

効用理論に基づいた追従挙動のモデル化に関する基礎的研究*

A Preliminary Study on Modeling Car-following Behavior Based on Utility Theory*

葛西誠**・加藤瑞穂***・内山久雄****

By Makoto KASAI**・Mizuho KATO***・Hisao UCHIYAMA****

1. はじめに

高速道路の果たすべき機能の第一は、高度なトラフィック機能であり、目的地までの高速かつ安全快適な移動に担保である。しかし現実には、我が国における高速道路のトラフィック機能は交通集中や工事・事故に伴う渋滞によって十分に発揮されていない場面が多々見られ、ドライバーの認知するサービスレベルの低下をもたらしている。道路整備の目的は社会経済活動の基盤づくりもさることながら、利用者満足度の向上も重要であり、サービスレベルを向上することは今後の整備方針の一つの柱になると考えられる。

ドライバーの認知するサービスレベルを評価する方法は喜多ら¹⁾により議論がなされている。これによれば、「サービスの質は何をもって計測するか」と「達成すべきサービス水準は如何に設定するか」を明確に分離して議論すべきとし、その上で、サービスの質の計測方法について以下のように述べている。すなわち、ドライバー周辺の交通環境に対する評価構造は直接計測し難いが、周辺の交通環境に対応した行動原理は比較的計測しやすいため、行動原理をもって評価構造を代替する。ここで、行動原理は効用理論に立脚した離散選択モデルにて表現されたとしている。

上記手法に基づき、高速道路単路部のサービス水準を計測する試みとして中村ら²⁾の成果がある。中村らは、特に自由流状態においては平均速度などのマクロ的な指標ではドライバーの認知するサービスレベルを表現することが困難であると、ミクロ的な時々刻々と変化するドライバーの周辺環境を客観的に評価することが要求されると述べている。その上で、車線変更希望の有無を行動原理として追従状態のストレス計測を試みている。しかしながら、追従挙動のストレスを直接的に取り扱ったものではないため、例えば暫定往復2車線区間でのスト

レス計測への適用性や、アクセル・ブレーキ操作など運転動作に係る煩雑さを考慮し難いことが課題としてあげられよう。

そこで、上記のサービス水準評価の基盤フレームを活用して高速道路単路部の追従挙動を効用理論ベースでのモデリングを最終的な目標と位置付け、その上で、本論文は比較的簡単なモデル構造を仮定してその特性を明らかにし、本格的なモデリングに向けての課題を議論することを目的とする。

なお、本論文で用いる「効用」「不効用」とは、ドライバーが評価する追従挙動状態の説明変数の望ましさを意味するものとする。

2. 試験車両による追従挙動観測

実交通流中に試験車両を走行させ、追従試験を行ない、車間距離・相対速度、先行車および追従車の位置・速度・加速度等を収集する。試験走行区間は東北自動車道(下)加須IC-館林IC(延長12.1km)、実施日時は平成15年11月1日8:10~8:23である。参考として、車間距離および追従車速度の変動を図-1に示す。

3. 効用理論的な追従挙動モデリングの試行

追従の際ドライバーへの刺激と想定される項目を挙げ、効用関数を設定する。すなわち、「ドライバーは時々刻々とこの効用を最大にするように自車の加速度を

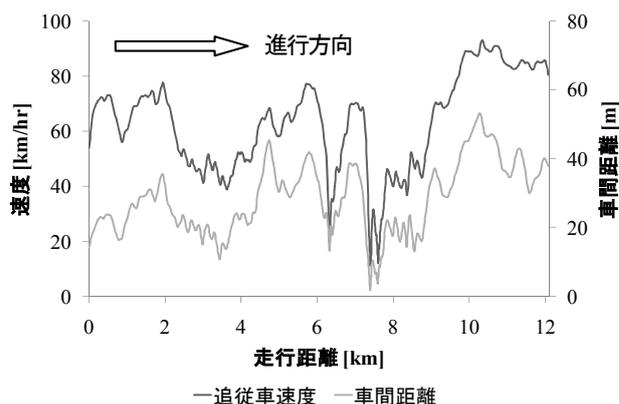


図-1 試験走行における車間距離・追従車速度変動

* キーワーズ：交通流，サービス水準

** 学生員，修(工)，東京理科大学大学院 理工学研究科
(千葉県野田市山崎2641，TEL: 04-7124-1501 EXT:4058，
E-mail: j7606701@ed.noda.tus.ac.jp)

*** 学生員，学(工)，東京理科大学大学院 理工学研究科

**** フェロー員，工博，東京理科大学 理工学部 土木工学科

決定論的に制御する」と仮定する。

(1) 追従に影響を及ぼす要素の想定

既往の追従挙動モデル³⁾を参考にすると、追従に影響を及ぼす要素としては、車間距離、相対速度、追従車速度などが考えられる。本研究では、車間時間、追従車速度、アクセル・ブレーキ操作に係る項を用い、それぞれの項に対して部分的な効用形を設定する。

a) 車間時間

車間時間とは、車間距離を追従車速度で除した量である。車間時間が長いほど、追従車ドライバーにとっての安心感が増すと考えられる。すなわち、車間時間に対する効用は単調増加関数と考えられる。具体的な効用関数形としては車間時間が0に近づけば近づくほど急激に効用が下がり、また車間時間が大きくなれば単位車間時間の増分に対する効用の上昇率は小さくなる（限界効用逓減）と考えられるので、対数関数を仮定する。

b) 追従車速度

高速道路においては追従車速度が大きいほど快適性が向上すると考えられるため、速度に対する効用は単調増加関数と考えられる。具体的な関数形としては、速度が小さいほど急激に不満感が増し、また速度が高くなるほど速度の単位増加分に対して効用の上昇は小さいと考えられると考えられるので、対数関数を仮定する。

c) 運転操作煩雑性

アクセルペダルの踏み増しやアクセル・ブレーキペダル踏み替えなどの運転操作は煩雑であり、ドライバーはなるべく現在の操作を維持しようと考えたと想定する。これを効用関数に置き換えるとき、以下の2通りが考えられる。1)加速度=0を維持しようとする設定、2)加加速度=0を維持しようとする設定、である。1)は、急激な速度の変動に繋がるような操作を避ける主張、2)は加加速度の急激な変動に繋がるような操作を避ける主張である。何れにせよ、加速度=0または加加速度=0を最大値とし、0から離れるにしたがって急激な操作を伴うために効用が減少すると考えられるため、上に凸の効用関数を仮定することが適切であろう。

(2) 効用関数

総効用は前述3項の部分効用の和と仮定する。すなわち、式(1)で表される：

$$U_i(t) = u_{1i}(t) + u_{2i}(t) + u_{3i}(t) \quad (1)$$

ここに、

$U_i(t)$:時刻 t のときの総効用、

$u_{1i}(t)$:追従車速度に関する部分効用、

$u_{2i}(t)$:車間時間に関する部分効用、

$u_{3i}(t)$:運転操作煩雑性に関する部分効用。

なお、添字 i は個人 i を意味する。効用関数はドライバー属性によって変化すると考えるのが自然であるが、本稿はパイロットスタディのため、個人 i を固定して議論を展開する。

次に、各部分効用項を具体的に書き下す。前述の通り運転操作煩雑性に関して 2 通りの部分効用関数の設定方法を挙げたために式(2)および式(3)の2通りの表現が考えられる：

$$U_i(t) = u_{1i}(t) + u_{2i}(t) + u_{3i}(t) = a_{1i} \ln \dot{x}_i(t) + a_{2i} \ln T_{gi}(t) + a_{3i} \cosh\{a_{4i} \ddot{x}_i(t)\} \quad (2)$$

または、

$$U_i(t) = a_{1i} \ln \dot{x}_i(t) + a_{2i} \ln T_{gi}(t) + a_{3i} \cosh\{a_{4i} \ddot{x}_i(t)\} \quad (3)$$

ここに、

$\dot{x}_i(t)$: 追従車速度、

$\ddot{x}_i(t)$: 追従車加速度、

$\ddot{\ddot{x}}_i(t)$: 追従車加加速度、

$T_{gi}(t)$: 車間時間、

$a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}, a_{4i}$: 係数。

(3) 走行ロジック

ある時刻 t において、ドライバーは任意の加速度を選択できるものとする。このとき、時刻 $t + \Delta t$ において総効用最大となるような加速度を一意に選択すると仮定する(図-2)。すなわち、決定論的な連続選択問題となる。これにより、時刻 $t + \Delta t$ における追従車速度が定まり、同時に車間時間などの諸量も定まる。時刻 $t + 2\Delta t$ においても同様の手順を繰り返す。このようにして、追従車ドライバーは自車を時々刻々と制御していくと仮定する。

(4) 効用最大化

時刻 $t + \Delta t$ のときの総効用 $U_i(t + \Delta t)$ の最大値および

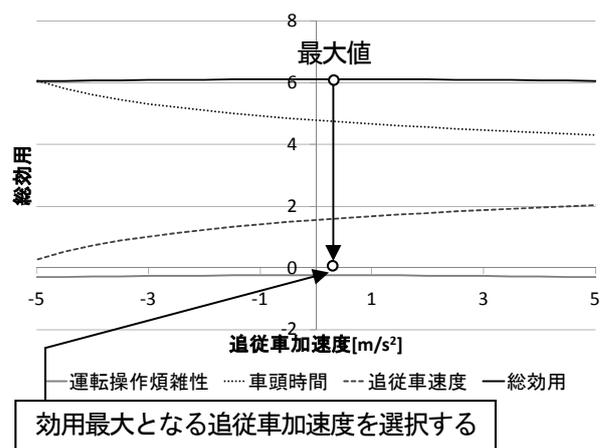


図-2 効用最大仮定に基づく追従車加速度選択

最大値をとる追従車加速度 $d\ddot{x}_i(t)$ を求めるための方法について式(2)を基に述べる(式(3)は同様であるので省略する). 式(2)は凸性が確保されているので, $dU_i(t+\Delta t)/d\ddot{x}_i(t)=0$ を満たす追従車加速度 $\ddot{x}_i(t)$ を求めれば良い. また凸性よりニュートン・ラプソン法が適用できる. すなわち, $\{\ddot{x}_i(t)_n\}$ に関する漸化式(4)に従い, 十分収束したと判断されるまで反復計算する. なお n は反復回数である.

$$\ddot{x}_i(t)_{n+1} = -\frac{dU_i(t+\Delta t)}{d\ddot{x}_i(t)} \bigg/ \frac{d^2U_i(t+\Delta t)}{d\{\ddot{x}_i(t)\}^2} + \ddot{x}_i(t)_n \quad (4)$$

4. モデルキャリブレーション

(1) パラメータ推定方法

提唱モデルによって追従走行そのものが可能であるか否かを判断するため, モデルキャリブレーションを実行する. これは推定車間距離と実測車間距離の平方平均自乗誤差 (RMS) を最小とするパラメータ a_{ni} ($n=1,2,\dots,4$) の値を求める問題である. この平方平均自乗誤差はパラメータ a_{ni} の微分が不可能であるため, 最尤法を用いることができない. よって非線形最適化手法の一つである微分操作の不要なシンプレックス法⁴⁾を用いる.

パラメータ推定の流れを要約すると以下のようになる. 1)パラメータの初期値を与え, そのパラメータ値に従い追従走行させる. このとき先頭車挙動データは所与とし, 実測の先頭車挙動データを用いる. スキャンニングインターバルは, データ取得時間間隔に依存し, 本研究では 1/54 秒としている. 2)全区間にわたっての推定車間距離と実測の車間距離との平方平均自乗誤差を求め, シンプレックス法によって, 平方平均自乗誤差の減少が可能なパラメータ値があるか否かを探索する.

1)~2)を繰り返し, 平方平均自乗誤差を最小化するパラメータ値が得られる.

(2) 推定結果

この手順にしたがって推定されたパラメータ値および平方平均自乗誤差を表-1 に示す. 表中の Model-1 は運転操作煩雑性として追従車加速度を採用する場合, すなわち効用関数として式(2)を仮定する場合, 一方 Model-2 は運転操作煩雑性として追従車加加速度を採用する場合, すなわち効用関数として式(3)を仮定する場合である. 平方平均自乗誤差を見る限りでは, 両モデルとも 5m 以下と小型車の車長程度であり, 本モデルに従って走行すれば平均的には小型車 1 台分の車長の誤差が

表-1 パラメータ推定結果

	Model-1	Model-2
a_{1i} [$m^{-1}s$]	0.839	1.01
a_{2i} [s^{-1}]	0.830	1.00
a_{3i}	$-2.50 \times 10^{-4}[m^{-1}s^2]$	$-1.02 \times 10^{-2}[m^{-1}s^3]$
a_{4i} [-]	0.135	1.33×10^{-2}
RMS[m]	4.77	4.38

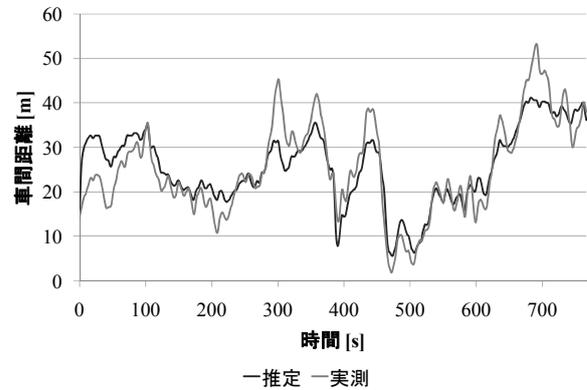


図-3 Model-1 における推定・実測車間距離比較

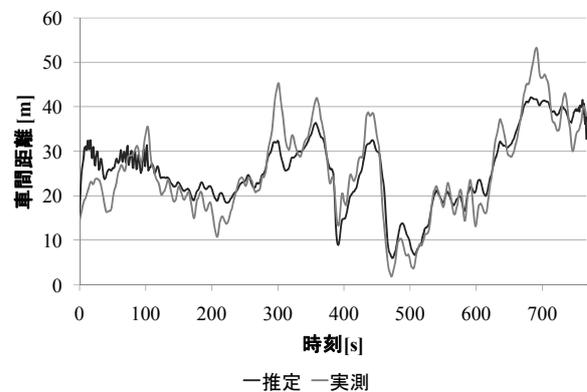


図-4 Model-2 における推定・実測車間距離比較

生起することを意味する. これは概ね満足できる推定精度であると言えよう.

それぞれのモデルによって推定された車間距離と実測の車間距離を時系列で比較してみよう. 図-3 は Model-1, 図-4 は Model-2 における比較である. 大域的にはいずれも実測の車間距離変動によく整合していることが見てとれる. しかし, Model-2 の場合 (図-4) では, 0~100 秒間で不自然な推定車間距離の振動が見られる. この原因は運転操作煩雑性項の関数形の違いによるものと推測される. よりミクロに観察すると, 実測の車間距離が 30m を超えるような状況下で, 推定車間距離との乖離が目立つようである. これは車間距離が大きいときの反応感度が現実よりも高いモデル構造であることが原因と推測される. また, 本研究では如何に車間距離が離れていようと先行車へ

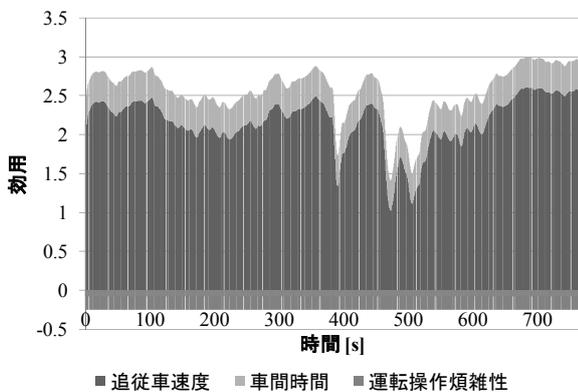


図-5 ドライバー効用の時系列変動

の追従を仮定しているため、自由走行と追従走行との閾値についての吟味が必要である。

(3) 効用の推定

例として、時々刻々と変動する追従車ドライバーの効用を求めてみよう。図-5は、Model-1を用いた場合の、効用の時間変動を変数毎に示している。本モデルを用いる限りでは、追従速度に関する部分効用が大きく寄与しており、運転操作煩雑性に関する部分効用は極めて小さな寄与にとどまる。本モデル構造では運転操作煩雑性が十分働かないものと推測される。また前述の実測の車間距離が比較的大きくなる局面で推定車間距離が小さいままという事実も、おそらく運転操作煩雑性が十分効力を持たないことに起因すると思われる。

本研究で示したモデルでは、ある時刻における加速度は前時刻の加速度とは独立に選ばれるが、物理的にも、あるいは人間の自然な運転動作を想定しても両者が大幅に異なる値となることは考えられない。過去の加速度の選択結果への依存性について考慮する必要がある。

5. おわりに

(1) モデリングの課題

本論文で提示した効用理論を基礎とした追従モデルはあくまでプロトタイプであり、多くの課題が残されている。以下に課題を整理する。

a) 追従・自由走行の切替ロジック

現段階では如何なる状況下でも追従走行を仮定しているが、自由走行と追従走行を分離して扱う必要があるのか、そうであればその閾値の検討が必要である。もちろん、両者の間に明確な行動論理の違いがなく、一つの効用関数で統一的に扱える可能性もある。

b) 変数および部分効用形の吟味

本研究で採用した変数以外にも、追従挙動をよく説明する要素が当然あり得え、変数の取捨選択が必要である。また効用関数形についても吟味する必要がある。

c) 効用関数の個人差の考慮

個人毎に、車両周辺の環境に対する評価は当然異なるはずである。いわば、横断方向の異質性の考慮が必要である。これにより誤差項が生じるため、確定的な効用モデルからランダム効用モデルへの拡張が必要であろう。

d) 選択履歴を考慮した動的選択問題への拡張

前述の通り、物理的にもドライバーの判断の連続性を考慮しても、前時刻の加速度と、現時刻の加速度の選択には関連があると想定される。パイロットモデルとしては運転操作煩雑性なる変数を設けることで対応を図ったが、十分な寄与が得られていない。過去の選択履歴を考慮した選択行動としてのモデリングが必要である。

e) ドライバー挙動のあいまいさ

ドライバーの、車間距離や速度への認知には誤差が伴うはずであるから、知覚誤差を考慮する必要があるかもしれない。確率過程的な扱いも視野に入るであろう。

(2) 今後の展望

高速道路単路部においては追従挙動の集積によって交通流が構成されているから、追従走行時にドライバーの評価する不効用が時々刻々と推定できれば、交通流全体でのドライバーが持つ不効用の総和も推定可能であり、道路整備や交通管理施策の効果測定というマクロ的評価手法への展開もあり得るであろう。

本パイロットモデルでは、ドライバーの追従挙動は、先行車の挙動の先読みを行わず、現時点の情報のみに基づいて判断するものと仮定している。しかし現実にはドライバーはある程度の将来まで（おそらく数秒のオーダーで）先行車をはじめとした自車周辺の環境の成り行きを予測し、不効用をもたらす状況、すなわち危険な状況や急激な操作を伴う状況を避けつつ自車を制御しているものと想定される。したがって時空間的視野の拡大がドライバー効用の向上をもたらすと考えられる。時空間的視野を広げる役割は何らかのITS要素技術が担うと思われ、本格的モデリングにあたってはITS技術開発時の効果推定への適用も念頭に置くこととなる。

参考文献

- 1) 喜多秀行, 前田信幸: 道路交通における走行サービスの質とその計測: 効用アプローチに基づく方法, 土木学会論文集, No.772/IV-65, pp.3-10, 2004.
- 2) 中村英樹, 鈴木弘司, 劉俊晟: ドライバーストレスの観測計測に基づく高速道路単路部におけるサービス水準の評価, 土木学会論文集, No.772/IV-65, pp.11-21, 2004.
- 3) 越正毅: 高速道路のボトルネック容量, 土木学会論文集, No.371/IV-5, pp.1-7, 1986.
- 4) S.L.S. ジャコビ, J.S. コワリク, J.T. ピゾ (関根智明訳): 非線形最適化問題の反復解法, 培風館, pp.81-84, 1976.