JE05 モードとの比較

図6、7はエンジンA~Cにおいて、WHTC (冷機(C)、暖機(H)、コンバインド)、JE05 モード、WHSC の各試験サイクルにおけるNOx およびPM 排出率を比較したものである。いずれも DPF 再生等が行われていない状態のみの値である。

図6より、WHTC (H) では、エンジンA、BにおいてJE05 モードよりもNOx 排出が低減する。これはWHTC (H) ではJE05 モードよりも高負荷の使用頻度が高いため、触媒出口温度はWHTC (H) で平均して約40℃も高く、尿素SCRのNOx 浄化率がより高い状態であったと考えられる。それに対して、エンジンCはA、Bよりも下のクラスの車両を対象としたものであり、図3で示した例ほどではないが、JE05 モードにおいて低い負荷領域を多く使用する。

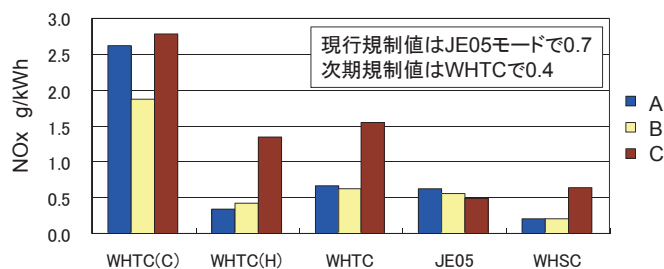


図6 各エンジン各試験サイクルにおけるNOx 排出

そのために尿素 SCR 等の適合がそれに合わせて行われたとみられ、WHTC における後処理温度の上昇が必ずしも NO_x 低減につながっていない。

WHTC (C) では NO_x 排出が大幅に増加するため、加重平均後の評価としては、JE05 モードを上回る値となった。次期規制における NO_x 規制値レベルについて初めて言及した中環審第八次答申（平成 17 年 4 月）では、ポスト新長期規制値（0.7g/kWh）の 1/3 程度としたが、その後 WHTC の導入とともに提言された次期規制値は 0.4g/kWh である。実機試験の結果から WHTC で低い NO_x 排出だったエンジン A、B でも JE05 モードから WHTC とすることで 0.1g/kWh 程度増加しており、0.7 の 1/3 程度から 0.4 への変更は、当初の考え方を踏襲した上で技術的にみて概ね妥当な水準といえる。

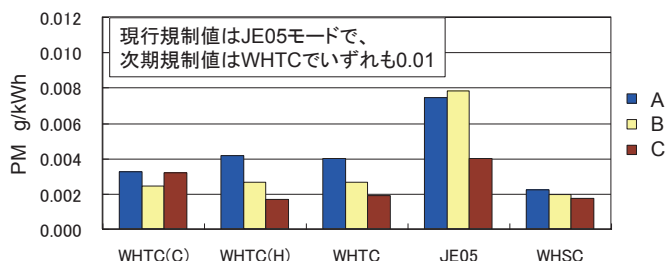


図 7 各エンジン各試験サイクルにおける PM 排出

図 7 の PM 排出について、DPF 再生を含まない結果ではあるが、いずれのエンジンにおいても十分に低い水準にある。ただ、A～C 全てにおいて JE05 モードが最も高い値となった。JE05 モードでは発進加速の頻度が高い割に全体としての仕事量が小さいため、相対的に高くなったと考えられる。なお、PM 排出については次期規制において規制値の変更はない。

WHSC においては、いずれの成分も排出量が少なく、一部のエンジンではすでに次期規制値をクリアするレベルであった。このことから適切な制御が行われれば、適合に向けた課題は少ないとみられる。

これらの結果から、次期規制で求められる排出ガス低減技術の高度化においては、WHTC で NO_x 規制値をクリアできることが最重要課題となり、中でも従来の認証試験がカバーしていない冷機状態での対策が大きなウェイトを占めると予想される。

3. 3. OCE 試験結果

評価対象エリアやそのエリア内の運転ポイントを

どこにするかが問題となるが、ここでは図 5 で示される 1～3 の 3 エリアを選択した場合を低速条件 (L)、4～6 を選択した場合を中速条件 (M)、7～9 を選択した場合を高速条件 (H) として、それぞれ比較することとした。各エリア内における 5 箇所の測定点は、エリア中央およびエリア外周部 4 点を選択した。

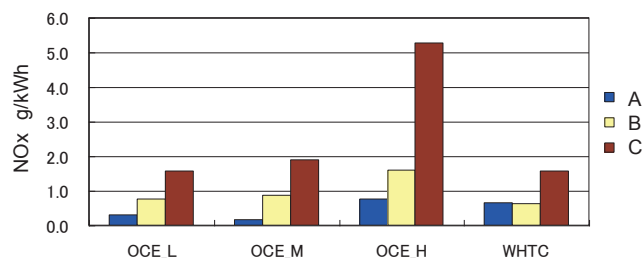


図 8 OCE の各条件における NO_x 排出

図 8 に各エンジンにおける測定結果を示す。

いずれも L、M 条件では WLTC の結果をやや上回るかそれ以下の値となり、GTR で定められた WNTC 規制値は妥当な水準といえる。ただし、H 条件ではエンジン B、C で明らかに高い値となった。これは触媒などにおいては排出ガス流量が多いほど NO_x 浄化に厳しい方向になることや、JE05 モードで使用頻度が低い領域であることなどが理由として考えられる。この領域は一般的に使用頻度が低い、車両と変速機等との組み合わせによっては、道路状況等により相当頻度で使用する可能性もあり、そのような場合には、OCE 導入により対策が進み改善効果が期待できる。

4. 今後課題となりうる点

2. 2 項において、大型トラック等を前提とした場合、従来の JE05 モードと WHTC ではエンジン使用領域が比較的重複している旨を記載した。しかし JE05 モードの試験条件を設定するための「標準的な車両」は JE05 モード作成時の平均的な諸元となっているのに対して、現在では従来に増して低燃費が求められることや技術の進化からそれとは大きく変化している。具体的には高過給化等により、常用回転数でのトルクを高め、それに機械式自動変速機構を持つ多段トランスミッション等を組み合わせて、エンジンにより低速回転数の高負荷領域で使用する傾向にある。このような変化について、JE05 モードであれば標準的な車両の諸元変更で簡便に対応できるが、WHTC ではそうはいかない。

図9はエンジンAにおけるWHTCと、当該エンジンを搭載して平成27年度燃費基準を達成した車両の設定としたJE05モードにおける、試験中に使用するエンジン回転数とトルクをプロットしたものである。WHTCにおいて1370rpm前後で縦にプロットが集中しているが、これは実走行において最高ギア段で車速80～90km/hの高速走行を行い、微妙な加減速や勾配等によりトルクが変化した状況を表している。それに対して、燃費基準達成車におけるJE05モードでは、80km/h以上の高速部分においても1200rpm前後で走行しており、WHTCと大きな違いがみられる。

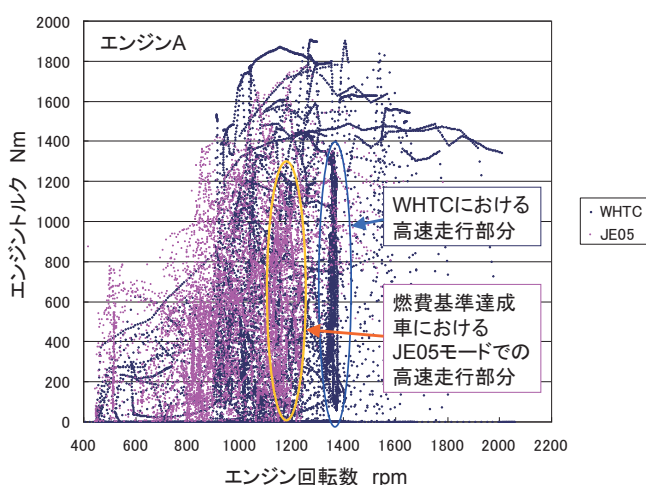


図9 WHTCと燃費基準達成車両におけるJE05モードとのエンジン使用領域の比較（エンジンA）

このような認証試験と実際の運用で想定されるエンジン使用領域の乖離は、デフィートストラテジーの有無によらず、実走行時の排出ガス性能が認証試験時より悪化する結果につながりやすい。既述のOCEはその対策の一部となるが、より有効なものとして、すでに欧米で導入が始まっている車載式排出ガス分析装置（PEMS: Portable Emission Measurement System）を用いた実車両による排出ガス評価が挙げられる。それについては、中環審第十次答申において導入に向けた検討を行っていくべき旨が記載されている。

世界統一試験サイクルの導入により、これまでは同一のエンジンであっても、仕向地ごとに適合作業などを行わねばならなかったのに対して、今後はそれが不要となり、輸出入の障壁がなくなることから、メーカー、ユーザーのコスト削減が期待される。一方で、上記のごとく日本固有の車両設定や走行環境等から離

れていく面が出ざるをえない。そこをカバーするにはPEMSを用いるなど、評価の複雑化についても「欧米並み」となる可能性がある。その複雑化する傾向を抑えるのではなく、必要なものとして追加しつつ、「一度で済ませる」ことで総合的な工数抑止を図るのが、重量車用排出ガス試験の世界統一化の本質といえるだろう。

5. ま と め

2016年以降に予定される次期規制で導入される国際統一試験サイクルであるWHTC、WHSC、OCEについて紹介するとともに、現行エンジンシステムで評価を行った場合の特徴などについて述べた。以下に概要をまとめる。

- (1) WHTCは、実走行に基づくが、JE05モードと異なり、車両で再現することはできない。JE05モードよりも高負荷領域を多く使用するため、後処理装置を有するエンジンでは、有利に働くことがある。しかし、冷機試験が合わせて行われることから、全体としては厳しくなる傾向で、次期規制適合に向けた技術開発はWHTCにおけるNO_x低減が主となるとみられる。
- (2) WHSCはWHTCを補完する定常試験サイクルとして作成された。エンジン試験の結果、NO_x、PM排出量は全てのエンジンでWHTCを下回り、適合は比較的容易と予想される。
- (3) OCEは、WHTC、WHSCでカバーしない領域も含めた性能維持を検証するものである。現行エンジンでは高速エンジン回転数でNO_x排出が増加する例がみられたが、OCE導入により対策が講じられることになる。
- (4) 今後の課題として、平成27年度燃費基準を達成した車両では、実走行でWHTCとは異なるエンジン運転領域を使用する傾向にあり、対策が必要となる可能性がある。欧米で実施されている車載式排出ガス分析装置（PEMS）を用いた実車両における排出ガス評価などがその候補となる。

参考文献、参照先など

- (1) 環境省ホームページ：<http://www.env.go.jp/council/toshin/t07-h2205.pdf>
- (2) 国交省ホームページ：http://www.mlit.go.jp/jidosha/sesaku/environment/osen/2_osenj.htm