実走行過渡モードを個別重量車のエンジンベース試験条件に自動変換するアルゴリズムについて

－重量車の新長期排出ガス試験法と燃費評価法への適用－

環境エネルギー部　※野田　明、 佐藤　由雄、 佐藤　辰二、 塚本雄次郎

１．まえがき

我が国では、排出ガス規制の強化にもかかわらず大都市部を中心として浮遊粒子状物質と二酸化窒素による大気汚染が依然として厳しい状況にある。特に沿道における大気環境汚染については、ディーゼル車の寄与度が高いとされ、実効性の高い排出ガス対策が望まれている。

１台あたりの排出量の多いディーゼル重量車については、エンジンベースで排出ガス試験が行われるが、PM規制の強化に対応してＤＰＦ等の排気後処理装置の装着が今後予想されるため、その性能を適正に評価できる試験法が必要となる。後処理装置の浄化性能は作動温度への依存性が強いことから、定常ベースの現行１３モード試験法では実用性能の評価に適していないとされ、中央環境審議会の第５次答申では、代表走行モードをベースにしたエンジンの過渡運転試験モードに変更する方針が示された。(1) しかし欧米で実施されている過渡モード試験法のように負荷率、回転数比の条件をすべてのエンジンに一律に規定する方法では、エンジンのトルク特性によって試験条件が変わり、代表モードを走行する際の現実の運転条件とは乖離してしまう可能性が高い。そこで同答申では、車速ベースの過渡モードパターンから個別の重量車の特性に合わせたエンジン試験条件を算出して運転し、排出ガスを測定する手法を導入すべきという提言がなされた。

当研究所では、環境省の要望に基づき、関係する研究機関と協力してエンジンベースへの変換アルゴリズムを開発し、その実行用プログラム（ＰＣ版）を完成させた。本報告では、代表モードと変換アルゴリズムの概要を示し、各種車両の入力情報によるプログラムの演算結果を例示することにより、エンジンベース新モード試験方法を紹介した。

さらに、この変換アルゴリズムを利用して、エンジン定常燃費マップと組合せて、各種車両、各種走行条件での燃費特性を推計する方法についても述べる。

２．エンジン試験のベースとなる代表走行モード

環境省が行った走行実態調査を基に、新長期排出ガス規制用の試験モードとして、軽量車（総重量３．５トン以下）を対象にしたシャシベース試験モード（図１－以下、ＣＤモードと記す）と重量車（同３．５トン超）のエンジン試験の前提となる代表走行モード（図２－以下、ＥＤモードと記す）が第５次中環審答

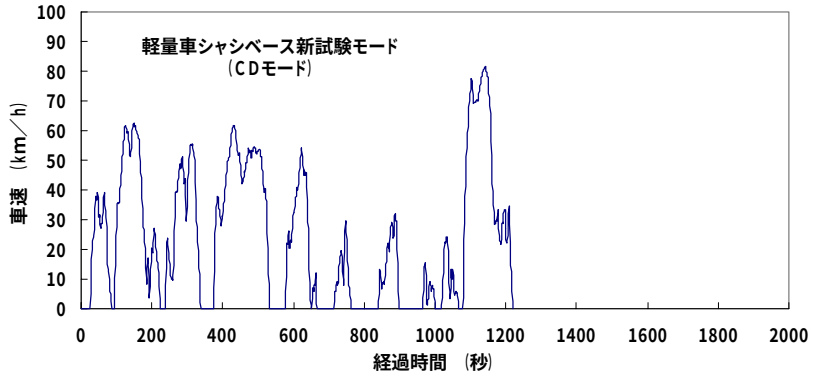

図１　シャシベース新試験モード（ＣＤモード）

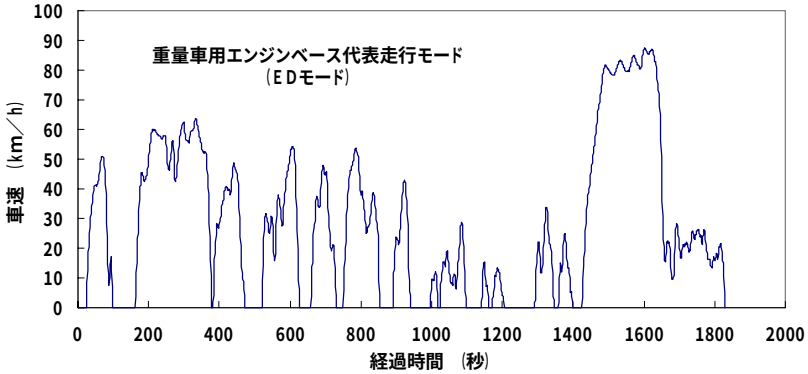

図２　エンジンベース新試験モード（ＥＤモード）

申において示された。

図３は、両試験モードの特性値の比較であり、モードのトータル時間を除けばこれらの走行特性値に関しては大きな差異は無い。図４は両モードのアイドリング域を除く走行時の車速と加速度の出現頻度を比較したものである。車速分布はほぼ同様であるが、加速度分布ではＥＤモードの方が使用範囲が狭く、急加速がしにくい重量車の走行実態が反映されている。重量車エンジンの排出ガス試験では、対象エンジンを搭載する代表車両がＥＤモードを半積載条件で走行するとして、そのエンジン回転、トルクを１秒ごとに計算し、試験ベンチでの運転指令値として与える。

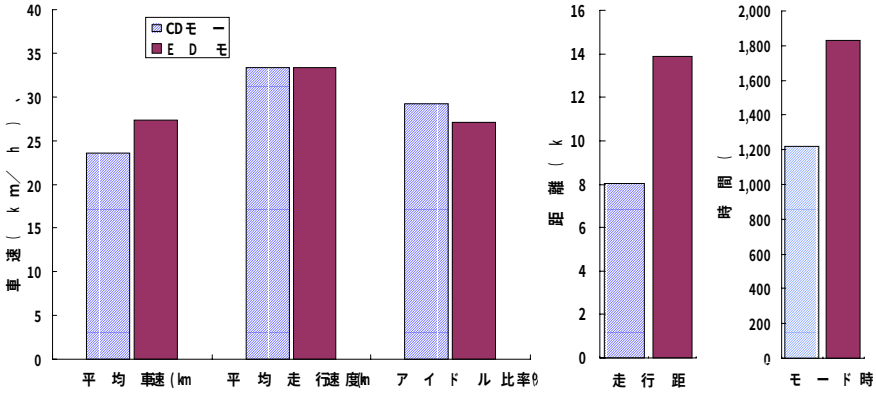

図３　ＣＤモードとＥＤモードの特性値の比較

３.走行モードから個別エンジンの試験条件を算出する変換アルゴリズム

３．１必要性の背景

車両走行時の変速段の選択と変速タイミングは、エンジンの使用域を決定し、結果として排出ガスや燃費に影響する。軽量ＭＴ車のシャシモード試験法では、使用ギヤと変速点が規定されているが、重量車はギヤ段数や変速比の組み合わせが複雑な上に、車両総重量によってもエンジンのパワーウェイト比が大きく変わる。このため走行モードからエンジンベースの条件に変換する際に、変速段、変速ポイントを一律に定めてトルクと回転数を決定すると、代表車両の現実の運転操作とは乖離してしまう可能性がある。

一方、欧米で実施されている過渡試験法のように、負荷率、回転数比を規定して全てのエンジンに適用する方法では、エンジンの最大トルク特性によって試験時の運転条件が変わり、代表走行モードをその車両が運転するという前提とは合致しなくなる。

実際の重量車の運転では、速度域、加速度、エンジン性能、変速機、車重等に応じて、運転者が走行に適したギヤ段と変速ポイントを選択しているので、こうした運転方法をアルゴリズム化することにした。

３．２　エンジン試験条件への変換アルゴリズム

新長期規制のエンジンベース試験法では、試験運転条件は次のように決定される。すなわち対象エンジンを搭載した代表車両がＥＤモードを走行するとして、規定された変換アルゴリズムが各瞬間のエンジン回転数、トルクを自動的に割り出し、これを台上運

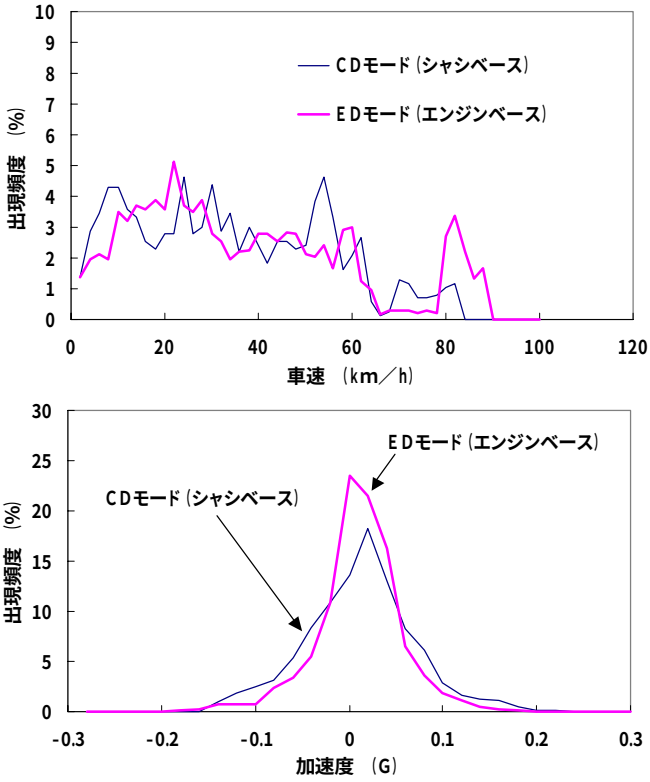

図４　２つの試験モードの車速と加速度の使用頻度

転での試験条件とする。この変換アルゴリズムでは、ＥＤモードパターンの速度、加速度と車両総重量、走行抵抗値等から各瞬間の必要駆動力を計算し、ギヤ比、タイヤ径、伝達効率などからトルク、回転数を算出する。計算のために入力する情報は、空車時車両質量、最大積載質量、定員（人）、車両の全高・全幅、エンジン回転数(アイドリング、定格、有負荷最高)、タイヤ動的負荷半径、ギヤ比(各変速段、終減速機)、全負荷トルク(８rpmごとの実測値)である。加速時の変速操作は、先読み処理でシフトアップ後の駆動力余裕率(その回転数での最大駆動力／必要駆動力)が基準値を越えるという条件と最低３秒間は同一ギヤを保持するという基本ルールにより、選択ギヤ段と変速タイミングを決定する。また最大トルクを越え

表１　計算に使用した貨物車の関連情報

車両区分	2t積み貨物車	4t積み貨物車	8t積み貨物車	16t積み貨物車
試験時車両総重量（半積載）	3.293	5.575	8.115	16.730
空車重量 (kg)	2190	3400	4310	8680
最大積載量 (kg)	2206	4350	7610	16100
試験時乗員 （人）	2	2	2	2
全高 (m)	2.06	2.41	2.019	3.131
全幅 (m)	1.7	2.23	2.23	2.49
タイヤ有効径 (m)	0.325	0.388	0.407	0.508
ギヤ段数	5	6	6	7
ギヤ比　1速	5.380	6.098	6.489	7.740
ギヤ比　2速	3.028	3.858	3.977	5.362
ギヤ比　3速	1.700	2.340	2.284	3.153
ギヤ比　4速	1.000	1.422	1.433	1.958
ギヤ比　5速	0.722	1.000	1.000	1.394
ギヤ比　6速		0.761	0.753	1.000
ギヤ比　7速				0.775
終減速比	4.111	3.900	4.444	3.307
アイドリング回転数 (rpm)	650	555	600	500
定格回転数 (rpm)	3200	2500	2700	1750
有負荷限界回転数 (rpm)	3400	2700	2900	1900

る場合や最低常用エンジン回転数以下となる場合は、シフトダウンを行う。その他に発進時や減速時、クラッチ断のアルゴリズムなども用いる。こうしたルール群をプログラム化して、ＥＤモード運転時の１秒ごとのエンジントルク、回転数を算出する。

この自動変換アルゴリズムは、環境省の求めに応じて、当研究所及び日本自動車研究所（ＪＡＲＩ）が共同で開発に当たった。

４.変換アルゴリズムの実行プログラム

４．１　プログラムの開発と検証

３に示した変換アルゴリズムに従って、実行用プログラムを開発した。今回のプログラムは、新長期排出ガス規制に対応したエンジン試験を実施する際の運転条件（指令値）を規定する唯一のツールとなることから、内容の透明性を高めるために、環境省、国土交通省、ＪＡＲＩ及び関係団体と協議の結果、ソースコードを一般に公開することになった。またソフトはＰＣ環境で実行できるものとし、利用者がプログラム内容を閲覧し理解できるように、科学技術プログラミング言語の主流であるＣ言語並びにＦＯＲＴＲＡＮで記述することとし、当研究所は前者（実際の開発環境としては、Ｃ＋＋を利用）を、ＪＡＲＩは後者を採用することとなった。

変換アルゴリズムの規定通りにプログラミングが行われたかを検証するため、当研究所とＪＡＲＩが個別に開発した両プログラムに対して、総重量クラスの異なる複数の車両、エンジンの情報を入力し、両プログラムの出力値である１秒ごとの選択ギヤ段、トルク、回転数の一致度を確認して、ソフトにバグが無いこと、同等の変換機能を有すること等を関係者の間で検証した。

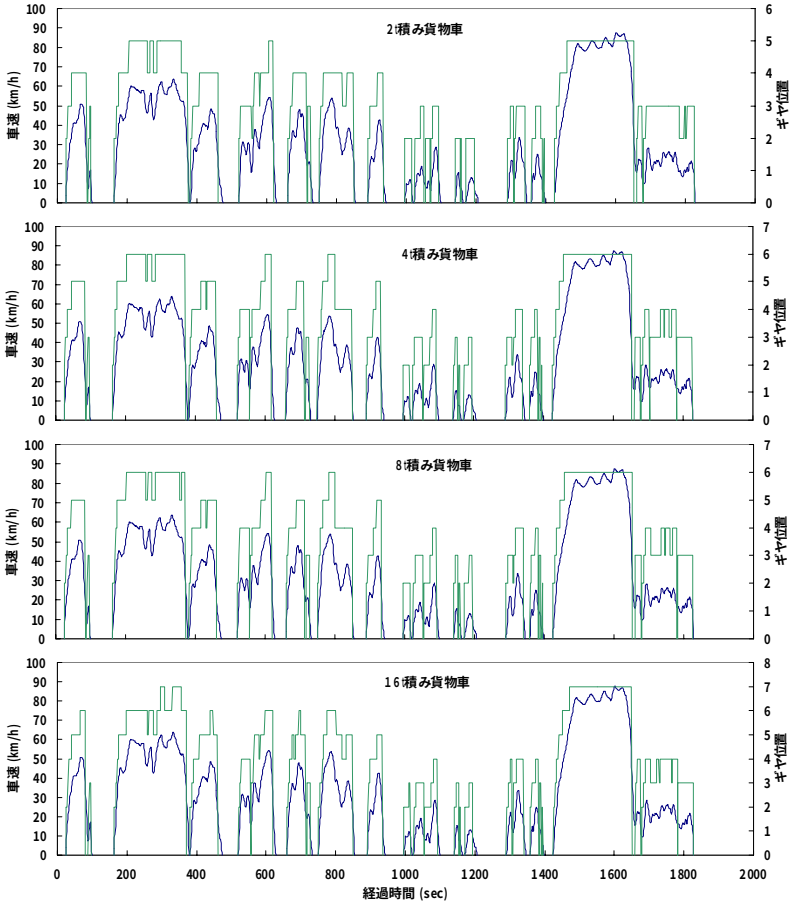

図５　ＥＤモード走行時の各車の変速位置の計算結果

４．２　ＥＤモード運転条件の計算例

前述の変換プログラムを使って、表１の４台の貨物車が半積載、２名乗車でＥＤモードを走行する時のエンジン使用条件を導いた。選択ギヤ段、変速ポイントの計算結果を図５に示す。車速範囲や加速度、各車の総ギヤ段数、ギヤ比に応じて、概ね適切なギヤ段が選択されていると判断される。

図６は４ｔ積み貨物車を例に取り、ＥＤモードの１５０秒～５００秒間におけるエンジン回転数とトルクの計算結果である。ディーゼル車の新長期規制における排出ガス試験では、このように出力された回転数とトルクの値をエンジン･ダイナモ制御装置の指令値として与えて運転し、排出ガスやＰＭ量を測定することになる。

エンジンベースの排出ガス値は、ｇ／ｋＷｈの単位で表示される。モードの総仕事量も実測値を使用することになるが、予測のため制御指令となるエンジン回転数、トルク値から計算してみた。図７は４車のＥＤモード試験時の総仕事量計算値であり、ほぼ車両の総重量（半積載条件）に比例した増加傾向を示すことがわかる。

４．３　ＥＤモード運転条件の特徴

ＥＤモード運転でのエンジン使用域の特徴を１３モードと比較した。結果を図８、図９に示す。なおアイドリング条件は、今回の頻度解析の対象から除外した。また負荷率と回転数比は、１３モードの定義と同様にした。各車とも、過渡ＥＤモードでは

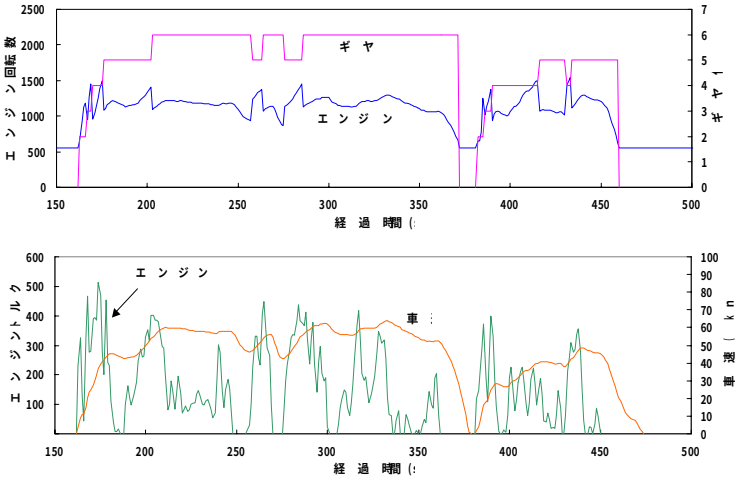

図６　４ｔ積み貨物車の回転数とトルクの計算結果

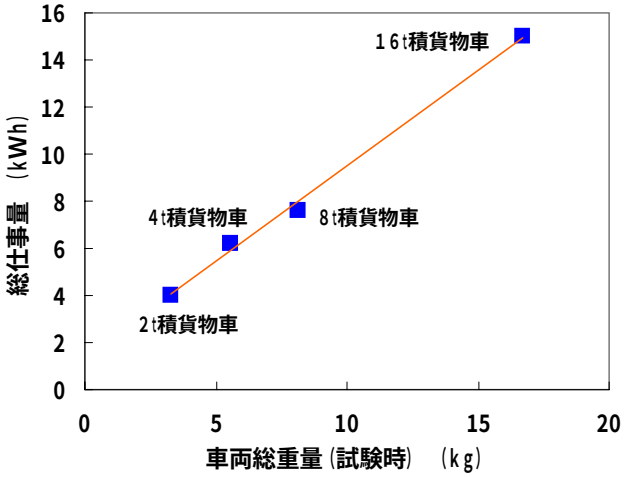

図７　ＥＤモード走行時の各車のエンジン総仕事量

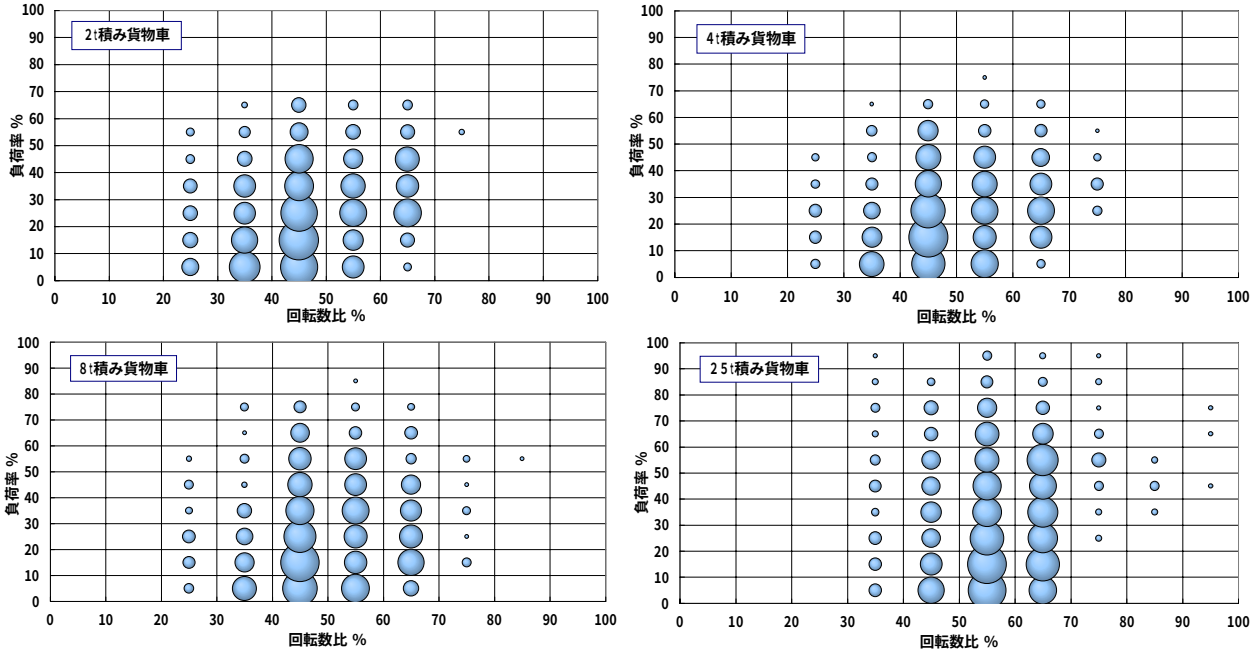

図８　ＥＤモード走行時の各車のエンジン負荷率と回転数比の使用域頻度

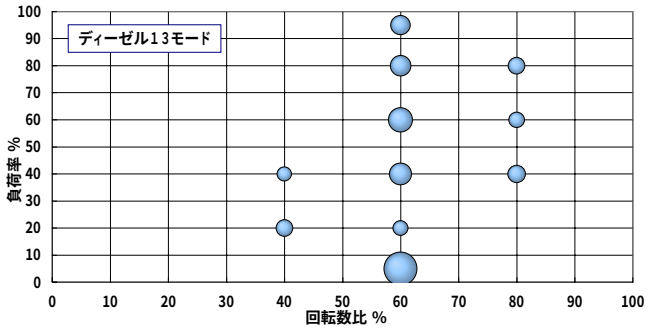

図９　Ｄ１３モードの負荷率と回転数比の使用域頻度

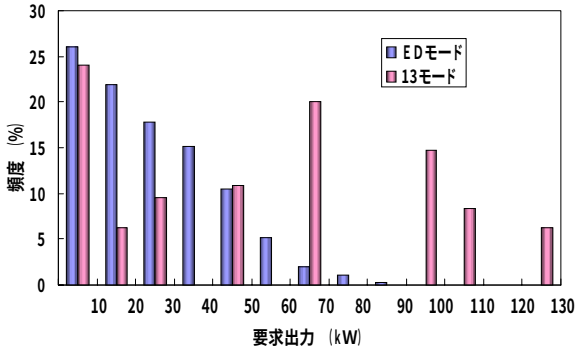

図１０　Ｄ１３モードの要求出力の使用頻度

低中負荷、低中回転域を中心に広い範囲が使用されている。１３モードでは、同試験法の規定により特定の定常運転条件がその重み係数（図９中の円の大きさで示す）で与えられが、図８のＥＤモードに比べて高負荷運転の割合が多い。図１０はエンジンの要求出力の頻度分布の比較である。なお１３モードでの出現率は、各モードの重み係数から求めた。図の結果から、出力条件も１３モードの方が平均的に高い。しかしＥＤモードは実走行のパターンを基に構成され、人間の操作に近い変速条件で各車両をモード追従運転する時のエンジン条件を導いたものなので、重量車の使用実態により近いエンジン試験条件といえる。

5.変換アルゴリズムを利用した燃費シミュレーション法とその応用

重量車の実路走行運転では、エンジン性能や変速段数、ギヤ比、車両総重量等に応じてドライバーが走行条件に適したギヤを選択しているが、本変換アルゴリズムはこうした運転方法をコンピュータ上で模擬するものである。この[走行モード]→[エンジン回転・トルク]の変速アルゴリズムを組み込んで、各種走行条件における燃料消費量を推計するプログラムを開発した。

5.1　燃費評価シミュレーションの方法

最初にエンジン単体のベンチ試験を行い、トルクと回転数の組み合わせを変えて、各ポイントでの燃料消費率（l／h）を測定し燃費マップを求める。燃費シミュレーションでは、入力した任意の車速パターンを仮想運転する際のギヤ位置を前記のアルゴリズムで割り出し、各瞬間のエンジン回転数とトルクを算出する。これを燃費マップに当てはめて、補間法により瞬時の燃料消費量を求める。この演算処理をモード全体に渡って実行することにより、その積算値から燃料総消費量を算出する。過去の研究成果から、同法による燃費推計結果は台上試験での燃費実測値と良く一致することが確認されている。(2)

表２ 燃費シミュレーションに用いた貨物車

空車重量 (kg)	3550
最大積載量 (kg)	4000
試験時乗員 (人)	2
全高 (m)	1.8
全幅 (m)	2.5
タイヤ有効径 (m)	0.398
ギヤ段数	6
ギヤ比　1速	7.817
ギヤ比　2速	4.957
ギヤ比　3速	2.992
ギヤ比　4速	1.866
ギヤ比　5速	1.312
ギヤ比　6速	1.000
終減速比	3.636
アイドリング回転数 (rpm	555
定格回転数 (rpm)	2900
有負荷限界回転数 (rpm	3000

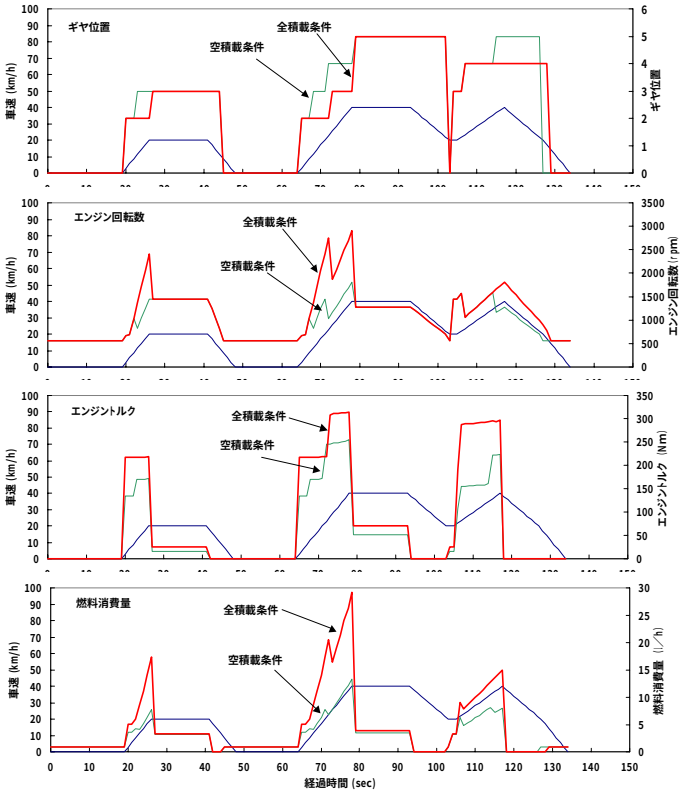

図１１ 変換プログラムによる１０モード空／全積載運転時のエンジン使用域と燃料流量の計算結果

重量車の燃費評価をシミュレーション法で行う利点は、計測がエンジン単体の燃費試験によるだけで良いという点にある。すなわち実車を使うシャシダイナモメータ試験法のように大型の試験設備、場所を必要としないこと、変速機、車体、重量等の車両条件がどのように変わっても、入力情報の変更のみで同エンジンを搭載するすべての車両の燃費評価結果が極めて短時間に得られる点に特長がある。

５．２　燃費シミュレーション推計結果の例

表２に仕様を示す４ｔ積みトラックを対象に、各種走行モード、積載条件における燃料消費特性をシミュレーション計算した。図１１は、空積載並びに全積載の条件で１０モードを仮想運転させた時のエンジン挙動と瞬時燃料消費量である。全積載時の加速条件では、モード追従性を確保する必要から、人間の運転操作と同じようにシフトアップが空積載時よりも遅めになっており、結果としてエンジンが高回転域で使われている。また加速時及び定速時のエンジントルクも相対的に高い。積載量増加に伴う燃料消費への影響は、同図下に示すように特に加速モード域において多く現れている。

図１２は、貨物積載率を変えてＥＤモードを運転した時の総仕事量と燃料消費量の計算結果である。積載率にほぼ比例する形で仕事量が増加し、それに対応して燃料消費量も増加していることがわかる。

図１３は、平均速度が異なる８種類の都市内実走行型モードと２種類の首都高速走行モードを半積載条件で運転した時の距離あたり仕事率と燃費の計算結果である。距離あたり仕事率（ｋＷ／ｋｍ）と燃費（ｋｍ／ｌ）は、平均速度５０ｋｍ／ｈ程度までは背反の関係にあるが、首都高モードでは空気抵抗増加の影響が燃費に表れている。図の結果から、平均速度が４０ｋｍ／ｈ以下の一般道路条件では、平均速度を高める交通流対策や渋滞対策が通行車両の燃料消費抑制に非常に有効になると予想される。

６．まとめ

(1)中環審第５次答申で示された重量車エンジンの新排出ガス試験法（代表走行モードから対象車種ごとにエンジン運転条件を定める方法）の概念に沿って、トルク、回転数のエンジン試験条件に自動変換するアルゴリズムと、その実行プログラムを開発した。

(2)同変換アルゴリズムは、加速時の変速ギヤの選択と変速点を決める基本ルール（余裕駆動力とギヤ保持時間の条件設定）や、発進時、減速時、回転数使用範囲等のルール群で構成される。開発した実行プログラムは、車両総重量、ギヤ段数、ギヤ比等の車両情報とエンジン最大トルク値等の入力値から、代表走行モードを運転する時の変速段を自動的に割り出し、エンジントルク、回転数を算出する機能を持つ。

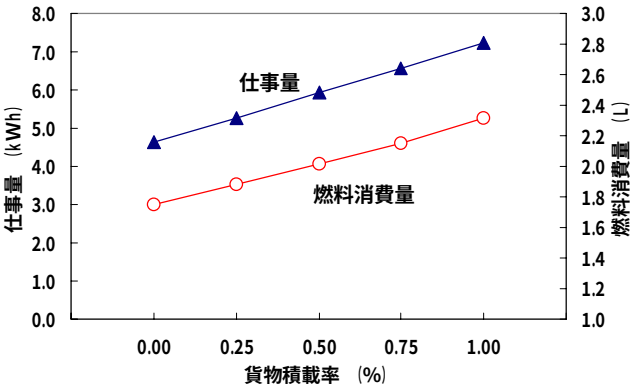

図１２　ＥＤモードにおける貨物積載率と仕事率、燃費の関係

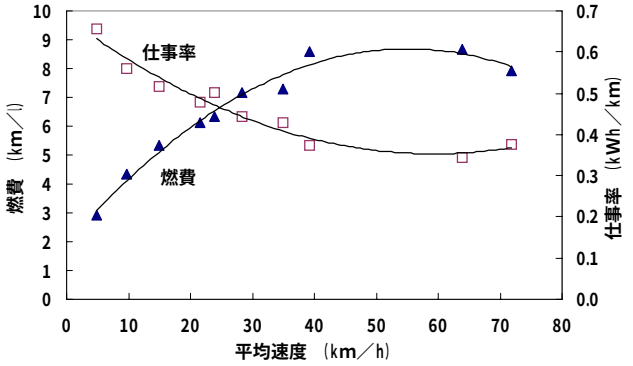

図１３　各種実走行モードにおける平均速度と仕事率、燃費の関係

(3)２ｔ～１６ｔ積みの４台の貨物車の諸元とエンジントルク特性を同変換プログラムに入力し、代表モード走行をエンジン試験条件に変換した結果を示した。また新試験法におけるエンジン使用領域の特徴を１３モード試験条件と比較した。

(4)同変換アルゴリズムを組み込んだ重量車用の燃費シミュレーションプログラムを開発した。これを用いて、各種の走行モードを種々の積載条件で運転した時の燃料消費量を計算し、平均速度と燃費との関連、積載率の影響などを把握した。

最後に、本報告で示したアルゴリズムに基づいて、Ｃ言語ベースでのＰＣ版変換プログラム・燃費シミュレーションプログラムの開発にご尽力を頂いた　㈱小野測器（共同研究提携先）の関係者に謝意を表します。

８．参考文献

(1)中央環境審議会大気環境部会、自動車排出ガス専門委員会；今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について（第５次報告）

(2)野田他；１９９８年自動車技術会春季学術講演会前刷り集１２７