

道路交通における燃料消費量推定方法に関する考察[†]

On Estimation of Vehicle Fuel Economy on Road Traffic

大口 敬*

By Takashi OGUCHI

1. はじめに

ガソリンや軽油などの燃料消費量と二酸化炭素(炭酸ガス)排出量が比例するために、地球温暖化防止対策の一つとして道路の自動車交通による燃料消費量の削減、燃料消費効率の向上が近年一層求められている。

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間や貨物の輸送に利用することを、エネルギーの流れとして捉えると図1のようにまとめられよう。ここに H は燃料の熱量換算係数[J/cc]、 ϵ は正味熱効率、 η は総伝達効率(機械的損失)であり、燃料の熱量の $\epsilon\eta(=0.2\sim0.3$ 程度)倍程度が車両推進力となる^{1),2)}。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、機械的損失低下の技術などの「車両性能」の向上、あるいは燃料の化学特性の改質などにより、燃料消費効率は既に大きく向上している。

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、これは主に輸送する量(人数や貨物トン数)や輸送距離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、輸送は「道路」という「交通の場」で移動時間を費やすことにより目的とする移動が達成されるものであるから、「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要素として考えられよう。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、といった交通側・道路側の条件の改善策は、特に車両が本来持っている燃料消費効率性能を十分引き出すために重要な対策であろう。

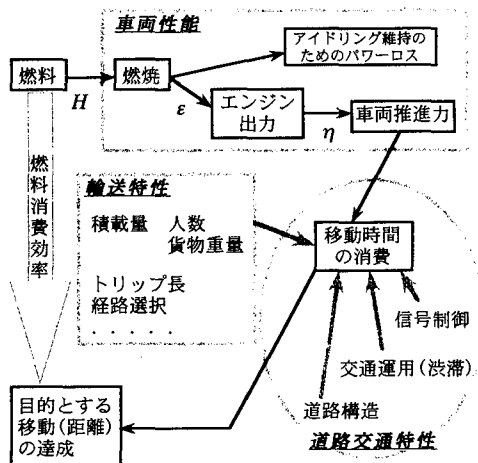


図1 燃料から目的とする移動の達成まで

炭酸ガス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(定数)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。この考え方では、炭酸ガス排出量を削減するためには必然的に「台キロ」或いは「人キロ」、「トンキロ」を削減する必要がある。

しかし直感的にも明かなように、また実走行調査にもとづく燃料消費量の実証分析^{3),4),5),6)}、と少しの理論解析⁷⁾によれば、実交通における燃料消費量(すなわち炭酸ガス排出量)は、走行距離のみならず旅行速度や速度変動の影響もかなり大きいことが示されている。つまり図1の「道路交通特性」が変われば、「排出原単位」は大きく異なるのである。

本稿では、「原単位」で扱われてきた燃料消費特性をエネルギー効率の問題として検討し、簡便な原単位法を用いる代わりに、炭酸ガス排出量を道路交通特性を反映し

[†] キーワード：交通流、環境問題、交通公害測量

* 正会員 博(工) 東京都立大学大学院工学研究科講師
(192-0397 八王子市南大沢 1-1 TEL:0426-77-1111, FAX:77-2772,
e-mail: oguchi-takashi@c.metro-u.ac.jp)

て推定できるような方法について考察する。

2. 自動車における燃料消費構造

(1) 熱機関と車両運動のモデル

自動車のガソリンエンジンの場合の熱機関モデルと車両の運動方程式にもとづいて燃料消費構造をまとめると、次式が導かれる(文献⁷⁾参照)。

$$f_t = f_{idle} + \frac{(\mu + \sin \theta) M g}{\varepsilon \eta H} v + \frac{\kappa}{\varepsilon \eta H} v^3 + \frac{M + M'}{\varepsilon \eta H} \alpha v \quad (1)$$

ここに、

- f_t : 単位時間当たり燃料消費量 [cc/s]
- f_{idle} : アイドリング維持に必要な f_t の値
- v : 車両速度 [m/s]
- M : 車両質量 (搭乗者, 積荷含む) [kg]
- μ : 路面転がり抵抗係数
- g : 重力加速度 [m/s²]
- θ : 路面勾配 (上り坂を正) [rad]
- κ : 空気抵抗パラメータ [kg/m]
- α : 車両加速度 [m/s²] ($\alpha > 0$ の場合のみ)
- M' : 加速時回転部分相当質量 [kg]

式(1)の右辺は4つの項からなる。

第1項の f_{idle} はアイドリング燃費であり、エアコンや冷却ファンなど電装品の消費エネルギーの変動を無視すれば一定と見なせる。第2項は、路面の転がり抵抗と勾配抵抗に抗して車両を動かすために必要な燃料を意味し、速度 v にほぼ比例する。第3項は、空気抵抗に抗して車両を動かすために必要な燃料を意味し、速度 v の3乗にほぼ比例する。第4項は、車両加速度 $\alpha > 0$ 、すなわち車両が加速している場合にのみ定義され、車両を加速するために必要な燃料を意味する項で、加速度 α と速度 v の積で決まる。なお M' は、車軸や変速器の歯車など回転部位の慣性モーメントを質量換算したもので、変速器のギア比によって変化し、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、だんだん小さくなり、トップギアでは1割程度である²⁾。

なお、式(1)の第2項以外は常に非負であるが、第2項は下り坂で負となり得る。(第2項+第3項+第4項)がゼロまたは負となる場合は、通常 $f_t = f_{idle}$ と考える。この状態は、エンジンはアイドリングを維持する仕事だけを行っており、車両の推進力(実効出力)はゼロとなる。

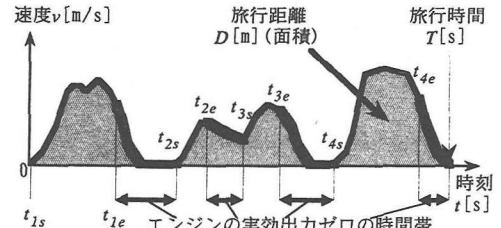


図2 あるトリップのイメージ図

(2) あるトリップの燃料消費量

式(1)は瞬時の燃料消費率であり、時々刻々と速度や加速度が変化すると f_t も変化する。そこで目的とする移動を達成するのに必要な、ある交通目的を持ったトリップを考え、旅行距離を D [m]、旅行時間を T [s] (旅行速度が $V = D/T$ [m/s]) とする。

図2は、あるトリップのイメージを示したもので、通常は、信号待ちなどの理由で時間 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 m 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 ($0 < j \leq m$) の開始時刻を t_{js} 、終了時刻を t_{je} とする ($t_{1s} = 0$, $t_{me} = T$)。図2は $m = 4$ 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(1)の f_t を時刻0から T まで時間について積分して求められる。

$$Q = f_{idle} T + \frac{(\mu + \sin \theta) M g}{\varepsilon \eta H} \Delta + \frac{\kappa}{\varepsilon \eta H} \sum_{j=1}^m \int_{t_{js}}^{t_{je}} v^3 dt + \frac{M + M'}{\varepsilon \eta H} \sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{2} v_{je}^2 - \frac{1}{2} v_{js}^2 \right) \quad (2)$$

ここに、

v_{js} : 時刻 t_{js} における車両速度 [m/s]

v_{je} : 時刻 t_{je} における車両速度 [m/s]

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

: 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の量を意味するが、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、その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の量を意味する。

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。特に最初の2つの項では、トリップの旅行時間とトリップの旅行速度は、お互い独立に燃料消費量に影響を与えていることが分る。

3. 燃料消費量の実証回帰式との比較

(1) 燃料消費量の回帰式

文献^{5),6)}では、2,000[cc] 乗用車に瞬時燃費計と速度、加速度などを搭載した実験車両を用いて、一般街路(往復2車線道路, 往復6車線道路), 及び渋滞時の首都高速道路の延べ約300km, 23時間余りの走行実験調査を行い、燃料消費率を推定する次のような回帰式を求めている。なおこの式は、前式(2)の定量的妥当性の検討に利用するため、係数の精度を2桁程度に丸めてある。

$$F = 0.028 + 0.3\tau + 0.056A \quad (3)$$

ここに、

F : 単位距離当たり燃料消費量 [cc/m]

τ : 単位距離当たり旅行時間 [s/m]

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

: 単位距離当たり加速エネルギー当量 [m/s^2]

v_k : 計測サンプリング周期 (k) 毎の車速 [m/s]

δ_k : 加速時 $\delta_k = 1$, 定速・減速時 $\delta_k = 0$

K : 総サンプル数

式(3)は、ある1回の停止から次に停止・発進するまでの燃料消費効率を推定する式であるが、両辺にその間の旅行距離 $d[m]$ を掛けて整理すると次式が得られる。

$$Q = 0.3T + 0.028d + 0.11\left(\frac{1}{2}Ad\right) \quad (4)$$

すなわち燃料消費量 $Q[cc]$ は、 $0.3 \times$ 旅行時間 $T[s]$, $0.028 \times$ 旅行距離 $d[m]$, 及び $0.056 \times$ 旅行距離 $d[m] \times$ 単位距

離当たり加速エネルギー当量 [m/s^2], という3つの項の線形和で表される。

(2) 各諸元とパラメータを代入した理論式

ここで2,000[cc]程度の乗用車を想定し、各諸元やパラメータの概算値を理論式(2)に代入する。 μ は路面状況で大きく変化するが、標準的な値として0.015とする。車両総質量 M は、車体自重1.4[t]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 κ は0.5, M' は本来ギアにより変動するものであるが、便宜上 $M' = 0.1M$ とする。簡単のため、 $\sin \theta = 0$, 重力加速度 $g = 10[kg \cdot m/s^2]$ とする。また、 $\eta = 0.9$, $\varepsilon = 0.3$, $H = 3.4 \times 10^4[J/cc]$ とする。

理論式(2)の第1項は、回帰式(4)の第1項と論理的に同じものである。理論式(2)の第2項で、 Δ の係数は約0.0245となる。 $0 < \Delta < D$ であることから、もしも $\Delta = D \times 7/8$ 程度の関係があるならば、回帰式(4)の第2項の係数0.028と一致することになる。

理論式(2)の第3項には不定積分があるため一般には解けないが、速度一定で仮定して試算すると $v = 5[m/s] = 18[km/h]$ で $0.0014D$, $v = 10[m/s] = 36[km/h]$ で $0.0054D$, $v = 30[m/s] = 108[km/h]$ で $0.049D$ と第2項同様 D の関数となるが、第2項より係数のオーダーが低速域では1桁低く、逆に高速では第2項以上の値になる。回帰式(4)が、一般街路及び渋滞中の首都高速道路で収集されたデータに基づいて作られた式であることを考えると、その範囲では理論式の第3項は無視できるほど小さいことになる。

理論式(2)の第4項の係数 $(M + M')/(\varepsilon \eta H)$ を計算すると0.18となる。回帰式(4)の第3項は、式(2)の第4項と良く似た式の形である。式(4)の第3項の $(\frac{1}{2}Ad)$ とは、「加速時間中」の最終速度と初期速度の運動エネルギー差に相当し、式(2)の第4項は、「加速時間中」ではなく「実効出力が正の時間中」である点が異なる。例えば下り坂で加速した後にはアクセルを離した場合、「実効出力が正の時間」よりも「加速時間」は少し長くなると考えられ、回帰式(4)の係数は小さくなる可能性がある。式(4)の第3項の係数は0.11であり、式(2)の第4項の係数0.18より小さいがオーダーは合っており、理論式の第4項は回帰式の第3項とほぼ同じものであることが確かめられた。

4. 燃料消費量の推定方法

(1) 燃料消費原単位

比較的低速な旅行速度の交通状況では、あるトリップで消費される燃料消費量 $Q[\text{cc}]$ は、旅行時間 $T[\text{s}]$ にほぼ比例する項と、旅行距離 $D[\text{m}]$ にほぼ比例する項と、速度変動の度に生じる速度増加による運動エネルギー増分に比例する項、と3項の線形和で表されることが分かった。

これまでよく用いられている「燃料消費原単位 $F_{\text{dist}}[\text{cc/m}]$ 」は単位距離当たりの燃料消費量であり、式(2)を旅行距離 D で割ったものとなる。

$$F_{\text{dist}} = \frac{f_{\text{idle}}}{V} + \frac{(\mu + \sin \theta) Mg \Delta}{\varepsilon \eta H D} + \frac{\kappa}{\varepsilon \eta H} \left\{ \sum_{j=1}^m \int_{t_{j,s}}^{t_{j,e}} v^2 dt \right\} / D + \frac{M + M'}{\varepsilon \eta H} \left\{ \sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{2} v_{j,e}^2 - \frac{1}{2} v_{j,s}^2 \right) \right\} / D \quad (5)$$

ここで、 Δ/D が一定と見なせば第2項は一定と考えて良い。また第3項は無視できるが、道路交通特性として、交通混雑などで速度低下や速度変動の増大が生じれば第1項と第4項は大きくなり、 F_{dist} は増大してしまう。

ここで回帰式(3)で数値を調べてみると、 $A[\text{m/s}^2]$ の代表的な経験値は約0.2～1.5程度なので⁵⁾、式(3)の第3項は0.011～0.084[cc/m]程度となり、定数項0.028[cc/m]の1/3～3倍程度の範囲で変化する可能性がある。また旅行速度 $V = 5[\text{m/s}]$ とすると第2項は0.06[cc/m]、 $V = 10[\text{m/s}]$ で0.03[cc/m]、 $V = 15[\text{m/s}]$ で0.02[cc/m]となり、やはり定数項の1～3倍程度の範囲で変化的ことが分かる。つまり旅行速度が10[km/h]の場合は、20[km/h]の場合よりも F_{dist} は約1.5倍、さらに速度変動特性の状況が変化すれば、もとの0.5倍から4.5倍まで変動する可能性があることになる。

(2) 道路交通特性に基づく燃料消費量推定方法

簡便な「原単位法」以外の燃料消費量を推定する方法の一つは、原単位 F_{dist} を旅行速度の関数とすることである。こうすれば、理論式(5)の初めの2つの項を取込んだことになる。しかし政策変数として旅行速度を用いるには、平均の旅行速度を知る必要があるが、「速度を平均する」には「総旅行距離」を「総旅行時間」で除したものが、「平均」という概念として望ましい。

従って、パーソントリップ調査などから得られる「ト

リップ長(旅行距離)」と「トリップ時間(旅行時間)」に基づいて、トリップ長、トリップ時間の母集団平均、分散、共分散等を推計し、一方で平均的な車両諸元パラメータを車種構成分布などより推計し、理論式(2)または回帰式(4)の第1項にトリップ時間、第2項にトリップ長を代入して、原単位を用いずに直接燃料消費総量[cc]を推計することが可能と思われる。また推定精度を上げるためには、Acutt et. al.⁸⁾のように、車両グループ別に諸元を与えてグループ別に燃料消費総量を推定することも有効であろう。

5. おわりに

速度変動特性に起因する運動エネルギー増加分で消費される燃料(式(2)の第4項、式(4)の第3項)の推計方法についてまだ検討していない。これには実証データを積み重ねて、速度変動特性と旅行距離、旅行時間、道路種別、道路幾何構造などの関係を実証分析する必要がある。また本稿ではガソリンエンジンのみを対象にしており、ディーゼルエンジンの検討が必要である。さらにディーゼルエンジンの大型貨物車の場合、車両自重に比べ重量物を積載すると質量が大きく増えるため、「トンキロ」ベースの分析(予測)と絡めて燃料消費量を推定する枠組みを整備することが重要である。

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) 大口敬, 谷口正明, 山口友行, 古賀正揮, 岡本智: 走行パターン波形特性に基づく燃料消費構造分析, 自動車技術会春季学術講演会前刷集, No.951, pp.149-152, 1995.
- 4) 大口敬, 谷口正明, 岡本智: 実用燃費を規定する要因について—実交通環境における燃料消費構造分析—, 自動車技術会秋季学術講演会前刷集, No.955, pp.17-20, 1995.
- 5) T. Oguchi, M. Taniguchi and S. Okamoto: Analysis of Fuel Consumption Structure in Real Traffic Situations, Proc. of 8th IPC on Automotive Engineering, Vol.1, pp.305-310, 1995.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) M. Z. Acutt and J. S. Dodgson: Transport and Global Warming: Modelling the Impacts of Alternative Policies, *Transport Policy and the Environment* (D. Banister Ed.), E & FN Spon, pp.20-37, 1998.