

公的資金の限界費用を考慮した 財政規模の異なる複数都市間の交通ネットワークにおける最適料金水準

環境社会基盤工学分野
都市交通研究室
金子 武瑠
指導教員：加藤 哲平

1. 背景と目的

近年、地方の公共交通機関の存廃を巡る議論が高まっている。今後、人口減少が深刻化していくなかで公共交通の利用者はさらに減少すると予想され、サービスを維持していくためには、運賃収入以外に沿線自治体等からの財源調達が必要になる。

しかし、地方自治体の財政規模は小さくさまざまであり、財政規模の小さい自治体では、公共交通への支出が他の財源を大きく圧迫してしまう。その結果、他の行政サービスの水準が低下し社会厚生に損失が発生する。森杉・河野(2012)¹⁾はこのような財源調達の限界費用(Marginal Cost of public Funds, 以下MCF)を考慮した上で、効率的な高速道路料金水準を検討している。MCFとは、財源を1円調達することに伴う社会厚生への減少分であり、財源として調達される費用にMCFを乗じることで、財源調達に伴う厚生損失を算出することが可能となる。この研究では、こうした厚生損失を考慮して社会的余剰を最大化する料金水準を求めている。また、河野ら²⁾は橋梁の補修計画において、代替案によって異なる補修工事費用や所得税収入の違いから生じるMCFの内省的な変化を考慮した上で、最適な補修計画を分析している。この研究において、MCFが財政制約のシャドウプライスによって定義できることが示されている。つまり、財政規模が大きい(財政制約が緩い)ほどMCFは小さくなるため、財政規模の小さい運営主体は相対的に非効率的な資金調達を行う必要が生じる。したがって、財政規模の小さい地方部の公共交通を維持するためには、このような影響を考慮する必要があると考えられる。

また、市営バスや並行在来線などのように自治体ごとに交通サービスが運営されているケースが多い。その場合、自治体もしくは自治体が出資する運営会社等が運営主体となり、(国からの補助金によってある程度はコントロールされているものの)サービス料金の決定権者となる。その場合、隣接する交通サービスの運営主体が設定する料金水準を踏まえながら、適切な料金水準を決定することが求められる。Kohら³⁾は、複数都市間にまたがる交通ネットワークにおいて、各都市が他都市における料金水準等の影響を考慮したうえで自都市内の料金水準を決定する状況を分析している。この研究では、都市間での資金の流動を「税輸出行為」と定義し、自都市から他都市に資金が流れる場合には損失、他都市から自都市に資金が流れる場合には収入として考慮している。このような税輸出行為によって生じる都市間の競争をナッシュ均衡によって表現し、各都市の最適な料金水準を導出している。地方部の交通ネットワ

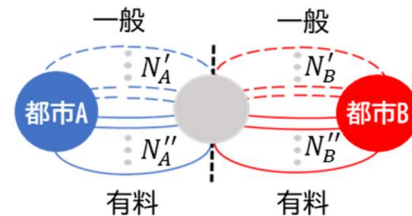


図-1 想定するネットワーク

ークにおいては、赤字が見込まれる区間のみ民間事業者から運営が切り離され、自治体等が運営するケースもある。このため、それぞれの交通サービスの料金収入をどの地域の住民がどれだけ支払っているのかという視点は重要であると考えられる。

本研究では、これら2つの研究をもとに財政規模の異なる2つの都市を跨る交通ネットワークにおいて、各都市の社会厚生が最大となるような都市内に存在する有料リンクの料金水準について分析する。その際に、財政規模に応じた公的資金の限界費用について考慮する。また、数値実験を行い、財政規模の違いがもたらす料金水準・社会厚生の違いや資金の再配分スキーム等について考察する。

2. 想定するネットワーク

本研究では、財政規模の異なる2つの都市がそれぞれ自都市内に存在する課金リンクの料金水準を決定するような状況(Kohら³⁾)を考える。また、これらの都市間の移動のみを考える。本来、各都市内には複数のノード・リンクが存在するが、簡単のためネットワーク上には各都市を表す2つのノード(A, B)および都市の境界を表す1つのゲートノードが存在し、かつ各都市を表すノードとゲートノード間に複数リンクが存在すると仮定する(図-1)。また、都市 $i \in \{A, B\}$ とゲートノード間を結ぶリンク集合を N_i とし、その内課金リンク・非課金リンクの集合をそれぞれ N'_i 、 N''_i とおく。先述した通り、課金リンク集合 N'_i の料金水準は、それぞれを管轄する都市 $i \in \{A, B\}$ が独自に決定すると仮定する。

都市 $i \in \{A, B\}$ からもう一方の都市への経路集合を K^i とおき、経路 $k \in K^i$ の交通量を f_k とおく。この時、リンク a の交通量は以下で表される。

$$x_a(\mathbf{f}) = \sum_{i \in \{A, B\}} \sum_{k \in K^i} f_k \delta_{a,k} \quad \forall a \in \{N_A \cup N_B\} \quad (1)$$

ここで、 $\delta_{a,k}$ はリンク a が経路 k に含まれていれば1、それ以外は0の値をとるダミー変数を表す。リンク

a の移動時間は BPR 関数等の関数 $t_a(x_a)$ によって表されると仮定する. したがって, 経路 k の移動時間は以下のように表現できる.

$$T_k(\mathbf{f}) = \sum_{a \in \{N_A \cup N_B\}} t_a(x_a) \cdot \delta_{a,k} \quad (2)$$

$$\forall k \in K^i, \forall i \in A, B$$

また, 経路 k の通行料金及び燃料税は, 経路 k を構成するリンクの通行料金 p_a と燃料税 o_a の和として, それぞれ以下のように表すことができる.

$$P_k = \sum_{a \in \{N_A \cup N_B\}} p_a \cdot \delta_{a,k} \quad \forall k \in K^A \quad (3)$$

$$O_k = \sum_{a \in \{N_A \cup N_B\}} o_a \cdot \delta_{a,k} \quad \forall k \in K^A \quad (4)$$

3. 最適料金の導出に向けた定式化

前節で示した想定するネットワークをもとに, 各都市に存在する課金リンクの最適料金水準の定式化を行う. なお, モデルネットワークでは都市 A と都市 B の 2 都市を想定しているが, 変数名が若干変化するのみで, 基本的には同一の定式化ができるため, ここでは都市 A の利用者と行政の行動のみを示す. 具体的には, 都市 B の利用者・行政の行動は, 本章で示される定式化に含まれる上付きの A がついた記号を上付きの B の記号に入れ替えることで表現できる.

(1) 都市 A に居住する代表的個人の行動

利用者は時間と所得に関する制約下で効用最大化に基づいて自身の行動を決定すると仮定する. 都市 A に居住する利用者の効用は, 以下に示す準線形な効用関数で表されると仮定する.

$$U^A = z^A + u^A(\mathbf{f}^A, L^A) + h^A(G^A) \quad (5)$$

ここで, z^A は合成財の消費量, \mathbf{f}^A は都市 A を起点とする経路の交通量ベクトル, L^A は余暇時間, G^A は行政の道路建設費以外の支出, $h^A(G^A)$ は道路建設費以外の支出 (道路以外の行政サービス) に関する個人の効用関数を表す. これに対し, 所得制約と時間制約をそれぞれ以下のように仮定する.

$$z^A + \sum_{k \in K^A} (P_k + O_k) f_k = (w^A - \tau) t_L^A \quad (6)$$

$$t_L^A + L^A + \sum_{k \in K^A} t_k(\mathbf{f}) \cdot f_k = T^A \quad (7)$$

ここで, P_k は経路 k の通行料金, O_k は経路 k の燃料税, w^A は賃金率, τ は所得税率, t_L^A は労働時間をそれぞれ表す. 上記の制約条件付き効用最大化を解くことで得られる間接効用関数 V^A は以下のように表される.

$$V^A = wT^A + v^A(w, \mathbf{C}^{A*}) + h^A(G^A) \quad (8)$$

ここで, \mathbf{C}^{A*} は都市 A を起点とする経路の一般化費用ベクトルを表す. その要素である経路 k の一般化

費用は以下のように表される.

$$C_k = P_k + O_k + wT_k(\mathbf{f})$$

$$= P_k + O_k + w \sum_{a \in \{N_A \cup N_B\}} t_a(x_a) \cdot \delta_{a,k} \quad (9)$$

$$\forall k \in K^A$$

4. 最適料金水準

課金リンクの料金水準は, 都市内の社会厚生を最大化によって決定すると仮定する. ただし, 他都市の料金水準を決定することはできないため, その料金水準は外生的に与えられているものとする. 都市内の社会厚生はその年に居住する代表的個人の間接効用で表すことができる.

$$\max_{G^A, p_{a \in N_A}} V^A \quad (10)$$

社会厚生を最大化するにあたって, 都市には財政制約が存在する. 都市の支出は都市内の交通サービスの維持費用および交通サービス以外に対する支出であり, 収入は自都市内の交通サービス (リンク課金および燃料税) と労働所得税による収入, 国からの補助金 \bar{R}^A であると仮定する. よって, 財政制約は以下のように表現できる.

$$G^A + I^A \leq \sum_{a \in N_A'} (p_a + o_a)x_a + \sum_{a \in N_A} o_a x_a + \tau t_L^A + \bar{R}^A \quad (11)$$

社会厚生関数と財政制約式から, ラグランジュ関数を立て, $G^A > 0$ のもとで KKT 条件を整理すると下記のようになる. なお, ϕ^A はラグランジュ乗数である.

$$\phi^A = V^A$$

$$+ \phi^A \left\{ \sum_{a \in N_A'} (p_a + o_a)x_a + \sum_{a \in N_A} o_a x_a + \tau t_L^A \right. \\ \left. + \bar{R}^A - G^A - I^A \right\} \quad (12)$$

$$\left\{ \frac{\partial \phi^A}{\partial G^A} = \frac{\partial h^A}{\partial G^A} - \phi^A = 0 \right. \\ \left. G^A > 0 \right. \quad (13)$$

$$\left\{ \frac{\partial \phi^A}{\partial p_a} = \frac{\partial V^A}{\partial p_a} \right. \\ \left. + \frac{\partial \left[\phi^A \left\{ \sum_{a' \in N_A'} (p_{a'} + o_{a'})x_{a'} + \sum_{a' \in N_A} o_{a'} x_{a'} \right\} \right]}{\partial p_a} = 0 \right. \quad (14)$$

$$\left\{ \frac{\partial \phi^A}{\partial p_a} = \left\{ \sum_{a \in N_A'} (p_a + o_a)x_a + \sum_{a \in N_A} o_a x_a + \tau t_L^A + \bar{R}^A - G^A - I^A \right\} \leq 0 \right. \\ \left. \phi^A \frac{\partial \phi^A}{\partial p_a} = 0, \phi^A \geq 0 \right. \quad (15)$$

式 (15) について, 整理すると以下のようになる.

$$\frac{\partial h^A}{\partial G^A} = \varphi^A \quad (16)$$

式 (16) の左辺はその他の支出に対する代表的個人の効用の変化率を表しており，ラグランジュ乗数 φ^A (=財政制約のシャドウプライス) が MCF に一致していることがわかる。

また， x_a は $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_{a'}, \dots, p_{N_a})$ の関数であることから $x_a = x_a(\mathbf{p})$ と表すことができる。この時，経路 k の一般化費用は次のように表せる。

$$\begin{aligned} C_k &= P_k + O_k + wT_k(\mathbf{f}) \\ &= P_k + O_k + w \sum_{\substack{a \in \{N_A \cup N_B\} \\ \forall k \in K^A}} t_a(x_a(\mathbf{p})) \cdot \delta_{a,k} \end{aligned} \quad (17)$$

式(14)の第二項は次のように表せる。

$$\begin{aligned} &\partial \left[\varphi^A \left\{ \frac{\sum_{a' \in N_A''} (p_{a'} + o_{a'}) x_{a'}(\mathbf{p}) + \sum_{a' \in N_A'} o_{a'} x_{a'}(\mathbf{p}) + \tau t_L^A + \bar{R}^A - G^A - I^A}{\sum_{a' \in N_A'} o_{a'} x_{a'}(\mathbf{p}) + \tau t_L^A + \bar{R}^A - G^A - I^A} \right\} \right] \\ &= \varphi^A(x_a(\mathbf{p})) + \sum_{\varphi^A a' \in (N_A'' \cap a)} (p_{a'} + o_{a'}) \frac{\partial(x_{a'}(\mathbf{p}))}{\partial p_a} \\ &\quad + \varphi^A \sum_{a' \in N_A'} o_{a'} \frac{\partial(x_{a'}(\mathbf{p}))}{\partial p_a} \\ &= \varphi^A \left\{ \begin{aligned} &x_a(\mathbf{p}) + \sum_{a' \in (N_A'' \cap a)} (p_{a'} + o_{a'}) \frac{\partial(x_{a'}(\mathbf{p}))}{\partial p_a} \\ &+ \sum_{a' \in N_A'} o_{a'} \frac{\partial(x_{a'}(\mathbf{p}))}{\partial p_a} \end{aligned} \right\} \quad (18) \end{aligned}$$

次に，式(14)の第一項は，以下のよう表される。

$$\frac{\partial V^A}{\partial p_a} = \sum_{k \in K^A} \frac{\partial V^A}{\partial C_k} \frac{\partial C_k}{\partial p_a} \quad (19)$$

ここで，間接効用関数に対して，ロウの定理より，

$$-\frac{\partial V^A}{\partial C_k} = f_k \quad \forall k \in K^A \quad (20)$$

これを代入すると，以下のよう表される。

$$\frac{\partial V^A}{\partial p_a} = - \sum_{k \in K^A} f_k \frac{\partial C_k}{\partial p_a} \quad (21)$$

ここで， $C_k = P_k + O_k + wT_k(\mathbf{f})$ より，

$$\frac{\partial C_k}{\partial p_a} = \frac{\partial(P_k + O_k + wT_k(\mathbf{f}))}{\partial p_a} \quad (22)$$

右辺の 3 つの項はそれぞれ以下のよう表される。

第 1 項：

$$\frac{\partial P_k}{\partial p_a} = \delta_{a,k} \quad (23.a)$$

第 2 項：

$$\frac{\partial O_k}{\partial p_a} = 0 \quad (23.b)$$

第 3 項：

$$\begin{aligned} \frac{\partial wT_k(\mathbf{f})}{\partial p_a} &= w \sum_{a'} \delta_{a,k} \frac{\partial t_{a'}(x_{a'})}{\partial x_{a'}} \frac{\partial x_{a'}}{\partial p_a} \\ &= w \delta_{a,k} \frac{\partial t_a(x_a)}{\partial x_a} \frac{\partial x_a}{\partial p_a} \\ &\quad + w \sum_{a' \neq a} \delta_{a',k} \frac{\partial t_{a'}(x_{a'})}{\partial x_{a'}} \frac{\partial x_{a'}}{\partial p_a} \end{aligned} \quad (23.c)$$

これらを代入すると，式(14)の第二項は以下のよう表される。

$$\frac{\partial V^A}{\partial p_a} = - \sum_k \left[\begin{aligned} &f_k \delta_{a,k} \left(1 + w \frac{\partial t_a(x_a)}{\partial x_a} \frac{\partial x_a}{\partial p_a} \right) \\ &+ f_k \left(w \sum_{a' \neq a} \delta_{a',k} \frac{\partial t_{a'}(x_{a'})}{\partial x_{a'}} \frac{\partial x_{a'}}{\partial p_a} \right) \end{aligned} \right] \quad (24)$$

したがって，式 (14) は以下のよう表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi^A}{\partial p_a} &= - \sum_k \left[\begin{aligned} &f_k \delta_{a,k} \left(1 + w \frac{\partial t_a(x_a)}{\partial x_a} \frac{\partial x_a}{\partial p_a} \right) \\ &+ f_k \left(w \sum_{a' \neq a} \delta_{a',k} \frac{\partial t_{a'}(x_{a'})}{\partial x_{a'}} \frac{\partial x_{a'}}{\partial p_a} \right) \end{aligned} \right] \\ &\quad + \varphi^A \left[\begin{aligned} &x_a(\mathbf{p}) + \sum_{a' \in N_A''} (p_{a'} + o_{a'}) \frac{\partial(x_{a'}(\mathbf{p}))}{\partial p_a} \\ &+ \sum_{a' \in N_A'} o_{a'} \frac{\partial(x_{a'}(\mathbf{p}))}{\partial p_a} \end{aligned} \right] \quad (25) \end{aligned}$$

これより，社会厚生最大化問題の一階の最適性条件から，リンク $a (\in N_A'')$ の最適料金水準 p_a^* は以下のよう求めることができる。

$$\begin{aligned} p_a^* &= \frac{1}{\varphi^A} \sum_k \left[f_k \delta_{a,k} \left(w \frac{\partial t_a(x_a)}{\partial x_a} \right) \right. \\ &\quad - \left. \left[\begin{aligned} &\sum_{a' \in (N_A'' \cap a)} p_{a'} \frac{\partial(x_{a'}(\mathbf{p}))}{\partial p_a} \\ &- \frac{w}{\varphi^A} \sum_k \sum_{a' \neq a} f_k \delta_{a',k} \frac{\partial t_{a'}(x_{a'})}{\partial x_{a'}} \frac{\partial(x_{a'}(\mathbf{p}))}{\partial p_a} \end{aligned} \right] \frac{\partial p_a}{\partial(x_a(\mathbf{p}))} \right. \\ &\quad \left. + \left[\begin{aligned} &\frac{1}{\varphi^A} \sum_k f_k \delta_{a,k} - x_a(\mathbf{p}) \\ &+ \sum_{a' \in (N_A'' \cap a)} (o_{a'}) \frac{\partial(x_{a'}(\mathbf{p}))}{\partial p_a} \end{aligned} \right] \frac{\partial p_a}{\partial(x_a(\mathbf{p}))} - o_a \right] \quad (26) \end{aligned}$$

以上が都市 A の課金リンクにおける最適料金水準である。都市 B の課金リンクにおける最適料金水準も同様に導出することができる。

なお，各都市の最適料金水準は隣接する都市の料金水準の関数となっており，次のように表すことができる。

$$P_{a \in A}^* = P_a(\mathbf{f}; P_{a \in B}) \quad (27)$$

$$P_{a \in B}^* = P_a(\mathbf{f}; P_{a \in A}) \quad (28)$$

よって，この問題は都市 A と都市 B の不動点問題となっている。初期値を与えて繰り返し計算を行い，

一定の値に収束した場合にはその値が各課金リンクの最適料金水準となる。

5. 数値実験

(1) テストネットワーク

前節では財政規模の異なる2つの都市がそれぞれ自都市内に存在する課金リンクの料金水準を決定するような状況を想定し、最適料金水準の定式化を行った。そのなかでは、各都市に複数の課金リンクと一般リンクがそれぞれ跨る状況を想定していたが、本章では、財政規模の異なる2つの都市にそれぞれ課金リンクと一般リンクが一本ずつ跨っている状況(図-2)を想定する。

これに前節で導出された最適料金水準の定式化にテストネットワークを当てはめて数値実験を行った。

OD (Origin-Destination) は、都市Aから都市Bと都市Bから都市Aの2つを想定する。各OD間の経路と経路を構成するリンクの組み合わせについて表-1に示す。また、各経路の交通量については、経路ごとに需要関数を設定し、社会厚生を最大化することで決定される。各経路の需要関数を表-2に示す。

ここで $\alpha, \beta_{a_1}, \beta_{b_1}$ はパラメータである。なお β_{a_1}, β_{b_1} は、需要の料金変化率を表している。この値が大きい場合、料金の変化に対して需要が大きく変動する。以上をもとに各リンクの交通需要関数を表-3に示す。

続いて、各リンクの所要時間関数については次のように表す。

$$t_{a_1}(X_{a_1}) = \tau_{a_1} \left[1 + \gamma \left(\frac{X_{a_1}}{k_{a_1}} \right)^\eta \right] \quad (29.a)$$

$$t_{a_2}(X_{a_2}) = \tau_{a_2} \left[1 + \gamma \left(\frac{X_{a_2}}{k_{a_2}} \right)^\eta \right] \quad (29.b)$$

$$t_{b_1}(X_{b_1}) = \tau_{b_1} \left[1 + \gamma \left(\frac{X_{b_1}}{k_{b_1}} \right)^\eta \right] \quad (29.c)$$

$$t_{b_2}(X_{b_2}) = \tau_{b_2} \left[1 + \gamma \left(\frac{X_{b_2}}{k_{b_2}} \right)^\eta \right] \quad (29.d)$$

ここで、 τ_i はリンク $i \in \{a_1, a_2, b_1, b_2\}$ における自由走行時間、 k_i はリンク $i \in \{a_1, a_2, b_1, b_2\}$ における道路交通容量をそれぞれ表している。また、 γ, η はパラメータである。

また、都市 $i \in \{A, B\}$ に居住する代表的個人の行政のその他の支出による効用関数 $h^i(G^i)$ は次のように特定化する。

$$h^i(G^i) = v \cdot G^i \cdot \ln(G^i) - v \cdot G^i + \zeta \cdot G^i \quad (30)$$

ここで v, ζ はパラメータである。

3章で示したように、これを G^i で微分するとMCF(=φ)が求められる。

$$\varphi(G^i) = v \cdot \ln(G^i) + \zeta \quad (31)$$

(2) パラメータ

本実験では地方公共交通を想定する。具体的には

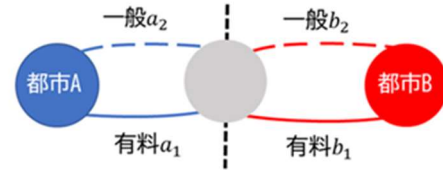


図-2 テストネットワーク

表-1 各OD間の経路と経路を構成するリンクの組み合わせ

| | OD ペア | |
|------|-------------|-------------|
| | 都市 A⇒都市 B | 都市 B⇒都市 A |
| 経路 1 | $a_1 + b_1$ | $b_1 + a_1$ |
| 経路 2 | $a_1 + b_2$ | $b_1 + a_2$ |
| 経路 3 | $a_2 + b_1$ | $b_2 + a_1$ |
| 経路 4 | $a_2 + b_2$ | $b_2 + a_2$ |

表-2 各経路の需要関数

| | OD ペア | |
|------|--|--|
| | 都市 A⇒都市 B | 都市 B⇒都市 A |
| 経路 1 | $e^{(\alpha - \beta_{a_1} p_{a_1} - \beta_{b_1} p_{b_1})}$ | $e^{(\alpha - \beta_{b_1} p_{b_1} - \beta_{a_1} p_{a_1})}$ |
| 経路 2 | $e^{(\alpha - \beta_{a_1} p_{a_1} + \beta_{b_1} p_{b_1})}$ | $e^{(\alpha - \beta_{b_1} p_{b_1} + \beta_{a_1} p_{a_1})}$ |
| 経路 3 | $e^{(\alpha + \beta_{a_1} p_{a_1} - \beta_{b_1} p_{b_1})}$ | $e^{(\alpha + \beta_{b_1} p_{b_1} - \beta_{a_1} p_{a_1})}$ |
| 経路 4 | $e^{(\alpha + \beta_{a_1} p_{a_1} + \beta_{b_1} p_{b_1})}$ | $e^{(\alpha + \beta_{b_1} p_{b_1} + \beta_{a_1} p_{a_1})}$ |

表-3 各リンクを含む経路の組み合わせと需要関数 (都市 A 発)

| | 経路の組み合わせ | 需要関数 |
|-----------|-----------------------|---|
| リンク a_1 | $f_1^{AB} + f_2^{AB}$ | $e^{(\alpha - \beta_{a_1} p_{a_1} - \beta_{b_1} p_{b_1})} + e^{(\alpha - \beta_{a_1} p_{a_1} + \beta_{b_1} p_{b_1})}$ |
| リンク a_2 | $f_3^{AB} + f_4^{AB}$ | $e^{(\alpha + \beta_{a_1} p_{a_1} - \beta_{b_1} p_{b_1})} + e^{(\alpha + \beta_{a_1} p_{a_1} + \beta_{b_1} p_{b_1})}$ |
| リンク b_1 | $f_1^{AB} + f_3^{AB}$ | $e^{(\alpha - \beta_{a_1} p_{a_1} - \beta_{b_1} p_{b_1})} + e^{(\alpha + \beta_{a_1} p_{a_1} - \beta_{b_1} p_{b_1})}$ |
| リンク b_2 | $f_2^{AB} + f_4^{AB}$ | $e^{(\alpha - \beta_{a_1} p_{a_1} + \beta_{b_1} p_{b_1})} + e^{(\alpha + \beta_{a_1} p_{a_1} + \beta_{b_1} p_{b_1})}$ |

表-4 BPR 関数に含まれるパラメータ

| 記号 | 名目 | 値 |
|--------------|-------------------|-------|
| τ_{a_1} | リンク a_1 の自由走行時間 | 10 |
| τ_{a_2} | リンク a_2 の自由走行時間 | 15 |
| τ_{b_1} | リンク b_1 の自由走行時間 | 10 |
| τ_{b_2} | リンク b_2 の自由走行時間 | 15 |
| k_{a_1} | リンク a_1 の道路容量 | 10000 |
| k_{a_2} | リンク a_2 の道路容量 | 10000 |
| k_{b_1} | リンク b_1 の道路容量 | 10000 |
| k_{b_2} | リンク b_2 の道路容量 | 10000 |
| γ | BPR 関数のパラメータ | 0.48 |
| η | BPR 関数のパラメータ | 2.89 |

利用者の増加に伴う交通渋滞や公共交通サービスにおける不快感による影響は極めて小さいケースを想定する。よって、各リンクの道路容量は交通需要に対して大きな値を設定した。それぞれ表-4、表-5に

まとめた。

また、燃料税については一般的に政府の財源として徴収される。本研究において、都市 A, B は地方公共団体を想定しているため財源とはならない。このため、燃料税のパラメータはゼロとした。

また、その他支出額に応じた MCF は表-6 のようになる。

(3) 最適料金水準及びリンク交通量

3 章で導出された最適料金水準 (式 (26)) に基づき算出されたリンク a_1 の最適料金水準を以下に示す。

p_{a_1}

$$\frac{1}{\varphi^A} \left[\left(\frac{-1}{\beta_{a_1}} \right) + (K+M)^\eta \left(w \tau_{a_1} \gamma \eta \left(\frac{1}{k_{a_1}} \right)^\eta \right) \right] + w \frac{1}{\varphi^A} \left(-(K+M)^\eta \left(\tau_{a_2} \gamma \eta \left(\frac{1}{k_{a_2}} \right)^\eta \right) - \left[\frac{-1}{\beta_{a_1}} + O_{a_1} + O_{a_2}(-1) \right] \right)$$

$$= \left[\begin{array}{l} -\frac{1}{\varphi^A} \left[-\eta \beta_{a_1} (K+M)^\eta w \tau_{a_1} \gamma \eta \left(\frac{1}{k_{a_1}} \right)^\eta \right] \\ \frac{\beta_{a_1} (2K)^{\eta+1}}{-(K+M)} \cdot \left(\tau_{b_1} \gamma \eta \left(\frac{1}{k_{b_1}} \right)^\eta \right) \\ + \frac{\beta_{a_1} (2M)^{\eta+1}}{-(K+M)} \cdot \left(\tau_{b_2} \gamma \eta \left(\frac{1}{k_{b_2}} \right)^\eta \right) \\ + \left(-(K+M)^\eta (\eta+2) \beta_{a_1} \right) \cdot \left(\tau_{a_2} \gamma \eta \left(\frac{1}{k_{a_2}} \right)^\eta \right) \\ + [O_{a_2}((-2\beta_{a_1}))] + 1 \\ \dots (32) \end{array} \right] - w \frac{1}{\varphi^A}$$

where

$$K = e^{(\alpha - \beta_{b_1} p_{b_1})} \quad (33.a)$$

$$M = e^{(\alpha + \beta_{b_1} p_{b_1})} \quad (33.b)$$

以上が都市 A の課金リンク a_1 における最適料金水準である。なお、都市 B の課金リンク b_1 についても、都市 A の課金リンク a_1 の状況設定と同じであるため、同様の手順で導出することができる。

先述の通り、本問題は都市 $i \in \{A, B\}$ の課金リンクにおける料金水準 p_{a_1}, p_{b_1} の不動点問題となっている。それぞれの料金水準に初期値ゼロを与えて数値計算を行ったところ値が収束した。各都市の MCF に応じた最適料金水準を表-7 に、各都市発の各リンク交通量を表-8 にそれぞれ示す。

都市 A の MCF が一定の下では、都市 B の MCF の増加に伴い、 p_a は一定に推移し p_b は増加している。 p_a が一定に推移した結果から、隣接する都市 B の料金水準 p_b が変動したことによる影響を受けてないことが分かる。今回のような交通渋滞を考慮しないケースでは料金決定の際に隣接する他都市の料金水準による影響は受けないと言える。一方で渋滞を考慮したケースでは隣接する都市の影響を受けることを確認した。また、 p_b は都市 B の MCF の増加に伴い上昇する結果となった。行政の財源が乏しい

表-5 その他のパラメータ

| 記号 | 名目 | 値 |
|---------------|------------------|--------|
| α | 需要関数のパラメータ | 4.693 |
| β_{a_1} | リンク a_1 のパラメータ | 0.008 |
| β_{b_1} | リンク b_1 のパラメータ | 0.008 |
| w | 賃金率 | 30 |
| O_{a_1} | リンク a_1 の燃料税 | 0 |
| O_{a_2} | リンク a_2 の燃料税 | 0 |
| O_{b_1} | リンク b_1 の燃料税 | 0 |
| O_{b_2} | リンク b_2 の燃料税 | 0 |
| v | MCF 関数のパラメータ | -0.185 |
| ζ | MCF 関数のパラメータ | 3.0807 |

表-6 交通サービス以外の行政支出額と MCF

| その他支出額 (G) | MCF(φ) |
|------------|------------------|
| 75000 | 1.0 |
| 45000 | 1.1 |
| 25000 | 1.2 |
| 15000 | 1.3 |
| 8750 | 1.4 |

表-7 各都市の MCF に応じた最適料金水準

| | | 都市 B の MCF | | | |
|------------|-----|------------|-------|-------|-------|
| | | 1.0 | 1.2 | 1.4 | |
| 都市 A の MCF | 1.0 | p_{a_1} | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | | p_{b_1} | 0.00 | 20.82 | 35.69 |
| | 1.2 | p_{a_1} | 20.82 | 20.81 | 20.81 |
| | | p_{b_1} | 0.00 | 20.81 | 35.69 |
| | 1.4 | p_{a_1} | 35.69 | 35.69 | 35.69 |
| | | p_{b_1} | 0.00 | 20.81 | 35.69 |

表-8 各都市の MCF に応じた各リンクの交通量

| | | 都市 B の MCF | | | | | | |
|------------|-----|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 1.0 | | 1.2 | | 1.4 | | |
| | | A 発 | B 発 | A 発 | B 発 | A 発 | B 発 | |
| 都市 A の MCF | 1.0 | a_1 | 218 | 218 | 221 | 221 | 227 | 227 |
| | | a_2 | 218 | 218 | 221 | 221 | 227 | 227 |
| | | b_1 | 218 | 218 | 185 | 185 | 164 | 164 |
| | 1.2 | b_2 | 218 | 218 | 258 | 258 | 291 | 291 |
| | | a_1 | 185 | 185 | 187 | 187 | 192 | 192 |
| | | a_2 | 258 | 258 | 261 | 261 | 268 | 268 |
| | 1.4 | b_1 | 221 | 221 | 187 | 187 | 166 | 166 |
| | | b_2 | 221 | 221 | 261 | 261 | 295 | 295 |
| | | a_1 | 164 | 164 | 166 | 166 | 171 | 171 |
| | | a_2 | 291 | 291 | 295 | 295 | 302 | 302 |
| | | b_1 | 227 | 227 | 192 | 192 | 171 | 171 |
| | | b_2 | 227 | 227 | 268 | 268 | 302 | 302 |

と、財源を捻出した際に発生する厚生損失が大きくなるため、利用者からの料金収入により維持費用を賄うことになる。

リンク交通量については、各リンクの需要関数に両都市の料金水準が含まれていることから、料金が一定の都市においても他都市の料金変動の影響を受

ける結果となった。

(4) 都市間の資金流動

各都市の MCF に応じた都市 B から都市 A への資金流動額を表-9 に示す。

都市 A の MCF が一定で都市 B の MCF が増加した場合、都市 B から都市 A への流動額は増加している。都市 A の料金の増加に伴い、利用者数は減少したものの、減少幅が小さかったため流動額が増加したと考えられる。

(5) 社会厚生

都市 A の社会厚生関数については、次のように表される。

$$V^A = wT^A + \frac{1}{\beta_1} \cdot e^\alpha \cdot e^{-\beta_{a1}(p_{a1}+p_{b1})} + h^A(G^A) \quad (34)$$

数値計算の結果について、各都市の MCF に応じた社会厚生を図-3 に示す。ここでは、最も高い社会厚生となる両都市の MCF が 1.0 のケースを基準として、3 つのケースにおける社会厚生との差を比較する。また、ケース 4、ケース 5 では各都市の交通サービス以外に充てる財源を合算し、均等に再配分した際の社会厚生の変動について比較する。

ケース 1 からケース 3 まで都市 B の MCF は 3 つのケースとも 1.2 で一定だが、隣接する都市 A の MCF が増加するにつれて、都市 B の社会厚生は小さいながらも減少している。隣接する都市の MCF が大きくなると、課金リンクの料金水準も上昇し、自都市から隣接する都市への流出額が増加する。これにより、都市 B は隣接する都市 A の MCF の増加による影響を受けて、社会厚生が減少したと考えられる。また、ケース 4 については都市 A の MCF が 1.0 で交通サービス以外の財源が 75,000、都市 B の MCF が 1.4 で交通サービス以外の財源が 8,750 の場合における社会厚生を示している。ケース 5 はケース 4 における両都市の交通サービス以外の財源の和である 83,750 を各都市に対して均等に 41,875 ずつ再配分した場合の社会厚生を示した。再配分によって両都市の社会厚生の総和は約 10% 上昇した。均一化によって財源の小さい都市における行政サービスに充てられる資金が大幅に増加したため、社会厚生も大幅に増加した。これより「両都市の社会厚生の総和」という視点で考察した場合、都市間の財政規模が大きく異なるケースでは、財源を均等に再配分することで社会厚生の総和が増加することが確認できた。

6. まとめ

本研究では、「財政規模に応じて異なる公的資金の限界費用」と「都市間競争の原理」の 2 つ枠組みを考慮した最適料金水準と社会厚生について定式化を行った。数値実験の結果より、社会厚生は隣接する都市の財政規模に応じて異なることから、隣接す

表-9 各都市の MCF に応じた都市 B から都市 A への資金流動額

| | | 都市 B の MCF | | |
|------------|-----|------------|-------|-------|
| | | 1.0 | 1.2 | 1.4 |
| 都市 A の MCF | 1.0 | 0 | 0 | 0 |
| | 1.2 | 3,849 | 3,901 | 4,005 |
| | 1.4 | 5,858 | 5,939 | 6,098 |

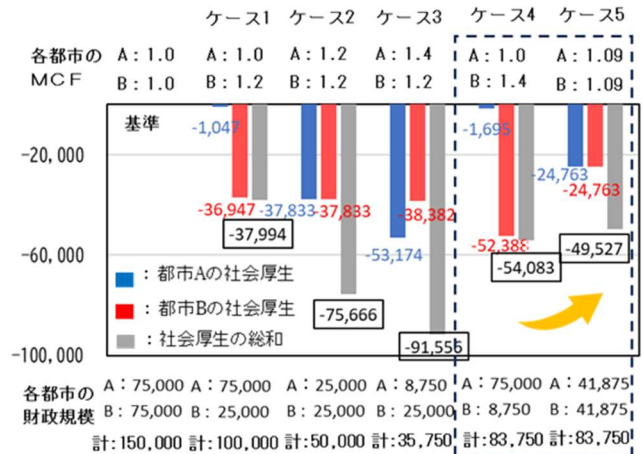


図-3. 各都市の MCF に応じた社会厚生

る都市の影響を受けることが分かった。また、都市間の財政規模の格差を再調整することで、両都市の社会厚生の和が上昇することが分かった。最適料金水準については、地方都市を想定したケースでは隣接する都市の料金水準による影響を受けない結果となったが、都市圏を想定したケース（渋滞を考慮）では、隣接する都市の影響を受ける結果となった。以上の結果から複数都市というマクロ視点に立ち、各都市の財政状況に着目したうえで料金水準や社会厚生について検討することは有効であると言える。

今後は、数値実験で用いた需要関数のパラメータ等について、実際の都市データなどから推計し、現実的な問題について検討していく必要がある。

また、3 都市以上を想定したケースについて定式化を行い、料金水準や財政規模の再調整スキームについて検討する必要がある。

参考文献

- 1) 森杉壽芳・河野達仁：道路整備財源調達に伴う厚生損失を考慮した高速道路料金の効率的水準。日本経済研究, No67, 2012, 7
- 2) 河野達仁・罵万希音・水谷大二郎：公的資金の限界費用の内生的変化を考慮した最適補修計画, 土木学会論

文集 D3 (土木計画学) , Vol. 77, No. 4, pp 389-399
2021

- 3) Koh, A, Shepherd, S.P. & Watling, D.: Competition between Two Cities using Cordon Tolls: An Exploration of Response Surfaces and Possibilities for Collusion, *Transportation Research Part B Methodological*, Vol. 76, pp. 93-116