

[特 集]

# ドライバーストレスの間接計測に基づく 高速道路単路部におけるサービス水準の評価

中村 英樹<sup>1</sup>・鈴木 弘司<sup>2</sup>・劉 俊辰<sup>3</sup><sup>1</sup>正会員 工博 名古屋大学大学院 助教授 工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: nakamura@genv.nagoya-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 修(工) 名古屋工業大学 助手 ながれ領域社会開発工学教育類(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

E-mail: suzuki@ace.nitech.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ(株) 交通技術本部道路部(〒163-0730 東京都新宿区西新宿2-7-1)

E-mail: Syunsei.Ryuu@ss.pacific.co.jp

本論文では、道路計画や交通マネジメントに際して重要な評価基準である交通流のサービスの質(QOS)を、走行快適性といったドライバーの認識の観点から評価することを試みた。走行快適性は、走行環境に応じた車線変更挙動をモデル化することで、ドライバーのストレスとして間接的に計測可能であることを示した。そして、走行調査データに基づき、高速道路単路部における各種の車両挙動モデルを推定し、これらを組み込んだ微視的交通流シミュレーションを構築した。これを用いて、非渋滞領域における様々な交通量レベルの交通状況を再現し、それぞれの運用状態と走行快適性との関係について明らかにした。

*Key Words: level of service, driver's perception, traffic flow simulation, basic expressway sections*

## 1. はじめに

これまでわが国では、実現する具体的交通状況や走行環境を示す、「サービスの質」(Quality of Service; QOS)の概念が必ずしも十分明確でないままの道路計画や交通マネジメントが行われてきた。しかしながら、今後道路の新設や改良、あるいはITSによる各種交通管制や交通マネジメントなどを行う際には、実現する具体的サービスの質が曖昧なまま計画を進めることは事業に対する理解を得にくいと考えられ、そのプロジェクトのアカウントビリティが求められることは必至である。道路構造にもいわば性能規定の概念を取り入れていくことが望まれ、道路の提供するサービスの質を利用者の認識に基づき適切に計量し、これを明示できる環境を整えることが必要となっている。

道路のサービスには、サービスの享受主体や道路特性に応じてさまざまなものが考えられる。特に高速道路単路部では、いわゆるトラフィック機能が卓越していることから、非渋滞流における利用者の観点からのサービスの評価要素としては、走行快適性が経済性、定時性とならび重要な要素として位置付けられる<sup>1)</sup>。

この走行快適性とは、自車の走行を妨げる要因に伴うストレスが少ないことにはかならない。

また一般に、非渋滞流領域において、速度は交通量の変化に対する感度があまり高くないため、利用者の感じる走行快適性を速度のみで評価することは適当ではないと考えられる。これは、米国のHighway Capacity Manual (HCM)で高速道路単路部におけるサービス水準指標として交通密度を用いていることの理由のひとつでもある。しかしながら、HCMにおいても、各サービス水準のもとでの具体的な交通状況が、行動の自由度やドライバーの認識(driver's perception)に基づく走行快適性を的確に表現する指標をもって明示されていないのが現状である。

著者らは、高速道路走行時の快適性評価について、ドライバーの主観評価である満足度を走行直後のアンケート調査によって質問し、これによって得られた区間全体での平均的な満足度評価値をそのときの交通状況の集計状態量から推定することを試みている<sup>2)</sup>。本手法を適用することにより、ドライバーの区間全体での平均的な快適性は推測することが可能である。しかしながら、これはあくまで主観的な区間全体の総合評

価値であり、ドライバーの置かれた走行環境における走行制約の種類や程度を明示的に説明するものではない。

行動の自由度とドライバーの認識は互いに深く関連していることから、区間全体での平均的な総合評価のみに頼ることで限界があり、ドライバーが瞬間瞬間に置かれた微視的な走行環境の観点からそのメカニズムを表現し、客観的計測値をもって評価することが必要であると考えられる。区間全体での平均的な評価は、これらの瞬間評価の集積として表現されていると解釈できる。

そこで本研究では、高速道路単路部の非渋滞流を対象として、ドライバーの走行環境に対する瞬間的な認識に基づく快適性を、客観的な走行環境指標から間接的に推定可能なモデルを検討する。同時に、単路部における追従や車線変更などの走行挙動をモデル化し、それらを組み込んだ交通流シミュレーションモデルを構築する。そして、これらのモデルを用いて、各交通状況に対応するサービス水準について、ドライバーの快適性の観点から評価を行うことを目的とする。

## 2. ドライバーストレスによるサービスの質の定量化

### (1) ドライバーストレスと車両挙動

高速道路単路部を走行中の各車両は、周囲を走行する他の車両により影響を受け、時々刻々自車の走行環境が変化する。周囲の車両の存在により自車の挙動の自由が妨げられる、あるいは制限されることで、ドライバーは走行快適性の低下、すなわちストレスを感じ、その状況を改善したいという欲求を持つ。このとき物理的に可能である場合には、車線変更を行うことによって、より好ましい状況を実現しようとすると考えられる。交通量が比較的少ない状況では、これは比較的容易であるが、交通量が増加してくると車線変更の実行が困難となり、ストレスが蓄積しやすい状況となる。

本研究では、ドライバーの置かれた瞬間的な走行環境とストレスの関係をモデル化し、これを用いて任意の走行環境におけるドライバーストレスを推計する。そして、走行環境変化に伴う加減速挙動および車線選択行動を反映した微視的な交通流シミュレーションモデルを用いて、各種の道路条件、交通条件に応じた交通状況を再現し、その中で各車両のストレスを随時計量する。このような方法を用いることにより、それぞれの交通状況に応じたストレスは、区間別、車線別、車種別など、任意の単位で集計することが可能となる。その一方で、サービスの質に応じたストレスと車線変

更挙動とを関連づけたモデル化が不可欠であり、ストレスの顕在化行動として捉えることのできる車線変更挙動を、とりわけ精緻に再現することが重要となる。

### (2) ストレスの間接計測

ドライバーは、ストレスがたまると自車の走行環境改善、すなわち車線変更を希望するようになると考えられる。本研究ではこの仮説に立脚した上で、車線変更希望を直接計測し、その有無を自車の置かれた走行環境で説明する「車線変更希望モデル」を非集計二項ロジットモデルで推定する。そして、その効用関数の値を用いることによりストレスの変化を表現する。

### (3) 車線変更挙動の表現

国内外を含め、車線変更挙動を詳細に表した研究は、そのデータ収集の困難さもあるために極めて少ない。例えば、Sultan, McDonald<sup>3)</sup>は、路外のビデオカメラにより約3000回の車線変更挙動データを収集し、それらを用いて車線変更モデルを構築している。このモデルでは、車両間の相対速度や距離を車線変更を実行する際の閾値として用いているが、ドライバーの認識と行動の自由度の関係については扱っていない。

一方、喜多・平泉<sup>4)</sup>は、合流部における合流、避走挙動を、走行環境に基づく車線選択問題として非集計ロジットモデルで表している。このモデルの効用関数は、隣接車線走行車両や合流区間長と自車との位置関係から計算されるTTC(time to collision)を説明変数としている。したがって、このときの効用は、物理的な車線変更実行可能性も含んだものである。

車線変更をするための区間長制約のない単路部においては、隣接車線のギャップを評価する以前に、自車の置かれた走行環境が車線変更の重要な動機づけとなる。特に交通量が多くなってくると、車線変更を希望していても、目的の車線にギャップが見つからないなどの理由で、即座には実行できないことが多くなってくる。実際に車線変更が実行できるまでの間は、ストレス下での走行を強いられることとなる。このような状況におけるストレスは、走行効用の高い車線を常に走行しているとの仮定に基づく車線選択モデルの効用関数では、必ずしも的確に表現できない。

行動の自由度に着目する本研究で、快適性評価の対象として重視するのは、「車線変更したいが、物理的に車線変更できない」状態である。そこで、車線変更プロセスを①ストレスを表現する「車線変更希望モデル」と、②車線変更の実行を判断する「車線変更実行モデル」の2段階に分離して考えることにより、ストレスの部分のみを抽出可能な構造とする。これより、前節で述べたストレスと車線変更挙動との間に、因果

関係を持たせることができる。

### 3. 試験走行車両によるデータ収集

#### (1) データ収集方法

車線変更希望と走行環境の関係、およびシミュレーションで用いる走行挙動モデルのためのデータ収集を目的として、AHS研究組合所有の各種計測機器を搭載した2台の試験走行車両を用いて、データ収集を行った。

走行データ収集は、平成11年9月8日(水)5:30～17:00、東名高速道路の名古屋IC～音羽蒲郡IC間の45.3kmを計3往復して行った。調査対象区間や時間帯は、区間の交通状況や幾何構造にバラエティを持たせることを意図して選定したものである。当日は、早朝の閑散とした状態から夕刻の混雑した交通流まで、広範な交通状況下でのデータが取得できている。2台の試験走行車両は、原則追従走行することとし、先行車両は自由に走行させた。いずれの車両からも、自車状態量として速度、前後加速度、横加速度、ストップランプON/OFF、スロットル開度、操舵角、前後傾斜角、先行車両との車間距離、照度、燃料消費量などが0.1秒単位で記録され、同時に車載のビデオカメラから自車周辺の走行環境の映像を撮影している。両調査車両の被験者は、20歳代から40歳代までの学生、会社員などの一般ドライバー計12名が交代して担当した。

自由な走行を指示した先行試験車両では、自車の走行環境にストレスを感じ、車線変更を希望したときに、ドライバーがこれを音声で記録した。このときの「車線変更希望」は、隣接車線の状況に関係なく、自車の車線の状況のみから判断するよう指示したものである。車線変更を行わぬまま走行環境が改善された場合には、「希望解除」を音声記録した。

さらに、走行中3kmごとに、ドライバーにその区間の走行環境について5段階の満足度で回答してもらい、交通状況の主観的評価のデータを同時に取得している。これは、後に車線変更希望モデルの効用関数から推定するストレスによる快適性評価値と、主観評価値との対応関係を検証することを目的としたものである。

このほか、走行データ収集に合わせて、当該区間に設置された車両感知器による車線別交通量、速度の5分間データ、沿線からの交通流ビデオ観測データ、および道路幾何構造データを入手した。

#### (2) 走行環境と車線変更の関係

0.1秒単位で記録された各種車両挙動データは、それぞれが独立の計測機器で観測されているが、車両速度

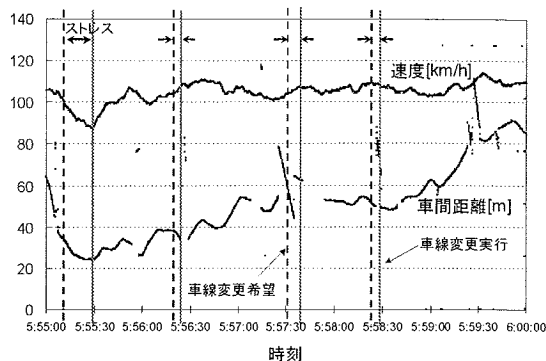


図-1 車線変更の希望、実行と先行車両との車間距離、自車速度の関係の観測例

～加速度や、先行車両の位置～先行車両との車間距離の間には力学的関係が成立していなければならない。そこで、これらの観測状態量について、カルマン・スムージングを適用し、同時にデータの補間処理を施した。

車線変更希望については、交通状況や被験者ドライバーにもよるが、45.3kmの走行区間で15～30回の表明があった。図-1は、ドライバーが「車線変更希望」を表明した時刻、および車線変更を実行した時刻を、速度および先行車両との車間距離の変化と併せて示したものである。これより、自車が希望速度で走行しようとするとき先行車に追いつき車間距離が縮小するような場合に、車線変更希望を表明していることがわかる。その後車線変更を実行することにより、走行環境が改善されている。

### 4. 高速道路単路部における車両挙動モデルと微視的交通流シミュレーション

#### (1) 交通流シミュレーションの特徴

本研究で用いる交通流シミュレーションの具備すべき性能条件として、1)日本の高速道路単路部における交通状況、特に交通量-速度関係や車線利用率などを的確に再現できること、2)時々刻々変化する走行環境に応じて、ドライバーストレスを推定するために必要な個々の車両の状態量を随時出力し、これを車線変更の動機付けとして用いることができること、3)大型車の走行状態や、ドライバーストレスに影響を与えると考えられる縦断勾配について明示的に考慮できること、などが考えられる。これらを全て満たすことのできるシミュレーションモデルは、国内外を通じて存在しない。また、市販されているモデルを改良するとしても、プログラムソースコードの公開されたものは極めて限

定されるとともに、自由な改良操作を可能とするために莫大な労力とコストを要する。

その一方で、筆者らは、都市内高速道路の織り込み区間を対象としたシミュレーションモデル<sup>5)</sup>を開発したノウハウを有しており、今回はこれをベースとしながらも大幅に改良を加えることで、単路部を対象とした独自の微視的交通流シミュレーションモデルを開発することとした。シミュレーションに組み込まれる各種の車両挙動モデルは、今回の試験走行により収集したデータに基づき推定する。本研究では、時々刻々変化する走行環境を緻密に表現する必要があるために、ピリオディックスキャン方式とした。スキャンングインターバルは、高速走行を考慮して、0.1秒としている。

本研究では、先行する大型車の速度低下などによる快適性の変化を表現できることが望ましいため、道路構造条件として、各区間の縦断勾配を入力できる構造としている。また、制限速度は車線別に設定可能である。

車両は上流端で負の指数分布に従う車頭時間間隔で発生し、与えられた大型車混入率に応じて普通車が大型車かの車種を決定するとともに、車種ごとに個別の正規分布に従った希望速度が与えられる。希望速度は、平坦な区間での交通量の少ない自由流状態における車種別の地点速度の分布に基づき設定すべきであるが、今回は車種別データの制約上、希望速度の平均値と標準偏差を普通車でそれぞれ110km/h、5km/h、大型車では性能を考慮して100km/h、3km/hと経験的に設定している。これらの設定値の妥当性については、6章(2)で言及する。

このようにして発生した車両の挙動は、大きく自由走行、追従走行、及び車線変更から構成される。以下、これらの各挙動モデルについて述べる。

## (2) 走行状態の判定ロジック

本シミュレーションモデルでは、走行速度 $V$ に応じた追従車頭距離 $S$ を与える関係( $S$ - $V$ 関係、図-2)を設定し、車頭距離が速度に応じた追従車頭距離の $\beta$ 倍( $\beta > 1$ )の値を超える場合に自由走行、それ以下の場合を追従走行と判定している。また、シミュレーション内では、追従車が先行車の挙動に反応しきれず衝突してしまう状況が生じざるを得ないため、この場合には車頭距離が追従車頭距離となるよう車両位置の補正処理を施している。なお今回は、 $\beta=2.0$ としている。

## (3) 自由走行モデル

自由走行状態にあり、かつ希望速度との差が $\pm\delta_1$ km/h以内、もしくは制限速度超過量が $\delta_2$ km/h以下である場合には、車両重量 $W$ kgf、加速度 $a$ m/sec<sup>2</sup>と勾配 $\theta$ の力学

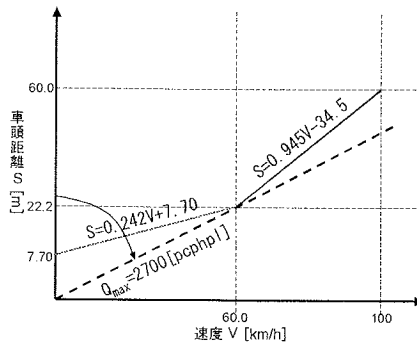


図-2 S-V式の設定

的關係に基づいた式(1)により加速度が決定される。式(1)のパラメータは、今回の試験走行車両の重量ならびに自由走行時の加速度と前後傾斜角との関係から推定したものである。

$$\alpha = \left\{ \frac{1}{W} (1.57 \times 10^2 \theta - 53.1) - \sin \theta \right\} g \quad (1)$$

ここに、 $g$ は重力加速度である。

上記以外の場合には、事前設定した一定値で加速もしくは減速を行う。なお今回は、 $\delta_1=20$ 、 $\delta_2=20$ と設定している。

## (4) 追従走行モデル

本研究で用いる追従走行モデルは、縦断勾配の影響を表現できることが望ましい。そこでここでは、GMモデルの名で知られるGazisら(1961)の追従モデルを基本とし、これに縦断勾配、特に上り勾配による速度低下の影響を反映可能な構造のモデルを考える。越<sup>6)</sup>は、縦断勾配のほか、希望速度や目標車間距離を説明変数に加え、高速道路のサグやトンネルの陥路現象を記述することを意図した複雑なモデルを提案しているが、本研究では、データの取得可能性、パラメータ推定の容易さを考慮して、式(2)を用いて時刻 $t$ における追従車の加速度 $\alpha_F(t)$ を簡便に求めることとした。

$$\alpha_F(t) = k \cdot \left\{ \frac{V_F(t-\tau)}{X_L(t-\tau) - X_F(t-\tau)} \right\}^l \times [\exp \{ \theta(t-\tau) \}]^m \times [V_L(t-\tau) - V_F(t-\tau)]^n \quad (2)$$

ここに、

$X(t), V(t)$ : 時刻 $t$ における位置[m], 速度[m/sec]

$\theta(t)$ : 時刻 $t$ における縦断勾配[%]

$k$ : 反応感度

$\tau$ : 反応時間[sec]

$l, m, n$ : パラメータ

であり、添字 $L, F$ はそれぞれ先行車、追従車を示す。式(2)は、GMモデルに縦断勾配に応じた係数を乗ずる形を取っているため、両辺に対数をとることによって線形重回帰によりパラメータを推定することができる。

パラメータ $m$ が負であれば、上り勾配では加速度が小さく、下り勾配では大きくなり合理的である。なお、減速度についても、上りで小さめに、下りで大きめになってしまうが、縦断勾配が数%の場合には減速時の影響は加速時に比較して小さいと考えられること、本研究の趣旨から上り勾配での加速度低下の影響を反映させることを重視することから、式(2)をそのまま用いることとする。

追従モデルのパラメータは、乗用車については走行調査で得られたデータから推定したものを基本とするが、これをそのまま用いたのではシミュレーションで追突が頻繁に発生する。また大型車については、加減速度を乗用車よりも小さく設定する必要があるが、挙動データが得られていない。そこでここでは、追突がなるべく発生せず、かつ衝撃波伝播の状況が実態と乖離しないこと、ならびに大型車の加速度は乗用車よりも小さいこと、を条件として、パラメータのチューニングを施した。衝撃波伝播速度のチェックについては、一定の間隔で車両を発生させた後、先行車を停止するまで等加速度で減速させ、再び発進させた際の後続車への衝撃波の伝播速度を理論値と比較することでやっている。このようにして、最終的に設定したパラメータを表-1に示す。

表-1 追従モデルのパラメータ設定値

項	パラメータ設定値	
	乗用車	大型車
反応時間[sec] $\tau$	0.8	0.8
反応感度 $k$	0.3	0.2
速度/車間距離[sec <sup>-1</sup> ] $l$	-0.3	-0.8
exp(縦断勾配(%)) $m$	-0.124	-0.124
相対速度[m/sec] $n$	0.4	0.4

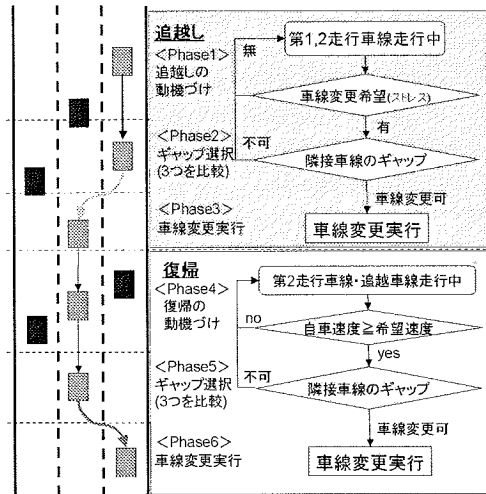


図-3 車線変更ロジックの概要

### (5)車線変更モデル

走行車線を走行しているドライバーは、自車走行環境にストレスを感じ、先行車を追越そうとするとき、図-3に示す3段階の判断手順を踏んでいると仮定する。すなわち、

<Phase 1>追越しの動機づけ(車線変更希望)

<Phase 2>隣接車線のギャップを探索

<Phase 3>車線変更を実行

であり、同様に追越車線から走行車線へ復帰する際は、

<Phase 4>復帰の動機づけ

<Phase 5>隣接車線のギャップを探索

<Phase 6>車線変更を実行

の3段階を仮定する。

#### a)車線変更の動機づけ(Phase1, 4)

追越しの場合、次節で述べる車線変更希望モデルにおいて、車線変更希望が選択された場合に追越しを希望し、また復帰の場合は、走行速度が自車の希望速度に達した場合に復帰を希望した上で、それぞれ次のステップの隣接車線におけるギャップ探索行動へ移行する。

#### b)隣接車線のギャップを探索(Phase2, 5)

車線変更を希望したドライバーは、自車の走行している車線から隣接車線へ移行を図るために、隣接車線のギャップを探索する。中村ら<sup>3)</sup>は、織り込み区間を

対象として、「車線変更に際しては、隣接車線前方・後方の車両と自車との車頭距離相対変化率(1/TTC)の和が最小となるようなギャップを選択する」とした、ギャップ選択モデルを提案している。

本研究ではこのロジックを導入し、隣接車線のギャップ探索挙動を表現する。選択されたギャップへの車線変更が性能上可能な加速度で実現可能である場合には、最終段階の車線変更実行に移行する。なお、ギャップ探索中に走行環境に変化が生じ、車線変更希望が解消した場合には、通常走行に戻る。

#### c)車線変更実行(Phase3, 6)

ギャップ探索の後、目的のギャップへの流入に見合うよう加速度を調節し、車線変更を実行する。

#### (6)車線変更希望モデル

車線変更希望の表明から車線変更の実行までの間(Phase 2)は、走行環境が改善されない限りにおいてドライバーはストレスを感じ続け、車線変更希望が継続している状態と考えることができる(図-1)。そこで、車線変更希望を表明しストレスを感じている間、および車線変更を希望しない状況における走行状態のデータを用いて、非集計二項ロジットモデルを適用して車線変更希望の有無を表現するモデルを推定した。ここで用いる走行状態データとは、速度、車間距離、傾斜

角など、試験走行車両により時々刻々観測されるものである。

表-2に、このモデルのパラメータ推定結果を示す。ここで希望速度は、各ドライバーの自由走行状態における速度データに基づき設定して用いている。各説明変数はいずれも有意であり、符号条件はいずれも合理的な結果である。走行速度が希望速度より低い、車間距離が小さい、あるいは先行車が大型車で縦断勾配がきつい場合などにおいて、ドライバーはストレスを感じ易く、車線変更の希望をすることがわかる。特に個人差による影響から尤度比の低い結果となっているが、個人属性に関わる変数を取り込むと後で行うシミュレーション実験が困難となることから、今回は個人属性に関するセグメンテーションの導入等の処置は取らないこととした。

なお、車間距離の相対変化率、追従走行継続時間×(1/車間距離)などについても説明変数として取り込むことを試みたが、いずれも有意な結果が得られず、先行車が大型車であることを明示的に扱うことのできる表-2の説明変数に落ち着いた。追従走行継続時間は有意になることが当初予想されたが、速度によっては追従状態であっても必ずしもストレスを感じていない状態が少なからず存在するため、有意にならなかったものと考えられる。

図-4は、走行調査における時々刻々の走行状態データを本モデルの効用関数に入力して求めた瞬間効用値の、3kmの小区間ごとの集計値を示したものである。また、走行調査に際してドライバーが回答した3kmごとの小区間における交通状況に対する満足度を定量化<sup>2)</sup>した値を併せて示している。これより、車線変更希望モデルの効用関数値の変化が、主観評価値の変化と概ね似た傾向で推移しており、ドライバーの快適性評価の代理指標として適用することの妥当性を示している。

本研究では、以上のようなモデルで構成されるシミュレーションの出力結果が、実現象に整合するよう検証しながら、各種設定パラメータにチューニングを施している。その概要を次章で示す。

## 5. シミュレーションモデルの基本的機能の確認と実データを用いた再現性の検証

シミュレーションモデルを適用するためには、4章で述べた各モデルの基本的機能が忠実に再現されているかのチェック(verification)を行い、この確認の後、実現象の再現性に関する検証(validation)を行う必要がある。

そこで、車両の発生と衝撃波の伝播速度についてシ

表-2 車線変更希望モデルのパラメータ推定結果

説明変数	パラメータ(値)
定数項	-0.227(-2.05)
速度-希望速度[m/sec]	-0.310(-10.5)
車間距離[m]	$-5.89 \times 10^{-3}(-6.81)$
(先行大型車ダミー)×縦断勾配[%]	0.767(4.80)
$\rho^2$ 値	0.121
的中率[%]	66.9

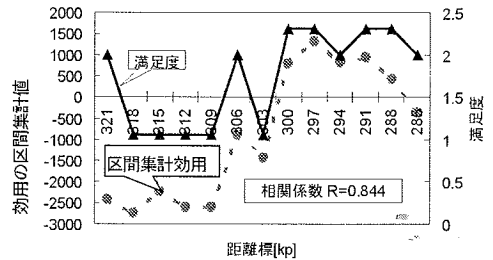


図-4 車線変更希望モデル効用関数の区間集計値と満足度

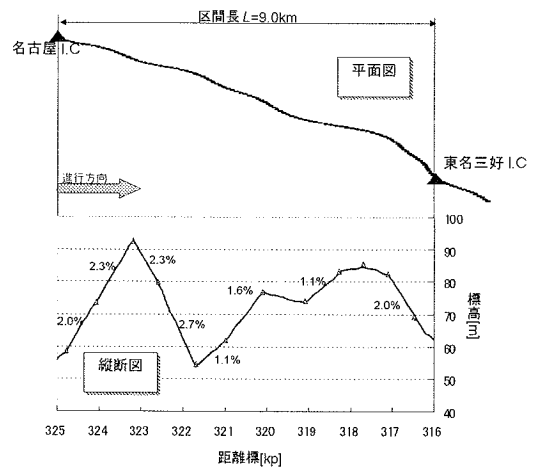


図-5 シミュレーション演算に用いる道路区間の縦断勾配

ミュレーションの基本的機能の確認を行う。また、再現性の検証に際しては、図-5に示す東名高速道路名古屋I.C～東名三好I.C間上り(9.0km)の縦断線形を用いる。この区間は、適度な縦断勾配を持った典型的な高速道路単路部区間であり、さまざまな交通運用状態が実現していることから、ケーススタディ区間の構造条件として採用する。なお、大型車混入率は25%で統一し、結果の表示においては「道路の交通容量<sup>7)</sup>」における縦断勾配3%以下、大型車混入率30%のときの大型車の乗用車換算係数1.7を用いて乗用車換算台数(pcu)単位で示す。

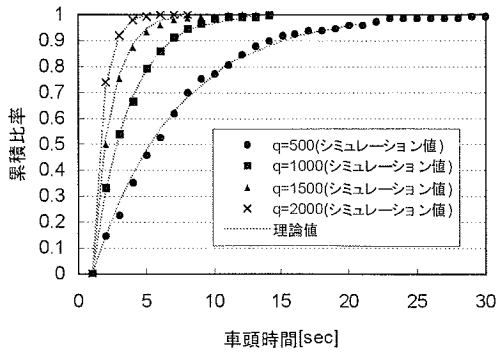


図-6 発生車頭時間分布の理論値とシミュレーション値

### (1)シミュレーションの基本的機能の確認

#### a) 車両の発生

本シミュレーションモデルでは、車頭時間分布が指数分布に従うと仮定して車両を発生させている。最小車頭時間を $h_0=1\text{sec}$ 、交通需要 $q\text{台/h}$ における発生車頭時間 $h\text{[秒]}$ を式(3)により決定する。

$$h = h_0 - (3600/q - h_0) * h(\text{RND}) \quad (3)$$

ここに、RNDは0~1の間に一様分布する乱数である。

図-6に、式(3)で与えられる車頭時間の理論値と、シミュレーション上で実際に発生した車両の車頭時間の分布を示す。これより、想定した分布に従った車頭時間で車両が発生していることが確認される。

#### b) 衝撃波の伝播速度

図-7の矢印に示すように、交通流が近飽和の状態Aから渋滞流の状態Bに遷移したと想定した場合に得られる衝撃波の伝播速度の理論値と、シミュレーション値との比較を行う。このとき、図-7における非渋滞流領域の曲線は、分合流の影響を受けないと考えられる東名高速上り322.3kpの車両感知器による交通量-地点速度の実測値から推定したものである。渋滞流領域については、この地点における渋滞流領域のデータがほとんど得られていないため、停止時の交通密度を80台/kmとして最大交通量の点とこの点を直線で結んだものである。

また、図-8に、シミュレーションで図-7のA点の状態であっていた車群の先頭車が、B点の状態に減速したときの時間-空間図を示す。これより、衝撃波の伝播速度の理論計算値は上流方向へ約27.5km/hであり、シミュレーション値は図-8から読み取ると約25.9km/hであることから、衝撃波の伝播が概ね再現されていることがわかる。

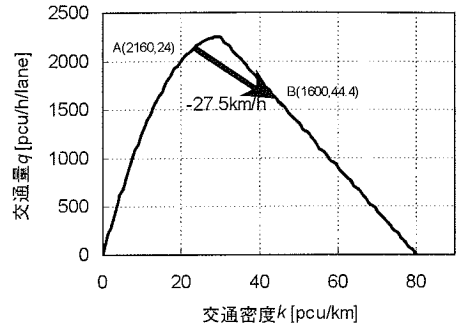


図-7 交通量と密度の関係

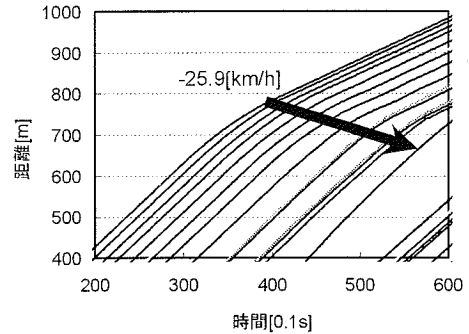


図-8 衝撃波伝播の再現状況

### (2)実データを用いた再現性の検証

本研究では、ドライバーのおかれた走行環境に基づくストレスと車線変更挙動を密接に関連付けていることから、シミュレーションでは交通量-速度関係といった基本的特性はもとより、特に各車線の利用状況や車線変更などを的確に再現する必要がある。

そこで、車線利用率、平均地点速度、追越し回数等の3項目について、走行調査や車両感知器による実測値とシミュレーション値との比較を行い、本モデルの再現性の検証を行う。検証に用いた車両感知器のデータは、上り322.3kpにおける走行調査当日の15分間データである。また、シミュレーションにおいては、区間の上流端から各演算条件の交通量を入力し、先頭車が下流端を流出した後、定常状態となった時点から、当該地点や区間全体における計算値を出力している。なお、シミュレーション結果は、ランダムシードを変えて行った3回の演算結果の平均値である。

#### a) 車線利用率

図-9に、15分間交通流率と車線利用率の関係を示す。これより、本シミュレーションにより各交通量レベルにおける車線利用率が適切に再現されていることがわかる。

### b) 平均地点速度

図-10に、15分間交通流率と平均地点速度の関係を示す。これより、3500pcu/h程度までは、交通流率の増加に伴う速度の低下が緩やかであり、その後、4000pcu/h付近から交通流率の増加に伴い急激に速度が低下する様子が再現されている。なお、交通容量は4450pcu/hとなり、実測値と概ね一致する。

### c) 追越し回数比率

10km走行あたりの追越し回数を追越し回数比率として定義し、これと15分間交通流率との関係を図-11に示す。ここで、追越し回数比率の実績値のプロットは、試験走行車両に登載されたビデオカメラ画像から読み取った10kmあたり追越し回数の平均値を、車両感知器から得られた走行調査時の交通量に対応させて示したものである。これより、シミュレーション結果では特に高い交通量レベルで追越し回数比率が少なめの結果となっているが、概ね妥当な傾向を示している。

## 6. 高速道路単路部におけるサービス水準評価

### (1) 効用値の集計平均による区間走行快適性評価

以上の交通流シミュレーションを用いて、交通量レベルに応じた、走行快適性について分析を行う。ケーススタディとして、前章と同様、図-5に示す道路構造の区間全体を対象として様々な交通量条件での演算を行う。各車両の瞬間快適性評価には、車線変更希望モデルの効用関数の値を用いる。区間評価に際しては、通行する各車両の瞬間走行効用の区間積分値を通過交通量で除すことにより得られる、式(4)の平均効用値を用いる。

$$\bar{U} = -\frac{1}{q} \sum_i^q \int_{t_{0i}}^{t_{0i}+T_i} u_i(t) dt \quad (4)$$

ここに、

$u_i(t)$  : 時刻 $t$ における車両 $i$ の車線変更希望モデルの効用関数、

$t_{0i}$  : 車両 $i$ が当該区間に流入した時刻、

$T_i$  : 車両 $i$ の当該区間における旅行時間、

$q$  : その区間の下流端から流出した交通量、

である。

### (2) 交通量レベルと平均効用値の関係

図-12に、図-5の区間を対象として行ったシミュレーションによって得られた、15分間交通流率と平均効用値との関係を示す。各プロットは、ランダムシーズを変えて行った3回の演算結果の平均値である。交通量レベルが上がるに従って、全体的に平均効用値が低下し

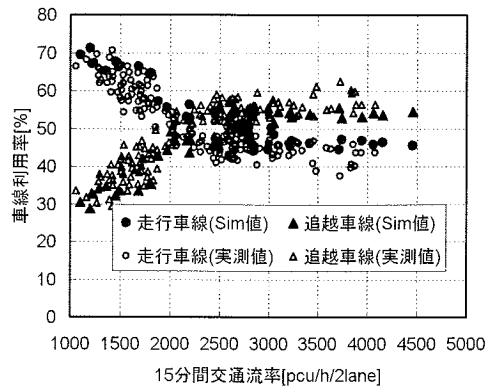


図-9 交通流率－車線利用率関係

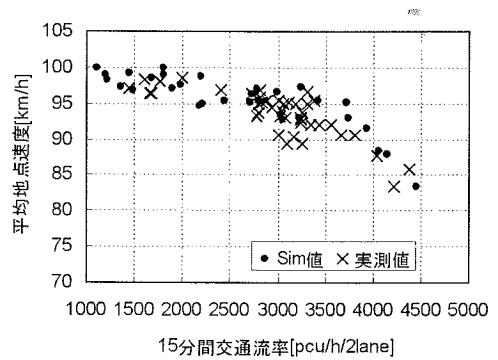


図-10 交通流率－地点速度関係

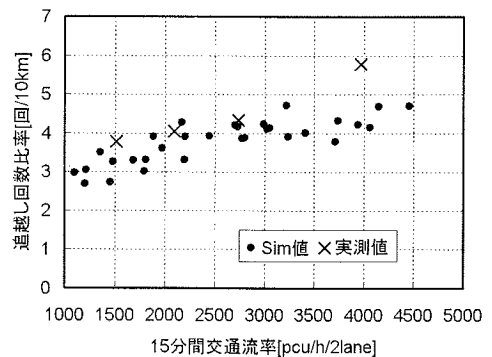


図-11 交通流率－追越し回数比率の関係

て行くことが示されている。しかしながら、平均効用値といった概念的な無次元の数値の絶対量だけでは、それが一体どのような走行環境なのか示すことができない。このため、各平均効用値における、外部観測可能な交通状態量と対比させて走行性を解釈することが



重要となる。

なお、大型車の平均効用値が普通車のそれを常に上回っているが、これは大型車の希望速度が普通車に比較して低いためである。今回の車線変更希望モデルは、普通乗用車によって収集したデータに基づいているが、大型車ドライバーは同じ走行状態に対して普通車ドライバーとは異なった認識を持っている可能性がある。このため、今回算出された大型車の平均効用変化については、あくまで参考程度と見るべきである点に注意を要する。

普通車の平均効用値の変化に着目すると、交通流率が約1300pcu/hのとき、平均効用値が0となるのがわかる。これは、普通車ドライバーが平均して区間旅行時間の50%ほどの間、あるいは全普通車ドライバーの50%が区間全体でストレスを感じる状態であると解釈することができる。

また、交通流率が2250pcu/hを超えると平均効用値が大きく低下している。これは、交通量の増加により、走行車線の利用のみではストレスを感じるドライバーの割合が増えているためであると考えられる。このことは、図-9に示すように、このときの車線利用率が走行車線、追越車線で均衡している状態となっていることから示唆される。

その後、交通流率の増加に伴い、平均効用値にあまり変化が見られなくなるが、3250pcu/hを超える交通量となると再び低下し始めるのがわかる。このときの交通量-交通容量比( $w/c$ )は、 $3250 \div 4450 = 0.73$ であるが、この程度まで混雑し始めた段階で、行動の自由度がかなり妨げられるようになることを示している。このことは、図-11に示すように、交通量の増加に伴って追越し回数比率が増加しなくなっていることから裏付けられる。

さらに、交通流率が4000pcu/hを超えると、平均効用値が大きく落ち込む。このとき、走行速度が急速に低下し、不安定な交通状態となることが図-10からもわかる。

以上のように、本手法を用いることにより、各交通運用状態における走行快適性の相違を、平均効用値という客観的計測値に基づき評価することができた。なお、本モデルにより算出される効用値は、車線変更モデルの説明変数の一部として設定されている希望速度の大小によって変化することは言うまでもない。希望速度の平均値を変化させると、図-12のプロットが上下に移動するが、交通量の増加に伴う平均効用の変化の傾向はいずれも同様であった。希望速度の標準偏差は、その値を大きく設定すると極端に効用の大きい、あるいは小さい車両が出現することになるが、平均効用値に対してはほとんど感度がない。本節で示した車

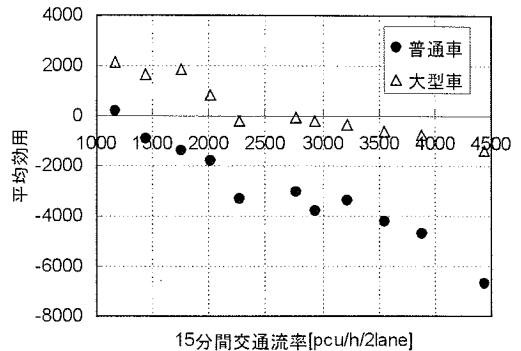


図-12 交通流率と区間平均効用値との関係

線利用率などの実観測可能な状態量と算出された平均効用値との対応関係を考えると、今回の乗用車の希望速度の設定値はほぼ妥当であったと考えられる。

また本研究の結果は、僅か12名の被験者による限られた区間における走行調査データに基づいたものであり、また大型車ドライバーの認識を必ずしも適切に表現するものではないため、これらの点については改良の余地が残されている。

### (3) HCM2000によるサービス水準との対応

表-3に、前節で述べた平均効用値に変化の見られる交通流率と交通容量である、1300、2250、3250、4000、4450pcu/hのときの走行快適性と交通状況との対応関係を、HCM2000<sup>8)</sup>における自由走行速度FFS=100km/hの各サービス水準(LOS)の上限値と対比してまとめる。表中ではすべて1車線あたりの値で示している。本研究で平均効用値に変化の見られた交通流のときの $w/c$ 比は、それぞれ0.29、0.51、0.73、0.91であるが、これらの値は偶然にもHCM2000で定義したLOS A~Dの最大 $w/c$ 比にほぼ対応している。また、交通流の飽和度が高くなり速度が低下する状態である、HCMのLOS D、Eの上限における速度も、本研究で示した図-10の対応する交通量における速度にそれぞれ概ね一致する結果となった。

以上のように、ドライバーの瞬間的なストレスを間接的に計測し、これを区間で集計平均することにより求めた平均効用値と交通流率の関係における平均効用値の変化する各点は、HCM2000における各サービス水準上限値に対応する結果となったことは興味深い。ただし本研究は、高速道路の非渋滞流における利用者の認識する快適性を計量する手法の開発を目指したものであり、わが国と特性の異なる交通を対象としたHCMにおけるLOS設定を追認することが目的ではないことを付記しておく。行動の自由度に関して何ら定量的根拠のないHCMにおけるLOS設定値を例として、本研究の手法を用いることで、非渋滞流における任意の交通

表3 走行快適性と交通状況、LOS との関係

本研究の平均効用値変化点			HCM2000 (FFS=100km/h) <sup>9)</sup>				
1車線あたり 交通流率 $q$ [pcu/h/lane]	交通量- 交通容量比 $v/c$	走行快適性と交通状況との対応	サービス 水準 LOS	最大 交通密度 [pcu/km/lane]	最大交通密 度のときの 速度 [km/h]	最大 サービス 交通流率 [pcu/h/lane]	最大交通量 -交通容量 比 $v/c$
650	0.29	・ ドライバーが区間旅行時間の50%の 時間ストレスを感じる	A	7	100.0	700	0.30
1125	0.51	・ 走行車線と追越車線の車線利用が均 衡 ・ 平均効用値が大きく低下	B	11	100.0	1100	0.48
1625	0.73	・ 平均効用値が再び低下傾向 ・ 追越し回数比率の増加傾向が収束 し、車線変更の自由度が低下	C	16	100.0	1600	0.70
2000	0.91	・ 平均地点速度が急激に低下	D	22	93.8	2065	0.90
2225	1.00	・ 可能交通容量	E	28	82.1	2300	1.00

状況に対して行動の自由度に関する指標を対応付けられることを示したものである。結果的に、交通量-速度( $q-v$ )曲線の交通容量と原点を結ぶ直線と速度軸(縦軸)で囲まれた非渋滞領域を、単純に原点と曲線上の各点を結ぶ直線の傾き(交通密度)の増分がほぼ等しくなるよう分割することによって定義されたに過ぎないHCMによるLOSの閾値に、図らずも意味を持たせることとなった。

## 7. おわりに

### (1) 結論

本論文では、まず、ドライバーのストレスを間接的に計測することによる、利用者の認識を反映したサービスの質の計量方法について述べた。

そして、走行調査データに基づき、高速道路単路部における各種の車両挙動モデルを推定し、これらを組み込んだ微視的交通流シミュレーションモデルを構築した。車線変更のモデル化に際しては、自車の走行環境に応じたストレスの変化と車線変更との因果関係を明示的に表現する構造とし、車線変更希望モデルの効用関数を用いて、ドライバーストレス、すなわち快適性の低下の計量が可能であることを示した。効用関数の利用という間接的な計測方法による走行快適性評価値は、ドライバーの表明する主観的快適性評価値と同様の傾向を示すことが確認できた。また、実データを用いて、片側2車線高速道路区間における本シミュレーションモデルの再現性の確認を行ったところ、実現象を適切に再現可能であることが示された。

以上のシミュレーションモデルを用いて、非渋滞領域における様々な交通量レベルの交通状況を再現し、それぞれに対する区間平均効用値を算出した。その結

果、交通量レベルの増加に伴い区間平均効用値が減少し、とりわけ、交通量-交通容量比が0.5および0.7付近で走行快適性が急激に低下することわかった。これらの交通状況は、前者は走行車線と追越車線の車線利用率がほぼ均衡する運用状態、後者は自由な車線変更が困難になる運用状態である。本手法を用いることにより、各交通運用状態における走行快適性の相違を、平均効用値という客観的計測値に基づき評価することができた。

最後に、走行快適性と交通運用状態との関係を整理し、参考のためHCM2000によるLOSの上限値とも比較を行ったところ、本研究におけるドライバーの走行快適性変化の観点からみた交通運用状態の境界は、HCMの非渋滞領域におけるLOS A~Eの境界とほぼ一致した結果となった。

### (2) 今後の課題

本論文で走行快適性の評価と交通運用状態の関係を示したのは、ケーススタディとしてのある一単路部区間での結果にとどまっている。縦断線形の変化や車線数の異なる構造での評価を行い、より一般化する必要がある。また、今回は調査データの制約から縦断線形を除き道路構造条件による感度のあるモデルとすることができなかったが、車線幅員の大小や平面線形など様々な道路構造について、利用者の走行快適性からの評価を行うことが望まれる。

また、今回は特に道路の新設や改築などの計画段階での検討を想定し、非渋滞流におけるサービスの質を利用者の観点から評価を行ったが、特に運用段階においては、渋滞流におけるサービスの質の計量と評価が極めて重要である。自由な移動が拘束される渋滞流では、ドライバーは交通流のサービスの質を自由流とは全く異なった観点から評価していると考えられ、この

ような利用者の評価構造の分析が今後の大きな課題である。

謝辞：本研究を進めるに際して、試験走行車両貸与の便宜を図っていただいた、建設省土木研究所(現・国土交通省国土技術政策総合研究所)ITS研究室、AHS研究組合、ならびに走行調査に協力していただいた、日本道路公団中部支社名古屋管理局、㈱オリエンタルコンサルタンツをはじめとする多くの方々に謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 中村英樹, 劉 俊晟：道路の提供するサービスの質とその計量, 土木計画学研究・講演集 No23(1), pp.756-757, 2000.11.
- 2) 中村英樹, 加藤博和, 鈴木弘司, 劉 俊晟：ドライバー主観の計量による高速道路単路部のサービスの質の定量化とその要因分析, 土木計画学研究・論文

集 No.17 pp.941-946, 2000.9.

- 3) Sultan, B., McDonald, M.: The lane changing process: data analysis & modeling behaviour, Traffic Engineering and Control, pp.202-207, 2001.6.
- 4) 喜多秀行, 平泉 顕：道路のサービス水準指標算定のためのシミュレーション分析, 第16回交通工学研究発表会論文報告集, pp.121-124, 1996.11.
- 5) 中村英樹, 桑原雅夫, 越 正毅：織り込み区間の交通容量算出シミュレーションモデル, 土木学会論文集, No.440/IV-16, pp.51-59, 1992.1.
- 6) 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.
- 7) (社)日本道路協会：道路の交通容量, pp.31, 1984.
- 8) Transportation Research Board: Highway Capacity Manual 2000, pp.23-3, 2001.

(2003.7.9 受付)

## EVALUATION OF LEVEL OF SERVICE IN BASIC EXPRESSWAY SECTIONS BASED ON INDIRECT MEASUREMENT OF DRIVER'S MENTAL STRESS

Hideki NAKAMURA, Koji SUZUKI and Shunsei RYU

This paper discusses evaluation of quality of service (QOS) of traffic flow, which is one of the major concerns for highway planning and traffic management, from the aspect of driver's perception or comfort. It is shown that the driving comfort can indirectly be measured as driver's mental stress, through modeling the lane-changing behavior. Based on data obtained from a driving survey, several models for vehicular movement in basic expressway sections are estimated, and a traffic simulation model incorporating these models is developed. From the simulation results for various traffic flow levels under unconstrained flow conditions, a relationship between level of service and driver's comfort is shown.