

高速道路上の完全自動運転化を前提とする 確率的時間価値の異質性を考慮した 最適通行料金モデル

栗原 脩斗¹・峪 龍一²・内田 賢悦³

¹ 学生会員 北海道大学大学院 工学院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: manyon819@eis.hokudai.ac.jp

² 正会員 北海道大学大学院 工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: r-tani@eng.hokudai.ac.jp

³ 正会員 北海道大学大学院 工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: uchida@eng.hokudai.ac.jp

自動運転車両の研究開発の過程において、限定的な走行領域において完全自動運転が可能となる車両の普及が予測される。完全自動運転化により、ドライバーの時間価値は低下すると考えられている。本研究では、高速道路上のみの完全自動運転化を前提として、利用する道路により時間価値が異なることを考慮した需要変動型の確率的利用者均衡配分モデルを開発する。さらに、このような道路ネットワークにおいて、消費者余剰を最大にする高速道路料金の設定手法を提案する。本研究では、非観測要因による時間価値の確率的変動を考慮し、この変動に起因する移動コストの不確実性を表現する。これにより、完全自動運転化による移動コストの変化に加え、その不確実性の変化も考慮される。最後に、テストネットワークで数値計算を行い、モデルの挙動を確認する。

Key Words: *autonomous driving, stochastic value of time, expressway toll, travel cost uncertainty*

1. はじめに

自動運転技術の研究開発の過程において、走行領域が限定された自動運転車両の普及が予測される。これは自動運転化レベル 4 に相当し、実用化に向けた動きが加速している。官民 ITS 構想・ロードマップ¹⁾では、2025 年を目途に、ドライバーの運転操作を全く必要としない完全自動運転が、高速道路上において利用可能になると見込まれている。一方で、自動運転化レベル 5 にあたる、走行領域の限定なしに完全自動運転が可能となる段階は、技術的レベルが非常に高く、達成には時間を要すると予想される。したがって、自動運転技術の研究開発過程では、レベル 4 の状況が長期間継続すると考えられる。

完全自動運転化により、ドライバーは移動中に運転以外の活動を行うことが可能となる。そのため、自動運転時におけるドライバーの時間価値は、ドライバー自身が手動で運転するときの時間価値に比べ、30~40%程度低下することが指摘されている^{2),3)}。自動運転を利用可能

な走行領域が限定される状況下においては、利用する道路ごとに運転モードが異なることにより、時間価値も道路ごとに異なると考えられる。これにより、自動運転を利用可能な道路へ交通が集中することが予想され、それに対応した適切な道路管理モデルが必要となる。

また、ドライバーの時間価値は非観測要因により確率的に変動すると考えられ、その変動に起因して、移動コストは不確実なものとなる。ドライバーは移動コストのばらつきが小さい経路を選好するため、移動コストの不確実性の大きさはドライバーの行動に影響を与える。そのため、交通状態の予測や事業便益評価において、移動コストの不確実性を考慮することは重要である。

既往研究において、自動運転化レベル 4 にあたる、限定的な走行領域でのみ自動運転が可能となる車両の普及を想定した研究は少数である。Wu et al⁴⁾は、自動運転で走行する高速道路と手動運転で走行する一般道路が混在する、特定の小規模なネットワークにおいて交通量配分モデルを提案した。このモデルでは、自動運転時の時間

価値と手動運転時の時間価値を異なる値で設定しており、運転モードによる時間価値の異質性が考慮されている。

ドライバー間の時間価値の違いを考慮した研究は Leurent⁵⁾や Wu and Huang⁶⁾などで行われてきた一方で、個々のドライバーの時間価値が確率的に変動することを考慮した研究は行われていない。移動コストの決定要因が確率的に変動することによる不確実性を考慮した交通量配分モデルは、これまでに検討されてきた。例えば、Tani et al⁷⁾は交通需要と交通容量、新田ら⁸⁾は交通需要と車頭間距離を確率変数とし、移動時間の不確実性を考慮した交通量配分を提案した。

また、混雑を緩和するための解決策となる、混雑課金に関する研究は、これまでに多数行われている。混雑化課金はファースト・ベスト課金とセカンド・ベスト課金に分類されるが、一部の走行領域にのみ課金をするセカンド・ベスト課金は実用上重要であり、様々なモデルが提案されている⁹⁾。

本研究では、高速道路上でのみ自動運転による走行が可能となる車両の普及を想定した、高速道路の最適通行料金モデルを開発する。まず、自動運転と手動運転の運転モードの違いによる時間価値の異質性を考慮した交通量配分手法を開発する。本研究では、高速道路と一般道路が混在するネットワークにおいて、高速道路上のみの完全自動運転化を仮定するため、利用する道路により時間価値が異なる。また、時間価値を確率変数とすることで、非観測要因による時間価値の変動を表し、この確率的変動に起因する移動コストの不確実性を考慮する。そして、上記の交通量配分に基いて、消費者余剰が最大となる高速道路の最適通行料金設定手法を示す。

本稿の構成を以下に示す。第 1 章では、本研究を行う背景とモデルの概要を述べた。第 2 章では、最適通行料金モデルの定式化を示す。第 3 章では、テストネットワークにおける数値計算例を示す。第 4 章で本研究をまとめ、今後の課題を示す。

2. モデルの定式化

(1) 記号

本稿で用いる主な記号を以下に示す。

| | |
|----------|--------------------|
| W | 道路ネットワーク中の OD ペア集合 |
| K_w | OD ペア w 間の経路集合 |
| A | 道路ネットワーク中のリンク集合 |
| A_e | 高速道路リンク集合 |
| A_h | 一般道路リンク集合 |
| Ω | 経路交通量ベクトルの集合 |
| α | 自動運転時の時間価値 |
| β | 手動運転時の時間価値 |

| | |
|-------------------------------|--|
| ρ | 手動運転から自動運転に切り替わったときの時間価値減少率 |
| $\mu_\alpha, \sigma_\alpha^2$ | α のパラメータ |
| $\mu_\beta, \sigma_\beta^2$ | β のパラメータ |
| t_a | リンク a の移動時間 |
| t_a^0 | リンク a の自由走行時間 |
| c_a | リンク a の交通容量 |
| γ, n | BPR 関数のパラメータ |
| x_a | リンク a の交通量 |
| f_w^k | OD ペア w 間の経路 k の交通量 |
| $\delta_w^{k,a}$ | リンク a が OD ペア w 間の経路 k を構成するとき 1、それ以外の時に 0 をとる変数 |
| \tilde{p}_a | リンク $a (\in A)$ の通行料金 |
| p_a | 高速道路リンク $a (\in A_e)$ の通行料金 |
| GC_w^k | OD ペア w 間の経路 k における一般化コスト |
| Te_w^k | OD ペア w 間の経路 k における高速道路上の移動時間 |
| Th_w^k | OD ペア w 間の経路 k における一般道路上の移動時間 |
| P_w^k | OD ペア w 間の経路 k における高速道路の通行料金 |
| c_w^k | OD ペア w 間の経路 k の不効用 |
| q_w | OD ペア w 間の交通需要 |
| \bar{q}_w | OD ペア w 間の最大交通需要 |
| ω | OD ペア w 間のトリップキャンセルコスト |
| S_w | OD ペア w 間の期待最小費用 |
| θ_1, θ_2 | Nested Logit Model のパラメータ |
| g_w^k | OD ペア w 間の経路 k の配分コスト |
| $D_w(S_w)$ | OD ペア w 間の需要関数 |
| $D_w^{-1}(q_w)$ | OD ペア w 間の逆需要関数 |
| f_w^{k*} | 均衡状態における OD ペア w 間の経路 k の交通量 |
| q_w^* | 均衡状態における OD ペア w 間の交通需要 |
| \mathbf{f} | 経路交通量ベクトル |
| \mathbf{f}^* | 均衡状態における経路交通量ベクトル |

(2) 確率的時間価値の定式化

本研究では、個々のドライバーの時間価値が確率的に変動すること考慮するため、時間価値を確率変数とする。定式化の簡略化と、時間価値が非負であることを考慮し、手動運転時の時間価値 β は対数正規分布に従うものとする。

$$\beta \sim LN(\mu_\beta, \sigma_\beta^2) \quad (1)$$

このとき、 β の平均と分散はそれぞれ式(2), (3)で表される。

$$E[\beta] = \exp\left(\mu_\beta + \frac{\sigma_\beta^2}{2}\right) \quad (2)$$

$$var[\beta] = \exp(2\mu_\beta + \sigma_\beta^2) \cdot (\exp(\sigma_\beta^2) - 1) \quad (3)$$

また、本研究では、ドライバーの時間価値が自動運転時に低下することを考慮する。Wu et al⁴⁾と同様に、手動運転時の時間価値 β に、手動運転から自動運転に切り替わったときの時間価値減少率 $\rho(0 < \rho \leq 1)$ を乗じ、自動運転時の時間価値 α を表す。

$$\alpha = \rho \cdot \beta \quad (4)$$

β は対数正規分布に従うため、 α も同様に対数正規分布に従う。

$$\alpha \sim LN(\mu_\alpha, \sigma_\alpha^2) \quad (5)$$

ここで、 α のパラメータ $\mu_\alpha, \sigma_\alpha^2$ について、それぞれ以下の関係が成立する。

$$\mu_\alpha = \mu_\beta + \ln(\rho) \quad (6)$$

$$\sigma_\alpha^2 = \sigma_\beta^2 \quad (7)$$

このとき、 α の平均と分散は、それぞれ β の平均と分散を用いて式(8),(9)で表せる。

$$E[\alpha] = E[\rho \cdot \beta] = \rho \cdot E[\beta] \quad (8)$$

$$var[\alpha] = var[\rho \cdot \beta] = \rho^2 \cdot var[\beta] \quad (9)$$

また、 α と β の共分散は以下のように表せる。

$$\begin{aligned} cov[\alpha, \beta] &= cov[\rho \cdot \beta, \beta] \\ &= \rho \cdot cov[\beta, \beta] \\ &= \rho \cdot var[\beta] \end{aligned} \quad (10)$$

(3) 移動コストの定式化

交通需要 q_w は、ODペア間を発着するすべての経路交通量の和として表される。

$$\sum_{k \in K_w} f_w^k = q_w \quad (11)$$

where

$$f_w^k \geq 0 \quad (12)$$

リンク交通量 x_a は、リンク a を通過するすべての経路交通量の和で表される

$$x_a = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} \delta_w^{k,a} \cdot f_w^k \quad (13)$$

本研究では、リンク移動時間は式(14)に示す BPR 関数により算出する。

$$t_a(x_a) = t_a^0 \cdot \left(1 + \gamma \cdot \left(\frac{x_a}{c_a}\right)^\eta\right) \quad (14)$$

また、高速道路リンクにのみ通行料金が課されるとし、以下のようにリンク通行料金 \tilde{p}_a は表される。

$$\tilde{p}_a = \begin{cases} p_a & \forall a \in A_e \\ 0 & \forall a \in A_h \end{cases} \quad (15)$$

ここで、高速道路利用者が金銭を得るような政策は考慮せず、 $p_a \geq 0$ である。本研究では、すべての車両が高速道路上では自動運転、一般道路上では手動運転されると仮定し、一般化コスト GC_w^k を以下のように定義する。

$$GC_w^k = \alpha \cdot Te_w^k + \beta \cdot Th_w^k + P_w^k \quad (16)$$

where

$$Te_w^k = \sum_{a \in A_e} \delta_w^{k,a} \cdot t_a(x_a) \quad (17)$$

$$Th_w^k = \sum_{a \in A_h} \delta_w^{k,a} \cdot t_a(x_a) \quad (18)$$

$$P_w^k = \sum_{a \in A} \delta_w^{k,a} \cdot \tilde{p}_a \quad (19)$$

ここで、高速道路リンク集合 A_e と一般道路リンク集合 A_h について、 $A = A_e \cup A_h (A_e \cap A_h = \emptyset)$ である。高速道路リンク上の移動時間 Te_w^k と一般道路リンク上の移動時間 Th_w^k に、自動運転時の時間価値 α と手動運転時の時間価値 β をそれぞれ乗じている。また、 P_w^k は経路上の通行料金の和である。 α と β は確率変数であるため、 GC_w^k も確率変数となり、その平均と分散は式(8)-(10)よりそれぞれ以下のように表せる。

$$\begin{aligned} E[GC_w^k] &= E[\alpha] \cdot Te_w^k + E[\beta] \cdot Th_w^k + P_w^k \\ &= \rho \cdot E[\beta] \cdot Te_w^k + E[\beta] \cdot Th_w^k + P_w^k \\ &= E[\beta] \cdot (\rho \cdot Te_w^k + Th_w^k) + P_w^k \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} var[GC_w^k] &= var[\alpha] \cdot Te_w^k{}^2 + var[\beta] \cdot Th_w^k{}^2 \\ &\quad + 2 \cdot Te_w^k \cdot Th_w^k \cdot cov[\alpha, \beta] \\ &= \rho^2 \cdot var[\beta] \cdot Te_w^k{}^2 + var[\beta] \cdot Th_w^k{}^2 \\ &\quad + 2 \cdot Te_w^k \cdot Th_w^k \cdot \rho \cdot var[\beta] \\ &= var[\beta] \cdot (\rho \cdot Te_w^k + Th_w^k) {}^2 \end{aligned} \quad (21)$$

ここで、 GC_w^k は式(4)により、以下のように β を用いて表され、対数正規分布を平行移動させた分布に従う。

$$\begin{aligned} GC_w^k &= (\rho \cdot \beta) \cdot Te_w^k + \beta \cdot Th_w^k + P_w^k \\ &= \beta \cdot (\rho \cdot Te_w^k + Th_w^k) + P_w^k \end{aligned} \quad (22)$$

本研究では、一般化コストの不確実性を考慮した利用者のリスク回避的な経路選択を想定するため、Tani et al⁷⁾や新田ら⁸⁾に従い、以下のように経路選択基準となる移動の不効用 c_w^k を定める。

$$c_w^k = E[GC_w^k] + \lambda \cdot \sqrt{var[GC_w^k]} \quad (23)$$

ここで、 λ はドライバーのリスク回避度を表すパラメータであり、正の値をとる。

(4) ドライバーの行動選択の定式化

本研究では、ドライバーの行動選択モデルとして、図-1のように、移動の有無を上位、経路選択を下位とする階層的選択構造を仮定し、ドライバーの行動選択をNested Logit Model (NLM)で表現する。

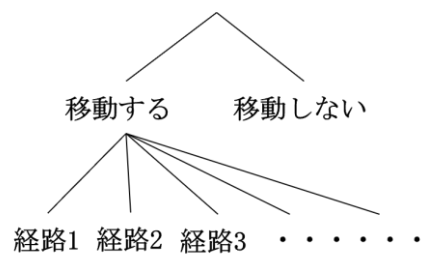


図-1 NLMにおける階層的選択構造

交通需要 q_w は、OD ペア w 間で想定し得る最大の交通需要 \bar{q}_w に、OD ペア w 間でドライバーが移動することを選ぶ確率 $\Pr [trip|w]$ を乗じることにより表される。

$$q_w = \bar{q}_w \cdot \Pr [trip|w] \quad (24)$$

where

$$\Pr [trip|w] = \frac{1}{1 + \exp[-\theta_2 \cdot (\omega_w - S_w)]} \quad (25)$$

ここで、 θ_2 は上位の選択に関する正のパラメータ、 ω_w は移動を中止する場合のドライバーの不利益を表すトリップキャンセルコストである。また、 S_w は期待最小費用であり式(26)で表される。

$$S_w = -\frac{1}{\theta_1} \ln \sum_{k \in K_w} \exp(-\theta_1 \cdot c_w^k) \quad (26)$$

θ_1 は下位の選択に関するパラメータである。また、経路交通量 f_w^k は、交通需要に経路選択確率を乗じることにより表される。

$$f_w^k = q_w \cdot \Pr [k|w, trip] \quad (27)$$

where

$$\Pr [k|w, trip] = \frac{\exp(-\theta_1 \cdot c_w^k)}{\sum_{m \in K_w} \exp(-\theta_1 \cdot c_w^m)} \quad (28)$$

式(28)は、OD ペア w 間でドライバーが移動することを選んだという条件のもとに経路 k が選択される確率である。

(5) 交通量配分問題の定式化

4 節の NLM により表現されるドライバーの行動は、需要変動型の確率的利用者均衡配分モデルとして定式化される。Wang et al¹⁰と同様に、以下のように配分コスト g_w^k を定める。

$$g_w^k = c_w^k + \frac{1}{\theta_1} \cdot \ln \left(\frac{f_w^k}{q_w} \right) \quad (29)$$

また、式(24)、(25)より、交通需要 q_w は期待最小費用 S_w の関数であり、以下のように表せる。

$$q_w = D_w(S_w) = \bar{q}_w \cdot \frac{1}{1 + \exp[-\theta_2 \cdot (\omega_w - S_w)]} \quad (30)$$

このとき、逆需要関数 $D_w^{-1}(q_w)$ は式(31)で表される。

$$D_w^{-1}(q_w) = S_w = \frac{1}{\theta_2} \ln \left(\frac{\bar{q}_w - q_w}{q_w} \right) + \omega_w \quad (31)$$

Wang et al¹⁰に基づき、弾性需要を考慮した logit 型の確率的利用者均衡状態における経路交通量ベクトル $\mathbf{f}^* = \{f_w^{k*}, \forall k \in K_w, \forall w \in W\}$ は、 $f_w^{k*} > 0 \forall k \in K_w, \forall w \in W$ であるとき式(32)を満たす。

$$g_w^k(\mathbf{f}^*) - D_w^{-1}(q_w^*) = 0 \quad (32)$$

where

$$\sum_{k \in K_w} f_w^{k*} = q_w^* \quad (33)$$

$$\mathbf{f}^* \geq 0 \quad (34)$$

逆に、式(32)を満たすならば、 \mathbf{f}^* は均衡状態の経路交通量ベクトルとなる。この均衡条件は、変分不等式問題と

して以下のように表せる。

$$\sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} (g_w^k(\mathbf{f}^*) - D_w^{-1}(q_w^*)) (f_w^k - f_w^{k*}) \geq 0 \quad (35)$$

$$\forall \mathbf{f}, \mathbf{f}^* \in \Omega$$

where

$$\Omega = \{ \mathbf{f} | \sum_{k \in K_w} f_w^k = q_w, f_w^k \geq 0, \forall k \in K_w, \forall w \in W \} \quad (36)$$

(6) 最適通行料金設定問題の定式化

本研究では、社会的な利益の最適化を考え、消費者余剰が最大となる高速道路の通行料金設定手法を提案する。OD ペア w 間の消費者余剰 CS_w は式(37)で表される。

$$CS_w = \int_0^{q_w} D_w^{-1}(s) ds - q_w \cdot c_w \quad (37)$$

ここで、 c_w は均衡状態における OD ペア w 間の不効用であり、交通需要 q_w と不効用 c_w は交通量配分から得られる値である。本研究では最適通行料金設定問題を、高速道路リンクの通行料金 $\mathbf{p} = \{p_a, \forall a \in A_e\}$ を変数とし、道路ネットワーク全体の消費者余剰を最大化する問題として表す。

$$\max_{\mathbf{p}} \sum_{w \in W} CS_w \quad (38)$$

s. t. (35) and

$$\mathbf{p} \geq 0 \quad (39)$$

この最適化問題は、式(35)の変分不等式問題で示した均衡条件を制約に持つ、均衡制約付き最適化問題である。

3. 数値計算

(1) 計算条件の設定

テストネットワークによる数値計算を行い、モデルの挙動を確認する。使用するテストネットワークを図-2に示す。

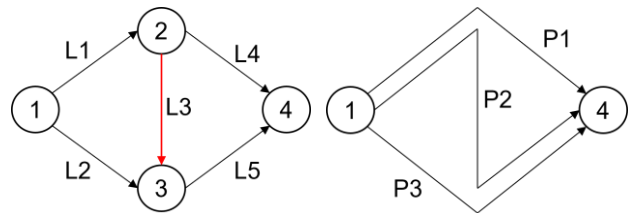


図-2 テストネットワーク

テストネットワークは、4つのノード、5つのリンクで構成され、L1、L2、L4、L5は一般道路リンク、L3は高速道路リンクである。ノード1からノード4への1つのODペアを考え、その経路は3つである。BPR関数のパラメータはすべてのリンクで等しく、 γ と n はそれぞれ 0.15

と 4 とする. 自由走行時間 t_a^0 は, L1, L3, L5 で 1.0 [hour], L2, L4 で 3.0 [hour] とする. 交通容量 c_a は, L1, L2, L4, L5 で 1000 [pcu/hour], L3 で 2000 [pcu/hour] と設定する. 手動運転時の時間価値 β の平均と分散は, それぞれ 2000 [JPY/hour] と 50000 [JPY/hour²] とする. 最大交通需要 \bar{q}_w とトリップキャンセルコスト ω_w はそれぞれ 10000 [pcu/hour] と 12000 [JPY] と設定する. NLM のパラメータ θ_1 と θ_2 はそれぞれ 1 と 0.1 とする. リスク回避度を表すパラメータ λ は 1 とする.

(2) 結果

手動運転から自動運転に切り替わったときの時間価値減少率 ρ を 1 から 0.1 まで 0.1 ずつ変化させ, それぞれについて数値計算を行った. ρ の値それぞれについて, L3 の通行料金を 0 [JPY] から 6000 [JPY] まで 10 [JPY] ずつ変化させたときの, 経路交通量の推移を図-3 に, 消費者余剰の推移を図-4 に示す.

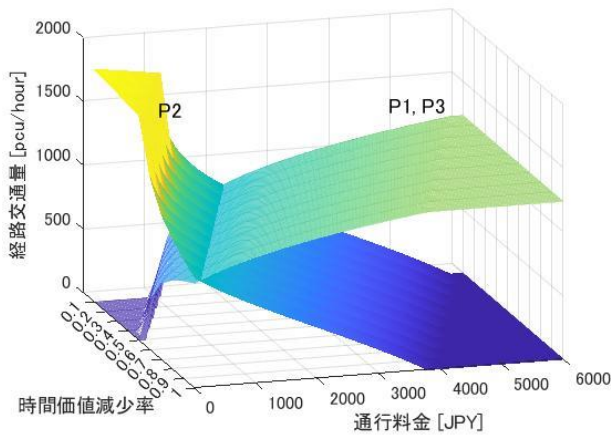


図-3 経路交通量の推移

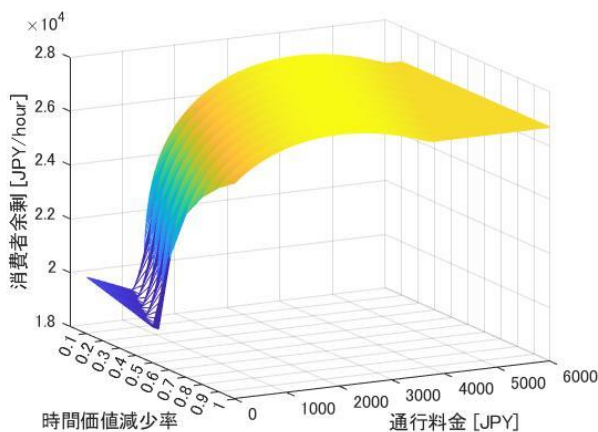


図-4 消費者余剰の推移

図-3 より, 通行料金の上昇に対して, 高速道路を利用する経路の交通量が減少し, 一般道路のみを利用する経路の交通量が増加することが示された. また, 完全自動

運転化による時間価値の低下が大きいほど, 高速道路の利用が増加することが示された. なお, 計算条件の設定が対称的であるため, P1 と P3 の経路交通量は等しくなることに注意されたい.

また, 図-4 より, 通行料金の上昇に対して消費者余剰は増加し得ることが明らかになり, 適当な通行料金を設定することで消費者余剰は最大化されることが示された. 仮定した条件では, 消費者余剰の最大値は ρ の値によらず 27375 [JPY/hour] となり, このときの通行料金は, 1 から 0.1 までの ρ の値それぞれに対して, 1980 [JPY], 2210 [JPY], 2430 [JPY], 2650 [JPY], 2870 [JPY], 3100 [JPY], 3320 [JPY], 3540 [JPY], 3760 [JPY], 3980 [JPY] と求められた. 完全自動運転化による時間価値の低下が大きいほど, 消費者余剰最大化のためにより高い通行料金を設定する必要があることが示された. また, 時間価値減少率と通行料金の値が小さいとき, 消費者余剰の推移は下に凸な挙動を示した. 完全自動運転化による時間価値の低下が大きく, かつ, 通行料金が低く設定されているとき, すべてのドライバーが高速道路リンクを含む P2 を利用する. このとき, 通行料金が上昇するとドライバーの不効用が増加するため, 消費者余剰は減少する. ある通行料金以上になると, P1, P3 も利用されるようになるため, ドライバーの不効用は減少し, 消費者余剰は増加に転じる. このため, 消費者余剰は, 時間価値減少率と通行料金の値が小さいとき, 下に凸な挙動を示したと考えられる. また, 時間価値減少率と通行料金の値が大きいとき, 消費者余剰は一定となった. 自動運転化による時間価値の低下が小さく, かつ, 高速道路の通行料金が高く設定されているとき, すべてのドライバーが一般道路リンクのみで構成される P1, P3 を利用する. そのため, 高速道路リンクの通行料金によらず消費者余剰は一定になったと考えられる.

4. まとめ

本研究では, まず, 高速道路上のみの完全自動運転化を前提として, 利用する道路により時間価値が異なることを考慮した需要変動型の確率的利用者均衡配分の手法を示した. そして, この交通量配分に基づいて, 消費者余剰を最大化する最適通行料金モデルを開発した. 本研究では, 時間価値を確率変数とすることにより, 時間価値の確率的変動に起因する移動コストの不確実性を, 利用者の経路選択基準に考慮した. 数値計算では, 通行料金と時間価値減少率の変化に対する経路交通量と消費者余剰の推移をそれぞれ示し, モデルの挙動を確認した.

本研究では, すべての車両が自動運転と手動運転の両運転モードで走行が可能であり, 高速道路上では自動運

転, 一般道路上では手動運転で走行すると仮定した。しかし, 実際には手動運転のみでしか走行できない車両が存在することが予想されるため, マルチユーザークラスの交通量配分に拡張する必要がある。また, 本研究で提案した最適通行料金モデルでは, 均衡制約付き最適化問題を解く必要があり, 大規模ネットワークにおける計算には膨大な時間を要することが予想される。そのため, 計算の効率化のために, 感度分析を用いて解を探索することが今後の課題として挙げられる。

REFERENCES

- 1) 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議：官民 ITS 構想・ロードマップ 2020 . [Koudozhohotsushinnettowakushakai Suishinsenryakuhonbu・Kanmin Detakatsuyousuishinsenryakukaigi: *Kanmin ITS Koso Rodomappu 2020.*]
- 2) Kolarova, V., Steck, F. and Bahamonde-Birke, F.: Assessing the effect of autonomous driving on value of travel time savings: A comparison between current and future preferences, *Transportation Research Part A*, Vol.129, pp.155-169, 2019.
- 3) Steck, F., Kolarova, V., Bahamonde-Birke, F., Trommer, S. and Lenz, B.: How Autonomous Driving May Affect the Value of Travel Time Savings for Commuting, *Transportation Research Record*, Vol.2672, No.46, pp.11-20, 2018.
- 4) Wu, W., Zhang, F., Liu, W. and Lodewijks, G.: Modelling the traffic in a mixed network with autonomous-driving expressways and non-autonomous local streets, *Transportation Research Part E*, Vol.134, 2020.
- 5) Leurent, F.: Cost versus time equilibrium a network, *European Journal of Operational Research*, Vol.71, No.2, pp.205-221, 1993.
- 6) Wu, W. X. and Huang, H. J.: Finding anonymous tolls to realize target flow pattern in networks with continuously distributed value of time, *Transportation Research Part B*, Vol.65, pp.31-46, 2014.
- 7) Tani, R., Sumalee, A. and Uchida, K.: Travel time reliability-based optimization problem for CAVs dedicated lanes, *Transportmetrica A, Transport Science*.
- 8) 新田翔, 峪龍一, 内田賢悦: 自動運転車両普及過程における移動時間信頼性を考慮したマルチクラス交通量配分モデルの開発, 第 62 回土木計画学研究発表会・講演集, 2020. [Nitta, S., Tani, R. and Uchida, K.: Development of a multi-class traffic assignment model considering travel time reliability in the spreading process of automated vehicles, *Dai 62 kai Dobokukeikakugakukenyuhappyukai・Kouenshu*, 2020.]
- 9) 円山琢也: 都市域における混雑課金の政策分析: レビューと展望, 土木計画学研究・論文集, Vol.26, No. 1, 2009. [Maruyama, T.: Modelling urban congestion pricing: Recent review and perspective, *Dobokukeikakugakukenyu・Ronbunshu*, Vol.26, No.1, 2009.]
- 10) Wang, J., Peeta, S. and He, Z.: Optimal toll design problems under mixed traffic flow of human-driven vehicles and connected and autonomous vehicles, *Transportation Research Part C*, Vol.125.

(Received ?)

OPTIMAL TOLL SETTING MODEL WITH HETEROGENEOUS STOCHASTIC VALUE OF TIMES UNDER COMPLETELY AUTONOMOUS DRIVING ON EXPRESSWAYS

Shuto KURIHARA, Ryuichi TANI and Kenetsu UCHIDA