

自動運転車と手動運転車の混合流を考慮した 道路ネットワーク政策評価モデル

峪 龍一¹・内田 賢悦²

¹正会員 北海道大学大学院 工学研究院土木工学部門 (〒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

²正会員 北海道大学大学院 工学研究院土木工学部門 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
E-mail: uchida@eng.hokudai.ac.jp

本研究は時間配分モデルに基づいて、自動運転車と手動運転車の利用者の効用を定義し、自動運転車と手動運転車が混在する道路ネットワークにおいて、利用者の間接効用を計算するための小規模マイクロ経済学モデルを提案した。自動運転車と手動運転車の代表的利用者それぞれが合成財、余暇時間、交通サービスを消費すると仮定した。道路ネットワーク内の交通サービス水準は、自動運転車と手動運転車の混在流を考慮したマルチクラス交通量配分モデルによって表現されるものとし、混雑効果を考慮している。自動運転車の利用者行動を考慮した、既往のネットワーク分析モデルにおいては自動運転車と手動運転車の時間価値が外生的に与えられることが多いが、本研究では自動運転車と手動運転車の利用者の可処分時間と所得の異質性に基づいて利用者の行動を定式化した。そのため、自動運転車内における利用者のマルチタスク効果が利用者の効用に与える影響を分析することが可能となった。提案モデルを検証するため、テストネットワークで数値計算を実施した。

Key Words: *autonomous vehicles, utility maximization, mixed traffic flow*

1. はじめに

完全自動運転が実現すると、ドライバーは運転操作から解放されて、労働や余暇などの生産的な目的に移動時間を充てることができる (マルチタスク効果)。従来の手動運転車であれば、移動時間は単なる費用として扱われるが、自動運転車であれば、移動時間の間で労働する場合は所得が増加し、余暇に充てる場合は効用が増加する。車外における労働と余暇と完全に置換可能ではないものの、従来の手動運転車とは異なり、移動時間が価値を持つようになる。

実証研究においても、手動運転車よりも自動運転車を利用するときの方が時間価値が小さく推計されている。Steck et al.²⁾の SP 調査によると、個人が所有する自動運転車を用いて通勤するときの移動時間短縮価値は手動運転車を用いる場合と比較して 31%低くなると報告されている。Steck et al.は道路利用者の所得の際が時間価値に及ぼす影響も調べている。従来の手動運転車を前提とする知見と同様に、高所得者の時間価値は中・低所得者の時間価値よりも高くなることが報告されている。自動運転車が普及する初期の段階では、自動運転車の価格が手動運転車より高くなることを見込まれることから、自動運転

車の利用者として高所得者を想定する必要がある。したがって、自動運転車の時間価値を考慮した道路ネットワーク分析を実施するにあたっては、(i)自動運転車内におけるマルチタスク効果による所得と可処分時間の配分パターンの変化、(ii)自動運転車の潜在的利用者の所得水準を考慮する必要がある。

自動運転車が実用化されてしばらくは、自動運転車と手動運転車が共存する時期が続くと予想されており、このような混合流を考慮した道路ネットワーク分析モデルが数多く提案されている³⁾⁵⁾。多くの研究において、自動運転車と手動運転車の時間価値の差異は考慮されているものの、異なる時間価値が所与として与えられているのみである。自動運転車のマルチタスク効果および利用者の所得の異質性を明示的に考慮して、時間価値が議論されている研究は、著者らの知る限り存在しない。

そこで本研究では、自動運転車におけるマルチタスク効果と道路利用者の所得の異質性を考慮することを目的として、自動運転車と手動運転車の利用者の所得と可処分時間の配分を扱う、政策評価モデルを提案する。藤原ら⁶⁾が開発した小規模マイクロ経済モデルを自動運転車と手動運転車が共存する環境における政策分析ができるように発展させた。藤原らのモデルは交通サービスに関連

する消費について部分均衡を仮定している。代表的利用者の効用は準線形モデルとして仮定している。

第 2 章は自動運転車と手動運転車の可処分時間・可処分所得の配分を考慮した小規模マイクロ経済モデルを定式化する。第 3 章はテストネットワークを用いて、提案手法を検証する。最後に、第 4 章では本研究をまとめ、今後の展望を述べる。

2. 定式化

ここでは、道路利用者の可処分時間の配分を考慮した小規模マイクロ経済モデルを提案する。交通サービスに対する支出は家計全体に対する支出と比較すれば十分小さいことから、部分均衡の枠組みに基づいて定式化する。代表的利用者の効用最大化問題を定式化し、代表的利用者の間接効用および需要関数を導出する。道路ネットワーク内における O-D 間の移動時間は自動運転車と手動運転車の混合流を考慮したマルチユーザークラス型利用者均衡モデルによって決まるものとする。

(1) 効用関数

本研究ではモデルを柔軟にするため、CES 効用関数を仮定する。代表的利用者は合成財、余暇、交通サービスを消費するものとする。3 財を消費する CES 効用関数を仮定すると、それぞれの財の間の代替弾力性は等価となる。しかし、合成財と比べて、余暇と交通サービスの消費は強く関連していると考えられることから、等価な代替弾力性にかかる仮定を緩和するため、層化 CES 効用関数を導入する。さらに、モデルを簡便にするために層化 CES 効用関数を以下のように準線形化する。

$$u_z(x_{1,z}, x_{2,z}) = x_{1,z} + \alpha_{2,z} \cdot x_{2,z}^{\frac{1-\sigma_0}{\sigma_0}} \quad \forall z \in \{A, H\} \quad (1)$$

$$x_{2,z}(t_{l,z}, q_z) = \left(\alpha_{21,z}^{\frac{1}{\sigma_1}} \cdot t_{l,z}^{\frac{1-\sigma_1}{\sigma_1}} + \alpha_{22,z}^{\frac{1}{\sigma_1}} \cdot q_z^{\frac{1-\sigma_1}{\sigma_1}} \right)^{\frac{\sigma_1}{1-\sigma_1}} \quad \forall z \in \{A, H\} \quad (2)$$

$$q_z(\mathbf{q}_z) = \prod_{i \in I} q_{i,z}^{\beta_{i,z}} \quad \forall z \in \{A, H\} \quad (3)$$

ここで、

$$\sigma_0 > 0 \quad (4)$$

$$\alpha_{21,z}^{\frac{1}{\sigma_1}} + \alpha_{22,z}^{\frac{1}{\sigma_1}} = 1 \quad \forall z \in \{A, H\} \quad (5)$$

$$\alpha_{21,z} \geq 0, \alpha_{22,z} \geq 0, \sigma_1 > 0 \quad \forall z \in \{A, H\} \quad (6)$$

$$\mathbf{q}_z = [\dots, q_{i,z}, \dots]^T \quad \forall z \in \{A, H\} \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I} \beta_{i,z} = 1 \quad \forall z \in \{A, H\} \quad (8)$$

(1)式は準線形化された効用関数である。合成財の価格はニューメーラールとして 1 として設定される。(2)は余暇

と交通サービスの消費を CES 型の関数により合成した消費水準である。(3)は代表的利用者の交通サービスの消費水準であり、道路ネットワーク全体の交通需要によって決まるコブダグラス型の関数である。(4)は $x_{2,z}$ の消費にかかる代替弾力性に対応するパラメータである。(5)-(6)は(2)における CES 型関数のパラメータの制約式である。(7)は道路ネットワーク全体の O-D 交通需要を表すベクトルである。(8)は(3)に示すコブダグラス型関数のパラメータにかかる制約である。

(2) 制約

道路ネットワーク中の代表的利用者は可処分所得と可処分時間の制約の下で効用を最大化する。手動運転車の利用者の可処分時間は以下の通りである。

$$t_{w,H} + t_{l,H} + \sum_{i \in I} q_{i,H} \cdot t_{i,H} = \hat{t}_H \quad (9)$$

$t_{w,H}$ は労働時間である。 $q_{i,H}$, $t_{i,H}$ はそれぞれ O-D ペア i の交通需要と最小移動時間である。最小移動時間は後述するマルチユーザークラス型利用者均衡配分モデルによって決まる。 $\sum_{i \in I} q_{i,H} \cdot t_{i,H}$ は道路ネットワーク全体の総移動時間である。 \hat{t}_H は可処分時間であり、外生的に与えられる。本研究では道路利用者は可処分時間を、労働、余暇、移動の 3 つの活動に配分するものと仮定する。道路利用者は労働時間と賃金率の積としての所得を得て、合成財、余暇、交通サービスに費やす。道路利用者の所得制約は以下の通りである。

$$\sum_{i \in I} p_{i,H} \cdot q_{i,H} + p_{l,H} \cdot t_{l,H} + x_{1,H} = w_H \cdot t_{w,H} \quad (10)$$

ここで、 $p_{i,H}$ は O-D ペア i 間の移動に対応する交通サービスの価格である（自動車税、燃料費など）。 $\sum_{i \in I} p_{i,H} \cdot q_{i,H}$ は道路ネットワーク全体の移動にかかる費用の総和である。 $p_{l,H}$ は単位時間あたりの余暇サービスの価格である。 $w_H \cdot t_{w,H}$ は道路利用者の所得である。可処分時間にかかる制約を、所得にかかる制約に代入すると以下を得る。

$$\sum_{i \in I} (p_{i,H} + w_H \cdot t_{i,H}) \cdot q_{i,H} + (p_{l,H} + w_H) \cdot t_{l,H} + x_{1,H} = w_H \cdot \hat{t}_H \quad (11)$$

次に自動運転車の利用者の可処分時間、所得にかかる制約を考える。可処分時間の制約は自動運転車の利用者の制約と同じである。

$$t_{w,A} + t_{l,A} + \sum_{i \in I} q_{i,A} \cdot t_{i,A} = \hat{t}_A \quad (12)$$

自動運転車の場合、移動時間の一部を労働や余暇などの生産的な目的に使うことができる⁶⁸⁾。ここで、本研究では自動運転車の利用者が移動時間の一部を労働に転換すると仮定する。したがって、自動運転車の利用者の所得は車内での労働時間分だけ増加する。車内での労働を考慮した可処分時間にかかる制約は以下ようになる。

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in I} p_{i,A} \cdot q_{i,A} + p_{L,A} \cdot t_{L,A} + x_{1,A} \quad (13) \\ & = w_A \cdot \left(t_{w,A} + (1 - \varepsilon) \sum_{i \in I} q_{i,A} \cdot t_{i,A} \right) \end{aligned}$$

ここで、 ε は車内での労働の時間効率を表す割合であり、0から1の間を取る。車内では環境が制約されていることから、車外と比較して車内では労働の生産性が低下することを表している。 $(1 - \varepsilon) \sum_{i \in I} q_{i,A} \cdot t_{i,A}$ は総移動時間のうち、労働のために転換できる時間を表している。自動運転車の利用者の可処分所得にかかる制約に可処分時間にかかる制約を代入すると以下の制約を得る。

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in I} (\varepsilon \cdot p_{i,A} + w_A \cdot t_{i,A}) \cdot q_{i,A} \quad (14) \\ & + (p_{L,A} + w_A) \cdot t_{L,A} + x_{1,A} = w_A \cdot \hat{t}_A \end{aligned}$$

ここで、(11)と(14)を比較する。自動運転車と手動運転車の利用者それぞれのO-Dペア*i*間の移動サービスに対応する実質的な価格はそれぞれ以下ようになる。

$$\hat{p}_{i,H} = p_{i,H} + w_H \cdot t_{i,H} \quad \forall i \in I \quad (15a)$$

$$\hat{p}_{i,A} = \varepsilon \cdot p_{i,A} + w_A \cdot t_{i,A} \quad \forall i \in I \quad (15b)$$

(3) 効用最大化

代表的利用者の消費行動は2(1)で定義した効用関数を2(2)の制約の下で最大化するものと定義される。効用関数は3層の層化構造になっている。このような場合、最下層の構造から順番に財・サービスの消費水準を決めることで、効用関数全体が対象とする財・サービスの消費水準を決めることができる¹⁾。

まず、以下の問題を解くことによって、交通サービスの消費水準を決める。

[P-1]

$$\max q_z(\mathbf{q}_z) = \prod_{i \in I} q_{i,z}^{\beta_{i,z}} \quad \forall z \in \{A, H\} \quad (16)$$

s.t.

$$\sum_{i \in I} \hat{p}_{i,z} \cdot q_{i,z} \leq I_{3,z} \quad \forall z \in \{A, H\} \quad (17)$$

ここで、 $\hat{p}_{i,z}$ は(15)で定義されたO-Dペア間の移動サービスにかかる実質的な価格である。コブ・ダグラス型関数で表される移動サービスの消費水準(16)は、(17)の所得制約の下で最大化される。本研究では道路利用者の選好は単調であると仮定するため、(17)は実質的に等式制約となる。

(16)と(17)の一次最適性条件から、最適なO-D交通需要が以下のように導出される。

$$q_{i,z}^* = \frac{\beta_{i,z} \cdot I_{3,z}}{\hat{p}_{i,z}} \quad \forall i \in I, \forall z \in \{A, H\} \quad (18)$$

現実に観測されるO-D間の交通需要 $q_{i,z}$ および移動費用は、道路利用者が本研究で示すような効用を最大化するように行動した結果、実現するものとして解釈される。したがって、 $q_{i,z}$ は観測を通じて既知として扱われる。

パラメータ $\beta_{i,z}$ にかかる制約(8)と(18)から、所得 $I_{3,z}$ およびパラメータ $\beta_{i,z}$ は以下のように特定される。

$$I_{3,z} = \sum_{i \in I} \gamma_{i,z} \quad \forall z \in \{A, H\} \quad (19)$$

$$\beta_{i,z} = \frac{\gamma_{i,z}}{\sum_{i \in I} \gamma_{i,z}} \quad \forall z \in \{A, H\} \quad (20)$$

ここで、 $\gamma_{i,z} = q_{i,z} \cdot \hat{p}_{i,z}$ である。(20)で特定された $\beta_{i,z}$ を(3)に代入すると、交通サービスの消費水準 q_z は以下のように書き換えられる。

$$q_z = \prod_{i \in I} q_{i,z}^{\gamma_{i,z} / \sum_{i \in I} \gamma_{i,z}} \quad \forall z \in \{A, H\} \quad (21)$$

次に、(2)を最大化することで、余暇の消費水準を決定する。

[P-2]

$$\max x_{2,z}(t_{l,z}, q_z) \quad (22)$$

$$= \left(\alpha_{21,z}^{\frac{1}{\sigma_1}} \cdot t_{l,z}^{\frac{1-\sigma_1}{\sigma_1}} + \alpha_{22,z}^{\frac{1}{\sigma_1}} \cdot q_z^{\frac{1-\sigma_1}{\sigma_1}} \right)^{\frac{\sigma_1}{1-\sigma_1}}$$

$$\forall z \in \{A, H\}$$

s.t.

$$\hat{p}_{l,z} \cdot t_{l,z} + p_{q,z} \cdot q_z \leq I_{2,z} \quad \forall z \in \{A, H\} \quad (23)$$

where

$$\hat{p}_{l,z} = p_{l,z} + w_z \quad \forall z \in \{A, H\} \quad (24)$$

CES型関数を最大化することで、余暇と交通サービスの消費水準を決定する。(23)は余暇と交通サービスの消費にかかる所得制約である。(16)-(17)と同様に、道路利用者は単調な選好を持つので、(23)は実質等式制約となる。(24)で定義される $\hat{p}_{l,z}$ は余暇サービスの消費にかかる実質的な価格である。これは(11)と(14)に由来しており、余暇サービスの実質的な価格は余暇サービスの価格 $p_{l,z}$ と機会費用としての賃金率 w_z の和としてあらわされる。 $p_{q,z}$ は道路ネットワーク全体における交通サービスの消費に対応する価格である。(16)-(17)より、道路ネットワーク全体の総移動費用は所得 I_3 に対応している。 $p_{q,z} \cdot q_z = I_{3,z}$ かつ(19)より、道路ネットワーク全体の交通サービスの消費に対応する価格は以下のように表される。

$$p_{q,z} = \frac{\sum_{i \in I} \gamma_{i,z}}{\prod_{i \in I} q_{i,z}^{\gamma_{i,z} / \sum_{i \in I} \gamma_{i,z}}} \quad \forall z \in \{A, H\} \quad (25)$$

(22)-(24)の一次最適性条件から、余暇サービスと道路ネットワーク全体の交通サービスにかかる需要関数はそれぞれ以下のように計算される。

$$t_{l,z} = \frac{\alpha_{21,z}}{p_{l,z}^{\sigma_1}} \cdot \frac{I_{2,z}}{\alpha_{21,z} \cdot p_{l,z}^{1-\sigma_1} + \alpha_{22,z} \cdot p_{q,z}^{1-\sigma_1}} \quad (26)$$

$$\forall z \in \{A, H\}$$

$$q_z = \frac{\alpha_{22,z}}{p_{q,z}^{\sigma_1}} \cdot \frac{I_{2,z}}{\alpha_{21,z} \cdot p_{l,z}^{1-\sigma_1} + \alpha_{22,z} \cdot p_{q,z}^{1-\sigma_1}} \quad (27)$$

$$\forall z \in \{A, H\}$$

(27)-(28)の需要関数を用いて、余暇と交通サービスを合成した消費水準 $x_{2,z}$ は以下のように計算される。

$$x_{2,z} = (\alpha_{21,z} \cdot \hat{p}_{l,z}^{1-\sigma_1} + \alpha_{22,z} \cdot p_{q,z}^{1-\sigma_1})^{\frac{1}{\sigma_1-1}} \cdot I_{2,z} \quad (28)$$

$$\forall z \in \{A, H\}$$

消費水準 $x_{2,z}$ に対応する価格を $p_{2,z}$ とすると、(23)の所得は $p_{2,z} \cdot x_{2,z} = I_{2,z}$ となるように使われるので、(28)より価格 $p_{2,z}$ は以下のように表される。

$$p_{2,z} = (\alpha_{21,z} \cdot \hat{p}_{l,z}^{1-\sigma_1} + \alpha_{22,z} \cdot p_{q,z}^{1-\sigma_1})^{-\frac{1}{\sigma_1-1}} \quad (29)$$

$$\forall z \in \{A, H\}$$

最後に、道路利用者の効用は以下のように最大化される。

[P-3]

$$\max u_z = x_{1,z} + \alpha_{2,z} \cdot x_{2,z}^{\frac{1-\sigma_0}{\sigma_0}} \quad \forall z \in \{A, H\} \quad (30)$$

s.t.

$$x_{1,z} + p_{2,z} \cdot x_{2,z} \leq I_z \quad \forall z \in \{A, H\} \quad (31)$$

where

$$w_z \cdot \hat{t}_z = I_z \quad \forall z \in \{A, H\} \quad (32)$$

(31)は道路利用者の所得全体にかかる制約である。道路利用者の所得全体はそれぞれ(11)と(14)のように定義されている。(30)-(31)から一次最適性条件を求めると、合成財 $x_{1,z}$ と消費水準 $x_{2,z}$ の需要関数はそれぞれ以下のように導かれる。

$$x_{1,z} = I_z - \left(\frac{\sigma_0 - 1}{\sigma_0} \cdot \frac{\alpha_{2,z}}{p_{2,z}} \right)^{\sigma_0} \cdot p_{2,z} \quad \forall z \in \{A, H\} \quad (33)$$

$$x_{2,z} = \left(\frac{\sigma_0 - 1}{\sigma_0} \cdot \frac{\alpha_{2,z}}{p_{2,z}} \right)^{\sigma_0} \quad \forall z \in \{A, H\} \quad (34)$$

道路利用者の効用が準線形であるため、合成財の消費は所得 I_z に依存するのに対して、消費水準 $x_{2,z}$ は依存しない。したがって、本モデルでは余暇と交通サービスにかかる消費は所得水準に依存しない。したがって、道路利用者の間接効用は(33)-(34)の需要関数を用いて、以下のように特定される。

$$V_z = I_z - \left(\frac{\sigma_0 - 1}{\sigma_0} \cdot \frac{\alpha_{2,z}}{p_{2,z}} \right)^{\sigma_0} \cdot p_{2,z} \quad (35)$$

$$+ \alpha_{2,z} \cdot \left(\frac{\sigma_0 - 1}{\sigma_0} \cdot \frac{\alpha_{2,z}}{p_{2,z}} \right)^{\sigma_0} \quad \forall z \in \{A, H\}$$

効用関数が準線形かつ合成財がニューメレルであるため、(35)のように間接効用は貨幣換算できる。したがって、本研究が想定する道路ネットワークに対する介入および変化(例えば、自動運転車の性能の変化、自動運転車普及率の変化)の前後における間接効用の差が消費者余剰の変化と等価になる。

(4) マルチユーザークラス型交通量配分モデル

2.(3)の[P-1]で議論したように、効用関数のパラメータは観測されたO-D間の交通需要と最小移動時間から推定される。道路ネットワークのパフォーマンスに影響を及ぼしうる、道路ネットワークに対する介入および操作の効果を測定するためには、介入および操作を実施した後の道路ネットワークのパフォーマンスを表現できなければ

ならない。そこで、本研究では自動運転車と手動運転車が混在する状態を考えるため、マルチユーザークラス型交通量配分モデルを用いて、道路ネットワークに対する介入および操作の効果を表現するものとする。道路ネットワークをリンク集合 A とノード集合 N からなる有効グラフ $G(N, A)$ とする。車種 z のO-Dペア i 間の交通需要を $q_{i,z}$ 、経路 k の交通量を $f_{i,k,z}$ 、リンク a の交通量を $v_{a,z}$ とする。経路交通量およびリンク交通量の保存則をそれぞれ以下に示す。

$$\sum_{k \in K_i} f_{i,k,z} = q_{i,z} \quad \forall i \in I, \forall z \in \{A, H\} \quad (36)$$

$$v_{a,z} = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} f_{i,k,z} \quad \forall a \in A, \forall z \in \{A, H\} \quad (37)$$

リンク a の交通量に占める自動運転車の交通量の割合を $p_a = v_{a,A} / (v_{a,A} + v_{a,H})$ とすると、自動運転車と手動運転車が共存するリンクにおける交通容量は既往研究⁴⁾のように、 p_a の関数として表される。

$$c_a(v_{a,A}, v_{a,H}) = \frac{1}{p_a \cdot \frac{1}{c_{a,A}} + (1 - p_a) \cdot \frac{1}{c_{a,H}}} \quad (38)$$

$\forall a \in A$

ここで、 $c_{a,A}$ と $c_{a,H}$ はそれぞれ、自動運転車または手動運転車のみがリンク上に存在するときの交通容量である。それぞれの違いは自動運転車と手動運転車の車頭時間の違いに由来している。(37)における混合流におけるリンク交通容量もまた、交通流内の自動運転車と手動運転車の割合と車頭時間の違いから導出されている。多くの既往研究^{4),10)}では手動運転車と比べて自動運転車の車頭時間が小さいと仮定していることから、本研究もこれに倣う。リンク移動時間は自動運転車と手動運転車それぞれのリンク交通量の関数として表される。

$$t_a(v_{a,A}, v_{a,H}) = t_{0,a} \cdot \left(\alpha_a + \left(\frac{v_{a,A} + v_{a,H}}{c_a(v_{a,A}, v_{a,H})} \right)^{\beta_a} \right) \quad \forall a \in A \quad (39)$$

(38)より自動運転車と手動運転車のリンク交通量が相互干渉していることから、リンク移動時間のヘッセ行列は非対称となる。したがって、本研究では変分不等式問題として交通量配分問題を定式化する¹¹⁾。自動運転車と手動運転車それぞれの経路選択基準について多くのパターンが提案されているが^{4),10)}、本研究では両車ともに利用者均衡に従うものと仮定する。また、O-D 交通需要の変動を考慮するものとする。交通量配分問題は以下のように定式化される。

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} \sum_{z \in \{A, H\}} (G_{i,k} - D^{-1}(q_{i,z})) \cdot (f_{i,k,z} - f_{i,k,z}^*) \geq 0 \quad (40)$$

where

$$\Delta_z \mathbf{f}_z = \mathbf{q}_z, \mathbf{f}_z \geq 0, \forall z \in \{A, H\} \quad (41)$$

$$G_{i,k} = \sum_{a \in A} \delta_{i,k,a} \cdot t_a \quad \forall i \in I, \forall k \in K_i \quad (42)$$

ここで、 Δ_z はO-Dペアと経路の接続行列である。 f_z と q_z はそれぞれ経路交通量とO-D交通需要のベクトルである。(41)はO-D交通需要の保存則と経路交通量の非負条件である。(42)はO-Dペア*i*間の経路*k*の移動時間であり、経路*k*を通るリンクの移動時間の和として表される。(40)-(42)のようなマルチユーザクラス型の交通量配分問題は対角化法^{9,12)}などのアルゴリズムによって解ける。

3. 数値計算

(1) 設定

2.の定式化を検証するため、図-1に示すテストネットワークを用いて数値計算を実施した。O-Dペア数は1、経路数は3、リンク数は5である。リンクコスト関数のパラメータは $\alpha_a = 1, \beta_a = 4 \forall a \in A$ である。自動運転車と手動運転車のみが存在する場合の交通容量および自由走行時間は表-1のように設定する。ここで(18)に基づいて逆需要関数を定義する。(20)より、O-Dペアが1つであるので $\beta_{i,z} = 1 \forall z \in \{A, H\}$ である。道路ネットワーク全体の総交通需要 $q (= q_{1,A} + q_{1,H})$ は80 [pcu/hour]である。自動運転車内での労働の時間効率を表す割合(減耗率) $\varepsilon = 1$ のとき、逆需要関数のパラメータは $I_{3,z} = p_{i,z} = 300, w_z = 40 \forall z \in \{A, H\}$ である。

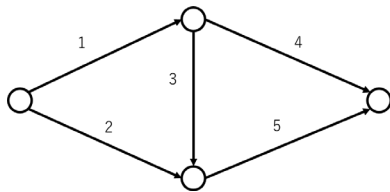


図-1 テストネットワーク

表-1 リンクコスト関数, リンク交通容量のパラメータ

リンク	$t_{0,a}$	$c_{a,A}$	$c_{a,H}$
1	4	30	60
2	7	40	80
3	1	10	20
4	5	30	60
5	2	30	60

(2) 結果

O-D交通需要に占める自動運転車の割合と自動運転車内での労働の時間効率を表す割合(減耗率)をそれぞれ変化させたときのO-D間の実質的な移動費用と間接効用を図-2と図-3に示す。自動運転車混入率を大きくすると減耗率の大小に依らず、O-D間の実質的な移動費用は減少し、道路ネットワーク全体の間接効用は増加する。減耗率を減少させると、それだけ道路利用者は移動時間を

労働に転換できるため、O-D間の実質的な移動費用は減少し、間接効用は増加する。

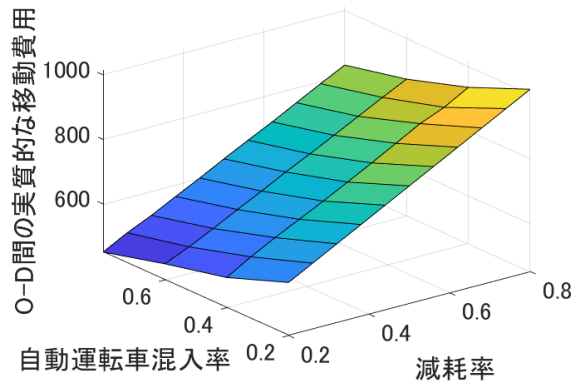


図-2 O-D間の実質的な移動費用

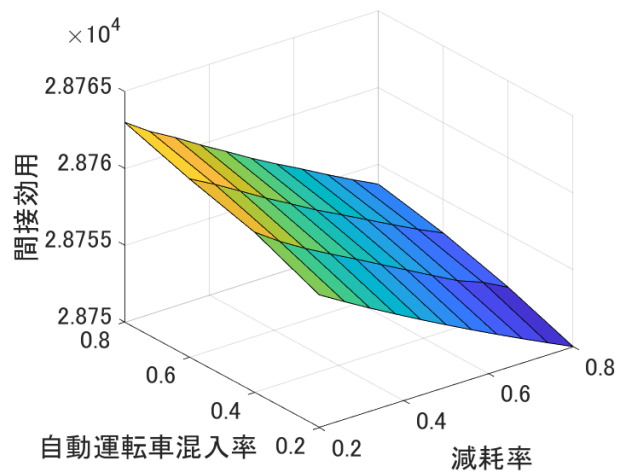


図-3 間接効用

4. まとめ

本研究では自動運転車と手動運転車を利用する代表的利用者の効用関数をそれぞれ定式化し、自動運転車の普及段階における道路ネットワークの政策評価モデルを提案した。代表的利用者は可処分時間と所得の制約の下で、合成財、余暇、交通サービスを消費すると仮定する。自動運転車におけるマルチタスク効果を表現するために、自動運転車の利用者が移動時間の一部を労働時間に転換できると仮定した。したがって、自動運転車の利用者は移動時間中の労働により所得を増やすことができる。移動時間は自動運転車と手動運転車の混合流を考慮したマルチユーザ型交通量配分モデルによって決まる。テストネットワークを用いて数値計算を行い、提案するモデルを用いることで、道路ネットワーク全体の自動運転車の分布、および自動運転車内における労働の効率に応じて道路利用者の間接効用が計算できることを示した。

今後の主な方向性として以下の4点が考えられる。第

一に、O-D ペア間あるいは同じ O-D ペア内の道路利用者の所得および可処分時間が異なる可能性があるため、道路利用者の異質性を考慮したモデルへの拡張が必要である。第二に、本研究では個人が自動運転車を私有することが仮定されているが、既存研究では共有型の自動運転車についても広く研究されている。共有型の場合、所得及び可処分所得にかかる仮定が本研究とは異なるため再定式化が必要である。第三に、本研究で提案するモデルを用いて、自動運転車の普及段階におけるネットワークデザイン問題を考えることができる。

謝辞：本研究の一部は JSPS 科研費 21H01446 の助成を受けたものである。

REFERENCES

- 1) 藤原徹, 蓮池勝人, 金本良嗣：政策評価のための小規模ミクロ経済モデル～乗用車部門における温暖化対策の評価～, 独立行政法人経済産業研究所ディスカッション・ペーパー, 2004.
- 2) 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.
- 3) Fagnant, D.J. and Kockelman, K.: Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. *Transportation Research Part A*, Vol. 77, pp. 167-181, 2015.
- 4) Wang, J., Peeta, S. and He, X.: Multiclass traffic assignment model for mixed traffic flow of human-driven vehicles and connected and autonomous vehicles, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 126, pp. 139-168, 2019.
- 5) Zhang, K. and Nie, Y. (M.): Mitigating the impact of selfish routing: An optimal-ratio control scheme (ORCS) inspired by autonomous driving, *Transportation Research Part C*, Vol. 87, pp. 75-90, 2018.
- 6) Tani, R., Sumalee, A. and Uchida, K.: Travel time reliability-based optimization problem for CAVs dedicated lanes, *Transportmetrica A: Transport Science*, 2021.
- 7) Childress, S., Nichols, B., Charlton, B. and Coe, S.: 2015. Using an activity-based model to explore the potential impacts of automated vehicles. *Transportation Research Record*, Vol. 2493, pp. 99–106, 2015.
- 8) Auld, J., Sokolov, V. and Stephens, T.S.: Analysis of the effects of connected-automated vehicle technologies on travel demand, *Transportation Research Record*, Vol. 2625, pp. 1–8, 2017.
- 9) Perrine, K.A. and Kockelman, K.: Anticipating long-distance travel shifts due to self-driving vehicles, *Transportation Research Board 96th Annual Meeting*, Washington DC USA, 2018.
- 10) Levin, M.W. and Boyles, S.D.: A multiclass cell transmission model for shared human and autonomous vehicle roads, *Transportation Research Part C*, Vol. 62, pp. 103-116, 2016.
- 11) Yang, H. and Huang, H.: The multiclass, multi-criteria traffic network equilibrium and systems optimum problem, *Transportation Research Part B*, Vol. 38, No. 1, pp. 1-15, 2016.
- 12) Van Vuren, T. and Watling, D.: A multiple user class assignment model for route guidance, *Transportation Research Record*, Vol. 1306, pp. 22-32, 1991.

(?)

ROAD NETWORK POLICY EVALUATION MODEL CONSIDERING THE MIXED FLOW OF AUTONOMOUS VEHICLE AND HUMAN-DRIVEN VEHICLE

Ryuichi TANI and Kenetsu UCHIDA

This study proposed a small-scale microeconomic model to compute the indirect utility of road users considering the mixed flow of autonomous vehicles and human-driven vehicles. We defined the utility of road users using autonomous vehicles and human-driven vehicles based on the time allocation model. It is assumed that each type of road user consumes composite goods, leisure, and transportation services. The proposed model considers the congestion effect by incorporating the multiclass traffic assignment model considering the mixed flow. While the literature often gave the values of time of each type of road user exogenously, this study formulated the difference in the road user's behavior based on the heterogeneity of the disposable time and income. Thereby, the impact of the road user's multitask effect in autonomous vehicles on the road user's behavior can be analyzed quantitatively. Finally, we conducted a numerical calculation to verify the proposed model.