

ライドシェアリングを考慮した時空間ネットワーク均衡モデル

嶋本 寛¹

¹正会員 宮崎大学准教授 工学部工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)

shimamoto@cc.miyazaki-u.ac.jp

本研究では、近い将来実用化するシェアリング交通が都市内交通に及ぼす影響を評価することを念頭に置き、i) Solo Driver (単独で移動する運転手)、ii) Ridesharing Driver (相乗りを許容する運転手)、iii) Rider (Ridesharing Driver の車両に同乗して移動する) という 3 つの移動手段の時空間ネットワークにおける均衡フローを導出するモデルを線形計画問題として定式化する。定式化した問題の双対問題を考えることにより、ライドシェアリングにおけるドライバーとライダーの需要と供給に応じた動的な運賃 (ダイナミック・プライシング) を導出可能であることを示す。最後に、仮想的なネットワークを用いて、構築するモデルの挙動を数値的に解析する。

Key Words: Ridesharing, Space-time network equilibrium, Dynamic pricing, Duality problem

1. はじめに

我が国の都市部において、公共交通サービスは高水準で提供されているものの、黒字バス路線でも運行本数が削減されるほど運転手不足が顕在化している。一方、多くの地方部では、需要の減少により公共交通サービスの縮小が進展しており、自動車を利用できない免許非保有者の外出手段の確保が課題となっている。さらに、昨今の COVID-19 の感染拡大により、都市部、地方部双方の公共交通利用者数が大幅に減少しており、持続可能なモビリティの確保に大きな影響を及ぼしている。

一方で、IoT、AIなどをコア技術とする第4次産業革命ともよばれる大きなイノベーションが生まれており、交通分野でも自動運転技術の活用や MaaS (Mobility as a Service) などの新たなサービスによるモビリティの確保が期待されている。我が国では限定的なサービスにとどまっているが、諸外国では Uber や Lift などの配車サービス (ride-hailing) が広く展開されている。配車サービスはアプリ上で運転手と利用者をマッチングするサービスであり、タクシーと類似したサービスであるとも見られる。そのため、諸外国では配車サービスの急増により、道路空間における車両台数がかえって増加し、交通渋滞が悪化している状況も報告されている¹⁾。これに対し、ある目的を持って移動する運転手が、空いているスペースを活用して相乗りさせるというサービスも考えられる。このようなサービスは Carpooling とよばれ ride-hailing と明確に区別されている。Carpooling は車両の空き

スペースを有効活用するものであり、交通量の削減に寄与することが期待される。Carpooling は、トリップにかかる費用 (ガソリン代、通行料金など) を折半するが、運転手は同乗者にそれ以上の費用を請求しないサービス形態を想定していることが多い。しかし、運転手が同乗者から「料金」を徴収する Carpooling も考えることができ、本研究ではこれをライドシェアリング (以下、RS とする) とよぶことにする。我が国においては、RS サービスの実現に向けた制度上の課題は多いものの、公共交通の運賃・料金の柔軟化に向けた検討もすすめられており²⁾、将来的には RS サービス実用化に向けた議論が進展することも考えられる。

RS サービスの実現により、短期的には都市部の交通量のみならず駐車台数が変化し、道路や駐車場などの交通インフラの整備計画に影響が及ぶものと考えられる。したがって、本研究では RS サービス実現後の交通インフラ整備計画への活用を資する、ネットワーク均衡モデルを構築することを目的とする。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

RS サービスは、送迎者 (ドライバー) と被送迎者 (ライダー) を効率的にマッチングするものであり、個々の移動者の行動を記述する非集計モデルと、その結果のリンク交通量を求解する集計モデルに分類できる。さらに、非集計モデルは総旅行時間最小化³⁾、総効用最大化³⁾等を目的関数としてシステム最適状態のマッチン

グパターンを求めるものと、マッチング理論を援用して安定解を求めるもの^{4,5)}に分類できる。両者に共通して、混合整数計画問題として定式化されるため、計算負荷が大きく効率的な解法アルゴリズムが求められる。

一方、集計レベルのモデルはフローを実数として扱うため、一般に非集計モデルよりも計算負荷は小さい。

Xu et al.⁶⁾は i) 単独で移動する運転手である「Solo Driver (SD)」, ii) 相乗りを許容する運転手である「Ridesharing Driver (RD)」, iii) RD の車両に同乗して移動する「Passenger」(ただし、本研究では「Rider (R)」とする) という 3 つの移動手段の均衡問題である Ridesharing user equilibrium (RUE) を相補性問題として定式化している。彼らは、定式化した問題の解が存在することと、パラメータがある条件を満たせば唯一のリンクフロー解が得られることを示している。しかし、彼らのモデルは、i) RD の運賃収入を計算する際に、平均同乗人数を定数として与えているため、運賃収入を正確に評価できない、ii) リンクフローを表す変数を OD ごとに設定しているため、変数の数が多くなる、という問題を抱えている。Di et al.⁷⁾は、R と RD の比率である乗客占有率 (passenger occupancy ratio) が満たすべき条件を相補性条件として追加し、かつリンクフローを表す変数を目的地ごとに設定した上で RUE モデルの再定式化を行い、上記の問題点を解決している。さらに、改良した RUE モデルを下位問題として、HOT レーンに関するネットワークデザイン問題を構築している。Ma et al.⁸⁾は、RS の需要に対しドライバー数が不足しているときにおける、OD ベースでの料金急騰戦略 (Surge Pricing Strategy) を考慮した RUE モデルを変分不等式問題として定式化している。彼らは、パラメータに緩やかな仮定を設定することで唯一の均衡解が得られることを示している。Li et al.⁹⁾は、RD と R のマッチングに関する意思決定を明示的に考慮したリンクベースの均衡問題を提案している。より一般的な枠組みとして、Ban et al.¹⁰⁾は配車サービスの供給量、移動手段の選択、道路混雑の 3 つの相互作用を記述した均衡問題を提案している。さらに、Di et al.¹¹⁾は移動者は SD, RD, R に加えて、配車サービスの 4 種類の交通手段が利用可能であるとし、移動者の交通手段選択と配車サービスプラットフォームの供給量選択に関する均衡と、道路混雑に関する均衡を統合したモデルを提案している。

RS サービスが成立するためには、サービス利用者 (RD と R) が時空間上でマッチングされる必要があるが、これまでに示した集計レベルのモデルは時間軸を考慮していない。これに対し、Seo et al.¹²⁾は共有型自動運転車両 (SAV) システムの最適化モデルを、時空間ネットワーク上における多目的最適化問題として定式化している。しかし、彼らのモデルではサービス利用時の運賃が

考慮されておらず、また移動者の総旅行時間最小化を目的関数の 1 つとして採用しており、利用者均衡との関係性は明示的には示されていない。

以上を踏まえて、本研究は時空間ネットワーク上における SD, RD, R という 3 つの移動手段の均衡フローを算出するとともに、RD と R の需要と供給に応じた動的な運賃 (Dynamic Pricing) を導出するものである。以下、第 3 章において構築するモデルの定式化と性質を示す。第 4 章では構築するモデルを仮想的なネットワークに適用する。最後に、第 5 章で本研究の成果をまとめるとともに、今後の課題と展望を述べる。

3. モデルの定式化

(1) 前提条件

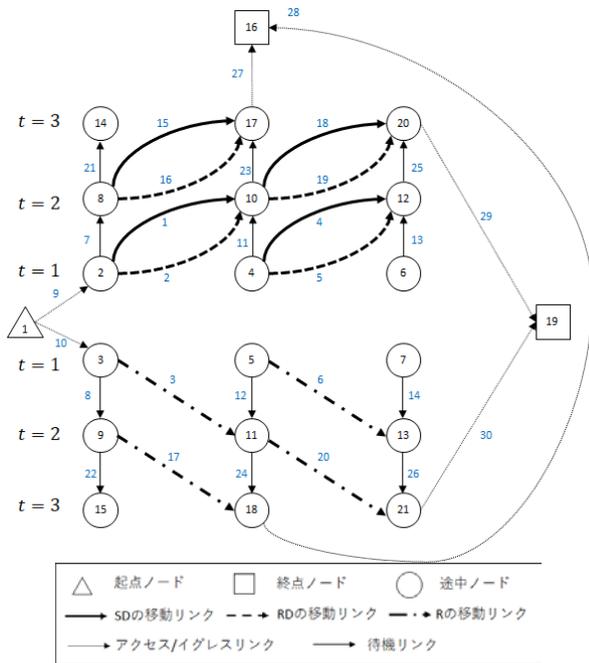
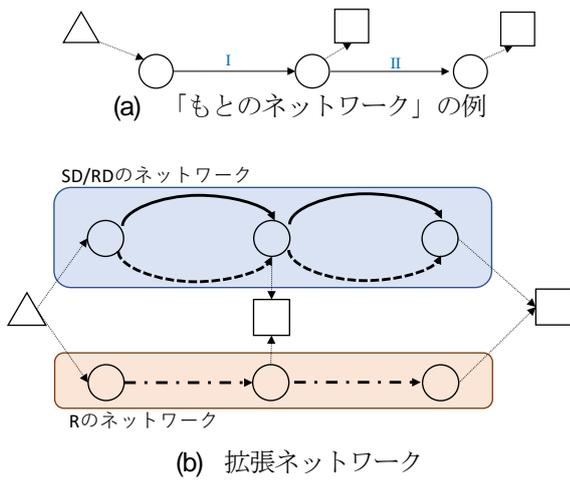
本節では、モデル化にあたる前提条件を述べる。

まず、Xu et al.⁶⁾と同様に、「Solo Driver (SD)」, 「Ridesharing Driver (RD)」, 「Rider (R)」という 3 つの移動手段を考える。SD は時空間ネットワーク上を自身で運転し単独で移動する移動手段である。RD は時空間ネットワーク上を自身で運転し、R を相乗りさせながら移動する移動手段である。R は RD が運転する車両に相乗りして時空間ネットワーク上を移動する移動手段である。SD と RD は移動途中で入れ替わり可能 (ie. 移動途中で R を乗降させることが可能) であるが、SD/RD と R は移動途中で入れ替わることはできないとする。また、それぞれの移動手段が出発地を出発する時間帯と、目的地に到着する必要がある最遅時刻は既知であるとする。また、それぞれの移動手段は、到着時刻制約に関わらず目的地になるべく早く到着できることが望ましいと考えていると仮定する。

SD および RD は、走行時間に比例した車両走行コスト (ガソリン代など) を支払うものとする。RD は、R を同乗させることにより R から運賃を受け取ることができるものとする。また、RD は R を同乗させている時間に比例して、心理的な負担に相当するコストがかかるものとする。最後に、道路上のリンクには容量が存在し、各時間帯におけるリンクを走行する RD と SD の合計はリンク容量以下であるとする。

(2) 時空間ネットワーク (STEN) の構築

前節で述べたとおり、SD と RD は移動途中で入れ替わり可能であるが、SD/RD と R は移動途中で入れ替わりできない。そこで、まず Xu et al.⁶⁾と同様に図-1(a)に示す「もとのネットワーク」を図-1(b)に示すような、SD/RD が通行可能なリンクと R が通行可能なリンクを分離した「拡張ネットワーク」に変換する。その上で、これを図-1(c)に示すような時空間ネットワーク (STEN; Space-



(c) 時空間ネットワーク
図-1 ネットワーク変換

Time Extended Network) ³⁾ ¹⁵⁾に拡張する。

時空間ネットワークにおけるノードは、2次元ネットワークに存在するノードを時間帯ごとに定義したものであり、 (i, t) (ただし i は2次元ネットワークにおけるノード番号、 t はノードの時間帯)のように表記できる。本研究では、需要が発生、集中する「起点ノード」、 「終点ノード」とそれ以外のノードである「途中ノード」の3種類のノードを設定する。リンクに関しては、「移動リンク」と「アクセスリンク」、「待機リンク」の3種類のリンクを定義する。「移動リンク」は車両による移動を表すリンクであり、移動リンクの流出ノード、流入ノードをそれぞれ (i, t_1) 、 (j, t_2) とすると $t_2 = t_1 + c_{ij}$ が成り立つ。なお、 c_{ij} は2次元ネットワークにおける ij 間の移動時間であり、本研究では2次元ネットワーク上におけるノード間移動時間は時間帯幅 Δt の整数倍であるとする。「アクセスリンク」は、「起点ノード」から

「途中ノード」あるいは「途中ノード」から「終点ノード」を結ぶリンクである。また、「待機リンク」は各ドライバーあるいはライダーの活動を希望しない場所 i において隣接するノード (i, t) および $(i, t + \Delta t)$ を結ぶリンクであり、時刻 t から $t + \Delta t$ までの間に待機することを表している。「アクセスリンク」、「待機リンク」に容量制約条件を設定すれば、乗降スペースや活動スペースによる影響が評価可能である。

(3) 記号表記

本研究で用いる記号表記は、以下の通りである。

- L : もとのネットワークのリンク集合
- N : もとのネットワークのノード集合
- T : 分析対象時間帯の集合
- Δt : STENにおける単位時間幅
- I : STENにおけるノード集合
- R : STENにおける出発地ノードの集合
- S : STENにおける目的地ノードの集合
- A : STENにおけるリンク集合
- A_1^{SD} : STENにおけるSDの移動リンクの集合
- A_1^{RD} : STENにおけるRDの移動リンクの集合
- A_1^R : STENにおけるRの移動リンクの集合
- A_2 : STENにおけるアクセスリンク
- A_3 : STENにおける待機リンク
- $OUT(i)$: ノード i の流出リンクの集合
- $IN(i)$: ノード i の流入リンクの集合
- e_{ia} : ノード $i \in I$ がリンク $a \in A$ の流出ノードであれば-1, 流入ノードであれば1, それ以外であれば0をとるダミー変数
- $a_{i,t}^{SD}$: 「もとのネットワーク」において時間帯 t にリンク l を流出する, STENにおけるSDの移動リンク番号
- $a_{i,t}^{RD}$: 「もとのネットワーク」において時間帯 t にリンク l を流出する, STENにおけるRDの移動リンク番号
- $a_{i,t}^R$: 「もとのネットワーク」において時間帯 t にリンク l を流出する, STENにおけるRの移動リンク番号
- $l(a)$: リンク $a \in A_1^{SD} \cup A_1^{RD} \cup A_1^R$ の「もとのネットワーク」におけるリンク番号 ($l(a) \in L$)
- $t(a)$: リンク $a \in A_1^{SD} \cup A_1^{RD} \cup A_1^R$ が流出する時間帯 ($t(a) \in T$)
- $n(i)$: ノード $i \in I$ の「もとのネットワーク」におけるノード番号 ($n(i) \in N$)
- c_a^s : 目的地を s とするリンク $a \in A$ のコスト
- t_a : リンク $a \in A$ の移動時間
- β^{TC} : 単位時間帯あたりの車両走行コスト
- β^{BF} : 単位時間帯あたりのベース運賃
- β^{PL} : 単位時間帯あたりのRDが抱える送迎に対する心理的負担コスト
- x_a^s : 目的地を s とするリンク a のフロー
- q_{rs} : STENにおける rs 間の需要

v_l^t : 「もとのネットワーク」において時間帯 t に流出するリンク l の容量

また、ある集合 S に対してその要素数を $|S|$ と表記する。

$$\sum_{s \in S} x_{a_{lt}}^s \leq \sum_{s \in S} x_{a_{lt}}^s, \forall l \in L, t \in T \quad (9)$$

$$x_a^s \geq 0, \forall a \in A, s \in S \quad (10)$$

(4) STEN リンクコスト

以上で述べた仮定により、STEN におけるリンクコストは以下のように設定できる。

a) 移動リンク

(1)節で述べたコストを各移動手段が負担すると仮定しているため、移動リンクのコストは以下のように設定する。

$$c_a^s = \begin{cases} t_a(1 + \beta^{TC}) & (\forall a \in A_1^{SD}) \\ t_a(1 + \beta^{TC} + \beta^{PL} - \beta^{BF}) & (\forall a \in A_1^{RD}) \\ t_a(1 + \beta^{BF}) & (\forall a \in A_1^R) \end{cases} \quad (1)$$

b) 待機リンク

各移動手段は到着時刻制約に関わらず目的地になるべく早く到着できることが望ましいと仮定しているため、待機リンクのコストを以下のように設定する。

$$c_a^s = \begin{cases} \Delta t & (n(s) \neq n(IN(a))) \\ 0 & (n(s) = n(IN(a))) \end{cases}, \forall a \in A_3 \quad (2)$$

c) アクセスリンク

アクセスリンクのコストは 0 である。なお、本研究では考慮していないが、車両保有にかかる固定コストを SD/RD のアクセスリンクに負荷することで考慮できる。

(5) 定式化

(3)節で定義した時空間ネットワーク (STEN) 上において、目的地別リンク交通量 x_a^s を未知変数とする最小費用流問題に類似する以下の問題[ST-RUE]を考えよう。

[ST-RUE]

Minimize

$$Z_p(\mathbf{x}) = \sum_{s \in S} \sum_{a \in A} c_a^s x_a^s \quad (3)$$

Subject to

$$\sum_{a \in IN(i)} x_a^s - \sum_{a \in OUT(i)} x_a^s = -q_{is}, \forall i \in R, s \in S \quad (4)$$

$$\sum_{a \in IN(s)} x_a^s - \sum_{a \in OUT(s)} x_a^s = \sum_{r \in R} q_{rs}, \forall s \in S \quad (5)$$

$$\sum_{a \in IN(i)} x_a^s - \sum_{a \in OUT(i)} x_a^s = 0, \forall s \in S, i \in \{I - R - S\} \quad (6)$$

$$\sum_{s \in S} (x_{a_{lt}}^s + x_{a_{lt}}^s) \leq v_l^t, \forall l \in L, t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{s \in S} x_{a_{lt}}^s \leq \kappa \sum_{s \in S} x_{a_{lt}}^s, \forall l \in L, t \in T \quad (8)$$

式(3)は、目的関数である総コストを表している。なお、これを最小化する解が、「すべての利用者が移動手段や(時空間上の)経路を変更する動機をもたない」という均衡状態であることは後述する。式(4)から式(6)はそれぞれ起点、終点、途中ノードにおける保存則である。式(7)はリンク容量制約である。式(8)および式(9)はライドシェアの成立条件を表している。式(8)は、R の移動可能人数は、RD が提供する車両容量以下であるという制約である。式(9)は、RD になりうる人数は R の移動人数以下であるという制約条件である。最後に、式(10)は終点別リンク交通量の非負条件である。

(6) 双対問題

前節で示した[ST-RUE]の双対問題を考えよう。式(4)から式(6)の等式制約に対応する双対変数を、

$$\mathbf{y} = (y_1^1, \dots, y_{|I|}^1, \dots, y_1^{|S|}, \dots, y_{|I|}^{|S|})^T$$

とし、式(7)から(9)の不等式制約に対応する双対変数をそれぞれ

$$\mathbf{d} = (d_1^1, \dots, d_{|L|}^1, \dots, d_1^{|T|}, \dots, d_{|L|}^{|T|})^T$$

$$\boldsymbol{\pi} = (\pi_1^1, \dots, \pi_{|L|}^1, \dots, \pi_1^{|T|}, \dots, \pi_{|L|}^{|T|})^T$$

$$\boldsymbol{\omega} = (\omega_1^1, \dots, \omega_{|L|}^1, \dots, \omega_1^{|T|}, \dots, \omega_{|L|}^{|T|})^T$$

とすると、[ST-RUE]の双対問題は以下のように表せる。

[ST-RUE_dual]

Maximize

$$Z_d(\mathbf{y}, \mathbf{d}, \boldsymbol{\pi}, \boldsymbol{\omega}) = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} q_{rs} (y_s^s - y_r^s) - \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} v_l^t d_l^t \quad (11)$$

Subject to

$$\sum_{i \in I} e_{ia} y_i^s - d_{l(a)}^{t(a)} \leq c_a^s, \forall a \in A_1^{SD}, s \in S \quad (12)$$

$$\sum_{i \in I} e_{ia} y_i^s - d_{l(a)}^{t(a)} + \kappa \pi_{l(a)}^{t(a)} - \omega_{l(a)}^{t(a)} \leq c_a^s, \forall a \in A_1^{RD}, s \in S \quad (13)$$

$$\sum_{i \in I} e_{ia} y_i^s - \pi_{l(a)}^{t(a)} + \omega_{l(a)}^{t(a)} \leq c_a^s, \forall a \in A_1^R, s \in S \quad (14)$$

$$\sum_{i \in I} e_{ia} y_i^s \leq c_a^s, \forall a \in A_2 \cup A_3, s \in S \quad (15)$$

$$d_l^t, \pi_l^t, \omega_l^t \geq 0, \forall l \in L, t \in T \quad (16)$$

なお、主問題および双対問題の行列表記は付録を参照

されたい。 y_i^s ($\forall i \in I, s \in S$) は (目的地別) ノードポテンシャルとよばれている。また、 y_i^s の符号を逆にした変数 $\mu_i^s \equiv -y_i^s$ は、ノード i から目的地ノード s までの最小コストと解釈でき¹⁴⁾、以降では「最小ノードコスト」とよぶ。

ここで、

$$\tilde{c}_a^s = \begin{cases} c_a^s + d_{l(a)}^{t(a)} & (\forall a \in A_1^{SD}) \\ c_a^s + d_{l(a)}^{t(a)} - \kappa \pi_{l(a)}^{t(a)} + \omega_{l(a)}^{t(a)} & (\forall a \in A_1^{RD}) \\ c_a^s + \pi_{l(a)}^{t(a)} - \omega_{l(a)}^{t(a)} & (\forall a \in A_1^{RD}) \\ c_a^s & (\forall a \in A_2 \cup A_3) \end{cases} \quad (17)$$

なる変数 \tilde{c}_a^s を導入しよう。このとき、 $\mu_i^s \equiv -y_i^s$ という関係も考慮すると、式(12)から式(15)を整理すると以下のように統一的に表記可能である。

$$\mu_{OUT(a)}^s - \mu_{IN(a)}^s \leq \tilde{c}_a^s, \forall a \in A, s \in S \quad (18)$$

このとき、相補性条件¹⁵⁾より

$$x_a^s (\mu_{OUT(a)}^s - \mu_{IN(a)}^s - \tilde{c}_a^s) = 0, \forall a \in A, s \in S \quad (19)$$

が成立する。したがって $x_a^s > 0$ 、すなわち s を目的地とするリンク a の利用者が存在すれば $\mu_{OUT(a)}^s = \mu_{IN(a)}^s + \tilde{c}_a^s$ となる。

(7) [ST-RUE]の解の性質

本節では、利用者が認知するリンクコストが式(17)で与えられる場合における[ST-RUE]の解の性質を考察する。まず、[ST-RUE]の解が利用者均衡状態であることを示す。

補題：ノード l_1 を起点とし、 n 個のノード (i_1, \dots, i_n) を経由して l_2 に至る経路を考える。 l_1 と l_2 における最小ノードコストの差は、この経路の利用者が存在するときは経路を構成するリンクコストの和と等しく、利用者が存在しないときは、それよりも大きくなることはない。

証明：ノード l_1 を起点とし、 n 個のノード (i_1, \dots, i_n) を経由して l_2 に至る経路を考えよう。この経路における、ノード l_1 から流出するリンクを a_1 、ノード i_k から流出するリンクを a_k とする。(図-2 参照) 式(18)、式(19)より、

$$\mu_{i_k}^s - \mu_{i_{k+1}}^s - \tilde{c}_{a_{k+1}}^s \begin{cases} = 0 & (x_k > 0) \\ < 0 & (x_k = 0) \end{cases}, k = 1, \dots, n \quad (20)$$

が成立する。この経路の利用者が存在すれば、 $x_k > 0$ ($k = 1, \dots, n$) が成立するので、式(20)を足し合わせることで、

$$\mu_{l_1}^s - \mu_{l_2}^s = \sum_{k=1}^n \tilde{c}_{a_{k+1}}^s$$

が成立する。したがって、 l_1 と l_2 における最小ノードコストの差は経路を構成するリンクコストの和に等しい。

一方、この経路の利用者がいなければ、少なくとも 1 つの k について $x_k = 0$ となるので、式(20)より

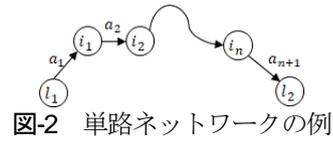


図-2 単路ネットワークの例

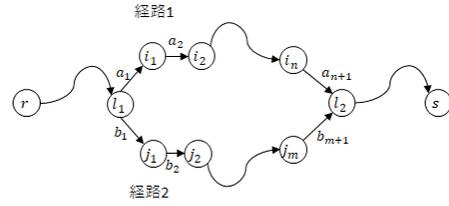


図-3 途中で分岐するネットワークの例

$$\mu_{l_1}^s - \mu_{l_2}^s \leq \sum_{k=1}^n \tilde{c}_{a_{k+1}}^s$$

が成立する。したがって、 l_1 と l_2 における最小ノードコストの差は、経路を構成するリンクコストの和よりも大きくなることはない。

Q.E.D.

命題：利用者の認知するリンクコストが式(16)で与えられるとき、[ST-RUE]の解は均衡状態である。

証明：図-3 に示すように、 rs 間においてノード l_1 ($l_1 \neq s$) で分岐し、ノード l_2 ($l_2 \neq r, l_2 \neq l_1$) で合流する 2 つの経路 (経路 1, 経路 2) を考えよう。なお、経路 1 は利用者が存在するものとする。上記の補題より、

$$\mu_{l_1}^s = \mu_{l_2}^s + \sum_{k=1}^n \tilde{c}_{a_{k+1}}^s \quad (21)$$

$$\mu_{l_1}^s \begin{cases} = \mu_{l_2}^s + \sum_{k=1}^m \tilde{c}_{b_{k+1}}^s & (p_2 > 0) \\ \leq \mu_{l_2}^s + \sum_{k=1}^m \tilde{c}_{b_{k+1}}^s & (p_2 = 0) \end{cases} \quad (22)$$

が成立する。(ただし、 p_2 は経路 2 の利用者数である。)

$p_2 > 0$ のとき、式(21)、式(22)から、

$$\mu_{l_2}^s + \sum_{k=1}^n \tilde{c}_{a_{k+1}}^s = \mu_{l_2}^s + \sum_{k=1}^m \tilde{c}_{b_{k+1}}^s$$

が成立する。これは、経路 1 と経路 2 のコストが等しいことを表している。

一方、 $p_2 = 0$ のとき、式(21)、式(22)から、

$$\mu_{l_2}^s + \sum_{k=1}^n \tilde{c}_{a_{k+1}}^s \leq \mu_{l_2}^s + \sum_{k=1}^m \tilde{c}_{b_{k+1}}^s$$

が成立する。これは、経路 1 の経路コストは、経路 2 のそれと等しいか小さいことを表している。

以上より、経路 1、経路 2 に関して利用者均衡状態で

あることを示すことができた。\$l_1\$と\$l_2\$の間に 3 本以上の経路が存在するときも、同様に示すことができる。

なお、一般に\$rs\$間の経路は分岐と合流が複数回存在するが、上記を繰り返すことにより[ST-RUE]の解は利用者均衡状態であること示すことができる。

Q.E.D.

式(16)は双対変数により外部費用を内部化したものと捉えることができるが、双対変数の意味の解釈を試みる。式(18)より、式(17)の右辺は（利用者が存在するリンクにおける）リンクコストを表している。容量制約条件（式(7)）に対する双対変数\$d\$は、SD と RD の移動リンクのみに負荷されており、リンク遅れ時間を表している。また、ライドシェアの成立条件（式(8)および式(9)）に対する制約条件は、RD と R の移動リンクのみに負荷されており、これらはライドシェア利用者の運賃として内部化されるとしよう。このとき、RD が受け取る運賃\$\omega_a^{RD}\$および R が支払う運賃\$\omega_a^R\$は、式(1)に示すリンクコスト\$c_a^d\$に内包されているベース運賃\$\beta^{BF} t_a\$もあわせて以下のようになる。

$$\begin{cases} \omega_a^{RD} = \beta^{BF} t_a + \kappa \pi_{l(a)}^{t(a)} - \varpi_{l(a)}^{t(a)} \\ \omega_a^R = \beta^{BF} t_a + \pi_{l(a)}^{t(a)} - \varpi_{l(a)}^{t(a)} \end{cases} \quad (23)$$

ここで、Ma et al.⁸⁾を参考にすれば、\$\pi\$は R の需要が増加したときに急騰する Surge Price を表す項と解釈できる。また、\$\varpi\$は R の需要が少ないとき、RD にとって運賃収入の減額を表す項であり、R にとって支払い運賃が補助される Subsidy を表す項と解釈できる。以上より、\$\pi\$および\$\varpi\$は需要に応じて増減する Dynamic Pricing を表しているといえる。

4. ケーススタディ

本章では、仮想ネットワークに対してモデルを適用し、本研究で提案したモデルの挙動を確認する。第 3 章で構築した線形計画問題は MATLAB R2021a から汎用ソルバーである Gurobi Optimizer 9.1.2 を呼び出して求解する。なお、汎用ワークステーション (Intel(R) Xeon(R) W-2102 CPU @ 2.90GHz, 32GB RAM) での計算時間は、1 ケースあたり最大で 2 分程度であった。

(1) 計算対象ネットワークと需要設定

本章では、構築したモデルを図-4 に示す仮想ネットワーク (Sioux Falls ネットワーク) に適用し、モデルの特性の検証を行う。リンク長等の情報¹⁶⁾も公開されており、リンク旅行時間は\$[d_a/2] \times \Delta t\$ (分) (ただし、\$d_a\$はリンク\$a\$のリンク長 (km) , \$[x]\$は\$x\$を切り上げて整数にした値) として与えた。また、\$\Delta t = 15\$とし、リンク容量

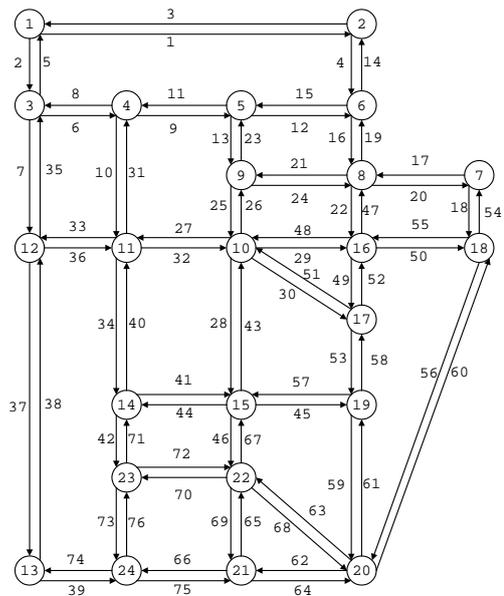


図-4 計算対象ネットワーク

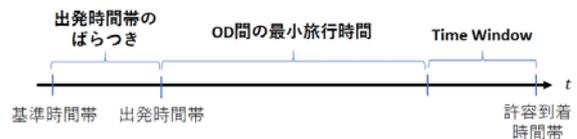


図-5 出発・到着時刻の設定

表-1 パラメータ設定に用いた属性値

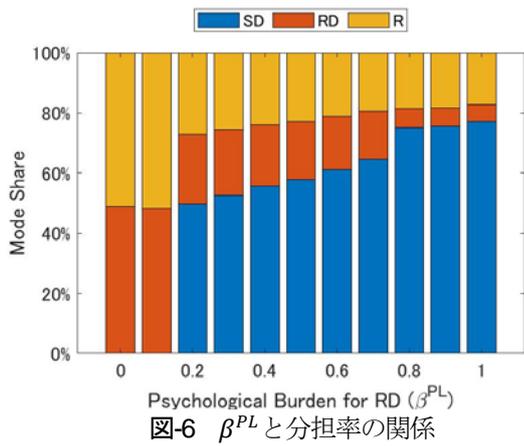
時間帯幅	時間価値	燃料代
15 min	30 円/min	140 円/l
車両燃費	平均速度	
12 km/l	30km/h	

は公開されている値の 0.2 倍と設定した。

なお、Sioux Falls ネットワークの静的な OD 需要しか公開されていないが、これを時間帯ごとに割り振ることを考える。図-5 に示すように、基準時刻から出発時刻の間には、ある「ばらつき」が存在するものとする。そして、許容到着時刻は、「出発時刻+OD 間の最小旅行時間+Time Window」により設定する。以下では、出発時刻の「ばらつき」をポアソン分布で表現し、その平均値\$\lambda\$を OD ペアごとに設定するものとする。また、Time Window は全 OD ペアで一律の値を与えるものとする。

(2) パラメータ設定

構築したモデルにおけるパラメータは\$\beta^{TC}\$, \$\beta^{BF}\$, \$\beta^{PL}\$の 3 種類である。このうち、\$\beta^{TC}\$は表-1 に示す属性値を用いて車両走行コストを時間単位に変換して\$\beta^{TC} = 0.194\$と設定した。なお、車両走行コストとしてガソリン代のみを考慮した。また、\$\beta^{BF}\$は東京都 23 区内のタクシーの運賃料金表¹⁷⁾の距離と運賃の関係を線形近似した係数の半分の値として、\$\beta^{BF} = 0.715\$と設定した。また、\$\beta^{PL}\$を設定する際の属性値が見当たらなかつたため、



β^{PL} の値は感度分析を行って設定する。

(3) 心理的負担を表すパラメータに対する感度分析

まず、全 OD ペアについて出発率の平均を $\lambda = 1$ 、到着時刻の Time Window を 4 (1 時間) として、RD の心理的負担を表すパラメータ β^{PL} に対する感度分析を行う。

図-6に β^{PL} と分担率の関係を示す。なお、SD、RD、Rの分担率は、

$$r_{SD} = \frac{\sum_{s \in S} \sum_{a \in A_1^{SD}} x_a^S}{\sum_{s \in S} \sum_{a \in \{A_1^{SD}, A_1^{RD}, A_1^R\}} x_a^S}$$

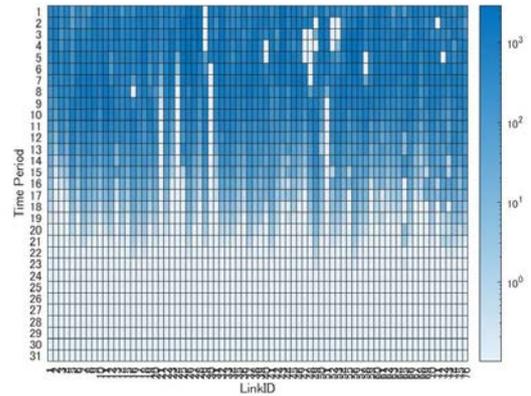
などのように定義した。

β^{PL} が 0, 0.1 のとき SD の分担率は 0 であるが、その後 β^{PL} の値が大きくなるにつれ SD の分担率は上昇する傾向にあることがわかる。これは、式(1)を見てわかるように、 β^{PL} が大きくなるにつれ RD のリンクコストが増加するためであるといえる。以下では、 $\beta^{PL} = 0.5$ として分析をすすめる。

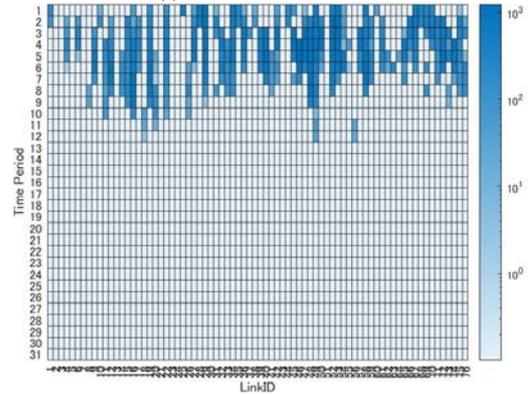
(4) 「基本ケース」に対する交通量と動的課金額

本節では、 β^{TC} 、 β^{BF} 、 β^{PL} を(2)節および(3)節で設定した値とする。さらに、出発時刻のばらつきを表すポアソン分布の平均値を $\lambda_1 = 1$ 、 $\lambda_2 = 4$ の2種類設定し、平均値が λ_1 に属するODペア (Group 1) の比率を0.5、到着時刻の Time Window を 4 時間帯としたケースを「基本ケース」と称し、交通量と動的課金額の時空間推移を考察する。

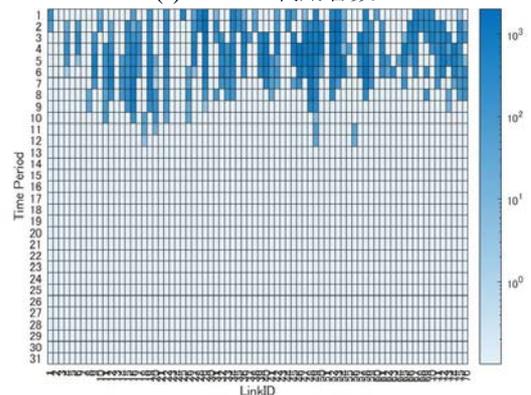
図-7に交通量の時空間推移を示す。これを見ると、一般的に SD の利用者数が多く全時間帯を通して SD のみが移動するリンクも存在するものの、時間帯によって全移動者が RS サービスを利用しているリンクも存在することが確認できる。また、「基本ケース」では到着時刻に対する Time Window を 4 時間帯に設定しているが、終盤の時間帯の SD、RD、R のリンク交通量は 0 である。したがって、本節の設定では送迎のために時間調整や遠回りをした利用者はいないことが推察される。



(a) SD の利用者数



(b) RD の利用者数



(c) R の利用者数

図-7 リンク交通量の時空間推移

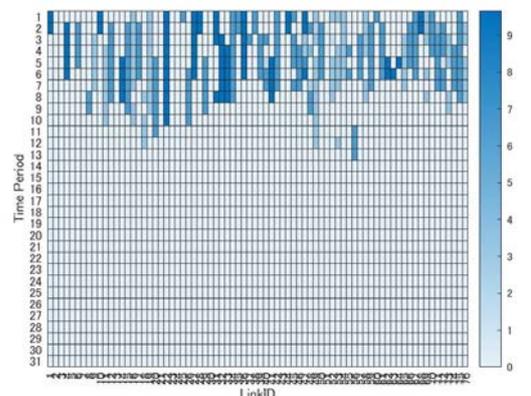


図-8 Subsidy の時空間推移

図-8 に Subsidy に相当する動的課金額の時空間推移を示す。これを見ると、Subsidy は最大で9時間帯相当であることがわかる。なお、本節の設定では RS サービス利用者数が少ないため Surge Price は発生しなかった。

(5) パラメータに関する感度分析

本節では、パラメータに対する感度分析を行う。

a) 需要の時間的分散に対する感度分析

まず、RD の心理的負担を表すパラメータを $\beta^{PL} = 0.5$ として、需要の時間的分散に対する感度分析を行う。需要の分散を考慮するにあたり、前節と同様に出発時刻のばらつきを表すポアソン分布の平均値を λ_1, λ_2 の 2 種類設定し、平均値が λ_1 に属する OD ペア (Group 1) の比率を 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 の場合の結果を比較する。ここでは $(\lambda_1, \lambda_2) = (1, 4)$ と $(\lambda_1, \lambda_2) = (1, 6)$ の 2 ケースを設定した。なお、ポアソン分布の平均値 λ が小さいほど分布のばらつきが小さいことに注意が必要である。また、乱数の影響を考慮するため、OD ペアの比率が 0, 1.0 の場合を除いたそれぞれのケースに対し、乱数を変えて 10 回計算を行った。なお、ケース数を減らすために到着時刻の Time Window は 4 に固定した。

図-9 に需要の時間的分散と SD の分担率の関係を示す。図における棒グラフは SD の分担率の中央値を表し、エラーバーは SD の分担率の最大値、最小値を表している。Group 1 に属する OD ペア、すなわち出発時刻のばらつきが小さい OD ペアの比率が増加するにつれて、SD の分担率が減少し、シェアリングが促進されているといえる。さらに、 $\lambda_2 = 4$ と $\lambda_2 = 6$ の結果を比較すると、出発時刻の分散が小さい $\lambda_2 = 4$ の方が SD の分担率が低い傾向にあるといえる。したがって、出発時刻のばらつきが小さいほどシェアリングが促進されるといえる。

図-10 に需要の時間的分散と総遅れ時間の関係を示す。Group 1 に属する比率が大きくなるにつれて、総遅れ時間が増加する傾向にあることがわかる。出発時刻のばらつきが小さくなり需要が集中することで混雑が激化するが、本節のパラメータ設定では前述したシェアリングの促進による渋滞緩和効果は限定的であるといえる。

b) ベース運賃に対する感度分析

次に、OD 需要を前節で設定した「基本ケース」として、ベース運賃に対する感度分析を行う。図-11 に設定した $\beta^{BF} (0.715)$ に対する比率と分担率の関係を示す。ベース運賃の比率が 0 のときは全員が RS サービスを利用しているが、ベース運賃比率が 0.1 に増加すると SD の比率が大幅に増加している。その後ベース運賃の比率が 0.4 から増加するにつれ R の比率は減少する傾向にあることがわかる。また、ベース運賃の比率が 0.4 から 0.6 までは増加するにつれ、RD の比率も減少する傾向にあるが、ベース運賃の比率が 0.7 より大きくなると RD の比

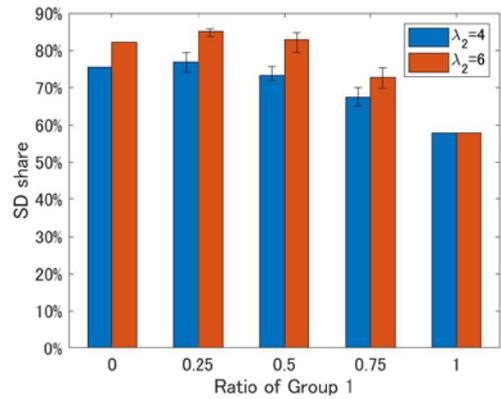


図-9 需要の時間的分散と SD の分担率の関係

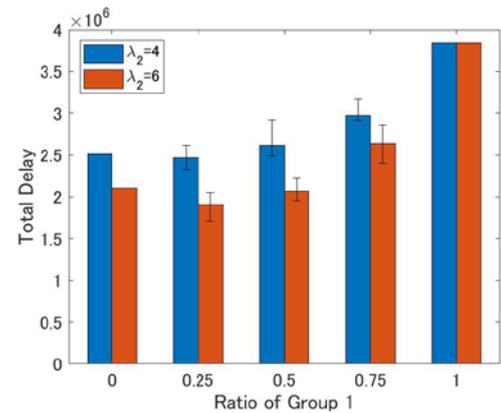


図-10 需要の時間的分散と総遅れ時間の関係

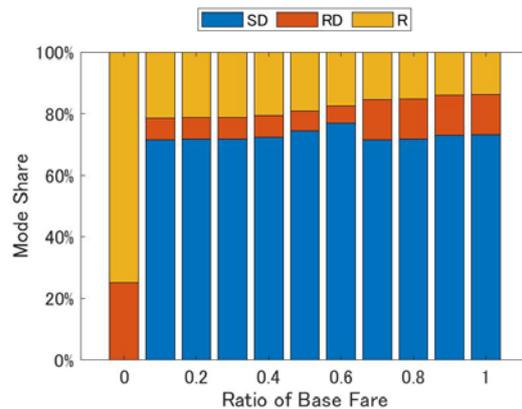


図-11 ベース運賃と SD の分担率の関係

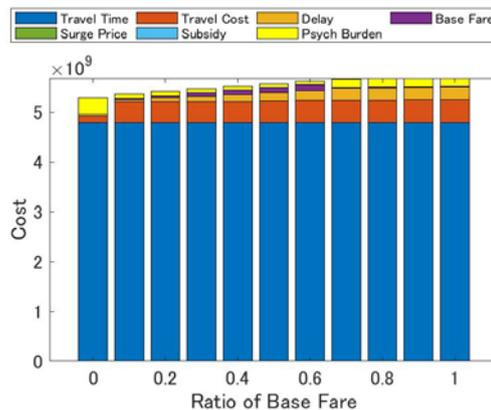


図-12 ベース運賃と費用内訳の関係

率が大きくなっていることが読み取れる。これは、ベース運賃の比率が大きくなると RD が受け取る運賃が増加するため、自動車利用者が送迎するモチベーションが高まったためであると考えられる。

図-12 にベース運賃と費用内訳の関係を示す。ベース運賃に関わらず（遅れ時間を含まない）旅行時間はほぼ一定である。また、前述したようにベース運賃が 0 のときは全員が RS サービスを利用しているため、RD の心理的負担コストが大きいといえる。そして、ベース運賃が大きくなるにつれて遅れ時間費用が増加する傾向にあることが読み取れる。すなわち、ベース運賃を適切に設定することにより、RS サービスの利用促進による混雑の緩和につながる可能性があることを示しているといえる。

5. おわりに

本研究では、近い将来実用化するシェアリング交通が都市内交通に及ぼす影響を評価することを念頭に置き、RS サービス実現後の交通インフラ整備計画への活用に資するネットワーク均衡モデルを構築した。構築したモデルの双対問題を考えることにより、RS サービスの需要と供給に応じた動的な課金額を導出可能であることを示した。仮想的なネットワークへの適用計算により、以下の点を明らかにした。

- ・ 需要が特定の時間帯に集中すれば RS サービス利用が促進されるが、需要集中にともなう混雑緩和にまで至らないこともある
- ・ ベース運賃を適切に設定すれば RS サービスの利用が促進され、混雑緩和につながることもある

今後は、RS サービスの普及を考慮した道路空間の最適化モデルへの拡張への余地があると考えている。また、構築したモデルを実都市に適用し、施策検討を行いたい。

付録 主問題および双対問題の行列表現

[ST-RUE]は、行列では以下のように表すことができる。

Minimize

$$Z_p(\mathbf{x}) = \mathbf{c}^T \mathbf{x}$$

Subject to

$$\mathbf{B}_1 \mathbf{x} = \mathbf{b}_1$$

$$\mathbf{B}_2 \mathbf{x} \leq \mathbf{b}_2$$

$$\mathbf{B}_3 \mathbf{x} \leq \mathbf{0}$$

$$\mathbf{B}_4 \mathbf{x} \leq \mathbf{0}$$

ここに、

$$\mathbf{c} = (c_1^1, \dots, c_{|A|}^1, \dots, c_1^{|S|}, \dots, c_{|A|}^{|S|})^T$$

$$\mathbf{x} = (x_1^1, \dots, x_{|A|}^1, \dots, x_1^{|S|}, \dots, x_{|A|}^{|S|})^T$$

$$\mathbf{b}_1 = (b_1^1, \dots, b_{|I|}^1, \dots, b_1^{|S|}, \dots, b_{|I|}^{|S|})^T$$

$$b_i^s = \begin{cases} -q_{is} & (i \in R) \\ \sum_{r \in R} q_{rs} & (i = S) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases}$$

$$\mathbf{b}_2 = (v_1^1, \dots, v_{|I|}^1, \dots, v_1^{|T|}, \dots, v_{|I|}^{|T|})^T$$

である。ここで、STEN におけるノード、リンクの接続関係を表すダミー変数 e_{ia} の行列表記を、

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} e_{11} & \dots & e_{1|A|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{|I|1} & \dots & e_{|I||A|} \end{pmatrix}$$

と表し、STEN における SD, RD, R の移動リンクと、もとのネットワークのリンク番号、流出時間帯の対応関係を表す行列を、

$$\mathbf{W}^{SD} = \begin{pmatrix} w_{11,1}^{SD} & \dots & w_{11,|A|}^{SD} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{|L||T|,1}^{SD} & \dots & w_{|L||T|,|A|}^{SD} \end{pmatrix}$$

ただし、

$$w_{lt,a}^{SD} = \begin{cases} 1 & (a_{lt}^{SD} = 1) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases}$$

などと表すと、制約条件の左辺の行列は以下のように表現できる。

$$\mathbf{B}_1 = \begin{pmatrix} \mathbf{E} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \dots & \mathbf{E} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{B}_2 = \overbrace{(\mathbf{W}^{SD} + \mathbf{W}^{RD} \quad \dots \quad \mathbf{W}^{SD} + \mathbf{W}^{RD})}^{|S|}$$

$$\mathbf{B}_3 = \overbrace{(-\kappa \mathbf{W}^{RD} + \mathbf{W}^R \quad \dots \quad -\kappa \mathbf{W}^{RD} + \mathbf{W}^R)}^{|S|}$$

$$\mathbf{B}_4 = \overbrace{(\mathbf{W}^{RD} - \mathbf{W}^R \quad \dots \quad \mathbf{W}^{RD} - \mathbf{W}^R)}^{|S|}$$

このとき、3 章で定義したものと同一の双対変数を用いると、[ST-RUE_dual]は行列を用いて以下のように簡略に表記が可能である。

Maximize

$$Z_d(\mathbf{y}, \mathbf{d}, \boldsymbol{\pi}, \boldsymbol{\omega}) = \mathbf{b}_1^T \mathbf{y} - \mathbf{b}_2^T \mathbf{d}$$

Subject to

$$\mathbf{B}_1^T \mathbf{y} - (\mathbf{B}_2^T \mathbf{d} + \mathbf{B}_3^T \boldsymbol{\pi} + \mathbf{B}_4^T \boldsymbol{\omega}) \leq \mathbf{c}$$

$$\mathbf{d}, \boldsymbol{\pi}, \boldsymbol{\omega} \geq \mathbf{0}$$

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 21H01459 および国土交通省道路局「道路政策の質の向上に資する技術研究開発（課題名：自動運転とシェアリングが融合した新しいモビリティサービスと社会・都市・生活の未来についての研究開発）」の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 国土交通省総合政策局：都市と地方の新たなモビリティサービス懇談会 中間とりまとめ (https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/transport/sosei_transport_tk_000089.html) , 2019
- 2) Agatz, N. A. H., Erera, A., Savelsbergh, M. W. P., and Wang, X.: Optimization for dynamic ride-sharing: A review, *European Journal of Operational Research*, 223, 295–303, 2012.
- 3) Shimamoto, H.: Optimal Matching Problem for Ride-Sharing Considering Users' Schedule Rearrangement, *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 18(3), 391-399, 2020
- 4) Wang, X., Agatz, N., and Erera, A.: Stable matching for dynamic ride-sharing systems, *Transportation Science*, 52(4), 850-867, 2018
- 5) Thaitakul, P., Seo, T., Kusakabe, T., and Asakura, Y.: Evoluti of a dynamic ridesharing system based on rational behaviour of users, *International Journal of Sustainable Transportaiton*, 13(8), 614-626, 2019
- 6) Xu, H., Pang, J-S., Ordonez, F., and Dessouky, M. : Complementarity models for traffic equilibrium with ridesharing, *Transportation Research B* 81, 161-182, 2015
- 7) Di, X., Ma, R., Liu, H. X., and Ban, X: A link-node reformulation of ridesharing user equilibrium with network design, *Transportation Research B* 112, 230-255, 2018
- 8) Ma J., Xu, M., Meng, Q., and Cheng, L.: Ridesharing user equilibrium problem under OD-based surge pricing strategy, *Transportation Research B* 134, 1-24, 2020
- 9) Li, Y., Liu, Y., and Xie, J: A path-based equilibrium model for ridesharing matching, *Transportation Research B* 138, 373-405, 2020
- 10) Ban, X. J., Dessouky, M., Pang, J-S., and Fan, R.: A general equilibrium model for transportation systems with e-hailing services and flow congestion, *Transportation Research B* 129, 273-304, 2019
- 11) Di, X, and Ban. X. J.: A unified equilibrium framework of new shared mobility system, *Transportation Research B* 129, 50-78, 2019
- 12) Seo, T. and Asakura, Y.: Muliti-objective liner optimization problem for strategic planning of shared autonomous vehicle operation and infrastructure design, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1-13, 2021
- 13) Bell, M. G. H and Iida, Y.: *Transportation Network Analysis*, Capter 1, Wiley, 1997
- 14) Ahuja, R. K., Magnanti, T. L. and Orlin, J. B. : *Network Flows Theory, Algorithm and Applications*, Chapter 9, pp. 294-344 Prentice Hall
- 15) 森哲男：数理計画法，共立出版株式会社
- 16) Transportation Networks for Research Core Team. *Transportation Networks for Research*. <https://github.com/bstabler/TransportationNetworks>.
- 17) 一般社団法人東京都個人タクシー協会 HP (http://www.kojintaxi-tokyo.or.jp/cus/fares_table.html)

(2021 10.1 受付)

SPACE-TIME NETWORK EQUILIBRIUM MODEL CONSIDERING RIDESHARING

Hiroshi SHIMAMOTO