

自動車・鉄道間の混雑料金賦課・還元スキームの影響分析

広島大学大学院 学生員 吉村 充功
 広島大学大学院 正会員 奥村 誠

1. はじめに

近年、自動車に対して混雑料金の導入が検討されている。この施策は鉄道への転換を促すため、料金収入を鉄道のサービス水準向上に投入することも検討されている。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機関分担、効用がどのように変化するかを分析する。

2. 効用の定式化

(1) モデル化の仮定

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の直前にはボトルネック(point queue)が存在する。代表的な通勤者を想定し、 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、遅刻は認められていないとする。

(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、ボトルネックでの混雑待ち不効用(右辺1項)と早く自宅を出発するスケジュールコスト(右辺2項)、ガソリン代(右辺3項)からなるとする。

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

ただし、 $a(q)$ は自宅出発時刻、 $m_a(q)$ は出社(ボトルネック流出)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 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、 v は単位時間あたりのガソリン代(円/分)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、車内混雑(右辺1項)と早く自宅を出発するスケジュールコスト(右辺2項)、運賃 RC からなるとする。

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

ただし、 $s(t)$ は時刻 t にCBDに到着列車の混雑度、 η は混雑度の弾力値、 κ は通勤時間(分)(一定)である。運賃は総輸送費用を鉄道通勤者数で除した金額とする。

3. 利用者均衡下の通勤時刻分布決定問題

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、自動車・鉄道通勤不効用、

キーワード: TDM, 混雑料金, 機関分担, 賦課還元スキーム, 最適制御
 連絡先: 〒739-8527 広島県山鏡山 1-4-1, TEL&FAX: 0824-24-7849

輸送費用からなる社会的通勤費用を最小化する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

ボトルネック容量を k (台/分)とすれば、時刻分布 $a(q)$ 、 $m_a(q)$ 、自動車通勤の社会的通勤費用 SC_a は等効用条件より自動車通勤者数 N_a を用いて次式で求められる。

$$a(q) = \frac{e+v}{e+c+v} \frac{q}{k} + \left(T_f - \frac{N_a}{k} - w\right) \quad (3)$$

$$m_a(q) = q/k + (T_f - N_a/k) \quad (4)$$

$$SC_a = \frac{c}{k} N_a^2 + (c+v)wN_a \quad (5)$$

(2) 鉄道通勤の通勤時刻分布

鉄道通勤の社会的通勤費用 SC_r は、運賃が総輸送費用から求められることと等効用条件を考慮すると、式(6a)で表される。また、時刻 t までに都心に到着する累積鉄道通勤者数を $m_r(t)$ とすると、時刻別鉄道通勤者数 $\dot{m}_r(t)$ は式(6b)で表される。ここで鉄道通勤者数 N_r を所与とすると、 SC_r 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。

$$\min_{u(t)} SC_r = c(T_f - (T_r - \kappa))N_r + \int_{T_r}^{T_f} \zeta u(t)^t dt \quad (6a)$$

$$s.t. \quad \dot{m}_r(t) = s(t)u(t) \quad (6b)$$

$$m_r(T_r) = 0, \quad m_r(T_f) = N_r \quad (6c)$$

$$s(t) = (c(t - T_r))^{\frac{1}{\eta}} \quad (6d)$$

ただし、 $u(t)$ は時刻 t の輸送力、 ζ, t は輸送費用の比例係数、弾力値を表す。 T_r は最早鉄道通勤出社時刻である。最適制御理論を用いて求解すると、次式が求まる。

$$m_r(t) = \left(\frac{t - T_r}{T_f - T_r}\right)^{\frac{1}{\eta\theta\psi}} N_r, \quad T_r = T_f - \frac{1}{c} \left(\frac{cN_r}{\eta\theta\psi}\right)^{\frac{1}{\phi}} \left(\frac{\zeta}{\eta\psi}\right)^{\frac{1}{\phi}} \quad (7)$$

$$SC_r = c\kappa N_r + (1 + \eta\psi)N_r \left(\frac{\zeta}{\eta\psi}\right)^{\frac{1}{\phi}} \left(\frac{cN_r}{\eta\theta\psi}\right)^{\frac{1}{\phi}} \quad (8)$$

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

(3) 機関分担の決定問題

等効用条件より、 $U_r = U_a$ となる $N_r = N_r^*$ 、 $N_a = N - N_r^*$ で均衡する。 N_r^* は以下の方程式より求まる。

$$(1 + \eta\psi) \left(\frac{\zeta}{\eta\psi}\right)^{\frac{1}{\phi}} \left(\frac{c}{\eta\theta\psi}\right)^{\frac{1}{\phi}} (N_r^*)^{\frac{1}{\phi}} + \frac{c}{k} N_r^* + \left\{c\kappa - \frac{c}{k}N - (c+v)w\right\} = 0 \quad (9)$$

4. システム最適下の通勤時刻分布決定問題

等効用条件を制約にせず、社会的通勤費用を最小化する鉄道輸送力、鉄道混雑料金(時刻別運賃)、道路混

雑料金（ピークロードプライシング）を決定する問題をシステム最適(S.O.)問題と呼ぶ。なお、各通勤者の効用が事後的に等しくなるように料金収入が還元される。

(1) 自動車通勤の通勤時刻分布

自動車通勤では、常に混雑が発生しないように混雑料金が賦課されるため、通勤時刻分布、自動車通勤の社会的通勤費用 SC_a^o は次式で求まる。

$$a(q) = m_a(q) = q/k + (T_f - N_a/k) \tag{10}$$

$$SC_a^o = \frac{c}{2k} N_a^2 + (c + v) w N_a \tag{11}$$

(2) 最適通勤時刻分布と機関分担決定問題

鉄道通勤の社会的通勤費用 SC_r^o は式(12a)の積分項で表される。社会的通勤費用 SC^o の最小化問題は、 $N_a + N_r = N$ を利用して、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。

$$\min_{s(t), u(t)} SC^o = \frac{c}{2k} (N - N_r)^2 + (c + v) w (N - N_r) \tag{12a}$$

$$+ \int_{T_r}^{T_f} [s(t)u(t) \{s(t)^\eta + c(T_f - (t - \kappa))\} + \zeta u(t)^t] dt \tag{12a}$$

$$s.t. \quad \dot{m}_r(t) = s(t)u(t) \tag{12b}$$

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

これを解くと、機関分担は以下の方程式を満たす $N_r = N_r^o, N_a = (N - N_r^o)$ となり、 SC^o は式(14)で表される。

$$(1 + \eta) \zeta^{\frac{1}{\phi}} \left(\frac{1 + \theta}{\eta} \right)^{\frac{1}{1+\eta}} \left(\frac{c}{\theta} \right)^{\frac{1}{\phi}} (N_r^o)^{\frac{1}{\phi}} + \frac{c}{k} N_r^o + \left\{ c\kappa - \frac{c}{k} N - (c + v) w \right\} = 0 \tag{13}$$

$$SC^o = \frac{c}{2k} (N - N_r)^2 + (c + v) w (N - N_r) + c\kappa N_r + \zeta^{\frac{1}{\phi}} N_r (1 + \eta) \frac{\phi}{1 + \phi} \left(\frac{1 + \theta}{\eta} \right)^{\frac{1}{1+\eta}} \left(\frac{c N_r}{\theta} \right)^{\frac{1}{\phi}} \tag{14}$$

5. 数値計算例

過去の研究事例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-1は利用者均衡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。

システム最適下も同様に数値計算を行うと、 $N_a = 5,158$, $N_r = 44,842$ であり、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、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

システム最適(混雑料金課金)下では、交通管理者に混雑料金収入が発生する。そこで、混雑料金の賦課を

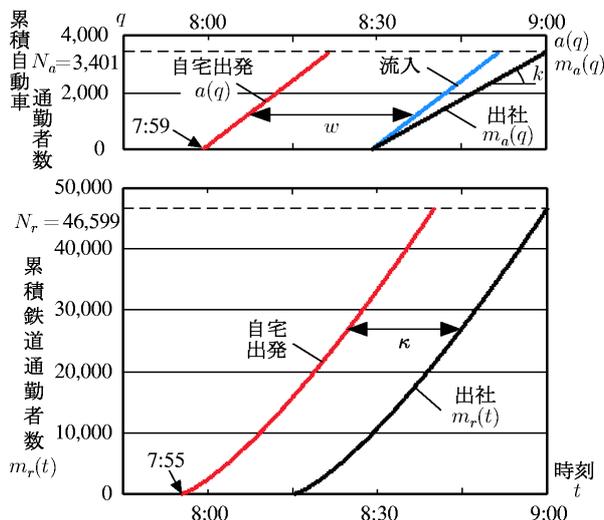


図-1 利用者均衡下の通勤時刻分布

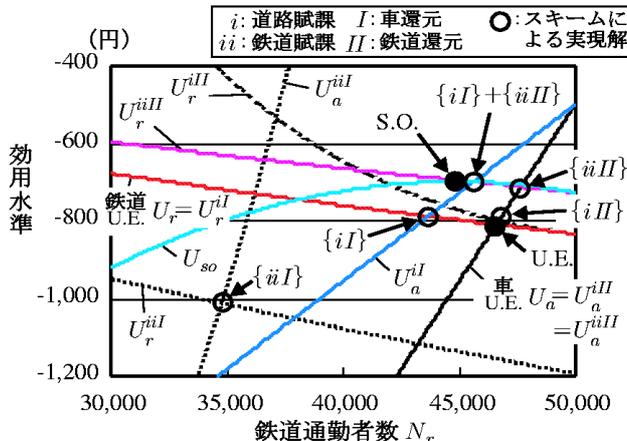


図-2 賦課・還元スキームごとの効用

i) 道路, ii) 鉄道, 料金収入の還元を I) 道路利用者, II) 鉄道利用者とする各ケースを考える。

以上のケース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効用水準を表したものが図-2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。

利用者均衡下(U.E.)では効用水準は-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ため、効用はほとんど改善されない。一方、鉄道だけに導入、還元する場合{iiII}, 鉄道利用者は増加するが効用は大幅に増加し、システム最適下(S.O.)の効用水準に近くなる。道路に混雑料金を導入、鉄道利用者に還元する場合{iiI}, 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}では道路利用者が大幅に増加し、却って効用が低下する。

6. 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。

今後は、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への拡張の必要がある。