手段補完性を考慮したバス市場構造の分析に関する一考察*

A STUDY ON BUS MARKET STRUCTURE WITH STRATEGIC COMPLIMENTARITY*

松島格也** ・小林潔司***
by Kakuya MATSUSHIMA** and Kiyoshi KOBAYASHI***

1. はじめに

家計のバス利用行動には，1）往路にバスを利用すれば，復路においてもバスを利用せざるを得ない，2）バスを利用するために待ち時間が発生するが，往路・復路のいずれか一方の待ち時間が長くなれば，双方のバス利用そのものを諦めるという特性がある．家計はトリップチェイン全体の効用だけでなく，待ち時間という個々のトリップの（不）効用も判断し，交通手段を選択する．このようなバス利用構造の特性が，バスサービスの市場構造に多大な影響を及ぼしている．本研究では家計のバス利用行動における手段補完性を明示的に考慮したようなバス市場均衡モデルを定式化し，バス市場構造の特性を分析する．さらに，バス市場の維持・活性化戦略の導入がバス市場の効率性に及ぼす影響を分析する．

2. 本研究の基本的な考え方

目的地まで同一区間を往復する家計を考えよう．簡単のために，交通手段としてバス，自家用車のみが利用可能であるとする．往路にバスを利用すれば，復路でもバスを利用せざるを得ない．自家用車に関しても同様である．往路でバス利用を考えている家計でも，復路にバス利用が不可能であればバス利用を往復とも諦める．家計は往路と復路の双方における交通手段の利用可能性を考慮に入れて，トリップチェイン全体の交通手段を選択する．このように家計の交通行動には，往路と復路のいずれかのトリップにおける手段選択に関する制約が，いま一方のトリップの手段選択に制約条件として機能するという技術外部性（以下，手段的技術外部性と呼ぶ）が存在する．

家計は往路と復路の双方における交通手段の利用可能性を考慮に入れて，トリップチェイン全体の交通手段を選択する．家計がバスを利用する場合，バスの到着を待つための待ち時間という取引費用が発生する．往路と復路のうちいずれか一方の待ち時間が長くなれば，いま一方の待ち時間の長短に関わらず，バス利用を諦める．往路と復路の待ち時間は，相互に完全代替的ではなく不完全に代替可能である．このような待ち時間（取引費用）に対する不効用の性質を，不完全代替性と呼ぶ．

家計の交通行動には，上述のように手段的技術外部性と不完全代替性が存在する．バス利用トリップには，一方のトリップにおけるバス選択確率の増加（減少）が，いま一方のトリップにおける選択確率の増加（減少）をもたらすという戦略的補完性が存在する．自家用車には取引費用が存在しないため戦略的補完性は存在しない．本研究では，家計のバス選択行動に機能する戦略的補完性を手段補完性と呼ぶこととする．

バス市場に戦略的補完性に基づく規模の経済性が存在する場合，市場には複数の安定均衡解が存在する可能性がある．バス市場が独占企業により運営されている場合，仮に複数均衡解が存在し，効率性の悪い市場均衡に到達していても，例えば望ましいバスダイヤを一定期間継続する社会実験を政策的に実施することにより効率的な均衡解へ移動することが可能である．しかし，外部経済性が存在するため，資源配分上の非効率性の問題は残っている．本研究で

*キーワーズ：公共交通計画，交通管理
**正員 工修 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻
（〒606-8501 京都市左京区吉田本町　TEL 075-753-5073
kakuya@psa2.kuciv.kyoto-u.ac.jp)
***フェロー 工博 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻
（〒606-8501 京都市左京区吉田本町　TEL 075-753-5071
kkoba@psa2.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

は，規模の経済性が働く市場均衡の効率性を是正する簡便な方策として，手段補完性を解消することを目的とする交通手段の代替化施策に着目する．交通手段の代替化施策として，カーシェアリング，自転車共有化等の交通手段の共有化施策，片道定期券制度等，多様な交通施策が考えられる．

3. 市場均衡モデル

家計の通勤トリップを考えよう．通勤トリップの手段としてバスと自動車の双方が利用可能であると仮定する．家計が利用可能な往路と復路の交通手段は互いに手段補完的であり，家計が往路と復路に異なる交通手段を利用する場合，交通費用が禁止的に高くなると考えよう．各家計にはそれぞれ自らが希望する往路と復路の希望出発時刻が存在する．家計がバスを利用する場合，希望出発時刻後の最初の出発時刻を持つバスを選択する．希望出発時刻とバスの出発時刻との間に差異が存在する場合，待ち時間による不効用が発生する．一方，自動車を利用する場合には待ち時間は発生しない．家計は，往復の通勤トリップにバスを利用した場合と自動車を利用した場合の効用を比較して，効用の大きい交通手段を選択する．バス企業は独占企業であり，利潤を最大にするように運賃とバスダイヤを決定する．バス容量には制約がないと考える．

家計の往路と復路トリップの出発時刻の確率分布は外生的に与えられる．家計はすべて同質であり，出発時刻は確率密度関数

$$f(t)=\begin{cases}\frac{2}{T^2}(T-t) & 0\leq t\leq T\text{の時}\\ 0 & \text{それ以外の時}\end{cases}\quad(1)$$

に従うと仮定する．合計n本のバスサービスが時間軸上の離散的な時刻s_i $(i=1,\cdots,n,\ T\geq s_i\geq 0)$に提供されると考える．往路の希望出発時刻が$t_1$，復路の希望出発時刻が$t_2$である家計が，往復ともバスを利用した場合の間接効用関数を

$$U_{bus}(t_1,t_2:\boldsymbol{h})=Y+v(t_1)+v(t_2)-2p\quad(2)$$

と定式化する．ここに，Yは一般化所得，pはバス運賃を表す．$\boldsymbol{h}$はバス企業の戦略ベクトルであり，運賃pとバスダイヤ$\boldsymbol{s}(n)$で構成される．$v(\cdot)$はトリップに対する部分効用関数であり出発時刻の関数で表される．一方，自動車を利用した場合の効用も一般化所得に関する準線形効用関数$U_{car}=Y-2q$で表す．ここに，qは自動車を利用した場合の片道費用であり，駐車運賃や燃料費等が含まれる．

バスの往路と復路の待ち時間$s_i(t)-t$ $(i=1,2)$は互いに部分的に代替不可能である．このことを表現するために，部分効用関数$v(\cdot)$を，

$$v(t)=\begin{cases}-\xi(t) & -\xi-p\geq -q\text{の時}\\ -\infty & \text{それ以外の時}\end{cases}\quad(3)$$

と特定化しよう．ここに，$\xi(t)=\varepsilon(s_i(t)-t)$は金銭タームで表現された待ち時間の不効用である．また，ε (>0)は時間価値，$s_i(t)=\min\{s_i|s_i\geq t,\ i=1,\cdots,n\}$であり，希望出発時刻以降に出発するバスの中でもっとも早く出発するバスの出発時刻を表す．部分効用関数(3)は，家計が耐えうるバスの待ち時間に上限値が存在し，往路・復路のいずれか一方の待ち時間が閾値を超えれば往路・復路ともバスを利用しないという待ち時間の非代替性を表現している．

家計が利用する交通手段$i^*\in(bus,car)$は

$$i^*=\arg\max\{U_{bus}(t_1,t_2:\boldsymbol{h}),U_{car}\}\quad(4)$$

で表される．ここに，記号$\arg$は$U_{bus}(t_1,t_2:\boldsymbol{h})$と$U_{car}$のうち効用の大きい方の手段（busかcar)を指示している．またバスサービスの属性が$\boldsymbol{h}$でありかつ希望出発時刻がt_1,t_2の家計が獲得する効用水準は

$$U^*(t_1,t_2:\boldsymbol{h})=\max\{U_{bus}(t_1,t_2:\boldsymbol{h}),U_{car}\}\quad(5)$$

と表される．つぎに，バスサービスに対する集計化された需要関数は

$$m(p,\boldsymbol{s}(n))=\alpha\int_0^T\int_0^T\delta(t_1,t_2:\boldsymbol{h})f(t_2)f(t_1)dt_1dt_2\quad(6)$$

と表される．ここに表示関数$\delta(t_1,t_2)$は希望出発時刻の組みが(t_1,t_2)の家計がバスを利用する時に1を，そうでないときに0をとる関数である．

出発時刻がs_iであるバスに着目し，当該バスの時間軸上における市場の範囲を定義する．家計が当該バスを利用するためには当該家計の希望出発時刻は

$$s_i-t\leq\frac{q-p}{\varepsilon}\quad(7)$$

を満足しなければならない．ただし，$(q-p)/\varepsilon$は待ち時間の上限値を表す．したがって，時刻s_iに出発するバスの潜在的顧客の最早出発時刻$t^*(s_i)$は

$$t^*(s_i)=s_i-\frac{q-p}{\varepsilon}\quad(8)$$

で定義される．

バスサービス1便あたりの運行費用をcと表そう．バス利用者は往路と復路の双方においてバスを利用することに着目すれば，バス企業が運賃p，ダイヤ

$\boldsymbol{s}(n)$ の下で獲得できる利潤は

$$\Pi(n) = 2pm(p, \boldsymbol{s}(n)) - 2nc \tag{9}$$

と表される．バス企業は利潤 (9) を最大にするように運賃 p とバスダイヤ $\boldsymbol{s}(n)$ を決定する．

バス企業のダイヤ設定行動について考えよう．式 (7) より，当該のバスがカバーする家計の希望出発時刻の集合 $\Xi(s_i)$ は $\Xi(s_i) = \{t | t \in [t^*(s_i), s_i)\}$ と表される．それぞれのバスがカバーする市場の厚み（以下，市場幅と呼ぶ）Δ を $\Delta = \frac{q-p}{\varepsilon}$ と表そう．バス容量に制限がないため，バス企業は時間軸上での個々のバス市場が互いに重ならず，かつ利用者密度の大きい時刻帯より個々のバス市場が連続的につながるようにバスダイヤを設定する．いま，始発時刻 $s_1 = \Delta$ から間隔 Δ ごとに n 本のバスを運行するようなバスダイヤ（以下，条件付き最適ダイヤと呼ぶ）を $\boldsymbol{s}^*(n) = (\Delta, 2\Delta, \cdots, n\Delta)$ と表そう．バス企業が設定する最適な運行ダイヤは，

$$pm(p, \boldsymbol{s}^*(n^*)) - pm(p, \boldsymbol{s}^*(n^*-1)) \geq c \tag{10a}$$
$$pm(p, \boldsymbol{s}^*(n^*+1)) - pm(p, \boldsymbol{s}^*(n^*)) < c \tag{10b}$$

を満足するような $\boldsymbol{s}^*(n^*)$ で与えられる．

往路と復路の希望出発時刻の確率分布が互いに独立であることより，条件付き最適ダイヤ $\boldsymbol{s}^*(n)$ を与件としたバス需要関数は

$$\begin{aligned} m(p, \boldsymbol{s}^*(n)) &= \alpha \int_0^{n\Delta} \int_0^{n\Delta} f(t_2) f(t_1) dt_1 dt_2 \\ &= \alpha \{F(n\Delta)\}^2 = \frac{\alpha}{T^4} \left\{T^2 - (T - n\Delta)^2\right\}^2 \end{aligned} \tag{11}$$

と表される．ただし，関数 F は確率密度関数 (1) の分布関数であり，家計のバス利用確率を表す．

最後に，バス企業の運賃の決定問題を考えよう．当面の間，バスの運行本数 $\overline{n}$ を固定しよう．バスの運行本数 $\overline{n}$ を与件したバス企業の利潤は

$$\begin{aligned} \Pi(\overline{n}) &= 2pm(p, \boldsymbol{s}^*(\overline{n})) - 2\overline{n}c \\ &= 2p\alpha \{F(\overline{n}\Delta(p))\}^2 - 2\overline{n}c \end{aligned} \tag{12}$$

と表される．利潤 (9) の p に関する 1 階の最適化条件を求めれば

$$\begin{aligned} &4pF(\overline{n}\Delta(p)) \frac{\partial F(\overline{n}\Delta(p))}{\partial \Delta(p)} \frac{\partial \Delta(p)}{\partial p} \\ &+2\{F(\overline{n}\Delta(p))\}^2 = 0 \end{aligned} \tag{13}$$

を得る．最適化条件 (13) を満足するようなバス運行頻度 $\overline{n}$ の下での条件付き最適運賃を $p^*(\overline{n})$ と表そう．ここで，家計がバスを利用する誘因を持つためにはバス運賃に関して $p^*(\overline{n}) < q$ が成立しなければならないことに留意しよう．また，等時間間隔で運行されるすべてのバスが，家計の希望出発時刻が分布する時間区間 $[0, T]$ 内に運行されるためには，バス運賃はバスダイヤ設定時刻の制約 $n\Delta(p^*(\overline{n})) \leq T$ を満足しなければならない．したがって，条件付き最適運賃 $p^*(\overline{n})$ は

$$q > p^*(\overline{n}) \geq q - \frac{T\varepsilon}{\overline{n}} \tag{14}$$

を満足しなければならない．この時，市場均衡解は

$$\begin{aligned} &4p^*F(n^*\Delta(p^*)) \frac{\partial F(n^*\Delta(p^*))}{\partial \Delta(p^*)} \frac{\partial \Delta(p^*)}{\partial p^*} \\ &\quad +2\{F(n^*\Delta(p^*))\}^2 = 0 \end{aligned} \tag{15a}$$
$$p^*\alpha\{m(p^*, \boldsymbol{s}^*(n^*)) - m(p^*, \boldsymbol{s}^*(n^*-1))\} \geq c \tag{15b}$$
$$p^*\alpha\{m(p^*, \boldsymbol{s}^*(n^*+1)) - m(p^*, \boldsymbol{s}^*(n^*))\} < c \tag{15c}$$

を同時に満足するような p^*, n^* として求まる．ただし，p^* は条件 (14) を満足しなければならない．

4. 市場均衡解の特性

まず，バスの運行本数 n を固定し，条件 (15a) を満足するような条件付き最適運賃 $p^*(n) > 0$ を考えよう．式 (15a) を満たす解 $p^*(n)$ として

$$p^*(n) = \begin{cases} q \\ q - \frac{2T\varepsilon}{n} \\ \frac{-3(T\varepsilon - nq) \pm \sqrt{K(n)}}{5n} \end{cases} \tag{16}$$

が得られる．ただし，$K(n) = 9(T\varepsilon)^2 - 8T\varepsilon nq + 4(nq)^2$ である．式 (16) に示す 4 種類のバス運賃の中で，制約条件 (14) を満足する条件付き最適運賃 $p^*(n)$ は

$$p^*(n) = \frac{-3(T\varepsilon - nq) + \sqrt{K(n)}}{5n} \geq 0 \tag{17}$$

だけである．つぎに，最適運行本数を求める問題を考える．議論の見通しをよくするため，運行本数 n を実数と考えよう．この時，運行頻度に関する最適化条件 (15b),(15c) を

$$p\alpha \frac{\partial m(p^*(n), \boldsymbol{s}^*(n))}{\partial n} = c \tag{18}$$

と書き換えることができる．若干の計算により，運行費用 c が十分に小さい値をとる場合 $\partial \Pi(n, p^*(n^*))/\partial n = 0$ が成立するような $n^* > 0$ が存在し，その点において利潤は極大値をとる一方，c が十分大きい時 $n^* = 0$ において極大値 $\Pi(0, p^*(0)) = 0$ をとることがわかる．$F(n, p^*(n))$ が極大値をとる際の $n > 0$ の値を n° とすると，

$$\Pi(n^\circ, p^*(n^\circ)) = \alpha p(n^\circ) F(n^\circ, p^*(n^\circ))^2 - n^\circ c < 0 \tag{19}$$

が成立する場合には任意のnに関して負の利潤となるため，正の運行本数をもつ均衡解は存在しない．運行費用cの値に応じて均衡解の数は変化し，以下の命題が成立する．

命題1 運行費用cに関して$c \leq \frac{\alpha p(n^\circ)F(n^\circ, p^*(n^\circ))^2}{n^\circ}$が成立する場合，均衡条件を満たす均衡解として，$(p,n)=(0,0)$以外に均衡解$(p^*,n^*)$が少なくとも1つ存在する．$c > \frac{\alpha p(n^\circ)F(n^\circ, p^*(n^\circ))^2}{n^\circ}$が成立するときには$(0,0)$が唯一の均衡解となる．

命題1より，バス市場の構造に関する示唆が得られる．往路と復路の交通手段が補完的であるバス市場では手段補完性に伴う外部経済が機能し，バス企業のサービス水準（運行頻度）とサービスを利用する家計数との間にポジティブフィードバックのメカニズムが機能する．すなわち家計による需要の減少（増加）はバス企業のサービス水準の減少（増加）をもたらす．その結果，初期時点に状態に応じてバス市場は，正の運行本数をもつ市場均衡解$(p,n)=(p^*,n^*)$かもしくは全くサービスが提供されない均衡解$(p,n)=(0,0)$に収束する．

5．手段代替化施策の効果

一方，交通手段の代替化施策が導入され，それぞれのトリップにおいて互いに独立して手段選択が可能になる場合を考えよう．往路と復路の双方において，バス以外の交通手段が常に瞬時に利用可能である．いま，往路・復路において片道運賃qの代替的交通手段が常に利用可能であると考える．往路・復路にバスを利用した場合の片道あたりの部分効用関数を

$$\tilde{U}^i_{bus}(t_i : \boldsymbol{h}) = v(t_i) - p \tag{20}$$

と表そう．ただし，$i=1$の時は往路を，$i=2$の場合は復路を表す．一方，往路，もしくは復路において，自家用車も含めてバス以外の代替的な交通手段を利用した場合の片道あたりの効用関数を$\tilde{U}^i_{car} = -q$と表す．この時，バスサービスの属性が$\boldsymbol{h}$であり，かつ希望出発時刻がt_iである家計が最適な手段選択を実施することにより獲得できる効用水準は

$$\tilde{U}^*_i(t_i : \boldsymbol{h}) = \max\{\tilde{U}^i_{bus}(t_i : \boldsymbol{h}), \tilde{U}^i_{car}\} \tag{21}$$

と表せる．したがって，往路・復路トリップを通じて獲得できる間接効用関数は

$$\tilde{U}^*(t_1, t_2 : \boldsymbol{h}) = Y + \sum_{i=1}^{2} \tilde{U}^*_i(t_i : \boldsymbol{h}) \tag{22}$$

と表せる．前章と同様に，バス企業は始発時刻から時間幅Δごとに等間隔でバスを運行する．バス運行ダイヤ$\mathrm{s}^*(n)$を与件とした片道あたりのバス需要関数は，たとえば往路を例にとれば

$$\begin{aligned}\tilde{m}(p, \boldsymbol{s}^*(n)) &= \alpha \int_0^{n\Delta} f(t_1)dt_1 \\ &= \alpha F(n\Delta) = \alpha \frac{1}{T^2}\left\{T^2 - (T-n\Delta)^2\right\}\end{aligned} \tag{23}$$

となる．往路と復路が対称的であることより，バス企業の利潤$\tilde{\Pi}(n)$は

$$\tilde{\Pi}(n) = 2p\tilde{m}(p, \mathrm{s}^*(n)) - 2nc \tag{24}$$

となる．市場均衡モデルと同様の考え方により，手段代替化政策を導入した場合の市場均衡は

$$2\tilde{p}^* \frac{\partial F(\tilde{n}^*\Delta(\tilde{p}^*))}{\partial \Delta(\tilde{p}^*)} \frac{\partial \Delta(\tilde{p}^*)}{\partial \tilde{p}^*} + 2F(\tilde{n}^*\Delta(\tilde{p}^*)) = 0 \tag{25a}$$

$$\tilde{p}^*\alpha\{\tilde{m}(\tilde{p}^*, \boldsymbol{s}^*(\tilde{n}^*)) - \tilde{m}(\tilde{p}^*, \boldsymbol{s}^*(\tilde{n}^*-1))\} \geq c \tag{25b}$$

$$\tilde{p}^*\alpha\{\tilde{m}(\tilde{p}^*, \boldsymbol{s}^*(\tilde{n}^*+1)) - \tilde{m}(\tilde{p}^*, \boldsymbol{s}^*(\tilde{n}^*))\} < c \tag{25c}$$

を同時に満足するようなp^{**}, n^{**}として求まる．若干の計算により以下の命題が成立する．

命題2 $\frac{\alpha q^2}{2T\varepsilon} > c$が成立するとき均衡条件を満たす唯一の均衡解$(\tilde{n}^*, \tilde{p}^*)$が存在する．ただし，$\tilde{n}^* > 0$, $\tilde{p}^* > 0$である．一方，$\frac{\alpha q^2}{2T\varepsilon} \leq c$が成立する時，均衡解は$(0,0)$のみである．

このように手段代替化施策を採用した場合，複数均衡解は存在しない．これは往路と復路の交通手段選択に関する制約がそれぞれなくなることにより，手段補完性に伴う規模の経済性が働かなくなることによるものである．本節の設定では手段補完性に伴う外部経済が消滅するため，単一解の存在は単に運行費用cの大きさのみによって決定される．

6．おわりに

本研究では，バス市場に存在する外部性として，手段補完性に伴う外部経済性が存在することを指摘し，この外部経済性がバス市場に存在するポジティブフィードバックの原因となることを明らかにした．さらに，交通手段の代替化施策が手段補完性を解消する機能に着目し，代替化施策の導入が市場均衡の効率性に及ぼす影響を分析した．