

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

A Study on Factors Which Affect Vehicle Fuel Economy on Road Traffic

大口 敬* 谷口 正明** 岡本 智***

By Takashi OGUCHI, Masaaki TANIGUCHI and Satoshi OKAMOTO

1. はじめに

東京など大都市部の道路では激しい交通混雑が慢性化し、時間損失、騒音・大気環境の悪化、エネルギー損失などを生み出している。

自動車の燃費性能は近年格段に向上してきている。しかし大都市部の道路交通環境下では、その燃費性能を十分に発揮することができないのが現状である。社会・環境的な見地からは、道路交通の実態に則した形で自動車・道路交通の両面からエネルギー消費量削減策を検討する必要がある。本稿は、実際の道路交通環境における燃料消費量に影響を与える要因の構造を、実証・理論の両面から探ることを目的としている。

2. 走行実験と測定燃費の分析

(1) 実験概要と分析データ

著者らは、車両の速度、燃料消費量などをパソコンを車載してリアルタイムに測定するシステムを開発し¹⁾、これを搭載した実験車両(2000cc, 4速オートマチック乗用車)を用いて走行実験を行った。

「ある停止状態から発進して走行を開始する時点から次に停止して再度発進する時点まで」を「1 ショートトリップ (Short-trip)」と定義し、これを単位として走行パターン特性と燃費の関係の分析を行う^{2) 3)}。図1にショートトリップ(以下STと省略する)の概念を示す。図に示すように、旅行距離： D (Distance [m])、旅行時間： T (Travel Time [s])、走行

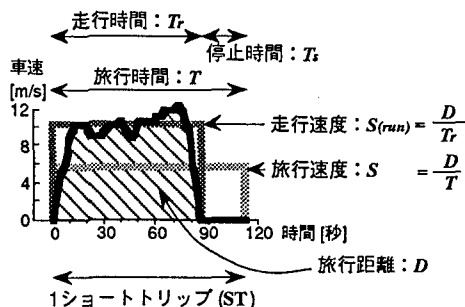


図1 ショートトリップの概念

時間： T_r (Running Time [s])、停止時間： T_s (Stopping Time [s])、旅行速度： S (Travel Speed [m/s])、及び走行速度： $S_{(run)}$ (Running Speed [m/s])を定義する。

東京の都市部で平日の昼間の一般的な交通状況で走行実験を行い、2車線道路(世田谷通り、駒沢通り、新青梅街道)及び6車線道路(国道15号、20号、246号)については各路線約5kmの区間⁴⁾、また首都高速道路として4号上り線の10kmの区間⁵⁾、を実験対象とした。ST分析に用いたSTの総数は1216、延べ走行距離は250km弱、延べ時間23時間余である¹⁾。

(2) 燃費特性分析

ある一つのSTの消費燃料[cc]を旅行距離[m]で割った単位距離当たり燃料消費量を Fa [cc/m]とする。図2に各STの旅行速度： S とこの Fa の関係を示す。

走行パターン及び燃費の平均的な特性とそのまわりの分散特性を分析した結果、2車線道路、6車線道路、及び首都高速道路、の3種類の道路で走行パターン特性が異なることが判った^{1) 4)}。図3にその違いを模式的に示す。すなわち、同じ旅行速度が実現するSTについて、平均的には6車線道路で最も停止時間が長く走行速度が高い。逆に首都高で最も停止時間が短く走行速度が低い。2車線道路はこの中間である。一方同じ旅行速度となる各STは平均の周りに散らば

キーワード：交通流、交通管理、エネルギー計画

* 正会員 博(工) 日産自動車(株)社会・商品研究所交通研究室

** 正会員 工修 日産自動車(株)社会・商品研究所交通研究室
主任研究員

*** 非会員 日産自動車(株)社会・商品研究所交通研究室
(〒104-23 東京都中央区銀座6-17-1

Tel. 03-5565-2133, Fax. 03-5565-2134)

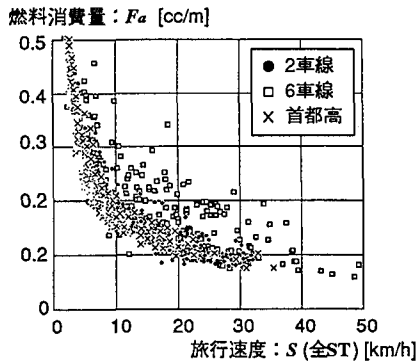


図2 旅行速度と燃料消費量の関係

る。この分散は、6車線道路が最も大きく、2車線道路がその次であり、首都高が最も小さい。

STは走行時と停止時に分けられるので、 Fa も走行時燃費 ($F(run)$ [cc/m])と停止時アイドリング燃費 ($F(idle)$ [cc/m])の和となる。アイドリング時の単位時間当たり燃料消費量 ($ft(idle)$ [cc/s])は、エアコンなどの影響がない場合には一定である。

$$F(idle) = ft(idle) \times T(idle) \quad [2.1]$$

ここに、 $ft(idle) = 0.345$ [cc/s] (測定値の平均)

$$T(idle) = Ts / D \text{ [s/m]}$$

図4は停止時を除いた、各STの走行速度： $S(run)$ と走行時燃費： $F(run)$ の関係を示す。平均的には右肩下りの双曲線的な関係が見られるので、単位距離当たり走行時間： $T(run)$ ($= Tr / D = 1 / S(run)$)と燃費： $F(run)$ は線形関係となる。また図から同じ走行速度に対する燃費の散らばりは、6車線道路で最も大きく、首都高で最も小さいことが判る。

燃費の散らばりは走行時の車速変動特性の違いにより生じるものと考えられる。車速変動特性を評価する変量として、式[2.2]に示す「加速エネルギー当量 (AEE : Acceleration Energy Equivalence) [(m/s)²]」の単位距離当たりの値 (AAEE = AEE / D : Average AEE) [(m/s)²/m]を用いる。AEEは各ST毎の加速による運動エネルギーの増分を意味する。

$$AEE = \sum [\delta_i \times \{ (v_i)^2 - (v_{i-1})^2 \}] \quad [2.2]$$

ここに、 $\delta_i = 1 \quad (v_i > v_{i-1})$

$\delta_i = 0 \quad (v_i \leq v_{i-1})$

v_i : 各サンプル周期(i)毎の車速[m/s]

式[2.3]は、特殊なケースを除いたSTについて、 $F(run)$ を $T(run)$ とAAEEの2変量により重回帰分析を行った結果得られたモデル式であり、非常に良好な

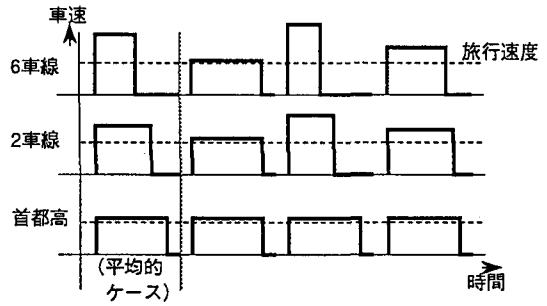


図3 走行パターン特性の模式図

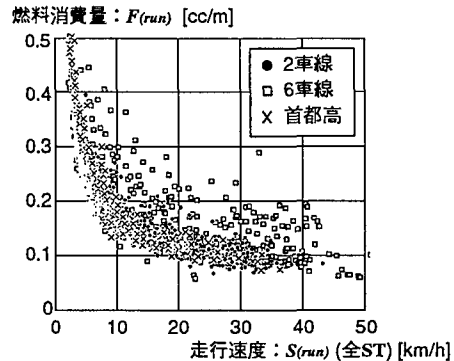


図4 走行速度と走行時燃料消費量の関係

説明力を得ることができた³⁾。(n=1100, R=0.981, F値=13647.3, 各説明変数の下の()内の値=t値)。

$$F(run) = a_0 + a_1 \times T(run) + a_2 \times AAEE \quad [2.3]$$

(160.1) (16.34)

ここに、 $a_0 = 0.0276$ [cc/m]

$a_1 = 0.3102$ [cc/s]

$a_2 = 0.05636$ [cc/(m/s)²]

3. 自動車エンジンの燃費特性

自動車の燃費は、ガソリンの燃焼熱が推進力に変換されるまでの熱効率及び機械効率と、必要な推進力と移動量の積 (仕事) の大きさで決まる。このエネルギー変換過程は次のようにモデル化できる。

(1) エンジンの熱機関モデル

単位時間当たりのエンジンへのガソリン供給量を ft [cc/s], ガソリンの熱当量を H [J/cc], エンジンの正味熱効率を ε とすると、回転軸から取り出される出力 (仕事率) P [W]=[J/s]は式[3.1]で表される⁴⁾。

$$P = \varepsilon \times H \times ft \quad [3.1]$$

ここで ε はエンジン回転数： n [回/s]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は低下する。

(2) 車両の運動モデル

車両の推進力： T_f [N]は、実効トルク： Q_e [N・m]をタイヤの有効半径： R [m]で除したものである⁷⁾。

$$T_f = Q_e / R \quad [3.2]$$

$$Q_e = (r \times \eta \times P_e) / (2\pi \times n) \quad [3.3]$$

$$P_e = P - P_i \quad [3.4]$$

$$n = v \times r / (2\pi \times R) \quad [3.5]$$

ここに、 r : 総減速比

η : 総伝達効率

P_e : 実効出力[W]

P_i : アイドル維持に必要な出力[W]

v : 車両速度[m/s]

エンジンの実効出力 (P_e) により推進力が得られる場合には、車両の運動方程式は式[3.6]となる⁷⁾。

$$T_f = R_t \quad [3.6]$$

$$R_t = (\mu \times M \times g) + (\kappa \times v^2) + (M \times g \times \sin\theta) + (M + m) \times \alpha \quad [3.7]$$

ここに、 R_t : 総抵抗[N]

μ : 転がり摩擦係数

M : 車両質量[kg] (搭乗者等含む)

g : 重力加速度[m/s²]

κ : 抵抗係数

θ : 路面勾配 (上り坂を正)

m : 加速時回転部分相当質量[kg]

α : 車両加速度[m/s²]

加速時回転部分相当質量： m は、エンジン回転軸やタイヤなど全回転部位の慣性モーメントを考慮して質量換算したものでギア比により異なる。 μ は路面性状と車速に依存する。 κ は車両に固有である。

減速時でも総抵抗： $R_t > 0$ の間は、エンジンは車両に対して仕事をする必要があるため、[3.5]の運動方程式が成立する。 $R_t \leq 0$ となると、加速度 α 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費 ($f_{t(idle)}$) に等しい⁸⁾。

(3) エネルギーモデル

式[3.1]～[3.6]を、瞬時燃費： f_t [cc/s]と車速： v [m/s]について整理すると式[3.7]となる。

$$f_t = c_0 + \delta \{ c_1 \times v + c_2 \times \alpha \times v + c_3 \times v^3 \} \quad [3.7]$$

ここに、 δ : $R_t > 0$ の時 $\delta=1$ ； $R_t \leq 0$ の時 $\delta=0$

$$c_0 = f_{t(idle)}$$

$$c_1 = M \times g \times (\mu + \sin\theta)$$

$$c_2 = (M + m) / (\eta \times \varepsilon \times H)$$

$$c_3 = \kappa / (\eta \times \varepsilon \times H)$$

第1項は旅行速度とアイドリング燃費で決まる項であり、 c_0 は定数と考えられる。第2項は走行時の転がり抵抗と勾配抵抗、第3項は加速抵抗、第4項は空気抵抗による影響を評価する項である。同一路面、同一勾配であれば c_1 は一定である。また総伝達効率： η はギア比により異なり、例えばギアが4速あれば4つの値を取る。正味熱効率： ε は近似的には一定である。 $c_0 \sim c_3$ を構成する他のものは定数と考えて良い。

(4) 延長距離当たりの燃費

微少時間： dt 間の燃料消費量を dF とすれば、 $f_t = dF/dt$ となる。ある一定時間を走行したときの燃費はこの積分により求まる。今、時間： τ の間に進んだ距離： x 、旅行速度： u とすると、この間の燃費： Fa [l/km] (= [cc/m]) は式[3.8]となる。

$$Fa = \int dF = (\int f_t dt) / (\int v dt) = f_{t(idle)} / u + c_1 \times K + c_2 \times I + c_3 \times J \quad [3.8]$$

ここに、 $u = x / \tau$

$$K = \int (\delta \times v) dt / u$$

$$I = \int (\delta \times \alpha \times v) dt / u$$

$$J = \int (\delta \times v^3) dt / u$$

積分記号 ($\int$) は時間： τ 間の定積分

ここで第2項～第4項は、エンジンが車両に対して仕事をしている時間($\delta=1$)に対してのみ積分される。

4. 燃料消費構造

(1) 燃費特性分析の結果

式[2.1]と走行時の重回帰式[2.3]を加え合わせると、燃費 Fa を一般的に表現する式[4.1]が得られる。

$$Fa = f_{t(idle)} \times T_{(idle)} + a_0 + a_1 \times T_{(run)} + a_2 \times AAEE \quad [4.1]$$

式[4.1]から、a)停止時間長： $T_{(idle)}$ (第1項)、b)走行速度： $S_{(run)}$ (= $1/T_{(run)}$) (第2,3項)、及びc)走行時の車速変動特性： $AAEE$ (第4項)の3つの要因で燃料消費構造を説明できることが判る。道路種類 (2

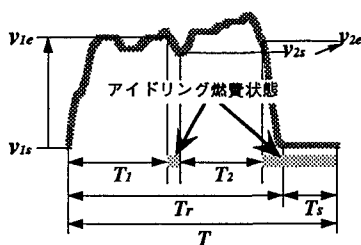


図5 $\delta=1$ となる時間： T_j の考え方

車線道路、6車線道路、首都高)による燃費の差異は、この指標が道路により異なるために生じる。

さらに係数 a_1 が、 $f_i(\text{idle})$ にほぼ等しいことから近似的に式[4.2]が成立する¹⁾。

$$Fa = f_i(\text{idle}) / S + a_0 + a_2 \times A A E E \quad [4.2]$$

この式は、停止時間と走行速度の項は近似的に旅行速度： S を用いて表現できることを意味する。

(2) エネルギーモデルの適用

ある1つのSTについて式[3.8]を解くと、積分する時間： $\tau = T$ 、走行距離： $x = D$ 、旅行速度： $u = S$ となる。 $\delta=0$ となるのは停止時間、及び走行時間のうち $R_t \leq 0$ となる減速時の一部であり、 $\delta=1$ となるのはその他の減速時間と加速・一定速走行時である。

走行時間： T の中には、 $\delta=1$ が時間的に連続して成立する、 m 個の互いに不連続な時間： T_j ($1 \leq j \leq m, m \in \text{自然数}$)がある。各 T_j 時間の始点時刻の速度を v_{js} 、終点時刻の速度を v_{je} とすると、例として $m=2$ の場合を模式的に示せば図5のようになる。 $(\sum T_j)$ 間の総和の走破距離を $\beta \times D$ (β : 係数($0 < \beta < 1$))とすると、 $K = \beta$ となる。また $\alpha \times v$ の不定積分は $v^2/2$ であるから、 $I = [\sum \{(v_{je})^2 - (v_{js})^2\} / D] / 2$ となる。従って次式[4.3]が導かれる。

$$Fa = f_i(\text{idle}) / S + c_1 \times \beta + c_3 \times J + (c_2 / 2) \times [\sum \{(v_{je})^2 - (v_{js})^2\} / D] \quad [4.3]$$

(3) 考察

式[4.2]、[4.3]から次のことが判る。

各第1項は同じものである。旅行速度に反比例し、アイドリング時の単位時間当たり燃費で決まる。

式[4.3]の第2項は転がり抵抗及び勾配抵抗、第3項は空気抵抗の影響を表現する項である。一方式[4.2]の第2項の定数 a_0 は、これらの抵抗の影響を近似的に一定と置いたものと解釈できる。つまり都心部の一

般的な状況においては、転がり抵抗や空気抵抗の燃費に対する影響は速度によらず一定と考えてよい。

式[4.3]の加速抵抗の影響を表現する部分(便宜的に最終項とする)と式[4.2]の第3項は良く似ている。いずれも速度の2乗の差分でかつ増速時の差分の和を単位距離当たりに換算した変数の項である。式[4.2]では加速時のみの和を取っているが、式[4.3]ではエンジンが車両に対して仕事をしている時間についての和を取っている点が異なっている。

5. まとめ

(1) 実際の道路交通における燃費に影響を与える要因は、各ST毎の停止時間、走行速度、及び車速変動の3要因にまとめられることを示した。

(2) 実測燃費にもとづく実証的な分析結果を、自動車のエンジンと車両の理論モデルを検討して要因の妥当性を確認し、その構造を整理した。

参考文献

- 1) 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—, 自技会秋季学術講演会前刷集, No.955, 1995年9月。
- 2) 大口敬, 谷口正明, 山口友行, 古賀正輝, 岡本智: 走行パターン波形特性にもとづく燃料消費構造分析, 自技会春季学術講演会前刷集, No.951, 1995年5月。
- 3) T. Oguchi, M. Taniguchi and S. Okamoto: Analysis of Fuel Consumption Structure in Real Traffic Situations, Proc. of 8th IPC on Automotive Engineering, Nov., 1995.
- 4) 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, 自技会秋季学術講演会前刷集, No.944, 1994年10月。
- 5) 大口敬, 谷口正明, 佐藤康治, 森田緯之: 渋滞/非渋滞区分に基づく燃料消費構造分析, 自技会秋季学術講演会前刷集, No.944, 1994年10月。
- 6) 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年。
- 7) 近藤政市: 基礎自動車工学(前期編), 養賢堂, 1965年。
- 8) D. C. Biggs and R. Akcelik: An Energy-related Model of Instantaneous Fuel Consumption, Traffic Eng. + Cntr., Vol.27, No.6, June, 1986.