

自動車燃料消費への影響要因分析に基づく消費抑制対策の効果予測法に関する研究

野田 明*、佐藤 辰二*、山本 敏朗*、塚本 雄次郎*

New Method to estimate Effectiveness of Automotive Energy Saving Strategies based on the Elemental Analysis on the Factors affecting Fuel Consumption

by

Akira NODA*, Tatsuji SATO*, Toshiro YAMAMOTO*, Yujiro TSUKAMOTO*

Abstract

The quantity of energy consumption and carbon dioxide (CO₂) emission in transportation section are steadily increasing in Japan. For the protection of our environment against global warming caused by CO₂, strategies to save automotive fuel consumption become very important. However, fuel consumption of vehicles in use is affected by many factors not only vehicle fundamental performance for fuel economy, but also driving speed profiles influenced by road traffic conditions, pay load conditions of trucks and buses, driving manner such as accelerator and a gearshift operation, and so on.

In this study, conducting on-road test to measure passenger vehicle's actual fuel consumption, and using simulation analysis to estimate fuel consumption of heavy duty vehicles, the authors examined various factors that influence fuel consumption characteristics.

In order to clarify fuel consumption characteristics in actual vehicle use, on-road tests were conducted on various road conditions with using the test vehicle equipped with some measuring instruments, and obtained experimental data were analyzed with a computer. The measured driving speed profiles under various road conditions were divided into their short trips (ST), and the relationship between those ST configuration parameters and ST fuel consumption quantities was investigated. From those analyses, it was found that vehicle's total work quantities needed to trace ST speed profile have an approximately linear function to ST fuel consumption quantity. This means that the total work to run on-road driving cycle is a most influential factor for fuel consumption in actual vehicle use.

On the other hand, to analyze influential parameters affecting HDV's fuel consumption, the authors developed a new practical method characterized by the combination of two procedures. One procedure is to make an engine fuel consumption map measured with an engine test stand, and the other is to execute a computer simulation procedure. With using this method, analysis how speed profile of urban driving influences fuel economy was conducted, and it was found that the traffic flow control that can raise vehicle average speed is quite effective for energy saving. In addition, the strategy of freight rationalization that can be helpful to reduce traffic volume is also effective to save total fuel consumption in automotive transportation.

原稿受付 : 平成16年2月23日

* 環境研究領域

1. 研究の目的及び位置付け

近年、世界各国のエネルギー消費の増加に伴って二酸化炭素（CO₂）の排出量が增大しており、これが地球温暖化をもたらすとの懸念が世界的に高まっている。こうした流れを受けて、平成9年12月には京都で気候変動枠組条約第3回締約国会議（COP3）が開催され、2008～2012年の目標年次に向けて、先進各国が温室効果ガスを基準年（1990年）より一定割合削減すべきであるという合意がなされた。

地球温暖化防止対策の中心はCO₂抑制であり、こうした国際公約を達成するためには、具体的かつ効果的な省エネルギー施策を産業・民生・運輸の各部門で強力に推進していくことが重要である。

我が国は、これまで産業部門を中心とした技術努力により世界トップクラスの省エネルギー化を実現してきたが、運輸部門では、輸送需要の高まり、ライフスタイルの変化等により、エネルギー消費の伸びが他部門に比べてきわめて顕著になっている。このため、特に運輸部門のエネルギー消費の約9割を占める自動車の燃料消費を抑制する必要があり、国はガソリン車に対する燃費基準の強化（トッランナー方式導入）とともに、ディーゼル車への新たな燃費基準設定等の諸施策を展開しているところである。

しかし、燃費基準はあくまでも自動車単体の基本性能を示す指標であり、車が実際に使用される際の燃料消費には、これ以外にも多数の要因（道路条件、走行方法、運転操作、貨物等の積載条件、エンジン暖機条件、エアコン等の補機類の作動、等）が複雑に影響している。このため、自動車部門の総エネルギー消費を抑制するには、実使用時の燃料消費への影響要因とその影響度を十分把握した上で、総消費量抑制に効果のある対策、例えば道路整備等のインフラ対策、交通流制御、物流の効率化、モーダルシフト、省エネ運転や車両整備でのユーザーへの啓蒙活動、等の諸施策を総合的に進める必要がある。ただそのためには、コスト効果の算定も重要であり、燃料消費節減のための各種施策の実用的効果を予測評価する手法や客観的資料が必要となる。

しかしながら、現状では自動車の燃料消費の影響要因を解析する手法や実証データが十分とはいえ、例えば最近言われているアイドルストップ運動による消費燃料削減の実際効果や、交通の流れを円滑化した場合の燃費向上効果、貨物輸送の集約化によるトータル燃料消費の削減量、さらには新しい燃費基準が適用された車両を導入した

場合の実使用条件下での具体的効果の推定が難しい。すなわち各種の消費抑制施策の効果を予測評価する適切な手法がないために、各施策に対する定量的な裏付け資料が得にくい状況にある。

こうした背景から本研究では、自動車の燃料消費に影響する各種要因について解析し、これをもとに各種の燃料消費抑制施策の効果を予測評価する手法の確立を目指した。

2. 研究の手法

本研究では、乗用車や貨物車が都市内の渋滞路や市街路、高速道路、交通量の少ない地方道、起伏のある山岳路等の道路条件下での走行した時の燃料消費量を調べる実路走行実験やシャシダイナモメータ実験を行い、同時に測定したエンジン及び車両のデータと合わせて比較解析することにより、燃料消費に対する影響要因の抽出と影響度の定量的把握を行う。

次に実走行燃費を推計する数値モデルの開発にも取り組む。このモデルには、実験・解析で得られた燃費影響要因を変数に折り込むこととする。この数値モデルをベースに、広範な実使用条件下での燃料消費量を推計するシミュレーションモデルを構築する。

次にこの燃費シミュレーションプログラムを使って、各種の自動車燃費抑制対策（車両の軽量化、走行抵抗の改善、エンジン熱効率改善、停車時のアイドルストップ、交通管制制御・道路整備による交通の円滑化、物流の集約化・モーダルシフト等）を実施した場合の変数の変化量を同シミュレーションプログラムにインプットすることにより、アウトプットとしての燃料消費削減量の効果予測を行う。

本研究では、最初の実走行条件下での燃料消費特性とその影響要因を把握する観点から、試験用乗用車を用いて実走行実験を行い、各種道路条件下での走行特性を解析し、走行条件が燃料消費に与える影響度を調べた。次に貨物車の実用燃費推計手法についても検討した。重量車エンジンの燃費マップと車両情報、仮想運転のロジックから任意の過渡モードにおける燃料消費量を算出するシミュレーションプログラムを開発し、その応用例として、各種の省エネ施策の効果予測を行った。

3. 軽量車の実走行条件下における燃費影響要因の実験的解析

自動車の燃料消費では、車の基本燃費性能の他に、走行条件の違いの影響も大きい。そこでこの影響度を把握するため、軽量車（乗用車）を実際

に各種の道路条件で運転し、各瞬間の燃料流量を計測し、集録した全データから走行条件と燃料消費との関連性を解析して、実走行燃費への主影響要因を把握した。

3.1 実験及び計測の方法

実路走行実験は、排気量 2000cc、ターボ過給電子制御燃料噴射エンジン（最高出力 170ps）を備えた試験用乗用車（空車重量 1500kg + 人員 2 名、その他、計測器類、バッテリー等の重量増分）を使って行った。なお、今回の走行実験では、エンジンの吸入空気量と排気空燃比をリアルタイムに計測し、下式を使って瞬時燃料消費量を間接的に算出する方法を用いた。

$$\text{燃料消費量 (g/sec)} = \frac{\text{吸入空気量 (g/sec)} \times \text{空燃比}}{\text{空燃比}}$$

吸入空気量は、運転中の吸気管圧力とエンジン回転数を連続計測し、シリンダ容積と充填効率から計算した。また排気空燃比は、小型の広帯域空燃比センサを触媒上流側の排気管に挿入して計測した。この計測法では、充填効率も間接値として与えているので、全部の運転領域で必ずしも正確さを出せない欠点がある。しかし加減速運転時に急激に変化する瞬時燃料流量を応答性良く測定するには、燃料流量計方式よりも優れていると考えられる。実走行時の車速は、タイヤ状態の影響を受けやすい推進軸の回転検出方式ではなく、路面と車両の相対速度差を正確に計測できる非接触車速計を用いて測定した。車両の瞬時加速度は、計測ノイズの影響を避けるため、サンプル点の前後数点の車速データを多項式で近似し、中心点の微分係数を算出することにより求めた。車上での計測データは、0.1 秒ごとにサンプルしてデジタル量でデータロガーに記録し、実験終了後にコンピュータで解析した。

実走行時の燃料消費特性を測定した道路条件は、東京都内（国道 20 号、環状 8 号）と地方都市（浜松市内）の市街地での走行、地方（静岡県）における比較的交通量の少ないローカル道路でのスムーズな走行、並びに高速道路（東名高速）走行の 3 種類とし、その中から各道路条件を代表するものとして、それぞれ 3 つの走行条件を選んでデータ解析を行った。市街地走行では平均車速が 16 ~ 24km/h であり、地方道は平均車速 34 ~ 43km/h、高速道路走行は平均車速 77 ~ 92km/h であった。この他に、参考として山岳路（箱根ターンパイク）の登坂路走行でも燃料消費を計測した。

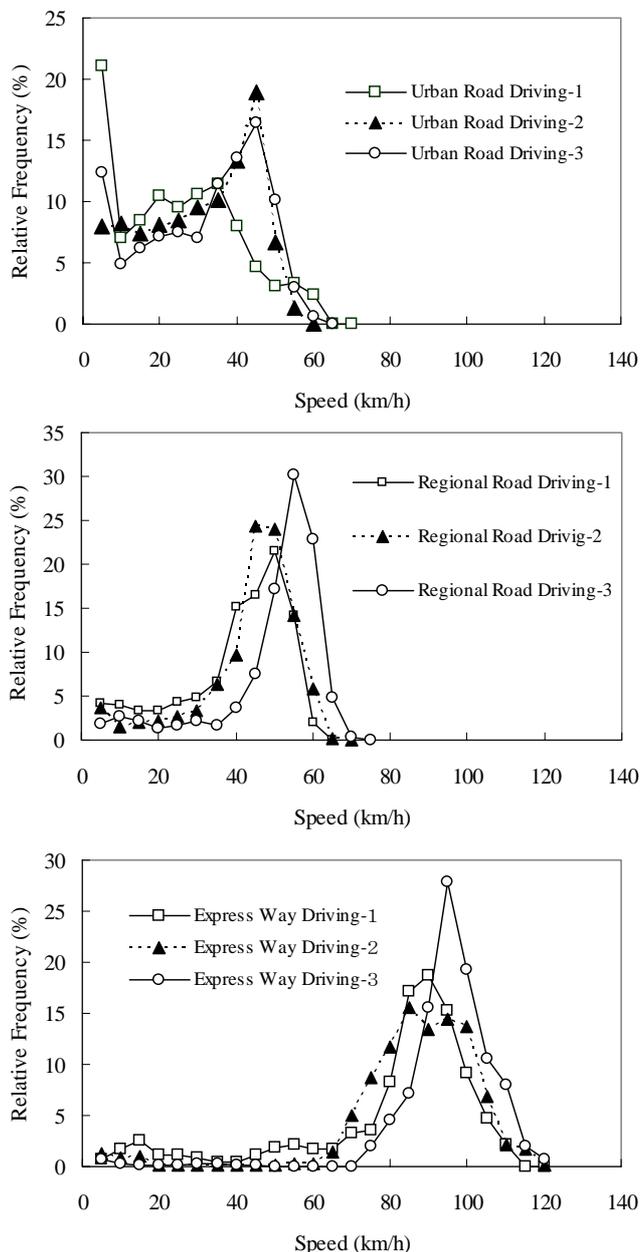


Fig.1 Relative Frequency of Vehicle Speed under various road conditions

3.2 実験結果

3.2.1 道路条件別の走行状態の特徴分析

図 1 は、市街路走行、地方道走行及び高速道路走行における使用速度域の出現率分布である。図 1 上段の市街路走行では、渋滞や赤信号によるアイドル停止が多く、また車速範囲も 10 ~ 50km/h の広い範囲に分布している。図 1 中段の地方道走行では、交通量が少なく信号停止も少ないスムーズな走行条件であったため、30km/h 以下の低速域が少ない代わりに 40 ~ 60km/h の中速域が多い。図 1 下段の高速道路走行では、車両混雑もなかったので 80 ~ 110km/h の範囲で走行が行われている。

次に道路走行条件別にアイドル、加速、定速、減速の各運転領域の発生割合を求めた。なお、こ

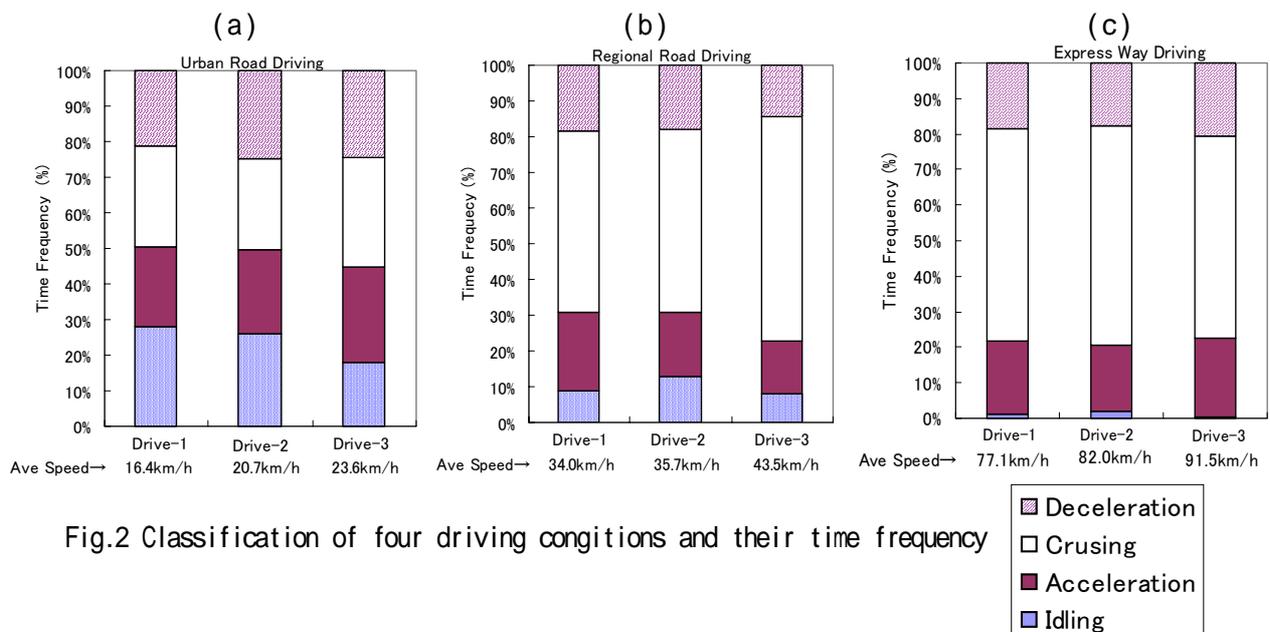


Fig.2 Classification of four driving conditions and their time frequency

で加速運転域とは0.2G以上の加速度を伴う運転域、定速域は加速度が-0.02G以上+0.02G以下の範囲にある運転域、減速域は加速度が-0.02G以下の運転領域と定義した。結果を図2(a)~(c)に示す。図2(a)の市街路走行の場合は、信号停止が多いことからアイドリング割合が高く、また発進、停止に伴う加減速の割合も増え、結果として4種類の運転域がほぼ同じ割合となった。なお市街路走行で混雑、渋滞がさらに激しくなれば必然的にアイドリングの比率が増加する。車の流れがスムーズな地方道走行の場合は、図2(b)に示すようにアイドリングの割合が減少し反対に定速運転域が増加する。図2(c)の高速道路走行では、渋滞が発生しない限りアイドリングは料金所での停止だけで、定速運転域の多い走行条件となるが、追い越しや前方車との車間距離調整、道路勾配等もあるため、加速域や減速域も一定の割合で発生している。

一般道路では、信号停止等の外的要因により、車が発進~走行~停止を繰り返しながら、必要区間(出発地から目的地まで)の走行が行われる。以下の解析では、一連の連続した測定区間の走行をトリップと呼ぶことにする。実走行パターンのデータ解析では、発進から停止までの間をひとつの走行単位として捉え、これをショートトリップ(以下、STと記す)と定義する。すなわち1回のトリップ走行では、アイドリング状態とSTが交互に多数回繰り返された集合体として捉えることができる。

ここで走行区間の走り方の特徴を表すため、3種類の平均速度を導入する。第1は、アイドリング時間を含めたトリップ区間全体での平均速度(以下、平均区間速度と呼ぶ)であり、第2はアイ

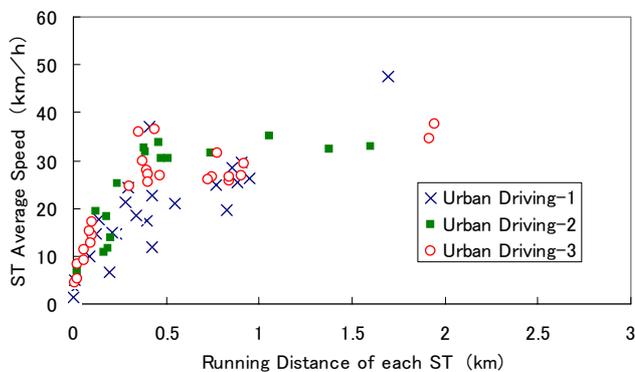


Fig.3(a) Relationship between ST Running Distance and ST Average Speed (Urban Road Driving)

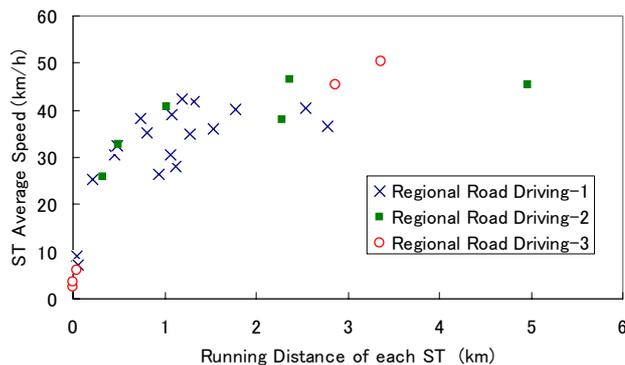


Fig.3(b) Relationship between ST Running Distance and ST Average Speed (Regional Road Driving)

ドル停止の時間を除外した走行中のみの平均速度(以下、平均走行速度と呼ぶ)である。さらに3番目は、各STの個々の平均走行速度(以下、ST平均速度と呼ぶ)である。

次に道路走行条件別にST集合の特徴を解析した。各STごとの移動距離とST平均速度の関係を図3(a)(b)に示す。市街路走行での測定

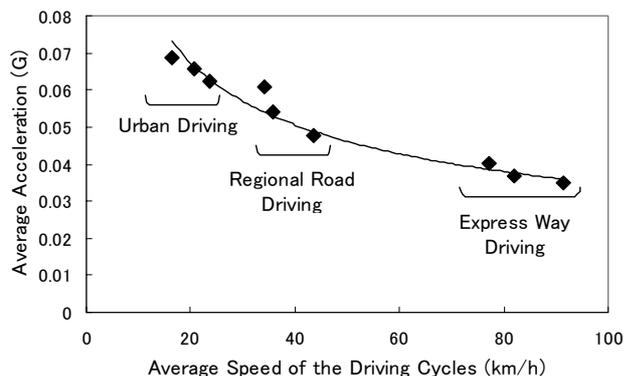


Fig.4 Average Acceleration under various driving conditions

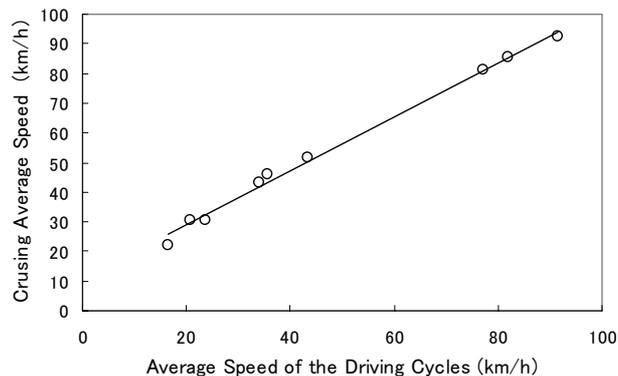


Fig.5 Average Cruising Speed under various driving conditions

結果 (図3 (a)) を見ると、個々のSTについては、移動距離0.5km以内が多いが、その範囲では移動距離の増加とともにST平均速度が上昇している。一方、移動距離が1kmを越えると、ST平均速度は30km/h程度に安定する。図3 (b) の地方道走行では、信号停止が少ないことからST移動距離が1km以上の走行が多く、この条件ではST平均速度も40km/h程度とやや高くなっている。

図4は、市街路、地方道及び高速道路の各走行において、加速域における瞬時加速度の平均値を求め、この値とトリップ全体の平均走行速度との関係を示したものである。市街路走行での加速度平均値は、0.06G ~ 0.07G と他の走行条件よりも高いが、これは平均走行速度が20km/h強と低車速域での運転が多く、自動変速機がエンジン高回転・高駆動力となる低変速段を選択する運転条件が多くなることに起因する。地方道走行では、平均走行速度が40km/h前後にあり、加速度の平均値はやや低下して0.05 ~ 0.06Gとなる。一方、高速道路走行では、高速域での加速となることからエンジンに高出力条件が要求され、さらに高速で使用ギヤ段も高いことから、加速度の平均値は0.03 ~ 0.04Gと、市街路や地方道の走行に比べて低くなっている。

図5は、定速運転域の中での車速の平均値を求め、これとトリップ全体の平均走行速度との関係を示したものである。平均走行速度の上昇とともに定速域の平均速度が上昇し、両者はほぼ直線関係にある。すなわち、定速運転状態での車速が平均走行速度と強い相関を持つといえる。

3.2.2 走行特性と燃料消費特性の関連解析

次に、走行条件の違いが燃料消費に及ぼす影響を解析した。図6は、各道路走行条件別に平均区間速度と燃費 (km/l) の関係を示すものである。なお、図中には参考として、山岳登坂路での測定

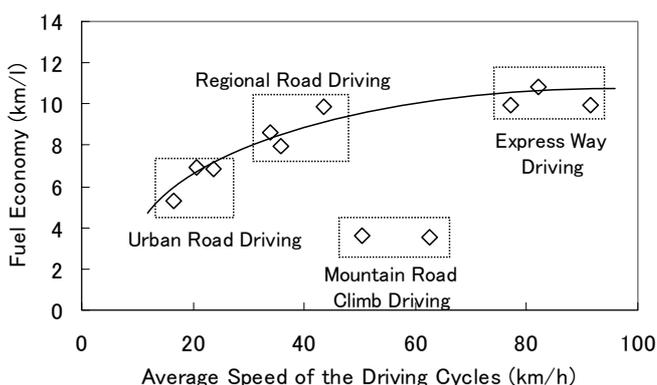


Fig.6 Relationship between Average Speed of Driving Cycles and corresponding Fuel Economy

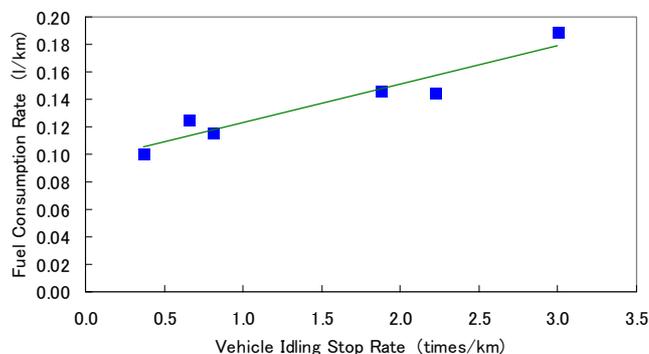


Fig.7 Relation Ship between Vehicle Stop Rate and Fuel Consumption Rate

結果も示している。この結果から、平均区間速度の上昇とともに燃費が向上していることが明らかである。信号停止が多く平均区間速度の低い市街路走行では、アイドル停止状態が多いこと、発進・停止が多く加減速運転の割合が増加することから、燃費値は大きく低下している。一方、地方道走行や高速道走行では、定速走行割合が増えることにより、燃費値が向上している。なお図中に示した山岳登坂路走行では、登り勾配では走行抵抗が大きく上昇し、エンジンが高負荷・高回転で多

く運転されるため、平均区間速度が高くなっても、燃費値としては極端に悪化している。

次に車両停止の頻度と燃費との関係を調べた。図7は市街路走行および地方道走行におけるアイドル停止率（1 kmあたりの停止回数）とトリップ区間の燃料消費率（l/km）の関係を示したものである。アイドル停止率の増加とともに燃料消費率が悪化し、両者はほぼ直線関係にある。この結果から、アイドル停止率を減らすための施策、例えば道路の拡幅や信号制御の最適化等により交通流をスムーズにできれば、燃料消費を効果的に削減できることが明らかである。

車両の停止回数が減れば、結果としてSTあたりの移動距離が伸びる。図8(a)(b)は市街路走行および地方道走行において、各STごとの移動距離と燃料消費率（l/km）の関係を求めたものである。この結果から、ST移動距離が500mより低下すると極端に燃料消費率が悪化していることがわかる。これは短距離のST走行では、燃料を多く消費する加速運転域の占める割合が増加することに起因する。

図9は加速領域と定速領域における各々の燃料流量（l/h）の平均値を3種類の走行条件について計算した結果である。加速時の平均流量は、市街路走行では定速時の2～2.5倍となり、地方道走行と高速道走行でも1.4～1.5倍多い。したがって加速運転の頻度を減らして、なるべく定速走行を多く使う運転が燃費向上に有効である。その意味で、特に市街路において走行をスムーズにする交通流改善策は、実際の燃費削減に大きな効果が期待できる。

アイドル停止時は燃料を無駄に消費している状態であり、走行条件によってはこの量が燃費にかなり影響していることも予想される。図10は、各走行条件での平均区間速度に対して、アイドル時の燃料消費が全体消費に占める割合を調べた結果

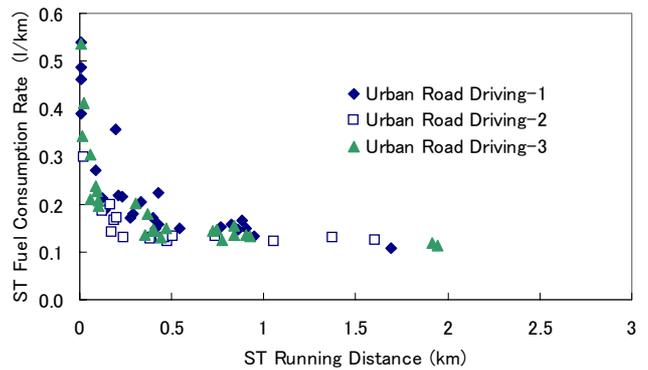


Fig.8(a) Relationship between ST Running Distance and ST Fuel Consumption Rate (Urban Driving)

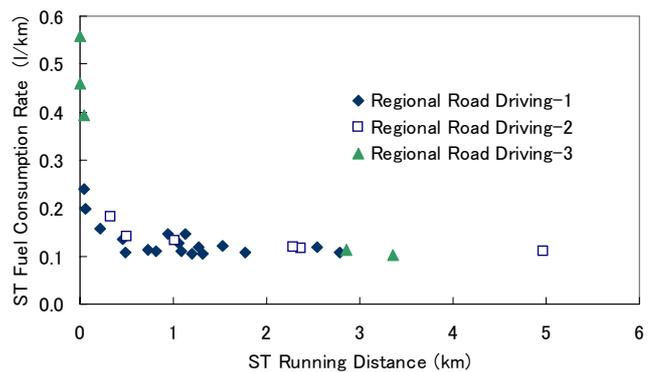


Fig.8(b) Relationship between ST Running Distance and ST Fuel Consumption Rate (Regional Road Driving)

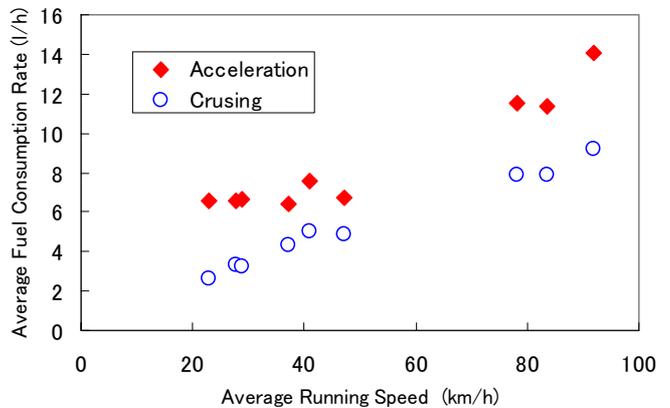


Fig.9 Fuel Consumption Rate for Acceleration and Cruising

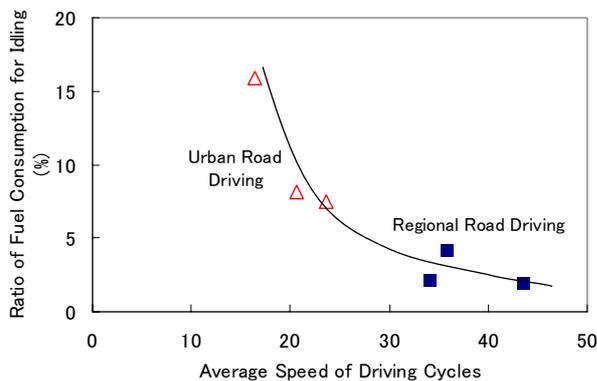


Fig.10 Ratio of Idling Fuel Consumption to total Fuel Consumption

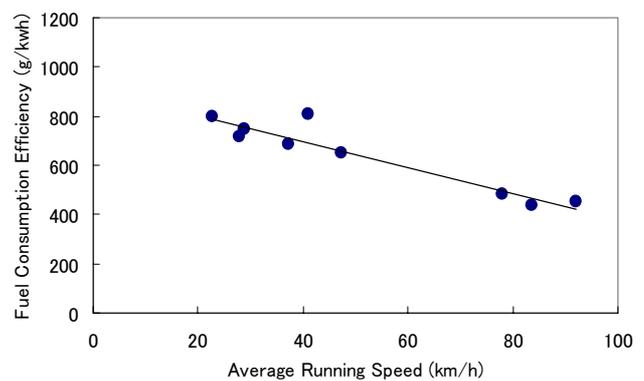


Fig.11 Fuel Consumption Efficiency under Practical Driving Conditions

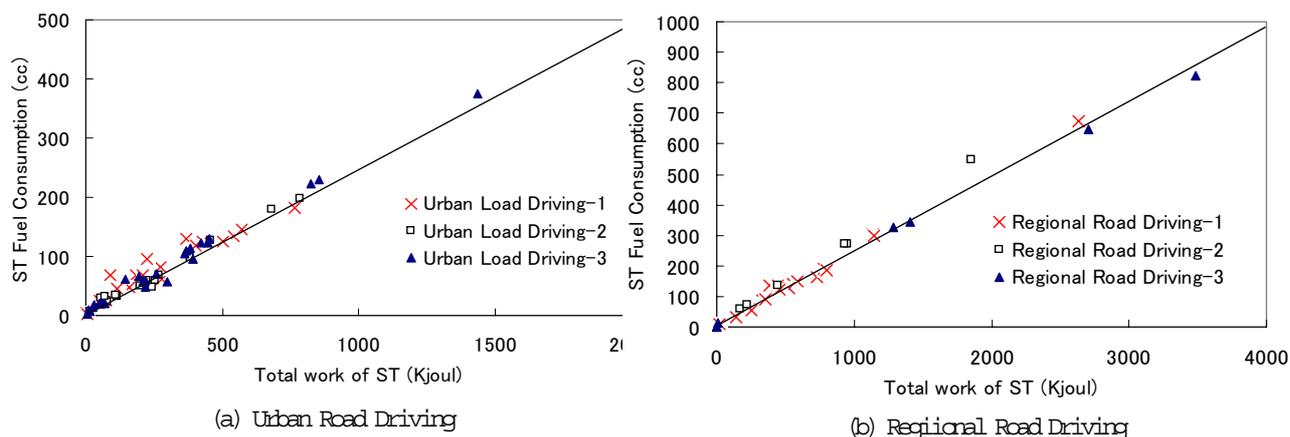


Fig.12 Relationship between ST Total Work and ST Fuel Consumption for each Driving Cycle

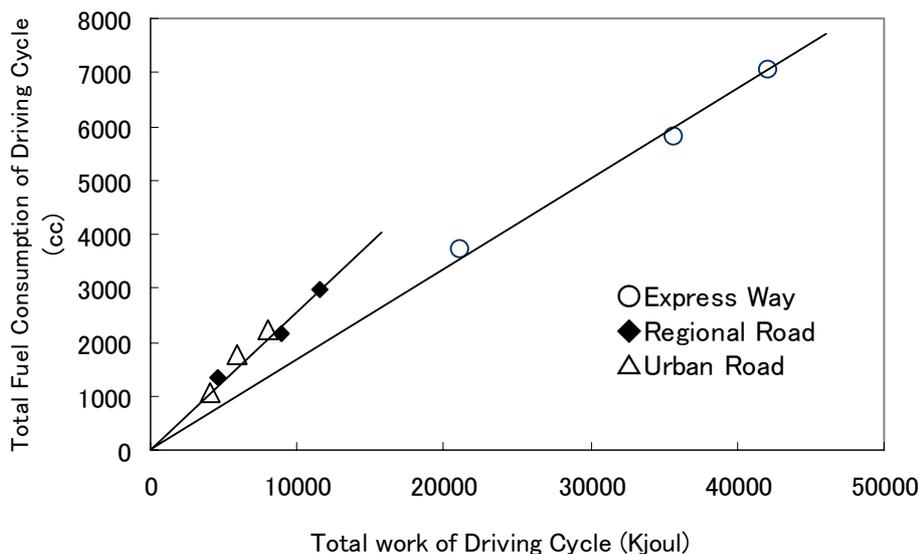


Fig.13 Relationship between Total Work and Fuel Consumption for each Driving Cycle

である。平均区間速度の高い地方道走行では、アイドル停止時の消費量は全体の2～4%であるが、市街路の走行では全体の8～16%となっており、かなりの割合となる。すなわち市街地での走行燃費を改善するには、前述の停車率を減らす施策（交通流改善策）の他に、車両停止時にドライバーがこまめにエンジンを切るアイドルストップ運転や、車両自体に自動エンジン停止・始動機構を備える等の対策が有効といえる。

これまででは、車を移動のための道具として捉えて走行距離あたりの燃料消費量を議論してきた。一方、エンジンのエネルギー消費効率は、消費した燃料発熱量に対するエンジンの発生仕事の比率で表すのが一般的である。そこで走行条件別に車両への要求仕事を計算し、これと燃料の消費量から実走行時のエネルギー消費効率を推定した。なお今回の実走行実験では、試験車両に駆動力を測定することができなかったため、走行時の所要駆動力は、平坦路走行抵抗係数と車両重量、加速

度、速度から計算した。減速時に要求仕事マイナスと計算された時は、ゼロとした。この要求仕事の算出では、道路は平坦と仮定し、道路勾配や路面状態による走行抵抗の変化などを考慮していないことから、計算仕事量 kWh の値は参考値的なものとなる。

図 11 に平均区間速度と燃料消費効率 (g/kWh) の関係を示す。この図によると、平均区間速度の上昇とともに消費効率が上昇し、高速道走行時が最も高い。平均区間速度の低い市街路走行時は、アイドリングでの消費割合が多い上に、熱効率の低い低エンジン回転域が使われる頻度が高く、結果として要求仕事に対する燃料消費率が悪化している。

次に個々の ST の総仕事量 (KJ) と ST の燃料消費量 (cc) の関係を調べた。図 12 (a) は市街路走行における両者の関係を示し、また図 12 (b) は地方道走行における結果である。両者は極めて高い相関度を持ち、ほぼ比例関係にあるこ

とから、燃料消費量に直接的に影響する因子は、走行仕事量である。またその比例定数も、市街路と地方道ではほぼ同一であった。このことから一般道での走行では、車速パターン、走行抵抗、車両重量からSTの総仕事量を計算すれば、この比例定数を使って走行に必要な燃料消費量を推計できる簡便モデルが構築できる。

なお高速道走行時は、前述のようにエンジンの使用域が一般道走行に比べてかなり高回転になるため、エンジンの熱効率が相対的に高い運転状態で使われ、仕事量と燃料消費量の関係が一般道走行時とは異なると予想される。それを実証するため、3種の走行条件でトリップの総仕事量と総燃料消費量（ただしアイドリング時の消費量を除く）の関係を求めた。結果を図13に示す。この結

果から、高速道走行時でも両者の比例関係は崩れないが、仕事量に対する燃料消費量が一般道走行より低く、比例定数が異なることがわかった。すなわち総仕事から燃料消費量を推計する場合は、一般道と高速道を分けて計算する必要がある。

4. 重量車における燃費関連要因とその影響度に関するミュレーション解析

4.1 まえがき

自動車部門の省エネルギー化には、低燃費車の普及とともに、車両運用の改善、物流の合理化、交通インフラ改善等の総合的な対策が必要であり、各対策の効果を個別に評価してより効果の高いものを示すことが重要である。そのためには、実使用時の燃費の関連要因とその影響度を定量的に把握し、各種

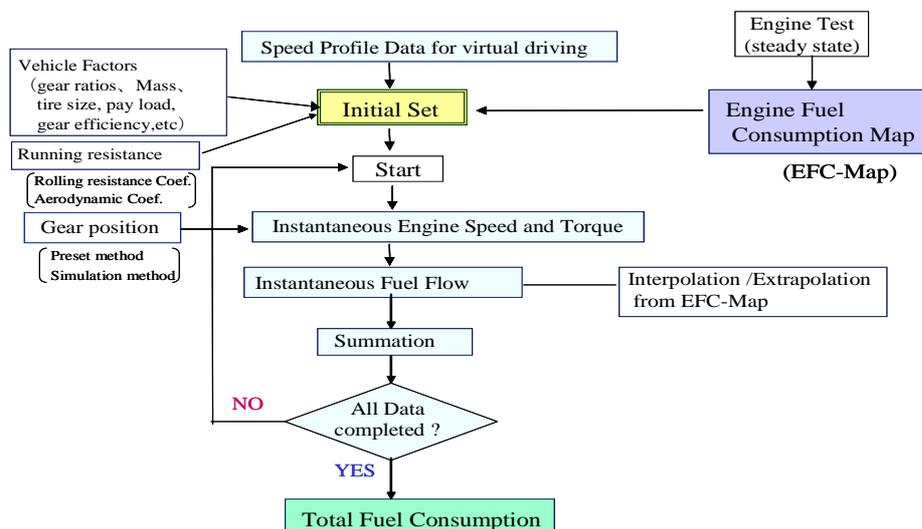


Fig.14 Block Diagram of the Fuel Economy Simulation Procedure

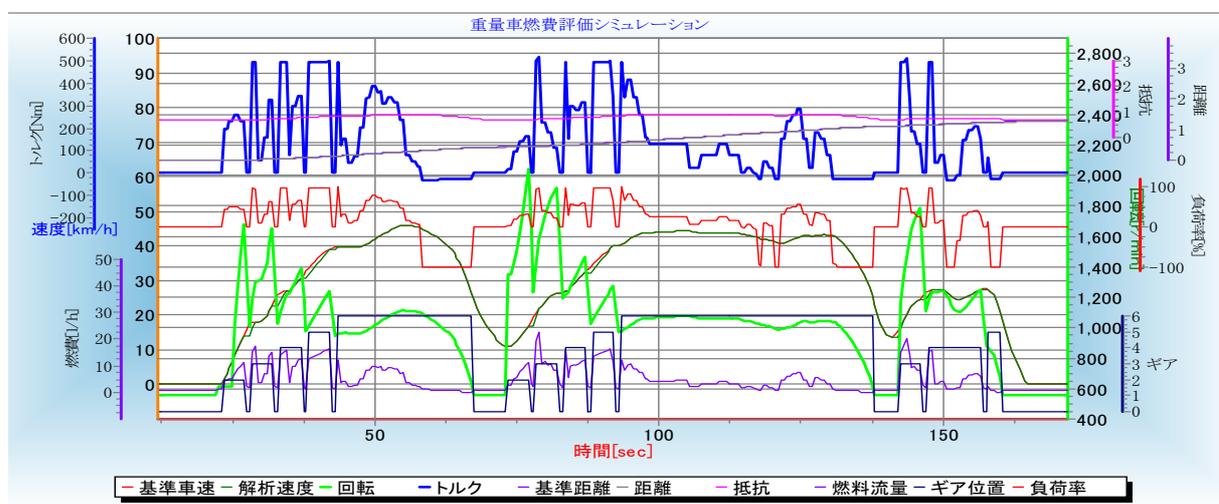


Fig.15 Simulation Results of Engine Behaviour and Fuel Consumption Rate under Transient Mode Driving

施策を展開した場合の実際面での効果を裏付ける資料を求める必要がある。

こうした観点から本章では、1台あたりの消費量が多く、またユーザーの燃費節約意識がとりわけ高い重量貨物車に関して、実用運転時における各種燃費影響要因を解析できるシミュレーション法を開発し、各々の燃費影響度を定量化することを試みた。

4.2 燃費シミュレーションの方法

前述の目的に対応するため、以前に開発した燃費シミュレーションソフト⁽¹⁾を、任意の過渡モードの走行燃費が算出できるように改良した。図14は本プログラムの基本構成である。本シミュレーション法では、最初にエンジン単体の燃費特性を定常試験で測定し、燃費マップを求める。次に同ソフトを立上げて、対象とする走行モードの車速データ並びに対象車の構造情報、エンジンの燃費マップデータ、運転パラメータ等を入力する。シミュレーション処理では、指定した運転ロジックに基づいて入力モードをコンピュータ内で仮想走行させ、ギヤ位置と所要駆動力等から各瞬間のエンジン回転数とトルク（負荷率）を計算する。この値を燃費マップに適

Table 1 Specification of Trucks used for the Fuel Economy Simulation

		2 tons pay load truck	4 tons pay load truck	8 tons pay load truck
Bore × Stroke	mm	110 × 120	114 × 130	133 × 160
Total Displacement	cc	4561	7960	13337
Maximum Power	ps/rpm	140/3200	200/2900	235/2900
Maximum Torque	Nm/rpm	333/1600	529/1700	833/1300
Vehicle Weight	Kg	2400	3550	6985
Max. Pay Load	Kg	2000	4000	8000
Frontal Area	m ²	3.3	4.5	5.8
Gear Ration	1 st	5.38	7.817	7.833
	2 nd	3.027	4.957	4.811
	3 rd	1.7	2.992	3.087
	4 th	1	1.866	1.989
	5 th	0.722	1.312	1.353
	6 th		1	1
	Final	4.875	3.636	3.777
Tire Radius	m	0.337	0.398	0.506

用し、補間法により各瞬間の燃料流量を求める。この処理をモード全体に渡って逐次実行し、得られた瞬時値を積算することで、総消費量を算出する。こうした方法で求めたモード走行燃費の推計値は、瞬時値および総消費量に関して、シャシダイナモ上での実測値と良く一致することを確認した。⁽²⁾⁽³⁾

図15は過渡モード走行時の燃費シミュレーション

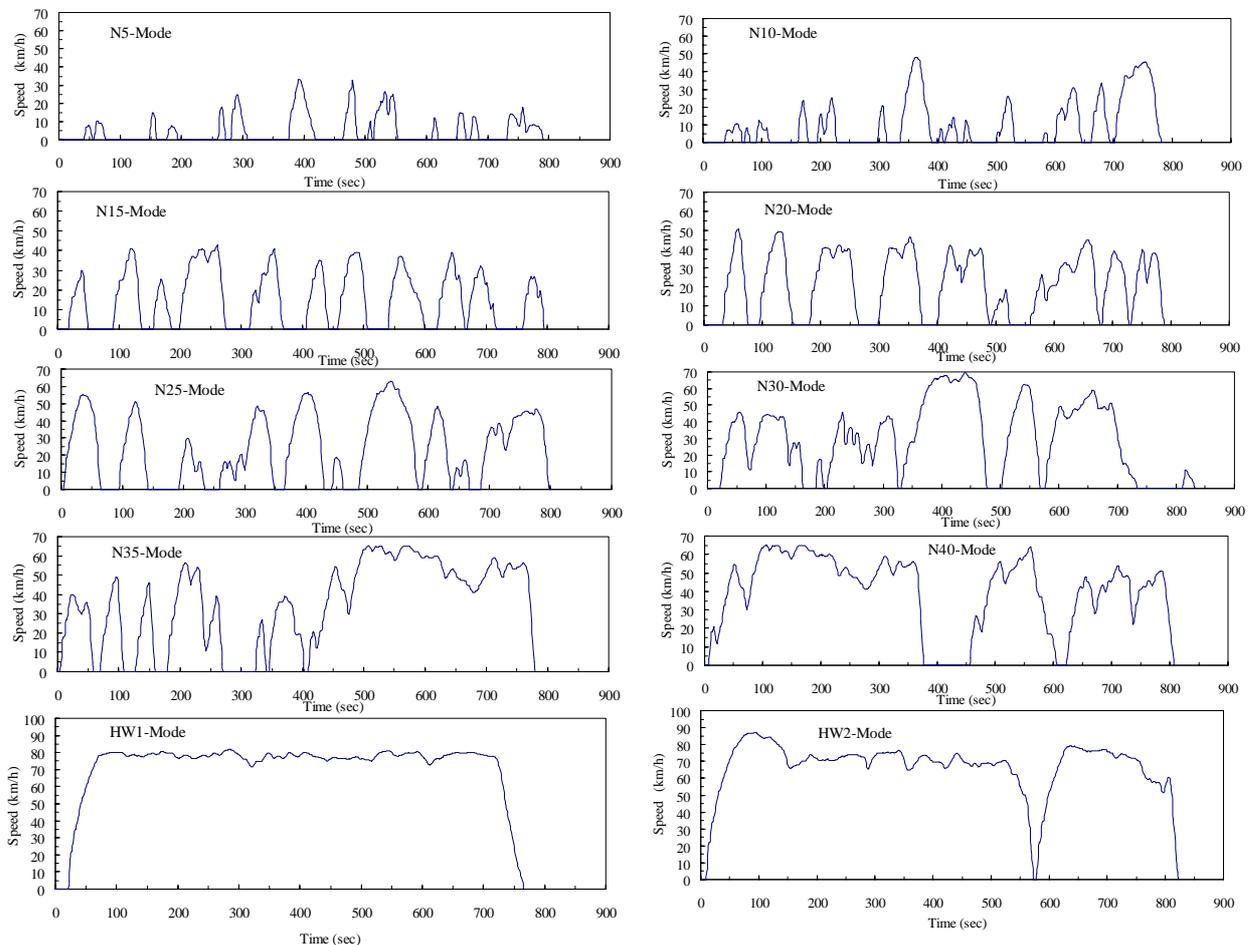


Fig.16 Driving Cycles used for the Simulation estimating Fuel Consumption

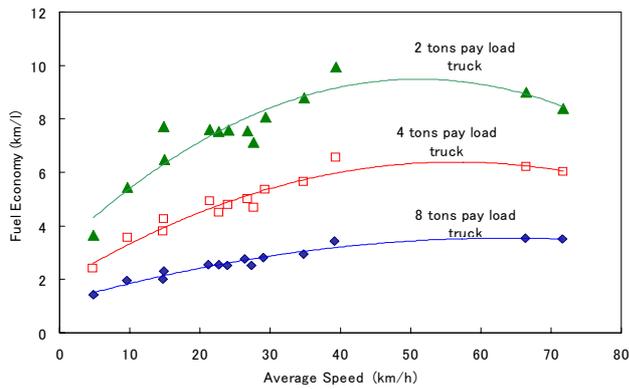


Fig.17 Simulation Results showing the Relationship between Average Speed and Fuel Economy

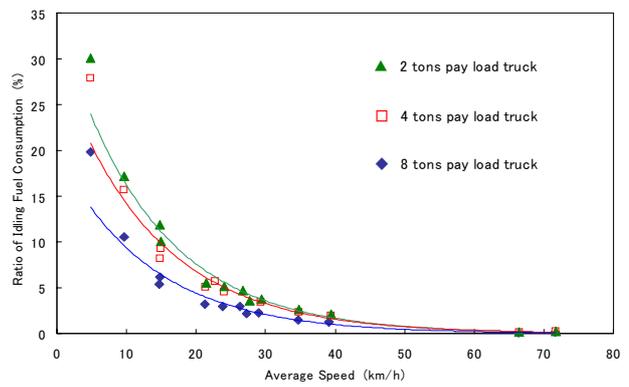


Fig.18 Simulation Results showing the Relationship between Average Speed and the Ratio of Idling Fuel Consumption

の計算出力結果である。

燃費推計プログラムの入力条件として、重量車の各種実走行車速パターンや、表 1 に示す 3 タイプの貨物車の車両構造情報、貨物の積載率、運転操作条件などを個別に変化させて、各々の燃料消費量を計算した。入力モードとしては、図 16 に示す平均速度が各々 5km/h ~ 40km/h の都市内走行モードや、平均車速 70km/h 程度の首都高速モード、その他の過渡モードを使用した。各実走行型モードは、各種道路の実走行試験で採取した車速データをショートトリップごとに分解し、目的の平均速度になるように再合成して編集したものである。

ドの走行特性を必ずしも代表しえない。特にアイドリング中の燃料消費との関連が不明確なので、走行条件別にアイドリングの燃費影響度をシミュレーションによって調べた。結果を図 18 に示す。渋滞走行の代表である N5 モードでは、全体の 20 ~ 30% の燃料がアイドリングで消費されており、また平均車速 15km/h のモードではその割合は 5 ~ 10% 程度となる。すなわちアイドリング燃料消費の影響は平均車速の低いモードほど大きい。また図に示される通り、総重量の小さい車の方がその影響が大きい。

4.3 実走行燃費に対する関連要因の定量化

4.3.1 走行モードパターンと燃費の関連

図 17 は、表 1 の 3 種の貨物車に関して各モードの平均区間速度（アイドリング時を含む平均速度）と燃費（km/l）の関係を示したものである。平均速度の上昇により燃費が向上することから、交通流の円滑化で平均速度を高める施策は、燃費節減に極めて有効である。図中の近似曲線が 2 次式で示される通り、燃費値は平均速度が 50 ~ 60km/h のあたりで最高ピークを持つ傾向となる。

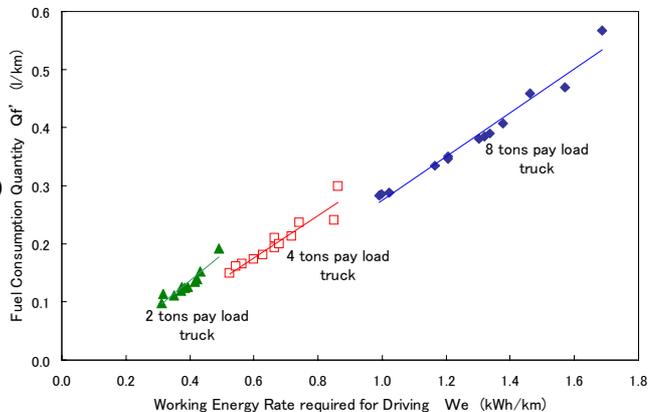


Fig.19 Simulation Results showing the Relationship between Working Energy Rate required for and Fuel Consumption Quantity

しかしながら平均区間速度は、アイドリング時間によっても変わるので、この平均速度だけではモ

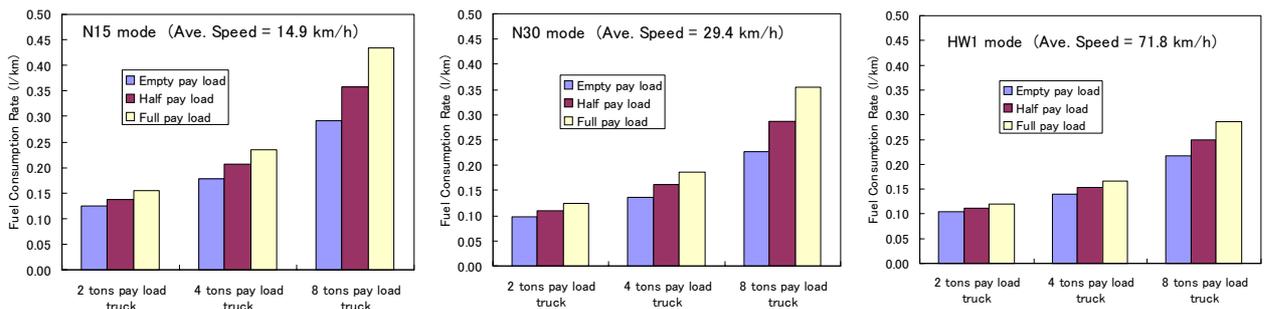


Fig.20 Simulation Results showing the Effects of Pay Load Conditions on Fuel Consumption under various driving cycles

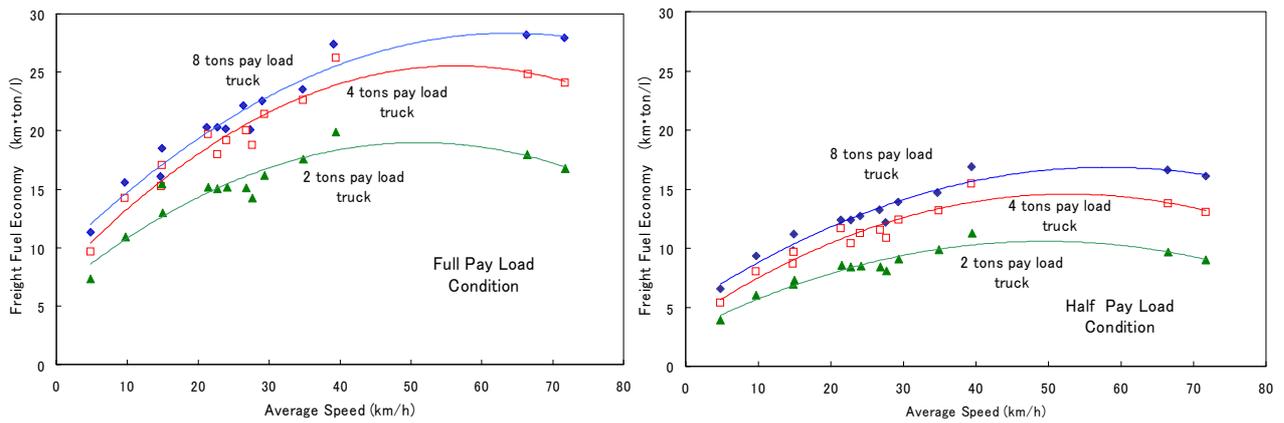


Fig.21 Simulation Results showing the Freight Fuel Economy for the three trucks and two pay load conditions

次にモード走行時の車両要求仕事率 W (kWh/km) と非アイドリング時の燃料の消費率 Q_f' (l/km) の関係を求めた。結果を図 19 に示す。3車の結果はいずれも W と Q_f' が直線関係となることから、燃料消費と最も相関性の高い指数はエンジンの総仕事量であるといえる。このことは、3章で示した乗用車での実路走行データの解析結果とも符合する。ただ今回解析した重量車の場合は、両者の関係が平均車速の低いモードでも高速走行モードでも同一の直線上に分布しており、前章の乗用車の結果のように一般道と高速道で比例定数が異なるという傾向にはならなかった。この違いは、ガソリンエンジンとディーゼルエンジンのそれぞれに特有なトルク特性、熱効率特性の違いに起因すると考える。

以上から、走行パターンの形から燃料消費の傾向を推計するには、モード平均車速よりも要求仕事量を使うのが適しているといえる。

4.3.2 貨物の積載条件、輸送条件と燃費の関係

シミュレーションプログラムの入力条件として、貨物の積載率を変化させた時の燃費影響を調べた。図 20 は、3種類の走行条件に対する距離あたり燃料消費量の傾向を示す。平均車速が低く加減速の割合が多いN15モード走行が積載率の影響を最も多く受け、一方、首都高速走行のHW1モードではその影響は相対的に少ない。また車種別の比較では、最大積載量の大きな貨物車ほど、燃費に対する積載条件の影響が大きい。

トラック、バスのような車種は、一定量の重量物を2地点間で移送する手段として使われるのが一般である。こうした利用目的でのエネルギー効率を示す指標を導入するとすれば、重量車の燃費の表示単位としては、積載物の重量トンを用いて、「km・t/l」を使うのが適当と考えられる。そこでシミュレーションで得られた各モードでの燃料消費量を上

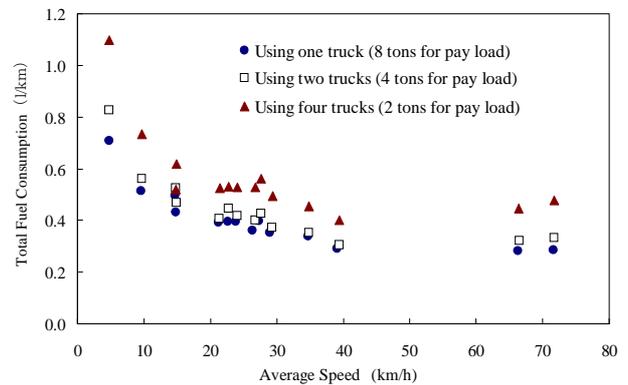


Fig.22 Energy saving effects by freight rationalization

記の単位で表してみた。結果を図 21 に示す。この表示単位で見ると、8トン車が最も貨物輸送におけるエネルギー利用効率が高く、また半積載時よりも全積載の方が効率が高い。さらに平均車速の上昇とともにその効率がアップする傾向があり、これは従来の燃費表示単位(km/l)と同様である。

次に物流の合理化施策の一環として、貨物輸送を集約した場合の燃料消費節減効果を推計してみた。合計8トンの貨物を同一区間、同一走行条件(モード)で輸送するという条件で、2トン積み貨物車4台に分けて搬送する場合、4トン積み車2台の場合、及び8トン車1台の3通りの輸送方法について、各条件における全燃料消費量を比較した。走行モードとしては、これまでと同じものを使った。各モードの平均速度と全燃料消費量との関係を図 22 に示す。この結果から、2トン車4台を使って輸送した時が最も多く燃料を消費し、8トン車1台の場合が最少となる。すなわち貨物の集約輸送は全体の燃費節減に役立つことが明らかである。4トン車2台ではその中間となるが、総消費量は8トン車1台に近いことから、4トン車は燃費と機能性とのバランスの良い車両クラスであることもわかった。

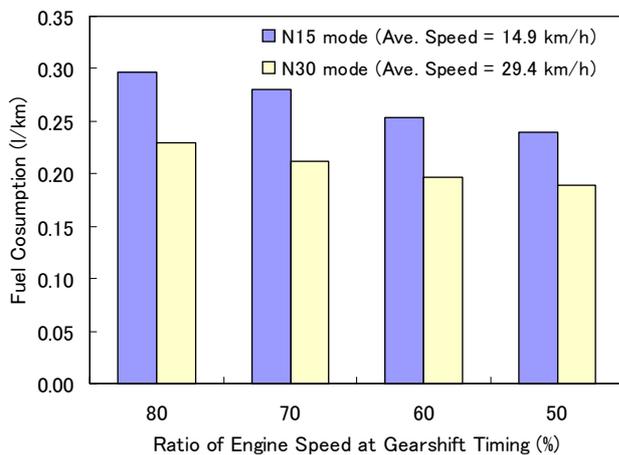


Fig.23 Simulation Results showing the Effects of Gearshift Timing on Fuel Consumption

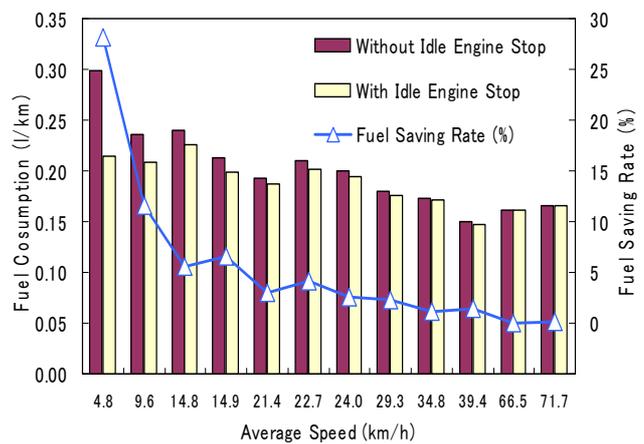


Fig.24 Simulation Results showing the Effects of Idle Engine Stop on Fuel Saving

4.3.3 運転操作が燃費に与える影響

(1) 変速条件の影響

同一モードを運転しても、変速操作などの運転方法によって燃費が変わることが知られている。例えば加速時の変速タイミングが変わればエンジンの使用域が変化し、結果として燃費にも差が生じる。こうした変速操作の燃費影響度を定量的に把握するため、4トン積み車の仮想走行で、加速時のシフトアップエンジン回転数を最大出力時回転数の80%、70%、60%、50%となるように変速条件を変えて、モード走行燃費を計算した。結果を図23に示す。変速時の回転数が高いほど、すなわちシフトアップタイミングが遅れる運転では燃料消費が多く、またその影響は加減速の頻度が多いN15モードの方が大きい。したがって変速操作では、加速追従運転が可能な範囲でシフトアップを早めに行い、上位段のギヤを使って可能な範囲で低いエンジン回転域を使用する運転が燃費節減には有利である。

(2) アイドルエンジン停止の効果

燃費対策や排出ガス対策としてアイドルストップが推奨されているが、その実用的効果についてはあまり知られていない。そこで、アイドル停止による燃費効果をシミュレーションで調べた。計算では、各走行モードで車両停車と同時にエンジンを止め、発進の2秒前にエンジンを再始動すると仮定した。またエンジン始動時の燃料流量は、実測値を与えて計算した。4トン積み車による各モード走行において、アイドル停止の有無による燃費の違いを図24に示す。アイドル停止を実施した場合の効果は、平均車速の低いモードほど大きく、平均速度5km/hの渋滞路の走行モードでは、約30%の燃料消費が達成できる。一方、平均車速が20km/h以上では、アイドル停止の効果は5%以下となり、その効果は相対的に少なくなる。

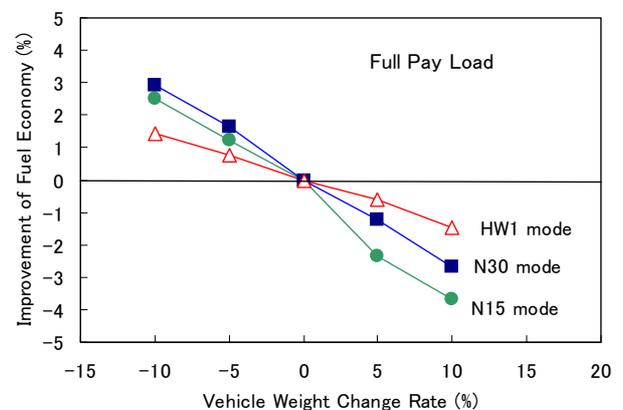


Fig.25 Simulation Results showing the Effects of Vehicle Weight Change on Fuel Economy Improvement

4.3.4 車両側の構造条件が燃費に及ぼす影響

車両側の燃費要因とその影響度をシミュレーションで分析し、車両側、エンジン側の改善が燃費に与える効果を調べた。この計算は4トン積み貨物車を対象にして行った。

(1) 車体重量の影響

転がり抵抗および加速時の慣性抵抗は、走行時の車両総重量に比例するので、車体の軽量化は燃費に有利である。ただし車体強度にも影響するので、設計上難しい要素ではある。そこで車体重量が増減した場合の燃費への影響度を試算した。図25は車体重量を対象車の本来の値(3,550kg)から±5%、10%の範囲で変化した場合のN15, N30及びHW1モード走行時の燃費の変化割合を示す。なお貨物の重量は、いずれも全積載である4トンとした。この結果から、加減速走行の多いN15, N30のモードでは、車体の10%軽量化により燃料消費が2~3%減少するが、高速走行であるHW1モードではその節減効果は約半分に留まることがわかった。

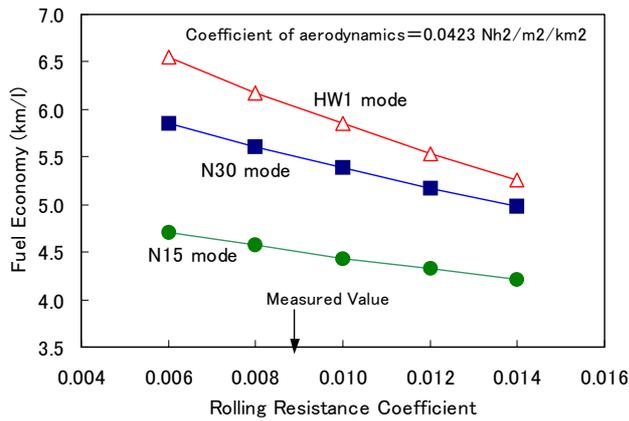


Fig.26 Simulation Results showing the Effects of Vehicle Rolling Resistance Coefficient on Fuel Economy Improvement

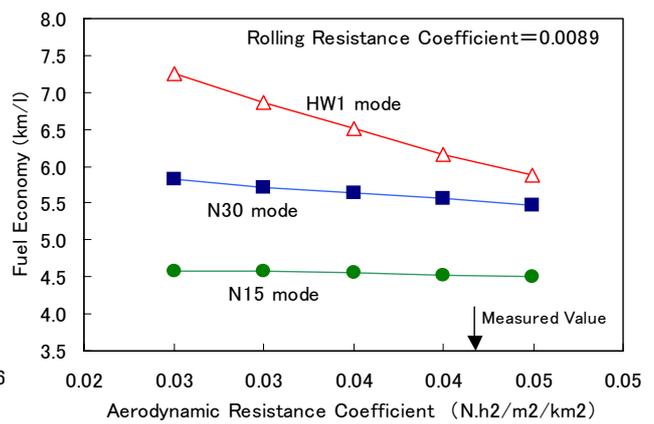


Fig.27 Simulation Results showing the Effects of Vehicle Aerodynamic Resistance Coefficient on Fuel Economy Improvement

(2) 走行抵抗係数の影響

走行抵抗（慣性抵抗及び勾配抵抗を除く）は、車両全重量に比例した転がり抵抗および車体前面投影面積と車速の2乗の積に比例する空気抵抗から成る。各々の抵抗値の比例定数が、転がり抵抗係数と空気抵抗係数であるが、車両側の改善でそれらの係数値を低減できれば、エンジンへの要求仕事が減るので走行条件に応じた燃費向上が期待できる。

3種類の走行モードについて、ころがり抵抗係数を変化させた場合の燃費の計算結果を図26に、また空気抵抗係数を変化させた時の結果を図27に示す。図26から、転がり抵抗係数の低減は、どのモードにおいても一様な燃費削減効果を与えることがわかる。一方、空気抵抗係数の低減は、走行速度の高いHW1モードでは顕著であるが、平均速度が約15km/hのN15モードではその効果がわずかである。

走行抵抗値は、燃費や排出ガスに影響する車両側の重要な特性値である。軽量車の台上燃費試験における負荷設定では、テストコースの惰行試験による測定値（届け出値）が使われるが、今後、車種ごとのバリエーションの多い重量車の燃費評価制度を策定する際には、個々の車両の走行抵抗値が適正に設定されることが必要である。

(3) 動力伝達損失の影響

エンジンの発生トルクが駆動輪に伝達されるまでには伝達損失が発生し、熱エネルギーに変化して散逸するため、燃費を低下させる要因となる。車両パワートレイン系の改良で伝達損失が低減すれば燃費が向上するが、逆に車両の整備不良等によって損失が増大する可能性もある。そこで動力伝達損失の変化がモード走行燃費に及ぼす影響度を試算した。伝達効率の初期基準値としては、直結段で98%、非直

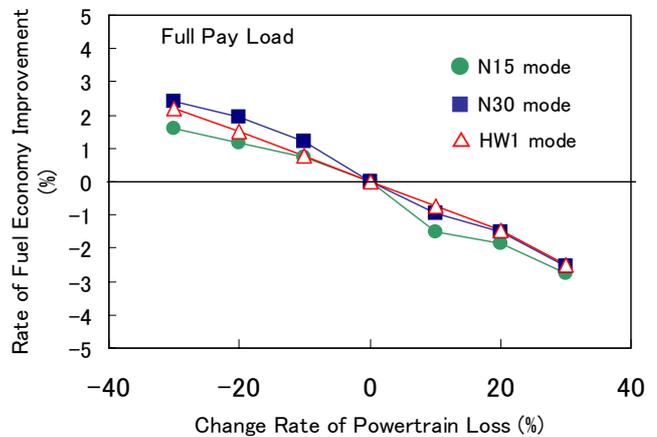


Fig.28 Simulation Results showing the Effects of Vehicle Powertrain Loss Improvement on Fuel Economy

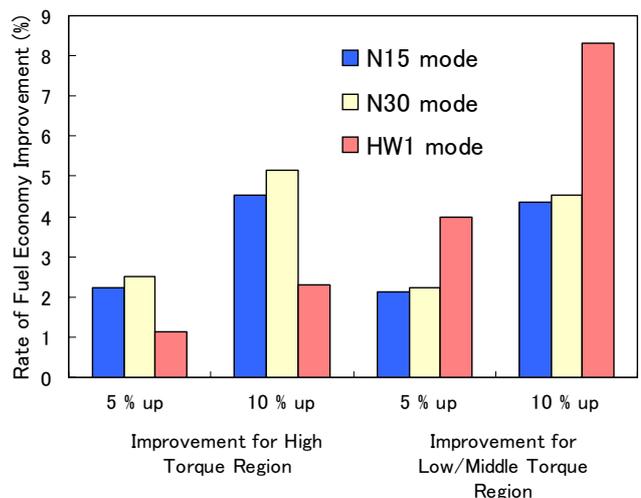


Fig.29 Simulation Results showing the Effects of Engine Energy Efficiency Improvement on Fuel Economy

結段で95%、最終段で95%の値を与えた。図28に計算結果を示す。トータル機械伝達ロス(仮に30%低減させた場合には、燃費が1.5~2.5%改善し、逆に伝達ロスが30%増加した場合は燃費が約3%悪化することがこの計算で判明した。

(4) エンジン側の燃費対策の効果

車両の走行に要求される仕事は、車体側の条件や貨物の重量、運転モードにより変化するが、一方でエンジンの熱効率が向上すれば、同一の要求仕事であっても燃料消費が減少し燃費が向上する。すなわちエンジンの熱効率向上を実現する技術対策も燃費改善にとっては重要なので、予想される実用的効果を燃費シミュレーションで検証した。計算を単純化するために、エンジンの高負荷運転域(60%負荷率以上)および低中負荷運転域(60%負荷率以下)の効率が独立に5%、10%向上するという技術改善が実現できたという仮定のもとで、3種の走行モードの燃費改善効果を試算した。このエンジン改善条件で燃費マップを修正して燃費を計算した結果を図29に示す。N15モードとN30モードに関しては、高負荷域の対策と低中負荷域への対策はほぼ同様な燃費向上効果が予想されたが、高速走行のHW1モードの場合は、低中負荷域で熱効率向上をはかる方が燃費改善のはるかに効果が大きいことがわかる。

5. 本研究のまとめ

自動車の省エネルギー対策を総合的に進める際のコスト効果を算定する上で、実使用面での燃費関連要因の影響度を定量的に把握する必要がある。そこで乗用車に関しては実路走行実験により、また重量車に関しては燃費シミュレーションを用いて、各車両の路上走行形態(走行パターン)や貨物車における積載条件、車両やエンジンの性能改善要素などが、実走行燃費に与える影響度を調査解析した。その結果をまとめると次のようになる。

軽量車両(試験乗用車)を使った実路走行実験を行い、そのデータを解析した結果から、次の点が明らかとなった。

- (1) 道路条件別の走行状態の特徴を、車速範囲の頻度分布や、加速、定速、減速、停止の各運転域の割合、ショートトリップの移動距離と平均速度の関連性、加速度平均値などから解析した。その結果、市街路での走行、地方道での走行、高速道路走行などの条件別走行特性の違いが明確になった。
- (2) 車の走行条件と燃料消費との関連では、平均

区間速度が上昇すると燃費(km/l)が向上する一般傾向が定量的に明らかとなった。すなわち信号停止の多い市街路走行では、多数回のアイドル停止や発進・停止が繰り返され区間平均速度が低下する結果、燃費値が低下する。

- (3) アイドル停止率(kmあたり停止回数)と燃料消費率(l/km)とは、ほぼ直線関係にあった。このことから、道路インフラや信号制御等の改善で交通流を円滑にし、アイドル停止率を減らせられれば、各車両の燃料消費を削減でき、全体のエネルギー消費の節減につながる。
- (4) 発進から停止までのショートトリップ(ST)の移動距離が500mより少なくなると、各STの燃料消費率(l/km)が極端に悪化する。
- (5) 運転域別の燃料消費特性を調べた結果、加速時の平均燃料流量は、市街路走行では定速時の2~2.5倍多く、地方道走行と高速道走行でも1.4~1.5倍程度あった。したがって加速走行割合を減らして定速運転を多用する運転方法やそれを実現する対策が燃費向上に有効である。
- (6) アイドルによる燃料消費が全体燃費に占める割合を、市街路走行とや地方道走行で求めた。その結果、交通流の少ない地方道走行ではアイドル時の消費量は全体の消費の2~4%であるが、平均速度が低く停止回数の多い市街路の走行では全体の8~16%となりかなりの割合となることがわかった。そのため混雑した市街路走行では、アイドル時にエンジン停止することで、燃費節減にはかなりの効果が期待できる。
- (7) 実走行条件下でのエンジンのエネルギー消費効率(g/kwh)を調べた。道路を平坦と仮定し車速パターンと走行抵抗から要求仕事量を計算し、燃料の消費量からを算出した。その結果、は平均区間速度の上昇とともに上昇し、高速走行時に最も高くなることが判明した。
- (8) 各ショートトリップ(ST)での総仕事量(KJ)の計算値とそのSTの燃料総消費量(cc)との関係を調べた結果、両者はほぼ比例関係にあることが明らかになった。市街路と地方道での比例定数はほぼ同じ値であったが、高速走行時は、エンジン高回転域が使われエネルギー消費効率が向上することから、比例定数が一般道走行とはやや異なることがわかった。
- (9) 以上の解析結果から、実走行時の燃料消費に直接的に影響する走行パラメータは、走行仕事量である。すなわち走行パターンと車両のデータ(重量、走行抵抗値等)から所要仕事量を計算し燃料消費量を推計する手法を使えば、燃料消費抑制対策の効果予測がある程度

は可能である。その時の変換係数は実験により算出する必要があるが、ガソリン車では一般道と高速道では使い分ける必要がある。

一方、重量車の場合は車両の大きさの制約から実路走行実験が簡単には行えない。そこでシミュレーション燃費推計法を開発し、これを用いて、重量車の走行形態や積載条件、車両条件などが実走行モード燃費に与える影響度を推計予測した。

このシミュレーションモデルは、搭載エンジンの燃費マップと走行パターン、車両情報、積載量から、仮想走行での燃費を計算する手法である。対象車両としては、2 t 積みトラック、4 t 積みトラックおよび8 t 積みトラックを選び解析した。

その結果、以下の点が明らかになった。

(10) 平均速度の異なる各種走行パターンのデータをシミュレーションモデルに入力して燃費推計を行った結果、重量車の場合も平均速度の高い走行モードほど燃費値 (km/l) が向上し、平均速度が50 ~ 60km/h 付近で最高燃費のピークを持つ2次式で表される傾向が見られた。

(11) 重量車においても、アイドルによる燃料消費が走行全体での消費に占める割合を、各種走行条件に関して計算した。その結果、平均車速が5km/h 程度の渋滞路走行モードでは、全体の20 ~ 30%の燃料がアイドルで消費され、また平均車速15km/h 程度の走行モードでは5 ~ 10%がアイドル時に消費されることがわかった。すなわちアイドル燃料消費の影響は平均車速の低いモードほど大きく、また車両総重量が小さいほど影響度が大きいことが判明した。

(12) 走行時の燃料消費量 (l/km) は、モード走行のエンジン要求仕事率 (kWh / km) と高い相関性のあることがわかった。この傾向は前述の乗用車での結果と同様であった。ただ重量車の場合、両者の関係が低速型のモードでも高速型モードでも同一の直線上に分布し、乗用車のように一般道と高速道で比例定数が異なるという傾向はなかった。この原因は、ガソリンエンジン (乗用車) とディーゼルエンジン (重量車) の燃焼形態の違いによるトルク特性、熱効率特性の違いに起因するものと考えられる。

(13) 貨物の積載条件は、平均速度の低いモードほどまた最大積載量の大きい車ほど燃費への影響が大きい。一方、貨物輸送時のエネルギー利用効率を示す燃費表示単位である $\text{km} \cdot \text{t} / \text{l}$ を用いた場合は、積載量の大きい車で高積載率の時ほどこの数値が良くなる傾向にあった。

(14) 運転操作では、追従運転可能な範囲でできるだ

け低い回転数域を使う変速操作が燃費削減に有効である。またアイドルストップの燃費効果は、平均車速の低い走行モードほど大きく、平均速度5km/h の渋滞モードでは約30%の消費削減効果があると予想された。

(15) 車両側の燃費影響要因として、車体重量の増減、転がり抵抗係数、空気抵抗係数、動力伝達損失、及びエンジン使用域別の熱効率改善に関して、それぞれのモード走行燃費に対する影響度を定量的に示すことができた。

6 . 参考文献

- (1) 野田他 ; 平成 1 2 年度交通研発表会前刷 3 0
- (2) 野田他 ; 1 9 9 8 年自動車技術会春季学術講演会前刷り集 1 2 7
- (3) 野田他 ; 平成 1 1 年度交通研発表会前刷 2 8
- (4) NODA, TSUKAMOTO, SATO ;
Evaluation Method for HDV Fuel Economy Performance with PC Simulation and Mapping Procedure
2003 JSAE/SAE International Spring Fuels & Lubricants Meeting