

所要時間情報提供による 所要時間信頼性向上便益の試算

倉内 文孝¹・Amr Mohamed Wahaballa²・宇野 伸宏³
・高木 朗義⁴・Ayman Othman⁵

¹正会員 岐阜大学准教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

E-mail: kurauchi@gifu-u.ac.jp

²非会員 岐阜大学研究員 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

E-mail: amr_whbala@yahoo.com

³正会員 京都大学准教授 経営管理研究部 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: uno@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

⁴正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

E-mail: a_takagi@gifu-u.ac.jp

⁵非会員 Professor, Aswan Faculty of Engineering, South Valley University

本稿では、所要時間情報を提供することによってドライバーの所要時間不確実性が減少され、その結果として便益が生じることを示す。ドライバーは、移動に関する時間損失に加え、早着および遅着に起因するスケジューリングコストを考慮した上で、期待一般化費用を最小化できる出発時刻を選択し、なおかつ確率的に経路選択するものとする。Webアンケート調査手法を用い、ドライバーの経路選択と出発時刻選択行動についてSP調査によりデータ収集し、このデータを用いてスケジューリングコストに関連するパラメータと、情報取得による所要時間の平均および標準偏差値の変化に関するパラメータの推定を行った。さらに、上記のパラメータを用い、CTM (Cell Transmission Model) を活用し、簡単な1OD2経路のネットワークにおいて、情報提供による期待一般化費用短縮効果についてシミュレーション分析を行った。その結果、ドライバーは所要時間情報を得ることで経路および出発時刻を調整することが可能となり、特に遅着に関するコストを小さくすることができることがわかった。その結果、全体の期待一般化費用も大きく減少し、交通情報提供には大きな便益が生じることが明らかとなった。

Key Words : *Travel time reliability, Information Provision, Benefit evaluation, Cell Transmission Model*

1. はじめに

成熟社会を迎え、個人の移動に対する時間価値が大きくなっており、予期せぬ時間遅れに対する損失が莫大となっている。それゆえ、ただ単に所要時間が短縮されるだけでなく、常に一定時間内に到達できるという安定的なサービスが求められている。従来、我が国の高速道路整備効果においては、走行時間や渋滞損失時間を用いて道路のサービス水準の評価及び費用便益分析を行ってきたが、今後は所要時間信頼性による評価が必要とされてくる。筆者らは、新名神高速道路の開通前後における所要時間信頼性向上による便益の算定方法について検討してきており、スケジューリングアプローチを活用するこ

とで、信頼性向上による便益評価が可能なフレームワークを示している¹⁾。本稿においては、上記の研究フレームを踏襲しつつ、所要時間情報提供による便益評価を試みた結果を報告する。

2. 出発時刻選択および経路選択の仮定

(1) スケジューリングアプローチの概要

スケジューリングアプローチとは、到着時刻制約を持つドライバーが所要時間の変動を考慮した期待不効用を最小にするような出発時刻選択を行う、という仮定の下に定式化されている。所要時間信頼性向上便益が利用者に帰着するため、その計測は利用者の行動結果をベース

に行う必要があるという視点に立ち、スケジューリングアプローチによる便益評価手法を適用する。

定式化にあたって、まず次を仮定する。

- 早着／遅刻のペナルティは、早着分、遅刻分に対して線形に変化する。
- 旅行者は、早着／遅刻ペナルティを考慮しながら最適な出発時刻を選択している。

到着制約時刻=0 とすれば、トリップの出発時刻が t_d である場合の期待コストは次のように記述できる。

$$EC(t_d) = \alpha \int_0^\infty tf(t)dt + \beta \int_0^{t_d} (t_d - t)f(t)dt + \gamma \int_{t_d}^\infty (t - t_d)f(t)dt \quad (1)$$

ただし、 α ：時間価値、 β ：早着に関するペナルティ、 γ ：遅刻に関するペナルティ、 EC ：早着／遅刻ペナルティを考慮した期待総コスト、 $f(t)$ ：所要時間関数の確率密度関数、 $F(t)$ ：所要時間関数の累積分布関数、 t_d ：出発時刻（実効旅行時間）である。

トリップメーカーは、上記でしめられる期待コストを最小化するように出発時間を決定しているとすれば、(1)式が最小となる時刻が出发時刻になる。今、(1)式を t_d で微分すると、次をえる。

$$\begin{aligned} \frac{d(EC(t_d))}{dt_d} &= -\gamma + (\beta + \gamma)F(t_d) + (\beta + \gamma)t_d f(t_d) \\ &\quad - (\beta + \gamma)t_d f(t_d) \quad (2) \\ &= -\gamma + (\beta + \gamma)F(t_d) = 0 \end{aligned}$$

これより、最適出発時刻 t_d^* は次のように記述できる。

$$\begin{aligned} -\gamma + (\beta + \gamma)F(t_d^*) &= 0 \quad (3) \\ \Leftrightarrow t_d^* &= F^{-1}(\gamma / (\beta + \gamma)) \end{aligned}$$

(3)式より、所要時間分布がどのような形状であったとしても、最適出発時刻は早着・遅刻ペナルティの値と、累積分布関数の逆関数から決定されることがわかる。この関係式は、Noland and Small²⁾、あるいは日下部ら³⁾によりすでに示されているが、その際の期待コストと t_d^* の関係をここでは求めたい。最適出発時刻が t_d^* と記述できることから、これを式(1)に代入して最小期待コストをえる。

$$EC(t_d^*) = (\alpha + \gamma)\mu - (\beta + \gamma) \int_0^{t_d^*} tf(t)dt \quad (4)$$

ただし、 μ ：期待所要時間である。第2項の積分は、期待値計算と同様であるが、すべての所要時間で積分するのではなく、0 から最適出発時刻まで積分している。また以下は常に成立する。

$$\begin{aligned} \mu &= \int_0^\infty tf(t)dt = \int_0^{t_d^*} tf(t)dt + \int_{t_d^*}^\infty tf(t)dt \quad (5) \\ &= p_e t_e + p_l t_l \end{aligned}$$

ただし、 t_e, t_l ：それぞれ早着時／遅刻時の条件付き平均所要時間、 p_e, p_l ：遅刻確率である。(5)式より、(4)式は次のように変形できる。

$$EC(t_d^*) = (\alpha - \beta)\mu + \beta t_l \quad (6)$$

以上より、 α, β, γ と μ, t_l が与えられれば、期待コストが簡単な式で表現できることが明らかとなった。

(2) 交通情報提供効果の仮定

上記のスケジューリングアプローチでは、トリップメーカーは所要時間分布に従い出発時刻を決定すると仮定している。一方で、交通情報提供とは、所要時間分布で表現される所要時間の不確実性を減少させることを目的として提供されていると考えることができる。そのため、本研究では、次のような仮定を設けることとする。

- (1) トリップメーカーは、過去の経験により自身の知覚所要時間分布を持つ。なお、ここでは簡単に、トリップメーカーの所要時間分布は、それまでの経験に基づき計算される平均、分散をもつ正規分布と仮定する。
- (2) 所要時間情報が提供されている場合、その情報を参考にして、トリップメーカーは所要時間分布を更新する。具体的には、以下のような更新を行うものとする。

$$\mu = \mu_0 + a_1 (Inf - \mu_0) \quad (7)$$

$$s = a_2 e^{a_3 |Inf - \mu_0|} s_0 \quad (8)$$

ただし、 μ ：更新後の所要時間分布の平均値、 μ_0 ：更新前の所要時間分布の平均値、 s ：更新後の所要時間分布の標準偏差、 s_0 ：更新前の所要時間分布の標準偏差、 Inf ：所要時間情報、 a_1, a_2, a_3 ：パラメータ、である。

式(7)より、もし提供された情報が知覚所要時間分布の平均値と同じであれば、平均値は更新されない。また、パラメータ a_1 は提供情報と知覚所要時間分布の差にかかる係数であり、この値が1より小さければ、情報が5分早くとも知覚所要時間の平均値の補正量はそれより小さい、ということになる。一方、式(8)より、もし情報と平均値が同じ場合には、 $s = a_2 s_0$ となり、もし a_2 が1より小さければ、たとえ提供情報と知覚所要時間平均値に差はなくても標準偏差が小さくなる。また、指数項は、提供情報による補正を示しており、提供情報と平均値に差があればあるほど標準偏差が増加傾向にあることを表現している。

3. Webアンケート調査

(1) 調査の概要

上記で示した出発時刻決定におけるパラメータを決定するため、Web アンケート調査を実施した。実験は、仮想的な IOD2 経路のネットワークを示し、条件が与えられた際の出発時刻と利用経路を質問するものである

(図-1 参照)。選択に影響を及ぼしうる要因として、a) 到着時刻制約、b) 所要時間情報差、c) 知覚所要時間の標準偏差の差、d) 平均所要時間の差の 4 項目を考え、それぞれ 3 水準として設計している。表-1 に、各要因の水準を示しておく。なお、知覚所要時間について、平均と分散をそのまま示しても理解が難しいと考えたため、5 日間のうちの頻度として示している。たとえば、4 日間は 22 分で走行できるが、1 日は 37 分かかる、といった形で表現している。すべての交互作用を認めると、 $3^4=81$ 通りの質問項目となるが、被験者の労力を考え、これを 9 ブロックに分割し、各被験者に 9 問ずつ回答していただくこととした。

本来ならば、被験者は Web 調査会社等を通じて募集し、被験者に大きな偏りがないよう収集すべきであるが、ここでは筆者らが電子メールを通じて募集した被験者による結果を示す。より広範な被験者での実験を行い、結果の信頼性を確認することが今後の課題である。

実験では、まず普段の交通行動や性別、年齢などの情報を質問する。その後、9 問の SP 調査に回答いただいた。調査にかかる時間はおよそ 15 分である。調査は、Web 上に設置し、電子メールにて参加を依頼し、賛同いただいた方にウェブサイトにアクセスし、回答していただいた。調査は、2011 年 7 月から 8 月にかけて実施した。

調査に参加いただいた被験者は、総数 247 名であったが、最後まで調査に協力されなかった方を除くと 149 の有効サンプルであった。本研究では、この 149 サンプルのデータを用いて分析を進める。このうち、84%が男性であり、80%が 20~40 代である。また、55%が学生で、43%が雇用者であった。

(2) パラメータ推定

以上のデータを用いて式(7)、(8)に示したパラメータを推定する必要があるが、それに加えて、スケジューリングモデルのパラメータである α 、 β 、 γ も未知変数として取り扱う必要がある。ここでは、 α は既存の調査を参考にし、49.18 円/分とし、また早着の際には他の行動ができないと仮定して、 $\beta=\alpha$ とする。 γ については、データから推定することとした。

調査において、所要時間の平均値と標準偏差値を与えているため、こちらを情報提供前の所要時間分布と仮定

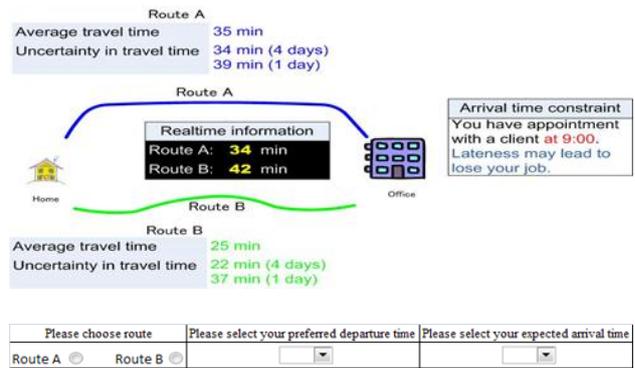


図-1 調査画面

表-1 実験の設計

要因	レベル		
	到着時刻制約	9:00~9:30 に到着	9:00 に到着
所要時間情報差	0	8分	-8分
標準偏差の差	0	4.47分	8.22分
平均所要時間差	5分	10分	15分

する。それに対して、情報提供がない場合には、この分布にしたがい出発時刻を決定しているとし、情報提供がある場合には、式(7)、(8)で示した形で平均及び標準偏差値が更新され、更新された所要時間分布により最適な出発時刻を決定していると考えられることとする。このとき、式(3)に示したとおり、最適出発時刻は $(\gamma\beta\gamma)$ の値と所要時間分布の形状がわかれば決定される。つまり、回答された時刻との差の二乗和を最小にする $a_1 \sim a_3$ 、 $\omega (= \gamma\beta\gamma)$ を求めることとする。

$$\min_{a, \omega} \sum_n \sum_{k=1}^9 \left(t_{dnk}^* - F_{\mu_{nk}, s_{nk}}^{-1}(\omega) \right)^2 \quad (9)$$

ただし、 n は被験者、 k は質問番号を意味しており、 t_{dnk}^* は、被験者 n が k 番目の質問で回答した実効旅行時間、 μ_{nk} 、 s_{nk} は、被験者 n の k 番目の質問で選択した経路に関する情報取得後の更新された所要時間分布の平均及び標準偏差であり、式(7)、(8)に示されるように、パラメータ $a_1 \sim a_3$ の関数となっている。

なお、パラメータ推定はエクセルのソルバーを用いて行った。今後より適切な推定方法を検討する必要があるといえる。

(3) 推定結果の考察

初期値を変化させ計算を繰り返し、最も最小二乗誤差が小さいものを選択した結果、以下が最適なパラメータ値として推定された。

$$\alpha=0.985, a_1=0.022, a_2=0.905, a_3=0.011$$

なお、この計算においては、到着時刻制約ごとに推定を行っておらず、比較的到着時刻制約が強い、2 水準のデ

ータのみを用いている。到着時刻制約ごとのパラメータ推定については、今後実施することとしたい。この結果より、 β と γ の比で表される ω が 0.985 であることから、98.5%所要時間を元に出発時刻を選択しており、今回の推定結果はかなりリスク回避的なものである。また、 a_1 は 0.022 であることから、所要時間情報と分布の平均値に差があっても、それほど敏感には平均値を更新しないようである。さらに、 a_2 が 0.905 と推定されており、情報がたとえ所要時間分布の平均値と同じであっても、その標準偏差は 10%程度減少する。最後に、 a_3 は正であることから、やはり提供情報と平均値が乖離すればするほど標準偏差は大きく修正される。

さらに、推定結果と実効旅行時間の回答値との関係を示したのが図-2 である。今回はエクセルのソルバーを用いているため、厳密な統計解析を行っていないが、まずまずの適合度であることが確認できる。

4. シミュレーションによる情報提供効果の試算

(1) 分析の方針

次に、得られた出発時刻選択行動および知覚所要時間更新モデルを用い、情報提供の効果を考察する。ここでは、10D2 経路の簡単なネットワークを対象として、所要時間情報提供による効果を 2(1)に示したスケジューリングアプローチを用いて評価する。なお、経路の選択については、ここでは簡単に、実効旅行時間に基づく期待所要時間コストを用い、ロジット型の確率選択行動を仮定とした。

シミュレーション計算においては、Cell Transmission Model (CTM) ⁴⁾を用いることとする。CTM は、ネットワークを同じ長さの Cell に分割し計算する方法である。Cell ごとに定義される流入交通需要や臨界密度などを用い、簡単な計算で交通流を再現できるため、ここでは CTM を採用した。

(2) シミュレーションの設定

シミュレーションにより、最終的な評価である総所要時間を求めるとともに、ドライバーに提供する所要時間情報を作成する。ここでは、2 経路の選択問題とし、計算を進めた。シミュレーション計算の設定値を表-2 に示しておく。経路 B の方が、自由走行時間が長いものの、最大交通容量および最大滞留可能台数が大きく設定されており、より条件のよい道路と考えられる。

今回示した計算条件においては、すべてのドライバーが到着時刻制約を有するとし、到着時刻制約は、計算開始後から平均 90、標準偏差 10 分の正規分布に従うものとした。また、計算は 30 日間実施するが、元の 10 日は、知覚所要時間分布の作成を目的としており、所要時間情

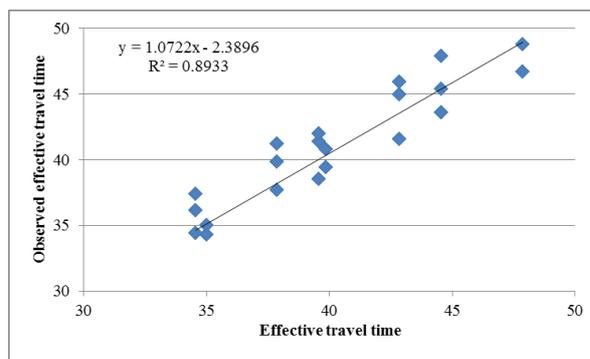


図-2 実効旅行時間推定値と観測値の関係

表-2 シミュレーションの計算条件

	経路 A	経路 B
距離 (km)	35	50
自由走行時間 (分)	35	50
最大交通容量 (台/分)	10	15
最大滞留台数 (台/Cell)	15	20
計算時間間隔 (分)	1	
Cell 長 (km)	1	
情報提供更新間隔 (分)	5	
情報の丸め単位 (分)	5	
情報参照タイミング	15 分前	
繰り返し計算数	30	
サンプル数	1000	
到着時刻制約	すべての人が有し、計算開始から 90 分後を平均として、 $N(90, 10)$ に従う。	
α (円/分)	49.18	
β (円/分)	49.18	
γ (円/分)	3229.49	

報も提供しない。その後、20 日は所要時間情報が提供され、その元で知覚所要時間分布を更新し、最適出発時刻及び経路を選択するロジックとなる。

情報は、5 分間ごとに、その時点でのブロックの状況から作成される現在時間情報とし、それを 5 分単位で切り上げて作成した。また、ドライバーは、毎日の計算開始前に知覚所要時間分布および自身の到着時刻制約により予定出発時刻及び予定経路を決定する。その後、出発時刻より情報参照タイミング（この計算では 15 分）の時間さかのぼった時間になったときに、情報を参照し、知覚所要時間分布を更新する。その結果得られた出発時刻をもって車両を発生させ、所要時間をシミュレーションより計算する。最後に、経験した所要時間を元に、知覚所要時間分布を更新するが、ここでは忘却を考慮せず、計算実施日までの経路ごとの経験所要時間の平均値および標準偏差値を知覚所要時間分布パラメータとして保持することとした。詳細なシミュレーションの流れを図-3 に示しておく。

なお、シミュレーションにおいて、確率経路選択の際に乱数を用いているため、その影響を除去するために10回のシミュレーションを実施し、その計算結果により比較を行う。ここでは、情報提供利用率を変化させた場合の提供効果について考察を加えることとする。

(3) 計算結果の考察

図-4に、情報を参照するドライバーの割合を変化させた場合の計算結果から得られる総コストを示した。図-4(a)は、総コストを示しており、(b)、(c)、(d)はそれぞれ移動コスト、早着コスト、遅着コストを示している。また、図中には10回のシミュレーションの平均値とともに、最小/最大値も併せて示した。この結果を見ると、情報提供を利用することによって総コストがおよそ9500円から6500円程度と大きく減少していることがわかる。図-4(b)~(d)をみると、その理由のほとんどは、遅着コストの減少額である。つまり、交通情報を得ることで、遅着を避けることができ、その結果大きく総コストが減少したようである。また、興味深いのが、移動コストおよび早着コストは、情報提供を行うことによって、逆に増加している。ドライバーは交通情報を得ることによって、多少の早着や所要時間を許容しても、遅着を避けることで移動にかかわる総額を減少させることが可能といえる。

交通情報提供効果にかかわる既往研究の多くは、出発時刻選択を与件とし、所要時間の短縮効果により情報提供効果を議論することが多かった。それらの研究の多くは、情報提供の効果が効果的に発現するのは、情報利用率がおおよそ30%~50%程度であり、それより大きくなると、総所要時間の増加が起こり、ある程度以上の情報利用者がある場合、情報提供がない場合と比較してかえって所要時間が長くなる傾向があることが示されている。情報利用率ごとの情報提供効果を金銭価値に換算したものを図-5に示す。図-5を見ると、やはり情報提供の便益が最も生じているのは情報利用率が40%程度のところであり、この結果は既往研究の知見と整合する。一方で、本研究のシミュレーション結果からは、情報提供利用率が大きくなっても、情報提供便益は大きくは減少しなかった。情報提供が実施されることによって、主に出発時刻が調整され、その結果遅着によるコストを抑えることができる。それが最終的に情報提供の価値につながっており、早着コストおよび移動コストは大きく変化はしなかった。情報提供の効果の多くは、所要時間の短縮という形では発現しにくいことをこの結果は示していると考えられる。

なお、この計算結果において、情報利用率が0.1のと

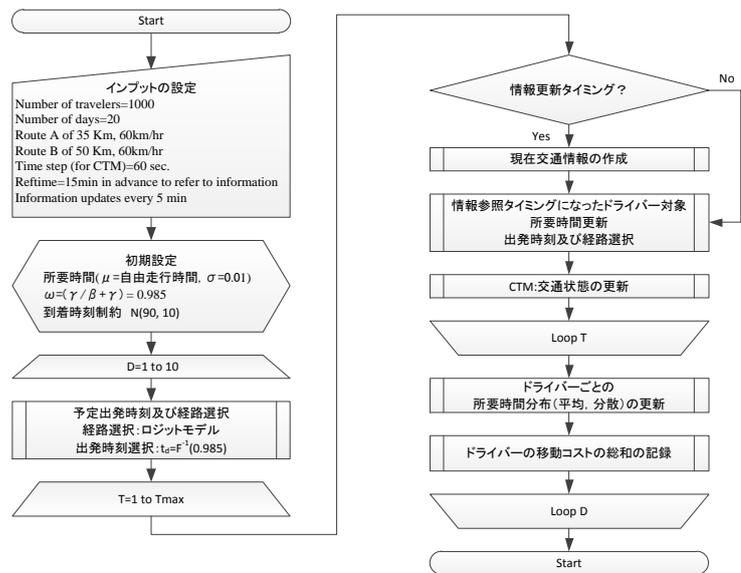


図-3 計算フローチャート

きに、情報利用率がゼロのケースと比較して大きく総コストが減少しているが、現在のところその原因を突き止めておらず、今後詳細な検討を進める予定である。

5. おわりに

本研究では、スケジューリングアプローチを用いて情報提供効果を検証する枠組みを提案し、Webアンケート調査により、スケジューリングモデルのパラメータおよび所要時間分布の更新過程に関するパラメータの推定を行った。さらに、得られた出発時刻選択モデルをCTMと組み合わせ、所要時間情報提供効果の便益評価を試みた。その結果、情報提供効果による便益は主に遅着を避けることができることによって発現し、移動コストの短縮はそれほど大きくはないことが明らかとなった。この結果は、情報提供の効果が、所要時間短縮という目に見える形のみではなく、遅刻の回避という観測しづらい点に大きく含まれることを示しており、本研究ではその観測手法を提案することができたといえる。

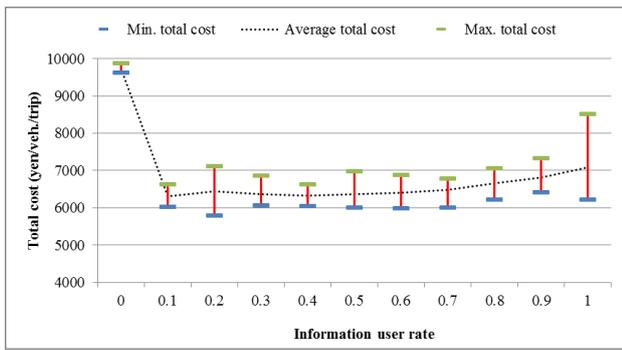
以上のように、本研究で得られた知見は、今後情報提供の効果を議論する際に重要な示唆を与えるものと考えられるが、一方で、分析に用いた値については慎重に議論すべきところもあり、現時点ではあくまで試算に過ぎない。より信頼性の高い議論を進めるためには、以下の問題を検討する必要があると考える。

1. 偏りのないWebアンケート調査の実施

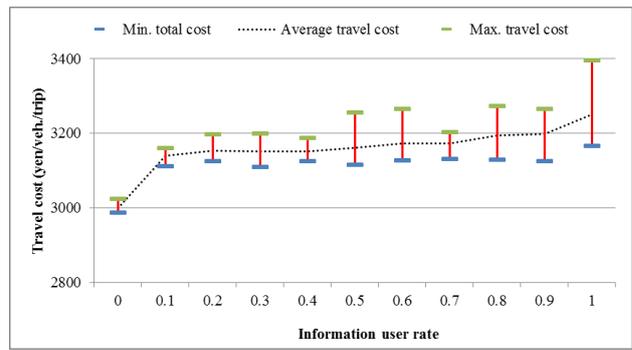
今回は、電子メールにて知人に勧誘することでWeb調査を実施したため、得られたパラメータ推定値について再度慎重に検討する必要があるだろう。

2. パラメータ推定方法の検討

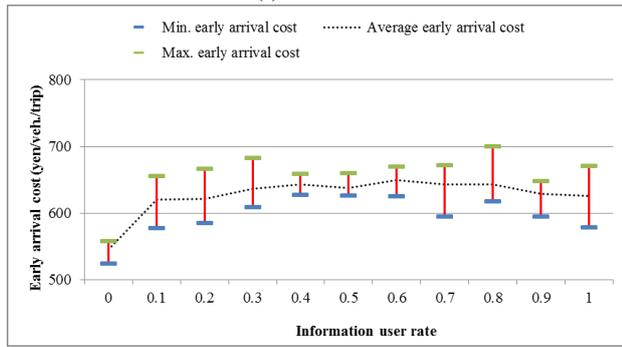
同じく、パラメータ推定においては、エクセルのソル



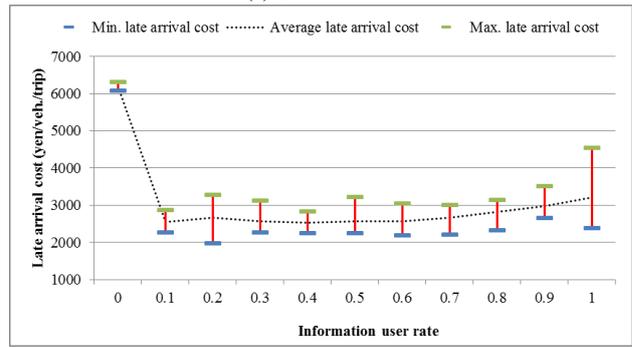
(a) 総コスト



(b) 移動コスト



(c) 早着コスト



(d) 遅着コスト

図4 計算結果

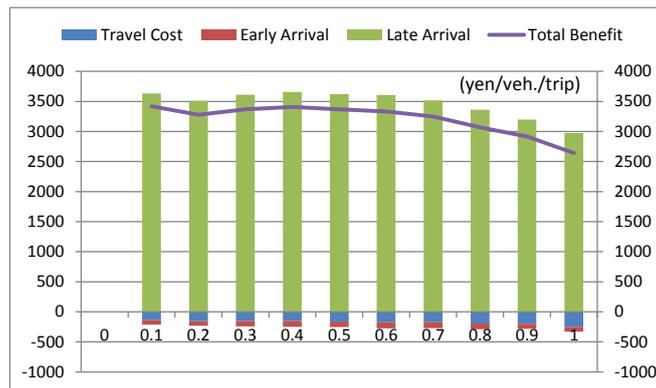


図5 総便益の推移

バーを活用しており、推定値の統計学的検証などを行っておらず、その信頼性には疑問が残る。他の推定方法を検討する必要があるといえる。

3. 個人異質性、トリップ異質性の検討

Webアンケート調査では、到着時刻制約を3段階に分けて質問しているが、ここで推定したパラメータは、到着時刻制約が比較的強い2つのケースのデータを用いたものである。制約の強さによって当然スケジューリングモデルのパラメータが変化することが考えられるため、それを考慮したモデル化を進めたい。さらに、個人の異質性についても考慮したモデル化も重要な拡張になるだろう。

4. 様々なケーススタディの実施

今回は、情報利用率を変化させた結果のみを示したが、その他、情報提供の更新頻度や丸め誤差、あるいは情報

参照タイミングが異なる場合など様々なシナリオが考えられる。ケーススタディを繰り返し、情報提供の効果のより効果的な発現条件などについて、知見を深めたい。当然ながら、より複雑かつ多ODペアでのシミュレーション計算も今後の重要な課題である。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B)「時間信頼性に基づく道路交通サービス水準変動の評価・マネジメント手法に関する研究」(課題番号：21360245, 期間：平成21～23年, 研究代表者：宇野伸宏)の一部として実施された。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 倉内文孝, 伊藤秀昭, 古市英士, 宇野伸宏, 永田順宏, 田中哲也: スケジューリングアプローチによる新名神開通による旅行時間信頼性向上便益の算出, 土木計画学研究・講演集, Vol. 40, CD-ROM, 2009.
- 2) R. B. Noland, K. A. Small, Travel-time uncertainty, departure time choice, and the cost of morning commutes, Transportation Research Record 1493, 150–158, 1995.
- 3) 日下部貴彦, 井料隆雅, 朝倉康夫: 「出発時刻選択と旅行時間信頼性」, 土木計画学研究・講演集, Vol. 37, CD-ROM, 2008.
- 4) Daganzo, C. F. :The cell transmission model: A simple dynamic representation of highway traffic. Transportation Research Part B, 28, 269-287, 1994.

(2012.5.7 提出)

Benefit of Travel Time Reliability Improvement by Travel Time Information Provision

Fumitaka KURAUCHI, Amr Mohamed WAHABALLA, Nobuhiro UNO,
Akiyohi TAKAGI and Ayman OTHMAN