配車サービス導入評価のための確定的利用者均衡モデルの提案

早川　敬一郎[1]・力石　真[2]

[1]正会員 （株）豊田中央研究所（〒 112-0004 東京都文京区後楽 1 丁目 4-14 後楽森ビル 10 階）
E-mail: kei-hayakawa@mosk.tytlabs.co.jp
[2]正会員 広島大学大学院 （〒 739-8511 東広島市鏡山一丁目 3 番 2 号）
E-mail: chikaraishim@hiroshima-u.ac.jp

配車サービスに公共交通を補完する役割を期待する行政と収益を追求する配車サービス事業者の間にはギャップがある．本研究では，配車サービスと従前の公共交通機関の関係が協調もしくは競合となるような条件を明らかにするために，1 次元都市モデルと確定的交通機関選択モデルを提案する．提案モデルは，都心における短距離利用と，郊外で公共交通と接続するフィーダーとしての利用を表現することが可能である．提案モデルを用いて配車サービスが従前から存在する公共交通機関に及ぼす影響を評価した結果，中規模都市においては公共交通と競合関係にある一方，大規模都市においては補完関係になり得ることなどが明らかになった.

1.　はじめに

２０世紀後半に大きく進展したモータリゼーションは，多くの人々に移動の自由をもたらした．先進各国の多くの地域で自動車は既に生活必需品となっており，また発展途上国においても自動車普及率は上昇の一途をたどっている．しかし，このようなモータリゼーションは，移動難民という新たな社会課題をもたらした．多くの人々が自動車で移動する大都市郊外部や地方都市などでは，従前に整備されていた公共交通機関が収益減少によって大幅減便や廃止となり，自動車以外の手段による移動コストが大幅に上昇した．そのため，子供や高齢者，経済的理由や身体障碍などで自動車を運転できない人々（本稿ではこれらの人々のことを公共交通依存者 (transit dependent) と呼ぶ）は，多くの場合において，移動を家族の送迎に頼らざるを得ない状況に陥っている．これらの人々は自らの意思で自由に移動することが困難であり，また送迎する家族にとっても自身の自由時間を大幅に制約されることになり，双方の QOL(Quality of Life: 生活の質) の低下が問題になっている．またこのような状況の下で，高齢者の運転免許返納が進まず，高齢者の事故が増加していることも社会問題となっている．

一方で，近年，Uber や Lift などのライドヘイリングサービスやケータイアプリでタクシーの配車を行うインターネット配車サービスの普及が進展している．これらのサービスは路線バスなどの従来型の公共交通機関と比較して低コストで広域をカバーすることができるため，上述した移動難民の問題を解決できる可能性がある．日本においても Uber を過疎地の足として活用しようとする社会実験が進められる[1]など行政側の期待は大きいものの，過疎地におけるサービス展開は事業者の利益につながりにくいことから，他の過疎地域への展開が進んでいるとはいえない．事業利益の拡大を目的とするサービス事業者は，交通需要の大都市の都心部においてサービス展開を進めるが，例えば Uber などの普及が進むニューヨークにおいては，従来は地下鉄などの公共交通機関を用いていた人々が Uber に転換することによって市内の交通渋滞が深刻化するという問題が発生している．このように，行政側は配車サービスを従来の公共交通機関を補助する手段と位置づけて両者が協調することで地域の移動サービス水準が向上することを期待しているのに対して，実際は公共交通機関と配車サービスが競合し地域の移動サービス水準を悪化させるという状況が発生している．

このような状況をふまえて，本研究では，新しい交通サービスとして普及が進む配車サービスと従前の公共交通機関の関係が協調もしくは競合となるような条件を明らかにし，配車サービスの積極的な導入に対する補助金施策や，逆にエリア規制や料金規制などの規制による両者の関係性の変化について論じる．

自動車と公共交通の間の交通モード選択問題は，two-mode problem と呼ばれ多くの研究が進められている

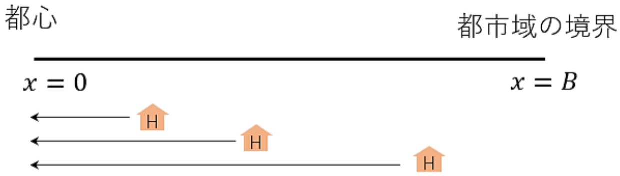
[1] https://www.uber.com/global/ja/cities/kyotango/

[4, 1, 6, 7]．経済合理的な利用者の交通モード選択を考慮した上で公共交通と道路の容量を効率的に活用して社会全体のコストを最小化するためには，公共交通利用者と道路利用者に，各々の需要と供給に応じた適切な価格設定を行うことが必要である．しかし実際の都市では公共交通が有料であるのに対して道路利用は無料であることが多く，自動車を利用する人が過剰となって渋滞が発生し，都市の交通サービス水準の低下につながっている．この状況は，道路利用者に適切な課金が為されていないという意味から道路の under-pricing 問題と呼ばれている．公共交通がある程度利用されている都市において道路が under-pricing の場合に，渋滞を緩和のための道路拡張工事などを行って道路容量を拡張すると，従前は公共交通を利用していた利用者がさらに自動車利用に転換し，かえって交通サービス水準が低下することが多くの研究で示唆されている [5, 9, 3, 2, 11, 10]．

このような two-mode problem を議論する多くの既往研究では単一出発地単一目的地モデル (single OD model) が使われており，都市の地理的条件はモデルから捨象されている．一方で文献 [8] では，都心から一定範囲のエリアで自動車利用者に課金を行うエリア課金制度を議論することを目的として 1 次元都市モデルを導入し，同一の道路を共有する自動車と路線バスの間での利用者のモード選択について議論している．自動車利用者への課金方法として，課金なし，エリア課金，距離課金，理想的課金の 4 種類を考えると同時に，バス事業者が地域の交通サービス向上を目的とする「公営企業」である場合と自社の収益向上を目指す「私営企業」である場合の 2 種類を考え，それぞれの場合における利用者の交通行動変容と地域の交通水準の変化について議論している．

Two-mode problem に関する研究は多く行われているが，多くの研究において利用者が自動車と公共交通の 2 つのモードを自由に選択できることが前提となっている．現実には本章の冒頭で述べたように自動車を利用できない公共交通依存者が存在するが，従来の two-mode problem の枠組みにおいては公共交通依存者の存在は明示的には考慮されていない．

問題の本質を簡潔に表現するため，本研究では，文献 [8] と同様の 1 次元都市を考え，自動車を利用できる人々(自動車ユーザー) と利用できない人々(公共交通依存者) の交通機関選択行動について議論する．本研究では，1 次元都市モデルを導入し，公共交通依存者の交通機関選択行動を定式化する．



図–1　1 次元都市モデル

2.　モデル

(1)　1 次元都市モデル

本研究では，文献 [8] と同様に，図 1 に示すような 1 次元都市における単一目的地モデルを考える．都市内の位置を座標 x で定義し，都心 $x = 0$ と都市域の境界 $x = B$ の 2 点に挟まれた区間 $x = [0, B]$ と都心 $x = 0$ の相互間の移動需要について考える．地点 x で発生する移動需要を $\rho(x)$ とする．この移動需要のうち、自動車を利用できる利用者 (自動車ユーザー) による移動需要を $\rho_1(x)$，自動車を利用できない利用者 (公共交通依存者) による移動需要を $\rho_2(x)$ とする。ただし、$\rho(x) = \rho_1(x)+\rho_2(x)$ であり、$\rho_1(x)$ と $\rho_2(x)$ は共に単調減少関数であるものとする。

(2)　交通モード

上述した 1 次元都市において，以下に示す自動車，公共交通および配車サービスの 3 つの交通モードを考える．

自動車　自動車で地点 x から都心 $x = 0$ まで移動する場合のコスト $C^A(x, n_a)$ は以下で与えられるものとする．

$$C^A(x, n_a) = p^A(n_a) + \kappa^A x + \alpha t^A(x) \tag{1}$$

ここで，n_a は自動車の利用者数，$p^A(n_a)$ は都心の駐車場料金，$\kappa^A x$ は距離に比例する金銭コスト (ガソリン代など)，$t^P(x)$ は自動車移動に関する所用時間を表すものとし，α は時間コストを金銭コストに変換するための係数 (時間価値) である．ただし，$p^A(n_a) > 0$, $\kappa^A \geq 0$,$t^A(x) \geq 0$, $t^A(0) = 0$, $\alpha > 0$ とする．

公共交通　公共交通で地点 x から都心 $x = 0$ まで移動する場合のコスト $C^P(x)$ は以下で与えられるものとする．

$$C^P(x) = p^P + \kappa^P x + \alpha(t^P(x) + w^P(x)) \tag{2}$$

ここで，p^P は公共交通事業者によって設定される初乗り運賃，$\kappa^P x$ は距離に比例する対距離運賃，$t^P(x)$ は乗車時間である．公共交通の乗車時間 $t^P(x)$ および公共交通に乗車するための待ち時間 $w^P(x)$ は出発地 x の関数で与えられるものとし，$p^P > 0$, $\kappa^P \geq 0$,$t^P(x) \geq 0$, $t^P(0) = 0$, $w^P(f(x)) \geq 0$ とする．

配車サービス　配車サービスで地点 x から都心 $x=0$ まで移動する場合のコスト $C^E(x,n_e)$ は以下で与えられるものとする．

$$C^E(x,n_e)=p^E+\kappa^E x+\alpha(t^A(x)+w^E(n_e)) \tag{3}$$

ここで，p^E は初乗り運賃，$\kappa^E x$ は距離に比例する対距離運賃，$w^E(n_e)$ は配車サービスに乗車するための待ち時間であり，n_e は配車サービスを利用する人数である．また，$t^A(x)$ は配車サービスで移動する際の所用時間であり，これは既に定義した自動車移動の場合の所用時間と等しい．ただし，$p^E>0,\kappa^E\geq 0,w^E(n_e)\geq 0$ とする．

配車サービスから公共交通への乗り継ぎ　自動車を利用せずに郊外部から都心へ移動する際には，郊外部では配車サービスを利用して途中で公共交通への乗り継ぐという手段が考えられる．地点 x を出発地とし，途中の地点 $x_t<x$ で乗り継いで都心へ向かうときの移動コスト $C^C(x,n_e,x_t)$ は，下式で示される．

$$\begin{aligned}C^C(x,n_e,x_t)=p^E&+\kappa^E(x-x_t)\\&+\alpha(t^A(x)-t^A(x_t)+w^E(n_e))\\&+p^P+\kappa^P x_t\\&+\alpha(t^P(x_t)+w^P(f(x_t)))\end{aligned} \tag{4}$$

上述の 4 つの移動モード（自動車，公共交通，配車サービス，乗り継ぎ）について，本研究では以下を仮定する．

仮定 1 (駐車場料金の単調増加性)．駐車場料金 $p^A(n_a)$ は自動車の利用人数 n_a に対して狭義単調増加である．

$$\frac{d}{dn_a}p^A(n_a)>0 \tag{5}$$

仮定 2 (公共交通の待ち時間の単調増加性)．公共交通の待ち時間 $w^P(x)$ およびその導関数 $\frac{d}{dx}w_0^P(x)$ は，出発地点 x に対して狭義単調増加である．

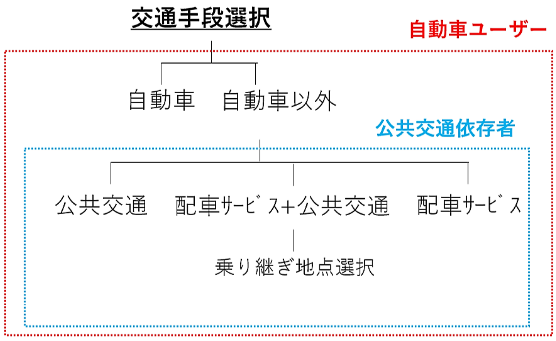
$$\frac{d}{dx}w^P(x)>0,\forall x\in[0,B] \tag{6}$$

$$\frac{d^2}{dx^2}w^P(x)>0,\forall x\in[0,B] \tag{7}$$

すなわち，出発地が都心から離れれば離れるほど公共交通の待ち時間は加速度的に増加し，都市境界 $x=B$ に近いような郊外部において公共交通を利用する場合には待ち時間が非常に長くなる．

仮定 3 (配車サービスの待ち時間の単調増加性)．配車サービスの待ち時間 $w^E(n_e)$ およびその導関数 $\frac{d}{dn_e}w^E(n_e)$ はサービス利用人数 n_e に対して狭義単調増加である．

$$\frac{d}{dn_e}w^E(n_e)>0 \tag{8}$$



図–2 自動車ユーザーと公共交通依存者の交通モード選択モデル

$$\frac{d^2}{dn_e^2}w^E(n_e)>0 \tag{9}$$

すなわち，配車サービスの利用者が増えれば配車待ち時間は加速度的に増加する．

仮定 4 (対距離限界金銭コストの順位性)．距離が増加することによる金銭コストの増加は配車サービス，公共交通，自動車の順に大きい．すなわち，

$$\kappa^E>\kappa^P>\kappa^A \tag{10}$$

仮定 5 (所用時間に関する順位性)．公共交通と自動車の所用時間差は，都心から離れれば離れるほど自動車が有利，公共交通が不利となる．すなわち，

$$\frac{d}{dx}(t^P(x)-t^A(x))>0 \tag{11}$$

$$\frac{d^2}{d^2x}(t^P(x)-t^A(x))>0 \tag{12}$$

仮定 6 (内部均衡)．利用可能な 4 つの交通モード（自動車，公共交通，配車サービス，配車サービスと公共交通の乗り継ぎ）のうち，誰にも使われないモードは存在しない．すなわち，いずれのサービスも都市内の一定の条件を満たす利用者に利用される．

(3)　交通機関選択モデル

本研究で扱う交通モード選択モデルの枠組みを図 2 に示す．まず，公共交通依存者の交通モード選択モデルについては，公共交通単独，配車サービス単独，および配車サービスと公共交通の乗り継ぎの 3 つのモードのうちの 1 つを選択する．乗り継ぎを選択した場合には，配車サービスから公共交通への乗り継ぎ地点も任意に選択できるものとする．自動車ユーザーについては，まず，自動車を利用して移動するか自動車を利用せずに移動するかを選択し，自動車を利用しない場合は，公共交通依存者と同様に交通モードを選択するものとする．

すなわち、地点 x の自動車ユーザーのうち自動車を利用することを選択した利用者の数を $q^A(x)$，自動車を利用しないことを選択した利用者の数を $q_1^T(x)$ とすると、

$$q^A(x) + q_1^T = q_1(x), \forall x \in [0, B] \tag{13}$$

が成り立つ。また、地点 x を出発するユーザーのうち公共交通，配車サービス，乗り継ぎのそれぞれを選択した利用者の数 $q^P(x)$,$q^E(x)$,$q^C(x)$ とすると、

$$q^P(x) + q^E(x) + q^C(x) = q_1^T(x) + q_2(x) \tag{14}$$

が成り立つ。

本研究では，交通モード選択モデルとして，文献 [8] と同様の確定的離散選択モデルを用いる．この方法は，各利用者が選択可能な交通モードの内で最も低コストの交通手段を確定的に選択するというモデルである．このような非常に単純なモデルを用いることで，既存の公共交通と新たな配車サービスとの複雑な協調-競合関係を見通し良く記述することが可能となる．全利用者が確定的離散選択モデルにしたがって行動した場合，均衡状態において以下に示す確定的均衡条件が成立する．

定義 1 (確定的均衡条件)**.** 均衡状態においては，任意の地点においてコストが最小となる交通モードが選択され，選択されなかった交通モードのコストは選択された交通モードのコストと等しいか大きい

この条件を数式で表すと以下のようになる．自動車以外の交通モードについて，

$$\begin{aligned}
&q^{P*}(x)(C^P(x) - c_2(x)) = 0, \forall x \in [0, B] \\
&q^{P*}(x) \geq 0, C^P(x) - c_2(x) \geq 0, \forall x \in [0, B] \\
&q^{E*}(x)(C^E(x, n_e^*) - c_2(x)) = 0, \forall x \in [0, B] \\
&q^{E*}(x) \geq 0, C^E(x, n_e) - c_2(x) \geq 0, \forall x \in [0, B] \\
&q^{C*}(x)(C^C(x, n_e^*, x_t^*) - c_2(x)) = 0, \forall x \in [0, B] \\
&q^{C*}(x) \geq 0, C^C(x, n_e, x_t^*) - c_2(x) \geq 0, \forall x \in [0, B]
\end{aligned} \tag{15}$$

自動車の利用について，

$$\begin{aligned}
&q^{A*}(x)(C^A(x, n_a^*) - c_1(x)) = 0, \forall x \in [0, B] \\
&q^{A*}(x) \geq 0, C^A(x, n_a^*) - c_1(x) \geq 0, \forall x \in [0, B] \\
&q_1^{T*}(x)(c_2(x) - c_1(x)) = 0, \forall x \in [0, B] \\
&q_1^{T*}(x) \geq 0, c_2(x) - c_1(x) \geq 0, \forall x \in [0, B]
\end{aligned} \tag{16}$$

が成立する．ただし、ここでインデックス $*$ は均衡状態をあらわし、$c_2(x)$ は地点 x を出発する公共交通依存者の移動コスト，$c_1(x)$ は地点 x を出発する自動車ユーザーの移動コストを示す．この定義からわかるように，自動車を利用できない公共交通依存者は，常に自動車ユーザーと同等以上のコストを負担している．

3. 公共交通依存者の交通モード選択行動

前章で示したモデルに基づいて，本章では，公共交通依存者のモード選択について考察する．

(1) 最適乗り継ぎ地点

まず，利用者が配車サービスと公共交通を乗り継ぐことを選択した場合に，最もコストが低くなる乗り継ぎ地点について考える．乗り継ぎのコストは式 (4) で与えられるので，乗り継ぎ地点 x_t に関する 1 次および 2 次の導関数は以下の式で与えられる．

$$\begin{aligned}
&\frac{d}{dx_t} C^C(x, n_e, x_t) \\
&\quad = \kappa^P - \kappa^E + \alpha \frac{d}{dx_t} \{t^P(x_t) - t^E(x_t) + w^P(x_t)\}
\end{aligned} \tag{17}$$

$$\frac{d^2}{dx_t^2} C^C(x, n_e, x_t) = \alpha \frac{d^2}{dx_t^2} \{t^P(x_t) - t^E(x_t) + w^P(x_t)\} \tag{18}$$

式 (18) と式 (7) および (12) より，

$$\frac{d^2}{dx_t^2} C^C(x, n_e, x_t) > 0 \tag{19}$$

が成立するため，乗り継ぎコストは乗り継ぎ地点 x_t に関して下に凸である．ここで，

$$\mathcal{T}(x) = \alpha\{t^P(x) - t^E(x) + w^P(x)\} \tag{20}$$

とすると，式 (6) および (11) から，

$$\mathcal{T}'(x) > 0, \forall x \in [0, B] \tag{21}$$

$$\mathcal{T}''(x) > 0, \forall x \in [0, B] \tag{22}$$

が成り立つ．このとき，乗り継ぎコスト $C^C(x, n_e, x_t)$ の導関数は，

$$\frac{d}{dx_t} C^C(x, n_e, x_t) = \kappa^P - \kappa^E + \mathcal{T}'(x_t) \tag{23}$$

と表すことができる．

このとき，仮に $\mathcal{T}'(0) \geq \kappa^E - \kappa^P$ であるとすると，全ての $x_t \in [0, B]$ に対して $\frac{d}{dx_t} C^C(x, n_e, x_t) \geq 0$ が成立するので，乗り継ぎコスト $C^C(x, n_e, x_t)$ は区間 $x_t \in [0, B]$ において乗り継ぎ地点 x_t に対して単調増加関数となり，$x_t = 0$ で最小値を取る．すなわち，行程の全てについて配車サービスを用いた方がコストが低くなるため，この条件下において乗り継ぎは選択されず，仮定 6 に反する．また，仮に $\mathcal{T}'(B) \leq \kappa^E - \kappa^P$ とすると，全ての $x_t \in [0, B]$ に対して $\frac{d}{dx_t} C^C(x, n_e, x_t) \leq 0$ が成立するので，乗り継ぎコスト $C^C(x, n_e, x_t)$ は区間 $x_t \in [0, B]$ において乗り継ぎ地点 x_t に対して単調減少関数となり，$x_t = B$ で最小値を取る．すなわち，行程の全てについて公共交通を用いた方がコストが低くなるため，この条件下において乗り継ぎは選択されず，仮定 6 に反する．

以上により，以下では $\mathcal{T}'(0) < \kappa^E - \kappa^P < \mathcal{T}'(B)$ の場合について考える．このとき，$\mathcal{T}'(x_t^*) = \kappa^E - \kappa^P$ となる $x_t^* \in [0, B]$ が存在し，乗り継ぎコスト $C^C(x, n_e, x_t)$ は $x_t = x_t^*$ において最小値を取る．$x_t = x_t^*$ において

$$\kappa^P - \kappa^E + \mathcal{T}'(x_t^*) = 0 \tag{24}$$

であり，式 (19) から，区間 $0 \le x_t < x_t^*$ において，

$$\frac{d}{dx_t} C^C(x, n_e, x_t) = \kappa^P - \kappa^E + \mathcal{T}'(x_t) < 0, \forall x_t \in [0, x_t^*) \tag{25}$$

が，また，区間 $x_t^* < x_t \le B$ において，

$$\frac{d}{dx_t} C^C(x, n_e, x_t) = \kappa^P - \kappa^E + \mathcal{T}'(x_t) > 0, \forall x_t \in (x_t^*, B] \tag{26}$$

成り立つ．出発地点 x が地点 x_t^* よりも郊外側，すなわち $x > x_t^*$ の場合については，地点 x_t^* における乗り継ぎが行われる可能性がある．本研究では，この地点 x_t^* を最適乗り継ぎ地点と呼ぶ．出発地点 x がこの最適乗り継ぎ地点 x_t^* よりも都心側，すなわち $x \le x_t^*$ の場合については，乗り継ぎコスト $C^C(x, n_e, x_t)$ は区間 $x_t \in [0, x]$ において乗り継ぎ地点 x_t に対して単調減少関数となり，$x_t = x$ で最小値を取るため，全行程で公共交通を用いた方が低コストとなり，乗り継ぎは選択されない．

なお，最適乗り継ぎ地点 x_t^* についての解釈は，以下の通りである．式 $\mathcal{T}'(x_t^*) = \kappa^E - \kappa^P$ において，左辺は都心から離れるにしたがって増加する公共交通の時間的不効用 (待ち時間の増加や対配車サービスの所用時間の増加) に関する限界コストを示し，右辺は配車サービスと公共交通の対距離限界金銭コストの差を示している．最適乗り継ぎ地点 x_t^* はこの両者が釣り合う地点であり，利用者はこの地点で配車サービスから公共交通に乗り継ぎを行うことで移動コストを低減することができる．

(2) 配車サービスの単独利用と乗り継ぎ利用のコストの比較

ここでは配車サービスの単独利用と公共交通との乗り継ぎ利用のコストの比較を行う．両者のコストの差 $C^E(x, n_e) - C^C(x, n_e, x_t^*)$ は，以下の式で与えられる．

$$\begin{aligned} &C^E(x, n_e) - C^C(x, n_e, x_t^*) \\ &= (\kappa^E - \kappa^P)x_t^* - \mathcal{T}(x_t^*) \\ &= -\int_0^{x_t^*} (\kappa^P - \kappa^E + \mathcal{T}'(x))dx \end{aligned} \tag{27}$$

これと式 (24),(25) から，$C^E(x, n_e) - C^C(x, n_e, x_t^*) > 0$ が成立するため，$\mathcal{T}'(0) < \kappa^E - \kappa^P < \mathcal{T}'(B)$ かつ $x > x_t^*$ の場合においては，配車サービスが利用されるとすれば常に公共交通との乗り継ぎ利用となり，配車サービス単独では利用されない．

(3) 公共交通の単独利用と乗り継ぎ利用のコストの比較

次に，公共交通の単独利用と配車サービスとの乗り継ぎのコストの比較を行う．両者のコストの差 $C^P(x) - C^C(x, n_e, x_t^*)$ とその導関数は，以下の式で与えられる．

$$\begin{aligned} &C^P(x) - C^C(x, n_e, x_t^*) \\ &= -p^E - \alpha w^E(n_e) + (\kappa^P - \kappa^E)(x - x_t^*) \\ &+ \mathcal{T}(x) - \mathcal{T}(x_t^*) \end{aligned} \tag{28}$$

$$\frac{d}{dx}(C^P(x) - C^C(x, n_e, x_t^*)) = (\kappa^P - \kappa^E) + \mathcal{T}'(x) \tag{29}$$

式 (26) より，$x > x_t^*$ の範囲において $\frac{d}{dx}(C^P(x) - C^C(x, n_e, x_t^*)) > 0$ が成立するため，同区間において，公共交通の単独利用と配車サービスとの乗り継ぎのコスト差 $C^P(x) - C^C(x, n_e, x_t^*)$ は出発地点 x に対して単調に増加する．

$x = x_t^*$ のとき，

$$C^P(x_t^*) - C^C(x_t^*, n_e, x_t^*) = -p^E - \alpha w^E(n_e) < 0 \tag{30}$$

であるから，$x = B$ において

$$\begin{aligned} &C^P(B) - C^C(B, n_e, x_t^*) \\ &= -p^E - \alpha w^E(n_e) + (\kappa^P - \kappa^E)(B - x_t^*) \\ &+ \mathcal{T}(B) - \mathcal{T}(x_t^*) \le 0 \end{aligned} \tag{31}$$

であれば，区間 $(x_t^*, B]$ において公共交通単独利用のコストは常に配車サービスとの乗り継ぎのコストよりも低くなり，配車サービスとの乗り継ぎ利用は行われない．一方，

$$\begin{aligned} &C^P(B) - C^C(B, n_e, x_t^*) \\ &= -p^E - \alpha w^E(n_e) + (\kappa^P - \kappa^E)(B - x_t^*) \\ &+ \mathcal{T}(B) - \mathcal{T}(x_t^*) \\ &> 0 \end{aligned} \tag{32}$$

であれば，下の式

$$(\kappa^P - \kappa^E)(x_{pc}^* - x_t^*) + \mathcal{T}(x_{pc}^*) - \mathcal{T}(x_t^*) = p^E + \alpha w^E(n_e^{*e}) \tag{33}$$

が成立する地点 x_{pc}^* で公共交通単独利用と配車サービスとの乗り継ぎのコストが逆転するため，この地点 x_{pc}^* よりも郊外側の地点 $x > x_{pc}^*$ を出発する利用者は配車サービスと公共交通の乗り継ぎ利用を選択する．

ここで，$x_{pc}^* > x_t^*$ であることに注意が必要である．乗り継ぎ利用を行う場合には，配車サービスと公共交通の双方の初期コスト（初乗り運賃と待ち時間コスト）を負担することになる．そのため，最適乗り継ぎ地点 x_t^* の近傍区間 $[x_t^*, x_{pc}^*]$ を出発するユーザーは，当該区間の限界コストは配車サービスの方が低いにも関わらず，二重の初期コストを回避するために公共交通を単独で利用する．

(4) 公共交通の単独利用と配車サービスの単独利用のコストの比較

最後に，公共交通の単独利用と配車サービスの単独利用のコストを比較する．既に (2) 節で示したように，乗り継ぎ利用が行われる条件下，すなわち $\mathcal{T}'(0) < \kappa^E - \kappa^P < \mathcal{T}'(B)$ かつ $x > x_t^*$ の場合においては，配車サービスは単独で利用されない．また，(1) 節のケース (i) およびケース (ii) で示したように，$\mathcal{T}'(0) \geq \kappa^E - \kappa^P$ および $\mathcal{T}'(0) \leq \kappa^E - \kappa^P$ の場合は，それぞれ前者は配車サービス単独，後者は公共交通単独で利用することで低コストになることを示した．そこで，ここでは，$\mathcal{T}'(0) < \kappa^E - \kappa^P < \mathcal{T}'(B)$ かつ $x \leq x_t^*$ の場合について考える．公共交通と配車サービスのコストの差 $C^P(x) - C^E(x, n_e)$ とその導関数は，以下の式で与えられる．

$$\begin{aligned} &C^P(x) - C^E(x, n_e) \\ &= (p^P - p^E) + (\kappa^P - \kappa^E)x \\ &+ \mathcal{T}(x) - \alpha w^E(n_e) \end{aligned} \tag{34}$$

$$\frac{d}{dx}(C^P(x) - C^E(x, n_e)) = (\kappa^P - \kappa^E) + \mathcal{T}'(x) \tag{35}$$

式 (25) より区間 $[0, x_t^*)$ において $\frac{d}{dx}(C^P(x) - C^E(x, n_e)) < 0$ が成立するため，公共交通と配車サービスのコスト差 $C^P(x) - C^E(x, n_e)$ は当該区間において単調減少である．仮に，$x = 0$ において $C^P(0) \leq C^E(0, n_e)$ であれば区間 $[0, x_t^*)$ において常に公共交通のコストが配車サービスのコストを下回るため，配車サービスは利用されない．逆に $C^P(0) > C^E(0, n_e)$ であれば，下の式

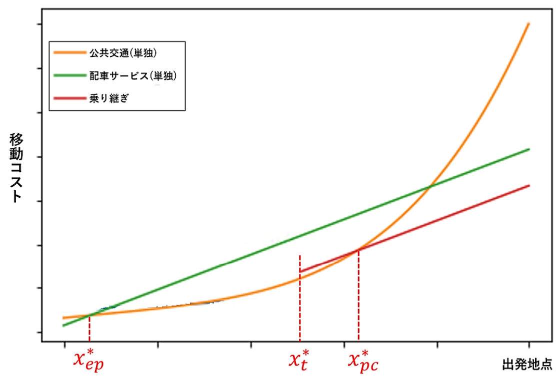
$$p^P + (\kappa^P - \kappa^E)x_{ep}^{*e} + \mathcal{T}(x_{ep}^{*e}) = p^E + \alpha w^E(n_e^{*e}) \tag{36}$$

が成立する地点 x_{ep}^* で公共交通と配車サービスのコストが逆転するため，この地点 x_{ep}^* よりも都心側の地点 $x < x_{ep}^*$ を出発する利用者は配車サービスを選択する．

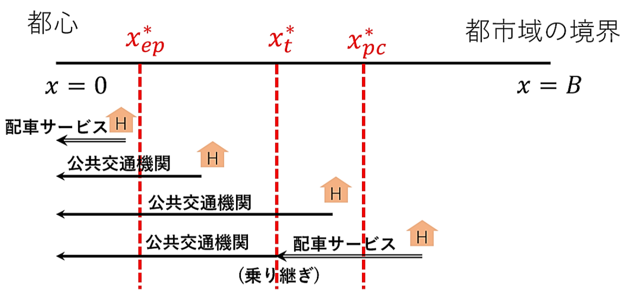
(5) 公共交通依存者の交通モード選択行動に関する考察

前節までに述べた交通モード選択行動についてここで整理し考察を行う．まず，公共交通単独，配車サービス単独，両者の乗り継ぎの 3 つのモードについて，コスト関数のイメージを図 3 に示す．図には最適乗り継ぎ地点 x_t^*，配車サービス単独利用から公共交通単独利用へのモード選択境界地点 x_{ep}^*，公共交通単独利用から配車サービスとの乗り継ぎ利用へのモード選択境界地点 x_{pc}^* を併せて表示している．

また，図 4 に出発地点に応じた公共交通依存者の交通モード選択結果のイメージを示す．図に示したように，都心に近い地点 $x < x_{ep}^*$ を出発する利用者は配車サービスを単独で，都心から遠い地点 $x > x_{ep}^*$ を出発する利用者は配車サービスを最適乗り継ぎ地点 x_t^* まで利用して公共交通に乗り継ぐ．その他のエリアから出発する利用者は公共交通を単独で利用する．



図–3 各モードのコストのイメージ



図–4 公共交通依存者の交通モード選択

4. 配車サービスの導入が公共交通機関に及ぼす影響

前章の議論を踏まえて，本章では，配車サービスの導入が公共交通機関に及ぼす影響について考える．まずベースシナリオとして配車サービス

(1) ベースシナリオ：配車サービスが導入されない場合

まず，ベースシナリオとして，配車サービスが存在しない状況，すなわち移動手段が自動車と公共交通しか存在しない場合における人々の交通モード選択を考える．本報告の以下の部分において，インデックス $*b$ はこのベースシナリオにおける均衡状態における値をあらわすものとする．例えば，n_a^{*b} はベースシナリオの均衡状態における自動車利用者数をあらわす．

a) 公共交通依存者の交通モード選択

移動手段が自動車と公共交通しか存在しない場合，自動車を利用できない公共交通依存者は全員公共交通で移動する．すなわち，公共交通依存者の移動コスト $c_2^{*b}(x)$

は，公共交通のコストと一致する．

$$c_2^{*b}(x) = C^P(x), \forall x \in [0, B] \tag{37}$$

b) 自動車ユーザーの交通モード選択

次に，自動車ユーザーの交通モード選択について考える．自動車ユーザーは自動車と公共交通のうちコストが低いモードを選択する．両モードのコスト差は，

$$C^P(x) - C^A(x, n_a) = p^P - p^A(n_a) + (\kappa^P - \kappa^A)x + \mathcal{T}(x) \tag{38}$$

と表すことができ，出発地点 x に関する導関数は

$$\frac{d}{dx}(C^P(x) - C^A(x, n_a)) = (\kappa^P - \kappa^A) + \mathcal{T}'(x) \tag{39}$$

で与えられる．式 10 および 21 より，$\frac{d}{dx}(C^P(x) - C^A(x, n_a)) > 0$ であるから，両モードのコスト差は出発地点 x に対して狭義単調増加であるため，両モードのコストが一致する地点 x はたかだか 1 箇所である．

ここでもし均衡状態において，$C^P(B) - C^A(B, n_a^{*b}) < 0$ であれば，全ての地点 $x \in [0, B]$ において $C^P(x) - C^A(x, n_a^{*b}) < 0$ となるため，自動車ユーザーの全員が公共交通を利用することとなり，内部均衡仮定 (仮定 6) に反する．よって，$C^P(B) - C^A(B, n_a^{*b}) \geq 0$ すなわち，

$$p^A(n_a^{*b}) \leq p^P + (\kappa^P - \kappa^A)B + \mathcal{T}(B) \tag{40}$$

が成り立つ．

ここで，地点 x_{pa}^{*b} を以下のように定義する．

$$\begin{cases} C^P(x_{pa}^{*b}) = C^A(x_{pa}^{*b}, n_a^{*b}), (\text{if } C^P(0) - C^A(0, n_a^{*b}) \leq 0) \\ x_{pa}^{*b} = 0, (\text{otherwise}) \end{cases} \tag{41}$$

すなわち，仮に $C^P(0) - C^A(0, n_a^{*b}) \leq 0$ であれば，$C^P(x) - C^A(x, n_a^{*b})$ を満たす解が区間 $[0, B]$ にただ一つ存在するため，その解を x_{pa}^{*b} とし，$C^P(0) - C^A(0, n_a^{*b}) > 0$ のときは $x_{pa}^{*b} = 0$ とする．このとき，地点 x_{pa}^{*b} より都心側の利用者は公共交通を，郊外側の利用者は自動車を選択する．このため，自動車ユーザーの移動コストは，

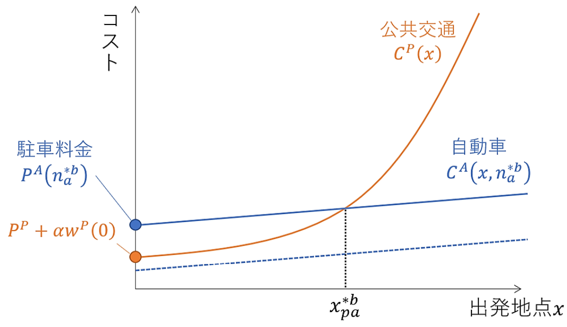
$$c_1^{*b}(x) = \begin{cases} C^P(x), \forall x \in [0, x_{pa}^{*b}] \\ C^A(x, n_a^{*b}), \forall x \in [x_{pa}^{*b}, B] \end{cases} \tag{42}$$

となる．

c) ベースシナリオの交通モード選択行動の解釈

前節に示した公共交通と自動車のコストの比較について，そのイメージを図 5 に示す．図では公共交通のコストを橙線で，$C^P(0) - C^A(0, n_a^{*b}) \leq 0$ の場合に相当する自動車のコストを青実線，$C^P(0) - C^A(0, n_a^{*b}) > 0$ の場合に相当する自動車のコストを青点線で示している．

$C^P(0) - C^A(0, n_a^{*b}) \leq 0$ の場合 (青実線) とは，均衡状態における自動車利用者数 n_a^{*b} を考慮した場合，都心の駐車料金 $P^A(n_a^{*b})$ が公共交通の最低利用コスト (初



図–5 ベースシナリオにおける自動車と公共交通のコスト

乗り運賃 p^P と都心における待ち時間コスト $\alpha w^P(0)$ の和) よりも高い場合であり，このとき，公共交通と自動車のコストが一致する点 x_{pa}^{*b} より都心側の利用者は公共交通を，郊外側の利用者は自動車を選択する．つまり，この条件は都心の駐車料金が一定以上であり，また都心での公共交通の利便性が一定の水準を保っている中規模以上の都市の状況を模擬していると考えられる．

一方，$C^P(0) - C^A(0, n_a^{*b}) > 0$ の場合 (青点線) とは，均衡状態において都心の駐車料金よりも公共交通の最低利用コストの方が高い場合である．この条件は都心での駐車料金が安く公共交通が不便な地方都市の状況を模擬していると考えられる．この条件下では全ての自動車ユーザーが自動車を使って移動し，公共交通を利用するのは自動車を利用できない公共交通依存者のみとなる．

均衡状態において各地点 $x \in [0, B]$ を出発する公共交通の利用者 $q^P(x)$ と自動車の利用者 $q^A(x)$ は，以下の通りとなる．

$$q^P(x) = \begin{cases} q_1(x) + q_2(x), \forall x \in [0, x_{pa}^{*b}] \\ q_2(x), \forall x \in [x_{pa}^{*b}, B] \end{cases} \tag{43}$$

$$q^A(x) = \begin{cases} 0, \forall x \in [0, x_{pa}^{*b}] \\ q_1(x), \forall x \in [x_{pa}^{*b}, B] \end{cases} \tag{44}$$

このため，均衡状態における自動車の利用者数 n_a^{*b} は，

$$n_a^{*b} = \int_{x_{pa}^{*b}}^{B} q_1(x) dx \tag{45}$$

で与えられる．また，均衡状態における全利用者の旅行コストの合計 C^{*b} および公共交通機関の利益 R_P^{*b} はそれぞれ以下の通りとなる．

$$C^{*b} = \int_0^{x_{pa}^{*b}} C^P(x) q_1(x) dx + \int_{x_{pa}^{*b}}^{B} C^A(x, n_a^{*b}) q_1(x) dx + \int_0^B C^P(x) q_2(x) dx \tag{46}$$

$$R_P^{*b} = \int_0^{x_{pa}^{*b}} (p^P + \kappa^P x) q_1(x) dx + \int_0^B (p^P + \kappa^P x) q_2(x) dx - D_0 \tag{47}$$

ただし、D_0 は本章で考える固定頻度運行を実現するための公共交通のコストである

(2) 配車サービスが導入されたとき

次に，前節で示したベースシナリオに加えて都市に配車サービスが導入された状況における人々の交通モード選択を考える．インデックス $*e$ はこの配車サービス導入シナリオにおける均衡状態における値をあらわすものとする．例えば，n_a^{*e} は配車サービス導入シナリオの均衡状態における自動車利用者数をあらわす．

a) 公共交通依存者の交通モード選択

まず、公共交通依存者のモード選択について考える。配車サービス導入シナリオにおいて公共交通依存者が選択可能な交通モードは、公共交通のみ，配車サービスのみ，乗り継ぎ (郊外側は配車サービス，地点 x_t で乗り換え都心側は公共交通) の 3 種類である。乗り継ぎを選択した場合については，3.(1) 節に示したとおり，

$$\mathcal{T}'(x_t^*) = \kappa^E - \kappa^P \tag{48}$$

を満たす最適乗り継ぎ地点 x_t^* で乗り継ぎを行うものとする．このとき，均衡状態においては，$0 < x_{ep}^{*e} < x_t^* < x_{pc}^{*e} < B$ を満たす地点 x_{ep}^{*e} および x_{pc}^{*e} が存在し，出発地点 x が $0 < x \leq x_{ep}^{*e}$ を満たす場合には配車サービスが，$x_{ep}^{*e} < x \leq x_{pc}^{*e}$ を満たす場合には公共交通が，$x_{pc}^{*e} < x \leq B$ を満たす場合には配車サービスから公共交通への乗り継ぎが選択される．このため，均衡状態における公共交通依存者の移動コスト $c_2^{*e}(x)$ は以下のようにあらわすことができる．

$$c_2^{*e}(x) = \begin{cases} C^E(x, n_e^{*e}), (0 \leq x \leq x_{ep}^{*e}) \\ C^P(x), (x_{ep}^{*e} \leq x \leq x_{pc}^{*e}) \\ C^C(x, n_e^{*e}, x_t^*), (x_{pc}^{*e} \leq x \leq B) \end{cases} \tag{49}$$

ただし，$C^E(x_{ep}^{*e}, n_e^{*e}) = C^P(x_{ep}^{*e})$ かつ $C^P(x_{pc}^{*e}) = C^C(x_{pc}^{*e}, n_e^{*e}, x_t^*)$ である．ここで，$x_{pc}^* > x_t^*$ であることに注意が必要である．乗り継ぎ利用を行う場合には，配車サービスと公共交通の双方の初期コスト（初乗り運賃と待ち時間コスト）を負担することになる．そのため，最適乗り継ぎ地点 x_t^* の近傍区間 $[x_t^*, x_{pc}^*]$ を出発するユーザーは，当該区間の限界コストは配車サービスの方が低いにも関わらず，二重の初期コストを回避するために公共交通を単独で利用する．

b) 自動車ユーザーの交通モード選択

均衡状態において，自動車ユーザーは自動車を利用した場合のコスト $C^A(x, n_a^{*e})$ と，利用しない場合のコスト $c_2^{*e}(x)$ のを比較してコストが小さい交通モードを選択する．両者のコスト差 $c_2^{*e}(x) - C^A(x, n_a^{*e})$ は狭義単調増加であるから，両者のコストが均衡する点はたかだか一か所である．

ベースシナリオのときと同様に，ここでもし均衡状態において，$c_2^{*e}(B) - C^A(B, n_a^{*e}) < 0$ であれば，全ての地点 $x \in [0, B]$ において $c_2^{*e}(x) - C^A(x, n_e^{*b}) < 0$ となるため，自動車ユーザーの全員が公共交通を利用することとなり，内部均衡仮定 (仮定 6) に反するため，$c_2^{*e}(B) - C^A(B, n_a^{*e}) \geq 0$ が成り立つ．

このとき，地点 x_{pa}^{*e} を以下のように定義する．

$$\begin{cases} c_2^{*e}(x) - C^A(x, n_a^{*e}) = 0, (\text{if } c_2^{*e}(0) - C^A(0, n_a^{*e})) \leq 0) \\ x_{pa}^{*e} = 0, (\text{otherwise}) \end{cases} \tag{50}$$

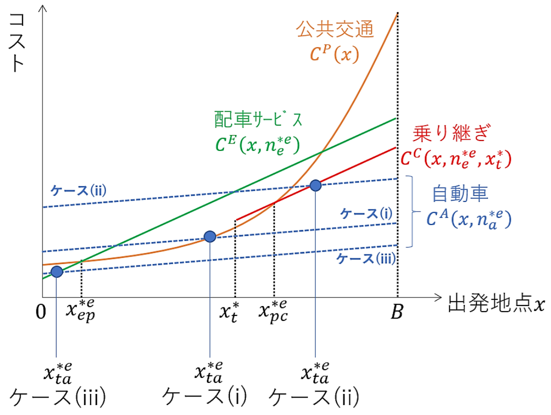
地点 x_{pa}^{*e} より都心側の利用者は公共交通を，郊外側の利用者は自動車を選択し，自動車ユーザーの移動コストは，

$$c_1^{*e}(x) = \begin{cases} c_2^{*e}(x), (x < x_{pa}^{*e}) \\ C^A(x, n_a^{*e}), (x \geq x_{pa}^{*e}) \end{cases} \tag{51}$$

となる．

c) 配車サービス導入シナリオにおける交通モード選択行動の解釈

前節までに，公共交通依存者および自動車ユーザーの交通モード選択行動を分析し，利用する交通モードが変化する地点 x_{ep}^{*e}，x_{pc}^{*e}，x_{pa}^{*e} を導出した．以下では，これらの大小関係に応じた 3 つのケースに場合分けして，結果の解釈を行う．3 つのケースとはそれぞれ，ケース (i) $x_{ep}^{*e} < x_{ta}^{*e} < x_{pc}^{*e}$，ケース (ii)$x_{pc}^{*e} < x_{ta}^{*e} < B$，ケース (iii)$0 < x_{ta}^{*e} < x_{ep}^{*e}$ であり，それぞれの場合の自動車，公共交通，配車サービスのコストの関係を図 6 に示す．図に示した通り，この場合分けは公共交通に対する自動車のコストの大小によるもので，ケース (i) は自動車のコストがほどほどで公共交通と自動車が共存する中



図–6 配車サービス導入シナリオ各交通モードのコスト

規模都市を，ケース (ii) は自動車のコストが高く多くの人々が公共交通で移動する大規模都市を，ケース (iii) は自動車のコストが低く多くの人々が自動車で移動する小規模都市を模擬していると解釈できる．

ケース (i)：中規模都市の場合　まず，$x_{ep}^{*e} < x_{ta}^{*e} < x_{pc}^{*e}$ の場合について考える．このとき，x_{ta}^{*e} は，

$$C^P(x_{ta}^{*e}) - C^A(x_{ta}^{*e}, n_a^{*e}) = 0 \tag{52}$$

かつ

$$n_a^{*b} = \int_{x_{ta}^{*e}}^{B} q_1(x)dx \tag{53}$$

を満たす点である．これを式 41 および 45 と比べると，$x_{ta}^{*e} = x_{pa}^{*b}$ であることが分かる．(図 7) すなわち，$x_{ep}^{*e} < x_{ta}^{*e} < x_{pc}^{*e}$ もしくは $x_{ep}^{*e} < x_{pa}^{*b} < x_{pc}^{*e}$ が成立している条件下においては，自動車ユーザーにとって自動車の利用/非利用の選択は，配車サービスの有無に影響を受けない．そのため，配車サービスの顧客はもともと公共交通を利用していた層であり，配車サービスと公共交通の関係は，配車サービスの顧客が増えれば増えるほど公共交通の利用者が減少するという競争関係であることが分かる．このケースにおいて，ベースシナリオと比較した公共交通の収益の差分 $\Delta R_P = R_P^{*e} - R_P^{*b}$ を求めると，

$$\begin{aligned}\Delta R_P = &- \int_0^{x_{ep}^{*e}} (p^P + \kappa^P x) q(x) dx \\ &- \int_{x_{pc}^{*e}}^{B} \kappa^P (x - x_t^*) q_2(x) dx\end{aligned} \tag{54}$$

となっており，公共交通の収益は減少する．右辺第 1 項は都心部の短距離利用における配車サービスへの顧客流出分に対応し，右辺第 2 項は郊外部の配車サービスのフィーダー利用による公共交通の利用距離減少分に対応している．

利用者の視点に立つと，地点 $x_{ep}^{*e} < x < x_{pc}^{*e}$ を出発する利用者は配車サービスを利用せず，移動コストは変化しない．都心部の短距離移動でコストが低下するほか，郊外部における公共交通依存者のコストが大きく減少する．

このように，公共交通の減収が許容できるのであれば中規模都市における配車サービスの導入は短期的には利用者にメリットをもたらすが，もし仮に減収により公共交通が維持できなければ長期的には地域の交通水準を悪化させる可能性もある．このような長期的な交通水準の分析については，次報以降で示す．

ケース (ii)：大規模都市の場合　次に，$x_{pc}^{*e} < x_{ta}^{*e} < B$ の場合を考える．このとき，x_{ta}^{*e} は，

$$C^C(x_{ta}^{*e}, n_e^{*e}, x^*) - C^A(x_{ta}^{*e}, n_a^{*e}) = 0 \tag{55}$$

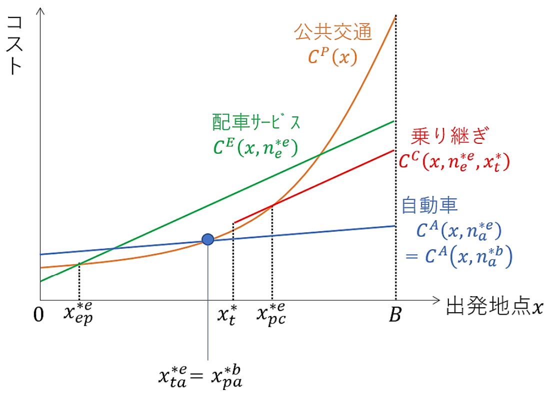
かつ

$$n_a^{*b} = \int_{x_{ta}^{*e}}^{B} q_1(x)dx \tag{56}$$

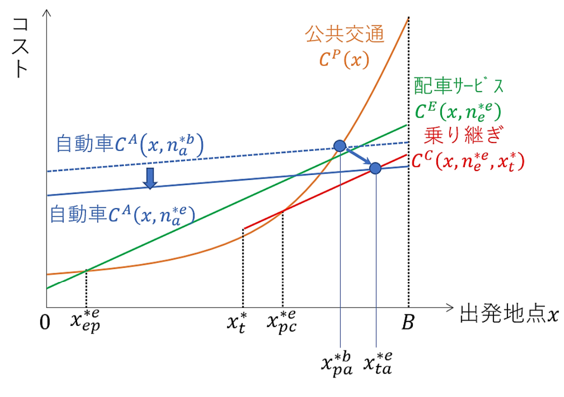
を満たす点である．これを式 41 および 45 と比べると，区間 $x \in [x_{pc}^{*e}, B]$ で $C^P(x) \geq C^C(x, n_e^{*e}, x^*)$ であることから，$x_{ta}^{*e} > x_{pa}^{*b}$ かつ $n_a^{*e} < n_a^{*b}$ であることが分かる．すなわち，$x_{pc}^{*e} < x_{ta}^{*e} < B$ が成立している条件下においては，郊外部で従来自動車を使っていた一部の利用者が配車サービスと公共交通の乗り継ぎ利用に転換し，自動車の利用者が減少するとともに公共交通の利用者層を増加させる．一方で，都心部においてはケース (i) の場合と同様に公共交通から配車サービスへの転換が起こる．

まとめると、均衡状態において各地点 $x \in [0, B]$ を出発する自動車の利用者 $q^A(x)$，公共交通の利用者 $q^P(x)$，配車サービスの利用者 $q^E(x)$，乗り継ぎの利用者 $q^C(x)$ は，以下の通りとなる．

$$q^A(x) = \begin{cases} 0, \forall x \in [0, x_{ta}^{*e}] \\ q_1(x), \forall x \in [x_{ta}^{*e}, B] \end{cases} \tag{57}$$



図–7　配車サービス導入前後の各交通モードのコスト (中規模都市の場合)



図–8　配車サービス導入前後の各交通モードのコスト (大規模都市の場合)

$$q^E(x) = \begin{cases} q_1(x) + q_2(x), \forall x \in [0, x^{*e}_{ep}] \\ 0, \forall x \in [x^{*e}_{ep}, B] \end{cases} \tag{58}$$

$$q^P(x) = \begin{cases} 0, \forall x \in [0, x^{*e}_{ep}] \\ q_1(x) + q_2(x), \forall x \in [x^{*e}_{ep}, x^{*e}_{pc}] \\ 0, \forall x \in [x^{*e}_{pc}, B] \end{cases} \tag{59}$$

$$q^C(x) = \begin{cases} 0, \forall x \in [0, x^{*e}_{pc}] \\ q_1(x) + q_2(x), \forall x \in [x^{*e}_{pc}, x^{*e}_{ta}] \\ q_2(x), \forall x \in [x^{*e}_{ta}, B] \end{cases} \tag{60}$$

このケースにおいて，ベースシナリオと比較した公共交通の収益の差分 $\Delta R_P = R^{*e}_P - R^{*b}_P$ を求めると，

$$\begin{aligned} \Delta R_P = &- \int_0^{x^{*e}_{ep}} (p^P + \kappa^P x) q(x) dx \\ &- \int_{x^{*e}_{pc}}^{B} \kappa^P (x - x^*_t) q_2(x) dx \\ &- \int_{x^{*e}_{pc}}^{x^{*b}_{pa}} \kappa^P (x - x^*_t) q_1(x) dx \\ &+ \int_{x^{*b}_{pa}}^{x^{*e}_{ta}} (p^P + \kappa^P x^*_t) q_1(x) dx \end{aligned} \tag{61}$$

となる．右辺第 1 項は都心部の短距離利用における配車サービスへの顧客流出分を，右辺第 2 項および第 3 項は郊外部で従来から公共交通を利用していた層が配車サービスをフィーダー利用することによる利用距離減少分を示している．一方で，右辺第 4 項は，配車サービスのフィーダー利用によって新たに公共交通を利用するようになった利用者による増収を示している．

利用者の視点に立つと，地点 $x^{*e}_{ep} < x < x^{*e}_{pc}$ を出発する利用者の移動コストは変化せず，都心部の短距離移動でコストが低下するという点については中規模都市の場合 (ケース (i)) と同様である．しかし，中規模都市の場合には郊外部での配車サービスのフィーダー利用によるコスト減少の恩恵を受けるのは公共交通依存者のみであったが，大規模都市の場合にはその恩恵が自動車ユーザーにも及ぶ．自動車から配車サービスのフィーダー利用にモード転換した利用者はもちろんのこと，より郊外を出発点とし依然として自動車を利用するユーザーも都心部への自動車流入量の減少による駐車コスト減少の恩恵を受ける．

このように，大都市へ配車サービスを導入すると，都心部では公共交通と配車サービスは競争関係となるが，郊外部では配車サービスと公共交通は補完関係となっていることが分かる．配車サービスの利用者数が増加すると待ち時間が長くなり配車サービスの導入効果が薄れることが考えられるが，公共交通と競争関係にある都心部において何らかの乗り入れ規制を行うことで都市の交通水準を向上させられる可能性がある．

ケース (iii) : 小規模都市の場合　最後に，$0 < x^{*e}_{ta} < x^{*e}_{ep}$ の場合を考える．これは，ベースシナリオにおける x^{*b}_{pa} が x^{*e}_{ep} よりも小さい状況である．c) 節に示したように，ベースシナリオにおいて $x^{*b}_{pa} > 0$ であれば都心部での短距離移動に公共交通を利用する自動車ユーザーが存在し，$x^{*b}_{pa} = 0$ であれば自動車ユーザーはどのような条件でも公共交通を利用しない．本ケースはそのどちらの状況も含んでいるが，いずれの状況においても配車サービス導入後には自動車ユーザーは公共交通を利用しない．都心部の短距離利用に関しては配車サービスの方が公共交通よりも低コストとなるため，仮に短距離移動に自動車を利用しない場合，公共交通ではなく配車サービスを利用する．そして，そのような短距離移動を除けば，自動車ユーザーはほとんど全ての移動を自動車で行う．

中規模都市のケースと同様，公共交通と配車サービスは競争関係になるが，本ケースの場合は都心のごく一部の短距離利用を除けば，顧客は公共交通依存者のみであり，その競争に耐えうる需要が存在しない可能性がある．しかし利用者目線に立つと，郊外の公共交通依存者は配車サービスの導入によって移動コストを大きく下げることができるため，公共交通と配車サービスの適切な棲み分けを行うことが望ましい．

5.　まとめ

本研究では，新しい交通サービスとして普及が進む配車サービスと従前の公共交通機関の関係が協調もしくは競合となるような条件を明らかにするために，1 次元都市モデルと確定的交通機関選択モデルを導入した．前章に示したように，提案したモデルは，実際に世の中で行われている配車サービスの主要な 2 種類の利用方法，すなわち，都心における短距離利用と，郊外で公共交通と接続するフィーダーとしての利用を表現することが可能である．冒頭で述べたように，配車サービスに公共交通を補完する役割を期待する行政と収益を追求する配車サービス事業者の間にはギャップがあるが，上述した 2 種類の配車サービスの利用方法は，この両者の期待にそれぞれ応えるものである．

提案したモデルを用いて新たに普及が進む配車サービスが従前から存在する公共交通機関や都市の交通水準の及ぼす影響を評価した結果，配車サービス導入の影響は都市の規模によって異なることが分かった．

中規模都市においては，配車サービスの導入は従前から自動車を利用している層に影響を及ぼさない．そのため，配車サービスと公共交通は，従来から公共交

通を利用していた層を対象とした競争関係となり，配車サービスが利用されればされるほど公共交通の利用者が減る構図となる．公共交通の減収が許容できるのであれば中規模都市における配車サービスの導入は短期的には利用者にメリットをもたらすが，もし仮に減収により公共交通が維持できなければ長期的には地域の交通水準を悪化させる可能性がある．

これと異なり，大規模都市においては，従前から自動車を利用している層も配車サービスの導入の影響を受ける．郊外の自動車利用者層の一部は配車サービスをフィーダーとして公共交通に乗り継ぐような移動形態に転換する．この転換によって都心への自動車流入量が減少することから，他の自動車利用者の移動コストも低下し，多くの利用者にメリットをもたらすことができる．一方で，都心部においては中規模都市と同様に配車サービスと公共交通は競争関係となるため，バランスの良いサービス設計が望まれる．

小規模都市においては，わずかに残っていた都心部での公共交通利用が配車サービスに転換することにより，自動車ユーザーは全く公共交通を使わなくなる可能性がある．公共交通と配車サービスは自動車を利用できない公共交通依存者を対象とした競争関係となるが，利用者目線に立つと，郊外の公共交通依存者は配車サービスの導入によって移動コストを大きく下げることができるため，公共交通と配車サービスの適切な棲み分けを行うことが望ましい．

本研究では，公共交通の初乗り運賃や待ち時間は固定として分析を行った．そのため，配車サービスが導入された都市における短期的な行動変容については表現ができているが，利用者数の低下に伴う公共交通の運行頻度低下など，現実に起こっているより長期的な減少を表現するには至っていない．このような長期的な影響も考慮した上で，配車サービスと公共交通が協調して地域の交通水準を向上させるようなモビリティデザインの形を明らかにすることは今後の課題である．

謝辞

本研究の一部は，新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発：AI 技術に基づく短期交通予測手法と総合的な交通需要マネジメントの研究開発」の一環として実施したものである．ここに感謝の意を表す．

参考文献

1) Richard Arnott and An Yan. The two-mode problem: Second-best pricing and capacity. *Review of urban & regional development studies*, 12(3):170–199, 2000.

2) Asaf Bar-Yosef, Karel Martens, and Itzhak Benenson. A model of the vicious cycle of a bus line. *Transportation Research Part B: Methodological*, 54:37–50, 2013.

3) Leonardo J Basso and Sergio R Jara-Díaz. Integrating congestion pricing, transit subsidies and mode choice. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(6):890–900, 2012.

4) Edmond L d'Ouville and John F McDonald. Optimal road capacity with a suboptimal congestion toll. *Journal of Urban Economics*, 28(1):34–49, 1990.

5) Anthony Downs. The law of peak-hour expressway congestion. *Traffic Quarterly*, 16(3), 1962.

6) Marvin Kraus. A new look at the two-mode problem. *Journal of Urban Economics*, 54(3):511–530, 2003.

7) Marvin Kraus. Road pricing with optimal mass transit. *Journal of Urban Economics*, 72(2-3):81–86, 2012.

8) Zhi-Chun Li, William HK Lam, and SC Wong. Modeling intermodal equilibrium for bimodal transportation system design problems in a linear monocentric city. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(1):30–49, 2012.

9) John Michael Thomson. *Great cities and their traffic*. 1978.

10) Fangni Zhang, Robin Lindsey, and Hai Yang. The downs–thomson paradox with imperfect mode substitutes and alternative transit administration regimes. *Transportation Research Part B: Methodological*, 86:104–127, 2016.

11) Fangni Zhang, Hai Yang, and Wei Liu. The downs–thomson paradox with responsive transit service. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 70:244–263, 2014.

(2020. 9. 14 受付)