

# 都市部道路交通における 自動車の二酸化炭素排出量推定モデル

大口 敬<sup>1</sup>・片倉 正彦<sup>2</sup>・谷口 正明<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 正会員 博(工) 東京都立大学助教授 大学院工学研究科 (〒 192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

<sup>2</sup> フェロー会員 工博 東京都立大学教授 大学院工学研究科 (〒 192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

<sup>3</sup> 正会員 工修 (財)省エネルギーセンター部長 調査第二部 (〒 104-0032 東京都中央区八丁堀 3-19-9)

自動車による二酸化炭素排出量の低減は地球温暖化対策として大変重要視されている。自動車単体の性能向上、自動車交通量の抑制など様々な対策が検討されているが、交通運用・交通制御面から捉えて交通混雑状況がどれだけ二酸化炭素排出量に影響があるかを的確に推定する手法がない。本稿では、実際の都市部の道路で行った実走行実験から得られた燃費データの実証分析とエンジン熱機関と車両運動の理論モデル解析を通して、交通混雑状況下における車両挙動と燃料消費量(すなわち二酸化炭素排出量)の関係の定式化を行う。その結果、自動車による二酸化炭素排出量は、旅行時間、旅行距離、車速変動特性の3要因により適切に定量評価できることが明らかとなった。

**Key Words:** road traffic, carbon dioxide, fuel consumption, travel time, travel distance, speed fluctuation

## 1. はじめに

道路交通を担う自動車が消費するガソリンや軽油などの燃料消費量は、これによる二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出量と正比例の関係にあることが知られている。そこで地球温暖化防止のためのCO<sub>2</sub>排出量の抑制策の一つに、道路の自動車交通による燃料消費量の削減、あるいは燃料消費効率の向上が求められている。また熱エネルギー発生量の抑制や化石燃料の枯渇問題の観点からも、同様の要求がある。

ガソリンや軽油などの燃料がもつ熱エネルギーを内燃機関で燃焼して人や貨物の輸送に利用するエネルギーの流れをまとめると図-1のようになる。

ここに  $H$  は燃料の熱量換算係数 [J/cc],  $\epsilon$  は正味熱効率,  $\eta$  は総伝達効率(機械的損失)である。燃料の持つ熱量を車両推進力に変換する効率は  $\epsilon \cdot \eta$  で表される。これまで燃料噴射の電子制御化技術やリーンバーンなどの燃焼効率向上技術や燃料の化学特性の改質などにより熱効率  $\epsilon$  を高める努力, あるいは機械的損失低下の技術などの車両性能の向上により伝達効率  $\eta$  を高める努力が行われ, 既に燃料消費効率は大きく向上しているが, それでも  $\epsilon \cdot \eta$  は 0.3 程度である<sup>1), 2)</sup>。

一方通勤乗用車の相乗りや貨物の混載, 輸送距離の低減や交通機関の転換策などは, 広く交通需要マネジメント技術として知られるものであり, これは主に輸

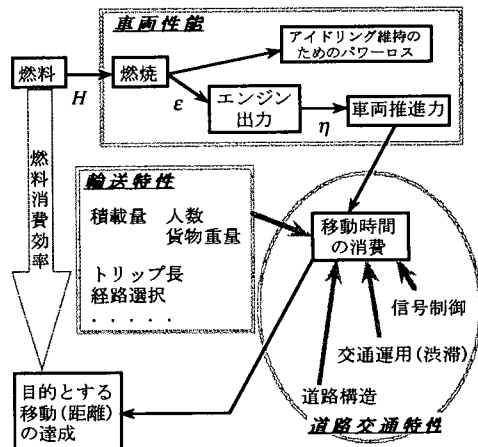


図-1 燃料から目的とする移動の達成まで

送する量(人数や貨物トン数)や距離(トリップ長)を直接減らして燃料消費量を削減しようとするものが多い。

しかし道路交通における目的とする移動は、「道路」という「交通の場」で移動時間を費やすことにより達成されるので、「移動の場」が持つ道路交通特性は、実際の燃料消費効率を決める重要な一要素と考えられる。すなわち、信号制御の効率化や交通運用改善による渋滞・混雑の低減・解消、無駄な車両推進力を発生させない道路構造の設計、といった道路交通運用条件の改善

策は、車両が本来持っている燃料消費効率性能を十分に引き出すためにも特に重要な対策であろう。

CO<sub>2</sub> 排出量の削減のための様々な対策を評価する手法として一般によく使われる考え方は、「排出原単位」(「燃料消費原単位」×「排出係数」)を用いる方法である。すなわち、「車両走行台キロ当たり」または「輸送人キロ当たり/輸送貨物トンキロ当たり」の排出ガスを原単位とし、これに「台キロ」や「人キロ/トンキロ」を乗ずる方法である。原単位を固定と考える限り、CO<sub>2</sub> 排出量を削減するには必然的に「台キロ」或いは「人キロ」、「トンキロ」を削減する必要があることになる。しかし直感的にも明らかなように、実交通における燃料消費量(すなわち CO<sub>2</sub> 排出量)は、走行距離のみならず旅行速度や車速変動の影響もあるはずである。つまり図-1の「道路交通特性」が変われば、「排出原単位」は大きく異なる可能性がある。

そこで「排出原単位」を速度の関数として表現する手法も存在する。しかし交通における速度には、集計の時間・空間単位に応じてかなり異なる特性があり、逆に同じ速度でも集計単位が異なれば全く違った走行状態を意味する場合がある。例えば都市部の幹線街路で数 km 区間にわたって 30km/h の旅行速度が実現すればかなり流れが良い空いている状態であるが、都市高速道路で数 km 区間の旅行速度が 30km/h であれば確実に渋滞に巻込まれているはずである。あるいはたとえ細街路でも、自動車の速度メータはしばしば 30km/h に達する。こうした集計単位の違いや車速変動特性によって、排出原単位、あるいは排出量がどのように異なるかを定量的に評価出来る手法は確立されていない。

## 2. 研究目的と論文の構成

### (1) 目的

ここでは、主に混雑した都市部の燃料消費効率が悪くなる道路区間における燃料消費特性(CO<sub>2</sub> 排出特性)を分析する。混雑した道路状況では、車両の持っている燃料消費効率が十分に発揮されず、道路条件・交通条件により左右されて燃料消費量(CO<sub>2</sub> 排出量)が増大するものと考えられる。相対的に交通量(走行台キロ)の多い都市部では、比較的混雑した状況での走行を強いられ、結果的に全体の燃料消費量の中で大きな割合を占めると考えられるので、こうした状況下の燃料消費量を規定する走行特性、影響要因を明らかにすることにより、燃料消費量の抑制を目的とした道路・交通運用対策を定量的に検討・評価できるものと考えられる。

本研究では、実験車両から得られた燃料消費特性を実証解析し、エンジンの熱機関モデルと車両の運動モデルから燃料消費構造の理論的導出を行い、各々の結

果の整合性を検証する。また本研究では、燃料消費構造の解析結果にもとづく燃料消費量(CO<sub>2</sub> 排出量)推定モデルを既存の原単位法にもとづく燃料消費量(CO<sub>2</sub> 排出量)算定法と比較し、両手法の相互関係と本研究の手法の特長を明らかにすることも目的としている。

### (2) 構成

本稿では、3. でまず関連の既存研究の整理と本研究の位置づけを行う。4. で実走行調査にもとづいて、走行特性と燃料消費量の実証分析を行い燃料消費(CO<sub>2</sub> 排出)特性を明らかにする。なお4. は、筆者らが自動車技術の国際会議<sup>3)</sup>と自動車技術会論文集<sup>4)</sup>に既に発表済みの内容を再構成したものである。5. では、エンジンという熱機関の効率と道路環境という物理的な環境における燃料消費効率に関する理論解析を行う。6. では、4. の実証分析と5. の理論解析との間に整合性が得られることを示す。また本研究で提案されたモデルを用いて燃料消費量(CO<sub>2</sub> 排出量)の定量評価を行い、従来手法である原単位法との対応関係を考察して、道路・交通条件の影響を考慮した燃料消費量(CO<sub>2</sub> 排出量)推定モデルに求められる特性を整理する。

## 3. 既往研究

自動車の走行燃費に関する実証的研究は様々に行われている。最も一般的なモデル化は、単位燃料消費量当りの走行距離[km/l]を旅行速度[km/h]の2次関数で近似するもの<sup>5),7)</sup>、あるいは単位距離当りの燃料消費量[l/km]を旅行速度[km/h]の逆数で線形回帰するもの<sup>8)</sup>などである。しかし実際には旅行速度だけでは説明できないちらばりが存在し、走行挙動特性を十分に反映したものとは言えない。

Lay & Bowyer<sup>9)</sup>は、実交通環境下における自動車の燃料消費量のモデル化を3段階に整理している。第1段階は、個々の車両の瞬時(微小時間)燃費をエンジンと車体運動力学のモデルから説明するものであり、例えば Biggs & Akcelik<sup>10)</sup>は、燃料消費量を、エンジン回転維持に必要な燃料、転がり抵抗・空気抵抗・勾配抵抗に対して必要な燃料、加速エネルギーに必要な燃料、の3つに分けてモデル化を行っている。第2段階は、車両のある走行プロファイル(走行軌跡)で消費される燃費を、第1段階の微小時間モデルをベースとしながら回帰式により簡易推定する手法であり、Postら<sup>8)</sup>の紹介する PIP モデルや、Langdon<sup>11)</sup>による道路形状の影響評価のモデル、排気・燃費評価用の走行モードの作成を意図した研究例<sup>12),14)</sup>などがこれに当たるであろう。第3段階は、トリップ全体あるいは集計された交通量に対する推定モデルであり、主に回帰分析により求め

る手法である。最初の旅行速度の2次関数や逆数による推計モデルはこの範疇に入る。

実際の道路における走行実験・走行パターン解析に基づき、道路交通運用条件の改善による排出ガス量や燃費の抑制を走行速度変動も考慮して検討した初期の研究として、越らによるもの<sup>15)</sup>がある。ここで燃費が速度(旅行速度)だけでなく速度変動に影響を受けることを、距離的平均速度  $V_x$  なる概念により表現した。

$$V_x = \frac{1}{L} \int_0^L v(x) dx = V_T + \frac{\sigma_T^2}{V_T} \quad (1)$$

ここに  $V_T$  は瞬間速度  $v$  の通常の平均速度、 $\sigma_T^2$  は  $V_T$  まわりの分散を表す。速度変動が大きいほど  $V_x > V_T$  の差は大きくなる。この研究では、単位距離当り燃料消費量 [cc/km] を  $V_x$  の逆数と  $V_T$  の逆数などを説明変数にして重回帰分析により推定している。

松本ら<sup>16)</sup>は実走行データから走行特性を表す19変数を定義して多変量解析を行い、燃費を説明する回帰モデルを求めた。2変数モデルでは、平均速度 ( $\sum v_i/T$ ) の逆数と加速評価値 ( $\sum a_i v_i/D$ : 単位距離あたりの加速度・速度の積和) を用いると説明力が高いことを示した。またこの研究では車両の運動力学面からの考察も行われているが、瞬間燃料消費量の計算には等燃費曲線としてエンジン実効トルクと回転数の2次式で近似される経験式を用いている。

土井ら<sup>17)</sup>は、乗用車を含む合計5車種による実走行を行い、道路種別(首都高・幹線・細街路)によりアイドルリング時間の走行時間に対する比率が異なること、道路種別・車種・積載量により平均加速度(加速時加速度の平均値)が異なること、馬力当り車両重量(積載量込み)と平均加速度に相関関係が見られること、などを見出した。また評価試験用の代表的な走行モードを道路種別に3種類、平均加速度の異なる2種類の車種別に作成することを提案している<sup>13),14),18)</sup>。

筆者ら<sup>19),20)</sup>は、車両感知器情報を用いて渋滞・非渋滞の状態判定を行い、渋滞時は旅行速度の逆数、非渋滞時は加速度の平均値と標準偏差により1km区間毎の燃料消費量 [cc/km] が説明できることを示し、首都高速道路における渋滞時と非渋滞時における交通流全体で消費される燃料を推定試算した。また走行実験車両以外の車種については、各車種の燃費特性<sup>21)</sup>を用いてシミュレーションにより燃費推定モデルを求めている。なお、多数の車種に対して燃費特性を解析した事例はいくつか存在するが<sup>19)~23)</sup>、いずれもシャシダイナモ上の試験かシミュレーション計算によるものである。

以上より、自動車の燃費・排ガス量を道路・交通流状態に応じて実証分析を行った事例はいくつか存在し、この中には走行速度の変動要因を考慮したものもあるが、いずれも燃料消費量を説明する上で回帰式など経

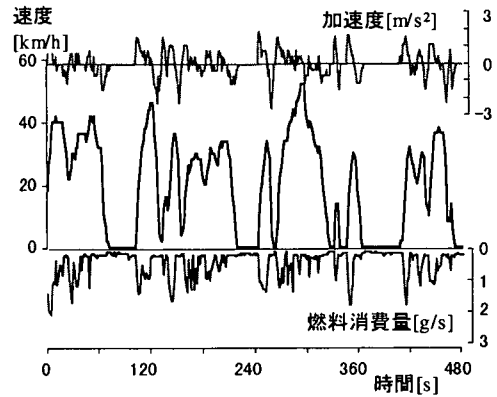


図-2 測定された走行データ例

験的モデルが含まれており、必ずしも論理的根拠は十分ではない。本研究では、実証分析だけでなく、エンジンの熱機関モデル・車両の運動力学モデルと実証分析結果を対照して、論理的整合性に優れた燃料消費量(CO<sub>2</sub>排出量)推定モデルを提案する。すなわち Lay & Bowyer<sup>9)</sup>による第2段階を基本としながら、実証的・論理的に3つの段階の整合性を目指すものである。

## 4. 実証分析

### (1) データ収集とデータ特性

分析には、2,000ccガソリンエンジンを搭載した乗用車(OD付4速オートマチック)に、瞬間燃費計、速度計、加速度計、アクセル開度変位計などの計測器を取付け、これらを車載のノートパソコンにより0.1秒毎にデジタル記録できる収集システムのデータを用いた。図-2に、このシステムによって実際に得られた時系列データの一例を示す。実験条件は、基本的に平日の昼間の平均的な状況において交通の流れに乗って走行するものとした(一部夜間走行)。実験中はエアコン等の補器類を一切使用せず、被験者は1人とした。

走行実験は、往復2車線道路として3路線(各5~6km区間)、片側複数車線幹線道路の例として往復6車線道路を3路線(各5~7km区間)、及び高速道路として首都高速道路の1路線(約10km)、合計7路線いずれも東京都内の放射道路で行った。

ここで、各走行ケースに含まれる細かい走行挙動特性を表現するために、ショートトリップ<sup>24)</sup>という分析単位を導入する。1つのショートトリップ(ST)は、「一旦発進して走行した後に停止してその次に発進するまで」と定義される。図-3にその概念を示す。図のように、1つのSTに関して、そのSTによって走行した距離(旅行距離:  $D$ )と旅行時間  $T$ 、旅行時間の内訳として走行中の時間(走行時間:  $T_{(run)}$ )と停止時間:  $T_{(idle)}$ 、また旅行速度:  $S$ と走行速度:  $S_{(run)}$ が定義できる。

表-1 測定路線とデータの特徴

道路の種類	路線名	走行区間	区間長 [km]	計測回数	総ショートトリップ数	ショートトリップ (ST) 全体		
						総旅行距離 [km]	総旅行時間 [min]	総平均旅行速度 [km/h]
2車線道路	駒沢通り	用賀～中目黒	6.1	5	96	27.3	105	15.6
	新青梅街道	井草～落合	6.0	7	89	39.0	115	20.3
	世田谷通り	用賀～三軒茶屋	5.6	6	170	31.1	169	11.0
6車線道路	国道15号	品川～新橋	7.3	8	109	53.4	177	18.1
	国道20号	新宿～半蔵門	5.2	12	129	56.7	177	19.2
	国道246号	池尻大橋～三宅坂	6.3	8	146	42.3	178	14.2
首都高	首都高速道路	永福～三宅坂	10.0	13	477	58.8	470	7.5
		合計		59	1216			

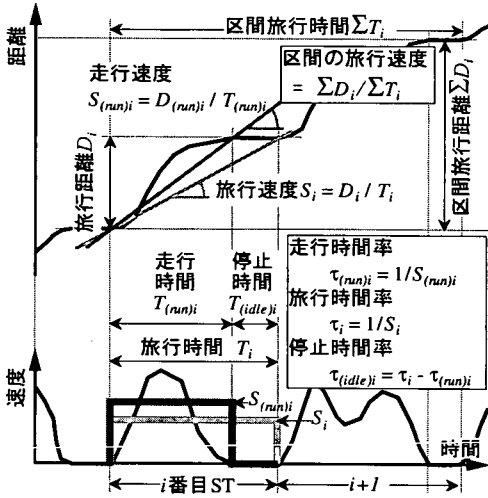


図-3 ショートトリップ (ST) の概念

STの定義により、対象区間に2回停止しないとST単位の解析はできない。従って信号の存在しない首都高速道路においては、非渋滞の場合および渋滞しても1度停止しただけの場合は解析対象とならない。

表-1は、解析対象とした59回走行データの特徴を整理したものであり、解析対象のST総数は1216、その内訳は表に示す通りである。表には、これ以外に各ST距離の総和と各ST時間の総和、及びこれらから求められる平均旅行速度が各7路線について示されている。また1回のSTの平均時間長を求めると、往復2車線道路が約60～77[秒/ST]、往復6車線道路が約73～97[秒/ST]、首都高速道路が約59[秒/ST]となり、いずれの路線においても平均的には約1分～1分半に一回の割合で停止していることがわかる。

図-4は、全59回の実験走行の各走行時間帯と各回の実験走行時の対象路線の区間旅行速度を示す。図より、ST単位の分析に用いる区間旅行速度はいずれも30[km/h]以下で比較的低速であり、さまざまな時間帯で区間の旅行速度の異なる状況(30[km/h]～10[km/h]、首都高は10[km/h]以下まで)のデータが得られたことがわかる。なお首都高で昼頃と夜間にサンプルが無い

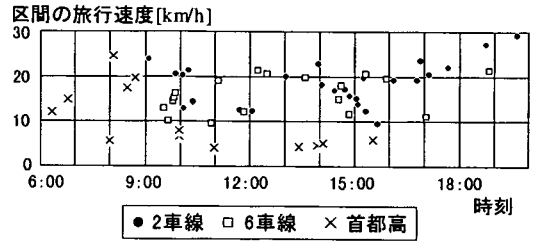


図-4 各データの測定時間帯と区間の旅行速度

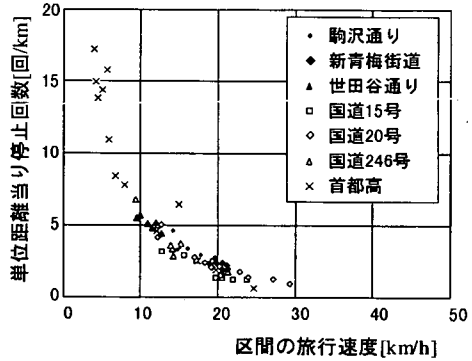


図-5 区間の旅行速度と単位距離当り停止回数

のは、混雑が解消してST単位の解析が可能なデータが収集できなかったことを意味する。

図-5は、各59回の走行別に単位距離当りの停止回数と各回の実験走行時の各路線の区間旅行速度の関係を示す。区間旅行速度が低くなるほど停止回数率が高くなる傾向が見られ、この傾向は2車線、6車線、首都高という道路によらずほぼ一定の傾向になる。

## (2) ST毎の走行パターン解析

図-6は、各STの旅行速度  $S$  を2.5[km/h]毎の速度ランクに分類して、STの出現頻度を表したものである。STの旅行速度が高くなるほどサンプル数が少なくなるため、解析に当たっては注意が必要である。

図-7は、停止時間率  $\tau_{(idle)}$  (各STの停止時間の旅行時間に対する割合、図-3参照) について、旅行速度  $S$  ランク別の平均を示したものである。旅行速度  $S$  が低

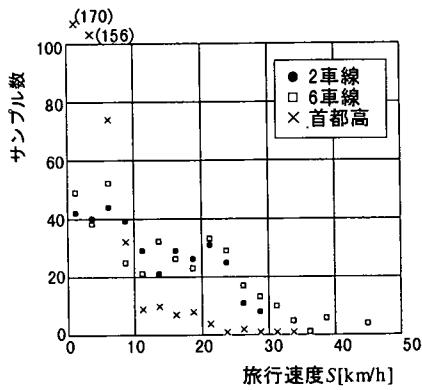


図-6 2.5[km/h] 旅行速度ランク別のサンプル ST の数

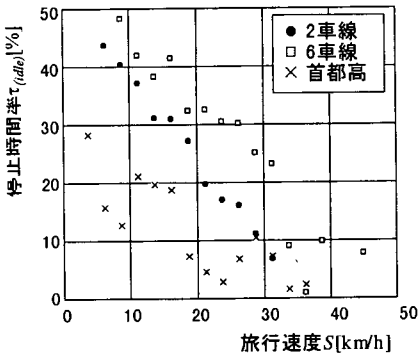


図-7 2.5[km/h] 旅行速度ランク別の停止時間率の平均

いほど停止時間が長くなる傾向がわかるが、同じ旅行速度でも首都高は停止時間が短くて次に2車線道路、6車線道路が最も停止時間が長くなり、道路の種類による違いが見られる。ST 旅行速度が10[km/h]程度になっても首都高の場合は20%程度の停止時間率であるが、2車線・6車線の場合は40%程度を占めている。

図-8は、旅行速度ランク別の停止時間率  $\tau_{(idle)}$  の頻度分布を示す。各速度ランクにおいて、道路の種類によらず停止時間の頻度の出現範囲はほぼ同じであるが、首都高の場合は低い停止時間率の頻度が高く、6車線の場合は逆に高い停止時間率の頻度が高い。こうした頻度分布の違いが図-7の平均の停止時間率の違いに現れたものと考えられる。

図-9は、旅行速度ランク別に平均の走行速度  $S_{(run)}$  を求めて旅行速度  $S$  との関係を示したものである。道路の種類によって同じ旅行速度であっても停止時間率が異なるために走行速度は異なる。首都高や2車線の場合に比べて6車線の場合の走行速度  $S_{(run)}$  と旅行速度  $S$  の違いが大きく、高い走行速度となる。一方停止時間率の低い首都高の走行速度は旅行速度とほぼ一致する。

図-10は、旅行速度ランク別の走行速度  $S_{(run)}$  の頻度分布を示す。6車線の場合は相対的に高い走行速度へ

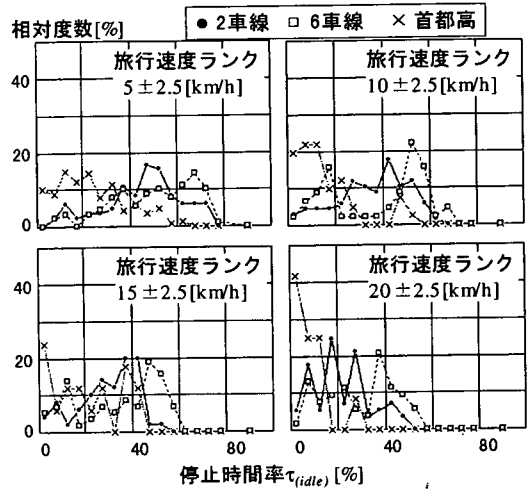


図-8 5.0[km/h] 旅行速度ランク別の停止時間率の頻度分布

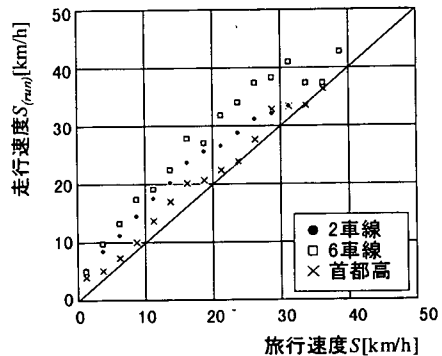


図-9 2.5[km/h] 旅行速度ランク別の走行速度の平均

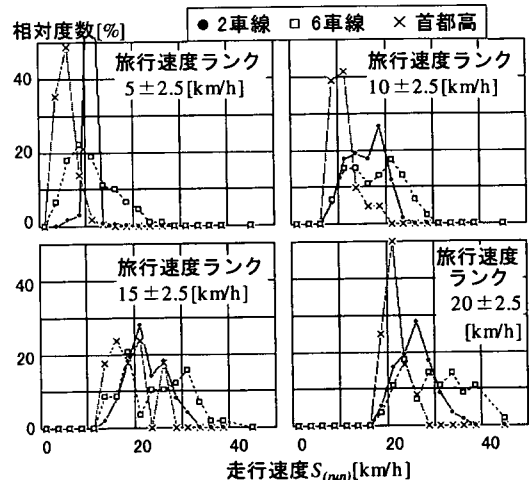


図-10 5.0[km/h] 旅行速度ランク別の走行速度の頻度分布

分布範囲が広がり、首都高の場合は走行速度の分布範囲が狭くて相対的に低い速度に高い頻度が現れている。

以上図-7~10から分かることを整理し、その特徴をイメージに示すと図-11のようになる。すなわちある

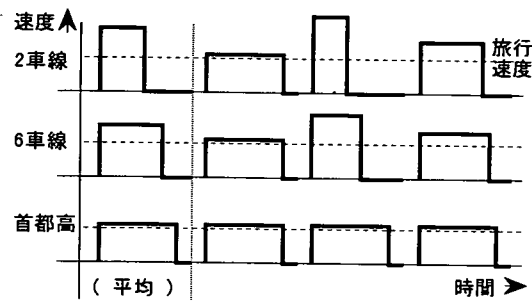


図-11 走行パターン特性のイメージ

同じ旅行速度ランクのSTを集めると、道路の種類の違いにより走行特性が次のように異なる。平均的には、6車線の多車線街路では走行速度が高く停止時間が長い傾向があり、首都高の場合は逆に走行速度が低く停止時間が短い傾向がある。平均の周りのST間の変動(ちらばり)を比べると、6車線の場合は走行速度や停止時間の変動が大きい特性が見られ、首都高の場合は逆ほどのSTも平均的な傾向とほとんど変わらない特性を持つ。一方往復2車線街路は、平均もちらばりも6車線と首都高の中間的な性質を持っている。

### (3) 燃料消費特性

燃料消費効率、すなわち「燃費」或いは「燃費率」という場合、通常我が国では単位燃料消費量当りどれだけの距離を進むことができるか、すなわち  $[km/l] (= [m/cc])$  という単位(次元)で表現することが多い。本稿ではこの逆数である  $[l/km] (= [cc/m])$  という単位(次元)を持つ「単位距離当りの燃料消費量  $F$ 」という物理的に加算可能な量により「燃費」を表現する。

図-12は各ST毎の旅行速度  $S$  と燃費  $F$  との関係を示す。STの旅行速度が  $30[km/h]$  を超えるのは道路が空いた状態の場合であり、それでも  $50[km/h]$  を超えることはない。図から全体的に旅行速度が高いほど燃費は少ない傾向がある。首都高の場合はこうした右下がりの傾向が比較的明確であるが、2車線、6車線の順にこの傾向は不明確となり、6車線の場合は同程度の旅行速度でも燃費はかなり散らばる。これは、道路の種類により走行パターン特性が異なること(図-11参照)に対応するものと考えられる。

旅行時間  $T$  が走行時間  $T_{(run)}$  と停止時間  $T_{(idle)}$  の和に分解できるのと同じように、単位距離当り燃料消費量  $F$  も次のように分解できる。

$$F = F_{(idle)} + F_{(run)} \quad (2)$$

停止時のエンジンはアイドリング状態であり、電装機器(特にエアコン)等の補器類によるエンジン負荷の変動を考慮しなければ、アイドリング中の燃料消費量

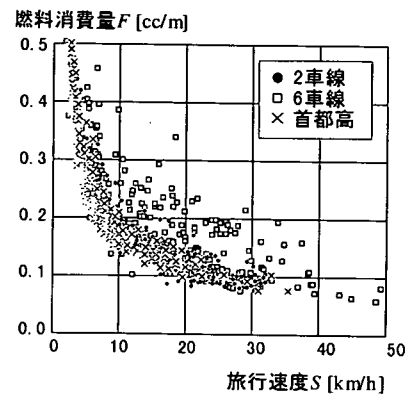


図-12 旅行速度と単位距離当り燃料消費量

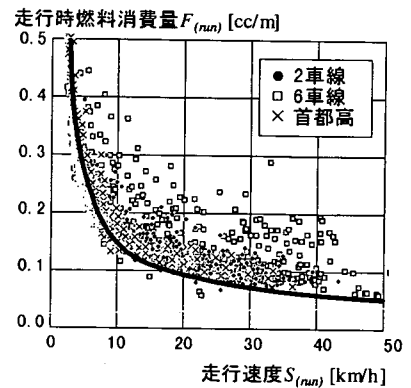


図-13 走行速度と単位距離当り走行時燃料消費量

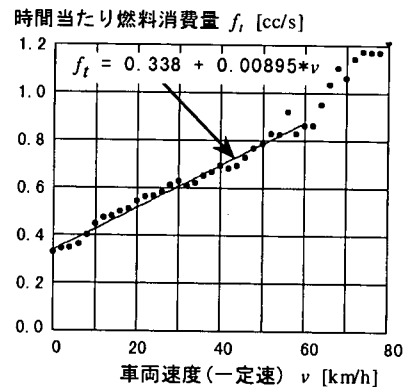


図-14 一定速走行時の単位時間当り燃料消費量

は単位時間当り一定と見なせる。本実験車両の場合、単位時間当り燃料消費量  $f_{(idle)}$  は  $0.34[cc/s]$  程度でほぼ一定であった。従ってSTの停止時間率  $\tau_{(idle)}[s/m]$  を用いると、STにおける単位距離当り停止時燃料消費量  $F_{(idle)} [l/km] (= [cc/m])$  は次式で計算できる。

$$F_{(idle)} = f_{(idle)} \times \tau_{(idle)} = 0.34\tau_{(idle)} \quad (3)$$

図-12に見られるような同じ旅行速度に対して燃料

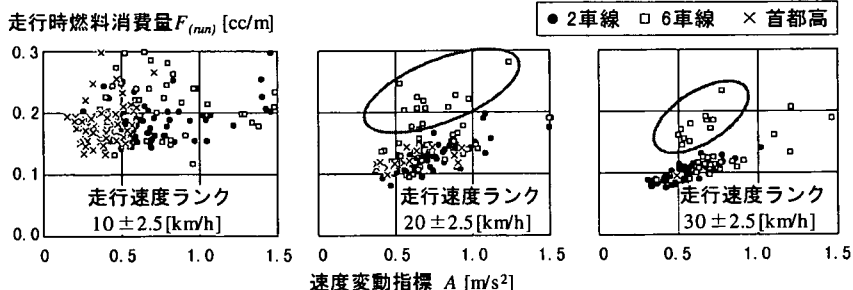


図-15 速度変動指標  $A$  と走行時燃費  $F_{(run)}$  の関係例

消費量がばらつく要因には、図-9～10に示されるような走行速度のちばりの要因が考えられる。そこで各STの走行速度  $S_{(run)}$  に対する各STの単位距離当りの走行時の燃料消費量  $F_{(run)}$  [cc/m] の関係を示したものが図-13である。同じ走行速度に対して旅行速度の場合よりさらに大きな燃費の散らばりがある。

ここで一定速走行時の単位時間当りの燃料消費量  $f_t$  [cc/s] は、勾配等の要因の変動がなければ一定値のはずである。そこで0.1秒毎に計測される瞬時の燃費のうち車速一定の時刻のデータのみを利用して、一定車速  $v$  [km/h] とその時の平均の  $f_t$  [cc/s] の関係を示したものが、図-14である。図から60[km/h]程度までは  $v$  と  $f_t$  にはほぼ線形関係が見られることがわかり、回帰直線を引くと図中のような回帰式が得られる。一定速走行時の単位距離当り燃料消費量： $F_{(const)}$  は、これを用いて  $f_t$  を  $v$  で除すことで得られる。

$$F_{(const)} = f_t \times \frac{3.6}{v} = 0.03 + \frac{1.22}{v} \quad (4)$$

図-13中の双曲線は式(4)の関係を示しており、プロットの下側の包絡線とほぼ一致する。つまり図-13のばらつきは、実際のSTでは一定速度の場合よりも余分に消費されることを意味している。

ここで走行中の車速の変動を評価する指標として「加速エネルギー当量 (Acceleration Energy Equivalent:  $AEE$  [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>])」という概念を導入する。これはSTの中で速度増大時(加速時)に車両が獲得する運動エネルギー [kg m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>] に相当する変数であり、増速時の到達速度の2乗値から増速時の初速の2乗値を引いたものとなる。1回のST中の全ての増速時についてこの総和を取ったものを加速エネルギー当量  $AEE$  と定義する。実際の計算処理では次式のように離散処理を行う。

$$AEE = \sum_{k=1}^K \delta_k (v_k^2 - v_{k-1}^2) \quad (5)$$

ここに、 $k$  は計測周期 ( $k = 1, 2, \dots, K$ )、 $K$  は対象STの旅行時間  $T$  を計測周期 0.1[秒] で割った値、 $v_k$  は各周期毎の瞬間速度、 $\delta_k$  は加速時  $\delta_k = 1$  でその他の場合

$\delta_k = 0$  となるダミー変数である。またST当りの  $AEE$  をSTの旅行距離  $D$  で除した単位距離当り加速エネルギー当量  $A$  [m/s<sup>2</sup>] を車速変動特性の評価指標とする。

図-15は、各STの走行速度  $S_{(run)}$  ランク別に単位距離当り加速エネルギー当量  $A$  と単位距離当り走行時燃料消費量  $F_{(run)}$  の関係を示した例である。 $S_{(run)}$  が20[km/h]と30[km/h]レベルにおいて  $F_{(run)}$  が有意に高い(図中で印をしたもの)STについては、ある特定の走行時のある特定の区間の実験ケースであることが判明しており、これを急勾配などの特殊データと判断して以下の分析では除外した。これらを除くと、 $S_{(run)}$  が10[km/h]レベルでは多少不明確であるが、20[km/h]、30[km/h]レベルでは  $A$  と  $F_{(run)}$  に正の相関が見られ、いずれも同程度の変動範囲を持っている。

以上の分析を踏まえてSTの  $F_{(run)}$  を説明する線形重回帰モデルを作成した。すなわち、説明変数として走行速度  $S_{(run)}$  の逆数である単位距離当り走行時間  $\tau_{(run)}$  [s/m] と車速変動を意味する単位距離当り加速エネルギー当量  $A$  [m/s<sup>2</sup>] を導入することで、次のようなモデルが得られた(重相関係数  $R = 0.981$ , データ数  $n = 1100$ , 括弧内は  $t$  値, RMS 誤差 = 0.032[cc/m])。

$$F_{(run)} = 0.028 + 0.31\tau_{(run)} + 0.056A \quad (6)$$

(160.1) (16.3)

さらに式(2)、(3)、(6)を整理すると式(7)が得られる。

$$\begin{aligned} F &= F_{(idle)} + F_{(run)} \\ &= \{0.34\tau_{(idle)}\} + \{0.028 + 0.31\tau_{(run)} + 0.056A\} \\ &\approx 0.3(\tau_{(idle)} + \tau_{(run)}) + 0.028 + 0.056A \\ &= 0.3\tau + 0.028 + 0.056A \end{aligned} \quad (7)$$

ここで  $\tau_{(idle)}$  の係数 0.34 と  $\tau_{(run)}$  の係数 0.31 は式(3)と式(6)の誤差範囲を考えると、お互いに等しく正確な値は0.31に近いものと考えられる<sup>4)</sup>。しかしここでは明確な根拠がないため、便宜上値を丸めて0.3とする。つまり、各ST毎における単位距離当り燃料消費量  $F$  [cc/m] は、単位距離当り旅行時間(すなわち旅行速度の逆数)  $\tau$  [s/m] と、単位距離当り加速エネルギー当量  $A$  [m/s<sup>2</sup>] の2つの説明変数により説明できる。

式 (7) の両辺に旅行距離  $D$  を乗じれば、その ST の燃料消費量:  $Q[\text{cc}]$  が計算できる。

$$Q = 0.3T + 0.028D + 0.056AEE$$

$$= 0.3T + 0.028D + 0.056 \sum_{k=1}^K \delta_k (v_k^2 - v_{k-1}^2) \quad (8)$$

ある起点から終点までの実際の自動車による移動(トリップ)を考えた場合、1つのトリップは必ず1つ以上のSTの和から構成される。式(8)は線形モデルなので、この式は1トリップについても成立する。

#### (4) 二酸化炭素排出量推定の実証モデル

二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の排出量は、ガソリン燃料の消費量と比例することが一般的に知られている。従ってガソリン燃料消費量  $Q[\text{cc-gasoline}]$  を CO<sub>2</sub> 排出量  $E[\text{g-C}]$ (炭素(Carbon)換算質量)に変換する変換係数を  $K_c[\text{g-C/cc-gasoline}]$  とすると、 $E = K_c Q$  より次式が得られる。

$$E = 0.3K_c T + 0.028K_c D$$

$$+ 0.056K_c \sum_{k=1}^K \delta_k (v_k^2 - v_{k-1}^2) \quad (9)$$

あるトリップによるCO<sub>2</sub>排出量は、旅行時間  $T$  と旅行距離  $D$  と走行中の車速変動の評価指標である加速エネルギー当量  $AEE$  で説明される3項で構成される。

### 5. 理論的検討

#### (1) 自動車エンジンの熱機関モデル

ガソリンエンジンにおいて、単位時間当たり燃料供給量を  $f_t[\text{cc/s}]$ 、ガソリンの熱当量を  $H[\text{J/cc}]$ 、エンジンの正味熱効率を  $\epsilon$  とすると、エンジン回転軸から取り出される出力(仕事率)  $P[\text{W}]=[\text{J/s}]$  は  $P = \epsilon H f_t$  で表される<sup>1)</sup>。ここで正味熱効率  $\epsilon$  とは一般にエンジンの回転数  $n[\text{回/s}]$ (r.p.s: rotation per second)の変数であり、最適な回転数で最も熱効率がよく、これよりも回転数が高くても低くても熱効率が低下する特性を持つが、ここでは  $\epsilon$  は一定と仮定する。

#### (2) 車両の運動モデル

車両の推進力  $T_f[\text{N}]$  は、実効トルク  $Q_e[\text{N}\cdot\text{m}]$  をタイヤの有効半径  $R[\text{m}]$  で除したものである<sup>2)</sup>。

$$T_f = \frac{Q_e}{R} \quad (10)$$

$$Q_e = \frac{r\eta P_e}{2\pi n} \quad (11)$$

$$P_e = P - P_{(idle)} \quad (12)$$

$$n = \frac{vr}{2\pi R} \quad (13)$$

ここに、 $r$  は最終減速比、 $\eta$  は総伝達効率、 $P_e$  は実効出力  $[\text{W}]$ 、 $P_{(idle)}$  はアイドリング維持に必要な出力  $[\text{W}]$  である。総減速比  $r$  は変速機のギア比により異なり、乗用車ではローギアで5程度、2速で3程度、トップギアで1程度で、通常はだいたい  $r > 1$  である。また  $P_{(idle)}$  は、 $P_{(idle)} = \epsilon H f_{(idle)}$  で与えられる。

エンジンの実効出力  $P_e$  から推進力が得られている状態では、車両の運動方程式は次のようになる<sup>2)</sup>。

$$T_f = R_t \quad (14)$$

$$R_t = \mu M g + \kappa v^2 + M g \sin \theta + (M + m) \alpha \quad (15)$$

ここに、 $R_t$  : 総抵抗

$\mu$  : 転がり摩擦係数

$M$  : 車両質量  $[\text{kg}]$ (搭乗者等含む)

$g$  : 重力加速度  $[\text{m/s}^2]$

$\kappa$  : 抵抗係数  $[\text{kg/m}]$ (空気抵抗相当)

$\theta$  : 路面勾配(上り坂を正)

$m$  : 加速時回転部分相当質量  $[\text{kg}]$

$\alpha$  : 車両加速度  $[\text{m/s}^2]$

加速時回転部分相当質量  $m$  は、車軸やタイヤや変速機の歯車など全ての回転部位の慣性モーメントを質量換算したもので、変速機のギア比により変化し、ある乗用車の例では、ローギアでは車両の自重(空荷)の8割ほどの値、高いギアほど小さくなりトップギアでは1割程度である<sup>2)</sup>。 $\mu$  は路面性状と車速に依存するがほぼ一定と見なせる。 $\kappa$  は車両に固有で一定としてよい。

式(14)は基本的に加速と一定速度走行時に成立するが、減速時でも総抵抗  $R_t > 0$  の状態ではエンジンは車両に対して仕事をするので同じ式が成立する。一方  $R_t \leq 0$  となると、加速度  $\alpha$  は基本的にブレーキによってのみ決まり、 $f_t$  はアイドリング時の単位時間当たり燃料消費量  $f_{(idle)}$  に等しく<sup>10)</sup>、車両の推進力  $T_f$ (エンジンの実効出力  $P_e$ ) はゼロとなる。

#### (3) 理論モデルに基づく燃料消費量

以上を用いて、瞬時燃費  $f_t[\text{cc/s}]$  を車速  $v[\text{m/s}]$  について解くと次のようになる<sup>25)</sup>。

$$f_t = f_{(idle)} + \frac{(\mu + \sin \theta) M g}{\epsilon \eta H} v$$

$$+ \frac{\kappa}{\epsilon \eta H} v^3 + \frac{M + m}{\epsilon \eta H} \alpha v \quad (16)$$

(ただし、右辺  $\leq f_{(idle)}$  時は、常に  $f_t = f_{(idle)}$ )

式(16)の右辺は4つの項からなっている。第1項の  $f_{(idle)}$  はアイドリング燃費であり一定と見なせる。第2項は路面の転がり抵抗と勾配抵抗に相当し、速度  $v$  で説明される。第3項は空気抵抗に相当し、速度  $v$  の3乗で説明される。第4項は車両加速度  $\alpha > 0$ 、すなわ



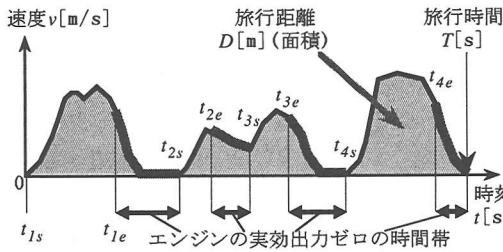


図-16 1 トリップにおける燃料消費量

ち車両が加速している場合のみ定義され、車両を加速させる場合のみ生じる加速抵抗に相当し、加速度  $\alpha$  と速度  $v$  の積で説明される。

#### (4) トリップにおける燃料消費量

式 (16) は瞬時の燃料消費率であり、速度や加速度の時間変化に伴い  $f_t$  も変化する。ここである目的トリップを考え、旅行距離を  $D$  [m]、旅行時間を  $T$  [s] (旅行速度  $V = D/T$  [m/s]) とする。図-16 はあるトリップのイメージを示したもので、通常は信号待ちなどで時間  $T$  [s] の間に何回か停車を強いられる。またトリップ途中に、アクセルを離してエンジンの実効出力がゼロとなる時間帯が少なくとも停車回数以上現れこれを  $J$  回とする。実効出力ゼロではない状態が連続する  $j$  番目時間帯 ( $0 < j \leq J$ ) の開始時刻を  $t_{js}$ 、終了時刻を  $t_{je}$  とする ( $t_{1s} = 0, t_{Je} = T$ )。図-16 は  $J = 4$  の例である。

以上のことを考慮すると、このトリップで消費される燃料  $Q$  [cc] は、式 (16) の  $f_t$  を時刻 0 から  $T$  まで積分して求められる<sup>26)</sup>。

$$Q = f_{(idle)}T + \frac{(\mu + \sin\theta)Mg}{\varepsilon\eta H}\Delta + \frac{\kappa}{\varepsilon\eta H} \sum_{j=1}^J \int_{t_{js}}^{t_{je}} v^3 dt + \frac{M+m}{\varepsilon\eta H} \sum_{j=1}^J \left( \frac{1}{2}v_{je}^2 - \frac{1}{2}v_{js}^2 \right) \quad (17)$$

ここに、

$v_{js}$  : 時刻  $t_{js}$  における車両速度 [m/s<sup>2</sup>]

$v_{je}$  : 時刻  $t_{je}$  における車両速度 [m/s<sup>2</sup>]

$$\Delta = \sum_{j=1}^J \int_{t_{js}}^{t_{je}} v dt$$

: 実効出力  $> 0$  で走行した距離 ( $< D$ ) [m]

トリップで消費される燃料  $Q$  [cc] は、次の4つの項の和で表される。第1項は、アイドリング時の燃料消費率  $f_{idle}$  [cc/s] に旅行時間  $T$  [s] を掛けたもので、旅行時間で値が決まる。第2項は、勾配抵抗と路面抵抗に抗して  $\Delta$  [m] ( $0 < \Delta < D$ ) だけの距離を移動するために必要な燃料を意味し、旅行距離に依存する項である。第3

項も、空気抵抗に抗して  $\Delta$  [m] の距離だけ移動するために要する燃料を意味するが、速度  $v$  の高次の項なので特に高速走行時に影響が大きくなる項である。第4項は、実効出力を連続的に車両速度の加速に費やした  $m$  回の時間帯で初期速度から最終速度までの運動エネルギーの増加分を獲得するために必要な燃料を意味する。

以上はガソリンエンジンの場合のエンジンの熱機関モデルと車両の運動方程式から燃料消費量を理論的に求めたものであるが、消費量は4つの項の線形和で表されることが分かった。

#### (5) 二酸化炭素排出量推定の理論モデル

4. の(4) と全く同様の方法で、式 (17) に変換係数  $K_c$  [g-C/cc-gasoline] を掛けると、ガソリンの燃料消費量  $Q$  [cc] を二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 排出量  $E$  [g-C] に換算される<sup>27)</sup>。

$$E = K_c f_{(idle)}T + \frac{K_c(\mu + \sin\theta)Mg}{\varepsilon\eta H}\Delta + \frac{K_c\kappa}{\varepsilon\eta H} \sum_{j=1}^J \int_{t_{js}}^{t_{je}} v^3 dt + K_c \frac{M+m}{\varepsilon\eta H} \sum_{j=1}^J \left( \frac{1}{2}v_{je}^2 - \frac{1}{2}v_{js}^2 \right) \quad (18)$$

#### 6. 二酸化炭素排出量を規定する要因

##### (1) 実証モデルと理論モデルのモデル構造比較

二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 排出量を推定する回帰分析から得られた実証モデル式 (9) と理論モデル式 (18) を比べると、良く似た構造を持っている。

第1項は実証式 (9) と理論式 (18) 共に全く同じ意味を持つ。第2項は、実証式 (9) では旅行距離  $D$  に比例する項であるが、理論式 (18) では  $\Delta$  に比例する項となる。通常  $\Delta$  は旅行距離  $D$  より少し短い長さであるから、もしも係数が同じであれば理論式 (18) の第2項のほうが少し小さくなる可能性がある。理論式 (18) の第3項は、対応する項が実証式には存在しない。これは空気抵抗の項で速度  $v$  の高次で効く項であるため、高速になるほど急激にこの項は大きくなる。実証分析の ST 単位の分析では、図-6 のようにほとんどの ST の旅行速度が 30 [km/h] を超えない範囲であるため、空気抵抗による影響の項が明確に現れないものと考えられる。

実証式 (9) の第3項は、理論式 (18) の第4項と良く似ており、いずれも一部の加速度状態の領域でのみ速度  $v$  の2乗で影響が現れる構造である。実証式では加速開始から終了までの速度増加 (加速時間中) による運動エネルギーの増分を表すが、理論式ではエンジンが仕事をしているの間 (実効出力が正の時間中) における

速度増加による運動エネルギーの増分に対応し、計算時間帯が微妙に異なるが、これはいずれも車速変動の評価指標として捉えられる。

## (2) 数値検討

### a) 両モデルの係数の数値検討

実証式(9)を定量的に検証するため、変換係数  $E[g-C]$  を乗じる前の実証式(8)の係数値と、理論式(17)に実験車両に使用した2,000[cc]乗用車のパラメータ概算値を代入したものを比較する。

$\mu$  は路面・タイヤ状況、速度などで変化するが、およそ0.01～0.02程度<sup>2)</sup>であるので、ここでは0.015とする。車両総質量  $M$  は、車体自重1.4[ton]に体重50[kg]の大人2名乗車した1,500[kg]とする。空気抵抗パラメータ  $\kappa$  も平均的な乗用車セダンの値<sup>2)</sup>を参考に0.5、 $m$  は低速ギアほど大きくギア比に依存して  $M$  の0.05～0.8倍程度<sup>2)</sup>とされるが、ここでは簡単のため  $m = 0.2M$  で一定とする。また、 $\sin \theta = 0$ 、重力加速度  $g = 10[\text{kg m/s}^2]$ 、 $\varepsilon = 0.3$ 、 $\eta = 0.9$ 、 $H = 3.4 \times 10^4[\text{J/cc}]$  とする。

理論式(17)の第1項は、実証式(8)の第1項と一致して係数  $f_{idle} = 0.3[\text{cc/s}]$  となる。理論式(17)の第2項の係数は約0.025となる。実証式(8)の第2項の係数は0.028で同程度の値であり、変数  $\Delta$  が  $D$  より少し小さい程度の値を取ることを勘案すると、第2項同士はほぼ同じものと見なせる。

理論式(17)の第3項の定積分は一般には解けない。仮に速度一定とすると  $v = 5[\text{m/s}] = 18[\text{km/h}]$  で  $0.0014D$ 、 $v = 10[\text{m/s}] = 36[\text{km/h}]$  で  $0.0054D$ 、 $v = 30[\text{m/s}] = 108[\text{km/h}]$  で  $0.049D$  となる。これは理論式(17)の第2項より低速域ではオーダーが1桁小さく、高速域では同等のオーダーとなる。実証式(8)では混雑した一般街路及び渋滞中の首都高で収集されたデータに基づいているので、その範囲では理論式の第3項の影響は小さいものと考えられる。

実証式(8)の第3項は、理論式(17)の第4項と良く似ている。計算時間帯が「加速時間中」と「実効出力が正の時間中」で異なるが、式の構造は同じである。理論式(17)の第4項の係数  $(M + m)/(\varepsilon \eta H)$  を計算すると約0.2となり、実証式(8)の第3項の係数0.11とはオーダーが等しく、実証式の第3項と理論式の第4項の対応関係がほぼ確認できる。

以上より、理論式(17)にパラメータの概算値を入れると、実証式(8)と都市部で混雑した比較的低速な領域ではよく一致する。従って実証モデルが理論モデルと論理的整合性を持つことがわかった<sup>26)</sup>。一方高い速度域が多い走行条件においては、理論式の第3項で表される空気抵抗の影響を適切に考慮することが必要と考えられる。

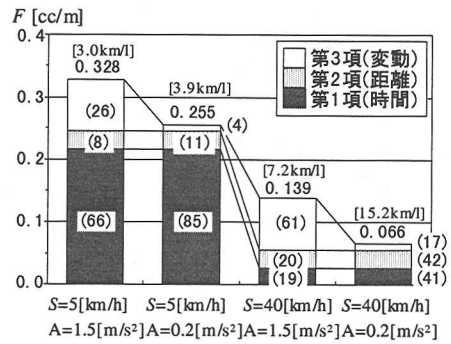


図-17  $F[\text{cc/m}]$  に対する各項の寄与 ( ) 内は寄与割合%)

### b) 各項の変動範囲

単位距離当り燃料消費量  $F[\text{cc/m}]$  を表す式(7)の各項の変動範囲、寄与割合を考える。式(7)の第2項の定数項は式(8)の旅行距離  $D$  の影響を意味し、0.028[cc/m] は単位距離(1[m])の移動に要する消費量に当たる。図-6を参考に  $S$  の範囲を5～40[km/h] とすると第1項の単位距離当り旅行時間  $\tau$  は0.09～0.72[s/m] となり、係数0.3を掛けた第1項の範囲は0.027～0.216[cc/m] で第2項の約1.0倍～7.7倍程度である。図-15を参考に単位距離当り加速エネルギー当量  $A[\text{m/s}^2]$  の範囲を0.2～1.5[ $\text{m/s}^2$ ]程度とすると、係数0.056を掛けた第3項の範囲は0.011～0.084[cc/m]程度と第2項の約0.4倍～3.0倍程度となる。

以上より、3つの項の大きさは互いに十分競合するものであり、いずれかの項が無視できるほど小さいということはないことが確認できる。

図-17は、旅行速度  $S$  の変動範囲5～40[km/h] と加速エネルギー当量  $A$  の変動範囲0.2～1.5[ $\text{m/s}^2$ ]の最小値・最大値の組合せについて、 $F[\text{cc/m}]$  の大きい順に式(7)を用いた各項の計算値と寄与割合を示す。

旅行時間が最も長く ( $S=5[\text{km/h}]$ ) 車速変動が最も大きい ( $A=1.5[\text{m/s}^2]$ ) ST で  $F$  は最も大きく、旅行時間の寄与が66%、車速変動が26%で旅行距離は8%である。これは停止時間が相対的に長い多車線道路の渋滞中に相当する。旅行時間は長いが車速変動が小さい ( $A=0.2[\text{m/s}^2]$ ) ST が次に  $F$  が大きく、旅行時間の寄与が85%、旅行距離が11%で車速変動は4%である。首都高で極低速で車速変動も少ない渋滞中に相当する。上記2つ例のように旅行時間が大きい(旅行速度が低い)場合は、圧倒的に旅行時間が燃費に対して支配的である。

旅行時間が最も短く ( $S=40[\text{km/h}]$ ) 車速変動が最も大きい ( $A=1.5[\text{m/s}^2]$ ) ST が次に来て、車速変動の寄与が61%、旅行距離が20%で旅行時間は19%である。例えば多車線幹線道路で比較的高速な車速変動の多いSTに当たり、車速変動が半分以上と支配的になる。

旅行時間が最も短く速度変動も最も小さいSTの場合

合に  $F$  が最も小さくなる。この場合は旅行距離の寄与が 42%、旅行時間の寄与が 41%で、車速変動は 17%である。交通量が少なく信号の系統が取れていて一定速に近い状態で走ることのできる 2 車線道路のような例に相当する。この場合は旅行距離の寄与が最も高いが、旅行時間の寄与も同等に高くなる。

以上より、旅行時間  $T$ 、旅行距離  $D$ 、車速変動指標  $A$  の 3 項は、燃費に対する影響はお互いに大小変化して、状況に応じて支配的な影響要因が大きく異なることがわかる。

### (3) CO<sub>2</sub> 排出原単位

実証モデル式 (9)、及び理論モデル式 (18) の CO<sub>2</sub> 排出量  $E$  [g-C] を旅行距離  $D$  で割ると CO<sub>2</sub> 排出原単位  $E_u$  [g-C/m] が得られる。

$$\text{実証: } E_u = \frac{0.3K_c}{S} + 0.028K_c + 0.058K_c A \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{理論: } E_u &= \frac{f_{(idle)}K_c}{S} + \frac{K_c(\mu + \sin)\theta Mg \Delta}{\varepsilon \eta H D} \\ &+ \frac{K_c \kappa}{\varepsilon \eta H D} \sum_{j=1}^J \int_{t_{j_s}}^{t_{j_e}} v^3 dt \\ &+ \frac{K_c(M+m)}{\varepsilon \eta H} \frac{1}{D} \sum_{j=1}^J \left( \frac{1}{2} v_{j_e}^2 - \frac{1}{2} v_{j_s}^2 \right) \quad (20) \end{aligned}$$

従来の排出原単位  $E_u$  は、様々な道路交通状況・車種等の平均的な一定値か速度の関数とされる。理論式 (20) では、第 3 項で速度の高次の項の影響が含まれるため、排出原単位  $E_u$  は旅行速度  $S$  に対して減少後極小値を取り、その後増加関数となるが、実証式 (19) では、旅行速度  $S$  に対して単調減少関数となる。これは式 (19) が混雑した速度の低い ST を対象とした実証分析から得られたモデルであるためである。

いずれにせよ式 (19) も式 (20) も旅行速度  $S$  の逆数とは独立に車速変動評価指標が説明変数となっている。従って旅行速度だけでなく車速変動による影響を適切に考慮すべきであることがわかる。この車速変動の影響の評価指標には、加速エネルギー当量  $AEE$  を用いるのが妥当であることが理論的にもほぼ裏付けられた。

## 7. まとめ

本稿では、実証分析にもとづいて実際の道路交通環境における CO<sub>2</sub> 排出量を推定する実証モデルを構築し、その妥当性を理論的なエンジンの熱機関モデルと車両の運動モデルにより検証した。

このモデルから CO<sub>2</sub> 排出原単位、およびあるトリップによる CO<sub>2</sub> 排出量は、旅行時間  $T$ 、旅行距離  $D$ 、車速変動評価指標  $AEE$  という 3 変数による影響に分解されることが明らかとなった。

旅行時間による CO<sub>2</sub> 排出量の増大は、道路の混雑・渋滞により生じる。また車速変動特性は道路構造や交通流状態のみならず、車両特性やドライバ属性などにより異なるものと思われる。加速度の時間分解能の高いマイクロ交通流モデルの再現性を考えると、こうしたモデルで各離散時間  $k$  毎に  $\delta_k$  を判定して  $AEE$  を計算し、CO<sub>2</sub> 排出量を求めるのは難しい。むしろ  $AEE$  とマクロな動的交通流特性との関係の実証分析と理論解析を行い、車速変動評価指標をマクロな交通流シミュレーションに組み込み、CO<sub>2</sub> 排出量推定モデルを開発すべきであろう。これにより車速変動の寄与の高くなるような道路・交通条件を見出し、この条件を排除する排出量抑制策を検討できるようになるであろう。

なお本研究で車速変動評価指標に用いた加速エネルギー当量  $AEE$  は、走行挙動の計測サンプリング周期 (0.1 秒)、および計測精度に大きく依存する。こうした観測上の問題を適切に回避する計測手法あるいは代替指標の開発も重要である。

また本稿における検討はガソリン乗用車を対象としており、交通流全体を評価するためにはディーゼル車、特に積載量によって大きく車両特性の変化する大型貨物車による CO<sub>2</sub> 排出量の推定手法の開発が必要である。

謝辞：本稿の実走行データの収集・分析は、岡本智氏 (日産自動車 (株)) との共同研究成果を含んでいる。また本論の内容は、日本交通政策研究会「運輸システムの高度化による CO<sub>2</sub> 排出抑制に関する研究検討委員会 (座長：太田勝敏東京大学教授)」を始め、土木学会土木計画学研究・講演会などにおける議論の結果を参考にさせて頂いている。ここに記して関係各位に深謝の意を表したい。

## 参考文献

- 1) 中島泰夫, 村中重夫: 新・自動車用ガソリンエンジン, 山海堂, 1994.
- 2) 近藤政市: 基礎自動車工学 (前期編), 養賢堂, 1965.
- 3) Oguchi, T., Taniguchi, M. and Okamoto, S.: Analysis of fuel consumption structure in real traffic situations, *Proc. of 8th Intn'l Pacifi-Rim Conference on Automotive Engineering*, Vol.1, pp.305-310, 1995.
- 4) 谷口正明, 大口敬, 岡本智: 実用燃費の要因構造に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.28, No.1, pp.59-64, 1997.
- 5) 片山硬, 鮎澤正: 交通流と燃料消費率に関する研究; その 1・走行実験結果, 自動車研究, Vol.15, No.1, pp.10-15, 1993.
- 6) 岡本智, 佐藤康治, 谷口正明: 各種道路と燃料消費率に関する一考察, 日本道路会論文集, No.20, pp.1346-1347, 1993.
- 7) 岡本智, 谷口正明: 道路交通環境が自動車の燃費に与える影響, 自動車技術会秋期学術講演会前刷集, Vol.944, pp.177-180, 1994.
- 8) Post, K., Kent, J. H., Tomlin, J. and Carruthers, N.: Fuel consumption and emission modelling by

- power demand and a comparison with other models, *Transpn. Res.*, Vol.18A, No.3, pp.191-213, 1984.
- 9) Lay, M. G. and Bowyer, D. P.: Fule consumption and traffic - what is left after the dust has settled, *10th IRF World Meeting*, Oct., 1984.
  - 10) Biggs, D. C. and Akcelik, R.: An energy-related model of instantaneous fule consumption, *Traffic Eng. + Cntr.*, Vol.27, No.6, June, 1986.
  - 11) Langdon, M. G.: Factors in road design which affect car fuel consumption, *Traff. Eng. + Cntr.*, Vol.25, No.11, pp.536-541, 1984.
  - 12) 西村昂, 日野泰雄, 寺本讓: 自動車走行モードに基づく排出ガス量の予測方式に関する一考察, 土木計画学研究・論文集, No.7, pp.283-288, 1989.
  - 13) 平井洋, 柳漢呉, 土井努, 細井賢三: 排出係数測定用の実走行モードの作成方法について, 自動車研究, Vol.18, No.12, pp.5-8, 1996.
  - 14) 小根山裕之, 大西博文, 山田俊哉, 平井洋: 自動車の走行特性を反映した排出係数の設定に用いる実走行モードについて, 土木計画学研究・講演集, No.22-2, pp.571-574, 1999.
  - 15) 越正毅, 大蔵泉, 茨木康男: 自動車排出ガスにおよぼす交通管制の影響について, 土木学会論文報告集, No.240, pp.71-79, 1975.
  - 16) 松本弘之, 辻絃良, 鈴木雅博, 嶋純孝, 広瀬登茂司: 街路交通における自動車燃料消費要因の研究, 科学警察研究所報告交通編, Vol.23, No.1, pp.39-48, 1982.
  - 17) 土井努, 平井洋, 柳漢呉, 細井賢三: 自動車の都市内走行形態に及ぼす道路, 車種, 積載量の影響, 自動車研究, Vol.18, No.1, pp.19-22, 1996.
  - 18) 柳漢呉, 平井洋, 土井努, 細井賢三: 自動車の都市内走行形態に及ぼす道路, 車種, 積載量の影響-試作走行モードの検証-, 自動車研究, Vol.19, No.1, pp.1-4, 1997.
  - 19) 大口敬, 谷口正明, 森田緯之: 燃費推定モデルを用いた道路交通施設整備効果の試算, 土木計画学研究・論文集, Vol.12, pp.575-582, 1995.
  - 20) Oguchi T., Taniguchi M. and Morita H.: A Method to Calculate Vehicle Fuel Consumption Allowing for Traffic Stream Fluctuation, *Proc. of 2nd WC on ITS(Yokohama)*, pp.2111-2116, 1995.
  - 21) 片山硬, 鮎澤正: 交通流と燃料消費率に関する研究; その2・実交通流における燃料消費量の予測, 自動車研究, Vol.15, No.3, pp.25-30, 1993.
  - 22) 松本弘之, 嶋純孝, 広瀬登茂司: 街路走行における車種別燃料消費量について, 科学警察研究所報告交通編, Vol.24, No.1, pp.73-78, 1983.
  - 23) Acutt, M. Z. and Dodgson, J. S.: Transport and global warming; modelling the impacts of alternative policies, *Transport Policy and the Environment*, E & FN Spon, pp.20-37, 1998.
  - 24) 埼玉県環境部: 自動車走行状況調査報告書, 1979.
  - 25) 大口敬, 谷口正明, 岡本智: 道路交通における自動車の燃費に影響を与える要因について, 土木計画学研究・講演集, No.18-2, pp.569-572, 1995.
  - 26) 大口敬: 道路交通における燃料消費量推定方法に関する考察, 土木計画学研究・講演集, No.22-2, pp.575-578, 1999.
  - 27) Oguchi, T. and Katakura, M.: New Conceptual Evaluation Method of Amount of Exhaust Emission Gas on Vehicular Road Traffic, *Urban Transport IV*, pp.383-392, 2000.

(2001.6.4 受付)

## CARBONDIOXIDE EMISSION MODEL IN ACTUAL URBAN ROAD VEHICULAR TRAFFIC CONDITIONS

Takashi OGUCHI, Masahiko KATAKURA and Masaaki TANIGUCHI

It is earnestly needed that the proper evaluation model of carbon-dioxide emission from vehicles on roads under the conditions of traffic operations and controls particularly in the urban crowded road traffic network. This paper deals with the practical analysis of observed data of fuel consumption, which is in proportion to carbon-dioxide emission, with an equipped vehicle. Estimation model of amount of carbon-dioxide emission is introduced and confirmed by theoretical consideration employing thermal model of engine and vehicle kinematics. The main factors influencing the amount of emission are travel time, travel distance and speed fluctuation.