

道路継断勾配を考慮した自動車燃料の削減に関する研究

李 勇鶴・佐藤 俊明（株式会社パスコ 研究開発センター）
岡部 篤行（青山学院大学 総合文化政策学部）

1. はじめに

地球温暖化問題が深刻になっている現在、世界的に二酸化炭素排出量の削減が大きな課題になっている。日本の場合、環境省の統計によると2010年度運輸部門の二酸化炭素排出量は2.32億トンで、総排出量の19.5%を占める¹⁾。従って、運輸部門、特に自動車の二酸化炭素排出量の削減は地球温暖化の防止に大きく貢献できると考えられる。また、自動車の二酸化炭素排出量はその燃料消費量と比例するため、二酸化炭素排出量の削減は燃料消費量の削減、ひいては省エネへの貢献にもつながる。

自動車燃料消費量の削減対策の一つとして、近年エコルートが推奨されている。エコルートとは出発地と目的地を結ぶ複数のルートの中で燃料消費量の最も少ないルートのことである。従って、走行ルートを選択において、普段の最短ルートの代わりに、エコルートを選択することにより、燃料消費量を削減することができる。

エコルート走行による燃料消費量の削減効果を定量的に分析する手法としては、実車両走行による手法とシミュレーション解析による手法が考えられる。まず、前者の場合は燃料消費量を正確に取得できるメリットがあるものの、多大な時間、費用と労力が必要である上に、分析結果が走行実験当時の道路状況、気象状況などの影響を受けやすいというデメリットを抱える。一方、後者の場合は、様々な走行状況の設定、広範囲でのシミュレーション解析が簡単に実現できる。但し、シミュ

レーション解析の信頼性は、ベースとなる燃費推定モデルの精度に左右される。以上の分析を踏まえ、本研究では時間、費用および対象地域が広範囲である点などを考量し、シミュレーション解析による分析手法を選択する。

前述のとおり、シミュレーション解析を通してエコルート走行による燃料消費量の削減効果を定量的に分析するためには、まず燃費推定モデルを構築する必要がある。本論文での燃費推定モデルとは、自動車燃費に影響を与える要因である速度、加速度などから燃費を推定するモデルのことである。燃費推定モデルに関しては、すでに様々な研究が行われている^{2),3)}。しかし、その多くは車両の速度、加速度、道路状況などに着目しており、重要な要因の一つである道路縦断勾配（以下、道路勾配）の影響を定量的に分析した研究は数少ない。その中で、Tavares *et al.* (2009) は重量車であるゴミ収集車を対象に、道路勾配を考慮した燃費推定モデルを構築し、構築されたモデルをもとに燃料消費量が最も少なくなるゴミ収集ルートを探している⁴⁾。一方、Frey *et al.* (2008) は軽量自動車 (light duty vehicle) を研究の対象とし、速度、加速度と道路勾配などから計算するVSP (Vehicle Specific Power) 指標と燃費の対応関係を表で作成している⁵⁾。また、ヨーロッパのMEETプロジェクトでは当時の多くの自動車を研究対象に、燃費に対する道路勾配の影響係数(道路勾配は6%まで考量)を算出している⁶⁾。ただし、既存のモデルを利用する場合は、車種、

速度・加速度・道路勾配などの説明変数の適用範囲および説明変数の非連続性(例えば、道路勾配は2%、4%、6%のみを考慮)などの制限を受けるため、本研究ではシミュレーションの信頼性を考量した上、既存研究の成果を参考に、独自の燃費推定モデルを構築することとした。

また、燃料消費量削減のシミュレーション解析において、広範囲の3次元道路ネットワークデータを用い、道路勾配を考慮したエコルートへの誘導による燃料消費量の削減効果を定量的に分析した研究は今まで見られない。

そこで、本研究では道路勾配を考慮したエコルート走行による燃料消費量の削減効果を定量的に分析することを目的とする。具体的には、まず、自動車の燃料消費量に与える道路勾配の影響を実車両走行実験により定量的に分析し、道路勾配をパラメータとする燃費推定モデルを作成する。次に、作成した燃費推定モデルを用いて、最短ルートとエコルートでの走行を想定したシミュレーション解析を行い、最短ルートに対するエコルート選択による燃料消費量の削減効果を定量的に分析する。

以下、2章では燃費推定モデルの構築、3章では最短ルートに対するエコルート走行による燃料消費量の削減効果を分析するためのシミュレーション解析、4章では本研究の成果と今後の課題について述べる。

2. 道路勾配を考慮した燃費推定モデルの構築

本章では、実車両走行によりデータ収集を行い、そのデータに基づいて燃費推定モデルを構築する。なお、本論文では燃費の単位としてcc/kmを採用する。

2.1 実車両走行によるデータ収集

自動車の燃費に影響を及ぼす要因として、



図1 実車両走行の実験ルート

表1 使用データとその取得・計算方法

データ	取得・計算方法
燃費 (cc/km)	燃費計で計測
速度 (km/h)	燃費計で計測
経度, 緯度 (度)	燃費計の付属 GPS で計測
加速度 (km/h/s)	前後4点の速度より計算
道路勾配 (%)	IMU (慣性計測装置) で計測

本研究では速度、加速度と道路勾配を考慮する。燃費推定モデルの構築に必要なデータは、自動車に燃費計を設置し、実際に道路を走行することにより取得する。走行実験車両はトヨタ社のカローラ(1.5L)を採用しており、走行ルートは道路勾配の変化が多い埼玉県の入間市川原町から飯能市原市場までの道路区間(約14km)を選定し、3回往復した(図1)。

燃費推定モデルの構築に使用するデータおよびその取得・計算方法を表1にまとめる。その中で、燃費、速度と計測位置(経度・緯度)は、燃費計より1秒間隔で取得される。加速度は燃費計で直接計測できなかったため、数値微分の5点近似公式(式(1))を用いて、前後それぞれ2秒の速度値を用いて計算する。

$$A(t)=[V(t-2)-8V(t-1)+8V(t+1)-V(t+2)]/12 \dots\dots\dots \text{式(1)}$$
 ただし、 $A(t)$ は t 時点の加速度(km/h/s)、 $V(t)$ は t 時点の速度(km/h)である。

また、実験ルートの道路勾配は、本実験とは別途に車載IMU(慣性計測装置)より事前に計測されたデータを使用する。なお、燃費計測地点とIMUによる道路勾配の計測地点は一致しないため、燃費計測地点の道路勾配

はその地点から最寄りの道路勾配の計測値を採用する。

2.2 燃費推定モデルの構築

前述のとおり、燃費に影響を与える主な要因としては、速度、加速度と道路勾配がある。また、燃費に対する道路勾配の影響は、普段平坦地に対する坂道走行による燃費の変化率を用いて評価することが多い。しかし、燃費に対する道路勾配の影響（燃費変化率）は独立なものではなく、その時点の速度、加速度などにより変化する^{4) 5)}。例えば、平坦地に対する坂道での燃費変化率は、速度が10km/hの場合と60km/hの場合で異なる。したがって、道路勾配による燃費の変化率をモデル化する場合には、速度、加速度の影響も総合的に考慮する必要がある。

本研究では燃費の影響要因の中でも主に道路勾配の影響に着目しており、且つモデル構築の簡易性とモデルの信頼性を考慮し、モデルの構築において速度と加速度の影響を除去することにする。すなわち、一定の速度で走行する場合を想定した上、道路勾配のみをパラメータとする燃費推定モデルを構築する。具体的には、速度と加速度の影響を除去するために、燃費に対する影響の変化が少なく且つ実験データの数も多い35km/h～42km/hの速度区間（図2の緑色点線区間）と、燃費に対

する影響が無視できると考えられる-0.1km/h/s～0.1km/h/sの加速度区間の実験データ968点を抽出してモデル構築に使用する。

前述のとおり、燃費に対する道路勾配の影響は平坦地に対する坂道での燃費変化率を用いて評価する。従って、道路勾配による燃費変化率を求めるためには、平坦地と坂道での燃費をそれぞれ求める必要がある。まず、平坦地に関しては、道路勾配が0.25%より小さい計測地点を平坦地と見なし、それらの計測地点における燃費の平均値を求め、平坦地での燃費とする。計算結果、平坦地での平均燃費は40.9cc/kmで、標準偏差は32.1cc/kmであった。次に、道路勾配が0.25%より大きい計測地点は坂道とみなし、道路勾配を0.5%間隔に細かく分割し、それぞれの勾配区間における燃費の平均値を求める。最後に、それぞれの勾配区間における燃費変化率を式(2)で計算する。

(道路勾配による)燃費変化率(%) = 坂道の平均燃費(cc/km) / 平坦地の平均燃費(cc/km) - 1 …式(2)

算出された平坦地に対する各勾配区間における燃費変化率を図3に示す。図3より、上り坂と下り坂で、道路勾配の変化にともなう燃費変化率の変化特性は大きく異なることが分かる。まず上り坂で、燃費変化率は道路勾配が1%未満の場合はほぼゼロに近く、それ以降は徐々に大きくなり、道路勾配3%では変化率が100%、道路勾配5%では変化率が200%程度まで増加している。特に、道路勾配が2%以上になると燃費変化率が急激に増加することが分かる。一方、下り坂では燃費変化率が道路勾配の増加に伴い線形的に減少し、道路勾配が3%の際には燃費変化率が-45%程度まで減少し、その以降は一定の変化率を維持している。

以上の分析結果を基に、道路勾配による燃費変化率を上り坂と下り坂でそれぞれ独立に

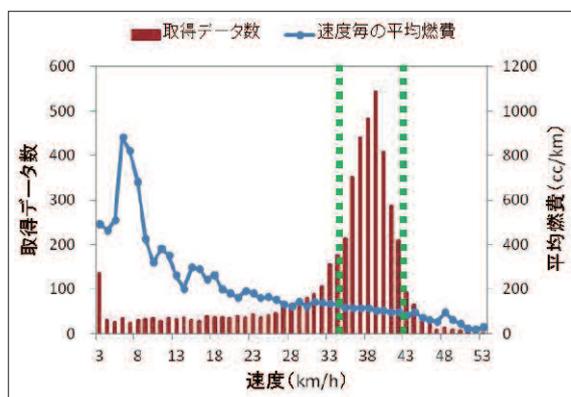


図2 各速度区間における平均燃費と取得データ数

モデル化する。燃費変化率モデルは、サンプル点の変化特徴より、上り坂と下り坂でそれぞれ三次関数と一次関数を採用し、条件付最小二乗法でモデルの推定を行う。推定されたモデルは表2に示しており、それぞれの決定

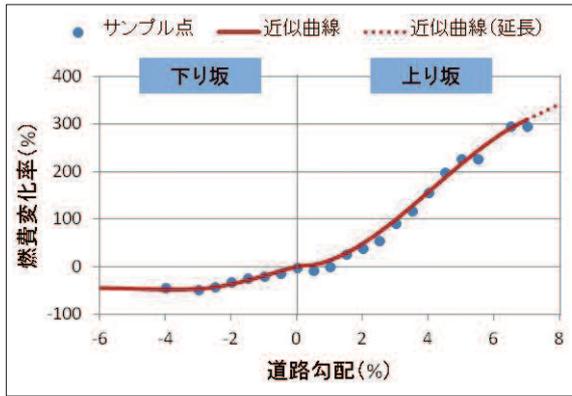


図3 道路勾配による燃費変化率

表2 道路勾配による燃費変化率モデル

分類	道路勾配区間	燃費変化率モデル
上り坂	$0\% < G < 7\%$	$Y = -1.16 \times G^3 + 14.42 \times G^2$
	$7\% \leq G$	$Y = 33.6 \times G + 72.0$
下り坂	$0\% < G < 2.7\%$	$Y = -16.5 \times G$
	$2.7\% \leq G$	$Y = -45.0$

(但し、Y：燃費変化率(%)、G：道路勾配(%))

係数は0.99と0.94であった。なお、上り坂では道路勾配が7%以上の実験データが無かったため、それ以上の道路勾配においては、道路勾配7%での燃費変化率の変化傾向(一次微分値)を利用して線形モデルを求める。これにより、燃費は燃費変化率モデルと平坦地の燃費を用いて式(3)で計算することができる。

燃費(cc/km) = 平坦地の燃費(cc/km) × (道路勾配による燃費変化率(%) + 1) ……式(3)
但し、式(3)における燃費変化率は式(2)より計算する。

本論文で構築される燃費推定モデル(式(3))は速度が35km/h~42km/h、加速度がゼロの場合に限られて適用可能であることを記しておく。

3. エコルート走行による燃料節約率のシミュレーション解析

構築された燃費推定モデルを用いて、最短ルートとエコルートでの走行をシミュレーション解析し、その結果を用いて最短ルート走



図4 エコルート走行による燃料節約に関するシミュレーション解析の概要

行に対するエコルート走行の平均燃料節約率を以下のとおり求める。

3.1 シミュレーションの概要と使用データ

図4に示すように、シミュレーションではまず対象範囲となる東京都渋谷区において、任意に出発地と目的地を選定する。次に、選定された出発地と目的地を結ぶ最短ルートとエコルートを検索し、それぞれのルートにおける燃料消費量を式(4)で計算する。最後に、エコルート選択による燃料節約率を式(5)で算出する。

燃料消費量(cc) = Σ (燃費(cc/km) × 道路セグメント距離(km)) …………… 式(4)

燃料節約率(%) = $1 - \frac{\text{エコルートの燃料消費量(cc)}}{\text{最短ルートの燃料消費量(cc)}}$ …… 式(5)

式(4)に示す燃料消費量の計算方法を具体的に説明すると、まずルートを道路勾配の等しいセグメントに分割し、次に各道路セグメントにおける燃料消費量を勾配に対応する燃費(式(3))とセグメントの距離で計算し、最後に燃料消費量の総和を求めて、そのルートを走行する場合の燃料消費量とする。

シミュレーションはArcGISのVBAにより行う。なお、シミュレーションで使用する3次元道路ネットワークデータは航空ステレオ写真を用いて道路中心線の標高を計測して作成したものである。

3.2 シミュレーション結果と分析

上節で説明したシミュレーションを1000回繰り返し、その結果を分析する。1000回のシミュレーションの結果、平均燃料節約率は5.0%で、一定の削減効果が確認された。燃料節約率の統計分布を図5に示し、その詳細を分析する。図5の燃料節約率の確率分布(1%刻み)をみると、全体的に低節約率の割合が多く、高節約率になるほどその割合は徐々に

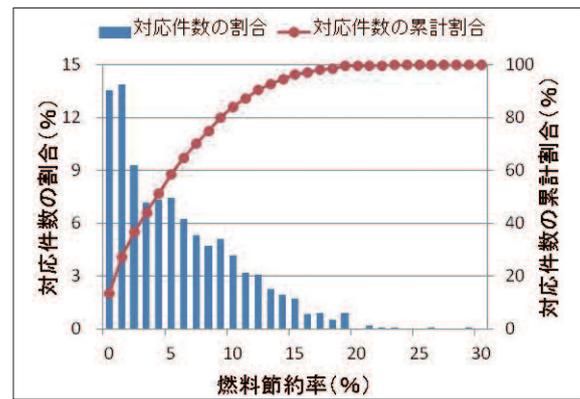


図5 エコルート走行による燃料節約率の分布

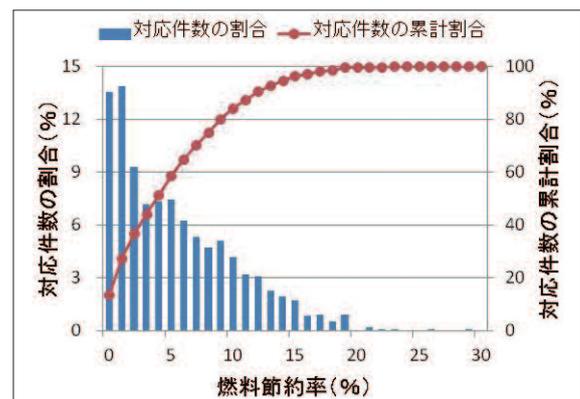


図6 走行距離増加率の確率分布および走行距離増加率と燃料節約率の関係

減少する傾向がみられる。また、節約率10%未満が全体の80%以上を占め、20%以上の節約率を持つケースはほとんど存在しない。なお、節約率がゼロ、すなわち最短ルートとエコルートが同一ルートであり割合は13.3%である。

最短ルートと比べて、エコルートは燃料消費量が節約できる代わりに、走行距離は長くなる。そこで、最短ルートに対するエコルート走行による走行距離増加率を式(6)で計算する。

走行距離増加率(%) = $\frac{\text{エコルートの走行距離(km)}}{\text{最短ルートの走行距離(km)}} - 1$ … 式(6)

また、走行距離増加率と燃料節約率との関係を分析するため、走行距離増加率を1%間隔で分割し、各区間における燃料節約率の平均値を求める。なお、平均燃料節約率の信頼

性を考慮し、サンプル数が10点以上のもののみを分析対象とする。図6に、走行距離増加率の確率分布および走行距離増加率と平均燃料節約率の関係を示す。

図6より、走行距離増加率の確率分布は低増加率の割合が多く、高増加率になるにつれて急激に減少する。すなわち、多くのエコルートは走行距離増加率の小さい領域に集中している。なお、走行距離増加率が10%未満のエコルートは全体の90%を占め、30%を超えるエコルートは存在しなかった。また、走行距離増加率に対応する平均燃料節約率をみると、走行距離増加率の1%~3%の区間では走行距離増加率の上昇に伴い平均燃料節約率も急激に上昇し、その以降の区間ではほぼ横ばいする傾向がみられる。

3.3 まとめ

以上のシミュレーション結果より以下の結論が得られる。

燃費変化率モデル(図3、表2)をみると、上り坂では道路勾配の僅かな変化により燃費は大きく変化する。例えば、平坦地と比べて道路勾配が3%の上り坂では燃費が100%も上昇する。しかし、現実の道路ネットワークを用いたシミュレーション解析結果では、最短ルートに対するエコルート走行による平均燃料節約率は5%にとどまる。その原因は、東京の市街地は平坦な道路が多く、勾配の大きい道路は比較的少ないためだと考えられる。但し、自動車による燃料消費量(または二酸化炭素の排出量)はその基数が大きいため、5%の削減でもその絶対量は決して無視できないと考えられ、道路勾配を考慮したエコルート走行による燃料節約(または二酸化炭素排出量の削減)は一定の効果があるとみられる。

また、多くのエコルートの走行距離が最短

ルートと比べて大きく変わらないことから(図6)、市街地でのエコルートは実際最短ルートから大きく変わるのではなく、最短ルートにおいて一部勾配変化の激しい道路区間を他の平坦な道路区間で入れ替えることによるものと想定される。また、エコルートの走行距離が最短ルートと比べて大きく増加しないことから、エコルートを選択する際、時間に対する考量も少ないと考えられる。

4. おわりに

本研究では、実車両走行実験により取得したデータを利用して道路勾配をパラメータとする燃費推定モデルを構築し、道路勾配が燃費に大きく影響することを明らかにした。

さらに、構築された燃費推定モデルと渋谷区の3次元道路ネットワークデータを用いて、最短ルートとエコルートでの走行を想定したシミュレーション解析を行った。その結果、最短ルートに対してエコルート走行により平均5%の燃料が節約できることが明らかになった。その他、90%以上のエコルートで、最短ルートに対する走行距離増加率が10%未満であることもわかった。

ただし、燃費推定モデルに関して、本研究ではカロラによる一回のみの走行実験から取得したデータを基にモデルを構築しているため、そのモデルの信頼性は検討の余地があると考えられる。今後、実験回数、対象車両を増やしてデータ収集および燃費推定モデルの再構築を行う必要がある。

また、シミュレーション解析の対象地域である渋谷区は他の地区と比べて坂道が多いため、道路勾配の影響も比較的大きい。従って、坂道の少ない東京の他の地区でシミュレーション解析を行う場合、エコルート走行による燃料節約率は今回の結果より小さい可能性がある。従って、今後より広い範囲でのシ

ミュレーション解析が必要と考えられる。

■謝辞

本研究では、株式会社パスコの岩崎秀司氏と前田諭氏に車両走行によるデータ取得のご協力をお願いした。ここに記して感謝の意を表す。

■参考文献

- 1) <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/index.html>
- 2) 大口敬、片倉正彦、谷口正明：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、土木学会論文集、Vol.695、pp.125-136、2002
- 3) 野田明、佐藤辰二、山本敏朗、塚本雄次郎：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、交通安全環境研究所報告、Vol.5、pp.9-23、2004
- 4) Tavares, G., Zsigraiova, Z., Semiao, V. and Carvalho, M.G.: Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS model-

ing, Waste Management, Vol.29, pp.1176-1185, 2009

- 5) Frey, H.C., Zhang, K. and Roupail, N.M.: Fuel use and emissions comparisons for alternative routes, time of day, road grade, and vehicles based on in-use measurements, Environmental Science & Technology, Vol.42, pp.2483-2489, 2008
- 6) Hickman, A.J.: Methodology for calculating transport emissions and energy consumption, Transport research laboratory, pp.1-381, 1999. (<http://www.inrets.fr/ur/lte/cost319/M22.pdf>)

■執筆者

李 勇鶴 (り よんぷい)

株式会社パスコ 研究開発センター

E-mail: yiorn_3951@pasco.co.jp

(共著者)

佐藤 俊明 (さとう としあき)

株式会社パスコ 研究開発センター

岡部 篤行 (おかべ あつゆき)

青山学院大学 総合文化政策学部

