

道路縦断勾配の影響を考慮したエコルートによる 自動車の燃料消費量削減に関する研究

李 勇鶴・佐藤俊明・岡部篤行

Reduction in fuel consumption of vehicles by using the Eco-Route considering the road gradient

Yonghe LI, Toshiaki SATOU and Atsuyuki OKABE

Abstract: In this paper, a fuel consumption model which takes an account of the road gradient is proposed. With this model, fuel consumption at any moment can be estimated by providing the information of the road gradient. The model is employed to determine the variation in fuel consumption between the Eco-route, which is optimized for the minimum fuel consumption, and the shortest route, between the departure and the destination points. For this purpose, the 3D road network data of Shibuya district is used. The simulation results show that the fuel consumption along the Eco-route is reduced by 5% compared to the shortest route.

Keywords: エコルート (Eco-route), 燃費モデル (fuel consumption model), 三次元道路ネットワーク (3D road network), 道路縦断勾配 (road gradient), シミュレーション解析 (simulation analysis)

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 2007 年度の運輸部門の二酸化炭素排出量は総排出量の 18.6%を占め、2.49 億トンにもなっている¹⁾。そこで、運輸部門、特に自動車の二酸化炭素排出量を削減することは地球温暖化問題の解決に大きく貢献できると考えられる。

李 勇鶴 〒153-0043 東京都目黒区東山 2-8-11
目黒ビル新別館 株式会社パスコ
Phone: 03-3715-4011
E-mail: yiorn_3951@pasco.co.jp

自動車の二酸化炭素排出量または燃料消費量（二酸化炭素排出量は燃料消費量にほぼ比例するため、以下は燃料消費量にする）の予測に関しては、様々な研究が行われているが、その多くは車両の速度、加速度と周辺環境などに着目（野田ほか, 2004 ; 大口ほか, 2002）しており、道路縦断勾配（以下、道路勾配）が自動車の燃料消費量に与える影響を定量的に分析した研究は数少ない。

道路勾配が燃料消費量に与える影響を定量的に分析・モデル化した研究としては、Tavares et al. (2009) による道路勾配を考慮したゴミ収集車の燃費モデルの提案と燃費モデルを用いた最適ゴミ収集ルートの選択、Frey et al. (2008) による VSP (Vehicle Specific Power) に基づく燃料消費

量・排出量の予測モデルの提案、MEET プロジェクト (Hickman, 1998) による排出量における道路勾配の重み分析などが挙げられる。しかし、既存の燃費モデルはそれぞれの対象車両が異なることもあります、一定の速度、加速度と道路勾配を与えた時、各モデルによる燃費の計算結果は大きく異なっています。従って、既存の燃費モデルを直接日本の大衆車両（トヨタのカローラなど）の燃費モデルとして使用することは不適切だと判断される。

また、広範囲の3次元道路ネットワークデータを用いて、道路勾配を考慮したエコルート（燃料消費量最小ルート）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の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モデルを作成する。次に、作成された燃費モデルを用いて、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、最短ルート選択に対するエコルート選択による燃料消費量の平均節約率を求める。

以下、2章では燃費モデルの構築、3章では最短ルートに対するエコルートの燃料節約率を求め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瞬間燃費モデルの構築

燃費モデルは、ある道路区間における平均的な燃費を予測する平均燃費モデルと、ある瞬間の燃費を予測する瞬間燃費モデルに大別される。本研究では同一の出発地と目的地に対して、最短ルートとエコルートでの燃料消費量をそれぞれ求め、比較する必要がある。しかし、平均燃費モデルではルートの平

均道路勾配を用いて燃費を計算するため、出発地と目的地が一緒であれば平均道路勾配も同じくなり、従って平均燃費モデルによる平均燃費値も同じくなってしまう。そのため、本研究ではある瞬間の道路勾配などの情報を用いてその瞬間の燃費を求める瞬間燃費モデルを構築する必要がある。また、本論文では燃費単位として一般的に使用される km/Lではなく、cc/km を採用する。

2.1 実車両走行によるデータ収集

瞬間燃費モデルの構築に必要となるデータは、実車両に燃費計を設置し、実際に走行させることにより取得した。走行実験ではトヨタのカローラ（1.5L）を道路勾配の変化の多い埼玉県の入間市川原町から飯能市原市場までの間の約 14km の道路を3回往復させた（図-1）。



図-1 実車両走行実験ルート

表-1 使用データと取得方法

データ	取得方法
瞬間燃費 (cc/km)	燃費計により計測
瞬間速度 (km/h)	燃費計により計測
経度、緯度 (度)	燃費計の付属 GPS により計測
瞬間加速度 (km/h/s)	前後 4 点の瞬間速度により計算
道路勾配 (%)	レーザー計測

表-1 に示すように、実験では燃費計を使用して 1 秒間隔の瞬間燃費、瞬間速度と計測時点の位置座標

(経度・緯度) を取得した。瞬間加速度は数値微分の 5 点近似公式(式-1)を用いて、前後それぞれ 2 秒の瞬間速度より計算した。

$$A(t) = [V(t-2) - 8V(t-1) + 8V(t+1) - V(t+2)]/12 \quad (1)$$

(但し、 $A(t)$: t 時点の瞬間加速度 (km/h/s), $V(t)$: t 時点の瞬間速度 (km/h))

また、実験ルートの道路勾配情報は車載レーザー計測により取得した。レーザー計測は燃費計と同じく 1 秒間隔で行っているが、燃費計測と独立して行われたため、燃費計測点とレーザー計測点の間には一定のずれが存在する。そこで本研究では燃費計測点から最寄りのレーザー計測点の道路勾配をその燃費計測点の道路勾配として使用した。

2.2 瞬間燃費モデルの構築

瞬間燃費モデルに関する既存研究によると、瞬間燃費に影響を与える要因としては、その時点の瞬間速度、瞬間加速度と道路勾配など様々な要因がある(Hickman, 1998)。また、瞬間燃費に対する道路勾配の影響は、一般的に平坦地での瞬間燃費に対する坂道での瞬間燃費の変化率を用いて評価することが多い(Tavares et al., 2009; Hickman, 1998)。

瞬間燃費に対する道路勾配の影響は独立なものではなく、その時点の瞬間速度などにより変化する(Tavares et al., 2009)。例えば、平坦地に対する坂道での燃費変化率はその時点の瞬間速度が 10km/h の場合と 60km/h の場合で異なる。したがって、瞬間燃費モデルを構築する際には、瞬間速度、瞬間加速度と道路勾配の影響を総合的に考慮する必要がある。しかし、その総合的な影響のモデル化は明確になっておらず、様々な研究により異なる瞬間燃費モデルが提案されており、しかもこれらのモデルによる瞬間燃費の計算値は大きく異なる場合がある。

本研究では主に瞬間燃費に対する道路勾配の影

響のみに注目しており、且つモデル構築の簡易性とモデルの信頼性を考慮して、実際のモデル構築では速度と加速度の影響は除去して、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瞬間燃費モデルを構築する。また、速度と加速度の影響を除去するために、瞬間燃費に対する影響の変化が少なく(図-2 で平均瞬間燃費の変化の少ない速度区間)且つ実験データの数も多い 35km/h ~42km/h の速度区間(図-2 の両点線間)と、瞬間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(958 点)を抽出してモデル構築に使用した。

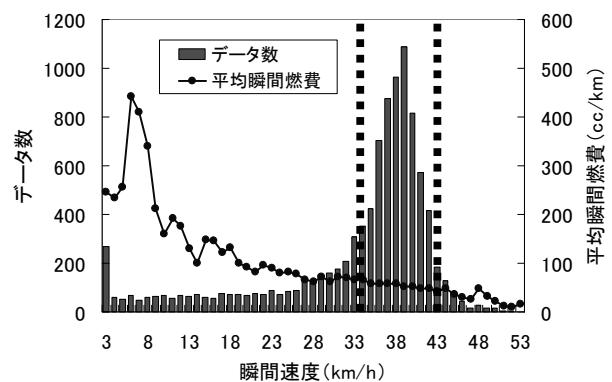


図-2 各速度区間の平均瞬間燃費とデータ数

前述のとおり瞬間燃費に対する道路勾配の影響は平坦地に対する坂道の瞬間燃費の変化率を用いて評価する。従って、道路勾配による瞬間燃費の変化率を求めるためには、平坦地と坂道の瞬間燃費をそれぞれ求める必要がある。本研究では、道路勾配が 0.25%より小さい計測地点を平坦地と見なして平坦地での平均瞬間燃費を求めた。一方、道路勾配が 0.25%より大きい坂道の道路勾配は 0.5%間隔で分割し、それぞれの勾配区間の瞬間燃費平均値を求めた。計算結果、平坦地の平均瞬間燃費は 40.9cc/km(標準偏差=32.1)であり、これに対する各勾配区間の

瞬間燃費変化率(式-2)は図-3の点のようである。

(道路勾配による) 瞬間燃費変化率=坂道の平均瞬間燃費 / 平坦地の平均瞬間燃費 - 100% (2)

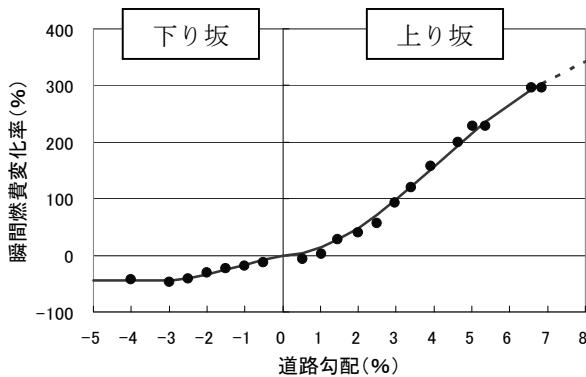


図-3 道路勾配による瞬間燃費の変化率

図-3より、上り坂と下り坂で、道路勾配の変化にともなう瞬間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、瞬間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%以上になると瞬間燃費変化率が急激に増加することが分かる。これに対して下り坂では、瞬間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%の際には瞬間燃費変化率が-45%程度まで減少し、その後は一定の変化率を維持している。

表-2 道路勾配による瞬間燃費変化率モデル

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

(但し、Y: 瞬間燃費変化率 (%), G: 道路勾配 (%))

以上の分析結果を基に、道路勾配による瞬間燃費変化率を上り坂と下り坂でそれぞれ独立にモデル化した。瞬間燃費変化率モデルは、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った。推定されたモデルは表-2に示しており、それぞれの決定係数は0.99と0.94である。その中で、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%での瞬間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た(表-2の $7\% \leq G$ に対応するモデル部分と図-3の点線部分)。これにより、瞬間燃費は瞬間燃費変化率モデルと平坦地の瞬間燃費を用いて式-3で計算することができる。

瞬間燃費 = 平坦地の瞬間燃費 × (道路勾配による瞬間燃費変化率(表-2) + 100%) (3)

但し、本論文で推定された瞬間燃費モデル(式-3)は瞬間速度が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

構築された瞬間燃費モデルを用いて、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

シミュレーションでは、対象範囲となる東京都渋谷区で任意に選択された出発地と目的地に対して、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(式-4)を求め、さらにエコルート選択による燃料節約率(式-5)を計算した。その中で燃料消費量は、ルートを道路勾配の等しいセグメントに分割し、各道路セグメントの燃料消費

量を瞬間燃費と道路セグメント距離で計算し、その総和を求めて計算した。シミュレーションはArcGISのVBAにより行った。

$$\text{燃料消費量} = \Sigma (\text{瞬間燃費 (式-3)} \times \text{道路セグメント距離}) \quad \dots \quad (4)$$

$$\text{燃料節約率} = 100\% - \frac{\text{エコルートの燃料消費量}}{\text{最短ルートの燃料消費量}} \quad \dots \quad (5)$$

また、シミュレーションで使用した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することにより作成した。

3.2 シミュレーション結果と分析

3.1 節のシミュレーションを1000回繰り返し、求めた燃料節約率の統計結果を図-4と図-5に示す。

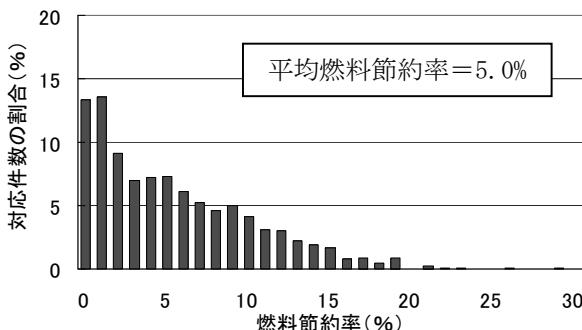


図-4 エコルート走行による燃料節約率の分布

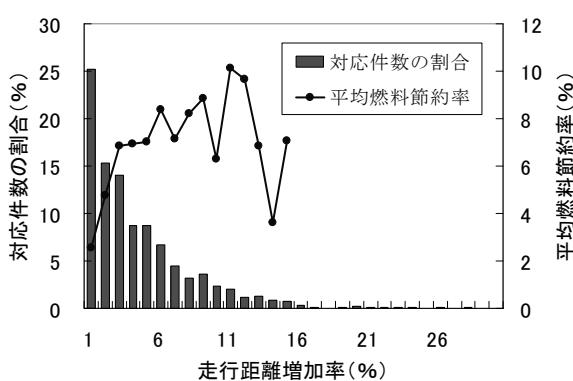


図-5 走行距離増加率と燃料節約率の関係

まず、図-4より分かるように、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%である。また、燃料節約率の分布をみると、5%未満の節約率の割合が大きく、20%以上の節約率を持つケースはほぼ存在しない。また、全シミュレーションの中で節約率がゼロ（最短ルートとエコルートが同一）の割合は13.3%である。

次に、図-5に示す最短ルートに対するエコルートの走行距離増加率（式-6）と対応するエコルートの件数をみると、エコルートの数は走行距離増加率が大きくなるにつれて少なくなる。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（走行距離増加率が10%未満のエコルートが全体の90%を占める）。また、今回のシミュレーションでは走行距離増加率が30%を超えるエコルートは存在しなかった。

最後に、走行距離増加率に対応する平均燃料節約率をみると、走行距離増加率が3%になるまでは平均燃料節約率も線形に上昇し、その後は横ばいする傾向がみられる。

$$\text{走行距離増加率} = \frac{\text{エコルートの走行距離}}{\text{最短ルートの走行距離}} - 100\% \quad \dots \quad (6)$$

以上のシミュレーション結果より下記の結論が得られる。

瞬間燃費変化率モデル（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瞬間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%の上り坂では瞬間燃費が100%も上昇する。しかし、実際の道路ネットワークを用いたシミュレーション結果では、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%で、それほど大きくない。その原因としては市街地の道路では勾配の大きい道路区間は少なく、一般的には平坦道路が多いためだと想定できる。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、多くのエコルートは走行距離が最短ルートと比べて大きく変わらなかったこと（図-5）から、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ことではなく、最短ルートにおいて一部の勾配変化の激しい道路区間を他の平坦な道路区間に入れ替えることにより得られたと想定される。その他、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、エコルート選択の際、時間に対する遠慮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瞬間燃費モデルを構築し、道路勾配が瞬間燃費に大きく影響することを明らかにした。

さらに、構築された瞬間燃費モデルと渋谷区の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、対応する最短ルートに対する走行距離増加率が10%未満であることが明らかになった。

今後の課題としては、（1）道路勾配に加えて速度、加速度なども考慮した瞬間燃費モデルの構築、（2）より広い範囲でのシミュレーション解析によるエコルート走行の燃料節約率の検証などが挙げられる。

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。

注

1)<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/index.html>

参考文献

- 大口敬・片倉正彦・谷口正明（2002）：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, 695, 125-136.
- 野田明・佐藤辰二・山本敏朗・塙本雄次郎（2004）：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, 5, 9-23.
- Hickman, A. J., 1998. Methodology for calculating transport emissions and energy consumption. Transport research laboratory, 75-82.
- Rakha, H., Ahn, K. and train, A., 2004. Development of VT-Micro model for estimating hot stabilized light duty vehicle and truck emissions. *Transportation Research Part D*, 9, 49-74.
- Tavares, G., Zsigraiava, Z., Semiao, V. and Carvalho, M.G., 2009. Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modeling. *Contents lists available at ScienceDirect*, 29, 1176-1185.