

# 効率性分析に基づく自動車運転挙動特性の分析\*

## Analysis of driving characteristics based on the energy consumption efficiency\*

山本航\*\*・塚井誠人\*\*\*・桑野将司\*\*\*

By Wataru YAMAMOTO\*\*・Makoto TSUKAI\*\*\*・Masashi KUWANO\*\*\*

### 1. 背景・目的

近年、環境問題に対する関心が高まる中、地球温暖化に対する早急かつ有効な施策の検討・実施が求められている。部門別の二酸化炭素排出量に着目すると、約20%を運輸部門が占め、そのうち約50%が自家用自動車によるものであるため、自家用自動車からの二酸化炭素排出量の削減に大きな期待が寄せられている。自動車から排出される二酸化炭素は、ほぼ燃料消費量と比例し、燃料消費量は走行距離と燃料消費率（走行燃費の逆数）で表すことができる。このうち前者は、土地利用状況等に依存するマクロ政策目標と位置付けられる、一方で、後者は個人の運転挙動に依存するミクロ政策目標である。後者についてはこれまで、運転挙動の「可視化」を通じてドライバーに情報提供がなされてきたが、その実態は明らかにされていない。

本研究では、公共交通機関のサービス水準や自動車利用特性の異なる地域を対象に、自動車利用状況を考慮した自動車利用の効率性を算出する。ここで効率性とは、現在の自動車利用と市場で実現しているなかで最も効率的と判断される状態との乖離度合いを言う。これにより、ドライバーが最も効率的な自動車利用を行った際の消費エネルギー削減ポテンシャルの算出が可能となり、環境負荷のエコドライブを評価するための政策の検討に貢献するものと考えられる。

### 2. 既往研究と本研究の位置付け

従来の自動車利用行動の分析は、主に各世帯の平均的な自動車利用を扱う典型的な分析が行われてきた。例えば、1年間あるいは1ヶ月間といった一定期間の自動車走行距離を被説明変数とした重回帰分析が主に用いられてきた<sup>1)2)</sup>。しかし、これらの分析では対象都市の特性の

\*キーワード：SFA分析、地球環境問題、消費エネルギー

\*\*学生員、広島大学大学院工学研究科

\*\*\*正員、博（工）、広島大学大学院工学研究院社会環境空間部門（広島県東広島市鏡山1-4-1、

TEL:082-424-7827、E-mail:m103594@hiroshima-u.ac.jp)

違いによる、自動車利用の抑制可能量（以下、自動車利用削減ポテンシャル）を把握することは出来ない。一方本研究では、平均的な自動車利用行動ではなく、メインドライバー属性を考慮した「効率性」の観点から、1日の自動車利用行動を明らかにする。

効率性の算出を試みる研究は Farrell<sup>3)</sup>をはじめとし、1950年代から理論研究、実証研究の双方でなされてきた。そのアプローチは、パラメトリックモデルとノン・パラメトリックモデルの2つに大別することができる<sup>4)</sup>。パラメトリックモデルでは、フロンティア生産関数またはフロンティア費用関数の関数型及び確率分布を仮定し、回帰分析等関数形を推定し効率性の計測を行う手法であり、代表的な手法として確率的フロンティア分析（SFA: Stochastic Frontier Analysis）がある。一方、ノン・パラメトリックモデルは関数型や確率分布を仮定せず、線形計画法等により効率性の計測を行う手法であり、DEA (Data Envelopment Analysis) が代表的な手法である。

確率的フロンティア分析は、インプットの変数がアウトプットにどの程度寄与するかを統計的に判断すると共に計測誤差と効率性の混合分布を仮定した分析を行うことにより、これらを分離できるという利点がある。よって、本研究では確率的フロンティア分析を用いることとする。近年、この分析を用いてエネルギー消費や環境負荷を分析した研究<sup>5)6)</sup>がなされているが、1日単位での自動車利用行動への適用は筆者の知る限り行われていない。

### 3. 使用データの概要

本研究では、2009年11月-12月にかけて自動車利用予定・実態調査と自動車走行軌跡調査を実施した。調査の概要を表-1に示す。2つの調査は同一被験者に対して1週間行った。自動車利用実態調査は、1週間の世帯の自動車利用予定・実態についての紙面調査である。利用実態調査の質問項目は、出発地、目的地、運転者、同乗者のみとして、時刻情報は自動車走行軌跡調査から取得した。自動車走行軌跡調査は、ドライブレコーダーを調査対象車に搭載して、移動経路、総移動距離、停止地点、停止時間の情報を内蔵メモリに蓄積した。

表一 1 調査概要

調査名	自動車利用実態調査...(1) 自動車走行軌跡調査...(2)	
期間	2009年11月-12月	
対象世帯	自動車利用世帯 (長距離・週末のみ利用車は除く)	
対象地域	広島市, 三次市, 安芸高田市	
方法	(1) 紙面 (2) ドライブレコーダー	
サンプル	(1)	広島市内 13台
		広島市以外 12台
	(2)	広島市内 11台
		広島市以外 12台

#### 4. 消費エネルギー算出手順

自動車の走行にかかる消費エネルギー $W[J]$ は、以下の運動方程式から算出する。時刻 $t$ において自動車にかかる力 $F(t)$ は、空気抵抗 $R_a(t)$ 、転がり抵抗 $R_r(t)$ 、勾配抵抗 $R_e(t)$ 、および加速度抵抗 $R_c(t)$ である。これらはそれぞれ、以下の式(1)~(4)で表わされる。

$$R_a(t) = \lambda \times s \times V_t^2 \quad (1)$$

$$R_r(t) = w \times \mu \quad (2)$$

$$R_e(t) = w \times \sin \theta_t \quad (3)$$

$$R_c(t) = (b_t / g) \times w \quad (4)$$

ここで、 $\lambda$ は空気抵抗係数、 $s$ は車両前面投影面積、 $V_t$ は時刻 $t$ の速度、 $w$ は車両重量、 $\mu$ は転がり抵抗係数、 $\theta_t$ は時刻 $t$ の勾配、 $b_t$ は時刻 $t$ の加速度、 $g$ は重力加速度である。なお、 $\lambda$ 、 $\mu$ はそれぞれ $0.02[\text{kgf/kg}]$ 、 $0.32[\text{kg} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^4]$ と仮定する<sup>7)</sup>。

力 $F_t$ と仕事 $W_t$ の関係は、 $W_t = F_t \times D_t$ である。ただし $D_t$ は、 $F_t$ の継続時間である。本研究では、データを1秒間隔で加工したので、 $D_t = V_t \times \Delta t = V_t$ である。以上より、自動車走行に必要な消費エネルギー $W$ は、

$$W = \sum_{t=t_0}^{t_e} W_t = \sum_{t=t_0}^{t_e} F_t \times V_t \quad (5)$$

$$= \sum_{t=t_0}^{t_e} (R_a(t) + R_r + R_e(t) + R_c(t)) \times V_t$$

で求められる。ただし、 $t_0$ は走行開始時刻、 $t_e$ は走行終了時刻である。本研究では、充電可能地点を自宅のみと考えて $t_0$ は自宅出発時刻、 $t_e$ は帰宅時刻とした。なお、実際には加速度抵抗による消費エネルギー $R_c(t) \times V$ は、

$$R_c(t) \times V_t = (1/2) \times w \times (V_t^2 - V_{t-1}^2) \quad (V_t > V_{t-1})$$

$$R_c(t) \times V_t = 0 \quad (V_{t-1} > V_t) \quad (6)$$

として算出し、減速時の回生ブレーキによるエネルギー回収量は無視した。また、勾配抵抗 $R_e(t)$ については、GPSより得られる標高情報は、精度が極めて低いため、 $\theta_t = 0$ として無視した。

#### 5. 効率性分析

##### (1) 確率的フロンティア分析モデル

公共交通機関のサービス水準や自動車利用特性のとなる地域を対象に、自動車利用による単位距離当たりの消費エネルギー削減を検討する。いま、ある属性を持ったメインドライバーが自動車を利用したとき、その自動車利用状況によりメインドライバーが取り得る最低限の自動車利用（単位距離当たりの消費エネルギー）の見込値が決まるものとする。ここでは、この最低限の単位当たりの消費エネルギーの見込値をフロンティアと定義し（図-1）、市場で実現している最も効率的な状態を表す。また、フロンティアから各世帯の乖離度合いを自動車利用の効率性と定義する。フロンティアはそのメインドライバーでの単位距離当たりの消費エネルギーを削減するための目標値として利用することが可能である。

以下の分析では、確率的フロンティア分析を用いて、世帯の単位距離当たりの消費エネルギーモデルの構築を行い、メインドライバーの自動車利用状況に応じた単位距離当たりの消費エネルギーの目標値の設定を行う。

確率的フロンティア分析モデルを式(7)に示す。

$$\ln(y_n) = f(x_n; \beta) + v_n \pm u_n \quad (7)$$

ここで、 $y_n$ は世帯 $n$ の生産物（単位距離当たりの消費エネルギー）を表す。 $x_n$ は投入ベクトル（メインドライバー属性）、 $\beta$ はパラメータである。 $v_n$ は攪乱項（ $v_n \sim N(0, \sigma_v^2)$ ）を、 $u_n$ は効率性を表現する確率項である。 $u_n$ はフロンティア費用関数の場合、非負の値をとり、フロンティア生産関数の場合、非正の値をとる。本研究では世帯の単位当たりの消費エネルギーを最小化することを目的としており、非効率性（メインドライバ

一の単位距離当たりの実際の消費エネルギーと単位距離当たりの最小消費エネルギーとの乖離)が必ず非負で算出される。そこで、フロンティア費用関数を採用し、 $u_n$  は試行錯誤の結果、先行研究でも多用され一般的な分布形状である平均値が 0 で分散が  $\sigma_u^2$  の切断正規分布に従うものと仮定する。

$u_n$  と  $v_n$  が独立であることを仮定し、式(8)の対数尤度関数を最大化することで未知パラメータの推定を行う。

$$\ln(L) = -\frac{N}{2} \ln\left(\frac{2}{\pi}\right) - \frac{N}{2} \log(\sigma^2) + \sum_{n=1}^N \ln\left[1 - \Phi\left(\frac{-\varepsilon_n \lambda}{\sigma}\right)\right] - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=1}^N \varepsilon_n^2 \quad (8)$$

ここで、 $\Phi(\cdot)$  は累積正規密度関数を表す。また、 $\lambda$  は 2 つの構造的攪乱項  $u_n$  と  $v_n$  の相対的影響力を表すもので、 $\lambda = \sigma_u / \sigma_v$  として定義される。なお、 $\sigma^2 = \sigma_v^2 + \sigma_u^2$ 、 $\varepsilon_n = u_n + v_n$  である。

世帯の効率性は観測される単位距離当たりの消費エネルギー ( $u_n$  がゼロでない) とフロンティア ( $u_n$  がゼロのときの単位距離当たりの消費エネルギー) との比率により式(9)で与えられる。ここで、 $y_n^*$  は式(7)により算出した目的関数値の指数変換値である。

$$PE_n = E(y_n^* | u_n = 0, x_n) / E(y_n^* | u_n, x_n) \quad (9)$$

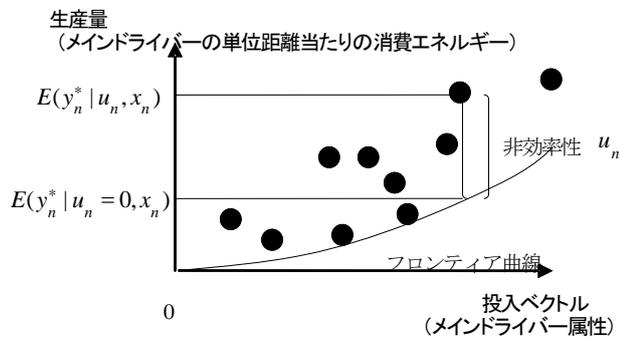


図-1 フロンティア費用関数

### (2) モデルに導入する説明変数

本研究では、世帯の自動車の 1 日の走行距離 (km) 当たりの消費エネルギー量を費用、メインドライバー属性を投入ベクトルとした確率的フロンティア分析モデルの構築を行う。ここで、メインドライバー属性として性別と自動車利用状況を用いる。具体的には、1 日の走行距離 (km)、1 日の走行時間 (hour)、1 日の駐車回数をを用いる。表-2 は本研究で用いるデータの記述統計量を示す。

表-2 データの記述統計

	平均値	最小値	最大値
1 日の走行距離 (km)	26.994	0.789	162.166
1 日の走行時間 (hour)	1.015	0.034	4.945
1 日の駐車回数	5.18	1.000	22.000

### (3) モデルの推定結果

モデルの推定結果を表-3に示す。メインドライバー属性のうち、性別に関するパラメータは正で有意な値となった。これは、メインドライバーが男性である方が単位距離当たりの消費エネルギーが大きくなることを示している。1 日の走行距離に関するパラメータに着目すると負で有意となった。これは、1 日の走行距離が短いほど、単位距離当たりの消費エネルギーが大きくなることを示している。この理由として、買い物や送迎などの走行距離が短い自動車利用時は、目的地に到着するのが早く、運転中に消費エネルギーなど環境面への配慮を考慮する時間がないために、単位距離当たりの消費エネルギーが増加すると考えられる。また、1 日の走行時間に関するパラメータに着目すると正で有意な値となった。これは、1 日の走行時間が長くなるほど、単位距離当たりの消費エネルギーは大きくなることを示している。これは、走行時間が長い場合、ドライバーは疲れなどにより運転が大雑把になり、単位距離当たりの消費エネルギーが大きくなるためと考えられる。

表-3 モデル推定結果

説明変数	推定値	t 値
<メインドライバー属性>		
性別	0.393 **	6.109
1 日の走行距離 (km)	-0.016 **	-7.171
1 日の走行時間 (hour)	0.646 **	9.123
1 日の駐車回数	-0.024	-1.631
<定数項>		
定数項	-0.786 **	-10.575
$\lambda$	2.072 **	6.124
$\sigma$	0.414 **	6.331
初期尤度	-673.165	
最終尤度	-17.826	
サンプル数	112	

\*\*): 1% 有意

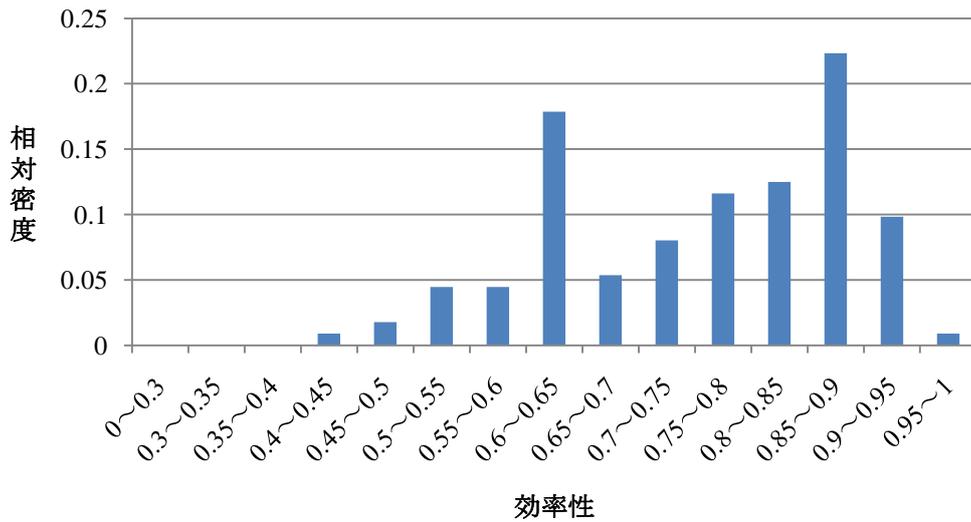


図-2 効率性と相対密度

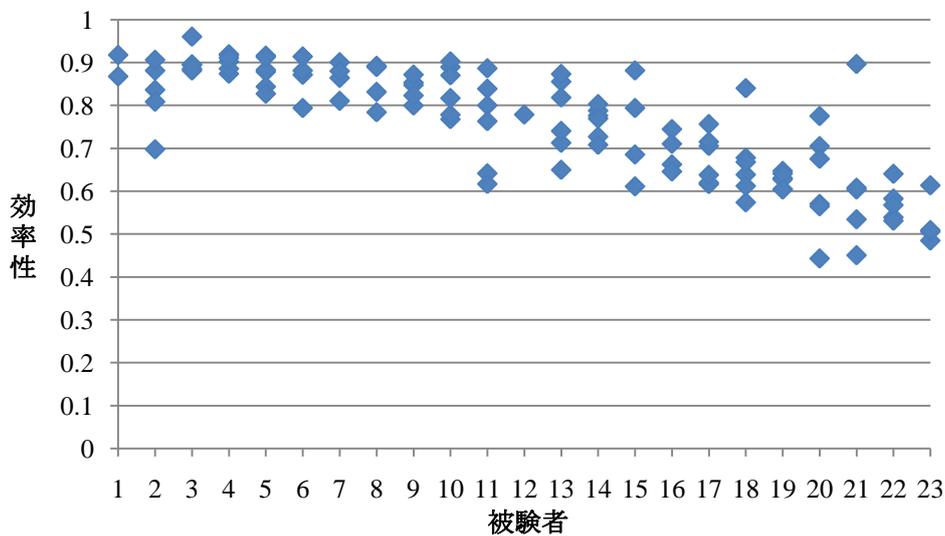


図-3 被験者別の効率性

(4) 効率性分布

図-2に上記のパラメータ推定結果を用いて世帯ごとに算出した効率性の分布を示す。全世帯の効率性を見ると、0.65~1.00の間に71%の世帯が属している。全世帯での効率性の平均値は0.76であり、これを単位当たりの消費エネルギーに換算すると現在の1日の自動車利用における0.73MJ/kmから、世帯が効率的に自動車利用を行うことにより1日で0.52MJ/kmの消費エネルギーの削減の可能性があることを意味する。また、図-3に効率性が高い被験者順に被験者別に効率性を算出した結果を示す。図-3の値を見ると、効率性の平均値が低くなるにつれて、効率性の値の変動が大きくなる傾向にある。つまり、同一被験者であっても効率性の平均値が低い場合、効率性の値に変動が生じる傾向が示された。

6. 重回帰分析による効率性影響要因分析

(1) 対数線形モデルの定式化

次に、重回帰分析を用いることにより、効率性の値に影響を及ぼす要因を定量的に把握する。分析には、対数線形モデルを採用する。対数線形モデルを式(10)に示す。

$$\ln PE_n = \ln A_n + \sum_{k=1}^K (\alpha_{kn} \times \ln x_{kn}) + \psi_n \quad (10)$$

ここで、 $PE$ ：効率性の値、 $A$ ：定数項、 $\alpha_k$ ： $k$ 番目のパラメータ、 $x_k$ ： $k$ 番目の説明変数、 $\psi$ ：誤差項である。説明変数にダミー変数を用いる場合は、 $x_{kn} = \exp(\delta_{kn})$ とする。ただし、 $\delta$ はダミー変数。

## (2) モデル推定結果

表-4に推定結果を示す。世帯人数に関するパラメータでは、負で有意な値となった。これは、世帯人数が少ないほど非効率であることを示している。この理由として、世帯人数が少ない場合、まとめて移動することが難しく、世帯人数が多い場合に比べて非効率になると考えられる。自動車保有台数に関するパラメータに着目すると、正で有意な値となった。自動車保有台数が多いほど、非効率になることを示している。これは、自動車保有台数が少ない場合、1回の自動車利用で多くの目的を果たそうとするが、保有台数が多い場合、それぞれがそれぞれの目的を果たすのみになってしまう。このために非効率になると考えられる。年齢に関するパラメータに着目すると、すべてのダミー変数で有意となり、正の値となった。年齢間での推定値を比較すると、50歳代の推定値が大きいため、非効率であることが分かる。年齢が50歳代になると、運転に対する注意が散漫になり、走行距離の増加などが非効率な運転につながる。このため、効率性の値が大きくなると考えられる。

## 7. 結論

本研究では、公共交通機関のサービス水準や自動車利用特性のことなる地域を対象に、確率的フロンティア分析手法により自動車利用削減ポテンシャルの算出を試みた。本研究の成果を以下のようにまとめる。

- ・確率的フロンティア分析モデルの推定結果より、メインドライバーの自動車利用状況をモデルに取り入れることにより、より環境負荷の小さいとされる自動車利用に変わったときに、実際にどの程度自動車利用ポテンシャルが削減されるかを定量的に示した。
- ・確率的フロンティア分析モデルを対象地方都市に適用した結果、世帯自動車利用の平均的な効率性が71%であることが明らかとなった。そして、世帯が効率的に自動車利用を行うことにより1世帯あたり1日で0.52MJ/kmの消費エネルギーの削減が可能であり、対象調査地域において日常の生活を営むため、最低でも1世帯あたり年間0.2MJ/km程度の自動車走行が必要であることを示した。また、効率性の平均値が低いほど、効率性の値にばらつきがみられ、個人間での効率性に変動があることを示した。
- ・重回帰分析による、線形対数モデル推定結果より、世帯人数に関しては世帯人数が少ないほど、自動車保有台数に関しては、保有台数が多いほど非効率になることが明らかになった。また、年齢に関しては、メインドライバーが50歳代のとき、運転が非効率になることが明らかとなった。

表-4 推定結果

説明変数	推定値	t 値
世帯人数	-0.229 **	-3.581
自動車保有台数	0.147 **	2.579
<年齢ダミー>		
30歳代以外=0, 30歳代=1	0.319 **	7.990
40歳代以外=0, 40歳代=1	0.298 **	5.882
50歳代以外=0, 50歳代=1	0.476 **	7.103
<居住地ダミー>		
広島市外=0, 市内=1	-0.013	-0.234
<定数項>		
定数項	-0.342 **	-4.745
自由度調整済み決定係数	0.999	
サンプル数	112	

\*\*): 1%有意

## 参考文献

- 1) Hensher, D.A. (1985), An Econometric Model of Vehicle Use in the Household Sector, Transportation Research Part B, Vol.19, No.4, pp.303-313.
- 2) Hensher, D.A., and Smith, N.C. (1990), Estimating Automobile Utilization with Panel Data: An Investigation of Alternative Assumptions for the Initial Conditions and Error Covariances, Transportation Research Part A, Vol.24, pp.417-426.
- 3) Farrell, M.J. (1957), The Measurement of Productive Efficiency, Journal of the Royal Statistical Society, Series A, General, Part 3, pp.253-281.
- 4) Kumbhakar, S.C., and Lovell, C.A. (2003), Stochastic Frontier Analysis, Cambridge University Press.
- 5) Senbil, M., Zhang, J., and Fujiwara, A. (2005), Causes of Energy Efficiency in Urban Transport Sector, Proceedings of International Conference on Civil and Engineering, pp.249-258.
- 6) Senbil, M., Zhang, J., and Fujiwara, A. (2005), Evaluating Energy Efficiency of Urban Transportation Systems in Developing Cities Using a Four-Wave Panel Data, Proceedings of the 31<sup>st</sup> Conference of Infrastructure Planning, CD-ROM.
- 7) 野崎博路：基礎自動車工学，東京電機大学出版局，2008。