

運転者が認識する遅延ストレスと事故リスクに着目した道路の交通性能指標

渡邊 友崇¹, 松村健志², 四辻 裕文³, 喜多 秀行⁴

¹正会員 阪神電気鉄道株式会社 (553-8553 大阪市福島区海老江1丁目1番24号)

E-mail: 1991tomotaka@gmail.com

²学生会員 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: 162t136t@stu.kobe-u.ac.jp

³正会員 神戸大学自然科学系先端融合研究環重点研究部 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: yotsutsuji@prople.kobe-u.ac.jp

⁴正会員 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: kita@crystal.kobe-u.ac.jp

本研究では、現在検討が進んでいる「性能照査型道路計画設計手法の枠組み」に沿って道路区間の交通性能を評価できる、ドライバー視点の性能指標を構築する。先行研究で提案したドライバー視点の走行環境評価モデルを改良した新たな指標を提案し、交通観測データから性能指標値を算出するためのプロセスをも併せて提示した。

指標のパラメータを特定するためにドライビングシミュレータ実験を行い、得られたデータを用いてモデルのパラメータを推定し、これまで性能評価指標として提案されている旅行速度よりもドライバーの認識・評価をより適切に説明しうることを確認した。これによりドライバーの評価を適切に捉えた性能指標での性能照査を可能とした。

Key Words : Performance Measure, Road Maintenance, Driver's Perception, Delay Stress, Accident Risk

1. はじめに

日本における道路整備は一定の量的ストックは形成されたとされ¹⁾、量を指標としてみると道路整備はある程度充足されたように見える。

しかし、道路交通サービスの質に目を向けると、幹線道路における旅行速度は依然として極めて低いレベルにあり、交通容量の不連続性による交通渋滞も一向に解消されていない²⁾。道路には通行機能などさまざまな機能があるが、現状ではその機能が十分に発揮されているとは考えがたい。

また、道路整備の評価に際しては、直接的な利用者であるドライバーにとって、どの程度走りやすさが向上したかを抜きにして論じることはできないが、ドライバーから見た走行環境評価については不明な点が多い。道路交通サービスの質を向上させるためには、サービスの受け手であるドライバーの認識や評価を適切に捉えた指標をもとに整備する必要があると考える。

既に喜多ら³⁾はドライバーの認識を取り込んだ道路

の性能指標である「行きやすさ」を性能照査型設計において活用するための方法論を提案している。この「行きやすさ」は、「瞬間効用を用いた走行環境評価モデル」を改良し、道路上に設置されたトラフィックカウンターから得られるデータを用いて簡潔に算出できる指標である。

しかし、①自由流から渋滞流へといったような交通状況が遷移する区間に適用できない、②提案されている性能照査型道路計画設計手法の枠組み⁴⁾に沿って「複数リンクからなる拠点連絡」を評価しうる構造になっていない(順序効果を考慮した指標であり、単純にリンクごとの評価値を足すことができない)といった問題点があり、実際の道路で適用することは難しい。

そこで本研究では、現在検討が進んでいる性能照査型道路計画設計手法の枠組み⁵⁾に沿って、性能を評価できる性能指標を構築することを目的とする。既存の性能指標の問題点を考慮し、どのような交通状況の道路でも指標値が導出でき、「複数リンクからなる拠点連絡」を評価しうる構造を有する性能指標を構築する。これにより、どの道路を優先的に整備するかを検討する際に、既

存の道路同士の優劣が容易に判断できるようになる。

具体的には、渡邊ら⁹⁾のモデルを改良し、交通データから道路の性能を評価する、遅延ストレスと事故リスクに着目した交通性能指標を提案する。このモデルは、目的地への到着遅れ時間が結果的に同じであっても、その遅れが出発直後に生じた場合には到着直前に生じた場合よりも遅延ストレスが長時間にわたって累積し、評価値が低くなるといった評価特性を有しており、喜多³⁾でブラックボックスとなっていたある種の順序効果の京成構造をモデル化したものとなっている。渡邊ら⁹⁾では①現象説明力が十分検討されていない、②「複数リンクの拠点連絡」の場合が明確に検討されていない。本研究では、指標のパラメータを特定するためにドライビングシミュレータ実験を行い、得られたデータを用いてモデルのパラメータを推定し、現象説明力を確認する。提案する指標がドライバーの評価を的確に表現できていることを確認した後、交通データから性能指標値を導出するまでの過程を提示する。また、提案した性能指標が既存の性能指標よりもドライバーの評価を的確に表現している事を示す。

2. 既往研究

(1) 性能照査型道路計画設計手法

交通工学研究会の基幹研究課題⁴⁾の中で提案されている性能照査型道路計画設計手法を示す。おおまかな流れは以下の[1]~[7]である。[1] 交通機能(トラフィック機能とアクセス機能)を考慮した階層区分を設定する。[2] [1]の階層区分と対応した性能目標(サービス水準 LOS)の設定する。[3] 交通需要予測や需要管理戦略により、その道路の計画交通量(AADT)や大型車交通量など基本的な交通条件が、従来の手順に準じて前提条件として与えられることを想定し、それらの情報から交通量の時間変動などの交通特性の詳細を推定する。[4] [1]の階層区分で決められた交通機能に対応した道路と交通運用を想定し、それに応じて道路交通性能を表現する性能曲線(時間交通量-速度曲線など)を準備する。[5] [3]の交通特性を[4]に入力し、その道路で実現する交通状況を推定する。[6] [5]で推定された交通状況が、[2]で設定された性能目標(サービス水準 LOS)を満たしているか照査・評価を行い、その道路構造・交通運用の可否を判定する。[7]性能が満足されていない場合は、[4]の段階へ戻って道路構造・交通運用について再考する。ただしこのとき、道路構造や交通運用のみではどのような対策を取っても性能目標が担保できないことも生じうる。この場合には、拠点配置や道路ネットワーク計画そのものにそもそも無理があることを意味し、これらを見直す必要があること

になる。

この手法の流れの下、サービスの質の考慮については、数ある提供すべきサービスや指標の中から、まずは自動車の移動サービスに特に着目し、旅行速度を代表的指標として考慮することとしている。性能照査型道路計画設計を実際に行っていくためには、道路の機能に応じた道路階層区分を明確にしたうえで、それらに対応した性能目標を設定する必要がある。道路が拠点間を有機的に連絡するという拠点連絡性の視点に立てば、拠点間の連絡は、大都市から集落・住区といった様々な拠点階層が相互に、高速道路から日常の生活の基盤である生活道路に至る、それぞれに相応しい階層の道路によって実現されるべきである。拠点は、それが有する施設や機能に応じて、表-1のように階層的に設定できる。この拠点階層に応じて、個別の施設から各拠点への目標旅行時間および同一階層の隣接拠点間の目標旅行時間を表-2のように設定し、この達成を目的に道路ネットワークの計画・設計・運用を行わなければならないとしている。この概念を図にしたのが図-1である。

表-1 拠点階層と有する施設・領域⁴⁾

拠点階層		拠点施設 Facility		拠点領域 Area		拠点領域の具体例	
		略称	具体例* (機能と対応)	略称	めやすとなる範囲		三大都市圏内の場合
大都市拠点	三大都市圏	MEF	のぞみ停車駅、国際空港など	MEA	第二環状道路内部	東京、名古屋、大阪	-
	ブロック中心都市				都市域	仙台、新潟、広島、福岡など	-
高次都市拠点	完結型	UUF	ひかり停車駅、県庁/政令指定市役所、地方空港、第三次医療施設、国公立大学、百貨店など	UUA	市街化地域	秋田、千葉、浜松、京都、神戸、岡山など	新宿、品川、栄、梅田、難波など
	相互補完型					花巻+奥州+一関、松江+米子、三島+沼津など	-
	生活拠点	LUF	駅、市役所、一般病院、大型ショッピングセンター、高等学校など	LUA	中心市街地(DID地区)	伊豆、下田、一宮、多治見など	中野、高円寺、金山、千里など
	小さな拠点	SMF	小中学校、旧役場庁舎、スーパーマーケット、JA、バスターミナル、診療所など	SMA	学区	旧町村、学区など	学区など
	集落・住区	CMF	集会所、自治会	CMA	住区・集落	XT目など	XT目など

*上位の拠点はそれより下位の拠点で提供される機能(施設)を包含することを前提とする。

道路ネットワーク全体が目指すべき性能は、①個別施設から各拠点施設への目標旅行時間および②同一階層の隣接する拠点施設間の目標旅行時間によって設定される。この目標旅行時間が達成されるように拠点間を連絡する各道路の目標旅行速度を定め、目標旅行速度が達成されるように設計・運用を行う。

以上が、提案されている性能照査型道路計画設計手法である。

表-2 目標旅行時間⁴⁾

拠点階層	目標旅行時間	
	①個別施設から拠点*まで	②同一階層の直近拠点*まで
大都市拠点 MEC	≦3.0h (3.5h)	≦3.0h
高次都市拠点 UUC	完結型	≦1.5h
	相互補完型	≦1.0h (2.5h)
生活拠点 LUC	≦30min (45min)	≦45min
小さな拠点 SMC	≦15min (30min)	≦20min
集落・住区 CMC	徒歩圏内	徒歩圏内

*拠点領域内の代表点(Center,代表点)を用いて評価する。

()内は山地部集落などで目標旅行時間達成が困難な場合の特例値。

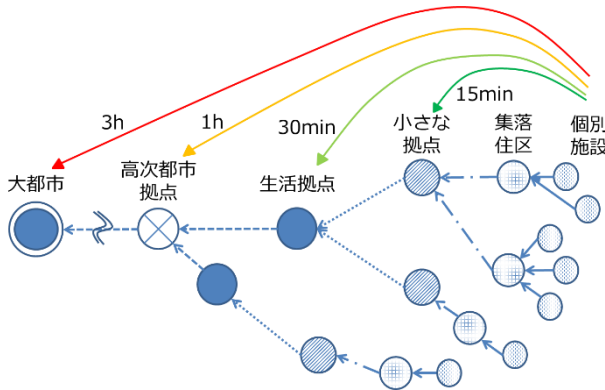


図-1 個別施設から拠点までの目標旅行時間の概念図⁴⁾

(2) 行きやすさ⁷⁾

2.(1)で示した性能照査型道路計画設計手法で性能指標として旅行速度を挙げている理由は、道路の本質的な目的が移動をするということであり、安全性の確保は前提条件であるとし、通行（トラフィック）機能の程度を表現するには、速度が最も端的でわかりやすいためであるとしている⁷⁾。

しかし、ドライバーは時々刻々と変化する交通状況の下で注意と緊張を強いられて走行していると考えられ、安全性が確保されているという状態を前提条件とすることは必ずしも現実に即していないと考えられる³⁾。旅行速度のみで道路の性能を評価することは、道路を利用するドライバーの認識を捉えきれていない可能性があると考ええる。

このような考えのもと、浅香³⁾は道路の通行機能を構成する性能の中でも基本的な性能である円滑性・安全性に着目し、この両者を包含した性能評価指標である「行きやすさ」を提案している。この「行きやすさ」は、ドライバーが車で移動した先で目的を達成するために目的地へ早く、かつ走行中は安全に行けることを表現できるものであり、最低限、以下に示す条件を具備している必要があるとしている。①目的地までの実所要時間が、目標とする所要時間よりどれくらい多くかかるか（遅延の程度を適切に表現できているか）。②どの程度安全に

走行できるか。③走行する距離の差異。

この①～③の条件を「行きやすさ」は的確に反映しているものであると考えている。これらの条件を踏まえたうえで、「行きやすさ」の程度を表現しうるものとして次式に示す、「拠点間アクセシビリティ評価モデル」を提案している。

$$A = \varphi_1 \frac{S}{v_{goal}} + \varphi_2 \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left(V^t \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \right) + \varphi_3 V_{min} + \varphi_4 \quad (1)$$

- A : 拠点間アクセシビリティ評価値
- S : 距離(km)
- v_{goal} : 目標旅行速度(km/h)
- N : 走行区間内の地点数
- V^t : 地点tでの地点評価値
- i : 割引率(=0.01)
- V_{min} : 地点評価値の最小値
- $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$: パラメータ

しかし、この「行きやすさ」では、「複数リンクからなる拠点間の行きやすさ」を算出できないため、性能照査型道路計画設計手法の枠組み⁴⁾に沿って活用できない指標となっている。3つのリンク①～③からなる拠点間の行きやすさを算出する際、行きやすさは順序効果を考慮した指標であり、単純にリンクごとの評価値を足すことができないからである。また、交通状況によって変化するモデルのパラメータの傾向が明確でないため、自由流から渋滞流へといったような交通状況が遷移する区間に適用できないという問題点も存在する。

3. モデル

(1) 本研究の方針

ここからは、本研究で用いる渡邊ら⁶⁾によって提案されている遅延ストレスと事故リスクに着目した走行環境評価モデルを改良し、改良したモデル（以降、本モデル）について整理する。渡邊ら⁶⁾のモデルを用いるのは、瞬間効用モデルを用いた走行環境評価モデル⁸⁾⁹⁾よりも高い現象説明力が確認されていることに加えて、時間を累積的に扱っているため①交通状況によって指標値が算出できない、②複数リンクからなる道路ネットワークの性能指標値が算出できないといった既存性能指標の問題点を改善できるモデル構造を有しているからである。

(2) 地点評価モデル

渡邊ら⁶⁾が提案している地点評価モデルでは(3)式に示すように地点評価値が遅延ストレスと事故リスクにより構成されるとする。右辺第1項と第2項は周辺車両との事故リスク、第3項は遅延ストレスである。

$$V_{spot}^n = \alpha L_1^n + \beta L_2^n + \gamma E[u_n(\tau)] + \varepsilon \quad (3)$$

- V_{spot}^n : 地点 n での地点評価値
- L_1^n : 前方車両 1 と当該車両の衝突危険度 (PICUD) (m)
- L_2^n : 当該車両と後方車両 2 の衝突危険度 (PICUD) (m)
- $E[u_n]$: 地点 n における期待効用
- $\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon$: パラメータ

渡邊ら⁹⁾の実施した実験に加えて、本研究で実施し 4. で詳述するドライビングシミュレータ実験においても、ドライバーに地点評価値を 0~10 で表明してもらうにも関わらず、地点評価モデルである(3)式は線形であるため 0 以上にも-10 以下にも値をとる可能性がある。また、実際に道路を運転しているドライバーは迅速性・安全性ともにある程度の水準を超えれば評価は等しくなると考えられる。例えば、前方車両が自車両から 1 km先にある場合と 3 km先にある場合では、どちらも衝突の危険は全くなく、ドライバーにとって快適性は等しいと考えられる。このように地点評価値には上限と下限があると考える。

そのため、本研究では地点評価モデルの構造を改良し、(4)式を新たな地点評価モデルとして提案する。(3)式と

同様に、地点評価値を目的変数、前方と後方の PICUD、遅れに対する期待効用を説明変数として、ロジスティック回帰モデルを構築した。

$$V_{spot}^n = \frac{-10}{1 + \exp[-\alpha - \beta E\{u_n(\tau)\} - \gamma L_1^n - \delta L_2^n]} \quad (4)$$

- V_{spot}^n : 地点 n での地点評価値
- L_1^n : 前方車両 1 と当該車両の衝突危険度 (PICUD) (m)
- L_2^n : 当該車両と後方車両 2 の衝突危険度 (PICUD) (m)
- $E[u_n]$: 地点 n における期待効用
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta$: パラメータ

事故リスクは、PICUD¹⁰⁾を用いて表す。PICUDは前方車が仮に急減速を行うとした時に、後続車が反応遅れ後に急減速して、両車が停止した時の相対的な位置を表す。前後車両に対する危険感を評価するための指標であり、ドライバーが事故回避のために注意を払うことに起因するストレスを表現できると考える。両車が等速で走行している際の PICUDは(5)式で表される。

遅延ストレスを算出するために、(6)式の効用関数¹¹⁾を用いる。この効用関数は、到着制約時刻に遅れることへの不効用を合理的に内包している。(6)式を用いることで、ドライバーが遅延に対して感じるストレスを表すことができる。本研究において到着制約時刻は、性能照査型道路計画設計手法に沿って決められた目標旅行時間

$$\begin{cases} L_1^n = \frac{(v_1^n)^2}{-2a} + s_1^n - \left\{ v_j^n \Delta t + \frac{(v_j^n)^2}{-2a} \right\} \\ L_2^n = \frac{(v_2^n)^2}{-2a} + s_2^n - \left\{ v_2^n \Delta t + \frac{(v_2^n)^2}{-2a} \right\} \end{cases} \quad (5)$$

- v_j^n : 地点 n におけるドライバー j の速度(m/s)
 - v_1^n : 地点 n における直前車両の速度(m/s)
 - v_2^n : 地点 n における直後車両の速度(m/s)
 - s_1^n : 地点 n における当該車両と前方車両との車間距離(m)
 - s_2^n : 地点 n における当該車両と後方車両との車間距離(m)
 - Δt : 反応時間(0.75s)
 - a : 減速度(-3.3m²/s)
- から決定する。

$$u(T_l) = \frac{-5.89}{1 + e^{-(T_l - T_a)/(-2.372)}} \quad (6)$$

- $u(T_l)$: 時刻 T_l に区間を走行し終える事象の効用
- γ : 遅刻ペナルティ
- T_l : 区間の終点への到着時刻
- T_a : 区間の終点への到着制約時刻
- c : パラメータ

ここで、時刻の関数である(6)式を時間の関数に書き換える。出発時刻を T_s 、目標旅行時間を T とすると所要時間 $t = T_l - T_s$ であり、 $T = T_a - T_s$ なので(6)式より時間の関数である(7)式が成り立つ。

$$u(t) = \frac{-5.89}{1 + e^{-(t-T)/(-2.372)}} \quad (7)$$

- $u(t)$: 所要時間 t で区間を走行し終える事象の効用

ドライバーが走行中に感じる遅延に対するストレスを以下のように表現する。ドライバーは各地点で区間を走行するのにかかる所要時間を予測しており、(7)式の効用関数に従って、各地点でストレスを感じているとする。つまり、遅延ストレスは(8)式で表わされる不効用と所要時間予測分布から次式で算定される期待効用 $E[u_n]$ である。

$$E[u_n] = \int u(\tau) p_n(\tau) d\tau \quad (8)$$

- τ : 予測所要時間
 - $u(\tau)$: 予測所要時間 τ で区間を走行し終える事象の効用
 - $p_n(\tau)$: 地点 n における予測所要時間 τ の生起確率
- この遅延ストレスの考えを用いることで、迅速性に関する評価に走行履歴が考慮できることに加えて、走行終了時には評価値が一意に定まる構造となり、先行モデルの問題点を解消したモデルとなる。

(3) 所要時間予測モデル

ドライバーの予測所要時間分布は以下の手順で求める。この概念図を図-2に示す。

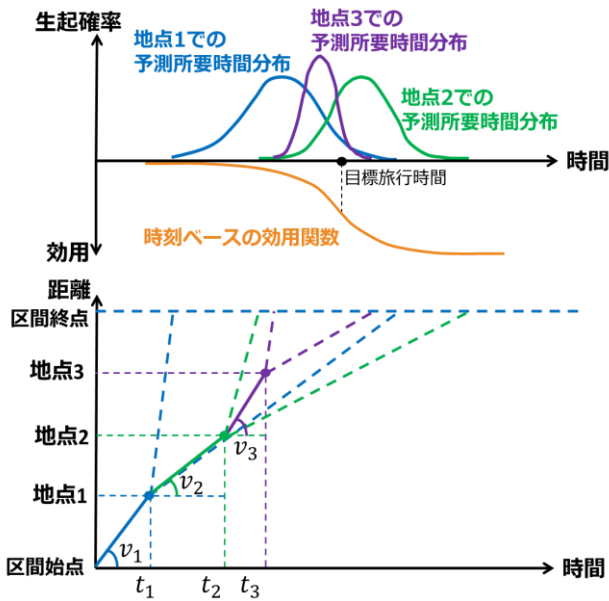


図-2 所要時間予測モデルと効用関数

ドライバーは各地点での速度から区間内での旅行速度を予測しているとする。データ(地点速度)が v_1, v_2, \dots, v_n であるとき、区間内での地点速度は正規分布に従うと仮定する。このとき、旅行速度分布 $f(v)$ の平均を μ 、分散を σ^2 とすると、 μ と σ^2 の最頻値 $\hat{\mu}$ と $\hat{\sigma}^2$ は、次式により求まる¹²⁾。

$$\hat{\mu} = \bar{v} \tag{9}$$

$$\hat{\sigma}^2 = S^2 / (n + 2) \tag{10}$$

但しここで、 $\bar{v} = N^{-1} \sum_{n=1}^N v_n$ 、 $S^2 = \sum_{n=1}^N (v_n - \bar{v})^2$ である。(9)、(10)式より、地点 n における5分間平均速度 v_n から $\hat{\mu}$ と $\hat{\sigma}^2$ を求め、「未走行区間での予測旅行速度分布」 $f(v)$ を導出できる。

$$f(v) = \frac{1}{\hat{\sigma}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(v - \hat{\mu})^2}{2\hat{\sigma}^2}\right] \tag{11}$$

$f(v)$: 「予測所要時間分布」の確率密度関数

(12)式を用いて予測旅行速度を予測所要時間に変換する。

(12)式より、「予測所要時間分布」の確率密度関数 $g(\tau)$ は(13)式である。

$$\tau = l/v + t \tag{12}$$

τ : 予測所要時間(分)

l : 未走行距離(km)

v : 予測旅行速度(km/h)

t : 現地点までにかかった所要時間(分)

$$g(\tau) = \frac{1}{\hat{\sigma}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{l}{\tau - t} - \hat{\mu}\right)^2\right] \left[\frac{l}{(\tau - t)^2}\right] \tag{13}$$

$g(\tau)$: 「予測所要時間分布」の確率密度関数

(4) 区間評価モデル

以上を地点評価モデルとし、さらに区間全体の評価値を算出するのが以下の(14)式で表される区間評価モデルである。ドライバーは走行終了時に各地点における地点評価値と区間を走行するのにかかった所要時間から区間評価値を決定していると考えられる。この区間評価モデルによりリンクの評価値を求め、3.5で示す方法で複数リンクからなる拠点連絡の評価を求めることが可能である。

$$V_{sec} = \lambda_1 t_{sec} + \lambda_2 \sum_{n=1}^N \frac{V_{spot}^n}{N} + \lambda_3 \tag{14}$$

V_{sec} : N 地点からなる区間における区間評価値

t_{sec} : 区間を走行するのにかかった所要時間

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$: パラメータ

(5) 複数リンクからなる拠点連絡の評価

複数リンクからなる拠点連絡の指標値を導出する方法を以下にまとめる。例えば、図-3のように区間1~3からなる拠点間の評価を行うとする。

ここで、区間 i の目標旅行時間を T_i 、区間 i を走行するのにかかった所要時間を t_i とすると、各区間での遅れ時間 t_{di} は(21)式である。

$$t_{di} = t_i - T_i \tag{21}$$

本研究で提案する性能指標は、時間を累積的に扱っており、区間ごとの指標値を足すことで拠点間の指標値とすることはできない。図-7のような場合、遅延ストレスについては、区間1~3を1つの区間と見なし、各区間での遅れ時間を次の区間にも持ち越す。

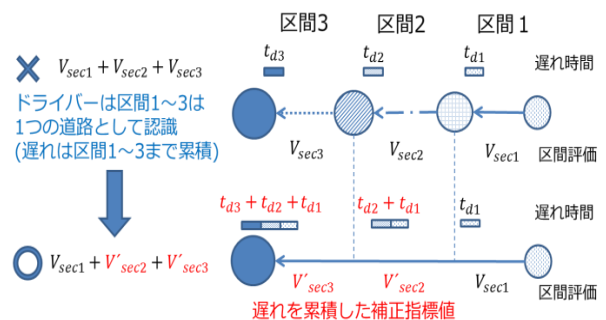


図-3 複数リンクからなる拠点連絡の評価

具体的には、拠点間の指標値を導出する際は、指標中の(13)式を(22)式に置き換えて、各区間の指標値を再導出する。その再導出した各区間の指標値を足し合わせることで、複数リンクからなる拠点連絡の評価が可能である。本研究で提案した性能指標は、新設・改良といった計画段階の道路の性能照査にも用いる。このとき、同一OD

$$g_l(\tau) = \frac{1}{\hat{\sigma}\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\frac{l}{\tau - t - \sum_{i=1}^{l-1} t_{di}} - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \right)^2 \right] \quad (22)$$

$g_l(\tau)$: 区間*l*における「予測所要時間分布」の確率密度関数

t_{di} : 区間*i*における遅れ時間

間に複数の経路が存在するネットワークの場合、新設・改良による交通量配分の変化を考慮する必要がある。図4のような場合である。

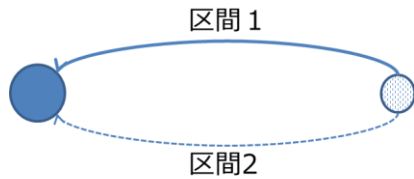


図4 複数経路が存在するネットワーク

本研究では、明示的に交通量配分については扱っていない。しかし、計画段階の道路の性能照査の際は予測交通量を定め、シミュレータ上で交通流を再現してデータを取得する。上記で示したように前区間での遅れ時間を考慮すれば、複数リンクからなる拠点連絡の正確な評価が可能である。そのため経路選択を的確に説明でき、本研究で提案した指標を用いて配分交通量を推計することも可能である。

理論上は以上の方法で拠点連絡の評価が可能であるが、事例分析等が必要であると考え、これに関しては今後の課題とする。

以上が、本研究で提案する性能指標である。

4. ドライビングシミュレータによる走行実験

提案したモデルのパラメータの推定と現象説明力の分析を目的に、ドライビングシミュレータ(UC-win/Road ver.10.0)を用いて様々な交通状態を作り出し、作成した走行区間を被験者に走行してもらう実験を行った。図5がシミュレータ映像である。運転中の気象条件や構造の変化のない道路つまり、高速道路単路部のような道路で片側2車線道路を走行した際の走行環境評価を観測した。走行環境に基づいてドライバーが表明する地点評価値が様々な値・順序で得られるようにするために、以下の4つの要素それぞれに関して3つの水準①走行距離(3, 5, 7km), ②目標旅行速度と到着制約時刻(70, 80, 90km/h),

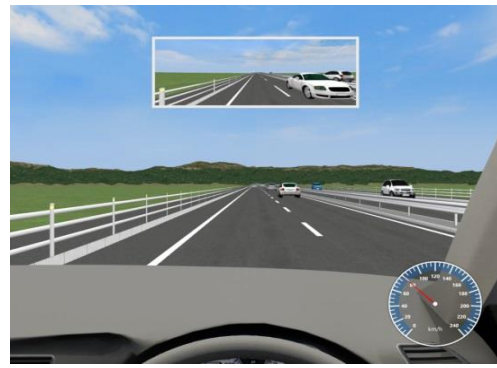


図5 シミュレータ映像

③混んでいる地点・空いている地点の組み合わせのパターン(前半, 中ほど, 後半), ④交通量(1000, 2500, 4000台/h), を設けて実験を行う。実験計画法では、実験で行う4要素3水準それぞれの組み合わせに関して、直交配列表で示す9通りであれば、網羅度を確保できている¹³⁾。直行配列表を用いると、以下の表-3の9通りとなる。

表-3 走行区間の条件の組み合わせ

実験No.	要素	距離(km)	目標旅行速度(km/h)	混雑区間の出現場所	交通量(台/h)
1		3	70	前半	1000
2		3	80	中ほど	2500
3		3	90	後半	4000
4		5	70	中ほど	4000
5		5	80	後半	1000
6		5	90	前半	2500
7		7	70	後半	2500
8		7	80	前半	4000
9		7	90	中ほど	1000

被験者には走行前にこれから走行する区間の距離に加えて、表4のような走行前後のスケジュールを提示し、スケジュール通りに行動するためには、平均どの程度の速度で走行する必要があるかを伝えた。これは、実生活での道路走行と同じ感覚を持ち、遅延ストレスを感じながら走行してもらうためである。また、事故リスクを感じってもらうために、「他車と衝突した際には、スタート地点まで戻る」というペナルティを科した。被験者には実験時間を示し、ペナルティを受けることで実験時間が長引くことを説明した。ペナルティにより、被験者に事故を起こしたくないという思いを抱かせた。走行中は、被験者に30秒ごとにその地点における不快の程度を0(不快なし)~10(とても不快)で表明してもらい、その値を地点評価値の実測値とした。

被験者には表-3の9通りの走行区間の中から、2つの走行区間を走行し、終了後2つの走行区間は同じ目的地につながっていると想定してもらい、次に同じ目的地へ行く場合、どちらの区間を選択するかを尋ねた。実験で取得した1人1区間あたりの地点数の平均は7地点、走行してもらった区間は72、つまり区間比較の組み合わせ数は36である。パラメータ値は被験者により異なる可能性があるため10人についてそれぞれ同じ

実験を行い、10 人分のデータを用いて代表的個人のパラメータ値としてパラメータを推定した。

表-4 実験時に提示したスケジュール

一日の行動スケジュール 距離7km, 目標旅行速度70km/h

時間	日中する行動	時間
~8:24	自宅	
	通勤(移動)	通勤時間:5分
8:30	仕事開始	(8:30に職場にいないてはならない)

※ 通勤にかけられる時間は6分である。

5. モデル分析

(1) 地点評価モデルによる分析

まず地点評価値の実測値から(4)式のパラメータ $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ と地点評価値の推定値を求める。推定方法には最尤推定法を用いる。N 地点分のデータを用いたとき、尤度Lは以下の(15)式である。求めた地点評価値の推定値と実測値の相関を検証する。

$$L = \prod_{n=1}^N \left(\frac{\exp[\alpha + \beta E\{u_n(\tau)\} + \gamma L_1^n + \delta L_2^n]}{1 + \exp[\alpha + \beta E\{u_n(\tau)\} + \gamma L_1^n + \delta L_2^n]} \right) \quad (15)$$

推定は 1 人当たり 9 つの走行区間 (4.で示した、9 通りの走行区間 1 つずつ) に含まれる地点を用いて行った。総地点数は 321 地点である。この結果を以下の図-6、表-5に示す。

表-5 地点評価モデルパラメータ推定

パラメータ	α	β	γ	δ
推定値	-0.892	-0.058	-0.006	-0.003
z値	-3.262	-8.146	-6.526	-3.520
	1%有意	0.1%有意	0.1%有意	0.1%有意

尤度比 $\rho^2 = 0.25$

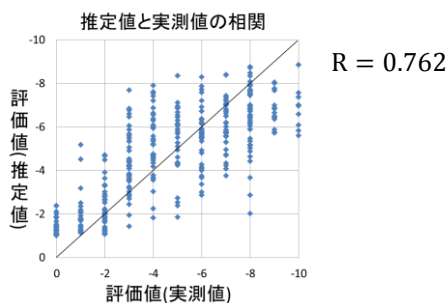


図-6 地点評価値の推定値と実測値の相関

推定の結果、地点評価値の推定値と実測値の相関係数は 0.762 と、高い相関関係がある¹⁴⁾ことを確認できた。また、尤度比 0.25 という値からも、地点評価モデルは十分に高い適合度を持っている¹⁴⁾ことを示している。地点評価モデルでは迅速性をベイズ統計学で累積的に扱

うことで、ドライバーの評価構造を表現できていないという瞬間効用モデルを用いた走行環境評価モデルの問題点を改善した。浅香¹⁵⁾が瞬間効用を用いた地点評価モデルの現象説明力をドライビングシミュレータ実験で得たデータを用いて検証している。その結果は被験者 10 人のデータから被験者別に相関係数を求めており、0.41~0.66 と中程度の相関を確認している。このことから、本研究における地点評価モデルがより高い現象説明力を持っていることがわかる。

この結果より、3 章で提案した地点評価モデルの構造を特定し、モデルの現象説明力を検証することができた。一方で、後方車両の挙動はドライビングシミュレータにより制御されているため、衝突される危険性がないことがドライバーも認知しており、後方車両との衝突の危険性をあまり感じることなく走行した可能性も考えられる。ドライビングシミュレータ実験の問題点の 1 つとして留意しておく必要があると考える。

(2) 区間評価モデルによる分析

(14)式の現象説明力を検証するため、今回の実験データを用いてパラメータの推定を行う。

被験者 1 人あたり 72 走行区間と 72 走行区間それぞれの距離、設定している目標旅行時間と、用意した 9 つの道路区間それぞれを一对比較した結果を被験者 10 人分用いて区間評価モデルのパラメータを推定する。つまり、一对比較した 360 回分のデータを用いる

推定にあたっては、一对比較した結果に基づき、区間評価値を効用と見なして、区間評価の優劣を判定する二項ロジットモデルを構築し、パラメータを推定する。

たとえば、用意した走行区間の中で、ある走行区間*i*と走行区間*j*を比較した際に、「よりストレスなく走行できた道路」に選択する道路パターンとしてドライバー*m*が走行区間*i*を選択した時、その選択確率*P_{im}*は(16)式のように表すことができる。

$$P_{im} = \frac{\exp[V_{seci}]}{\exp[V_{seci}] + \exp[V_{secj}]} \quad (16)$$

全ての組み合わせに対しても同様のことを行ったときの、その選択確率の積、つまり、尤度*L**は以下の(17)式の通りである。

$$L^* = \prod_{m \in M} \prod_{(i,j) \in (I,J)} P_{im}^{\delta_{im}} \cdot P_{jm}^{\delta_{jm}} \quad (17)$$

$$\delta_{im} = \begin{cases} 0 : j \text{ を選択したとき} \\ 1 : i \text{ を選択したとき} \end{cases}$$

$$\delta_{jm} = \begin{cases} 0 : i \text{ を選択したとき} \\ 1 : j \text{ を選択したとき} \end{cases}$$

なお、(i, j)は用意した 9 つの道路区間の組み合わせを表

す。この(5.2)式中の L^* を最大にするようなパラメータを導出する。今回、被験者 10 人分について分析した結果を以下の表-6に示す。

表-6 区間評価モデルパラメータ推定

パラメータ	λ_1	λ_2	λ_3
推定値	-0.387	0.697	4.539
z値	-5.081	11.581	10.617
	0.1%有意	0.1%有意	0.1%有意

尤度比 $\rho^2 = 0.470$ AIC : 800.08

尤度比 0.470 という値からも、区間評価モデルは現象説明力の高いモデルであることがわかる。以下の図-7は、横軸に一対比較した走行区間*i*と走行区間*j*の区間評価値(区間評価モデルによる推定値)の差をとり、縦軸に走行区間*i*の選択確率をとったものである。図から、選択確率が 0.3~0.7 といった走行区間も多くあることが確認でき、優劣が明らかな一対比較データから尤度比が算出されたわけではないことがわかる。このことから区間評価モデルは十分に高い現象説明力があると言える。

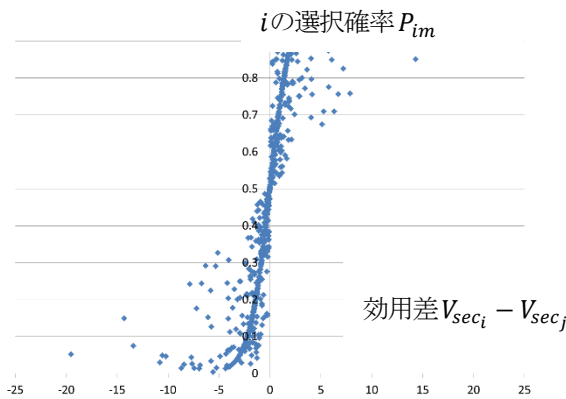


図-7 効用差と選択確率の関係性(選択確率0~1)

ここで、この区間評価モデルがよりドライバーの評価を的確に測定可能な指標であることを示すためには、既に提案されている性能指標である旅行速度との比較が必要であると考え。そのためには、4で行った実験データを用いて、旅行速度によってドライバーの評価は説明

$$V_{sec} = \lambda_{v1} \frac{v_{sec}}{V} + \lambda_{v2} \quad (18)$$

- V_{sec} : N地点からなる区間における区間評価値
- v_{sec} : 区間全体での旅行速度
- V : 目標旅行時間
- $\lambda_{v1}, \lambda_{v2}$: パラメータ

可能なのかを確認する方法が考えられる。

しかし、提案されている性能照査型道路計画設計手法⁴⁾では、性能指標を用いて異なる道路の性能を比較する方法について言及されていない。

そのため、ここでは目標旅行速度の達成度を旅行速度/目標旅行速度と、目標所要時間の達成度を旅行時間/目標旅行時間と考え、この二つの達成度それぞれがドライバーの評価を的確に表現できているのかを、実験データを用いて確認する。区間評価値が目標旅行速度と目標旅行時間の達成度によって決まるとしたのが、それぞれ(18)式と(19)式である。それぞれの分析結果は表-7、表-8に示す。

【旅行速度】

表-7 旅行速度分析結果

パラメータ	λ_{v1}	λ_{v2}
推定値	6.390	-6.381
z値	11.015	-10.866
	0.1%有意	0.1%有意

尤度比 $\rho^2 = 0.346$ AIC : 833.35

【旅行時間】

$$V_{sec} = \lambda_{t1} \frac{t_{sec}}{T} + \lambda_{t2} \quad (19)$$

- V_{sec} : N地点からなる区間における区間評価値
- t_{sec} : 区間を走行するのにかかった所要時間
- T : 目標旅行時間
- $\lambda_{t1}, \lambda_{t2}$: パラメータ

表-9 旅行時間分析結果

パラメータ	λ_{t1}	λ_{t2}
推定値	-5.876	6.015
z値	-10.265	10.361
	0.1%有意	0.1%有意

尤度比 $\rho^2 = 0.338$ AIC : 832.77

以上の結果より、3つの指標の中でも、本研究で提案する性能指標が最もドライバーの評価を的確に表現していることがわかる。

つまり、本研究で提案する性能指標で道路の性能を評価することで、よりドライバーが求める性能を満たした道路交通サービスの提供が可能となると考える。

6. 性能指標値の導出手法

(1) 性能指標の導出に必要なデータ

提案する性能指標を用いて、交通データから指標値を導出するための手法を提示する。

性能指標値を導出する場面は、(1) 新設や改良といった計画段階の道路の性能照査、(2) 供用中の道路の性能照査、の 2通りが考えられる。(1)の場合、実際に観測された交通データは存在しない。そのため、本研究でも用いた交通流シミュレーションソフトウェア VISSIM 等を使い、コンピューター上に計画している道路を再現し、交通流を発生させデータを取得する方法が考えられる。この場合、あらゆるデータの取得は容易であることが考えられ、6.2 で示す導出に必要なデータ全て取得可能であると考えられる。それに対して(2)の場合、交通データから性能指標値を導出できることが求められる。そこで本章では、トラフィックカウンター(以降、TC と表記)から得られる常時観測データとプローブデータを導出に用いることを想定し、指標値導出手法をまとめる。

TC とは、検知領域内の車両の存在を自動的に検知する機器のことを指し¹⁶⁾、道路上に設置されている。5 分間単位で集計された交通量や速度等の集計データを常時観測しているが、機種によっては個別車両の通過記録を取得することも可能である。

プローブデータとは、GPS(Global Position System)車載器を搭載した車両を現実の道路ネットワーク上を移動するセンサーとして捉え、走行速度情報や位置情報を収集することにより、交通流動等の道路交通情報を生成して得るデータである¹⁷⁾。今回は、車両ごとの緯度・経度・速度等が得られる ITS プローブデータ³⁴⁾を例に考える。

なお、本指標においては、データを取得した位置を「地点」、評価する道路区間を「区間」と定義し、区間評価値が「性能指標値」とする。

本研究で提案している性能指標を用いて、性能指標値を導出するのに必要なデータは以下の 5 つである。

【導出に必要なデータ】

- ①各地点における自車両の走行速度
- ②各地点における走行時の前後車両の走行速度
- ③各地点における前後車両との車間距離
- ④各地点までの所要時間
- ⑤走行区間の始点から各地点までの距離

これに対して、TC データ、プローブデータそれぞれから得られるデータは以下の表-10 である。TC データにおいては経過時間が得られないものの、地点間は地点速度で走行していると考えて近似的に求めることが可能である。6.2 節では、(1)TC データ、(2)TC データとプローブデータの 2通りのデータ取得時の指標値算出手法を提示する。

(2) 指標値導出手法

今回は各データから、ある道路区間の 5 分間ごとの性能指標値を導出することを想定する。「TC データ」で求める場合と「TC データとプローブデータ」で求める

表-10 取得可能データ

	TCデータ	プローブデータ(ITS)
①自車両走行速度	△	○
②前後車両走行速度	△	×
③前後車両との車間	△	×
④所要時間	×	○
⑤各地点の位置	○	○

△：5分間平均速度・平均車頭時間等の集計データ

場合の指標値導出過程を提案する。5 章でパラメータを特定し、本研究で提案する性能指標をもとに以下に示す。また、性能指標での指標値導出に必要なデータと流れは図-8 である。

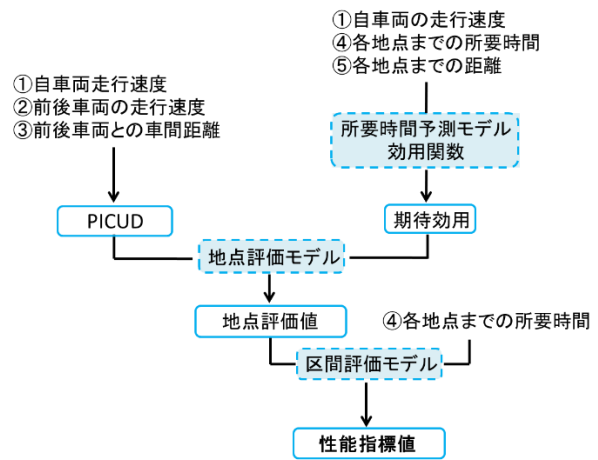


図-8 指標値算出過程

a) TC データによる導出

TC データを用いる際、利用するデータは表-11 に示したデータ項目である。

表-11 TC データによる導出で用いるデータ

	TCデータ
①自車両走行速度	5分間平均速度
②前後車両走行速度	5分間平均速度
③前後車両との車間	5分間平均車間距離
④所要時間	近似値
⑤各地点の位置	TC設置位置

①②の自車両・前後車両の走行速度については、5 分間の通過車両の平均速度を用いる。つまり、データの都合上、全ての車両が等速で走行していると仮定する。③の車間距離についても同様に、TC データから得られる 5 分間交通量から平均車頭時間を求めて平均車間距離を

算出し、全ての車両が平均車間距離を維持して走行していると仮定する。⑤の各地点の位置は TC の設置位置である。つまり、事故リスクを求める(5)式は以下の(20)式となる。

$$\begin{cases} L_1^n = \frac{(v^n)^2}{-2a} + s^n - \left\{ v_j^n \Delta t + \frac{(v^n)^2}{-2a} \right\} \\ L_2^n = \frac{(v^n)^2}{-2a} + s^n - \left\{ v_2^n \Delta t + \frac{(v^n)^2}{-2a} \right\} \end{cases} \quad (20)$$

v^n : 地点 n における 5 分間平均速度(m/s)
 s^n : 地点 n における 5 分間平均車間距離(m)
 Δt : 反応時間(0.75s)
 a : 減速度(-3.3m/s²)

④の所要時間に関しては、データを取得することができない。そのため、図-9 のように地点間は各地点で TC により取得した地点速度で走行したと仮定する。

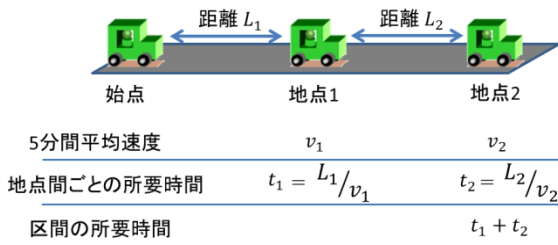


図-9 所要時間の近似値算出

以上のデータを用いて、指標値を導出する手法を本研究では TC データによる指標値導出手法として提案する。

b) TC データ+プローブデータによる導出

TC データとプローブデータを用いる際、導出に用いるデータは表-12 に示したデータ項目である。

プローブデータでは当該車両のデータのみしか得ることができない。そのため、②前後車両走行速度③前後車両との車間距離は TC データを用いる。このとき、プローブデータの緯度・経度に最も近い TC データから同時刻の 5 分間平均走行速度・車頭時間を用いて、前後車両の走行速度・車間距離と仮定する。TC データのみの際は近似値を採用した所要時間が取得できるため、より高精度の性能指標値が導出可能となる。

プローブデータで、同時刻もしくは TC データにおける 5 分間のうちに複数車両のデータが取得できた場合は、複数車両の性能指標値を算出し、分布もしくは平均値を性能指標値とする方法も考えられる。この方法については、数値分析等による検証が必要であると考え、今後の課題とする。

以上の 2 つの手法で指標値を導出することで、対象とした道路区間のある 5 分間の性能を測定することができる。新設や改良といった計画段階の道路の場合も、シミ

表-12 TC とプローブデータによる導出に用いるデータ

	TC データ	プローブデータ(ITS)
① 自車両走行速度	5分間平均速度	走行速度 (100m or 200m毎)
② 前後車両走行速度	5分間平均速度	×
③ 前後車両との車間	5分間平均車間距離	×
④ 所要時間	近似値	時刻 (100m or 200m毎)
⑤ 各地点の位置	TC 設置位置	緯度・経度 (100m or 200m毎)

ュレータ等により 6.2 の導出に必要なデータを取得することで指標値を導出できると考える。

7. おわりに

本研究では、現在検討が進んでいる性能照査型道路計画設計手法の枠組み⁵⁾に沿って、道路の性能を評価できる性能指標の提案を行った。渡邊ら⁶⁾のモデルを改良し、指標のパラメータを特定するためにドライビングシミュレータ実験を行い、得られたデータを用いてモデルのパラメータを推定し、現象説明力を確認した。提案する性能指標がドライバーの評価を的確に表現できていることが確認でき、交通データから性能指標値を導出するまでの過程を提示した。また、既存の性能指標比べ、よりの確にドライバーの評価を表していることも示した。

これにより、①交通状況によって指標値が算出できない、②複数リンクからなる道路ネットワークの性能指標値が算出できない、という既存の指標の問題点を改善した。提案した性能指標を用いれば、性能照査型道路計画設計手法の枠組み⁵⁾に沿って、ドライバーの視点で性能を評価できる。

本研究では新たな性能指標を提案したが、今後の実用に向けては検討が必要な課題が存在する。以下の①から⑥である。

① 所要時間予測分布や効用関数の分布形の検証

所要時間予測分布については正規分布を仮定しているが妥当性を検証していない。効用関数の分布形に関しては、山下¹¹⁾が検証しているが、パラメータに関しては通勤交通を想定しているため状況によってパラメータを変更する必要があると考える。これらの分布形やパラメータの特定化が結果に及ぼす影響に関する吟味が必要である。

② 性能指標値の集計方法

6 章で記述した性能指標値の導出は対象とした道路区間のある 5 分間の性能を測定するものである。今後は

「対象とした道路区間の性能」とは、どのように指標値を集計したものなのかを定義する必要があると考える。

③ 一般道への拡張

本研究では対象とする道路を高速道路のみとした。今後は、どのような道路でも活用できる性能指標とするために、信号での待ち時間など新たに考慮すべき要素をまとめ、モデルに組み込む必要がある。

④ 実験について

本研究で行ったドライビングシミュレーター実験の被験者数については、さらに多くの多様な被験者からデータを取得する必要があると考える。また、遅れへのペナルティが結果に及ぼす影響についての吟味が必要であるとともに、ペナルティを変化させることで、多様な状況下でのドライバーの評価を表現できるようになる。道路ごとに通勤や買い物等、ドライバーが道路を利用する目的別の性能指標の導出など、新たな活用も可能になる。

⑤ 交通データを用いた事例分析

本研究ではトラフィックカウンターやプローブデータを用いた指標値の導出過程を提案した。この導出方法に沿って、実際の交通データから指標値を導出できるかを確認する必要がある。

⑥ 性能目標の設定

性能照査型道路計画設計手法においては、道路が持つ機能に対応する明確な性能目標を設定し、これを満足することのできるような道路設計を行う必要があると考える。ドライバーの求める水準を反映させた性能目標の設定が必要である。

参考文献

- 1) 国土交通省社会資本整備審議会道路分科会基本政策部会第 14 回道路分科会：道路分科会建議中間とりまとめと社会資本整備重点計画，平成 24 年 7 月 13 日 <https://www.mlit.go.jp/common/000217726.pdf>
- 2) 交通工学研究会：性能照査型道路設計のための交通容量とサービス水準に関する研究 研究成果(中間報告)，特定課題研究(代表：中村英樹)，2011.12.
- 3) 喜多秀行・浅香遼・渡邊友崇・辻谷純：円滑性と安全性に着目した道路の性能評価指標，土木学会論文集 D3 (土木計画学) Vol.71 No.5,2015
- 4) 交通工学研究会：道路の交通容量とサービスの質に関する研究(最終成果報告書)，2015.8
- 5) 後藤梓・中村英樹・下川澄雄・喜多秀行・内海泰輔：日本における拠点設定と効率的な拠点間連絡を実現する階層型道路計画の枠組み，土木計画学研究・講演集 No.50, 7ページ，CD-ROM，2014.11.
- 6) 渡邊友崇・喜多秀行・浅香遼・四辻裕文：遅延ストレスと事故リスクに着目した走行環境の認識・評価モデル,第 34 回交通工学研究発表会論文集，No.71,2014.
- 7) 中村英樹，大口敬：性能照査型道路計画設計の導入に向けて，土木学会論文集 D3(土木計画学)，Vol.67, No.3, pp.195-202, 2011.
- 8) 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,pp.3-10,2004.
- 9) 喜多秀行・河内朗・谷本圭史：走行サービスの質に対する順序効果の影響を考慮したドライバーの認識・評価構造の実証分析，土木計画学論文集，Vol.25, no.2, 2008.
- 10) 宇野伸宏・飯田恭敬・安原真史・菅沼真澄：一般道織込み部における客観的コンフリクト分析と速度調整モデルの構築，土木計画学研究・論文集，Vol.20.4, pp.989-996, 2003.
- 11) 山下智志：遅刻回避行動モデルにおける時刻ベースの効用関数，統計数理，45 (1),pp.89-106,1997.
- 12) 繁樹算男：ベイズ統計入門，東京大学出版会，pp.101-109, 1985.
- 13) 前田信幸・喜多秀行：道路交通サービスの水準評価の現状と展望に関する考察，第 26 回土木計画学研究講演集，講演番号 48，2002.
- 14) 小林潔司・織田澤利守：確率統計学 A to Z，電気書院，p.68, p.240, 2012.
- 15) 浅香遼：トラフィック機能に着目した道路の性能評価指標の開発，神戸大学大学院工学研究科修士論文，2014.2
- 16) 新道路技術会議：複合データによる道路サービス・パフォーマンス情報システムの研究開発，道路政策の質向上に資する技術研究開発成果報告レポート No.21-3(研究代表者：石田東生)，2012.6.
- 17) 三輪富生：プローブカーデータを用いた道路ネットワーク上の交通行動分析，名古屋大学博士学位論文，2005.