

車両構成比に基づく Chandler モデルを用いた最適速度とエネルギー削減

M2012MM018 松原宗太

指導教員：河野浩之

1 はじめに

近代は自動車が一般大衆に広く普及し、電車、バス等が通っていない所に行くには必要不可欠となっている。2013年3月時点での国内四輪車保有台数は7607万4948台となっており、全ての自動車における燃料代金は莫大な費用がかかっている [1]。

そこで本研究では、2011年の車両販売台数を基に算出した車両構成比に基づき、Chandler モデルを用いて最適速度を求め、竹内秀樹の行ったプロブカーデータを用いた最適速度 (OV) モデルに基づく最適速度とエネルギー削減を基に東名高速道路を走行した場合と Chandler モデルを用いた最適速度を基に走行した場合における燃費比較を行う [3]。燃費の算出には燃費法を用いて計算し、コスト面でどの程度消費エネルギーを削減できるか検討を行う。

本研究の流れとしては、第2章で先行研究として竹内秀樹の行ったエネルギー削減に関する研究、追従モデルに関する研究を紹介し、第3章で車両最適速度手法の提案として追従モデルの詳細、燃費を求めるための燃費法、エネルギー消費量の求め方について加減速による消費、空気抵抗による消費、転がり抵抗による消費について述べる。第4章ではシミュレーションに使用する各種車両データ、燃料コスト計算式について述べる [2][5]。第5章では最適速度を用いてどの程度消費エネルギーを削減できるかを計算する。最後に第6章で本研究に対するまとめを述べる。

2 1台参照線形追従モデルに関する研究

本節では、1台参照線形追従モデルの比較検討について紹介する。杉本祐介らは数多く提案されている車両追従モデルのうち、Chandler モデル、線形 Newell モデル、Bierley モデル、Rockwell モデルについて安定性の解析と、交通流シミュレーションを行った [2]。その結果、それぞれのモデルについて安定領域の有無、先頭車両の速度変化が及ぼす後方車両への影響、後方車両へ及ぼした速度変化の収束時間をまとめた特徴を表1に示す。

表1 それぞれの追従モデルの特徴

モデル	安定領域	後方への影響	収束時間
Chandler	有	中	遅い
線形 Newell	有	大	遅い
Bierley	無	中	中
Rockwell	有	小	速い

なお、ここでいう安定領域とは、図中で矢印は車の方向を示し、先頭車両から昇順で番号付けされており、最後尾車両が n である図1のように、複数の車両が連なって走

行している場合において、この車列の先頭車両でブレーキなどによる急激な速度変化が生じた場合、先頭車両の直後車両が最も影響が大きく、そこから離れるに従って小さくなると予想される。

このように先頭車両の影響が後方に行くにつれて小さくなる状態を安定領域と呼ぶ。

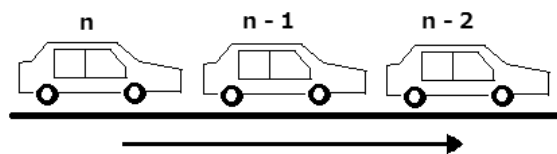


図1 追従状態

この研究によれば、Rockwell モデルがこれらのモデルの中で安定領域を保持し、後方への影響も少なく、速度変化の収束時間も短いので有効と思われる。しかしながら、前方車両から速度と加速度の2つの情報を入手する必要があることから、実際に運用することが困難になることが考えられると杉本祐介らは述べている。よって、本研究におけるシミュレーションでは Rockwell モデルの次に適していると思われる Chandler モデルを採用する。

2.1 OV モデルに基づく最適速度に関する研究

竹内秀樹は、まず予備実験として GPS ロガーを使用し実際に運転し、常滑市から南山大学瀬戸キャンパス、中部国際空港から名古屋駅のルートを走行したプロブカーデータを取得した [3]。取得した約1ヶ月間の記録データを用いて最適速度モデルとして OV モデルを使用し、最適速度を参考に走行することによって加減速の少ない運転を行うことが可能となり、燃費の消費を抑えると予測した。

その後本実験として阪神高速道路で収集されたプロブカーデータから最適速度モデルを用いて最適速度を算出し、燃費法を用いて年間での燃料コスト削減量を調べた。実験の結果、阪神高速道路3号神戸線での燃料コスト削減量を明らかにし、車車間通信や自動運転自動車等の開発によって最適速度を用いた走行が可能となった場合に大きな燃料コスト削減が可能ということを示した。

3 車両最適速度の提案

本章では、車両最適速度の提案とシミュレーションに使用するモデルなどについて述べる。3.1節では実験の流れ、3.2節では追従モデルについて、3.3節では燃費法について述べる。

3.1 実験の流れ

本研究における実験の流れを図2を用いて説明する。

1. シミュレーションに使用するモデルの選定
2. 車両構成比を用いて各道路毎に車種の比率を決定する [7]
3. Chandler モデルを用いて走行した場合の燃費を燃費法を用いて算出する
4. 消費エネルギーを比較し, どの程度燃料コストを削減できるか算出する

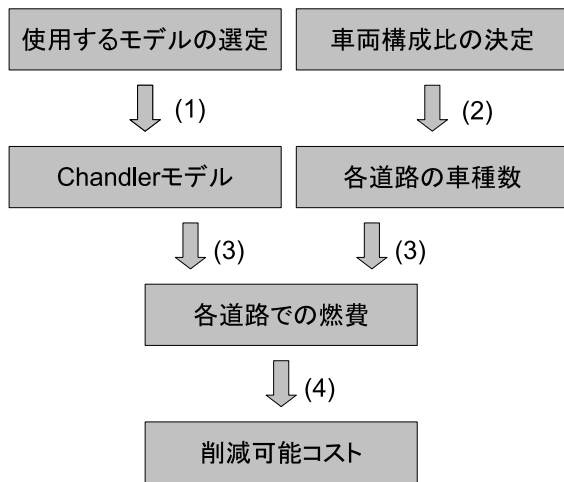


図2 実験の流れ

3.2 追従モデル

シミュレーションは, 追従モデルのうち, Chandler モデルを用いて行う。まず, 図1のように複数の車両が重なって走行している状態を考える。ここで, 先頭から n 番目の車両の運動は式1で与えられる。

$${}_n(t + t) = \{V_{n-1}(t) - V_n(t)\} \quad (1)$$

ここで, V_n は n 番目の車両の速度, V_{n-1} は前方車両の速度, ${}_n$ は n 番目の車両の加速度, t は前方車両に対する感度係数, t は遅れ時間である。よって, 右辺の括弧内は前方車両と自車両の速度差ということになる。

よって, このモデルは前方車両との速度差によって加速度を変更するモデルである。

本研究では, $t = 2$, ${}_n = 0.25$ としてシミュレーションを行う。

3.3 燃費法

本研究において燃費の算出には燃費法を用いる [4]。燃費法はエネルギー消費量 E (MJ), 燃料使用量 V (L), 単位発熱量 Q (MJ/L) の関係を表すもので,

$$E = VQ \quad (2)$$

として表すことができる。また, 距離 d (km), 燃費 F (km/L), 総合エネルギー効率 S から燃料使用量 V (L) は

$$V = \frac{Sd}{F} \quad (3)$$

で求められる。よって, 燃費 F (km/L) は式4と表すことができる。

$$F = \frac{QSd}{E} \quad (4)$$

単位発熱量 Q (MJ/L) はガソリンを燃料として使用する場合は 34.6MJ/L, 軽油を燃料として使用する場合は 38.2MJ/L を用い, 総合エネルギー効率 S はガソリンを燃料として使用する場合は 0.15, 軽油を燃料として使用する場合は 0.18, ハイブリッド車の場合は 0.25 を用いる。

3.4 エネルギー消費量

本研究においてエネルギー消費量は加減速による消費エネルギー, 空気抵抗による消費エネルギー, 転がり抵抗による消費エネルギーを用いて算出する [5]。エネルギー消費量を E (J), 加減速による消費エネルギーを E_A , 空気抵抗による消費エネルギーを E_B , 転がり抵抗による消費エネルギーを E_C とすると,

$$E = E_A + E_B + E_C \quad (5)$$

と表すことができる。

3.4.1 加減速によるエネルギー消費量

加減速によるエネルギー消費量 E_A (J) は加速度 (m/s^2), 自動車の質量 w (kg), 走行距離 d (m) を用いて

$$E_A = wd \quad (6)$$

を用いて求める。

3.4.2 空気抵抗によるエネルギー消費量

空気抵抗によるエネルギー消費量 E_B (J) は空気抵抗係数 C_D 値 C (0.26), 空気密度 ($1.29(kg/m^3)$), 前面投影面積 A (m^2), 走行距離 d (m), 速度 V (m/s) を用いて

$$E_B = \frac{1}{2}C AdV^2 \quad (7)$$

を用いて求める。

3.4.3 転がり抵抗によるエネルギー消費量

転がり抵抗によるエネルギー消費量 E_C (J) は転がり抵抗係数 R (0.0.15), 自動車の質量 w (kg), 走行距離 d (m) を用いて

$$E_C = 9.8Rwd \quad (8)$$

を用いて求める。

4 車両に関するデータ

ここでは, シミュレーションに用いる各種データを紹介する。

表 2 2011 年の車両販売台数と割合

車種	販売台数 (台)	割合 (%)
軽自動車	1138734	34.2
小型自動車	1246126	31.3
普通自動車	823610	22.6
大型自動車	117941	3.2
HV 車	316300	8.7
合計	3642711	100

4.1 車両販売台数

2011 年の車両販売台数を表 2 に記載する [7].

次に, 燃料代を算出するために必要なデータを道路運送車両法第三条を基に, トヨタ自動車株式会社が販売している車種のデータを用いて決定し, 車両重量 $w(\text{kg})$, 車幅 $b(\text{m})$, 車高 $h(\text{m})$, 総合エネルギー効率 $S(\%)$ を各種車両毎 (軽自動車 l , 小型自動車 s , 普通自動車 u , 大型自動車 b , ハイブリッド自動車 h) に決定し表 3 に示す [6].

4.2 車両データ

表 3 車両データ

車種	(kg)	$b(\text{m})$	$h(\text{m})$	$S(\%)$
軽自動車	730	1.475	1.49	15
小型自動車	1000	1.695	1.5	15
普通自動車	1560	1.815	1.69	15
大型自動車	8890	2.49	3.06	18
HV 車	1470	1.775	1.575	25

5 省エネ運転評価

東名高速道路を Chandler モデルを用いた最適速度を用いて走行した場合における燃費の比較を行い, コスト面でどれだけ改善されるかの検証を行う.

5.1 シミュレーションにおける各種設定

Chandler モデルは時間が経てば経つほど速度が安定するモデルなので, 速度が安定した状態の燃費を用いる. この際のシミュレーションにおける車両構成比は表 2 を用いる. 東名高速道路豊川 IC-音羽蒲郡 IC 間における 12 時間の交通量は 32782 台なので, 1 時間あたりの交通量である 2700 台をシミュレーションを行う [8]. その際は約 11500 回速度変化で速度が安定する.

5.2 竹内秀樹による最適速度との比較

表 2 の車両データを用いて Chandler モデルを用いて最適速度を基に走行した場合の燃費を表 4 にまとめる. 尚, 竹内秀樹の用いたプロブカーデータと近づけるため, 目標速度は 45km/h に設定する [3]. なお, ここで F_x は竹内秀樹による実測値, $F_{x,ov}$ は竹内秀樹による OV モデルを基に走行した場合の燃費である.

ここで大幅な差が見られるが, これはシミュレーションに用いた各車両のデータが異なるためと思われる. よっ

表 4 竹内秀樹による実測値燃費との比較

車種	$F_x(\text{km/L})$	$F_{x,ov}(\text{km/L})$	$F_2(\text{km/L})$
軽自動車	20.94	22.09	25.37
小型自動車	20.05	21.16	20.49
普通自動車	17.16	18.20	14.85
大型自動車	2.24	2.42	4.44
HV 車	30.69	32.60	26.29

て, シミュレーション結果をより正確にするために各車両のデータを竹内秀樹がシミュレーションに用いたデータと同じ物にする [3]. 竹内秀樹が使用したデータは表 5 に記載する.

表 5 竹内秀樹の用いた車両データ [3]

車種	$w(\text{kg})$	$b(\text{m})$	$h(\text{m})$	$S(\%)$	Q
軽自動車	850	1.50	1.65	15	34.6
小型自動車	900	1.66	1.54	15	34.6
普通自動車	1200	1.70	1.47	15	34.6
大型自動車	16000	2.20	3.50	18	34.6
HV 車	1400	1.75	1.50	30	34.6

竹内秀樹の用いた車両データを使用してシミュレーションを行った結果とその比較を表 6 に記載する. なお, ここで F_x は竹内秀樹による実測値, $F_{x,ov}$ は竹内秀樹による OV モデルを基に走行した場合の燃費である.

表 6 竹内秀樹による最適速度燃費との比較 2

車種	$F_x(\text{km/L})$	$F_{x,ov}(\text{km/L})$	$F_2(\text{km/L})$
軽自動車	20.94	22.09	22.61
小型自動車	20.05	21.16	21.72
普通自動車	17.16	18.20	18.43
大型自動車	2.24	2.42	2.40
HV 車	30.69	32.60	34.99

5.3 燃料コスト計算式

1L あたりの燃料の価格を $p(\text{円})$, 走行距離を $d(\text{km})$, 竹内秀樹による実測値による燃費を $F_1(\text{km/h})$, Chandler モデルによる最適速度を適用した場合の燃費を $F_2(\text{km/h})$ とすると, 車 1 台あたりにおいて削減可能な燃料コスト $C(\text{円})$ は次の様にして求めることができる.

$$C = \frac{dp}{F_x} - \frac{dp}{F_2} \quad (9)$$

5.4 東名高速道路全体の交通量

愛知県内の東名高速道路全体の交通量の詳細を車両構成比に基づき決定する. 平成 22 年度に実施された道路交通センサス一般交通量調査の結果から愛知県内の東名高速道路全体の交通量を表 7 に記載する [8].

表 7 愛知県内の東名高速道路全体の交通量

高速道路区間	乗用車	大型車	合計
三ヶ日 IC-豊川 IC	27,698	37,548	65,246
豊川 IC-音羽蒲郡 IC	37,858	39,495	77,353
音羽蒲郡 IC-岡崎 IC	46,034	43,304	89,338
岡崎 IC-豊田 JCT	56,668	44,422	101,090
豊田 JCT-豊田 IC	38,561	17,965	56,526
豊田 IC-東名三好 IC	49,677	19,632	69,309
東名三好 IC-日進 JCT	53,955	21,688	75,643
日進 JCT-名古屋 IC	55,460	22,388	77,848
名古屋 IC-春日井 IC	37,621	17,351	54,972
春日井 IC-小牧 JCT	39,592	17,291	56,883
小牧 JCT-小牧 IC	48,039	28,346	76,385
合計	491,163	309,430	800,593

5.5 東名高速道路三ヶ日 IC-豊川 IC でのコスト削減

東名高速道路三ヶ日 IC-東名高速道路豊川 IC 区間の距離は 17.9km, 1 日の交通量は表 7 から 65,246 台である。ガソリン 1L あたりの価格を 140 円, 軽油 1L あたりの価格を 120 円とした場合, Chandler モデルを用いて最適速度で走行した場合と竹内秀樹の行った研究の実測値と比べ, 各車両ごとにどの程度燃料コストを削減できるか算出した結果を表 8 に記載する。その結果, 東名高速道路三ヶ日 IC-東名高速道路豊川 IC 区間全体で Chandler モデルを基にした最適速度を用いて走行した場合, 1 日で約 2,683,263 円, 1ヶ月 (30 日) で約 80,497,890 円の燃料コスト削減に繋がるという結果が得られた。

表 8 東名高速道路三ヶ日 IC-豊川 IC でのコスト削減

車種	台数	削減 (円/台)	削減 (円/日)
軽自動車	9,805	8.86	86,914
小型自動車	8,946	9.6	85,861
普通自動車	6,454	10.08	65,056
大型自動車	37,548	64.46	2,420,401
HV 車	2,493	10.04	25,031
合計	65,246	—	2,683,263

5.6 愛知県内の東名高速道路全体におけるコスト削減

最適速度を用いて愛知県内の東名高速道路全体で 1 日で削減可能なコストを表 7 の交通量の詳細を基に表 9 に記載する。表 9 から愛知県内の東名高速道路全体で Chandler モデルを基にした最適速度を用いて走行した場合, 1 日で 13,070,774 円, 1ヶ月 (30 日間) で 392,123,220 円燃料コストを削減することが可能という結果になった。

6 まとめ

本研究では, 竹内秀樹の行ったプローブカーデータを用いた OV モデルに基づく最適速度とエネルギー削減を基に東名高速道路を走行した場合と Chandler モデルを用いた最適速度を基に走行した場合における燃費比較を行った [3]。燃費の算出には燃費法を用いて計算し, コスト面でどの程度消費エネルギーを削減できるか検討を行った。その結果, 愛知県内の東名高速道路全体で 1 日で約 1300 万円, 1ヶ月 (30 日間) で約 3 億 9200 万円, 1年 (365 日間)

表 9 1 日で削減可能な各高速道路の燃料コスト

高速道路区間	削減可能コスト (円)
三ヶ日 IC-豊川 IC	2,683,263
豊川 IC-音羽蒲郡 IC	1,817,773
音羽蒲郡 IC-岡崎 IC	2,380,658
岡崎 IC-豊田 JCT	2,033,606
豊田 JCT-豊田 IC	563,924
豊田 IC-東名三好 IC	485,184
東名三好 IC-日進 JCT	693,609
日進 JCT-名古屋 IC	352,088
名古屋 IC-春日井 IC	997,409
春日井 IC-小牧 JCT	183,171
小牧 JCT-小牧 IC	880,089
合計	13,070,774

で約 47 億 7000 万円燃料コストを削減することが可能という結果になった。全ての車が最適速度による走行が可能になった場合に大幅なコスト削減ができるという結果が得られた。

参考文献

- [1] 自動車情報センター, “国内四輪車保有台数の推移,” <http://www.autoinfoc.com/hoyu/kokunaihoyu/hy-kokunaihoyu-1.html>(accessed 2013.12).
- [2] 杉本祐介, 朝比奈鋼司, 清水光輝, 脇田佑希子, 玉城龍洋, 北栄輔, “1 台参照線形車両追従モデルの比較検討について,” 計算数理工学論文集, Vol.12, No.14-121212, 2012.
- [3] 竹内秀樹, “プローブカーデータを用いた OV モデルに基づく最適速度とエネルギー削減,” 南山大学院数理情報研究科数理情報専攻修士論文 (2011 年度).
- [4] 一般財団法人省エネルギーセンター, “エネルギー使用量算定方法,” http://www.eccj.or.jp/law06/pamph_shipper-guide/manual_03.html(accessed 2013.9).
- [5] 岡村技術士事務所, “車の燃費の考え方と計算事例,” <http://www1.ocn.ne.jp/~yokamura/>(accessed 2013.10).
- [6] 独立行政法人国立環境研究所, “電気自動車の開発と自動車の環境効率評価,” <http://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/11/10-11.html> (accessed 2013.9).
- [7] 日本自動車販売協会連合会 <http://www.jada.or.jp/index.html>(accessed 2013.12).
- [8] 国土交通省中部地方整備局道路部, “道路交通センサス,” <http://www.mlit.go.jp/road/census/h22-1/data/pdf/kasyo23.pdf>(accessed 2013.12).