鉄道と道路の選択を考慮した最適混雑料金の空間的特性

吉村 充功[1]・奥村 誠[2]

[1] 正会員　博 (工)　日本文理大学講師　工学部建設都市工学科 (〒 870-0397 大分市一木 1727)
[2] 正会員　博 (工)　広島大学助教授　大学院工学研究科社会環境システム専攻 (〒 739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

本論文では，道路と鉄道の 2 つの手段で通勤が可能な一次元空間上の都市を対象として，社会的通勤費用を最小化する混雑料金，コードンラインの設定および各手段の分担率の空間的分布を検討するための最適制御モデルを提案する．ピークロードプライシングが一切実施されないケース，コードンラインより郊外から通勤する道路利用者にのみ混雑料金を課金するケース，鉄道通勤者に乗車駅に応じて異なる混雑料金を課すシステム最適ケースのそれぞれについて，最適解が満足すべき条件を吟味するとともに，数値計算を通して，それぞれのケースを比較する．

KeyWords **:** *Congestion tax, cordon pricing, optimal control, modal split, TDM*

1. はじめに

近年，都市部の交通混雑問題を解決するため，様々な交通需要管理 (TDM) 施策が社会実験，本格実施されている．中でも，ピークロードプライシング (Peak-Load Pricing) 施策は，時差出勤など他の TDM 施策のように利用者・企業に導入を奨励するのとは異なり，利用者に直接混雑料金を課金することにより，交通手段，時刻の変更を促すため，大きな効果が期待されている．しかしながら，混雑料金の金額，時間帯などを適切に設定しなければ，かえって状況を悪化させる可能性がある [1)]．また，ピークロードプライシングを実施した場合，利用者は料金・コードンラインの設定，代替交通手段のサービス水準によって代替手段に交通手段を変更する可能性がある．このように，ピークロードプライシングを実施する際には，代替交通手段を含めた上で，どこにコードンラインを設定し，どのぐらいの混雑料金を課金すべきかを明らかにする必要がある．

本論文では，以上の視点に立ち，道路と鉄道の 2 つの交通手段で通勤が可能な一次元空間上の都市を対象に，社会的通勤費用を最小化する混雑料金の課金方法について，明らかにする．

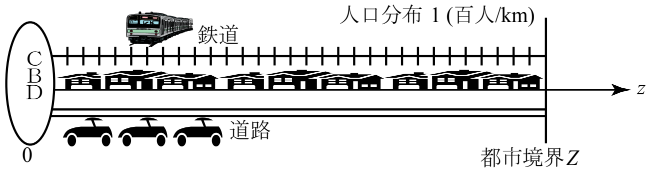
2. 既往の研究の概要

複数交通機関を扱ったピークロードプライシングの理論研究として，Tabuchi は 1OD ペアの自動車通勤問題に対し，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明らかにしている [2)]．Danielis and Marcucci は，この考えを拡張し，鉄道運賃に限界費用価格，平均費用価格を設定した分析を行っている [3)]．

Arnott らは，古典的な都市交通経済学の枠組みを応用し，道路に混雑料金を課金した際に，最適となる道路と鉄道の施設容量，鉄道の運賃を求めるという次善最適問題を扱うことを試みた [4)]。

吉村らは，フレックスタイム制とピークロードプライシング施策を組み合わせ，自動車と鉄道の双方を考慮した最適な通勤・始業時刻分布を分析できる理論モデルの構築を試みている [5)]．

ところで，混雑料金を賦課した場合，交通管理者に



図－1　仮想する都市形態

は混雑料金収入が発生する．混雑料金収入の用途としては，運用のための必要経費に利用するほか，交通施設整備や交通環境の改善のために利用するといったことが考えられている．さらに，施策により利用交通機関の転換が起こることが見込まれることから，代替交通機関の整備に充てることも検討されている[6)].

吉村らは，機関分担下で混雑料金収入を直接通勤者に還元することを仮定した分析を行い，鉄道通勤者への賦課･還元スキームが，通勤不効用を大きく改善し，かつ自動車通勤者数が減少する可能性を示した[7)].

以上の研究は問題を空間的に扱っていないため，居住地域が空間的に広がっている場合に，ピークロードプライシングがどのような影響をもたらすかといった分析ができない．

一方，自動車交通を対象に，一次元空間上の最適コードンプライシングを決定する問題として，Mun らの研究がある[8)]．Mun らは，最適コードンプライシングにより，コードンより都心側に位置する居住者のトリップ費用は低下し，郊外側の居住者のトリップ費用が増加することを理論的に明らかにしている．また，Verhoef は，Mun らのモデルを改良し，人口分布と労働力を内生化した次善コードンプライシング問題を分析している[9)].

本研究では，以上の複数交通機関を扱った研究，および自動車交通を対象とする一次元空間上のピークロードプライシング研究を参考に，道路と鉄道の 2 交通手段が存在する一次元空間上に分布する都市に対し，ピークロードプライシングを導入した場合に満足すべき最適性条件を導出する．

3. モデルの定式化

(1) モデル化の前提条件

モデル化にあたって，以下の仮定をおく．

- 都市は広がりをもたない都心 (CBD)0 から都市の境界 Z(km) まで，z 軸上の一次元空間で構成されるとする (**図-1**).
- すべての通勤者は，一次元空間上に一様に居住し，その人口分布を 1(百人/km) と基準化する．また，人口移動は考えない．
- 一次元空間上には道路と鉄道が整備され，すべての通勤者は 2 つの通勤手段のどちらかを用いて CBD に通勤するとする．ただし，鉄道駅は無限にあると考え，鉄道利用者は自宅前から鉄道に乗車できると仮定する．
- 通勤者の CBD に到着する時刻は，いずれの手段を用いた場合でも同じであり，通勤者はその時刻に CBD に到着するように自宅出発時刻を決定する．
- 道路容量，鉄道車両定員とも容量の限界は考えない．
- すべての通勤者は等質と考える．

(2) 通勤不効用の定式化

(a) 道路利用者の通勤不効用

z に居住する自動車通勤者の通勤不効用 $U_c(z)$ を次式で定義する．

$$U_c(z) = bz + e\int_0^z N(w)^{\xi}\mathrm{d}w \tag{1}$$

$b, e, \xi(>1)$ はそれぞれ定数である．右辺第 1 項は自由速度時の所要時間に関する不効用，第 2 項はこの通勤者が z から 0 まで走行する間に受ける道路混雑による不効用であり，ある微小区間 Δw の混雑度は，その空間の利用人数 $N(w)$ に依存するとする．このとき，$N(z)$ は z より郊外側の自動車通勤者数を表しており，次式で表される．

$$N(z) = \int_z^Z n_c(w)\mathrm{d}w \tag{2}$$

ただし，$n_c(w)$ は地点 w に居住する自動車通勤者数である．

以上より，

$$\dot{U}_c(z) = b + eN(z)^{\xi} \geqq 0 \tag{3}$$

$$\ddot{U}_c(z) = -e\xi N(z)^{\xi-1}n_c(z) \leqq 0 \tag{4}$$

となり，$U_c(z)$ は z に関し，上に凸の増加関数である．ただし，$\dot{U}_c(z) \equiv \mathrm{d}U_c(z)/\mathrm{d}z, \ddot{U}_c(z) \equiv \mathrm{d}^2U_c(z)/\mathrm{d}z^2$ である．

(b) 鉄道利用者の通勤不効用

同様に，z に居住する鉄道通勤者の通勤不効用 $U_r(z)$ を次式で定義する．

$$U_r(z) = az + c\int_0^z M(w)^\zeta \mathrm{d}w + \omega \tag{5}$$

$a, c, \zeta(>1)$ はそれぞれ定数であり，$a < b$ とする．右辺第 1 項は所要時間に関する不効用，第 2 項はこの通勤者が z から 0 まで乗車する間に受ける車内混雑による不効用であり，ある微小区間 Δw の混雑度は，その空間の乗車人数 $M(w)$ に依存するとする．第 3 項は鉄道輸送の固定費用に関する運賃であり，利用人数，乗車駅にかかわらず一定とする．このとき，$M(z)$ は z より郊外側の鉄道通勤者数を表しており，次式で表される．

$$M(z) = \int_z^Z n_r(w)\mathrm{d}w \tag{6}$$

ただし，$n_r(w)$ は地点 w に居住する鉄道通勤者数であり，定義より $n_r(z) + n_c(z) = 1$ である．

以上より，

$$\dot{U}_r(z) = a + cM(z)^\zeta \geqq 0 \tag{7}$$

$$\ddot{U}_r(z) = -c\zeta M(z)^{\zeta-1} n_r(z) \leqq 0 \tag{8}$$

となり，$U_r(z)$ は z に関し，上に凸の増加関数である．

(3) 社会的通勤費用の定式化

前節の通勤不効用の定義を用いると，都市全体での総通勤費用，すなわち社会的通勤費用 SC は，次式で定義できる．

$$SC = \int_0^Z [U_c(z)n_c(z) + U_r(z)n_r(z)]\,\mathrm{d}z \tag{9}$$

4. 施策別社会的通勤費用最小化問題

(1) 利用者均衡問題

本節では，通勤者の行動に任せた場合に実現する状況 (利用者均衡問題) について分析する．

(a) 前提条件

各通勤者は 2 つの交通手段の通勤不効用を比較し，不効用の小さい交通手段を必ず選択する．すなわち，通勤者はすべて等質であるという仮定より，混雑料金施策による利用者コントロールがない場合，次式が成立する．

$$n_r(z) = \begin{cases} 0 & \text{if } U_c(z) < U_r(z) \\ 0 \sim 1 & \text{if } U_c(z) = U_r(z) \\ 1 & \text{if } U_c(z) > U_r(z) \end{cases} \tag{10}$$

式 (10) は，z に居住する通勤者に関して，$U_c(z) < U_r(z)$ ならば自動車を，$U_c(z) > U_r(z)$ ならば鉄道を利用することを意味する．

ここで，$b \neq a$，$\xi \neq \zeta$ とすると，混雑料金による利用者コントロールがない場合，$U_c(z) = U_r(z)$ が z 軸に対し，連続的に成り立つとは考えにくい．そこで以下では，鉄道通勤が固定費用 ω を必要とすることから，z^* より都心側に居住する通勤者は自動車を，郊外側に居住する通勤者は鉄道を利用すると仮定し，分析を進める．

(b) 実現可能解

仮定より，郊外側累積通勤者数 $N(z), M(z)$ は次式で計算される．

$$N(z) = \int_z^{z^*} 1\mathrm{d}w = z^* - z \qquad z \in [0, z^*] \tag{11}$$

$$M(z) = \int_z^Z 1\mathrm{d}w = Z - z \qquad z \in [z^*, Z] \tag{12}$$

また，各通勤不効用 $U_c(z), U_r(z)$ は次式で計算される．

$$U_c(z) = bz + \frac{e}{\xi+1}\left[z^{*\xi+1} - (z^* - z)^{\xi+1}\right] \tag{13}$$

$$U_r(z) = az + c\,(Z - z^*)^\zeta z^* + \omega + \frac{c}{\zeta+1}\left[(Z - z^*)^{\zeta+1} - (Z - z)^{\zeta+1}\right] \tag{14}$$

仮定より，$z = z^*$ のとき，$U_c(z^*) = U_r(z^*)$ となる．

$$\frac{e}{\xi+1}z^{*\xi+1} - c\,(Z - z^*)^\zeta \cdot z^* + (b - a)\,z^* - \omega = 0 \tag{15}$$

方程式 (15) の解 z^* は，利用者均衡問題における自動車通勤者と鉄道通勤者の切り替え点となる．

なお，式 (15) の左辺を $f(z^*)$ とおくと，

$$\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}z^*} = ez^{*\xi} + c\,(Z - z^*)^{\zeta-1}\,[(\zeta+1)\,z^* - Z] + b - a \tag{16}$$

となるので，$z^* \geqq Z/(\zeta+1)$ のとき，解の唯一性が保証される．

社会的通勤費用 SC^e は次式で表される．

$$
\begin{aligned}
SC^e &= \int_0^{z^*} U_c(z)\mathrm{d}z + \int_{z^*}^{Z} U_r(z)\mathrm{d}z \\
&= \frac{b}{2}z^{*^2} + \frac{e}{\xi+2}z^{*^{\xi+2}} + \frac{a}{2}\left(Z^2 - z^{*^2}\right) + \omega\,(Z - z^*) \\
&\quad +c\,(Z - z^*)^{\zeta+1}\left[z^* + \frac{1}{\zeta+2}\,(Z - z^*)\right] \qquad (17)
\end{aligned}
$$

(2) コードンプライシング問題

次に，コードンラインより郊外から自動車で通勤する利用者に混雑料金を課金する状況(コードンプライシング問題) について分析する．

コードンライン z^c を通過する際に，一律 μ(円) 課金するとすると，課金された自動車通勤者の通勤不効用 $U_c^c(z)$ は $U_c^c(z) = U_c(z) + \mu, z \in [z^c, Z]$ となる．すなわち，利用者均衡問題と同様に，$U_c(z) = U_r(z), z \in [0, z^c)$ もしくは $U_c^c(z) = U_r(z), z \in [z^c, Z]$ が z 軸に対し，連続的に成り立つとは考えにくい．そのため，z^o より都心側に居住する通勤者は自動車を，郊外側に居住する通勤者は鉄道を利用すると仮定し，分析を進める．

ところで，混雑料金は利用者にとっては支出となるが，社会的に見れば収入となるため，社会的通勤費用ではキャンセルアウトする．そのため，社会的通勤費用を最小化するコードンプライシング設定は，式 (17) を最小化する z^* を決定する問題と同値である．このとき，最適切り替え点 $z^* = z^o$ について，次式が成立する．

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial SC}{\partial z^o} &= e z^{o^{\xi+1}} - c\,(\zeta+1)\,z^o\,(Z - z^o)^{\zeta} + (b-a)\,z^o - \omega \\
&= 0 \qquad (18)
\end{aligned}
$$

なお，式 (18) の左辺を $f(z^o)$ とおくと，

$$
\begin{aligned}
\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}z^o} &= e\,(\xi+1)\,z^{o^{\xi}} + c\,(\zeta+1) \\
&\quad \times (Z - z^o)^{\zeta-1}\,[(\zeta+1)\,z^o - Z] + b - a \qquad (19)
\end{aligned}
$$

となるので，$z^o \geqq Z/(\zeta+1)$ のとき，解の唯一性が保証される．

以上より，コードンプライシング μ は，最適切り替え点 z^o において，$U_r(z^o) = U_c^c(z^o) (= U_c(z^o) + \mu)$ となるように課金する必要がある．これは，コードンライン z^c において，混雑料金 μ(円) を課金することにより達成できる．コードンラインは $z_c \in [0, z^o]$ の区間内であれば，位置に関係なく同じ効果を持つことになる．

社会的通勤費用 SC^o は次式で表される．

$$
\begin{aligned}
SC^o &= \int_0^{z^o} U_c(z)\mathrm{d}z + \int_{z^o}^{Z} U_r(z)\mathrm{d}z \\
&= \frac{b}{2}z^{o^2} + \frac{e}{\xi+2}z^{o^{\xi+2}} + \frac{a}{2}\left(Z^2 - z^{ot^2}\right) + \omega\,(Z - z^o) \\
&\quad +c\,(Z - z^o)^{\zeta+1}\left[z^o + \frac{1}{\zeta+2}\,(Z - z^o)\right] \qquad (20)
\end{aligned}
$$

(3) システム最適問題 (鉄道ピークロードプライシング問題)

本節では，鉄道通勤者に混雑料金を付加する状況を分析する．

(a) 定式化

鉄道通勤者に混雑料金を賦課する場合，IC 型乗車券などを利用することにより，乗車区間に応じ異なる混雑料金を設定することが可能である．そこで，社会的通勤費用を最小化するように，通勤者ごとに異なる混雑料金 $\mu(z)$ を設定する問題を考える．このとき，自動車と鉄道の不効用差 $U_c(z) - U_r(z)$ と同額の混雑料金 $\mu(z)$ を課金すると，自動車，鉄道のどちらを利用しても最終的な不効用を等しくすることができる．そのため，社会的通勤費用最小化問題 (システム最適問題) は，以下のように鉄道利用者数 $n_r(z)$ を制御変数とする不等式制約最適制御問題として定式化できる．

$$
\begin{aligned}
\min_{n_r(z)}\ SC = \int_0^{Z} &[bz + eK(z) + \{az + cL(z) + \omega \\
&-bz - eK(z)\}\,n_r(z)]\,\mathrm{d}z \qquad (21a)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\text{s.t.}\quad & \dot{K}(z) = N(z)^{\xi} && (21b)\\
& \dot{L}(z) = M(z)^{\zeta} && (21c)\\
& \dot{N}(z) = n_r(z) - 1 && (21d)\\
& \dot{M}(z) = -n_r(z) && (21e)\\
& g_1(z) = -n_r(z) \leqq 0 && (21f)\\
& g_2(z) = n_r(z) - 1 \leqq 0 && (21g)\\
K(0) = 0,\ & L(0) = 0, N(0) + M(0) = Z && (21h)\\
& N(Z) = 0, M(Z) = 0 && (21i)
\end{aligned}
$$

ただし，$K(z) = \int_0^z N(w)^{\xi}\mathrm{d}w$, $L(z) = \int_0^z M(w)^{\zeta}\mathrm{d}w$ である．社会的通勤費用 (21a) は汎関数，式 (21b)-(21e) はそれぞれ状態変数 $K(z), L(z), N(z), M(z)$ の定義式に対する状態方程式である．式 (21f), (21g) は鉄道利用者数 $n_r(z)$ に関する物理的制約条件である．式 (21h) は

状態変数の初期条件，式 (21i) は状態変数の終端条件である．

本問題は，不等式制約最適制御問題として，最適性条件を導くことができる[10]．

(b) **最適性条件**

最適制御問題 (21) に対して，ハミルトニアン $H(z)$ を次のように定義する．

$$
\begin{aligned}
H(z) = {} & bz + eK(z) + \{az + cL(z) + \omega - bz - eK(z)\}\, n_r(z) \\
& + \psi_1(z)N(z)^{\xi} + \psi_2(z)M(z)^{\zeta} \\
& + \psi_3(z)\,(n_r(z) - 1) - \psi_4(z)n_r(z) \qquad (22)
\end{aligned}
$$

ただし，$\psi_1(z)$-$\psi_4(z)$ はそれぞれ $K(z), L(z), N(z), M(z)$ に対応する随伴変数である．

最適性条件より，以下の式が成立する．

$$\dot{\psi}_1(z) = -H_K = -e\,(1 - n_r(z)) \qquad (23a)$$

$$\dot{\psi}_2(z) = -H_L = -cn_r(z) \qquad (23b)$$

$$\dot{\psi}_3(z) = -H_N = -\xi\psi_1(z)N(z)^{\xi-1} \qquad (23c)$$

$$\dot{\psi}_4(z) = -H_M = -\zeta\psi_2(z)M(z)^{\zeta-1} \qquad (23d)$$

$$
\begin{aligned}
& H_{n_r}(z) + \lambda_1(z)g_{1n_r}(z) + \lambda_2(z)g_{2n_r} \\
& = az + cL(z) + \omega - bz - eK(z) + \psi_3(z) - \psi_4(z) \\
& \qquad - \lambda_1(z) + \lambda_2(z) \\
& = U_r(z) - U_c(z) + \psi_3(z) - \psi_4(z) \\
& \qquad - \lambda_1(z) + \lambda_2(z) = 0 \qquad (23e)
\end{aligned}
$$

ただし，$H_K \equiv \partial H(z)/\partial K(z)$ である．$\lambda_1(z), \lambda_2(z)$ は式 (21f), (21g) に対応するベクトル値関数であり，次式を満足する．

$$\lambda_i(z) \geqq 0,\ \lambda_i(z)g_i(z) = 0, \quad i = 1, 2 \qquad (24)$$

式 (23e) は $\lambda_1(z) = \lambda_2(z) = 0$, すなわち，$n_r(z) \neq 0, 1$ のとき，鉄道利用者と自動車利用者の平均不効用の差が，それぞれの限界不効用の差と一致することを意味する．

最適性条件 (23) を整理しまとめると，社会的通勤費用を最小化する鉄道利用者数 $n_r(z)$ は，$n_r(z) \neq 0, 1$ のとき，$n_r(z)$ の不連続点を除き次式を満足する．

$$
\begin{aligned}
& c\zeta\,(1 + \zeta)\left[\int_z^Z n_r(w)\mathrm{d}w\right]^{\zeta-1} n_r(z) \\
& = e\xi\,(1 + \xi)\left[\int_z^Z (1 - n_r(w))\,\mathrm{d}w\right]^{\xi-1} (1 - n_r(z)) \qquad (25)
\end{aligned}
$$

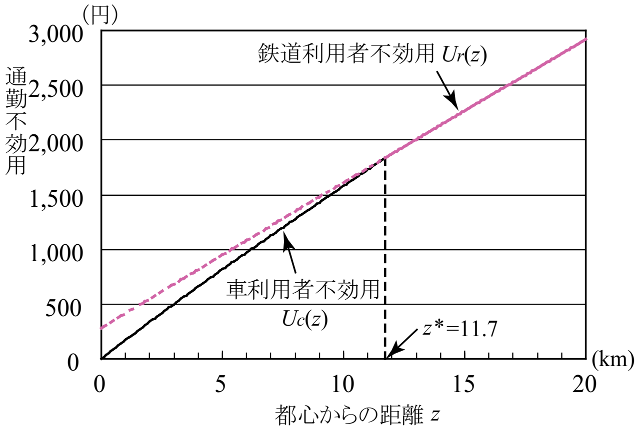


図 – 2　利用者均衡下における通勤不効用

以上より，社会的通勤費用を最小化する鉄道利用者数 $n_r(z)$ は，$n_r(z) = 0$, $n_r(z) = 1$, 式 (25) を満足する $n_r(z)$ の組み合わせとして求めることができる．

システム最適解における社会的通勤費用 SC^{opt} は，式 (25) を満足する $n_r(z)$ に基づいて，式 (21a) より計算できる．また，各ケースにおける社会的通勤費用の大小関係について，次式が成立する．

$$SC^e > SC^o \geqq SC^{opt} \qquad (26)$$

5. 数値計算例

前章において導出した各施策下において達成される状況を比較するため，数値計算を行う．

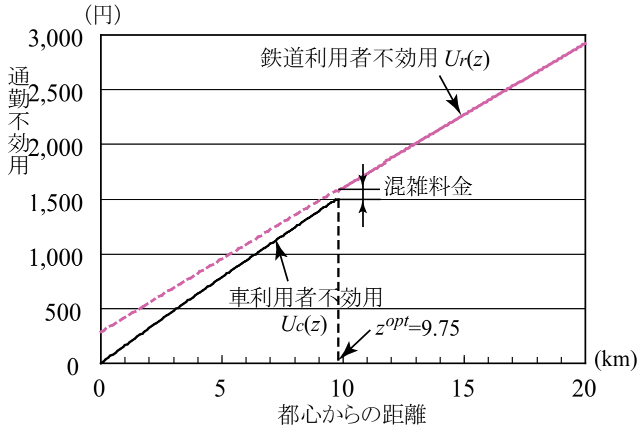
各係数値を以下のように設定する．$a = 130$(円/km), $b = 150$(円/km), $c = 0.05$(円), $e = 0.05$(円), $\xi = 2.5$, $\zeta = 1.5$, $\omega = 300$(円), $Z = 20$(km).

(1) 利用者均衡下における実現解

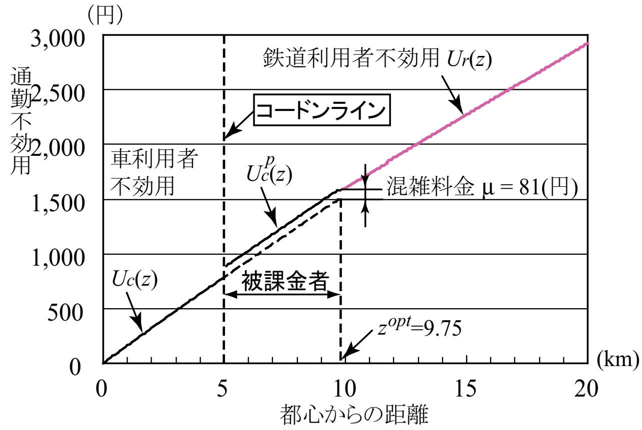
利用者均衡下における自動車と鉄道の利用切り替え点は $z^* = 11.7$(km) となる．このとき，各通勤者 z の自動車，鉄道利用時の通勤不効用は**図** –2 のとおりとなり，z^* より都心側の通勤者は自動車を，郊外側の通勤者は鉄道を利用して通勤する．また，社会的通勤費用は $SC^e = 3,058,551$(円) である．

(2) コードンプライシング下における最適解

コードンプライシング実施時の最適な自動車と鉄道の切り替え点は $z^o = 9.75$(km) となり，利用者均衡下と比較して $z = [9.75, 11.7]$(km) の居住通勤者にとっては，自動車通勤による不効用が鉄道通勤による不効用を上回るため，自動車通勤から鉄道通勤に利用



図－3　最適コードンプライシング下における通勤不効用



図－4　コードンプライシングの設定例と通勤不効用

交通手段を変更する．このとき，各通勤者 z の自動車，鉄道利用時の課金額を除いた通勤不効用は**図**–3 のとおりである．

z = [0, 9.75](km) のいずれか 1 点 (z^c) にコードンラインを設定し，混雑料金を $\mu = 81$(円) に設定すると，z^c より郊外の自動車通勤者の最終的な通勤不効用は，混雑料金 μ だけ上にシフトする．その結果，z^o より郊外の通勤者は鉄道通勤を選択する．$z^c = 5$(km) に設定した場合の各通勤者 z の通勤不効用を**図** –4 に示す．

また，社会的通勤費用 $SC^o = 3,043,216$(円) となり，利用者均衡時と比較して，15,335(円) の不効用の改善効果がある．

(3)　システム最適下における最適解

前章で求めた，最適制御問題の最適性条件は，必要条件である．そこで，z に沿った鉄道利用者数 $n_r(z)$ を，$n_r(z) = 0$, $n_r(z) = 1$, 式 (25) を満足する $n_r(z)$ のいずれかとして，その組み合わせとして数値計算により求めた．その結果，システム最適解は，コードンプライシング時と同じく，$n_r(z) = 0, z \in [0, 9.75]$, $n_r(z) = 1, z \in [9.75, 20]$ となる．また，社会的通勤費用 $SC^{opt} = 3,043,216$(円) となる．

この解を実現するには，z = [9.75, 11.7](km) の鉄道通勤者に，自動車通勤による不効用を下回るように，料金を還元する必要がある．

このように，コードンプライシングと，鉄道混雑料金による最適解が一致する場合，どちらの方式によってピークロードプライシングを実施しても，同様の効果を得ることができる．

6.　おわりに

本論文では，道路と鉄道の 2 交通手段が利用できる一次元空間上の都市を対象に，無課金状態，道路通勤者に対してコードンプライシングを実施した状態，鉄道通勤者に乗車区間に応じた混雑料金課金を実施した状態 (システム最適) の各ケースにおける最適解が満足する条件を導出した．

また，数値計算により各ケースにおける社会的通勤費用を計算し，混雑料金課金によりどの程度社会的通勤費用が節約できるのか，また，利用交通手段の分担率がどのように変化するかを明らかにした．その結果，コードンプライシングによりシステム最適解と同様の結果が得られるケースがあることを明らかにした．

本論文では様々な仮定を設けている．そのため，今後の課題として，居住場所の変更を認めたり，交通機関の交通容量を考慮したり，人口分布が CBD からの距離に応じて異なるようなケースに問題を拡張する必要がある．また，数値計算に用いた各係数値の大きさを実証分析により求める必要がある．

参考文献

1) 吉村充功・奥村誠・松本寛史：フレックスタイム制度下における最適ピークロードプライシング, 土木計画学研究・論文集, Vol.19, No.4, pp.823-830, 2002.

2) Tabuchi, T.: Bottleneck congestion and modal split, *Journal of Urban Economics*, Vol. 34, pp. 414–431, 1993.

3) Danielis, R. and Marcucci, E.: Bottleneck road congestion pricing with a competing railroad service, *Transportation Research Part E*, Vol. 38, pp. 379–388, 2002.

4) Arnott, R. and Yan, A.: The two-mode problem: Second-best pricing and capacity, *Review of Urban and Regional Development Studies*, Vol. 12, No. 3, pp. 170–199, 2000.

5) 吉村充功・奥村誠 : 自動車・鉄道の分担を考慮したフレックスタイム制度下の最適通勤・始業時刻分布の分析, 土木計画学研究・論文集, Vol.20, No.4, pp.903-912, 2003.

6) 東京 TDM 研究会編 (編) : 日本初のロードプライシング, 都政新報社, 2000.

7) Yoshimura, M. and Okumura, M. : Congestion charge and return schemes on modal choice between road and railroad, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.5, pp.1845-1858, 2003.

8) Mun, S., Konishi, K. and Yoshikawa, K. : Optimal cordon pricing, *Journal of Urban Economics*, Vol.54, 21-38, 2003.

9) Verhoef, E. : Second-best congestion pricing schemes in the monocentric city, *Journal of Urban Economics*, Vol.58, pp.367-388, 2005.

10) 志水 清孝：最適制御の理論と計算法, pp. 54–104, コロナ社, 1994.

SPATIAL CONFIGURATION OF OPTIMAL PRICING CONSIDERING ROAD-RAIL MODAL CHOICE

Mitsunori YOSHIMURA and Makoto OKUMURA

An optimal control problem is formulated to solve the spatial configuration of congestion price and modal choice of road and railroad minimizing the social commuting cost on an one-dimensional city. We firstly assess the optimal conditions for the three cases; no-toll, cordon pricing for road-users and congestion charge for railroad- users. After that we compare total performance of those cases with no-toll condition.