

プローブデータによるOD間旅行時間分布に基づく時間信頼性評価に関する検討

中川 真治¹・長澤 光弥²・鈴木 英之³・中田 諒⁴・酒井 大輔⁵・片山慎太郎⁶

¹正会員 一般社団法人システム科学研究所 (〒604-8223 京都市中京区小結棚町428新町アイエスビル4F)
E-mail:nakagawa@issr-kyoto.or.jp

²正会員 阪神高速道路株式会社 建設・更新事業本部 (〒550-0011 大阪市西区阿波座1-3-15)
E-mail: mitsuya-nagasawa@hanshin-exp.co.jp

³非会員 阪神高速道路株式会社 計画部 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3)
E-mail: hideyuki-suzuki@hanshin-exp.co.jp

⁴正会員 阪神高速道路株式会社 神戸管理部 (〒650-0041 神戸市中央区新港町16-1)
E-mail: ryo-nakata@hanshin-exp.co.jp

⁵正会員 一般社団法人システム科学研究所 (〒604-8223 京都市中京区小結棚町428新町アイエスビル4F)
E-mail: dsakai@issr-kyoto.or.jp

⁶正会員 一般社団法人システム科学研究所 (〒604-8223 京都市中京区小結棚町428新町アイエスビル4F)
E-mail: katayama@issr-kyoto.or.jp

旅行時間信頼性の便益評価に必要な指標である信頼性比—旅行時間変動価値と旅行時間価値の比—を経済学理論と統合した統合アプローチに基づいて検討した。具体的には、プローブデータを用いて、1) 阪神高速道路を経由する経路と経路しない経路の両方を含むODペアを10ペア選定し、2) それらOD間の旅行時間分布から統合アプローチの理論式にしたがって信頼性比を算出した。

その結果、OD間の旅行時間に関する信頼性比として0.82~0.96の間の値が得られ、旅行時間変動価値は旅行時間価値より1~2割小さいという結果が得られた。あわせて、本研究における試算を踏まえ、時間信頼性向上便益評価における課題について整理した。

Key Words : value of travel time variability, reliability ratio, probe data, Hanshin-Expressway

1. はじめに

(1) 本研究の目的

都市高速道路の整備効果の一つとして、旅行時間の日々のばらつきが小さくなること、つまり、時間信頼性向上があげられる。具体的には、新規路線の供用により、移動に要する時間（旅行時間）の変動が小さくなり、必要以上に早めに出発することや予定時刻に遅れることが少なくなるという効果等を指す。時間信頼性向上効果を端的に表す指標は旅行時間の標準偏差である。旅行時間の標準偏差は、道路整備による旅行時間変動の変化をそのまま表す指標といえる。

国・高速道路会社・自治体等が実施する道路事業については、費用便益分析が実施され、道路整備がもたらす主な経済効果を貨幣価値で評価した走行時間短縮便益・

走行経費減少便益・交通事故減少便益（基本3便益）と事業費の比較（費用便益比）に基づいて対象事業の社会的効率性が評価される。しかし、現時点の走行時間短縮便益では旅行時間変動に起因する便益は考慮されていないため、時間信頼性向上効果を貨幣価値で評価（＝便益評価）できれば、それは道路事業の経済評価の新たな指標になりうる。

時間信頼性の経済評価については、中山・朝倉¹⁾により整理されている。本研究では、それらのうち、Fosgerau and Fukuda²⁾による「統合アプローチ」の枠組みに基づく時間信頼性向上便益を対象とする。特に、時間信頼性向上便益の評価に必要な「信頼性比」（＝旅行時間変動価値と旅行時間価値の比）に着目し、阪神高速道路の沿道エリアで収集されたプローブデータから集計したOD間の旅行時間分布を用いて信頼性比を算出する。

なお、本研究に関連して、Nakataら³⁾は、車両検知器データを用いて阪神高速道路の経路旅行時間分布を集計し、信頼性比0.928 (H指数0.30) という推定値を得ている。本研究では、プローブデータを用いることで、阪神高速道路と一般道路の両方を考慮したOD間旅行時間分布に基づいて信頼性比の試算を行うものである。

(2) 本稿の構成

以降の構成は以下の通りとする。

まず、2.では、統合アプローチの概要（信頼性比の定義を含む）について述べ、3.では、プローブデータから信頼性比を算出する方法について述べる。続いて、4.では、プローブデータから得られるOD間旅行時間分布及び信頼性比の試算結果を示す。最後に5.では、本研究の結論として、得られた成果と今後の課題について述べる。

2. 統合アプローチの概要^{1) 2)}

(1) ドライバーのコストの表現

統合アプローチでは、出発時刻選択を日々行うドライバーを想定し、そのコスト C を次式と仮定する。

$$C(D, T) = \eta D + \lambda(T - D)^+ + \omega T \quad (1)$$

- D : 出発時刻 ($D > 0$, 目的地への希望到着時刻 (PAT) をゼロと仮定),
- T : 実旅行時間 (次節参照),
- η, λ, ω : スケジューリングパラメータ

第2項は遅着不効用 (次式) であり、到着時刻 $T - D$ がPATより前 (早着) か後 (遅着) により異なる。

$$(T - D)^+ = \begin{cases} T - D & \text{if } T - D \geq 0 \\ 0 & \text{if } T - D < 0 \end{cases} \quad (2)$$

(2) 実旅行時間と基準化旅行時間

実旅行時間 T は日々変動する確率変数 (平均 μ , 標準偏差 σ) と仮定し、 $T = \mu + \sigma X$ と表す。ここに X は平均が 0, 標準偏差が 1 の確率変数である。

統合アプローチでは、確率変数 X を基準化旅行時間と呼び、その確率密度関数を ϕ , 確率分布関数を Φ とおく。

(3) ドライバーの最適出発時刻

統合アプローチでは「ドライバーは確率的に変動する旅行時間の下で期待不効用最小化原理に従い、自身に最適な出発時刻を選択する」と仮定する。つまり、最適出発時刻 $-D^*$ は以下の最適化問題の解となる。

$$EC^* = \min_D n \left[\eta D + \lambda \int_{\frac{D-\mu}{\sigma}}^{\infty} (\mu + \sigma x - D) \phi(x) dx + \omega \mu \right] \quad (3)$$

具体的には、 D^* は以下の式で与えられる。

$$D^* = \mu + \sigma \Phi^{-1} \left(1 - \frac{\mu}{\lambda} \right) \quad (4)$$

つまり、統合アプローチにおける最適出発時刻は旅行時間の平均と標準偏差、及び、基準化旅行時間の確率分布関数の逆関数から算出される。

(4) 信頼性比とH指数

ドライバーが最適出発時刻に出発するときの期待コスト EC^* は次式で与えられる。

$$EC^* = (\eta + \omega)\mu + \lambda H \left(\Phi, \frac{\eta}{\lambda} \right) \sigma \quad (5)$$

ここに、 H は基準化旅行時間の分布関数の逆関数の定積分として定まる値であり、統合アプローチではH指数またはH定数と呼ぶ。

$$H \left(\Phi, \frac{\eta}{\lambda} \right) = \int_{1-\frac{\mu}{\lambda}}^1 \Phi^{-1}(v) dv \quad (6)$$

統合アプローチによる期待コスト EC^* (式4) は平均旅行時間 μ と旅行時間の標準偏差 σ の一次式で表される。平均 μ の係数 $\eta + \omega$ は旅行時間価値 (いわゆる時間価値), 標準偏差 σ の係数 $H(\Phi, \eta/\lambda)$ は旅行時間変動価値に相当する。信頼性比 RR はスケジューリングパラメータとH指数から次式により算出することができる。

$$RR = \frac{\lambda}{\eta + \omega} H \left(\Phi, \frac{\eta}{\lambda} \right) \quad (7)$$

このように、統合アプローチでは、旅行時間の平均とばらつきは時間価値は明示的に別個のものであり、それは信頼性比を算出する意義といえる。

本研究では、プローブデータを用いて作成したOD間基準化旅行時間の確率分布関数を用い、阪神高速道路の沿道地域の主なOD間の信頼性比を算出する。

3. 信頼性比の算出方法

(1) 使用したプローブデータ

株式会社富士通交通・道路データサービスが提供する商用車プローブデータを活用した。時期と範囲は以下の通りである。

時期：平成27年11月 (平日)

範囲：阪神高速沿道地域 (内々・内外・外内・通過)

(2) 信頼性比を算出するODペアの選定

「1. はじめに」に記した通り、阪神高速道路の経路旅行時間の変動に係る信頼性比は試算済みであることから、本研究では、OD間旅行時間の変動に係る信頼性比を算出することとした。その際、以下のプロセスに従って、

信頼性比の算出対象ペアを選定した。

Step 1 日付・時間帯レベルで下記の各条件を満足するトリップに対応するプローブデータが存在するODペアを抽出する。

- 条件1 トリップの開始または終了ゾーンが大阪府域または兵庫県域にある,
- 条件2 トリップ開始ゾーンとトリップ終了ゾーンが異なる(ゾーン内々トリップではない),
- 条件3 当該ODペアの各トリップの平均移動距離が10km以上である,
- 条件4 高速道路を利用するトリップと一般道路のみを利用するトリップの両方が存在する.

Step 2 Step1で抽出したODペアを, 条件1~3を満足するデータの件数(観測日・時間帯数及びトリップ数)の多いODペアを10個選定する。

(3) 信頼性比を算出するためのプローブデータの抽出

次に(2)で選定した10ODペアのいずれかとODが一致するプローブデータを抽出した。なお, 条件3と条件4が満足されないデータが含まれるが, より多くのデータサンプルを用いることを優先した。

さらに, 旅行時間と移動距離の95パーセンタイル値以上を外れ値と見なし, データクリーニングを行った。

以上を経て得られたデータを用いて信頼性比を算出することとした。算出データの概略は下表の通りであり, 10~20kmの移動に対応するデータが多いといえる。

表-1 信頼性比算出のためのプローブデータの概要

No.	OD間距離の中央値 (km)	トリップ数		
		高速経路	一般経路	全経路
1	12.0	290	313	603
2	11.3	332	224	556
3	13.9	347	68	415
4	11.0	744	79	823
5	14.0	280	75	355
6	24.4	74	187	261
7	7.11	751	60	811
8	10.4	752	63	815
9	18.9	76	214	290
10	10.5	304	79	383

注1: 高速経路は阪神高速を経由する経路, 一般経路は一般道のみを走行する経路を指す。

(4) OD間旅行時間の確率分布関数

No.1~No.10の各ODペアのOD間旅行時間(実旅行時間と基準化旅行時間)の確率分布関数(いずれも経験累積分布関数)は図-1と図-2に示す通りである。

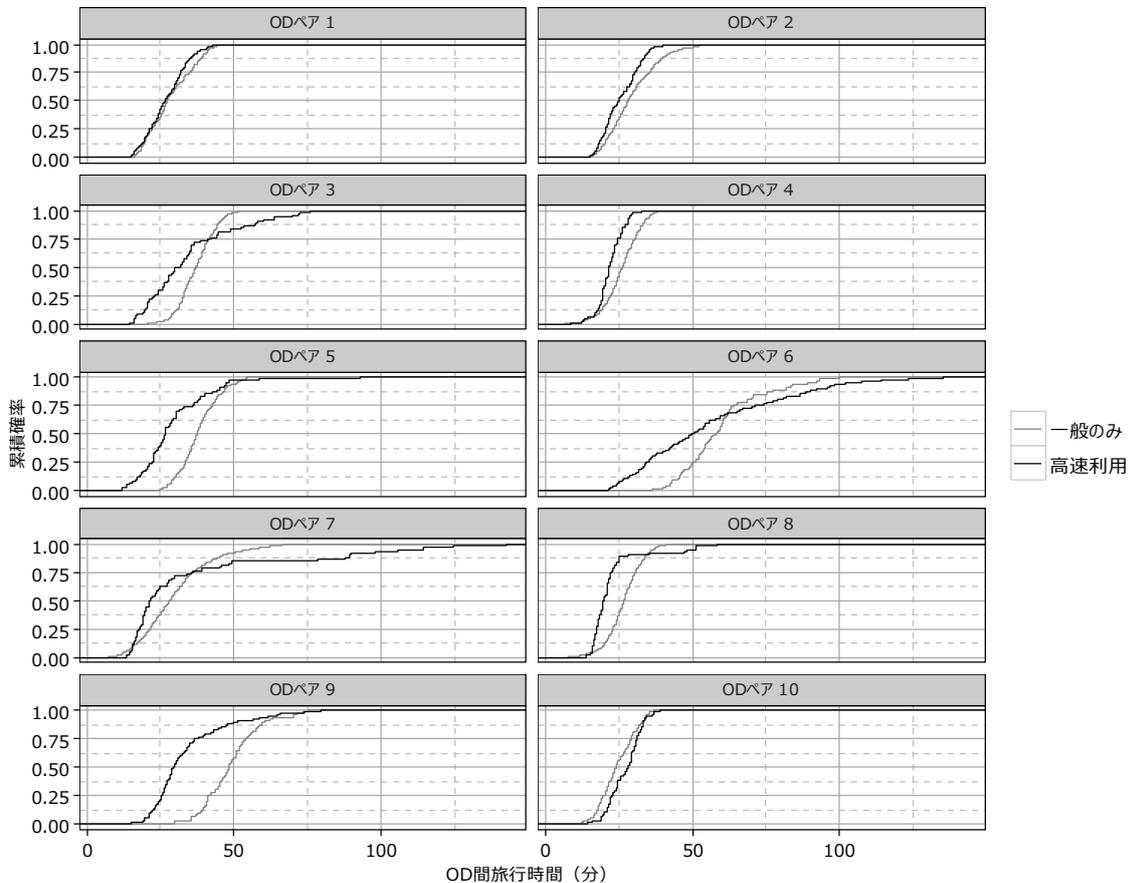


図-1 信頼性比算出対象ODペアのOD間旅行時間の分布(実旅行時間)

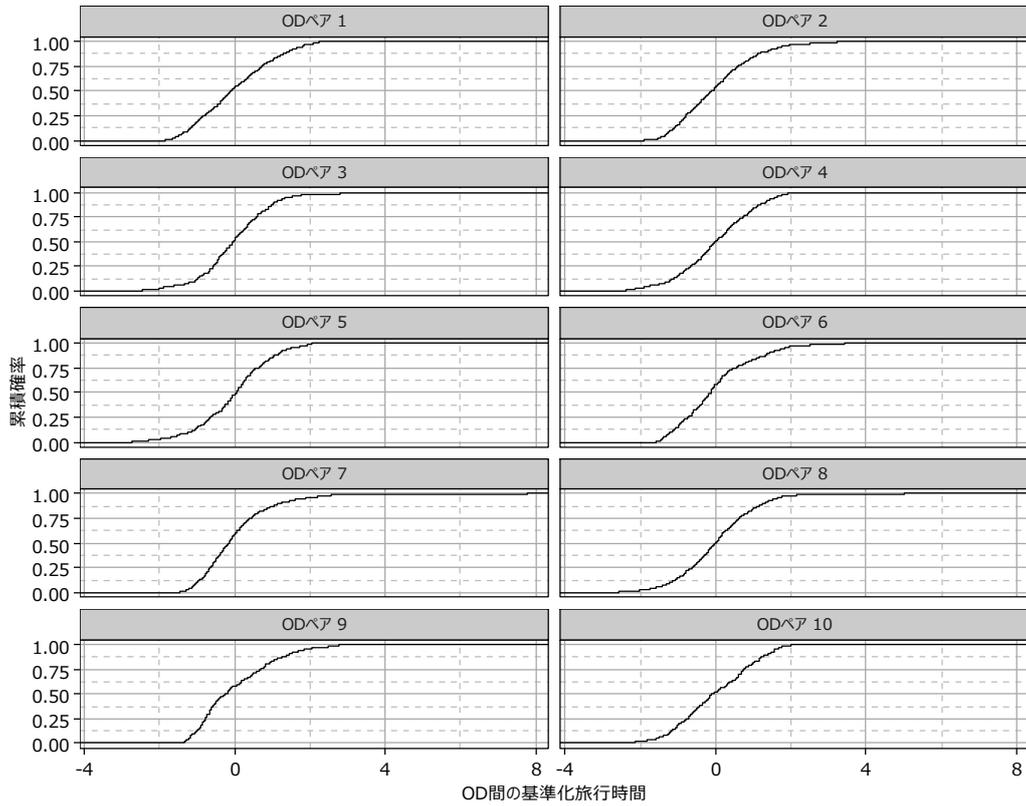


図-2 信頼性比算出対象ODペアのOD間旅行時間の分布（基準化旅行時間）

ここに、旅行時間の分布関数は経験累積分布関数とした。これによりH指数の計算式における積分区間の上限値を1.0とできる（注： $y=1.0$ に漸近する分布関数にフィットさせると積分区間の上限値を1.0未満の値に近似させる必要が生じる。）

また、基準化旅行時間（図-2）は高速利用非利用の区別をせず、ODペア単位で集計した。これは、OD単位の信頼性比を算出することに対応したものである。

図-1によると、外れ値（95%値超，3.(3)参照）を除去したものの、実旅行時間の分布範囲が広いODペアがある（No.6, No.7等）。これらのODペアは、旅行時間や移動距離に係る外れ値を除去した後も移動経路のバリエーションが他のODペアに比べて広いと考えられる。

一方、図-2によると、各OD間の基準化旅行時間の分布関数は比較的似ており、基準化旅行時間=0付近が中央値（累積確率0.5に対応する値）であることがわかる。

4. 信頼性比の算出結果

信頼性比は、H指数とスケジューリングパラメータから算出する。ここに、スケジューリングパラメータを推定するには、旅行時間変動を明示的に考慮した経路選択行動調査が必要であり、その実施に要するコストが大きいため、パラメータを推定せず、外生的に与えた。

(1) 既往研究によるスケジューリングパラメータに基づく信頼性の算出

Small⁴⁾の研究に基づいて作成したスケジューリングパラメータ（下記参照）を用い、10ODペアのH指数と信頼性比を算出した。

$$\eta = -0.065, \lambda = -0.319, \omega = -0.041$$

まず、H指数の算出結果を図-3に示す。

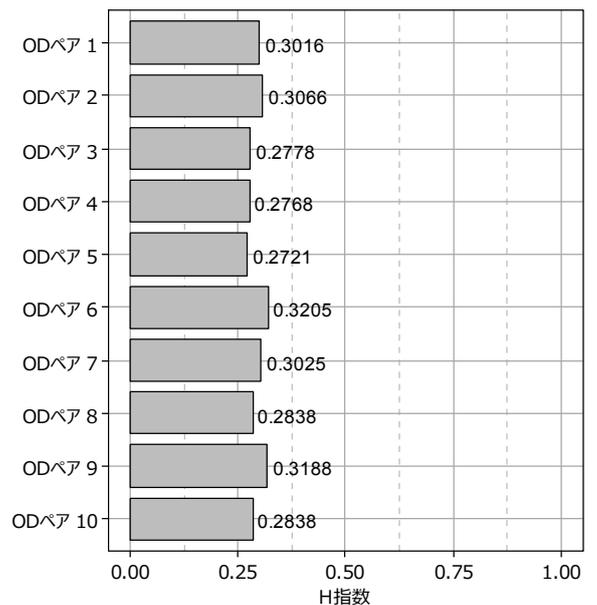


図-3 H指数（Small⁴⁾に基づくスケジューリングパラメータ）

図-3によると、H指数の値は0.27~0.30の範囲であり、Nakataら³⁾が車両検知器データから算出した経路旅行時間に基づくH指数の推定値と概ね同じ範囲である。

次に、信頼性比の算出結果を図-4に示す。

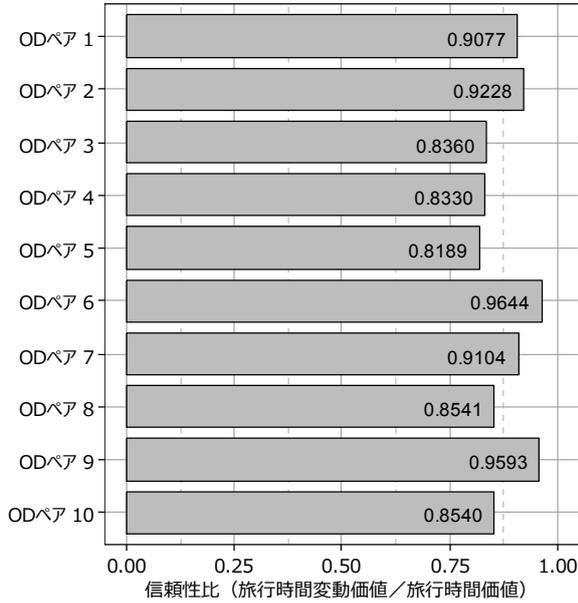


図-4 信頼性比 (Small⁴⁾ に基づくスケジューリングパラメータ)

この図によると、旅行時間変動値は旅行時間値より少し小さい値、具体的には80~96%程度の値であるという結果が得られた。ここに、中山⁵⁾は信頼性比について、

『既往研究における信頼性比は1.0~1.5程度と思われるが、12程度の研究が多いようである。』と述べている。ただし、旅行時間データの収集方法、旅行時間分布についての仮定、旅行時間変動指標等は研究等によって異なっており、本研究で算出した信頼性比も含め、さらなる研究事例の蓄積が必要と考えられる。

(2) H指数に関する感度分析

上の試算ではスケジューリングパラメータを外生的に与えた。そこで、スケジューリングパラメータのうち η と λ 、具体的には η/λ (遅刻しても仕方がないとする確率 (最適遅着確率) に相当¹⁾) を変化させて、そのH指数への影響について検討した。その際、最適遅着確率として、2,3,4,5,7,10,20日に1回遅刻しても仕方がないという状況に対応する以下の7つの値を与えた。

$$\eta/\lambda = 0.5, 0.33, 0.25, 0.20, 0.14, 0.1, 0.05$$

以上に基づいて算出したH指数を図-5に示す。この図によると、以下のことがわかる。

- H指数の値は概ね0.10~0.40の範囲にある。
- η/λ が小さいほどH指数は小さい (逆もいえる)。
- η/λ が同じならODペアによるH指数の違いは小さい。(例： $\eta/\lambda=0.2$ の場合のH指数は0.25~0.32の範囲)つまり、遅刻しても仕方がないとドライバーが思う確率が大きい (小さい) ほどH指数も大きい (小さい)。

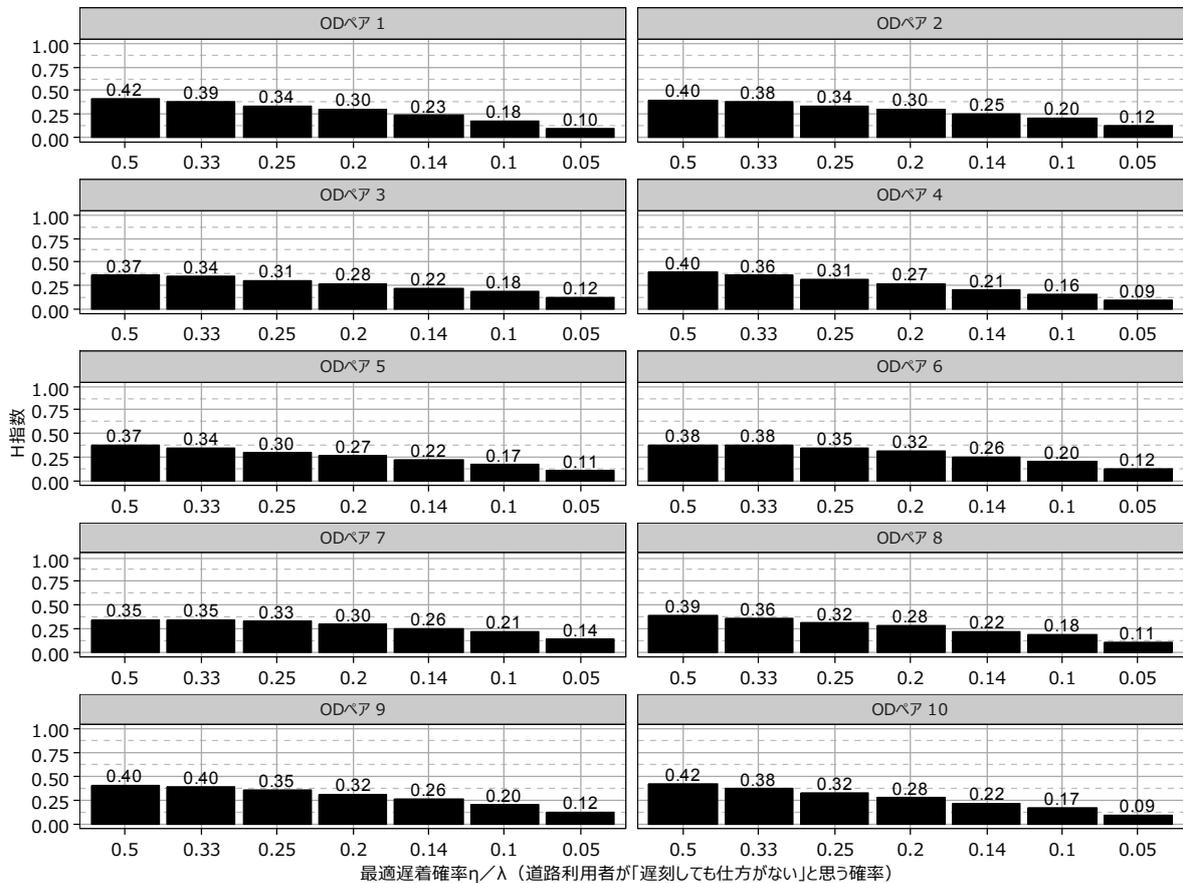


図-5 最適遅着確率 (η/λ) を外生的に与えた場合のH指数の試算結果

5. おわりに

(1) 本研究の成果

本研究では、旅行時間信頼性の便益評価に必要な信頼性比を算出した。具体的には、阪神高速道路の沿道地域で収集されたプローブデータにおいて高速道路を利用する経路と利用しない経路が混在するODペアを10個選び、OD間の旅行時間分布に起因する信頼性比を算出した。

その結果、10ODペアの信頼性比として0.82~0.96の値が得られ、旅行時間変動値は旅行時間値よりやや小さいことを示唆する結果が得られた。さらに、スケジューリングパラメータ（最適遅着確率）が同じであれば、ODペアが異なってもH指数はほぼ同じであることを示唆する結果が得られた。

(2) 今後の課題

1) 時間帯別の信頼性比の算出

朝夕のピーク時は通勤が多く、昼間は自由が多いなど、移動目的は時間帯により異なっており、時間帯別の信頼性比を推定するのが望ましい。十分な量のプローブデータが確保できないOD・時間帯が出てくる可能性があるため、長期（半年以上）のプローブデータの使用、時間帯の集約などが必要である。

なお、本研究で用いたプローブデータは主に貨物車から収集されたものである。様々な移動目的を考慮して時間信頼性を評価する上では、乗用車を多く含むプローブデータの活用も今後必要である。

2) スケジューリングパラメータの推定

本研究では、スケジューリングパラメータは外生的に与えて信頼性比を算出した。信頼性比は旅行時間分布とスケジューリングパラメータで決まるため、評価対象路線の実態を反映したスケジューリングパラメータを用いるのが望ましい。したがって、旅行時間変動を考慮した経路選択行動調査など、スケジューリングパラメータ推定に向けた調査の計画立案・実施について検討する必要がある。

3) 時間信頼性指標の効率的な評価方法の検討

既往研究及び本研究では、経路単位及びOD単位の時間信頼性評価に必要な信頼性比について検討を行った。阪神高速道路における新規路線の整備は影響範囲は広いと考えられるため、時間信頼性評価も広域を対象とするべきである。その方法として、今回適用した方法を対象範囲全体で繰り返すことが考えられる。しかし、対象範囲の広さによっては、計算コストが膨大になる可能性がある。

そこで、(OD間での評価の繰り返し回数を削減するための) 評価対象範囲の絞り込み、経路やODとは異なる評価単位など、効率的な計算方法についての検討が必要である。

謝辞: 本研究の遂行にあたっては、福田大輔東京工業大学准教授より有益かつ的確なアドバイスをいただいた。ここに感謝の意を表す次第である。また、プローブデータの使用について(株)富士通交通・道路データサービスの多大なご協力を得た。あわせて感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 中山晶一郎・朝倉康夫編著：道路交通の信頼性評価，pp.39-71，コロナ社，2014。
- 2) Fosgerau, M. and Fukuda, D. : Valuing travel time reliability, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 24, pp.83-101, 2012.
- 3) Nakata, R., *et al* : Application of an integrated approach for determining travel time reliability benefit in an urban expressway, 6th International Symposium on Transportation Network Reliability - The value of Reliability, Robustness and Resilience, 2015.
- 4) Small, K. A. : The scheduling of consumer activities: work trip, American Economic Review, Vol.72, No.3, pp.467-479, 1982.
- 5) 中山晶一郎：道路の時間信頼性に関する研究レビュー，土木学会論文集D3（土木計画学），Vol.67, No.1, pp.95-114, 2011.

(?)