

Influence of Congestion Charge and Return Schemes on Modal Choice between Road and Railroad

吉村 充功*・奥村 誠*

Mitsunori YOSHIMURA and Makoto OKUMURA

Congestion charge policy is most effective one among transportation demand management policies. Recently, road pricing that is one of the congestion charge policies is examined to be introduced into heavy congestion roads in Tokyo. This policy has influence on modal split between road and railroad, and then the government can use the collected congestion charge for improving railroad service level. In this paper, we have proposed theoretical models to determine simultaneously home departure time and modal choice with / without congestion charge. And, we have analyzed influence of congestion charge and return schemes on modal choice between road and railroad. From results of numerical simulation, we have shown that scheme of return to other mode doesn't improve utility. Furthermore, scheme of pricing to railroad commuters is more effective.

congestion charge, modal split, pricing and return schemes, optimal control

混雑料金、機関分担、賦課・還元スキーム、最適制御

1. はじめに

近年、道路混雑の悪化が深刻化しているが、時間的・空間的制約から、さらなるハード施設の建設は困難になっている。そこで、交通需要を時間的に分散させ、混雑度を平準化する交通需要管理 (TDM) 施策が着目されている。すでに、時差出勤やフレックスタイム制度といった始業時刻を分散させる施策は社会実験などでその混雑緩和効果が確かめられており¹⁾、行政などは積極的な導入を呼びかけている。しかしながら、業務効率への悪影響の懸念からこれらの施策の民間企業への導入は進んでおらず、社会的には十分な効果を発揮するには至っていない。そのため、最近では日本でも交通需要を直接的に制御できる混雑料金施策の導入が検討されている。

今後、混雑料金施策の重要性はさらに高まると考えられるが、より効果的に実施するには、時間的に変動する交通需要に対して、時刻ごとに異なる適切な額を設定する必要があると考えられる。また、他の TDM 施策と異なり、混雑料金を導入した場合には料金収入が発生するため、これをどのように利用者に還元すべきかが問題となる。

理論的には、料金収入を長期的な施設整備に当てるという方策があるが、大都市の施設増強は既に物理的な限界に達していることから、料金収入を通勤者に返還するというスキームが実際的である。この時、料金収入を他モードへ還元することにより、他モードへの転換をさらに促すことができる可能性もある。このように、混雑料金をどのように賦課し、料金収入をどのように還元することがより効果があるかを明らかにすることは混雑料金

施策の導入を促進させ、成功させるために重要である。

そこで、本研究ではまず自動車と鉄道の双方を考慮した通勤時刻分布の理論モデルを構築する。さらに施設の状況が固定されている状況下において、混雑料金の賦課と還元を自動車・鉄道にどのように行うかというスキームの違いにより達成される機関分担、効用を分析し、効果のある賦課・還元スキームを明らかにする。

以下、2. では自動車・鉄道通勤に関する既往の理論研究と本研究の考え方を述べる。3. では各機関ごとの効用を定式化する。4. では無課金時の通勤時刻分布、分担率を決定する問題を定式化し、求解する。5. では課金時の通勤時刻分布を決定する問題を定式化し、混雑料金の各種賦課・還元スキームによる機関分担率、混雑料金の設定額を求解する。6. では求解されたモデルの数値計算により、各種賦課・還元スキームの影響を分析する。7. は結論であり、総括と今後の課題を述べる。

2. 自動車・鉄道通勤の問題と理論研究の概要

(1) 既往の理論研究の概要

自動車通勤の出発時刻分布に関する先駆的な研究は Vickrey によってなされた²⁾。Vickrey は旅行費用として、混雑による不効用と、通勤開始時刻と実際の到着時刻のズレによる不効用を考慮しながら、通勤者の出発時刻を決定するという分析を行い、この出発時刻選択問題を通して時間的に変動する混雑料金について分析を行った。Arnott らはこの考えを発展させ、特定の時間帯に混雑料金を課した場合の効果について分析している³⁾。越は時差始業や混雑料金による混雑緩和効果について帰宅時を

* 正会員 広島大学大学院工学研究科 (Hiroshima Univ.)

含めた研究を行い、ボトルネック (以下、BN と略す) の容量制約による混雑の発生と混雑軽減のための方策を明らかにしている⁴⁾。

一方、鉄道通勤における出発時刻分布に関連する研究として、小林らは鉄道通勤市場が時刻別に差別化されていることに着目し、通勤者の時刻選択行動と鉄道事業者の輸送力供給行動を内生化した部分均衡論的モデルの構築を行っている⁵⁾。

以上の研究は、単一交通機関に対する出発時刻選択を分析する理論モデルを供給しており、複数交通機関に対しては直接扱えないが、本研究でもこれらの考え方を採用する。

複数交通機関を扱った研究として、Tabuchi は自動車通勤の代替手段としての鉄道を考え、鉄道の限界費用を一定とした場合の機関分担率を理論的に求めている。さらに、社会的通勤費用を最小化する自動車混雑料金の設定額についても明らかにしている⁶⁾。しかしながら、鉄道通勤の出発時刻分布を扱えないため、鉄道に対して混雑料金を課すといったケースの分析ができない。

(2) 本研究の考え方

本研究では、自動車・鉄道通勤の通勤時刻分布を分析するために、既往の理論研究を参考に通勤者の通勤にかかる不効用に着目する。自動車・鉄道通勤に関する動的な問題を扱う際の注意点としては、自動車通勤では BN での混雑の影響が後から流入する通勤者に波及する。そのため、通勤不効用は通勤順序ごとに差別化する必要がある。一方、鉄道通勤では列車内での混雑が問題となり、混雑は後から通勤する通勤者へ影響を及ぼさない。そのため、同じ列車に乗っている通勤者の不効用は等しくなるが、時刻ごとには差別化される。このように、自動車通勤と鉄道通勤では効用の考え方が異なるため、本質的に異なる問題となる。本研究では、これらの違いを明示的に取り込むため、それぞれのモードごとに異なる定式化を行う。

3. 効用の定式化

(1) モデル化の仮定

図-1 のように1つのベッドタウンと CBD が平行する通勤道路と通勤鉄道で結ばれている都市を考える。通勤道路の CBD の直前には BN が存在し、交通容量 k (台/分) を超える流入があれば、そこに point queue が発生する。また、追い越しは認められていないとする (First-In-First-Out 原則)。

均質な N 人の通勤者が自動車か鉄道を用いて通勤を行う。なお、アクセス、イグレスは考えない。さらに、遅刻は認められておらず、全通勤者は共通の始業時刻 T_f までに出社する必要があるとする。

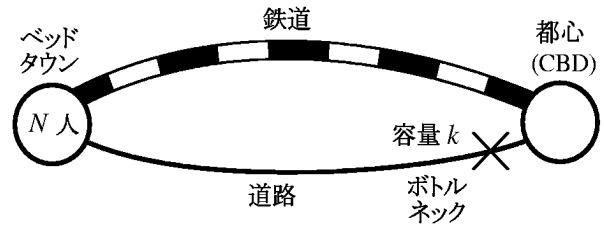


図-1 想定する都市

混雑料金は、BN の出口、もしくは CBD 中心駅で時刻ごとに異なる所定の混雑料金を賦課する。

(2) 自動車通勤による不効用

自動車通勤者で q 番目に自宅を出発する通勤者の不効用 $U_a(q)$ は式 (1) で表され、BN での混雑待ち不効用 (右辺 1 項)、自宅を早く出発することに関するスケジュールコスト (右辺 2 項)、ガソリン代 (右辺 3 項) および混雑料金 $\rho_a(q)$ からなるとする。

$$U_a(q) = -e \{m_a(q) - (a(q) + w)\} - c \{T_f - a(q)\} - v \{m_a(q) - a(q)\} - \rho_a(q) \quad (1)$$

ただし、 $a(q)$ は自宅出発時刻、 $m_a(q)$ は出社 (BN 流出) 時刻、 w は自由走行区間の所要時間 (分) (一定)、 T_f は始業時刻、 e は混雑不効用の時間価値 (円/分)、 $c (< e)$ はスケジュールコストの時間価値 (円/分) とする。ガソリン代は通勤所要時間に比例するとし、単位時間あたりのガソリン代 v (円/分) はガソリン単価 (円/ℓ) / 燃費 (km/ℓ) × 法定分速 (km/分) で与えられるとする。

(3) 鉄道通勤による不効用

時刻 t に CBD に到着する鉄道通勤者の不効用 $U_r(t)$ は式 (2) で表され、列車内混雑 (右辺 1 項)、自宅を早く出発することに関するスケジュールコスト (右辺 2 項)、運賃 RC および混雑料金 $\rho_r(t)$ からなるとする。

$$U_r(t) = -s(t)^\eta - c \{T_f - (t - \kappa)\} - RC - \rho_r(t) \quad (2)$$

ただし、 $s(t)$ は時刻 t に CBD に到着列車の混雑度を表し、 $s(t) = 1$ のとき定員輸送を意味する。 η は混雑度の弾力値、 κ は通勤時間 (分) (一定) である。また、運賃は混雑料金とは区別し、後述する総輸送費用 TR を総括原価方式に従い、鉄道通勤者数 N_r で除した金額とする。

鉄道の時刻別輸送力を $u(t)$ 、時刻 t までに CBD に到着する累積鉄道通勤者数を $m_r(t)$ とすれば、時刻別鉄道通勤者数 $\dot{m}_r(t)$ は混雑度と輸送力の積として表される。

$$\dot{m}_r(t) = s(t)u(t) \quad (3)$$

総輸送費用 TR は鉄道通勤時間帯 $[T_r, T_f]$ について、時刻別輸送力 $u(t)$ の関数を積み上げたものとして表されると仮定する。

$$TR = \int_{T_r}^{T_f} \zeta u(t) dt \quad (4)$$

ただし、 ζ, ι は輸送費用の比例係数、弾力値を表す。 T_r は最早鉄道通勤入社時刻である。

なお、鉄道輸送においては固定費用の占める割合が大きいと考えられるが、固定費用は鉄道通勤者数によらず一定と考えられ、本研究での問題の本質にかかわらないため、ここでは無視する。

4. 無課金時の通勤時刻分布・機関分担決定問題

自動車・鉄道ともに常に混雑料金を賦課せず、 $\rho_a(q) = \rho_r(t) = 0$ の状況を考える。このとき、出発時刻・利用機関によらず、全通勤者の効用が等しい状況（等効用条件）下で、全通勤者の自動車・鉄道通勤不効用からなる社会的通勤費用を最小化する時刻別鉄道輸送力を決定する問題を利用者均衡（U.E.）問題と呼ぶ。

(1) 自動車通勤の通勤時刻分布

ボトルネック容量が k (台/分) で表されることに注意すると、通勤者が合理的に行動する限り、式 (1) の式形より、入社時刻分布 $m_a(q)$ に関して次式が成立する。

$$m'_a(q) = 1/k \quad (5)$$

$$m_a(q) = q/k + (T_f - N_a/k) \quad (6)$$

ただし、 $m'_a(q) \equiv dm_a(q)/dq$ 、 N_a は自動車通勤者数を表す。

自動車通勤者の等効用条件 $U'_a(q) = 0$ より、自動車通勤者の自宅出発時刻分布 $a(q)$ 、社会的通勤費用 SC_a^e は次式で求められる。

$$a(q; N_a) = \frac{e + v}{e + c + v} \frac{q}{k} + \left(T_f - \frac{N_a}{k} - w \right) \quad (7)$$

$$SC_a^e(N_a) \equiv -\bar{U}_a^e \cdot N_a = \frac{c}{k} N_a^2 + (c + v) w N_a \quad (8)$$

ただし、 \bar{U}_a^e は均衡時の自動車通勤者の通勤不効用である。

(2) 鉄道通勤の通勤時刻分布

鉄道通勤者の等効用条件 $\dot{U}_r(t) \equiv dU_r(t)/dt = 0$ より、混雑度 $s(t)$ 、均衡時の通勤不効用 \bar{U}_r^e は次式となる。

$$s(t) = (c(t - T_r))^{1/\eta} \quad (9)$$

$$\bar{U}_r^e = -c(T_f - (T_r - \kappa)) - RC \quad (10)$$

鉄道通勤の社会的通勤費用 SC_r^e は、運賃が総輸送費用から求められることを考慮すると、鉄道通勤者数 N_r を用いて次式で表される。

$$SC_r^e = c(T_f - (T_r - \kappa))N_r + \int_{T_r}^{T_f} \zeta u(t)^{\iota} dt \quad (11)$$

時刻別鉄道通勤者数 $\dot{m}_r(t)$ が式 (3) で表されることを考慮すると、 SC_r^e を最小化する輸送力 $u(t)$ の決定問題は、以下の最適制御問題として定式化される。

$$\min_{u(t)} SC_r^e = c(T_f - (T_r - \kappa))N_r + \int_{T_r}^{T_f} \zeta u(t)^{\iota} dt \quad (12a)$$

$$s.t. \quad \dot{m}_r(t) = (c(t - T_r))^{1/\eta} u(t) \quad (12b)$$

$$m_r(T_r) = 0, \quad m_r(T_f) = N_r \quad (12c)$$

最適制御理論を用いて求解すると⁵⁾、鉄道通勤者の入社時刻分布 $m_r(t)$ 、時刻別輸送力 $u(t)$ 、最早鉄道通勤入社時刻 T_r 、運賃 RC 、社会的通勤費用 SC_r^e は、鉄道通勤者数 N_r を用いて次式で求められる。

$$m_r(t; N_r) = \left(\frac{t - T_r(N_r)}{T_f - T_r(N_r)} \right)^{1/\eta\psi} N_r \quad (13)$$

$$u(t; N_r) = \frac{cN_r}{\eta\theta\psi} \left(c(T_f - T_r(N_r)) \right)^{-1/\eta\theta\psi} (c(t - T_r(N_r)))^{1/\eta\theta} \quad (14)$$

$$T_r(N_r) = T_f - \frac{1}{c} \left(\frac{cN_r}{\eta\theta\psi} \right)^{\frac{1}{\phi}} \left(\frac{\zeta}{\eta\psi} \right)^{\frac{1}{\phi\theta}} \quad (15)$$

$$RC(N_r) = \eta\psi \left(\frac{\zeta}{\eta\psi} \right)^{\frac{1}{\phi\theta}} \left(\frac{cN_r}{\eta\theta\psi} \right)^{\frac{1}{\phi}} \quad (16)$$

$$SC_r^e(N_r) = -\bar{U}_r^e \cdot N_r \\ = c\kappa N_r + (1 + \eta\psi) N_r \left(\frac{\zeta}{\eta\psi} \right)^{\frac{1}{\phi\theta}} \left(\frac{cN_r}{\eta\theta\psi} \right)^{\frac{1}{\phi}} \quad (17)$$

ただし、 $\theta = \iota - 1$ 、 $\psi = 1/(1 + \theta + \eta\theta)$ 、 $\phi = (1 + \eta)(1 + \theta)/(\eta\theta)$ である。

(3) 機関分担の決定問題

機関分担は、以上で求めた通勤不効用 (8)、(17) が等しくなる $N_r = N_r^*$ 、 $N_a = N - N_r^*$ で均衡する。 N_r^* は以下の方程式より唯一に求まる。

$$(1 + \eta\psi) \left(\frac{\zeta}{\eta\psi} \right)^{\frac{1}{\phi\theta}} \left(\frac{cN_r^*}{\eta\theta\psi} \right)^{\frac{1}{\phi}} + \frac{c}{k} N_r^* + \left\{ c\kappa - \frac{c}{k} N - (c + v)w \right\} = 0 \quad (18)$$

5. 課金時の通勤時刻分布・機関分担決定問題

自動車・鉄道のそれぞれに混雑料金を賦課する状況、 $\rho_a(q) \geq 0, \rho_r(t) \geq 0$ を考える。ここでは、それぞれの機関の通勤不効用が独立に与えられることから、自動車通勤者数 N_a もしくは鉄道通勤者数 N_r が与えられた際のそれぞれの機関の社会的費用をそれぞれ最小化する鉄道輸送力・混雑料金（時刻別運賃）、道路混雑料金（ピークロードプライシング）を決定する問題を考える。

(1) 自動車通勤の通勤時刻分布

自動車通勤者数 N_a が与えられたとき、BN の容量が k で一定であることから無課金時の入社時刻分布を変更してスケジュールコストを改善することはできない。つまり、自動車通勤の社会的費用を最小化するには、混雑による不効用を混雑料金により完全に内部化することで達成できる。これは無課金時に被る混雑不効用に見合うように、BN での混雑が常に発生しないような混雑料金の額を設定することに等しい。このとき、通勤時刻分布 $a(q)$ 、 $m_a(q)$ 、混雑料金 $\rho_a(q)$ 、自動車通勤の社会的費用 SC_a^e は、自動車通勤者数 N_a を用いて次式で求まる。

$$a(q; N_a) + w = m_a(q; N_a) = q/k + (T_f - N_a/k) \quad (19)$$

$$\rho_a(q) = \frac{ec}{e + c + v} \frac{q}{k} \quad (20)$$

$$SC_a^o(N_a) = \frac{c}{2k} N_a^2 + (c+v)wN_a \quad (21)$$

このとき、混雑料金収入 CP_a は次式で表される。

$$CP_a(N_a) = \frac{1}{2} \frac{c}{k} N_a^2 \quad (22)$$

また、混雑料金の還元がないとき通勤不効用 \bar{U}_a^o は次式で表される。

$$\bar{U}_a^o(N_a) = -\frac{c}{k} N_a - (c+v)w \quad (23)$$

これは、自動車利用者数が等しければ、通勤不効用が U.E. 問題のそれと等しくなることを表している。

(2) 鉄道通勤の通勤時刻分布

混雑料金が社会的に見れば収入となり、各通勤者の混雑料金の支払額 $\rho_r(t)$ と相殺されるため、課金時の鉄道通勤の社会的費用 SC_r^o は次式で表される。

$$\begin{aligned} SC_r^o &= \int_{T_r}^{T_f} [\dot{m}_r(t)(U_r(t) - \rho_r(t))] dt \\ &= \int_{T_r}^{T_f} [s(t)u(t) \{s(t)^\eta + c(T_f - (t - \kappa))\} + \zeta u(t)^\iota] dt \quad (24) \end{aligned}$$

課金時の社会的費用 SC_r^o の最小化問題は、以下のように $s(t)$, $u(t)$ を制御変数とする最適制御問題として定式化できる。

$$\min_{s(t), u(t)} SC_r^o = \int_{T_r}^{T_f} [s(t)u(t) \{s(t)^\eta + c(T_f - (t - \kappa))\} + \zeta u(t)^\iota] dt \quad (25a)$$

$$s.t. \quad \dot{m}_r(t) = s(t)u(t) \quad (25b)$$

$$m_r(T_r) = 0, \quad m_r(T_f) = N_r \quad (25c)$$

なお、混雑料金の時刻毎の変化率は上記の問題の解を利用して、等効用条件 $\dot{U}_r(t) = 0$ を満たすように設定される。さらに、ここでは後で扱う賦課と還元を明確に区別するため、混雑料金の大きさは、混雑料金を除く通勤不効用が最も大きい通勤者の混雑料金が 0 となるように設定する。

最適制御理論を用いて求解すると⁵⁾、時刻別混雑度 $s(t)$ 、輸送力 $u(t)$ 、鉄道通勤者の入社時刻分布 $m_r(t)$ 、混雑料金 $\rho_r(t)$ 、最早鉄道通勤入社時刻 T_r 、運賃 RC 、社会的費用 SC_r^o は、鉄道通勤者数 N_r を用いて次式で求められる。

$$s(t; N_r) = \left(\frac{c(t - T_r(N_r))}{1 + \eta} \right)^{\frac{1}{\eta}} \quad (26)$$

$$u(t; N_r) = \left(\frac{\eta}{\zeta t} \right)^{\frac{1}{\theta}} \left(\frac{c(t - T_r(N_r))}{1 + \eta} \right)^{\frac{1+\eta}{\theta}} \quad (27)$$

$$m_r(t; N_r) = \frac{\zeta \theta}{c} \left(\frac{\eta}{\zeta t} \right)^{\frac{1+\theta}{\theta}} \left(\frac{c(t - T_r(N_r))}{1 + \eta} \right)^\theta \quad (28)$$

$$\rho_r(t; N_r) = \frac{c\eta}{1 + \eta} (t - T_r(N_r)) (= \eta s(t)^\eta) \quad (29)$$

$$T_r(N_r) = T_f - \frac{1 + \eta}{c} \left(\frac{cN_r}{\zeta \theta} \right)^{\frac{1}{\theta}} \left(\frac{\zeta t}{\eta} \right)^{\frac{\eta}{1+\eta}} \quad (30)$$

$$RC(N_r) = \zeta^{\frac{1}{\theta\theta}} \frac{\phi}{1 + \phi} \left(\frac{\eta}{t} \right)^{\frac{1}{1+\eta}} \left(\frac{cN_r}{\theta} \right)^{\frac{1}{\phi}} \quad (31)$$

$$SC_r^o(N_r) = c\kappa N_r + \zeta^{\frac{1}{\theta\theta}} N_r (1 + \eta) \frac{\phi}{1 + \phi} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\frac{\eta}{1+\eta}} \left(\frac{cN_r}{\theta} \right)^{\frac{1}{\phi}} \quad (32)$$

このとき、混雑料金収入 CP_r は次式で表される。

$$CP_r(N_r) = \zeta^{\frac{1}{\theta\theta}} N_r \frac{\phi\eta}{1 + \phi} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\frac{\eta}{1+\eta}} \left(\frac{cN_r}{\theta} \right)^{\frac{1}{\phi}} \quad (33)$$

また、混雑料金の還元がないとき、通勤不効用 \bar{U}_r^o は次式で表される。

$$\bar{U}_r^o(N_r) = -c\kappa - \zeta^{\frac{1}{\theta\theta}} (1 + 2\eta) \frac{\phi}{1 + \phi} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\frac{\eta}{1+\eta}} \left(\frac{cN_r}{\theta} \right)^{\frac{1}{\phi}} \quad (34)$$

鉄道利用者数が等しいとき、 $\bar{U}_r^o < \bar{U}_r^e$ である。これは、混雑を抑えるように混雑料金が設定されるために通勤時間帯が長くなり、料金収入の還元がなければ U.E. 時よりも効用水準が却って悪化することを表している。

(3) 混雑料金の賦課・還元スキームと機関分担の決定問題

以上のモデルを用いて、混雑料金の賦課・還元スキームの違いにより達成される均衡機関分担率を求める。なお、ここでは料金収入を全額還元すると仮定する。

(I) 自動車のみ賦課

自動車のみ混雑料金を賦課する場合(ケース i)、自動車通勤者の通勤時刻分布は式 (19) で表される。鉄道通勤者の通勤時刻分布は鉄道通勤者数が与えられれば、自動車通勤の通勤時刻分布によらず、U.E. 時の式 (13) で表される。このとき、混雑料金収入 (22) を鉄道に x 、自動車に $(1-x)$ 還元するスキームを行えば、自動車、鉄道のそれぞれの最終的な通勤効用 $\bar{U}_a^i(x; N_a)$, $\bar{U}_r^i(x; N_r)$ は次式で表される。

$$\bar{U}_a^i(x; N_a) = \bar{U}_a^o(N_a) + (1-x)CP_a/N_a \quad (35)$$

$$\bar{U}_r^i(x; N_r) = \bar{U}_r^e(N_r) + x \cdot CP_a/N_r \quad (36)$$

ただし、 $N_a + N_r = N$ である。

このとき実現する機関分担は、 x を所与とすると、 $\bar{U}_a^i(x; N_a) = \bar{U}_r^i(x; N_r)$ となる $N_r = N_r^*$, $N_a = N - N_r^*$ であり、以下の方程式より唯一に求まる。

$$\begin{aligned} (1 + \eta\psi) N_r^* \left(\frac{\zeta}{\eta\psi} \right)^{\frac{1}{\theta\theta}} \left(\frac{cN_r^*}{\eta\theta\psi} \right)^{\frac{1}{\phi}} - \frac{1}{2} \frac{c}{k} (N - N_r^*) (xN + N_r^*) \\ + \{c\kappa - (c+v)w\} N_r^* = 0 \quad (37) \end{aligned}$$

(II) 鉄道のみ賦課

鉄道のみ混雑料金を賦課する場合(ケース ii)、自動車通勤者の通勤時刻分布は U.E. 時の式 (7), (6) で表され、鉄道通勤者の通勤時刻分布は式 (28) で表される。このとき、混雑料金収入 (33) を鉄道に x 、自動車に $(1-x)$ 還元するスキームを行えば、自動車、鉄道のそれぞれの最終的な通勤効用 $\bar{U}_a^{ii}(x; N_a)$, $\bar{U}_r^{ii}(x; N_r)$ は次式で表される。

$$\bar{U}_a^{ii}(x; N_a) = \bar{U}_a^e(N_a) + (1-x)CP_r/N_a \quad (38)$$

$$\bar{U}_r^{ii}(x; N_r) = \bar{U}_r^o(N_r) + x \cdot CP_r/N_r \quad (39)$$

このとき実現する機関分担は、 x を所与とすると、以下の方程式の解 $N_r = N_r^*$, $N_a = N - N_r^*$ で唯一に求まる。

$$\zeta^{\frac{1}{\phi\theta}} \frac{\phi}{1+\phi} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\frac{\eta}{1+\eta}} \left(\frac{cN_r^*}{\theta}\right)^{\frac{1}{\phi}} \{(1+\eta)(2-x)N - (1+\eta)N_r^*\} - \frac{c}{k} (N - N_r^*)^2 + \{ck - (c+v)w\} (N - N_r^*) = 0 \quad (40)$$

(III) 自動車・鉄道の両方に賦課

自動車・鉄道の両方に混雑料金を賦課する場合(ケースiii)、自動車通勤者の通勤時刻分布は式(19)で、鉄道通勤者の通勤時刻分布は式(28)で表される。このとき、混雑料金収入($CP_a + CP_r$)を鉄道に x 、自動車に $(1-x)$ 還元するスキームを行えば、自動車、鉄道のそれぞれの最終的な通勤効用 $\bar{U}_a^{iii}(x; N_a)$, $\bar{U}_r^{iii}(x; N_r)$ は次式で表される。

$$\bar{U}_a^{iii}(x; N_a) = \bar{U}_a^o(N_a) + (1-x)(CP_a + CP_r)/N_a \quad (41)$$

$$\bar{U}_r^{iii}(x; N_r) = \bar{U}_r^o(N_r) + x(CP_a + CP_r)/N_r \quad (42)$$

このとき実現する機関分担は、 x を所与とすると、以下の方程式の解 $N_r = N_r^*$, $N_a = N - N_r^*$ で唯一に求まる。

$$\zeta^{\frac{1}{\phi\theta}} \frac{\phi}{1+\phi} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\frac{\eta}{1+\eta}} \left(\frac{c}{\theta}\right)^{\frac{1}{\phi}} (N_r^*)^{1+\frac{1}{\phi}} \{(1+\eta)(2-x)N - (1+\eta)N_r^*\} - \frac{1}{2k} (N - N_r^*)^2 (xN + N_r^*) + \{ck - (c+v)w\} N_r^* (N - N_r^*) = 0 \quad (43)$$

(IV) システム最適時の機関分担

各機関の効用が独立に表されるため、社会的総費用を最小化する問題は、式(21)+(32)を最小化する機関分担 $N_r = N_r^o$, $N_a = (N - N_r^o)$ を求める問題となる。この問題をシステム最適(S.O.)問題と呼ぶ。この問題の解は、以下の方程式を満たす $N_r = N_r^o$, $N_a = (N - N_r^o)$ で唯一に求まる。

$$(1+\eta)\zeta^{\frac{1}{\phi\theta}} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\frac{\eta}{1+\eta}} \left(\frac{cN_r^o}{\theta}\right)^{\frac{1}{\phi}} + \frac{c}{k} N_r^o + \left\{ck - \frac{c}{k}N - (c+v)w\right\} = 0 \quad (44)$$

料金収入を全額還元したとき、得られる通勤不効用は、通勤者が被る通勤不効用の下限値を表し、これ以上の効用の改善はできない。なお、この問題は前項(III)において社会的総費用を最小化する x を求める問題と等価である。

6. 数値計算例

過去の研究事例^{7),8)}などを参考に係数の値を以下のように設定する。 $c = 10$ (円/分), $e = 20$ (円/分), $k = 110$ (台/分), $v = 6.67$ (円/分), $w = 30$ (分), $\eta = 4.5$, $t = 3.1$, $\zeta = 0.0008$, $\kappa = 20$ (分), $N = 50,000$ (人), $T_f = 9:00$.

(1) 通勤時刻分布

図-2は利用者均衡(U.E.)下で実現する自動車・鉄道の通勤時刻分布である。 $N_a = 3,401$, $N_r = 46,599$ である。自動車通勤は7:59、鉄道通勤は7:55から開始される。

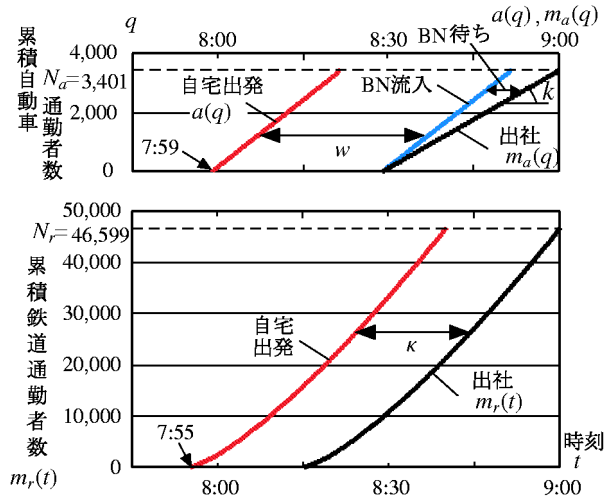


図-2 利用者均衡下の通勤時刻分布

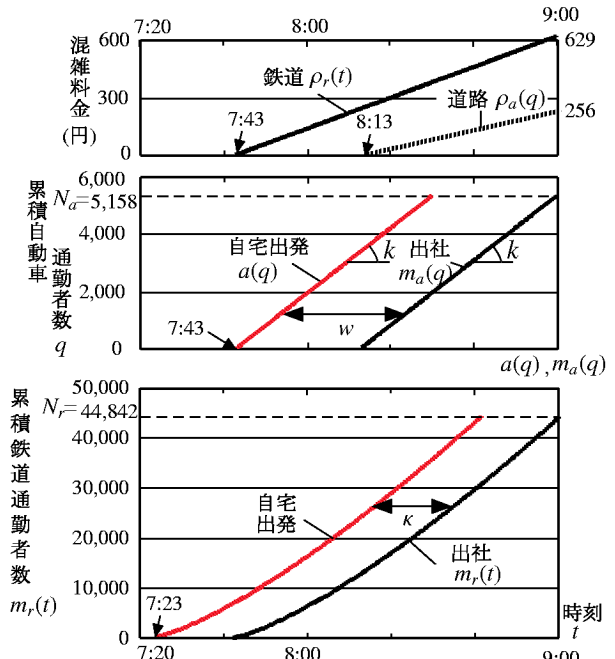


図-3 システム最適下の通勤時刻・混雑料金分布

システム最適下も同様に数値計算を行うと、実現する自動車・鉄道の通勤時刻分布は図-3のようになる。なお、あわせて混雑料金の設定額の分布も示している。 $N_a = 5,158$, $N_r = 44,842$ であり、U.E.下と比べて自動車通勤者が1,757人増加する。自動車通勤は7:43、鉄道通勤は7:23から開始される。鉄道通勤は利用者数が減少するにも関わらず、混雑度を抑えるために利用者均衡時に比べ通勤時間帯が長くなる。

(2) 混雑料金の賦課・還元スキーム間の効用比較

まず、料金収入の還元方法として、 $x = 0$ である(I)自動車利用者だけのケースと、 $x = 1$ である(II)鉄道利用者だけのケースを考える。

各賦課ケース(i), (ii)と、還元ケース(I), (II)を組み合わせたスキームに対して、機関分担率が与えられた時の各モードの還元後の通勤不効用を示したものが図-4である。このとき、実際に実現する均衡解はそれぞれの交点「」で与えられる。

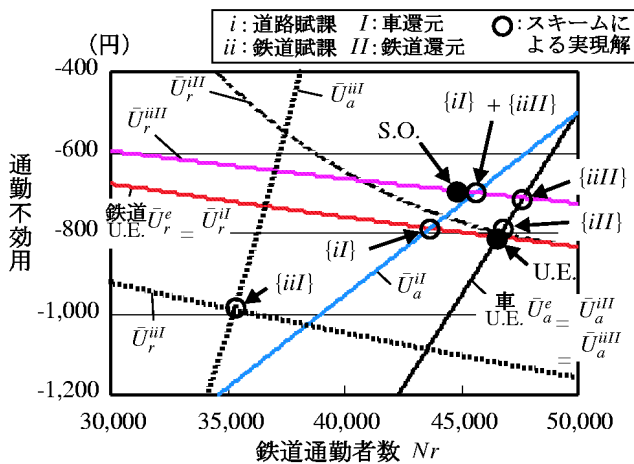


図-4 賦課・還元スキームごとの効用

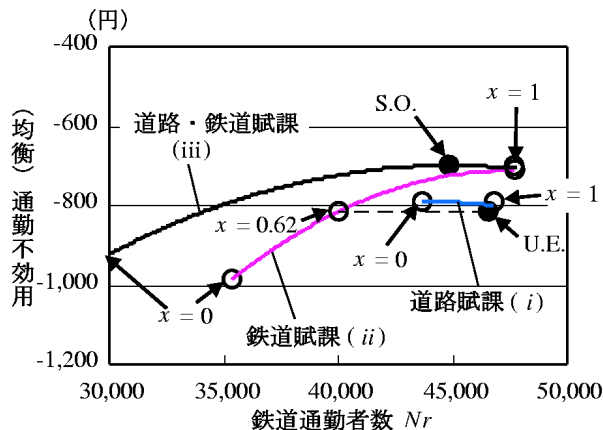


図-5 還元率ごとの均衡効用水準

利用者均衡下 (U.E.) では通勤不効用は -809(円) となる。

道路のみ混雑料金を導入、還元する場合 $\{iI\}$ 、道路利用者が大幅に増加するが、鉄道通勤者の減少に対して効用の弾力性が小さく、結果として効用はほとんど改善されない。一方、鉄道のみを導入、還元する場合 $\{iiIII\}$ 、鉄道利用者は増加し、自動車利用者が減少するが、自動車の弾力性が大きく、最終的な効用は大幅に増加する。また、自動車・鉄道の両方に課金を行い、料金収入を自モードにのみ還元する場合 ($\{iI\}$ と $\{iiIII\}$ の組み合わせ)、自動車通勤者が増加し、最終的な効用はさらに大きくなる。

道路に混雑料金を導入、鉄道利用者に還元する場合 $\{iII\}$ 、料金収入が少なく鉄道利用者 1 人当たり還元される額が小さいため、分担率、効用ともほとんど変化しない。また、逆のスキーム $\{iiiI\}$ では鉄道の通勤時間帯が長くなるため、鉄道利用者の効用は却って悪化する。そのため、道路利用者が大幅に増加し、結果的に効用は基本ケースである U.E. より悪化する。

次に、混雑料金収入を自動車と鉄道の利用者に分割して還元するスキーム ($0 \leq x \leq 1$) を考える。このとき、実現する効用水準と機関分担率を示したものが図-5 である。これより、自動車にのみ賦課した場合 $\{i\}$ 、機関分担率は変化するが、通勤不効用は還元率によらずほとんど改善しない。一方、鉄道にのみ賦課した場合 $\{iii\}$ 、 $x = 0.62$ で

U.E. の効用水準に回復でき、さらに x が増加するにしたがって、通勤不効用が改善される。

以上から、料金収入を他モードへ還元すると、効果が見られず、鉄道に課金する場合、却って効用を悪化させる。しかし、鉄道への還元が十分に行われるならば、鉄道へ課金を行うほうがより効用の改善効果大きい。

7. おわりに

本研究では、自動車と鉄道の 2 モードを考慮した出発時刻、機関選択を同時決定する理論モデルを構築し、求解した。さらに、混雑料金の賦課・還元スキームの違いが効用に与える影響の分析を行った。その結果、還元なしに鉄道への混雑料金賦課を実施すると効用が低下し、通勤者の理解が得られないという問題が生じる。しかし鉄道利用者への還元を行えば、自動車通勤者の需要を減少させる効果を含めた大きな効果が期待できることから、まず鉄道への導入、検討が必要であるといえる。

本研究の課題としては次のようなものがある。始業時刻が複数存在するケースやフレックスタイムが存在するケースでは、スケジュールコストの基準時刻が通勤者間で異なったり、企業の生産性への影響が問題となる。これらの影響を考慮した問題への拡張の必要がある。また、混雑料金施策の成功には時間価値を正しく計測し、混雑料金の額を設定する必要がある。そのため、実証分析を通じて時間価値をより正確に把握する必要がある。

参考文献

- 1) 高山 純一・谷 英賢・木村 実・小村 正隆 (1998), 「金沢市における時差出勤制度の社会実験」, 土木計画学研究・論文集, No.15, pp.821-830, 土木学会
- 2) Vickrey, W.S.(1969), 「Congestion theory and transport investment」, American Economic Review, Vol.59, pp.251-269
- 3) Arnott, R., de Palma, A. and Lindsey, R.(1990), 「Economics of a bottleneck」, Journal of Urban Economics, Vol.27, pp.111-130, Academic Press
- 4) 越 正毅 (1998), 「道路混雑対策としての時差出勤と混雑課金の効果についての一考察」, 交通工学, Vol.33, No.3, pp.65-74, 交通工学研究会
- 5) 小林 潔司・奥村 誠・永野 光三 (1997), 「鉄道通勤交通における出発時刻分布に関する研究」, 土木計画学研究・論文集, No.14, pp.895-906, 土木学会
- 6) Tabuchi Takatoshi (1993), 「Bottleneck congestion and modal split」, Journal of Urban Economics, Vol.34, pp.414-431, Academic Press
- 7) 志田州弘・古川敦・赤松隆・家田仁 (1989), 「通勤鉄道利用者の不効用関数パラメータの移転性に関する研究」, 土木計画学研究・講演集, No.12, pp.519-525, 土木学会
- 8) 永野 光三 (1998), 「大都市圏における鉄道通勤交通のマネジメント施策に関する研究」, 京都大学博士論文, pp.173-176