

# 都市鉄道の需要構造変化を踏まえた 時間帯別課金シミュレーション

木村 彗留<sup>1</sup>・福田 大輔<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 東京工業大学 環境・社会理工学院土木・環境工学系  
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1) E-mail: kimura.s.au@m.titech.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤学専攻  
(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1) E-mail: fukuda@civil.t.u-tokyo.ac.jp

本研究では、ポストコロナにおける都市圏の通勤鉄道需要の構造変化を想定し、ラッシュアワーにおける時間帯別運賃導入の影響をシミュレーションによって分析した。シミュレーションでは、2種類の通勤スタイルが異なる通勤者を想定した出発時刻選択・乗客需要均衡配分モデルと最善課金導出のためのシステム最適配分モデルを構築した。ポストコロナを想定した3種類のシナリオ（①在宅勤務の増加、②フレックスの増加、③混雑に対する抵抗感の増加）のもとでシミュレーションを行った結果、コロナ前から混雑率や時間帯別運賃によって得られる課金分の総料金収入が変化することを確認した。最後に、構築したモデルを実路線に適用し、今後起こり得る通勤者の出発時刻選択行動の変化を示した。

**Key Words:** *departure time choice, first-best congestion pricing, urban railway, user equilibrium, system optimal*

## 1. はじめに

現在、世界的に新型コロナウイルス (COVID-19) が流行している。感染者数の増加に応じて発令される緊急事態宣言や自粛要請に伴い、人々の生活や経済活動に大きな影響を及ぼしており、特に、通勤・通学・余暇活動などにおいて、人々の行動が大きく変化している。

本研究では首都圏の鉄道利用を念頭に、COVID-19 がもたらした影響について検討する。首都圏の鉄道利用にCOVID-19 がもたらした影響として以下の2つがある。1点目は、「混雑を避けた時間帯・車両の利用の促進」である。国土交通省や首都圏鉄道各社の働きかけなどにより、混雑を回避するための時差通勤や在宅勤務の割合が増加している<sup>1)</sup>。2点目は、「列車内の混雑に対する抵抗感の増加」である。コロナ前に比べて混雑している状況を避けようという通勤者が増加しており、車両内における感染への不安の拡大が示唆される<sup>2)</sup>。さらに、COVID-19 により在宅勤務をはじめとする多様な働き方が進んでいる。そして、こうした動きは今後も継続する可能性も考えられる。

鉄道通勤者の働き方の変化に伴い、首都圏鉄道の通勤定期券利用は減少などもあり、運賃収入が大きく減少している<sup>3)</sup>。こうした中、一部の鉄道会社では運賃に対す

る時間帯別運賃（ダイナミックプライシング、以降 DP と表記）の導入に向けた動きが見られる。DP とは、ピーク時の運賃を上乘せして鉄道需要の平準化を目指す運賃制度である。また、国も第2次交通政策基本計画<sup>4)</sup>の中で、DP について言及している。このように、DP の導入への動きが加速しており、鉄道通勤者の行動変化にもさらなる影響を与えることが予想される。

DP 設定、いわゆるプライシングスケジュールの検討においては、COVID-19 によって大きく変化した働き方や混雑に対する意識の変化が都市鉄道通勤者の出発時刻選択行動にどのような変化をもたらすのかを予測した上で、時間帯別に最適な運賃設定を行う必要がある。

そこで本研究では、ポストコロナの都市鉄道を念頭に、需要構造の変化を想定し、都市鉄道における DP はどうかをシミュレーションによって分析する。

本研究において想定するポストコロナにおける変化は特に、以下の3項目とする。

- ・ 在宅勤務の増加
  - 在宅勤務を現状のまま続ける通勤者が一定程度いるために、駅間鉄道 OD 需要がポストコロナにおいても一定程度減少する状況を想定。
- ・ フレックスの増加
  - 出社時刻を柔軟に選ぶことができる通勤者の

比率がポストコロナにおいては増加する状況を想定。

- ・ 混雑に対する抵抗感の増加
  - 感染への不安に伴い車内混雑に対して増加した抵抗感が、ポストコロナにおいても継続する状況を想定。

これらの想定に基づき、都市鉄道における DP の導入について交通均衡モデルを基礎としたシミュレーションによって分析する。

## 2. 既往研究の整理と本研究の位置付け

### (1) 出発時刻選択モデル (スケジューリングモデル)

出発時刻選択行動を対象とした研究は数多く行われている。一般的に出発時刻選択モデルでは、利用者の不効用 (スケジュールコスト)  $u(t_D, a)$  を利用者の出発時刻  $t_D$  と到着時刻  $a$  を引数として規定する。

現在でも広く用いられている出発時刻選択モデルとして、Vickrey (1969)<sup>9</sup>が提案し、その後 Small (1982)<sup>6</sup>や Amott (1993)<sup>7</sup>によって精緻化された“Step Model ( $\alpha - \beta - \gamma$  preference)”がある。図-1で示すように、Step Modelでは、利用者が希望到着時刻  $a^*$  よりも早く到着した場合の限界不効用を  $\beta$ 、遅く到着した場合の限界不効用を  $\gamma$ 、移動時間の限界不効用 (時間価値) を  $\alpha$  で表す。スケジュールコスト  $c(t_D, a)$  は式(1)のように表される。

$$c(t_D, a) = \alpha(a - t_D) + \beta \min(0, a - a^*) + \gamma \max(0, a - a^*) \quad (1)$$

$c(t_D, a)$  は希望到着時刻  $a^*$  に依存しているため、出社時刻が決まっている通勤者を想定した出発時刻選択モデルであると解釈することができる。

これに対し、限界効用が時刻とともに変化する出発時刻選択モデルとして、Vickrey (1973)<sup>8</sup>が提案し、その後 Tseng and Verhoef (2008)<sup>9</sup>や Fosgerau and Engelson (2011)<sup>10</sup>によって更なる研究が行われた“Slope Model”がある。Slope Modelでは「利用者は自宅に滞在し続けることから得られる効用と、目的地に滞在し続けることから得られる効用の総和に基づいて出発時刻を決める」状況を直接的に記述している。図-2のように、自宅滞在時間の限界効用  $H(t)$ 、目的地滞在時間の限界効用  $W(t)$  を式(2)、式(3)のようにそれぞれ線形で与える。

$$H(t) = \beta_0 + \beta_1 t \quad (2)$$

$$W(t) = \gamma_0 + \gamma_1 t \quad (3)$$

このとき、自宅を  $t_D$  に出発し、目的地に  $a$  に到着する (総移動所要時間  $T : T = a - t_D$ ) 利用者のスケジュールコスト  $c(t_D, a)$  は式(4)で表される。

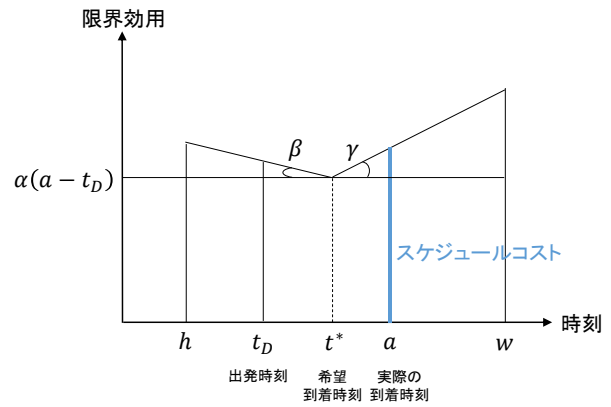


図-1 Step Modelによるスケジュールコストの表現

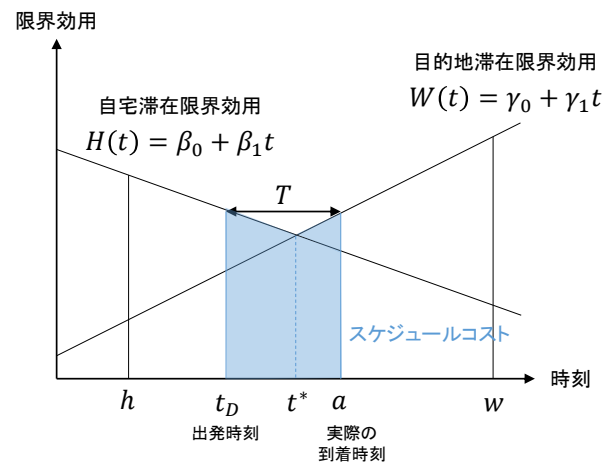


図-2 Slope Modelによるスケジュールコストの表現

$$c(t_D, a) = \int_{t_D}^{t^*} H(t) dt + \int_{t^*}^a W(t) dt \quad (4)$$

Slope Model の  $c(t_D, a)$  は、総移動所要時間  $T$  に依存することが分かる。また、希望到着時刻  $a^*$  に依存しないことも示される。そのため、希望到着時刻  $a^*$  に依存する Step Model とは異なり、Slope Model では、出社時刻が明確に定まっていないフレックス通勤者を想定した出発時刻選択モデルであると解釈できる。

### (2) 乗客需要均衡配分モデル

出発時刻選択モデルと利用者均衡モデルを統合することで、混雑した鉄道路線における鉄道通勤者の出発時刻分布を導出する研究が見られる。

Tian et al. (2007)<sup>11</sup>は、複数の郊外駅から単一の都心駅に向かう多対一の単一方向路線を仮定し、利用者均衡条件に基づいて混雑コストとスケジュールコストのトレードオフを考慮して、各通勤者の出発時刻・列車の選択パターン (出発時刻分布) を導出した。スケジュールコストには Step Model を用いており、全通勤者の出社時刻が決まっている想定で出発時刻分布を導出している。

Xie and Fukuda (2014)<sup>12</sup>も同様のフレームで出発時刻分布

を導出しているが、スケジュールコストに Slope Model が用いられている。つまり全通勤者はフレックスで働いている想定をしている。さらに、システム最適条件に基づく出発時刻分布を導出し、限界費用形成原理に基づく First-Best-Pricing スケジュールも求めている。

### (3) 本研究の位置付け

このように、出発時刻選択モデルを用いた研究は数多く行われているが、そのほとんどが Step Model に基づくものである。また、出発時刻分布の導出においては、全通勤者が同質であることを想定しており、多様な通勤スタイルの通勤者が混在する状況を記述できていない。

そこで本研究では、Tian et al. (2007)<sup>11</sup>と Xie and Fukuda (2014)<sup>12</sup>を拡張し、2種類の通勤者が同じ列車を利用する状況をマルチクラス交通均衡配分モデル<sup>13</sup>に基づいて記述する。その上で、ポストコロナにおける変化を考慮したシナリオ毎に DP 導入について分析する。

## 3. 出発時刻選択・乗客需要均衡配分モデルの構築

マルチクラス交通均衡配分モデルでは、出社時間が決まっている通勤者 (Step Model に従う通勤スタイル) と出社時間が明確に定まっていないフレックス通勤者 (Slope Model に従う通勤スタイル) の 2 種類とし、 $b = \{step, slope\}$  でラベル付けする。定式化において用いる変数とパラメータの一覧を表-1 に示す。

### (1) 対象路線の概要

シミュレーションを行う鉄道路線は、Tian et al. (2007)<sup>11</sup>及び Xie and Fukuda (2014)<sup>12</sup>に準拠し、図-3 に示す複数の郊外駅から単一の都心駅に向かう多対一の単一方向路線とする。列車  $j$  を利用して  $r$  駅を出発する通勤者数 (需要) は  $n_j^r$  で表され、それらを各駅で足し合わせることで  $r$  駅の通勤者数 (需要) は  $q_r$  で表される。つまり、通勤者数に関する保存則が成り立つ。ここで簡単のために、 $q_r$  と駅間  $i$  における移動時間  $\tau_i$  はそれぞれ一定とする。配分シミュレーションでは、後述する利用者均衡条件・システム最適化原則に対して最適な  $n_j^r$  を求める。

### (2) ユーザーコスト

$r$  駅を出発する列車  $j$  に乗る乗客 1 人あたりのユーザーコスト  $UC_j^{r,b}$  は、混雑コスト  $C_j^{r,b}$  とスケジュールコスト  $V_j^{r,b}$  の和で表される。

$$UC_j^{r,b} = C_j^{r,b} + V_j^{r,b} \quad (5)$$

混雑コスト  $C_j^{r,b}$  は、Step Model と Slope Model とともに、混雑コスト関数  $g_j(\cdot)$  と駅間移動時間  $\tau_i$  の積で表される。

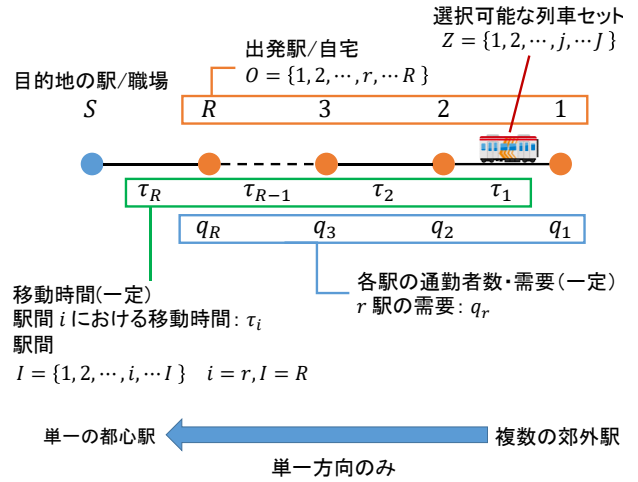


図-3 仮定の都市鉄道路線：空間的な表現

$$C_j^{r,b} = \sum_{i=r}^R g_j \left( \sum_{b \in B} \sum_{m=1}^i n_j^{m,b} \right) \tau_i \quad (6)$$

ここで、混雑コスト関数  $g_j(\cdot)$  は、乗客  $n$  と列車  $j$  の定員  $k_j$  の関係で表される。

$$g_j(\cdot) = \theta \left( \frac{n}{k_j} \right)^2 \quad (7)$$

Step Model のスケジュールコスト  $V_j^{r,step}$  は、式(1)における早着と遅着の項の和で表される。

$$V_j^{r,step} = \beta \max(0, a^* - j) + \gamma \max(0, j - a^*) \quad (8)$$

Slope Model のスケジュールコストは、式(2)-(4)に基づき式(9)のように表される。

$$\begin{aligned} V_j^{r,slope} &= \int_{t_D}^{t^*} (\beta_0 + \beta_1 t) dt + \int_{t^*}^a (\gamma_0 + \gamma_1 t) dt \\ &= \frac{\gamma_1}{2} (j + T_r)^2 - \frac{\beta_1}{2} j^2 + (\gamma_0 - \beta_0) j \\ &\quad + \gamma_0 T_r + \frac{(\beta_0 - \gamma_0)^2}{2(\gamma_1 - \beta_1)} \end{aligned} \quad (9)$$

式(5)-(9)より、通勤スタイル別にユーザーコストを記述すると、式(10)-(11)で表される。

Step Model のユーザーコスト：

$$\begin{aligned} UC_j^{r,step} &= C_j^{r,step} + V_j^{r,step} \\ &= \sum_{i=r}^R g_j \left( \sum_{m=1}^i n_j^{m,step} + \sum_{m=1}^i n_j^{m,slope} \right) \tau_i + V_j^{r,step} \end{aligned} \quad (10)$$

表-1 変数・パラメータの定義

変数	定義
$O$	出発駅の集合 (要素を $r$ とする) $O = \{1, 2, \dots, r, \dots, R\}$
$I$	駅間リンク集合 (要素を $i$ とする) $I = \{1, 2, \dots, i, \dots, I\}$ (ここに, $i = r, I = R$ )
$B$	通勤スタイル (Step Model, Slope Model) の集合 (要素を $b$ とする) $b \in B, b = \{step, slope\}$
$Z^{r,b}$	$r$ 駅から目的地間の列車 $j$ の通勤スタイル $b$ についての選択可能な列車の集合 (要素を $j$ とする) $Z^{r,b} = \{1, 2, \dots, j, \dots, J\}$
$UC_j^{r,b}$	$r$ 駅から目的地間の列車 $j$ の通勤スタイル $b$ についてのユーザーコスト
$UC^r$	$r$ 駅から目的地間の列車 $j$ の通勤スタイル $b$ についての最小ユーザーコスト
$C_j^{r,b}$	$r$ 駅から目的地間の列車 $j$ の通勤スタイル $b$ についての混雑コスト
$V_j^{r,b}$	$r$ 駅から目的地間の列車 $j$ の通勤スタイル $b$ についてのスケジュールコスト
$n_j^{r,b}$	$r$ 駅から列車 $j$ に乗る通勤スタイル $b$ の通勤者数 (需要)
$\tau_i$	駅間 $i$ における移動時間
$k_j$	列車 $j$ の定員
$a^*$	希望到着時刻
$T_r$	$r$ 駅から目的地までの移動時間
$q^{r,b}$	$r$ 駅における通勤スタイル $b$ の総通勤者数 (総需要)
$\lambda^{r,b}$	ラグランジュ乗数
$TC(n_j^{r,b})$	通勤スタイル $b$ のネットワーク全体の総旅行費用
$n_j^{r,total}$	$n_j^{r,step}$ と $n_j^{r,slope}$ の和
$TC(n_j^{r,total})$	ネットワーク全体の総旅行費用
$MC_j^{r,b}$	通勤スタイル $b$ の社会的限界費用
$MEC_j^{r,b}$	通勤スタイル $b$ の限界外部費用

パラメータ	定義
$\beta$	$V_j^{r,step}$ の早着に関するパラメータ
$\gamma$	$V_j^{r,step}$ の遅着に関するパラメータ
$\beta_0, \beta_1$	$V_j^{r,slope}$ の自宅滞在限界効用に関するパラメータ
$\gamma_0, \gamma_1$	$V_j^{r,slope}$ の目的地滞在限界効用に関するパラメータ
$\theta$	混雑率指数 $CRI$ に関するパラメータ

Slope Model のユーザーコスト :

$$UC_j^{r,slope} = C_j^{r,slope} + V_j^{r,slope}$$

$$= \sum_{i=r}^R g_j \left( \sum_{m=1}^i n_j^{m,step} + \sum_{m=1}^i n_j^{m,slope} \right) \tau_i + V_j^{r,slope} \quad (11)$$

(3) 利用者均衡配分

マルチクラスユーザーを想定した利用者均衡では、通勤スタイル別に利用者均衡を仮定しているため、出発時刻選択に関する利用者均衡条件が通勤スタイル別にそれぞれ成立する。これは式(12)-(17)で表される。

Step Model の利用者均衡条件 :

$$\begin{cases} UC_j^{r,step} \geq UC^{r,step}, & \text{if } n_j^{r,step} = 0 \\ \text{step} \in B, & j \in Z^{r,step}, r \in O \\ UC_j^{r,step} = UC^{r,step}, & \text{if } n_j^{r,step} > 0 \\ \text{step} \in B, & j \in Z^{r,step}, r \in O \end{cases} \quad (12)$$

制約条件 (通勤者数に関する非負条件と保存則) :

$$n_j^{r,step} \geq 0, \quad \text{step} \in B, \quad \forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,step} \quad (13)$$

$$\sum_{j \in Z^{r,step}} n_j^{r,step} = q^{r,step}, \quad \text{step} \in B, \quad \forall r \in O \quad (14)$$

Slope Model の利用者均衡条件 :

$$\begin{cases} UC_j^{r,slope} \geq UC^{r,slope}, & \text{if } n_j^{r,slope} = 0 \\ \text{slope} \in B, & j \in Z^{r,slope}, r \in O \\ UC_j^{r,slope} = UC^{r,slope}, & \text{if } n_j^{r,slope} > 0 \\ \text{slope} \in B, & j \in Z^{r,slope}, r \in O \end{cases} \quad (15)$$

制約条件 (通勤者数に関する非負条件と保存則) :

$$n_j^{r,slope} \geq 0, \quad \text{slope} \in B, \quad \forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,slope} \quad (16)$$

$$\sum_{j \in Z^{r,slope}} n_j^{r,slope} = q^{r,slope}, \quad \text{slope} \in B, \quad \forall r \in O \quad (17)$$

式(12)-(17)を同時に満たす各駅各列車の通勤者数を連立不等式を解いて直接的に求めることは困難であるため、等価な数理最適化問題に置き換え、その問題を数値計算によって求める。式(12)-(17)で表される利用者均衡時の

通勤スタイル別各駅各列車の通勤者数  $n_j^{r,b}$  を求めることは、次の式 (18) - (20) で表される Beckmann 型<sup>14)</sup>の数理最適化問題の解を求めることと等価である。

$$\begin{aligned} \min z(\mathbf{n}) = & \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^J G_{ij} \left( \sum_{b \in B} \sum_{m=1}^i n_j^{m,b} \right) \\ & + \sum_{b \in B} \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R n_j^{r,b} V_j^{r,b} \end{aligned} \quad (18)$$

制約条件 (通勤者数に関する非負条件と保存則)

$$n_j^{r,b} \geq 0, \quad \forall b \in B, \quad \forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,b} \quad (19)$$

$$\sum_{j \in Z^b} n_j^{r,b} = q^{r,b}, \quad \forall b \in B, \quad \forall r \in O \quad (20)$$

ここで、

$$G_{ij} \left( \sum_{b \in B} \sum_{m=1}^i n_j^{m,b} \right) = \int_0^{\sum_{b \in B} \sum_{m=1}^i n_j^{m,b}} g_j(\omega) \tau_i d\omega \quad (21)$$

上記の制約条件付き非線形最適化問題 (式 (18) - (20)) の最適性条件である KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件を調べることで、等価な最適化問題の解が利用者均衡を満足することの詳細については付録 1 に示す。また、式 (18) - (20) で表される利用者均衡条件と等価な数理最適化問題の解の一意性の証明は付録 2 に示す。

#### (4) システム最適配分

通勤スタイル毎のネットワーク全体の総旅行費用は、式 (22) と式 (23) で表される。

Step Model 旅行者全体の総旅行費用：

$$\begin{aligned} TC(n_j^{r,step}) = & \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J n_j^{r,step} UC_j^{r,step} \\ = & \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J n_j^{r,step} \sum_{i=r}^R g_j \left( \sum_{m=1}^i n_j^{m,step} + \sum_{m=1}^i n_j^{m,slope} \right) \tau_i \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R n_j^{r,step} V_j^{r,step} \end{aligned} \quad (22)$$

Slope Model 旅行者全体の総旅行費用：

$$\begin{aligned} TC(n_j^{r,slope}) = & \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J n_j^{r,slope} UC_j^{r,slope} \\ = & \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J n_j^{r,slope} \sum_{i=r}^R g_j \left( \sum_{m=1}^i n_j^{m,step} + \sum_{m=1}^i n_j^{m,slope} \right) \tau_i \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R n_j^{r,slope} V_j^{r,slope} \end{aligned} \quad (23)$$

式 (22) と式 (23) より、ネットワーク全体の総旅行費用は、

$$\begin{aligned} TC(n_j^{r,total}) = & TC(n_j^{r,step}) + TC(n_j^{r,slope}) \\ = & \sum_{b \in B} \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J n_j^{r,b} \sum_{i=r}^R g_j \left( \sum_{b \in B} \sum_{m=1}^i n_j^{m,b} \right) \tau_i \\ & + \sum_{b \in B} \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R n_j^{r,b} V_j^{r,b} \end{aligned} \quad (24)$$

で与えられる。

以上より、システム最適配分を定式化すると、式 (25) で表される。

$$\begin{aligned} \min s(\mathbf{n}) = & \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^J H_{ij} \left( \sum_{b \in B} \sum_{m=1}^i n_j^{m,b} \right) \\ & + \sum_{b \in B} \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R n_j^{r,b} V_j^{r,b} \end{aligned} \quad (25)$$

ここで、

$$\begin{aligned} H_{ij} \left( \sum_{b \in B} \sum_{m=1}^i n_j^{m,b} \right) & = \int_0^{\sum_{b \in B} \sum_{m=1}^i n_j^{m,b}} \left( g_j(\omega) \tau_i + \omega \frac{\partial g_j(\omega) \tau_i}{\partial \omega} \right) d\omega \\ & = \left( \sum_{b \in B} \sum_{m=1}^i n_j^{m,b} \right) \sum_{i=r}^R g_j \left( \sum_{b \in B} \sum_{m=1}^i n_j^{m,b} \right) \tau_i \end{aligned} \quad (26)$$

式 (26) を式 (18) (目的関数の式) に代入することで、システム最適配分は式 (27) - (29) で表すこともできる。

$$\begin{aligned} \min s(\mathbf{n}) = & \sum_{b \in B} \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^J n_j^{i,b} \sum_{i=r}^R g_j \left( \sum_{b \in B} \sum_{m=1}^i n_j^{m,b} \right) \tau_i \\ & + \sum_{b \in B} \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R n_j^{r,b} V_j^{r,b} \end{aligned} \quad (27)$$

制約条件：

$$n_j^{r,b} \geq 0, \quad \forall b \in B, \quad \forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,b} \quad (28)$$

$$\sum_{j \in Z^b} n_j^{r,b} = q^{r,b}, \quad \forall b \in B, \quad \forall r \in O \quad (29)$$

#### (5) First-Best-Pricing の導出

First-Best-Pricing (最適課金) は、社会的限界費用と私的限界費用の差分に相当する額を混雑課金として設定することで導かれる<sup>15)</sup>。

社会的限界費用  $MC_j^{r,b}$  は、一人の乗客が加わることによる社会的費用の増加分 (ネットワーク全体の総旅行

費用  $TC(n_j^{r,total})$  の増加分) のことであり, ネットワーク全体の総旅行費用  $TC(n_j^{r,total})$  の微分で表される.

$$MC_j^{r,b} = \frac{\partial TC(n_j^{r,total})}{\partial n_j^{r,b}} = UC_j^{r,b} + \left( \sum_{b \in B} n_j^{r,b} \right) \frac{\partial UC_j^{r,b}}{\partial (\sum_{b \in B} n_j^{r,b})} \quad (30)$$

これより, 限界外部費用  $MEC_j^{r,b}$  は以下で表される.

$$MEC_j^{r,b} = MC_j^{r,b} - UC_j^{r,b} = \left( \sum_{b \in B} n_j^{r,b} \right) \frac{\partial UC_j^{r,b}}{\partial (\sum_{b \in B} n_j^{r,b})} \quad (31)$$

式 (31) より, 通勤スタイル別に限界外部費用  $MEC_j^{r,b}$  を記述すると, 式 (32) と式 (33) で表される.

Step Model の限界外部費用:

$$MEC_j^{r,step} = (n_j^{r,step} + n_j^{r,slope}) \frac{\partial UC_j^{r,step}}{\partial (n_j^{r,step} + n_j^{r,slope})} = 2 \sum_{i=r}^R g_j \left( \sum_{m=1}^i n_j^{m,step} + \sum_{m=1}^i n_j^{m,slope} \right) \tau_i \quad (32)$$

Slope Model の限界外部費用:

$$MEC_j^{r,slope} = (n_j^{r,step} + n_j^{r,slope}) \frac{\partial UC_j^{r,slope}}{\partial (n_j^{r,step} + n_j^{r,slope})} = 2 \sum_{i=r}^R g_j \left( \sum_{m=1}^i n_j^{m,step} + \sum_{m=1}^i n_j^{m,slope} \right) \tau_i \quad (33)$$

式 (32) と式 (33) より, Step Model と Slope Model の First-Best-Pricing は一致する. これらの社会的限界費用を混雑課金として乗客に課すことで, 乗客は自分が鉄道のネットワークに加わることによる社会的費用の増加分を負担する. そして混雑課金を課した状態での利用者均衡による配分結果は, システム最適配分の結果と一致する.

本研究では, 限界外部費用  $MEC_j^{r,b}$  を貨幣換算するため, 以下の Xie and Fukuda (2014)<sup>12)</sup> の手順に従う.

① 乗車券運賃の限界効用の算出:

混雑率指数  $CRI$  のパラメータ  $\theta$  を大都市交通センサス (首都圏) から推定された混雑率指数  $CRI$  の値  $175.82 \text{ Yen/hr} \cdot \%^2$  で割ることで, 乗車券運賃の限界効用を求める.

② 限界外部費用の貨幣換算:

限界外部費用  $MEC_j^{r,b}$  を①で求めた乗車券運賃の限界効用で割ることで, 限界外部費用  $MEC_j^{r,b}$  を円単位で表現し, それを混雑課金額 (円) とする.

## 4. 時間帯別課金シミュレーション

(1) はじめに

a) シナリオの概要

本研究で想定するポストコロナにおける変化は第 1 章での考察を基に以下の 3 項目とし, 各項目の想定に基づくシナリオ毎に時間帯別課金シミュレーションを行う.

- ・ シナリオ 1: 在宅勤務の増加
- ・ シナリオ 2: フレックスの増加
- ・ シナリオ 3: 混雑に対する抵抗感の増加

なお, シナリオ毎に複数のケースを設定し, 出力される到着時刻分布, 混雑率, 時間帯別課金分布を比較して, コロナ前からポストコロナへの変化を分析する.

b) 全シナリオに共通する前提条件

全シナリオに共通する分析条件を表-2に, パラメータ設定を表-3に示す. 表-2中の混雑率指数  $CRI$  および表-3中のパラメータの値は, Xie and Fukuda (2014)<sup>12)</sup> の推定結果を用いた.

時間帯別課金シミュレーションにおける最適化の数値計算には Python のオープンパッケージである SciPy と, 制約条件付き最適化問題を扱うアルゴリズムである Sequential Least Squares Programming (SLSQP) を用いた.

次節以降ではシナリオ毎に分析を行うが, ベースとなるコロナ前を想定したケースを以下のシナリオ 0 とする.

【シナリオ 0 の条件】

- ・ 各出発駅の総通勤者数  $q^{r,step} + q^{r,slope}$ : 10000
- ・ 各出発駅の総通勤者数のうち, Step Model に従う人数  $q^{r,step}$ : 7500 (全体の 75%)
- ・ 各出発駅の総通勤者数のうち, Slope Model に従う人数  $q^{r,slope}$ : 2500 (全体の 25%)

表-2 全シナリオに共通する分析条件

分析条件	
出発駅の数	6
列車の運行間隔	0.05 (3 分)
駅間の移動時間 $\tau_i$	0.1 (6 分)
列車の定員 $k_j$	1500
対象とする列車の運行時間帯	AM7:24-AM8:39 (合計 26 本)
希望到着時刻 $a^*$	AM9:00
混雑率指数 $CRI$	$175.82 \text{ Yen/hr} \cdot \%^2$

表-3 全シナリオに共通するパラメータの数値設定

スケジューリングパラメータ	Step Model	Slope Model
$\beta$ (/hr)	1.500	
$\gamma$ (/hr)	6.230	
$\gamma_0 - \beta_0$ (/hr)		-55.400
$\beta_1 - \gamma_1$ (/hr <sup>2</sup> )		-6.450
$\gamma_1$ (/hr <sup>2</sup> )		5.760
$\beta_0$ (/hr)		5.927

- 混雑率指数  $CRI$  のパラメータ  $\theta$  の値 : 0.4

→Xie and Fukuda (2014)<sup>12)</sup>の推定結果を用いた。

シナリオ 0 のシミュレーション結果として、**図-4**に課金前における利用者均衡配分 (UE) の到着時刻分布、**図-5**に課金後における利用者均衡配分 (本論文では UEpricing と表記) の到着時刻分布、**図-6**に課金後における各駅各列車の混雑率を示す。到着時刻分布は列車毎のユーザーコスト (User Cost) も示す。到着時刻分布は、Tian et al. (2007)<sup>11)</sup>で示された Step Model の結果と Xie and Fukuda (2014)<sup>12)</sup>で示された Slope Model の結果を混合したような形状になっており、UE (図-4) と UEpricing (図-5) とともに、Step Model 通勤者と Slope Model 通勤者として選択する列車が明確に分かれていることも確認できる。これは、Xiao et al. (2017)<sup>10)</sup>の分析と同様の結果である。User Cost に着目すると、Step Model 通勤者が選択する列車の User Cost、Slope Model 通勤者が選択する列車の User Cost はそれぞれ一定であり、利用者均衡条件が成立していることが確認される。

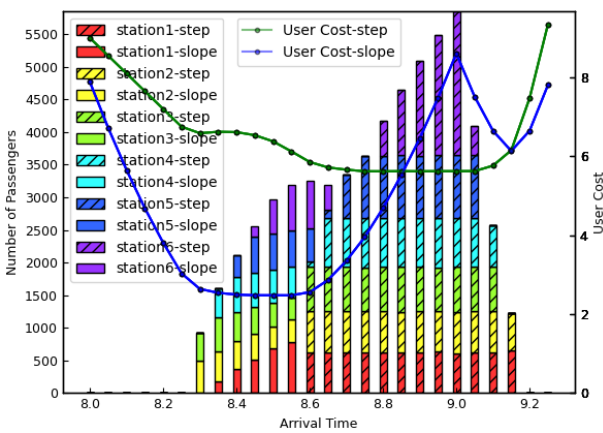


図-4 シナリオ 0 : 課金前における利用者均衡配分 (UE) の到着時刻分布

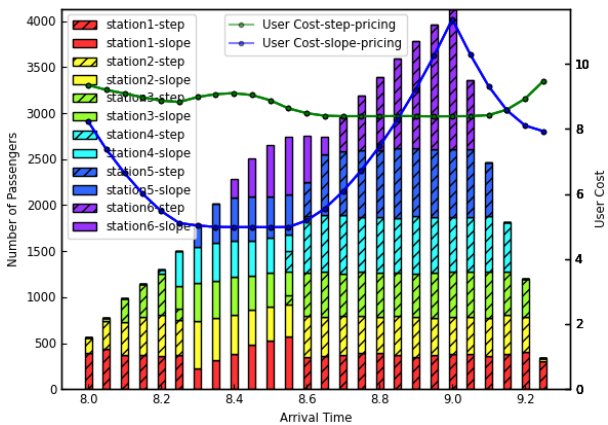


図-5 シナリオ 0 : 課金後における利用者均衡配分 (UEpricing) の到着時刻分布

**図-7** に通勤スタイル別の時間帯別課金分布を示す。Xie and Fukuda (2014)<sup>12)</sup>より、Step Model の課金分布は課金額の最大値が他の列車に比べて特に大きく、Slope Model の課金分布は課金額の変動が緩やかで対照的な分布形状であった。それらを混合したマルチクラス交通均衡配分による課金分布 (**図-7**) では、希望到着時刻付近に到着する列車では Step Model の特徴が見られ、目的地に早い時刻に到着する列車では Slope Model の特徴が見られた。また、Step Model と Slope Model の通勤者の両方が乗る列車では課金額が一時的に小さくなることも確認した。

(2) シナリオ 1 : 在宅勤務が増加する場合

シナリオ 1 では、在宅勤務が増加する場合を考える。これを鉄道を利用する通勤者数 (需要)  $q^{r,b}$  が減少することによって表現する。シナリオ 1 の比較条件として、

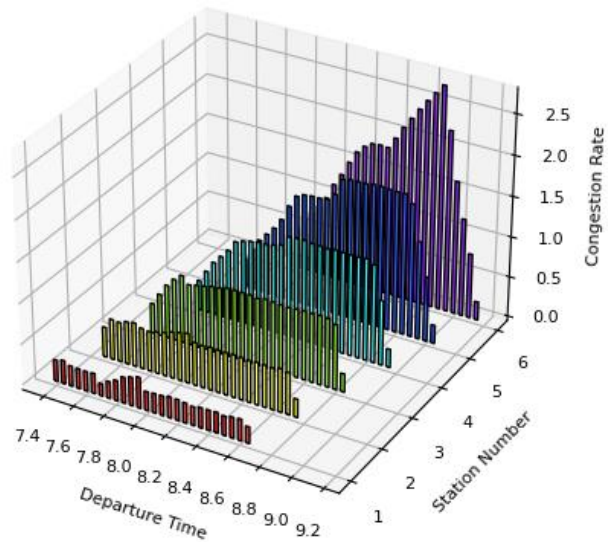


図-6 シナリオ 0 : 課金後における各駅各列車の混雑率

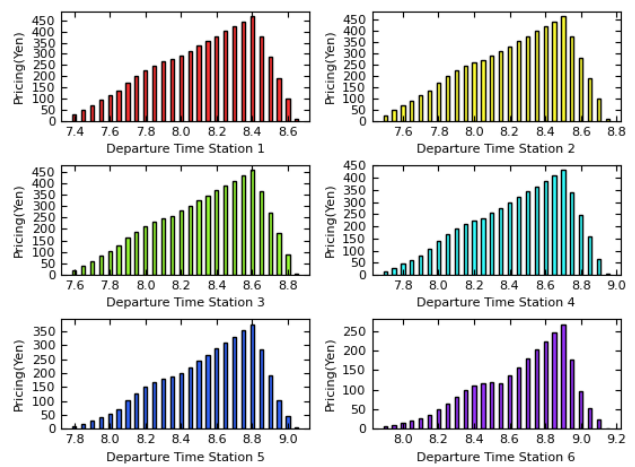


図-7 シナリオ 0 : 通勤スタイル別の時間帯別課金分布  
※Step Model と Slope Model のそれぞれがこの分布となる

表-4 シナリオ1の分析ケース

ケース	実社会の変化	各出発駅の総通勤者数 (総需要) $q^{r,step} + q^{r,slope}$
シナリオ0	コロナ前	10000
1-2	ポストコロナの想定： ・需要が全駅でコロナ前から 20%減少	8000
1-3	ポストコロナの想定： ・郊外寄りの3駅の需要は30%減少 ・都心寄りの3駅の需要は10%減少	Station1-3 (郊外寄り) : 7000 Station4-6 (都心寄り) : 9000

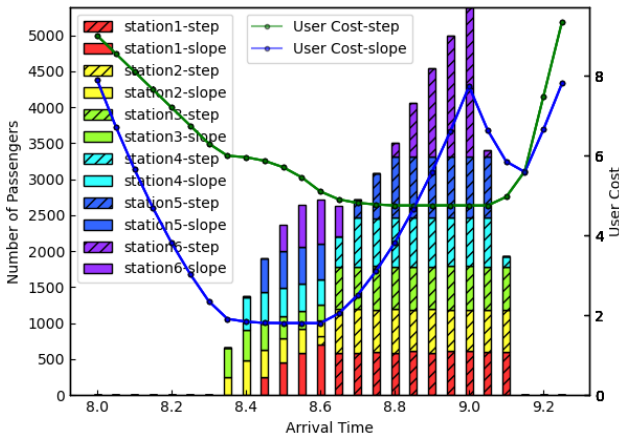


図-8 ケース 1-2：課金前における利用者均衡配分 (UE) の到着時刻分布

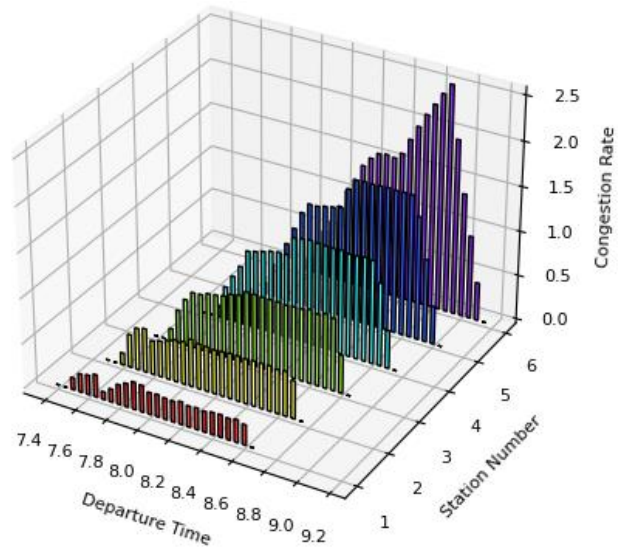


図-10 ケース 1-2：課金後における各駅各列車の混雑率

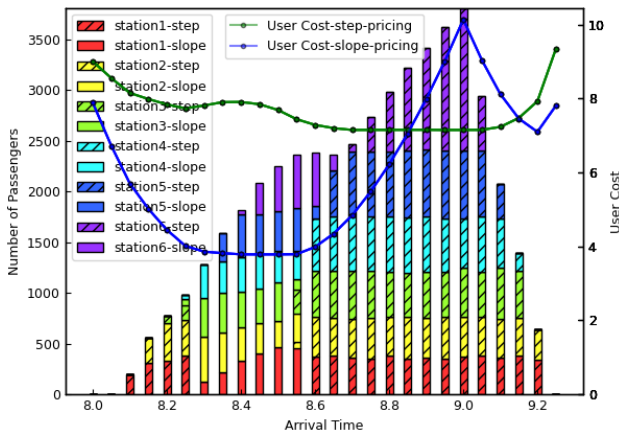


図-9 ケース 1-2：課金後における利用者均衡配分 (UEpricing) の到着時刻分布

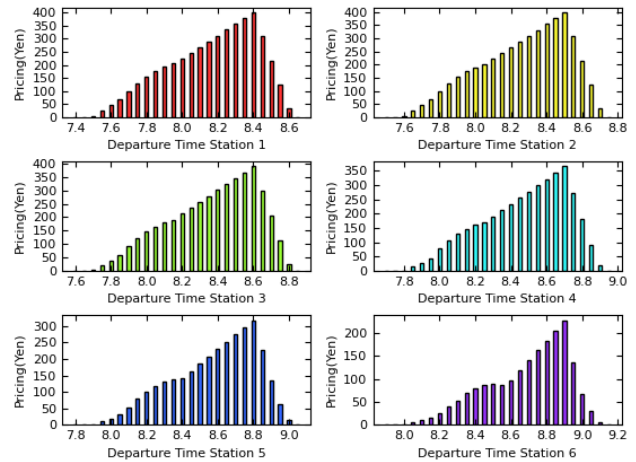


図-11 ケース 1-2：通勤スタイル別の時間帯別課金分布  
※Step Model と Slope Model のそれぞれがこの分布となる

実社会の変化を考慮したケースを表-4のように設定する。ケース 1-2 の設定は在宅勤務の調査結果に基づく<sup>1)</sup>。ケース 1-3 の設定はテレワーク人口実態調査<sup>17)</sup>の結果に基づく。ケース間での比較を簡単にするために、全ケースにおいて Step Model (出勤時間が決まっている通勤者) と Slope Model (フレックスの通勤者) の割合を 75%:25% で統一する。また、混雑率指数  $CRI$  のパラメータ  $\theta$  の値は、全ケースにおいて 0.4 とする。

シナリオ 1 では、ケース 1-2 の結果のみを示す。図-8 に課金前における利用者均衡配分 (UE) の到着時刻分布、図-9 に課金後における利用者均衡配分 (UEpricing) の到着時刻分布、図-10 に課金後における各駅各列車の混雑率、図-11 に通勤スタイル別の時間帯別課金分布を示す。ま

表-5 シナリオ1：課金分の総料金収入

配分モデル	比較項目	ケース		
		シナリオ0	1-2	1-3
UE	総料金収入(Yen)	17,612,869	11,821,188	11,465,630
	コロナ前(シナリオ0)の総料金収入を100%とした場合の百分率(%)	100	67.1	65.1
SO	総料金収入(Yen)	14,877,389	10,015,573	9,771,036
	コロナ前(シナリオ0)の総料金収入を100%とした場合の百分率(%)	100	67.3	65.7

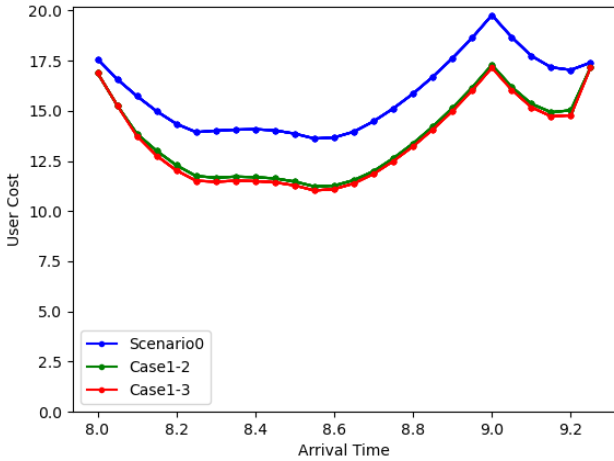


図-12 シナリオ1：課金後における利用者均衡配分(UEpricing)でのユーザーコスト

た、到着時刻分布には列車毎のユーザーコスト (User Cost)も通勤スタイル別に示す。シナリオ0と同様、通勤スタイル毎に選択する列車に明確な違いが見られた。UEとUEpricingともに、シナリオ0よりもケース1-2の方が選択される列車の数が少ないが、課金額は各駅で50円程度安い。したがって、在宅勤務の増加に伴う需要の減少により、通勤者が選択する列車の幅は狭まり、通勤者の課金による負担も小さくなると考えられる。

次に、評価指標に基づいてケース間での比較を行い、在宅勤務が増加する場合に起こり得る変化を考える。到着時刻分布の分析には課金後における利用者均衡配分(UEpricing)での各列車のユーザーコストを評価指標とし、DP導入に伴うコストの変化に着目する。時間帯別課金分布の分析には課金分の総料金収入を評価指標とし、DP導入に伴う鉄道事業者の追加収入に着目する。課金分の総料金収入は、通勤スタイル別に各駅各列車の通勤者数と各駅各列車の課金額を乗じ、それらの和によって算出する。

図-12にケース毎の課金後における利用者均衡配分(UEpricing)でのユーザーコストを示す。スケジュールコストは各列車の乗客数によらないため、各グラフの差は混雑コストの差を表している。したがって、在宅勤務が増加することで全列車において混雑コストが減少したと

いえる。

表-5にケース毎の課金分の総料金収入を示す。UEとSOともに、コロナ前を表すシナリオ0の方がポストコロナを表すケース1-2、ケース1-3に比べて総料金収入がUEでは600万円、SOでは500万円ほど大きい。コロナ前は在宅勤務の割合が低く、ポストコロナに比べて総通勤者数(総需要)が多いことから混雑も悪化する。時間帯別課金額は式(32)と式(33)より混雑率に依存するため、コロナ前の方が総料金収入は大きいと考えられる。また、ケース1-3の方がケース1-2に比べて百分率が2%ほど小さい。時間帯別課金額は式(32)と式(33)より各駅間の移動時間 $\tau_i$ の和に依存するため、郊外駅の総通勤者数(総需要)がケース1-2よりも少ないケース1-3の方が総料金収入は小さくなると考えられる。このことから、郊外における在宅勤務が増加するほど、課金収入が小さくなっていると考えられる。

(3) シナリオ2：フレックス通勤者が増加する場合

シナリオ2では、フレックス通勤者が増加する場合を考え、Slope Modelに従う通勤者の割合が増加することでそれを表す。シナリオ2の比較条件として、実社会の変化を考慮したケースを表-6のように設定する。シナリオ0、ケース2-2の設定は、時差通勤に関する調査結果に基づく。ケース2-3の設定は、極端にフレックス通勤者が増加する状況として、シナリオ0と通勤スタイル毎の総通勤者数(総需要)の割合が正反対になるように定める。ケース間での比較を簡単にするために、全ケースにおいて $q^{r,step}$ と $q^{r,slope}$ の合計を10000とする。混雑率指数CRIのパラメータ $\theta$ の値は全ケースで0.4とする。

シナリオ2では、ケース2-2の結果のみを示す。図-13に課金前における利用者均衡配分(UE)の到着時刻分布、図-14に課金後における利用者均衡配分(UEpricing)の到着時刻分布、図-15に課金後における各駅各列車の混雑率、図-16に通勤スタイル別の時間帯別課金分布を示す。また、到着時刻分布には列車毎のユーザーコスト (User Cost)も通勤スタイル別に示す。シナリオ0と同様、通勤スタイル毎に選択する列車に明確な違いが見られた。シナリオ0とケース2-2で選択される列車の数は同じだが、フレックス通勤者が増加したことで目的地に早い時刻に

表-6 シナリオ2の分析ケース

ケース	実社会の変化	各出発駅の $q^{r,step}$ と $q^{r,slope}$ の人数
シナリオ 0	コロナ前： 全駅で、 出社時間が決まっている通勤者：フレックス通勤者=Step:Slope=75%:25%	Step:Slope=7500:2500
2-2	ポストコロナの想定： フレックス通勤者が全駅で 11%増加する →全駅で、 出社時間が決まっている通勤者：フレックス通勤者=Step:Slope=64%:36%	Step:Slope=6400:3600
2-3	ポストコロナの想定： フレックス通勤者が全駅で 50%増加する →全駅で、 出社時間が決まっている通勤者：フレックス通勤者=Step:Slope=25%:75%	Step:Slope=2500:7500

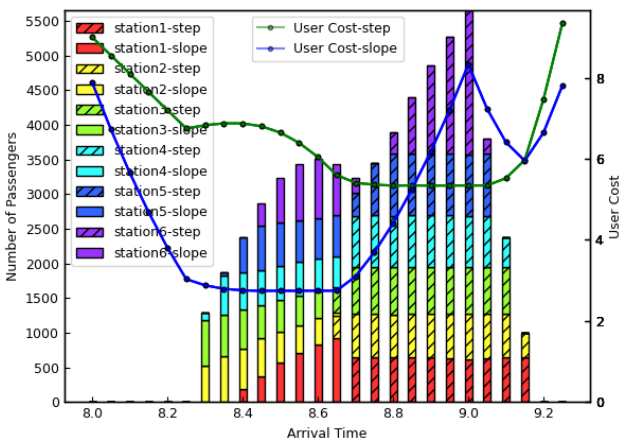


図-13 ケース 2-2：課金前における利用者均衡配分 (UE) の到着時刻分布

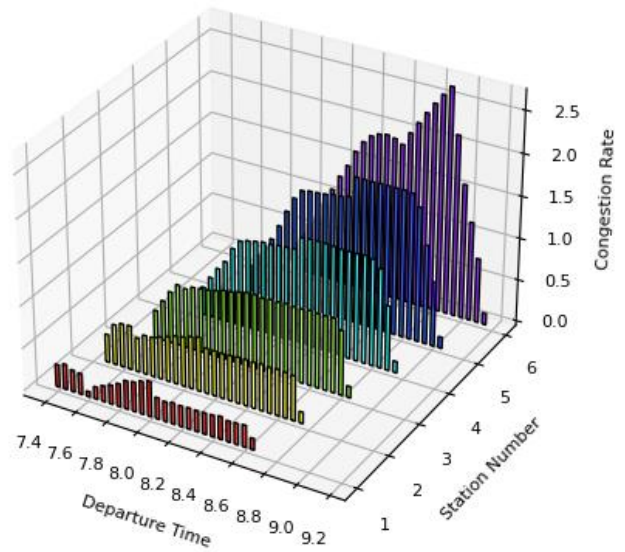


図-15 ケース 2-2：課金後における各駅各列車の混雑率

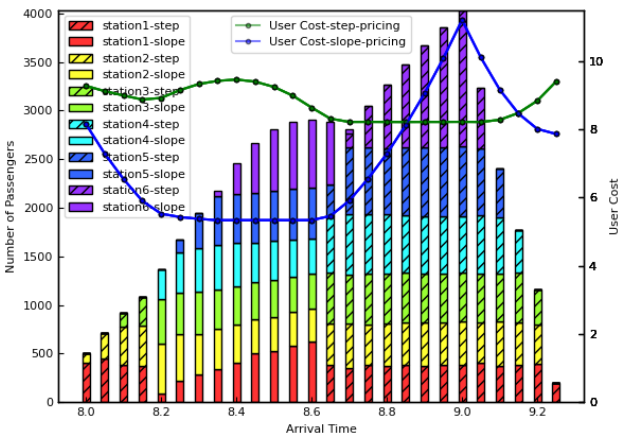


図-14 ケース 2-2：課金後における利用者均衡配分 (UEpricing) の到着時刻分布

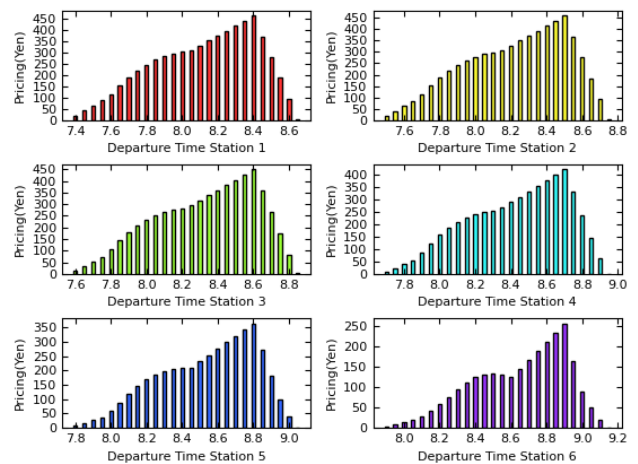


図-16 ケース 2-2：通勤スタイル別の時間帯別課金分布 ※Step Model と Slope Model のそれぞれがこの分布となる

到着する列車の乗客数が増加し、1列車あたりの最大乗客数が UE では 200 人程度、UEpricing では 100 人程度減少した。課金額が各駅で 10 円程度安いのはこの影響であると考えられる。

表-7 シナリオ 2：課金分の総料金収入

配分モデル	比較項目	ケース		
		シナリオ 0	2-2	2-3
UE	総料金収入(Yen)	17,612,869	17,309,534	16,356,412
	コロナ前 (シナリオ 0) の総料金収入を 100%とした場合の百分率(%)	100	98.3	92.9
SO	総料金収入(Yen)	14,877,389	14,813,063	14,472,778
	コロナ前 (シナリオ 0) の総料金収入を 100%とした場合の百分率(%)	100	99.6	97.3

表-8 シナリオ 3 の分析ケース

ケース	実社会の変化	混雑率指数 $CRI$ のパラメータ $\theta$ (/hr・%) <sup>2</sup>
シナリオ 0	コロナ前	0.4
3-2	ポストコロナの想定： 混雑に対する抵抗感がコロナ前から 13%増加する	0.45
3-3	ポストコロナの想定： 混雑に対する抵抗感がコロナ前から 2倍に増加する	0.8

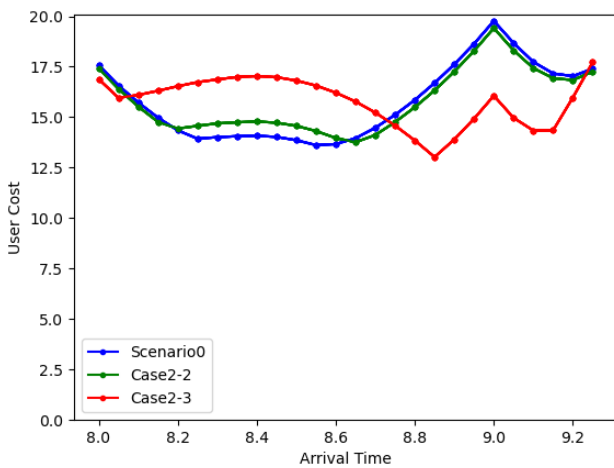


図-17 シナリオ 2：課金後における利用者均衡配分 (UEpricing) でのユーザーコスト

次に、評価指標に基づいてケース間での比較を行い、フレックス通勤者が増加する場合に起こり得る変化を考える。

図-17 にケース毎の課金後における利用者均衡配分 (UEpricing) でのユーザーコストを示す。フレックス通勤者の割合が増加するほど目的地に早い時刻に到着する列車のユーザーコストは増加し、希望到着時刻付近に到着する列車のユーザーコストは減少している。したがって、通勤者の出発時刻選択行動の変化を視覚的に捉えられる。

表-7 にケース毎の課金分の総料金収入を示す。UE と SO とともに、コロナ前を表すシナリオ 0 の方がポストコロナを表すケース 2-2、ケース 2-3 に比べて総料金収入が UE では 30~100 万円、SO では 6~40 万円ほど大きい。また、ケース 2-3 の方がケース 2-2 に比べて百分率が UE で

は 6%、SO では 2%ほど小さい。フレックス通勤者が増加することで各列車の混雑率の平準化が起こり、それに伴い混雑率に依存する時間帯別課金額が減少する。したがって、フレックス通勤者が増加することで総料金収入が小さくなると考えられる。ケース 2-3 では極端な例としてフレックス通勤者が大幅に増加する場合を考慮したものの、コロナ前に比べて大幅に総料金収入が小さくなることはなかった。これは、在宅勤務のように通勤者数 (需要) そのものが減少するわけではないためであると考えられる。

(4) シナリオ 3：混雑に対する抵抗感が増加する場合

シナリオ 3 では、混雑に対する抵抗感が増加する場合を考え、混雑率指数  $CRI$  のパラメータ  $\theta$  の値が増加することによって表現する。比較条件として、実社会の変化を考慮したケースを表-8 のように設定する。ケース 3-2 の設定は、鉄道混雑に関するアンケート結果に基づく<sup>2)</sup>。ケース 3-3 の設定は、シナリオ 0 と比較がしやすいように  $\theta$  の値を 2 倍の 0.8 にした。ケース間での比較を簡単にするために、全ケースにおいて各出発駅の総通勤者数 (総需要)  $q^{r,step}$  を 7500、 $q^{r,slope}$  を 2500 とする。

シナリオ 3 では、ケース 3-3 の結果のみを示す。図-18 に課金前における利用者均衡配分 (UE) の到着時刻分布、図-19 に課金後における利用者均衡配分 (UEpricing) の到着時刻分布、図-20 に課金後における各駅各列車の混雑率、図-21 に通勤スタイル別の時間帯別課金分布を示す。また、到着時刻分布には列車毎のユーザーコスト (User Cost) も通勤スタイル別に示す。シナリオ 0 と同様、通勤スタイル毎に選択する列車に明確な違いが見られた。シナリオ 0 よりもケース 3-3 の方が選択される列車が多い

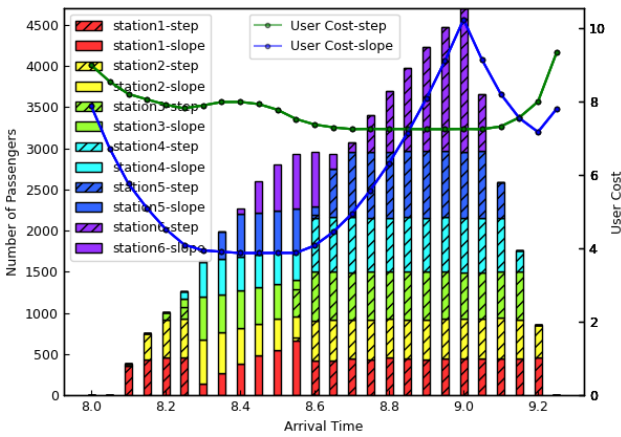


図-18 ケース 3-3：課金前における利用者均衡配分(UE)の到着時刻分布

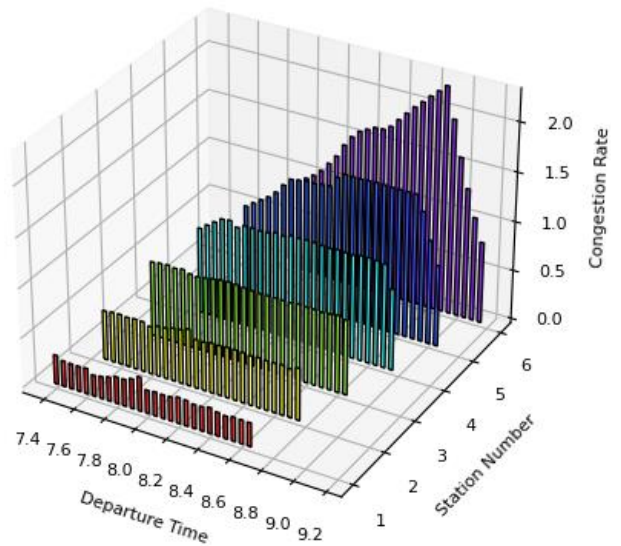


図-20 ケース 3-3：課金後における各駅各列車の混雑率

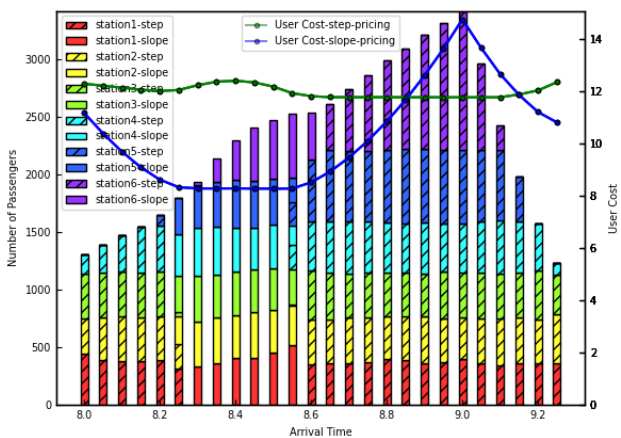


図-19 ケース 3-3：課金後における利用者均衡配分(UEpricing)の到着時刻分布

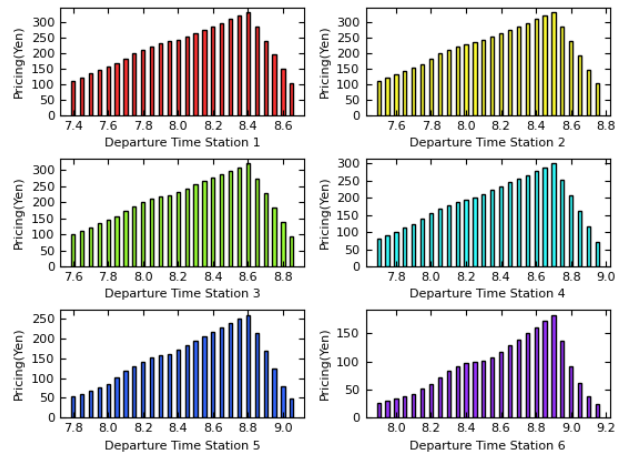


図-21 ケース 3-3：通勤スタイル別の時間帯別課金分布 ※Step Model と Slope Model のそれぞれがこの分布となる

ことから、通勤者は混雑を避けるために大幅な早着や遅着になり得る列車も積極的に選択していることがわかる。次に、評価指標に基づいてケース間での比較を行い、混雑に対する抵抗感が増加する場合に起こり得る変化を考える。

図-22 にケース毎の課金後における利用者均衡配分(UEpricing)でのユーザーコストを示す。シナリオ 3 では混雑率指数  $CRI$  のパラメータ  $\theta$  の値を変化させることで直接的に混雑コストを変化させている。ケース 3-2、ケース 3-3 ではシナリオ 0 よりも混雑コストが大きくなるため、混雑が平準化されているにもかかわらずユーザーコストが大きく表れると考えられる。

表-9 にケース毎の課金分の総料金収入を示す。UE と SO とともに、コロナ前を表すシナリオ 0 の方がポストコロナを表すケース 3-2、ケース 3-3 に比べて総料金収入が UE では 110-470 万円、SO では 90-330 万円ほど大きい。また、ケース 3-3 の方がケース 3-2 に比べて百分率が UE では 20%、SO では 15%ほど小さい。時間帯別課金額は

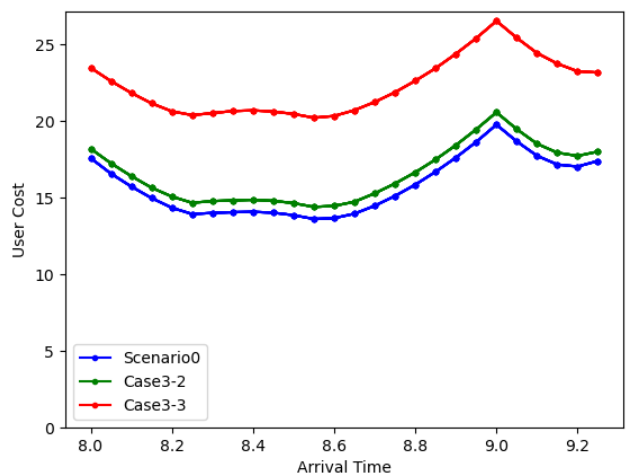


図-22 シナリオ 3：課金後における利用者均衡配分(UEpricing)でのユーザーコスト

表-9 シナリオ3：課金分の総料金収入

配分モデル	比較項目	ケース		
		シナリオ 0	3-2	3-3
UE	総料金収入(Yen)	17,612,869	16,490,330	12,918,344
	コロナ前 (シナリオ 0) の総料金収入を 100%とした場合の百分率(%)	100	93.6	73.3
SO	総料金収入(Yen)	14,877,389	13,960,067	11,623,287
	コロナ前 (シナリオ 0) の総料金収入を 100%とした場合の百分率(%)	100	93.8	78.1

式 (32) と式 (33) より混雑率に依存するため、混雑に対する抵抗感が増加することで混雑を回避し、混雑率が低下することから、 $\theta$  の値が大きいケース 3-3 の方が総料金収入は小さくなると考えられる。つまり、混雑に対する抵抗感が増加することは混雑課金（時間帯別課金）の文字通り、総料金収入が小さくなることを意味する。

(5) 実路線への適用

前節までは、出発駅が 6 駅・目的地駅が 1 駅（多対一）の単一方向路線においてシナリオ毎に分析を行ったが、本節では、構築したモデルを実路線へ適用することを試みる。モデルの枠組みを活かすために、多対一の状況を当てはめやすい路線として西武新宿線を対象とする。西武新宿線は相互直通運転をしておらず、朝ラッシュ時間帯の上り列車ではほとんどの乗客が高田馬場・西武新宿で降りるような首都圏鉄道路線である。

実路線とモデルの対応関係は以下の通りである。

- ・ 分析対象路線：西武新宿線
- ・ 分析対象区間：小平～西武新宿
  - 出発駅（郊外～都心）：小平～下落合（17 駅）
  - 目的地駅：高田馬場と西武新宿を 1 駅として仮定
- ・ 各出発駅の総通勤者数（総需要）：
  - 2015年の大都市交通センサスデータの鉄道OD調査（定期券）を用い、乗車駅コードが出発駅、降車駅コードが目的地駅（高田馬場または西武新宿）となる乗客を抽出

- 始発から AM9:59 の間に降車駅に到着する乗客を抽出
- 対象区間のうち最も郊外の小平駅以降からの乗客は、すべて小平駅の総需要と仮定
- ・ パラメータの数値は表-3 に従う
- ・ 列車の運行間隔、駅間の移動時間、定員は時刻表を基に設定

モデルを実路線へ適用するために、上記の対応関係と表-10 に示した分析条件に従う。実社会の変化を考慮したケースを表-11 のように設定し、比較する。ケース 4-2 の設定は、ポストコロナの状況がコロナ前に比べて最も大きく変化する場合を想定している。各ケースにおける各出発駅の通勤者数（需要）は表-12 に示す。

実路線への適用では、ケース 4-2 の結果のみを示す。

図-23 に課金前における利用者均衡配分 (UE) の到着時刻分布、図-24 に課金後における利用者均衡配分 (UEpricing) の到着時刻分布、図-25 に通勤スタイル別の時間帯別課金分布を示す。また、到着時刻分布には列車毎のユーザ

表-10 実路線への適用における分析条件

分析条件	
出発駅の数	17
列車の運行間隔	0.05 (3 分)
駅間の移動時間 $\tau_i$	0.05 (3 分)
列車の定員 $k_j$	1500
対象とする列車の運行時間帯	AM7:00~AM8:30 (合計 32 本)
希望到着時刻 $a^*$	AM9:00
混雑率指数 $CRI$	175.82 Yen/hr · % <sup>2</sup>

表-11 実路線への適用における分析ケース

ケース	実社会の変化
シナリオ 0	コロナ前： ・ Step Model と Slope Model の割合を 75%:25%とする ・ 混雑率指数 $CRI$ のパラメータ $\theta$ の値を 0.4 とする
	ポストコロナの想定： ・ 在宅勤務が増加し、全駅の需要がコロナ前から 20%減少する →土木計画学委員会が実施した在宅勤務の割合に関するアンケート結果 <sup>1)</sup> より（コロナ終息後） ・ フレックス通勤者が 11%増加し、Step Model と Slope Model の割合が 64%:36%となる →土木計画学委員会が実施した時差通勤の割合に関するアンケート結果 <sup>1)</sup> より（コロナ終息後） ・ 混雑に対する嫌悪感がコロナ前から 13%増加する（混雑率指数 $CRI$ のパラメータ $\theta$ の値を 0.45 とする） →国土交通省が実施した混雑回避の意識の変化に関するアンケート結果 <sup>2)</sup> より
4-2	

表-12 各出発駅の通勤者数 (需要)

駅名	駅番号	シナリオ 0		ケース 4-2	
		Step	Slope	Step	Slope
下落合	Station 17 (都心寄り)	1425	475	973	547
中井	Station 16	600	200	410	230
新井薬師前	Station 15	1875	625	1280	720
沼袋	Station 14	2325	775	1587	893
野方	Station 13	2400	800	1638	922
都立家政	Station 12	2175	725	1485	835
鷺ノ宮	Station 11	3975	1325	2714	1526
下井草	Station 10	2850	950	1946	1094
井荻	Station 9	2550	850	1741	979
上井草	Station 8	1800	600	1229	691
上石神井	Station 7	5025	1675	3430	1930
武蔵関	Station 6	3900	1300	2662	1498
東伏見	Station 5	2550	850	1741	979
西武柳沢	Station 4	2550	850	1741	979
田無	Station 3	6600	2200	4506	2534
花小金井	Station 2	6000	2000	4096	2304
小平	Station 1 (郊外寄り)	25500	8500	17408	9792

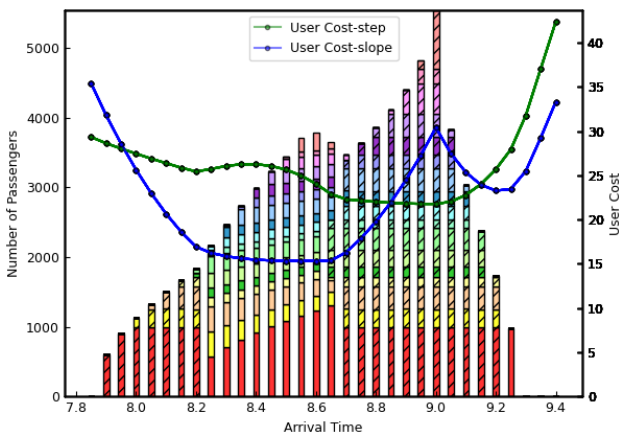


図-23 ケース 4-2：課金前における利用者均衡配分(UE)の到着時刻分布

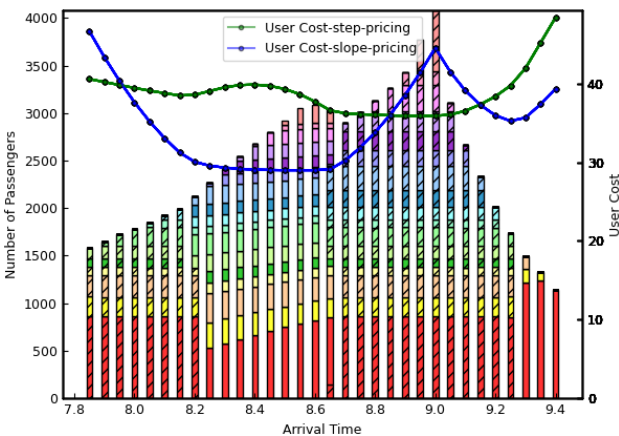


図-24 ケース 4-2：課金後における利用者均衡配分(UEpricing)の到着時刻分布

ーコスト (User Cost) も通勤スタイル別に示す。これらの図より、駅数や各駅の需要が増加した場合でも前節までのシナリオ分析と同様に通勤スタイル毎に選択する列車に明確な違いが見られた。ただし、Step Model 通勤者が多い時刻と Slope Model 通勤者が多い時刻が繰り返し交互に発生することはシナリオ分析では確認できなかった新しい現象である。

次に、評価指標に基づいてケース間での比較を行い、需要構造の変化が実路線に与える影響を考える。

図-26 にケース毎の課金後における利用者均衡配分 (UEpricing) でのユーザーコストを示す。ケース 4-2 もシナリオ 3 と同様、混雑率指数  $CRI$  のパラメータ  $\theta$  の値を変化させることで直接的に混雑コストを変化させている。そのためケース 4-2 ではシナリオ 0 よりも混雑コストが大きくなるため、混雑が平準化されているにもかかわらずユーザーコストが大きく表れると考えられる。

表-13 にケース毎の課金分の総料金収入を示す。UE と SO とともに、コロナ前を表すシナリオ 0 の方がポストコロナを表すケース 4-2 に比べて総料金収入が UE では 320 万円、SO では 310 万円ほど大きい。通勤者の出発時刻選択行動に大きな変化が起こる場合には、鉄道事業者は DP を導入しても追加の収入はコロナ前に導入した場合の約半分になることから、運賃収入減少の補填として DP を導入したとしても鉄道事業者の収入減少は避けられないと考えられる。

## 5. 結論と今後の課題

### (1) 結論

表-13 実路線への適用：課金分の総料金収入

配分モデル	比較項目	ケース	シナリオ 0	4-2
UE	総料金収入(Yen)		71,047,362	39,410,344
	コロナ前 (シナリオ 0) の総料金収入を 100%とした場合の百分率(%)		100	55.5
SO	総料金収入(Yen)		66,525,361	35,625,315
	コロナ前 (シナリオ 0) の総料金収入を 100%とした場合の百分率(%)		100	53.6

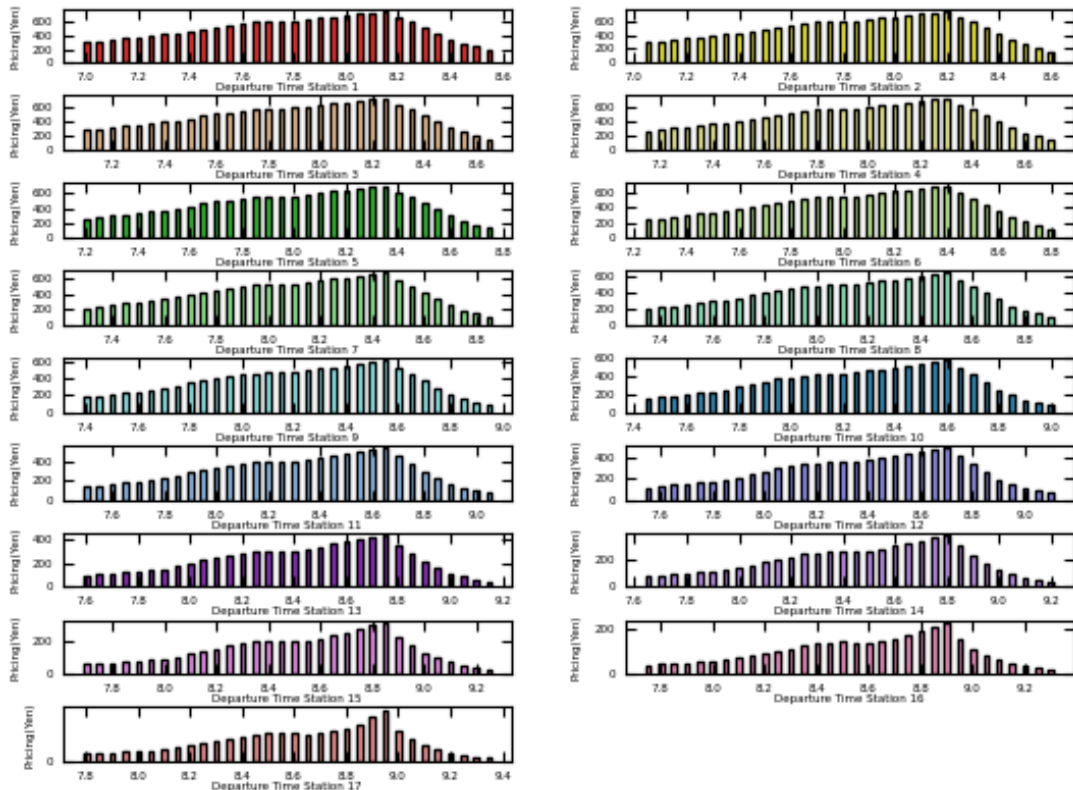


図-25 ケース 4-2：通勤スタイル別の時間帯別課金分布  
※Step Model と Slope Model のそれぞれがこの分布となる

本研究では、COVID-19の流行に伴う需要構造の変化を念頭に置いた都市鉄道の DP の検討を目的とし、都市鉄道通勤者の通勤スタイルに合わせた出発時刻選択モデルとマルチクラス交通均衡配分モデルによるシミュレーションシステムを構築した。

構築したモデルを用いてポストコロナの都市鉄道通勤者において想定され得る変化を考慮した時間帯別課金シミュレーションを行い、到着時刻分布と時間帯別課金分布を出力した。その結果、需要構造の変化に応じて通勤者が選択する列車に変化が見られ、時間帯別課金額も変動することが確認された。具体的に以下の結果が示された。

- 在宅勤務が増加する場合 (シナリオ 1) には、各列車の混雑率の平準化が促進され、鉄道事業者の混雑課金分の総料金収入は減少する。そうした中で混雑の平準化を目指す場合には、沿線一体で在宅

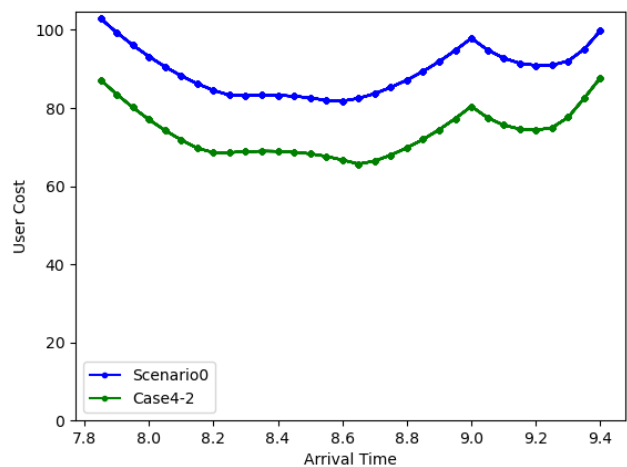


図-26 実路線への適用：課金後における利用者均衡配分 (UEpricing) でのユーザーコスト

勤務の実施率を上げる方が郊外だけで実施率を上げるよりも効果的である。また、鉄道事業者の総料金収入は、在宅勤務が増加するほど減少する。

- フレックス通勤者が増加する場合（シナリオ 2）には、各列車の混雑率の平準化が促進され、鉄道事業者の混雑課金分の総料金収入は減少する。ただし、通勤者数そのものが減少するわけではないため、大規模に混雑の平準化を目指すことは必ずしもできない。
- 混雑に対する抵抗感が増加する場合（シナリオ 3）には、文字通り混雑を回避する傾向が高まるため、混雑率の平準化が促進され、鉄道事業者の混雑課金分の総料金収入も減少する。

こうしたシナリオ毎の基本特性分析に加えて、構築したモデルの実路線への適用を考えるため、本研究ではさらに西武新宿線の一部区間を具体的に想定して到着時刻分布と時間帯別課金分布のシミュレーションを行った。結果は基本特性分析の場合と同様になり、実際の規模でも分析が可能であることを示すことができた。

## (2) 今後の課題

今後の課題として以下の 3 点を挙げる。

1 点目は、本研究のモデル構築で設定した分析対象路線が現実の状況を再現しきれていないことである。本研究で構築したモデルは、複数の郊外駅から単一の都心駅に向かう多対一の単一方向路線 (Many to One Railway Line) を想定しているが、実際の都市鉄道においてこのような路線は少ない。一般的には、複数の出発駅から複数の都心駅 (目的地駅) に向かうため、多対多の鉄道路線 (Many to Many Railway Line) がより現実的なネットワーク設定である。そうした、多対多の鉄道路線を想定したモデルへの拡張が必要であると考えられる。

2 点目は、時間帯別課金シミュレーションにおけるスケジュールコストのパラメータに COVID-19 流行前のデータからの推定値を用いたことである。本研究で用いたスケジュールコストのパラメータは、Xie and Fukuda (2014)<sup>12</sup>で推定されたものである。この推定結果は 2010 年の大都市交通センサスを基にしているため、COVID-19 流行前のデータを用いている。そのため、コロナ禍での通勤者の行動を把握できるデータ (例えば、2021 年秋から冬に実施された最新の大都市交通センサスのデータ等) を効果的に用いることで、より現実的妥当性の高い分析が行えると考えられる。

3 点目は、本研究で導出した時間帯別課金額 (First-Best-Pricing) を実際に鉄道会社が通勤者に課すことは難しいことである。FBP は各通勤スタイル・各通勤者の出発駅と選択した列車 (出発時刻) に応じて決定されるため、通勤者一人一人に別々の運賃を課すことになる。この運

賃体系で課金額を徴収するためには少なくとも複雑なシステムを導入する必要があり、現実的ではない。そのため、課金額を駅や時間帯で同一に設定するような、より現実的に課金額を設定するような次善課金 (Second-Best-Pricing) の理論に基づいた時間帯別課金の検討<sup>18</sup>が必要であると考えられる。

## 付録 I. 利用者均衡条件と数理最適化問題の等価性の証明

制約条件付き非線形最適化問題 (式 (18)-(20)) の最適性条件である KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件を調べることによって、等価な最適化問題の解が利用者均衡を満足することを以下に示す。

制約条件付き非線形最適化問題 (式 (18)-(20)) を式 (I.1) で表されるラグランジュ関数として再定義することによって、非負制約式以外に制約条件を持たない

$n_j^{m,step}, n_j^{m,slope}$  に関する最適化問題に置き換える。

$$L(\mathbf{n}, \boldsymbol{\lambda}) = Z(\mathbf{n}) + \sum_{r=1}^R \lambda^{r,step} \left( q^{r,step} - \sum_{j=1}^J n_j^{r,step} \right) + \sum_{r=1}^R \lambda^{r,slope} \left( q^{r,slope} - \sum_{j=1}^J n_j^{r,slope} \right) \quad (I.1)$$

$$n_j^{r,step} \geq 0, \quad \forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,step} \quad (I.2)$$

$$n_j^{r,slope} \geq 0, \quad \forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,slope} \quad (I.3)$$

ラグランジュ関数  $L(\mathbf{n}, \boldsymbol{\lambda})$  (式 (I.1)) の一次の最適性条件は KKT 条件より、式 (I.4)-(I.6) になる。

$$n_j^{r,b} \frac{\partial L(\mathbf{n}, \boldsymbol{\lambda})}{\partial n_j^{r,b}} = 0, \quad n_j^{r,b} \geq 0, \quad \forall b, \quad \forall r, \quad \forall j \quad (I.4)$$

式 (I.4) は、式 (I.4a) と式 (I.4b) で表される。

$$n_j^{r,step} \frac{\partial L}{\partial n_j^{r,step}} = 0, \quad n_j^{r,step} \geq 0, \quad \forall r, \quad \forall j \quad (I.4a)$$

$$n_j^{r,slope} \frac{\partial L}{\partial n_j^{r,slope}} = 0, \quad n_j^{r,slope} \geq 0, \quad \forall r, \quad \forall j \quad (I.4b)$$

$$\frac{\partial L(\mathbf{n}, \boldsymbol{\lambda})}{\partial n_j^{r,b}} \geq 0, \quad n_j^{r,b} \geq 0, \quad \forall b, \quad \forall r, \quad \forall j \quad (I.5)$$

式 (I.5) は、式 (I.5a) と式 (I.5b) で表される。

$$\frac{\partial L}{\partial n_j^{r,step}} \geq 0, \quad n_j^{r,step} \geq 0, \quad \forall r, \quad \forall j \quad (I.5a)$$

$$\frac{\partial L}{\partial n_j^{r,slope}} \geq 0, \quad n_j^{r,slope} \geq 0, \quad \forall r, \quad \forall j \quad (I.5b)$$

$$\frac{\partial L(\mathbf{n}, \boldsymbol{\lambda})}{\partial \lambda^{r,b}} = 0, \quad \forall b, \quad \forall r \quad (\text{I.6})$$

式(I.6)は、式(I.6a)と式(I.6b)で表される。

$$q^{r,step} - \sum_{j=1}^J n_j^{r,step} = 0, \quad \forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,step} \quad (\text{I.6a})$$

$$q^{r,slope} - \sum_{j=1}^J n_j^{r,slope} = 0, \quad \forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,slope} \quad (\text{I.6b})$$

$n_j^{r,step}$  に関する  $L(\mathbf{n}, \boldsymbol{\lambda})$  (式(I.1)) の偏導関数は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial n_j^{r,step}} L(\mathbf{n}, \boldsymbol{\lambda}) &= \frac{\partial Z(\mathbf{n})}{\partial n_j^{r,step}} \\ &+ \frac{\partial}{\partial n_j^{r,step}} \sum_{r=1}^R \lambda^{r,step} \left( q^{r,step} - \sum_{j=1}^J n_j^{r,step} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial n_j^{r,step}} \sum_{r=1}^R \lambda^{r,slope} \left( q^{r,slope} - \sum_{j=1}^J n_j^{r,slope} \right), \end{aligned} \quad \forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,step} \quad (\text{I.7})$$

ここに、

式(I.7)の第1項は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z(\mathbf{n})}{\partial n_j^{r,step}} &= \frac{\partial}{\partial n_j^{r,step}} \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^J \int_0^{\sum_{m=1}^i n_j^{m,step} + \sum_{m=1}^i n_j^{m,slope}} g_j(\omega) \tau_i d\omega \\ &+ \frac{\partial}{\partial n_j^{r,step}} \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R n_j^{r,step} V_j^{r,step} \\ &+ \frac{\partial}{\partial n_j^{r,step}} \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R n_j^{r,slope} V_j^{r,slope}, \end{aligned} \quad \forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,step} \quad (\text{I.8})$$

式(I.8)の第1項は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial n_j^{r,step}} \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^J \int_0^{\sum_{m=1}^i n_j^{m,step} + \sum_{m=1}^i n_j^{m,slope}} g_j(\omega) \tau_i d\omega \\ = \sum_{i=r}^R g_j \left( \sum_{m=1}^i n_j^{m,step} + \sum_{m=1}^i n_j^{m,slope} \right) \tau_i, \end{aligned} \quad \forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,step} \quad (\text{I.9})$$

式(I.8)の第2項は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial n_j^{r,step}} \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R n_j^{r,step} V_j^{r,step} &= V_j^{r,step}, \\ \forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,step} \end{aligned} \quad (\text{I.10})$$

式(I.8)の第3項は、= 0 となるので省略可能。

$\lambda^{r,step}$  は  $n_j^{r,step}$  の関数ではないため、式(I.7)の第2項は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial n_j^{r,step}} \sum_{r=1}^R \lambda^{r,step} \left( q^{r,step} - \sum_{j=1}^J n_j^{r,step} \right) &= -\lambda^{r,step}, \\ \forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,step} \end{aligned} \quad (\text{I.11})$$

式(I.7)の第3項は、= 0 となるので省略可能。

したがって、ラグランジュ関数  $L(\mathbf{n}, \boldsymbol{\lambda})$  (式(I.1)) の偏導関数は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial n_j^{r,step}} L(\mathbf{n}, \boldsymbol{\lambda}) &= \sum_{i=r}^R g_j \left( \sum_{m=1}^i n_j^{m,step} + \sum_{m=1}^i n_j^{m,slope} \right) \tau_i + V_j^{r,step} \\ &- \lambda^{r,step}, \quad \forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,step} \end{aligned} \quad (\text{I.12})$$

$n_j^{r,slope}$  の場合も同様にして、ラグランジュ関数  $L(\mathbf{n}, \boldsymbol{\lambda})$

(式(I.1)) の偏導関数は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial n_j^{r,slope}} L(\mathbf{n}, \boldsymbol{\lambda}) &= \sum_{i=r}^R g_j \left( \sum_{m=1}^i n_j^{m,step} + \sum_{m=1}^i n_j^{m,slope} \right) \tau_i + V_j^{r,slope} \\ &- \lambda^{r,slope}, \quad \forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,slope} \end{aligned} \quad (\text{I.13})$$

Step Model に関する式(I.4a)と式(I.5a)は以下を意味する。

$n_j^{r,step} > 0$  のとき、

$$\frac{\partial L}{\partial n_j^{r,step}} = 0, \quad \forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,step} \quad (\text{I.14})$$

$n_j^{r,step} = 0$  のとき、

$$\frac{\partial L}{\partial n_j^{r,step}} > 0, \quad \forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,step} \quad (\text{I.15})$$

ここに、

$$\frac{\partial}{\partial n_j^{r,step}} L(\mathbf{n}, \boldsymbol{\lambda}) =$$

$$\sum_{i=r}^R g_j \left( \sum_{m=1}^i n_j^{m,step} + \sum_{m=1}^i n_j^{m,slope} \right) \tau_i + V_j^{r,step}$$

$$-\lambda^{r,step} = UC_j^{r,step} - \lambda^{r,step},$$

$$\forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,step} \quad (I.16)$$

よって、式(I.14)と式(I.15)は以下で表される。

$$n_j^{r,step} > 0 \text{ のとき,}$$

$$UC_j^{r,step} - \lambda^{r,step} = 0, \quad \forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,step} \quad (I.17)$$

$$n_j^{r,step} = 0 \text{ のとき,}$$

$$UC_j^{r,step} - \lambda^{r,step} > 0, \quad \forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,step} \quad (I.18)$$

Slope Model に関する式(I.4b)と式(I.5b)は以下を意味する。

$$n_j^{r,slope} > 0 \text{ のとき,}$$

$$\frac{\partial L}{\partial n_j^{r,slope}} = 0, \quad \forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,slope} \quad (I.19)$$

$$n_j^{r,slope} = 0 \text{ のとき,}$$

$$\frac{\partial L}{\partial n_j^{r,slope}} > 0, \quad \forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,slope} \quad (I.20)$$

ここに、

$$\frac{\partial}{\partial n_j^{r,slope}} L(\mathbf{n}, \boldsymbol{\lambda}) =$$

$$\sum_{i=r}^R g_j \left( \sum_{m=1}^i n_j^{m,step} + \sum_{m=1}^i n_j^{m,slope} \right) \tau_i + V_j^{r,slope}$$

$$-\lambda^{r,slope} = UC_j^{r,slope} - \lambda^{r,slope}$$

$$\forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,slope} \quad (I.21)$$

よって、式(I.19)と式(I.20)は以下で表される。

$$n_j^{r,slope} > 0 \text{ のとき,}$$

$$UC_j^{r,slope} - \lambda^{r,slope} = 0, \quad \forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,slope} \quad (I.22)$$

$$n_j^{r,slope} = 0 \text{ のとき,}$$

$$UC_j^{r,slope} - \lambda^{r,slope} > 0, \quad \forall r \in O, \quad \forall j \in Z^{r,slope} \quad (I.23)$$

式 (I.17) と式 (I.22) において、 $UC_j^{r,step}$  と

$UC_j^{r,slope}$  は Step Model と Slope Model それぞれにおける  $r$  駅を出発する列車  $j$  に乗る乗客 1 人あたりのユーザーコストであるので、Step Model と Slope Model それぞれにおいて利用される列車 ( $n_j^{r,b} > 0$ ) のユーザーコストはすべて  $\lambda^{r,b}$  に等しいことを意味する。

式 (I.18) と式 (I.23) において、 $UC_j^{r,step}$  と  $UC_j^{r,slope}$

は Step Model と Slope Model それぞれにおける  $r$  駅を出発する列車  $j$  に乗る乗客 1 人あたりのユーザーコストであるので、 $\lambda^{r,b}$  は、Step Model と Slope Model それぞれにおいて利用されない列車 ( $n_j^{r,b} = 0$ ) のユーザーコストより小さいかせいぜい等しいことを意味する。

すべての列車のユーザーコストは  $\lambda^{r,b}$  より小さくなることはないから、 $\lambda^{r,b}$  は Step Model と Slope Model それぞれにおける  $r$  駅を出発する列車の最小のユーザーコスト (=  $UC_j^{r,b}$ ) と解釈できる。したがって、式 (12) と式 (15) で表される利用者均衡条件の式と一致するため、等価な最適化問題の解が利用者均衡を満足することが示された。

## 付録 II. 最適化問題の解の一意性の証明

式(18)-(20)で表される利用者均衡条件と等価な数理最適化問題の解の一意性を証明する。

最適化問題の解が一意であるためには、制約条件式によって示される変数の実行可能領域が凸で、かつ、目的関数が狭義の凸関数であることが証明されればよい<sup>13)</sup>。制約条件式は式(19)と式(20)より、すべて線形であることから変数の実行可能領域の凸性は保証される。目的関数が狭義の凸関数であることを証明するには、通勤者数に関する Hessian 行列が正定値行列になっていることを調べればよい。

目的関数 (式(18)) の Hessian 行列は以下で表される。

$$\nabla^2 z(\mathbf{n}) =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 z(\mathbf{n})}{\partial n_{11step}^2} & \frac{\partial^2 z(\mathbf{n})}{\partial n_{11step} \partial n_{12step}} & \cdots & \frac{\partial^2 z(\mathbf{n})}{\partial n_{11slope} \partial n_{jRslope}} \\ \frac{\partial^2 z(\mathbf{n})}{\partial n_{12step} \partial n_{11step}} & \frac{\partial^2 z(\mathbf{n})}{\partial n_{12step}^2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ \frac{\partial^2 z(\mathbf{n})}{\partial n_{jRslope} \partial n_{11slope}} & & \cdots & \frac{\partial^2 z(\mathbf{n})}{\partial n_{jRslope}^2} \end{bmatrix} \quad (II.1)$$

式(II.1)の2次の主小行列式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
& \left| \begin{array}{cc} \frac{\partial^2 z(\mathbf{n})}{\partial n_{11step}^2} & \frac{\partial^2 z(\mathbf{n})}{\partial n_{11step} \partial n_{12step}} \\ \frac{\partial^2 z(\mathbf{n})}{\partial n_{12step} \partial n_{11step}} & \frac{\partial^2 z(\mathbf{n})}{\partial n_{12step}^2} \end{array} \right| \\
& = \frac{\frac{\partial^2 z(\mathbf{n})}{\partial n_{11step}^2} \frac{\partial^2 z(\mathbf{n})}{\partial n_{12step}^2}}{\frac{\partial^2 z(\mathbf{n})}{\partial n_{12step} \partial n_{11step}} \frac{\partial^2 z(\mathbf{n})}{\partial n_{11step} \partial n_{12step}}} \\
& = \frac{dg_j(n_{11step})}{dn_{11step}} \tau_1 \quad (\text{II.2})
\end{aligned}$$

式 (II.2) 中の  $g_j(\cdot)$  は単調増加関数であるため、その微分は常に正となる。また、目的関数の Hessian 行列はブロック対角行列であり、常に正定値となる。よって、目的関数 (式 (18)) は狭義の凸関数となっており、最小解の一意性が証明された。

### 参考文献

- 1) 土木計画学研究委員会：「新型コロナウイルスに関する行動・意識調査」の実施と結果報告 (速報) について, <https://jsce-ip.org/2021/10/03/covid19-survey/>
- 2) 国土交通省 鉄道局都市鉄道政策課：第 2 回 鉄道の混雑緩和に資する情報提供のあり方に関する勉強会, <https://www.mlit.go.jp/tetudo/content/001401393.pdf>
- 3) 運輸総合研究所：東京圏の鉄道の中長期的課題への対応とコロナ禍に関するシンポジウム ～人口と需要の動向を踏まえた沿線魅力の向上～, <https://www.jttri.or.jp/sympo210705-10.pdf>
- 4) 国土交通省 第 2 次交通政策基本計画, <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001397812.pdf>
- 5) Vickrey, W.: Congestion Theory and Transport Investment, *The American Economic Review*, Vol. 59, No. 2, pp. 251-260, 1969.
- 6) Small, K.A.: The Scheduling of Consumer Activities: Work Trips, *The American Economic Review*, Vol. 72, No. 3, pp. 467-479, 1982.
- 7) Arnott, R., A. de Palma and R. Lindsey : A Structural Model of Peak-Period Congestion: A Traffic Bottleneck with Elastic Demand, *The American Economic Review*, Vol. 83, No. 1, pp. 161-179, 1993.
- 8) Vickrey, W. : Pricing, metering and efficiently using urban transportation facilities, *Highway Research Record*, No. 476, pp. 36-48, 1973.
- 9) Tseng, Yin-Yen. and Erik T. Verhoef : Value of time by time of day: A stated-preference study, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 42, No. 7-8, pp. 607-618, 2008.
- 10) Fosgerau, Mogens, and Leonid Engelson : The value of travel time variance, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 45, No. 1, pp. 1-8, 2011.
- 11) Tian, Q., Hai-Jun Huang and H. Yang : Equilibrium properties of the morning peak-period commuting in a many-to-one mass transit system, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 41, No. 6, pp. 616-631, 2007.
- 12) Xie, C. and Fukuda, D.: Scheduling preference modeling of rail passengers in the Tokyo Metropolitan Area and evaluation of time-varying fare policy for a congested urban railway line, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)*, Vol.70, No.5, pp L\_535-L\_548, 2014.
- 13) 道路交通需要予測の理論と適用 第 II 編 利用者均衡配分モデルの展開, 土木学会, 2006.
- 14) Beckmann, M., McGuire, C. and Winsten, C. B.: *Studies in the Economics of Transportation*, Yale University Press, 1956.
- 15) 交通ネットワークの均衡分析 —最新の理論と解法—, 土木学会, 1998.
- 16) Yu Xiao, Nicolas Coulombel, André de Palma : The valuation of travel time reliability: does congestion matter?, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 97, pp. 113-141, 2017.
- 17) 国土交通省 令和 2 年度 テレワーク人口実態調査, [https://www.mlit.go.jp/report/press/toshi03\\_hh\\_000072.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/toshi03_hh_000072.html)
- 18) Se-il Mun and Daisuke Fukuda : Road pricing and provision of capacity, In Verhoef, E.T., Hörcher, D., Tirachini, A. (eds). *Handbook of Transportation Economics*, Elsevier, forthcoming.

## SIMULATING TIME-VARYING FARE POLICY OF URBAN RAIL TRANSIT CONSIDERING STRUCTURAL CHANGES IN PASSENGER DEMAND

Satoru KIMURA and Daisuke FUKUDA

In this study, the impact of introducing time-varying fare during rush hour was analyzed by simulation, assuming structural changes in the demand for commuter rail in urban areas in the post-COVID-19. In the simulation, a departure time choice and passenger demand equilibrium assignment model for commuters with two different commuting styles and a system optimal assignment model for deriving the first best pricing were constructed. Simulation results under three post-COVID-19 scenarios ((1) increase in telework, (2) increase in flexible work hour, and (3) increase in resistance to congestion) confirmed that the total fare revenue for charges obtained by congestion rates and time-varying fare changed from before COVID-19. The model was applied to a real line (Seibu Shinjuku Line) to indicate possible future changes in commuters' departure time choice behavior.