

# 都市空間において鉄道と自動車の 混雑相互依存関係を考慮した料金政策

小長根 丈慈<sup>1</sup>・河野 達仁<sup>2</sup>・桑原 雅夫<sup>3</sup>・上戸 圭悟<sup>4</sup>

<sup>1</sup>非会員 東北大学 大学院情報科学研究科 (〒980-0801 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

E-mail:joji.konagane.r2@dc.tohoku.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東北大学教授 大学院情報科学研究科 (〒980-0801 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

E-mail:kono@plan.civil.tohoku.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 東北大学教授 大学院情報科学研究科 (〒980-0801 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

E-mail:kuwahara@plan.civil.tohoku.ac.jp

<sup>4</sup>非会員 東北大学 大学院情報科学研究科 (〒980-0801 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

E-mail:joto@plan.civil.tohoku.ac.jp

都市交通において道路渋滞と鉄道車内混雑が大きな問題となっており、対策として、自動車混雑税もしくは混雑税を含めた鉄道運賃の導入が挙げられる。しかし、料金政策を行うことで地点別に機関分担率や人口密度が変化するため、自動車と鉄道の相互依存関係及び都市空間を同時に考慮することが必要である。そこで本研究では、これらを同時に考慮した上で、時間で変化しない自動車と鉄道の最適料金を導出した。そして定量分析を通して、料金政策による社会厚生の変化や都市空間に及ぼす影響を分析した。その結果、この料金政策ではボトルネックの位置によらず、最善政策に対する社会厚生改善率が約25%になった。また、鉄道終端位置より郊外のエリアに住む通勤者はこの料金政策の結果、鉄道終端位置よりも内側のエリアに立地を変更することが明らかになった。

**Key Words :** *Bottleneck congestion, Congestion toll, Public transportation, Railway fare, Railway car congestion*

## 1. はじめに

この論文では、自動車と鉄道の相互依存関係を考慮した時間で変化しない料金政策に関する研究を行う。そして、時間で変化しない料金政策が自動車交通におけるボトルネック位置や鉄道混雑にどのように依存するのかを分析する。

まず、都市交通において、道路渋滞は大きな問題である。最善策として、自動車通勤者が常に直面する限界的社会費用に対応した混雑税をかけることが挙げられる。しかし、Rouwendel and Verhoef.<sup>1)</sup>で示されているように最善策を導入するには莫大な費用が掛かるため、最善策の導入は至難である。そこで、次善策として、導入が容易で、道路混雑を軽減することができる時間で変化しない混雑税を導入することを検討する。すでにロンドンやシンガポールでは、道路混雑軽減のために時間で変化しない混雑税の導入を行っている。

また、鉄道車内混雑も都市交通において大きな問題の1つになっている。対策として、車両の容量や路線数を増やすことが挙げられる。しかし、このようなインフラ設備の増設は膨大な時間と莫大な費用が必要となるため、

他の対策案を検討することが望ましい。そこで本研究では混雑税を含めた鉄道運賃の導入を検討する。実際、ワシントン地下鉄やロンドン地下鉄では通勤ラッシュ時に混雑税を含めた鉄道運賃の徴収を行っている。

しかし、このような時間で変化しない料金政策は地点ごとの人口密度や機関分担率に影響を与える。そのため、自動車混雑税と地点別の鉄道運賃は相互依存の関係にあるため、自動車と鉄道及び都市空間を同時に考慮した上で、最適な料金を設定することが望ましい。

先行研究では、Tabuchi<sup>2)</sup>、Amott et al.<sup>3)</sup>のように自動車混雑のみを考慮した料金政策に関する研究は多数を存在する。しかし、これらの研究では、都市内に存在する鉄道などの公共交通機関の存在を考慮できていない。また、Amott and Yan.<sup>4)</sup>、Quentin and Renaud.<sup>5)</sup>はIODを考えた自動車と公共交通機関の混雑を考慮した分析を行っている。しかし、これらの研究は自動車と公共交通機関が完全代替であると仮定しているため、各交通機関で発生する混雑による外部性を明確に考慮できていない。さらに鉄道混雑と自動車混雑を同時に考慮した研究としてvan den Berg and Verhoef.<sup>6)</sup>がある。しかし、この研究では地点別の人口密度や機関分担率による影響を明確に記述できていない。

このような混雑をモデル化している研究の多くは静学的な交通を用いている。しかし、静学的な交通を用いることは交通渋滞のピーク時間帯や通勤者の出発時刻選択を記述することができない。一方でVickrey.<sup>7)</sup>が導入したボトルネックモデルは静学的な交通では記述することができなかった交通渋滞のピーク時間帯や通勤者の出発時刻選択及び自動車の交通渋滞による外部性を表現することができる。しかし、ボトルネックモデルを用いている研究の多くは居住空間を同時に考慮していない。最近、Fosgerau and de Palma.<sup>8)</sup> Takayama and Kuwahara.<sup>9)</sup>では単一のボトルネックモデルが存在する連続的な居住空間を考え、料金政策が社会厚生の変化や通勤者の立地パターンにどのような影響を与えるのかを分析している。しかし、このような研究は時間変化する料金政策が社会厚生や立地パターンに与える影響を分析することを目的としているため、時間で変化しない料金政策の検討がなされていない。

そこで本研究では、自動車混雑と鉄道車内混雑及び都市空間を同時に考慮した時間で変化しない最適な自動車混雑税と混雑税を含めた地点別に最適な鉄道運賃の導出を行う。そして定量分析を通して、この料金政策が社会厚生や地点別の機関分担率及び通勤者の立地選択にどのような影響を与えるのかを分析する。

## 2. モデル

まず、モデルは図-1のような線形の単一中心都市を考える。居住地の横幅は $c$ (km)とする。居住地はCBDの縁( $x = \underline{x}$ )から都市境界( $x = \bar{x}$ )までとする。この都市にはボトルネックが $x = x_b$ に1つだけ存在する。鉄道の終端位置は $x = x_r$ で表現する。この都市には交通手段として自動車と鉄道の2つが存在する。自動車通勤者はボトルネックを通過したときに、待ち行列

による交通混雑による外部性を受ける。また鉄道通勤者は鉄道の車内人数によって生じる鉄道車内混雑による外部性を受ける。

この都市は閉鎖な都市とする。都市内の土地は公共事業者が所有しているものとする。道路事業者はボトルネックにおいて、道路渋滞を軽減するために時間で変化しない混雑税 $\tau$ を徴収する。鉄道事業者は鉄道車内混雑を軽減するために地点別に時間で変化しない最適な鉄道運賃を設定し、鉄道利用者から徴収する。

この都市には $N$ 世帯の家計が存在する。すべての

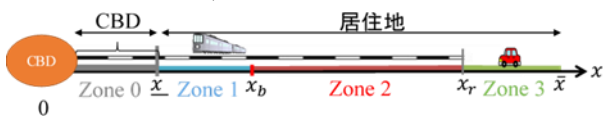


図-1 都市のモデル

家計は時間価値や所得が等しい同質な家計とする。そしてすべての家計は毎朝必ずCBDに通勤するものとする。ここで家計の効用関数は以下の式(1)のように定義する。

$$v = v(k + \sum_{i=1}^J \zeta_i \varepsilon_i^{car}, q) \dots (1)$$

ここで $k$ は合成財の消費量とし、価格をニューメーラーとする。 $q$ は住宅面積である。 $\varepsilon_i^{car}$ は自動車を利用したときの効用と鉄道を利用したときの効用の差分を表しており、この効用差 $\varepsilon_i^{car}$ は各人が独立にもっている確率密度関数に従うものとする。 $J$ は期間をさし、 $j$ は $J$ のうちの日を表している。そして $\zeta_j$ はある日に車を使った場合は1、鉄道を使った場合は0となるダミー変数である。

ある日にある地点からCBDに通勤する通勤者の中で車を使う確率 $\Phi(\kappa(x))$ は式(2)のように表される。

$$\Phi(\kappa(x)) = \int_{\kappa(x)}^{\infty} \chi(\varepsilon^{car}) d\varepsilon^{car} \dots (2)$$

ここで $\chi(\varepsilon^{car})$ は $\varepsilon^{car}$ に関する確率密度関数である。また、 $\kappa(x)$ は式(3)のように定義する。

$$\kappa(x) = t^{car}(x) - t^{rail}(x) \dots (3)$$

$t^{car}(x), t^{rail}(x)$ はそれぞれある地点における自動車と鉄道の通勤費用である。

所得制約式は式(4)のように定義する

$$k + rq = y - \left\{ \sum_{j=1}^J \zeta_j t^{car}(x) + \sum_{j=1}^J (1 - \zeta_j) t^{rail}(x) \right\} + \frac{G}{N} \dots (4)$$

$y$ は労働所得、 $r$ は土地1単位当たりの付け根地代、 $G$ は料金政策を通して全世帯に還元される非労働所得である。

地点 $x$ を通過した総通勤者数 $n(x)$ は式(5)のように定義する。

$$n(x) = \int_x^{\bar{x}} [1/q(m)] dm, x \in [\underline{x}, \bar{x}] \dots (5)$$

$x = \underline{x}$ は居住地の内縁にあたるので $n(\underline{x}) = N$ になる。

$n^{car}(x), n^{rail}(x)$ はそれぞれ地点 $x$ を通過した自動車と鉄道の総利用者数を表す。

次に通勤費用を定式化する。全自動車通勤者は距離1単位当たりの時間価値 $b$ に比例する時間費用を被る。ボトルネックを通過する通勤者はボトルネックでの混雑費用を被り、ボトルネック通過時に混雑税 $\tau$ を支払う。そのため自動車通勤費用は次のように定式化される。

$$t^{car}(x) = bx \text{ at } x < x_b \dots (6)$$

$$t^{car}(x) = bx + \delta n^{car}(x_b) / s + \tau \text{ at } x \geq x_b \dots (7)$$

ここで $\delta, s$ はそれぞれボトルネックパラメータとボトルネック容量である。

次に鉄道通勤費用は式(8)のように定式化する。

$$t^{rail}(x) = ax + e(x) + \left[ \underline{x} \cdot f(n^{rail}(x)) + \int_{\underline{x}}^x f(n^{rail}(s)) ds \right] \text{ at } x \in [\underline{x}, x_r] \dots (8)$$

ここで  $f(n^{rail}(x))$  は地点  $x$  における鉄道の車内混雑費用を表す。 $a$  は距離1単位当たりの時間費用、 $e(x)$  は地点  $x$  における鉄道運賃である。

最後に公共事業者の財政制約を定義する。今回考慮している公共事業者は自動車事業者と鉄道事業者そして不在地主である。自動車通勤者は混雑税による収入  $E$  を得ている。鉄道事業者は鉄道敷設費用として  $Z$  を運営費用として  $X$  を支払っている一方で運賃による収入  $T$  を得ている。不在地主は地代収入として  $R$  を得ている。これらすべてを考慮すると今回の政策を通して得られる社会全体の非労働所得  $G$  は式(9)のように定式化される。

$$G = R + E + T - Z - X \dots (9)$$

そしてこの式(9)を全世帯数  $N$  で割る (i.e.  $G/N$ ) と一人当たりの非労働所得を表すことができる。

### 3. 理論研究

理論研究では、社会厚生  $W$  を最大化する混雑税  $\tau$  と地点別の鉄道運賃  $e(x)$  の導出を行った。社会厚生最大化問題は次のように定式化される。

$$[\tau, e(x)] = \arg \max_{\tau, e(x)} W = Nu \dots (10)$$

$$s.t. \text{ eqs. (3), (5) - (9)}$$

ここで  $u$  は個人の均衡効用を表している。この式(10)に対してラグランジュ関数を定式化し、1階条件を解くと最適な混雑税  $\tau$  と鉄道運賃  $e(x)$  はボトルネックの位置によって異なる結果となった。

(1) ボトルネック位置がCBDの縁にある場合

$$\tau - e(x) = \frac{\delta n^{car}(x)}{s} - \left\{ \begin{array}{l} zx + \underline{x} \cdot n^{rail}(\underline{x}) \cdot f'(n^{rail}(\underline{x})) \\ + \int_{\underline{x}}^x n^{rail}(s) \cdot f'(n^{rail}(s)) ds \end{array} \right\} \dots (11)$$

ボトルネック位置がCBDの縁にある場合、自動車混雑税  $\tau$  と地点  $x$  の鉄道運賃  $e(x)$  の差分がボトルネックによる混雑費用と地点  $x$  からの通勤者が被る鉄道車内混雑費用の差分に等しくなるように設定することが最も最適であるという結果を導きだした。これはボトルネック位置がCBD縁にあることで、全自動車通勤者がボトルネックを通過するため、自動車と鉄道の双方の歪みを同時に考慮することが必要であると考えられる。ここで  $z$  は鉄道運営限界費用である。

(2) ボトルネック位置がCBD縁から離れている場合

最適な自動車混雑税  $\tau$  と鉄道運賃  $e(x)$  は以下のよう  
に導出された。

$$\tau = \frac{\delta n^{car}(x_b)}{s} \dots (12)$$

$$e(x) = \left[ \begin{array}{l} zx + \underline{x} \cdot n^{rail}(\underline{x}) \cdot f'(n^{rail}(\underline{x})) \\ + \int_{\underline{x}}^x n^{rail}(s) \cdot f'(n^{rail}(s)) ds \end{array} \right] \dots (13)$$

この結果からボトルネック位置がCBDから離れている場合、自動車混雑税  $\tau$  と鉄道運賃  $e(x)$  はそれぞれの混雑費用を取り除くように設定することが最適であるということを表している。これは双方の料金が同時に最適化しているため、片方の交通量が1単位増えた場合に発生する他方の混雑外部性が最適な料金水準によって打ち消されるためである。

### 4. 定量分析の設定

定量分析にあたり、居住地を2km幅の6つのゾーンに分けて分析を行う。CBD縁  $\underline{x}$ 、鉄道終端位置  $x_r$ 、都市境界  $\bar{x}$  はそれぞれ1km, 10km, 13kmとする。効用関数は式(14)のような準線形効用関数とする。

$$v_h = k_h + \sum_{i=1}^J \zeta_i \varepsilon_{i,h}^{car} + \alpha \ln(q_h) \dots (14)$$

各世帯の収入は\$42,628.555とする。パラメータ  $\alpha$  は8,000,  $J$  は230日とする。

ボトルネック容量  $s$  とパラメータ  $\delta$  はそれぞれ11,500 (台/時), 14.436 (\$/時) と設定する。アクセス費用  $Q$  は3.34(\$/トリップ), 鉄道運営限界費用  $z$  は0.219(\$/(時・km))。鉄道敷設費用  $I$  は4,800,000 (\$/(km・year)) と設定する。自動車もしくは鉄道を利用した際の時間費用  $b$ 、 $a$  はそれぞれ0.77(\$/km), 0.80(\$/km) と設定する。

鉄道の車内混雑関数  $f(n^{rail}(x))$  は以下のように線形の関数とする。

$$\left\{ \begin{array}{l} f(n_m^{rail}(x)) = f \cdot (n_m^{rail}(x) - \bar{c}_{rail}) \text{ when } \bar{c}_{rail} < n_m^{rail}(x) \\ f(n_m^{rail}(x)) = 0 \text{ when } 0 \leq n_m^{rail}(x) \leq \bar{c}_{rail} \end{array} \right. \dots (15)$$

ここで  $n_m^{rail}(x)$  は地点  $x$  において、 $m$  本目に鉄道を利用している通勤者数を表している。また、今回鉄道の運行間隔は1分として分析する。なぜなら列車の運行間隔によって発生するスケジュール遅延費用による影響を取り除き、時間一定の料金政策の効果を分析するためである。そのため、 $\bar{c}_{rail}$  は列車が1分おきに運行していると仮定したときの鉄道の輸送容量を表している。鉄道混雑費用パラメータ  $f$  は0.05(\$/(km・person))とする。確率密度関数は一様分布とし、各人が独立にもっているものとする。その確率密度関数に関する値  $a_1, b_1$  はそれぞれ110, 170に設定する。

このような設定の元、時間で変化する料金政策(first-best)の社会厚生改善に対して時間で変化しない料金政策(Second-best)の社会厚生改善率を求める。今回、分析にあたり2つのSituationを分析している。Situation1ではボトルネック位置が  $x_b = \underline{x}$  にある場合を分析している。

Situation2ではボトルネック位置が  $x_b > \underline{x}$  にある場合を分析している。

### 5. 分析結果

分析結果は表-1, 表-2 のようになった。私たちは3つの均衡状態を分析した: (a) *laissez-faire*, (b) *toll regime (first-best)*, (c) *optimal cordon pricing and railway fares (second-best)* である。

(a)では混雑税を徴収しなかった場合に達成される均衡状態を表している。(b)は自動車及び鉄道で発生する混雑費用を完全に排除するように時間で変化する料金をかけた場合の均衡状態を表している。(c)は式(11), (12), (13)で導き出した時間で変化しない自動車混雑税  $\tau$  及び鉄道運賃  $e(x)$  をかけた場合の均衡状態を表している。

また、今回鉄道の輸送容量も各均衡状態で変化させている。まず仙台市地下鉄の鉄道の輸送容量は576(人)である<sup>10)</sup>。(a)では、仙台市地下鉄のラッシュ時における運行間隔は4分であるため、 $\bar{c}_{rail} = 144$  (人/分)と設定している。しかし、東京メトロ銀座線ではラッシュ時の運行間隔が2分であるため、(b),(c)では $\bar{c}_{rail} = 288$  (人/分)に設定し分析を行っている。

First-bestの時の社会厚生改善率を100%としたときのSecond-bestの時の社会厚生改善率はSituation1では約25%, Situation2では約28%という結果になった。これは表1から料金政策を通して、自動車混雑費用が減少しているということが大きな原因になっているということがわかる。また、鉄道混雑費用が減少しているのは鉄道の運行間隔を短くしたことで短時間に多くの乗客を運ぶことができるようになったためである。次にsecond-best政策を通して、各地点の自動車利用者数はどのように変化しているのかを分析する。その結果が図-2である。Situation1では、second-best政策を通して、各Bandで自動車利用者数が減少しているということがわかる。つまりsecond-best政策は混雑費用が大きい自動車利用者数を減らし、混雑費用が小さい鉄道利用者数を増加させることで社会全体の厚生を改善している。しかし、Situation2では、ボトルネックの内側と外側で自動車利用者数が異なって変化している。自動車利用者数は人口と自動車分担率の積で表されるので、人口と自動車分担率の変化をそれぞれ分析する必要がある。

図-3は各Bandの人口を表している。まず、Situation1を見るとBand6の人口のみ減少し、他のBandの人口が増加していることがわかる。これはsecond-best政策を通して、Band6からの通勤者が被る年間の総交通費用が他のBandからの通勤者が被る年間の総交通費用よりも大きくなってしまったため、それを避けようとBand6からの通勤者が他のBandへと移住を行う。次にSituation2ではボトルネックの外側の人口は減少しているのに対して、内側の人口は増加している。これは、ボトルネックの内側の通勤者は自動車混雑による外部性を被らないため、ボトルネックの外側の通勤者は自身の交通費用を削減しようとボトルネックの内側に移住を行う。

表-1 分析結果 —社会厚生—

	W (10 <sup>7</sup> \$)	Welfare gain (%)	U (\$)	T (10 <sup>7</sup> \$)	E (10 <sup>6</sup> \$)	Z (10 <sup>6</sup> \$)	Road congestion (10 <sup>7</sup> \$)	Railway car congestion (10 <sup>7</sup> \$)
Situation1								
(a)	3.066	—	1474.1	0	3.950	3.950	5.462	1.423
(b)	6.849	100.0	3292.8	2.635	8.694	4.086	0	0
(c)	3.999	24.6	1922.4	2.945	4.017	4.478	4.734	1.071
Situation2								
(a)	5.311	—	2553.5	0	3.648	3.648	3.299	1.287
(b)	7.881	100.0	3789.0	1.599	7.922	3.782	0	0
(c)	6.052	28.8	2909.5	2.677	1.240	3.841	2.672	0.8570

注釈: (a) *laissez-faire*, (b) *first-best*, (c) *second-best*

表-2 分析結果 —料金設定—

	$\tau$ (\$/day)	$e_1$ (\$/day)	$e_2$ (\$/day)	$e_3$ (\$/day)	$e_4$ (\$/day)	$e_5$ (\$/day)
Situation1						
(a)	0	44	88	131	175	219
(c)	1025	44	88	131	175	219
Situation2						
(a)	0	44	88	131	175	219
(c)	1210	565	609	653	697	741

注釈: (a) *laissez-faire*, (c) *second-best*

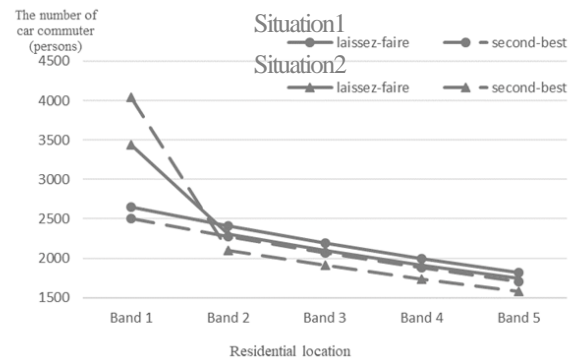


図-2 自動車利用者数

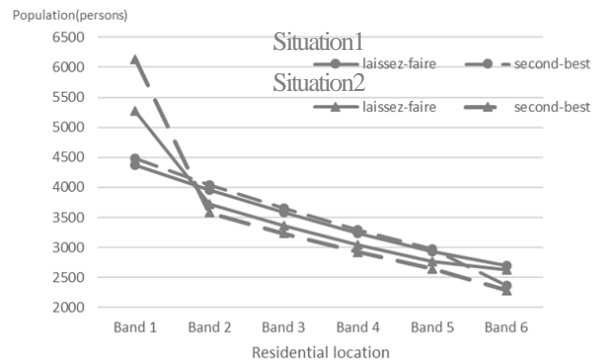


図-3 各地点の人口

表-3 自動車分担率

	Band1	Band2	Band3	Band4	Band5
(a): Modal shares (%)	65.3	62.0	62.4	62.7	63.1.
(c): Modal shares (%)	66.0	58.7	59.1	59.5	59.8

注釈: (a) laissez-faire, (c) second-best

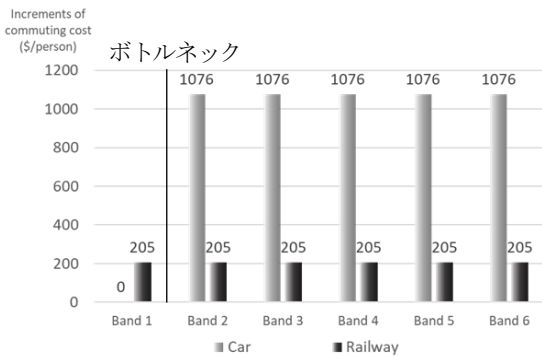


図-4 一般化費用の増加額

表-3と図-4は自動車分担率と一般化費用の増加を表している。ボトルネックの内側の一般化費用は鉄道のみ増加している。これはボトルネックの内側の自動車利用者はボトルネックを通過しないためである。そのため、ボトルネックの内側の通勤者は鉄道を利用するのを避けて自動車を利用しようとするため、自動車分担率が増加する。ボトルネックの外側の通勤者はsecond-best政策を通して、自動車と鉄道の双方の一般化費用が増加する。そのため、一般化費用の増加が大きい自動車の利用を避けて、鉄道を利用する通勤者が増加する。そのため、自動車分担率が減少する。

## 6. まとめ

ここでは、自動車混雑と鉄道車内混雑及び通勤者の立地選択を同時に考慮した自動車と鉄道の時間一定の最適料金に関する研究を行った。

理論研究では、ボトルネック位置に応じて2つの結果を導出した。ボトルネック位置がCBDの縁にあるとき、自動車混雑税と鉄道運賃は双方の混雑外部性の差分によって決まる。また、ボトルネック位置がCBDから離れているとき、自動車混雑税と鉄道運賃はそれぞれで発生する混雑外部性を取り除くように設定するのが最適である。

定量分析では、ボトルネック位置にかかわらず、時間一定の料金政策の社会厚生改善率が時間変化する料金政策に対して約25%を達成するという結果になった。ボトルネック位置がCBD縁にあるときは、時間一定の料金政策を通して、混雑費用が大きい自動車利用者数を減らし、混雑費用が小さい鉄道利用者数を増やすことで社会全体の厚生を改善しているということが分かった。また、ボトルネック位置がCBDから離れているとき、ボトルネックの外側の通勤者は自動車の混雑外部性を受けないボトルネックの内側に立地を変更しようとするということがわかった。さらに鉄道と自動車を同時に考慮したことにより鉄道が通っていないゾーンに住んでいる通勤者が料金

政策を通して、鉄道が通っているゾーンに立地を変更するということが分かった。

これからの研究の展望として、通勤者の異質性を考慮することが必要であると考えられる。V. van den Berg and Eric T. Verhoef.<sup>9)</sup>では均衡状態において、通勤者の異質性によって、出発時刻選択にソーティングが起きるということがわかっている。また、Takayama and Kuwahara.<sup>6)</sup>では、均衡状態において、通勤者の時間価値の違いが立地パターンに影響を及ぼしているということを示している。そのため、通勤者の異質性を考慮したとき、時間一定の料金政策が出発時刻や立地パターンにどのような影響を及ぼすのかを分析することが必要になってくると考えられる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、仙台市交通局より貴重なデータをいただきました。ここに記し、感謝を示します。

## 参考文献

- 1) Rouwendal, J., & Verhoef, E. T. (2006). Basic economic principles of road pricing: From theory to applications. *Transport policy*, 13(2), 106-114.
- 2) Tabuchi, T. (1993). Bottleneck congestion and modal split. *Journal of Urban Economics*, 34(3), 414-431.
- 3) Amott, R., De Palma, A., & Lindsey, R. : A structural model of peak-period congestion: A traffic bottleneck with elastic demand. *The American Economic Review*, 161-179, 1993.
- 4) Amott, R., & Yan, A. (2000). The Two - Mode Problem: Second - Best Pricing and Capacity. *Review of urban & regional development studies*, 12(3), 170-199.
- 5) Quentin, David., Renaud, Foucart. (2014). Modal choice and optimal congestion. *Regional Science and Urban Economics* 48, 12-20.
- 6) van den Berg, V. A., & Verhoef, E. T. : Congestion pricing in a road and rail network with heterogeneous values of time and schedule delay. *Transportmetrica A: Transport Science*, 10(5), 377-400, 2014.
- 7) Vickrey, W. S. (1969). Congestion theory and transport investment. *The American Economic Review*, 251-260.
- 8) Fosgerau, M., & De Palma, A. (2012). Congestion in a city with a central bottleneck. *Journal of Urban Economics*, 71(3), 269-277.
- 9) Takayama, Y., & Kuwahara, M. (2016). Bottleneck congestion and residential location of heterogeneous commuters.
- 10) Transportation Bureau City of Sendai. Retrieved January 2019 from <https://www.kotsu.city.sendai.jp/>
- 11) van den Berg, V.A.C., Verhoef, E.T., 2011. Winning or losing in the from dynamic bottleneck congestion pricing? The distributional effects of road pricing with heterogeneity in values of time and schedule delay. *J. Public Econ.* 95(7), 983-992.
- 12) Takayama, Y., Kuwahara, M., 2017. Bottleneck congestion and residential location of heterogeneous commuters. *J. Urban Econ.* 100, 65-79
- 13) Nemoto, T., Imaizumi, Y., Kikuchi, H., Kobayashi, M., Kono, K. : Effect of Hourly Toll Reduction on Toll Roads. IITS symposium, 133-138, 2009. Retrieved October 2018 from <http://hdl.handle.net/10086/22986>.
- 14) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. Retrieved January 2019 from <http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/hyouka-syuhou/4pdf/s1.pdf>
- 15) Small, K. S. : The scheduling of Consumer Activities. *The American Economics Review*, 467-479, 1982.

(2019. 10. 4 受付)

# **Optimal Pricing Policies on Railways and Roads Considering their Interdependent Congestion in a City**

Joji KONAGANE, Tatsuhito KONO, Masao KUWAHARA and Keigo JOTO

Road congestion and railway car congestion are important problems in urban city. Several cities introduce the uniform car toll or extra rail fares during rush hours in order to mitigate the congestion. Because they depend on the modal share of cars and railways at every location, we must consider both congestion in order to conduct pricing policies. This paper explores the optimal car toll and rail fares, and the efficacy of optimal uniform pricing policies which considers both congestion and urban spaces simultaneously.

Numerical results show as follows. The optimal uniform car toll and rail fares achieve approximately 25% to the time-variant tolls regardless of the location of bottleneck. In addition, this time-invariant pricing policy influences households in zone where railway is not located and they try to move to the zones where railway is located.