

道路サービス水準評価を念頭に置いた車両追従挙動モデル*

A Car-following Behavioral Model to Estimate Level of Service on Roads*

葛西誠**・加藤瑞穂***・内山久雄****

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

1. はじめに

我が国においては、絶対的に道路が不足していた時代の需要追従型整備は終焉を迎え、道路サービスの質を求める時代が来たとされる¹⁾。道路におけるサービスの質とは何であるかについての真剣な議論が必要とされている。

一般にサービスの質とは、その製品が果たすべき機能がどの程度達せれているかによって測られるとされる。道路に求められる機能としてその代表的なものはトラフィック機能であり、これがどの程度確保されているかを評価できれば、それはサービス水準評価と言えるであろう。問題となるのは、何を評価軸とし、また達成目標をどこに置くかである。

喜多ら²⁾、中村ら³⁾は、離散選択行動モデルを介した間接的サービス水準評価方法を提唱し、交通主体が周囲から受ける不快感を動的に計測・推定する枠組みを提唱している。この方法は、不快感を統一的評価軸として道路種別や交通主体の違いに依らない評価ができる点で極めて優れていると言えよう。高速道路・一般道を問わず、また自動車ドライバー・歩行者を問わず同一の評価軸でサービスが計測できる可能性のあることから、ネットワーク単位でのサービス評価・改善代替案の検討へと繋がるものと考えられる。

ただし、この方法の立脚する離散選択問題として交通主体の挙動を捉えられる場面はやや限定的と言える。例えば自動車であればアクセル踏み込み量の制御や、歩行者であれば歩行方向の連続的変化など、連続量の選択(制御)問題として捉える方が自然である局面も多い。本研究は、高速道路単路部の追従挙動をケーススタディとして、動的連続量選択問題のモデリングの方向性を議論する。

* 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 土木工学専攻（千葉県野田市山崎2641，TEL: 04-7124-1501 EXT:4058，E-mail: j7606701@ed.noda.tus.ac.jp）

*** 正会員，修(工)，首都高速道路(株) 西東京管理局 調査・環境グループ

**** フェロー員，工博，東京理科大学 理工学部 土木工学科

2. 道路のサービス水準評価の議論

(1) 「仕様型」から「性能照査型」道路計画設計へ

これまでの道路計画は、計画交通量が定まれば、自動的に設計規格が定まる「仕様型」と言えるものであった。道路なる社会資本が絶対的に不足していた時代には、規格化された道路の大量生産思想が適合していたと言えるであろう。しかしながら、予算制約および環境制約の厳しい昨今、ある道路に対し少ない投資で必要な機能を十分に発揮させることが必要である¹⁾。そのためには、機能に対応した性能目標の設定と、その性能がどの程度発揮されているかの照査が求められる⁴⁾。

道路に必要な機能はアクセス機能、防災機能等多々あるが、本質的には目的地への移動を担保するトラフィック機能であろう。したがって目的地へ快適に移動できるか否かによって、その道路の性能照査が可能である。

(2) 道路のサービス水準計測方法検討フレーム

性能照査のための指標(MOE: Measure of Effectiveness)には、道路の規格等によって様々な量が採用し得るが、いずれにせよ、利用者が認知するサービスレベルと対応していることが求められよう。この意味で、利用者の認知するサービス水準計測が必要である。

このための方法論を展開したのが喜多ら²⁾である。道路のパフォーマンス評価方法の体系化が必要であると主張した上で、「ミクロ的な行動原理が明らかになれば、それはドライバーが評価する周囲の交通環境(サービス水準)の良い代替指標となるであろう」と述べており、道路のサービス水準評価には効用理論アプローチが妥当であるという。すなわち、その人の持つ選択肢のうち、最も効用の高い選択肢を選ぶという効用最大化仮説に立脚すべきとの主張である。本アプローチの適用例として、車線変更行動に着目した都市間高速道路単路部でのサービス水準評価³⁾、避走行動に着目した高速道路合流部のサービス水準評価²⁾が代表的であり、一定の適用実績を有すると言って差し支えないだろう。

(3) 本研究の位置付け

喜多ら²⁾のアプローチは本来、道路種別に関係なく適

用できる一般性を有しているはずである。これは道路利用者の認識（周囲環境の快・不快の評価）という単一軸のみで評価可能であるためである。したがって、例えば旅行速度などのような、道路規格に依存するような変数を評価指標に用いるよりも合理的であるといえよう。

ただし、上記アプローチは離散選択問題として「ミクロの行動原理」が記述可能であることを前提とする。しかしながら、離散選択問題として記述できる（近似できる）挙動はさほど多くはないと想像される。例えば自動車専用道路であれば1次元1方向流内の挙動、特に追従挙動が卓越するが、これは加速度の連続制御問題と捉えた方が自然である。特に地方部高速道路の暫定2車線区間では車線変更が不可能なため、よりその色彩が強まるであろう。一方で、一般道特に生活道路ではアクセス機能が卓越するようになり、道路沿道への流入、流出が増すようになって、車両挙動は2次元の自由度を持つようになる。かつ、自転車や歩行者との交錯が増すようになる。このように、トラフィック機能が相対的に小さい生活道路では、各交通主体の挙動は速度ベクトルの連続制御問題と捉えた方が良いかもしれない。

この問題意識の下、高速道路の追従挙動を対象に、ドライバーの不快感を最小とする、換言すればドライバーの感じる好ましさを（以下効用理論の類推から「効用」とする）を最大とするような加速度を時々刻々と選択するモデリングがパイロットスタディとして試みられている⁵⁾。しかし、これはいわば近視眼的にある瞬間の効用最大化を図る行動ロジックにとどまっており、時間軸方向に不連続な加速度を選択していくという非現実的な現象が生起し得るものであった。現実には、ドライバーは先行車の挙動等ある程度将来の予測をしながら自車のアクセル・ブレーキワークが煩雑にならないよう制御するものと想定される。本研究の目的は、この先読みを考慮した動的連続選択のモデリングを試みるものである。

3. 不快感最小化プロトタイプモデル

先に提案された、ある瞬間での効用最大化原理に基づく車両追従挙動モデル⁵⁾の構造式は式(1)のようである。これはある一時点において、微小時間後に追従車ドライバーにとって効用最大となる加速度を選択する（制御する）とする仮定である：

$$\ddot{x}_i(t) = \max U_i(t) \quad (1)$$

ここに、

U_i ：個人*i*の持つ総効用(簡単のため*i*固定)

ただし、

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

$\dot{x}_i(t)$ ：追従車速度、
 $\ddot{x}_i(t)$ ：追従車加速度、
 $T_{gi}(t)$ ：車間時間、
 $a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}, a_{4i}$ ：係数。

式(1)に従って、時々刻々と効用最大を与える加速度を選択していくものとする。

なお、式(2)中の部分効用 $u_{ji}(t)$ の型は、次の仮説に基づく。すなわち、1)右辺第1項においては、追従車（自車）速度が大きいほど大きい効用を感じる、ただし、速度が大きくなるほどその効用の増分は小さくなっていく（限界効用逓減）、2)第2項においては、車間時間が大きいほど大きい効用を感じる、ただし、車間時間が大きいほど効用の増分は小さくなっていく（限界効用逓減）、3)ドライバーは急激な速度変動を伴うアクセル操作またはブレーキ操作を嫌う、とする仮定である。

実データ（表-1）と推定値との車間距離の平方平均二乗誤差を最小にするよう、非線形最適化手法であるシンプレックス法⁶⁾を用いたモデルキャリブレーションの結果、一定の再現精度は確認された⁵⁾が、次に述べるような問題も残された。すなわち、常にどの時刻においても効用最大となるよう制御するロジックであるため、ドライバーのファジーな挙動を十分に表現するものでないことである。これを裏付けるのが図-1に示す推定結果であり、ほぼ等車頭時間で走行するように推定されてしまっていることがわかる。これは、いわば常に神経を張り詰めて、自車の制御に知的処理の多くのコストをかけている状態と言え、非現実的な挙動の様態である。

ドライバーは、先行車挙動の「先読み」を行なっているものと考えることが自然である。ある長さの期間にわたって効用最大となるような、いわば「柔らかな制御」の行動モデルが必要であろう。

表-1 走行試験データプロフィール

試験走行区間	東北自動車道（下）加須IC-館林IC （延長12.1km）
実施日時	平成15年11月1日8:10~8:23

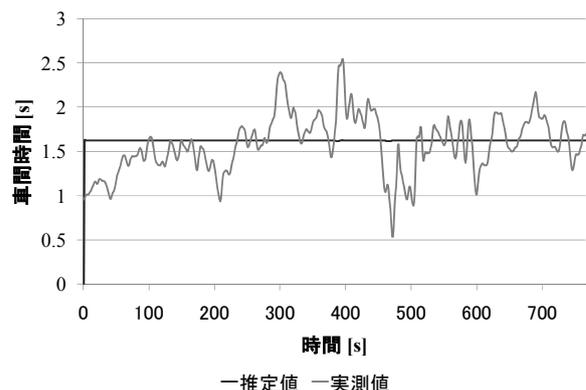


図-1 プロトモデルの推定結果（車間時間の比較）

4. 不快感最小化モデルの先読み概念の導入

追従車ドライバー*i*は、将来 $t=t_0+\tau$ ($\tau>0$)の先行車挙動を完全に予期することはできない。先行車挙動の不確定要素のために、効用最大を実現する加速度 $\ddot{x}_i(t_0, \tau)$ は確率変数となる。一方で、ドライバーは「先読み」に基づいて効用最大としたい時刻（これを「照準」と呼ぶ）を定めているとしよう。照準は、先行車の挙動その他の不確定要素のためやはり時間方向に確率的に分布すると考える。時刻 $t=t_0+\tau$ における照準の分布 $w(\ddot{x}_i(t_0, \tau))$ を定義すると、現在時刻 $t=t_0$ において選択される追従車加速度 $\ddot{x}_i(t_0)$ の確率は、

$$p(\ddot{x}_i(t_0)) = \int_{t_0}^{t_e} w(t_0 + \tau) p(\ddot{x}_i(t_0, \tau)) d\tau \quad (3)$$

となる。ただし、適当な期間 $[t_0, t_e]$ に対して式(4)が成立するものとする：

$$\int_{t_0}^{t_e} w(t_0 + \tau) d\tau = 1. \quad (4)$$

照準の確率分布は実質的に時間方向の重みとみなせる。ドライバーが時刻 $t=t_0$ において選択する追従車加速度 $\ddot{x}_i(t_0)$ は、期待値 $E(\ddot{x}_i(t_0))$ であるとする。

さて、式(3)を直接扱うのは $p(\ddot{x}_i(t_0, \tau))$ の形が不明であるため困難である。そこで、先行車が現在時刻 $t=t_0$ の速度を維持する（先行車加速度は0）と仮定しよう。すると $t=t_0+\tau$ ($\tau>0$)での効用が確定する。したがって $t=t_0+\tau$ で効用を最大とする追従車加速度 $\ddot{x}_i(t_0, \tau)$ も一意に定まるため、図-2のような手続きで式(3)左辺 $p(\ddot{x}_i(t_0))$ の分布は具体的に求まる。

先読みの有無の違いによって、加速度選択が異なることを模式的に示したのが図-3である。(b)先読みありの

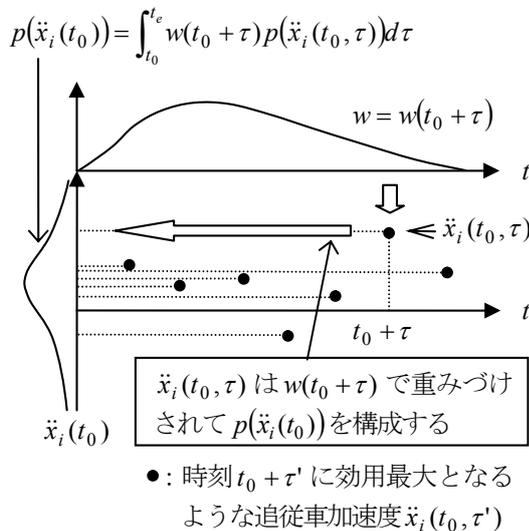
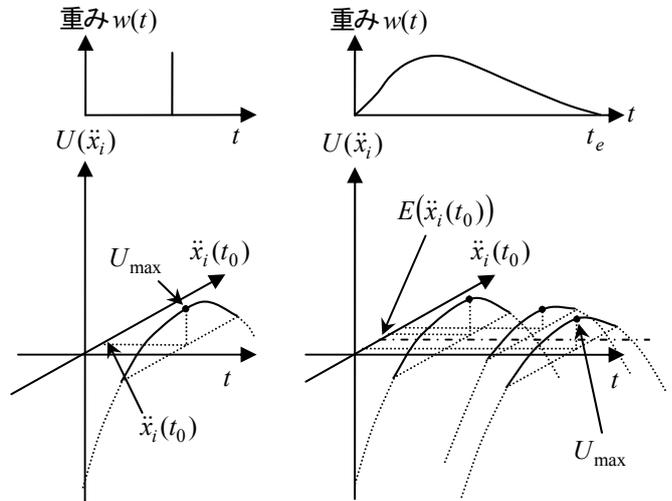


図-2 追従車加速度の選択確率分布の定め方

場合は各時刻 τ の効用最大値 U_{\max} を与える $\ddot{x}_i(t_0, \tau)$ を重み $w(t)$ 付平均した $E(\ddot{x}_i(t_0))$ が選択される。(a)は(b)の特殊な場合であり、ある一時点に重みが集中している。

次に、ドライバーは $w(\ddot{x}_i(t_0, \tau))$ をどのように評価しているかを考察しよう。走行しながら先行車の挙動を観測しつつ、何秒後に重きをおいた加速度の選択をするかを調整しているものと考えられる。すなわち、推定値と実測値の乖離を小さくするように、ベイズ的に時々刻々と加速度の確率密度分布を改訂していくと考える。図-4



(a) 先読みなし (プロトタイプ) (b) 先読みあり
図-3 先読み有無による加速度選択原理の相違

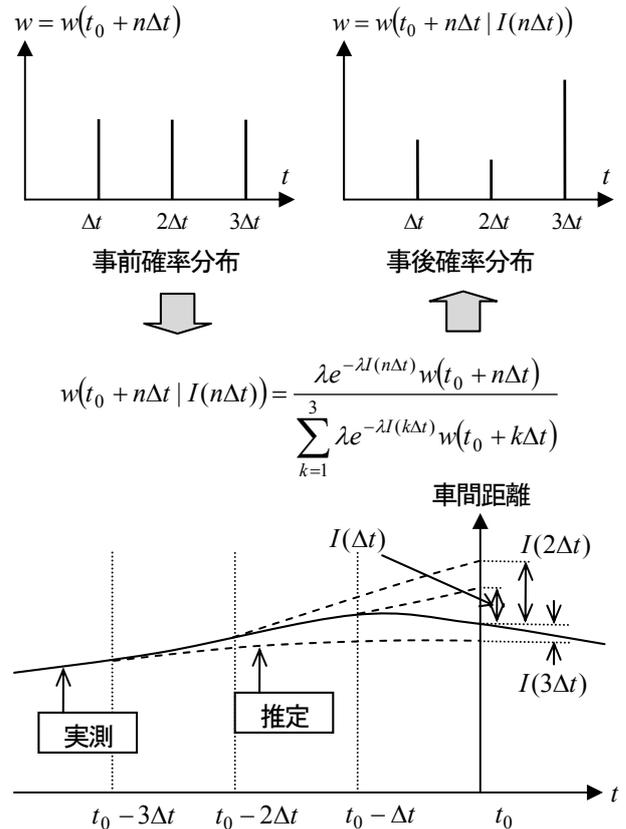


図-4 重み分布の改訂概念

は本概念を簡単な例を用いて示したものである。時刻 $t = t_0 - n\Delta t$ に採用された追従車加速度にしたがったとき、現時刻 t_0 での乖離量 $I(n\Delta t)$ が小さい $n\Delta t$ ほど、事後確率が大きくなるように改訂される。より一般には、この手続きは式(5)のように表現される：

$$w(t_0 + \tau | I(\tau)) = \frac{L(I(\tau) | w(t_0 + \tau))w(t_0 + \tau)}{\int_{t_0}^{t_e} L(I(\tau) | w(t_0 + \tau))w(t_0 + \tau)d\tau} \quad (5)$$

ここに、

$I(\tau)$ ：時刻 $t = t_0 - \tau$ に採用された追従車加速度にしたがったとき、現時刻 t_0 おける推定車間距離と実測車間距離との乖離

表-2 パラメータ推定結果

プロトタイプモデル ⁵⁾		先読み概念導入モデル	
a_{1i} [$m^{-1}s$]	0.839	a_{1i} [$m^{-1}s$]	0.946
a_{2i} [s^{-1}]	0.830	a_{2i} [s^{-1}]	0.757
a_{3i} [$m^{-1}s^2$]	-2.50×10^{-4}	a_{3i} [$m^{-1}s^2$]	-2.65×10^{-5}
a_{4i} [-]	0.135	λ [m^{-1}]	49.0
車間距離 RMS[m]	4.77	車間距離 RMS[m]	4.65
車間時間 RMS[s]	0.330	車間時間 RMS[s]	0.314

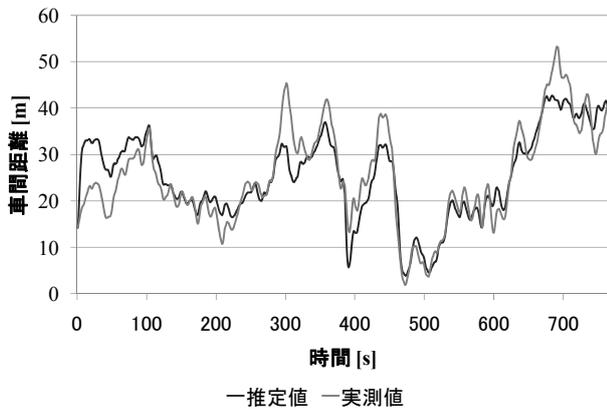


図-5 車間距離の実測値と推定値の比較

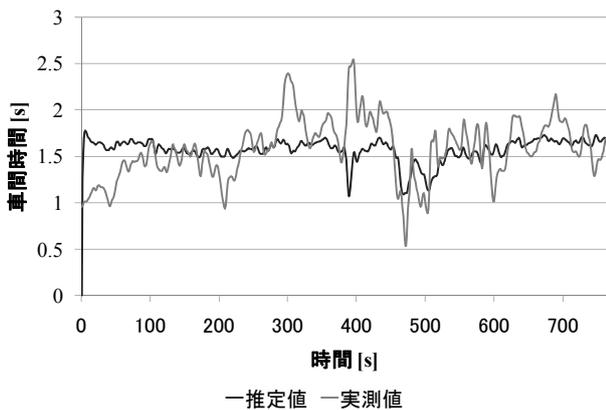


図-6 車頭時間の実測値と推定値の比較

$$L(I(\tau) | w(t_0 + \tau)) \equiv \lambda e^{-\lambda I(\tau)}$$

追従車が時刻 t_0 に加速度 $\ddot{x}_i(t_0)$ を選択した状況において、乖離 $I(\tau)$ が観測される尤度

尤度関数としては、この改訂の性質を持つものであれば良しとするが、本稿では簡便な指数分布を採用する。

推定結果を表-2、図-5、図-6に示す。なお、ここでは $t_e = 1.2$ [s]、スキャンインターバルは $1/18$ [s]としている。車間距離および車間時間の平方平均二乗誤差を見る限り、推定精度はプロトモデルと比べて大幅に改善したとは言いがたいが、3章で言及した等車頭時間として推定されてしまう問題は改善の兆しのあることが図-6から読み取れる。本試行結果から、先読みを考慮したモデリングの可能性が示唆されていると言えよう。

5. おわりに

不快感最小化追従挙動モデルに先読みの概念を導入し、ドライバーの挙動に近いモデリングの可能性を例証した。行動モデルとしては、多々強引な仮定や近似も残っており、アドホックな印象もあろう。経済的概念との整合性も吟味が必要である。しかし、ここでの検討は動的連続選択モデルの理論的枠組みを構築する上で十分参考となるべき結果と考えられる。

本研究は、高速道路単路部の追従挙動をケーススタディとしてはいるが、道路規格を問わないサービス水準評価のために、統一尺度となり得る不快感ベースの挙動モデルの枠組みを見出すことが最終的な目標である。道路サービスの質の計測に際して有用となるようなモデリングを継続する。

参考文献

- 1) 中村英樹：道路交通のパフォーマンスとサービス水準，交通工学，Vol.40，No.1，pp.7-10，2005.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 内海泰輔，中村英樹，渡辺将光：性能照査型道路計画設計のための年間を通じた時間交通需要変動推計手法の構築，土木計画学研究・論文集，Vol.24，No.4，pp.825-834，2007.
- 5) 葛西誠，加藤瑞穂，内山久雄：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，土木計画学研究・講演集，Vol.38，4pages，2008.
- 6) 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.