

地方における公共交通の需要構造に関する一考察*

An Analysis of Activity and Demand for Public Transportation Service in Local Areas*

横松宗太**・喜多秀行***

by Muneta YOKOMATSU**, Hideyuki KITA***

1. はじめに

地方では都市と比べて公共交通の便数が少ない。交通企業は地方では需要が少ないので便数を減らし、乗車率を上げようと目論むことがある。それに対して本研究では、公共交通の便数の少なさを自らに需要を減少させる構造について記述する。

地方では都市と比べて公共交通の便数が少ないため、移動の際に待ち時間が発生する。待ち時間は、公共交通による移動を伴う活動の機会費用の一部を構成する。よって移動の際の待ち時間が長い場合、活動自体がキャンセルされることもある。本研究では時間配分モデルを用いて、地方の公共交通のダイヤを評価する枠組みを定式化する。そして、地方の公共交通の便数と待ち時間、活動の機会費用の関係を導出して、地方における公共交通の需要構造について検討する。また、集計的需要関数を把握している合理的な独占企業のダイヤと運賃の決定問題について記述し、市場均衡条件を導出する。さらに、利用者同士の活動のコーディネーションと利用者から企業への活動スケジュールに関する情報提供がパレート改善をもたらす可能性について指摘する。

2. 循環バスモデル

対象とする地域には R 人の住民が居住しており、地域内の移動にバスを利用している。 R 人の住民は同一の選好（効用関数）をもち、同一の予算制約・時間制約に直面していると仮定する。本モデルでは各個人の休日1日の活動を対象とする。活動には場所 $i (= 1, 2, \dots)$ で行う活動 i と自宅で行う在宅活動がある。本モデルでは大きい効用を与える活動の順に番

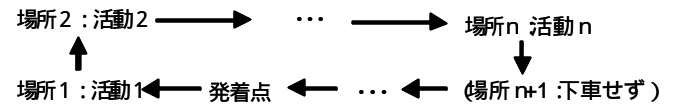


図-1 循環バスモデル

号 i を付すこととする。活動 i より得られる効用を以下の効用関数 $u_i(\cdot)$ により特定化する。

$$u_i(\tau_i) = (a - i\varepsilon)\tau_i - \frac{b\tau_i^2}{2} \quad (1)$$

τ_i は活動 i の活動時間を表す。 $a, b, \varepsilon (> 0)$ はパラメータであり、それらは $u_i(\tau_i)$ が、成立しえる τ_i の範囲において単調増加かつ限界効用逡減を示すように設定されている。一方、在宅活動の効用水準は $h_0 l_0$ 、バス停でバスを待つ時間の効用水準は hl により与えられると仮定する。ただし l_0, l はそれぞれ在宅活動時間、待ち時間を表し、 h_0, h は限界効用に相当するパラメータである。なお $h_0 > h > 0$ を仮定する。

活動 i を行うには公共のバスを利用して場所 i までいかなければならない。ここではバス路線について、個人が活動する機会をもつ全ての場所を循環して発着点に戻る循環路線を考える。モデルの簡単化のため、任意の地点間における移動時間はゼロとし、バスに乗りさえすれば瞬時に目的地に到着できると仮定する。自宅から最寄のバス停までの時間距離もゼロとする。自宅が発着点にあり、活動 n までを行う場合のイメージを図-1 に示す。個人は (活動数+1) 回、バスに乗り降りする。バスの運賃は移動区間に関わらず一律とする。また、都市では毎時刻バスが周回していると仮定する。一方、地方では1日に $(m+1)$ 本のバスが等しい時間間隔 (T/m) で発着点を出発して1周すると仮定する。なお、ハブ＝スポーク型のネットワークをもつバスシステムや、鉄道等の他の交通機関を想定しても本研究の本質は変わらない。本研究ではモデルの分析を容易にする目的で「循環バスモデ

*キーワード：公共交通，交通需要，情報提供

**正員 工博 鳥取大学工学部社会開発システム工学科
(〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101 TEL/FAX 0857-31-5311)

***正員 工博 鳥取大学工学部社会開発システム工学科

ル」を定式化する．個人の効用最大化問題は以下の時間配分問題として表される．

$$\begin{aligned} \max_{x, \tau_i (i=1, \dots, n), l_0, l} \quad & U = x + \sum_{i=1}^n u_i(\tau_i) + h_0 l_0 + h l \quad (2a) \\ \text{s.t.} \quad & x + p(n+1) = Y \quad (2b) \\ & \sum_{i=1}^n \tau_i + l_0 + l = T, \tau_i, l_0, l \geq 0 \quad (2c) \end{aligned}$$

n は実際に行われる活動数を表す． n は自然数であり，離散的な内生変数である． x は消費， p は1回あたりの運賃， Y は利用可能所得， T は利用可能時間を表す．式(2b)(2c)はそれぞれ予算制約，時間制約を意味する．一方，バス企業は独占企業と仮定する．バス企業は住民の集計的需要関数を知っており，利潤を最大化するように料金とダイヤを決定すると仮定する．バス企業の行動については4.で詳述する．

3. 利用者の問題

(1) 都市における交通行動

都市と地方の相違を鮮明にするため，都市では在宅活動が行われないようなパラメータ環境を仮定しよう．都市では毎時刻バスが循環しているため，待ち時間が生じることなく活動を切り替えることができる．問題(2a)-(2c)のKuhn=Tucker条件より，

$$u'_i(\tau_i) = a - i\varepsilon - b\tau_i = \mu \quad (\text{for } i = 1, \dots, n) \quad (3)$$

μ は式(2c)に対応したラグランジュ乗数を表す．よって各活動の限界効用が同一の μ に到達したときに，次の活動に切り替えることが効率的となる．上式より $\tau_i = \tau_i^\circ(\mu)$ を得る． $l_0 = l = 0$ と併せて式(2c)に代入すると次式を得る．

$$\mu = a - \frac{\varepsilon(n+1)}{2} - \frac{bT}{n} = \mu^\circ(n) \quad (4)$$

最適活動数 n^* は次の条件を満足する自然数となる．

$$u_{n^*}(\tau_{n^*}^\circ(\mu^\circ(n^*))) \geq p + h_0 \tau_{n^*}^\circ(\mu^\circ(n^*)) \quad (5a)$$

$$\begin{aligned} u_{n^*+1}(\tau_{n^*+1}^\circ(\mu^\circ(n^*+1))) \\ < p + h_0 \tau_{n^*+1}^\circ(\mu^\circ(n^*+1)) \quad (5b) \end{aligned}$$

ここでは $n^* > 1$ を仮定する．式(5a)(5b)において右辺は活動の機会費用を表す．機会費用は追加的に生じる運賃と在宅活動の効用で構成される．不等式(5b)は， $(n^* + 1)$ 個の活動で時間配分を行うと最後の活動の効用は機会費用を下回ることを意味してい

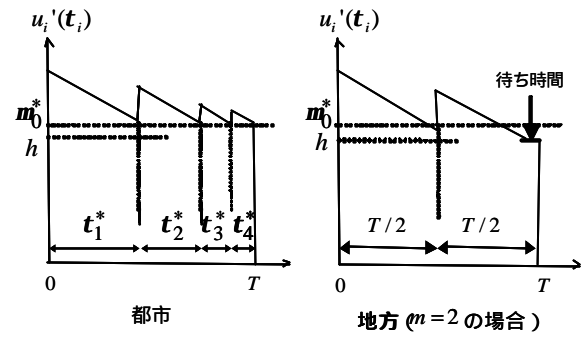


図-2 活動の限界効用と切り替えの関係

る． $n = n^*$ により， $\mu^* = \mu^\circ(n^*)$ ， $\tau_i^* = \tau_i^\circ(\mu^*)$ を得る．図-2の左図に $n^* = 4$ の場合の都市での活動の限界効用と切り替えの関係を示す．

個人の活動数を $n^*(p)$ と表すと，当該個人のバス需要は $d^*(p) = n^*(p) + 1$ となる．都市の個人の時間価値を導こう．間接効用関数を $V(Y, T, p)$ と表す．

$$V(Y - dY, T + dT, p) = V(Y, T, p) \quad (6)$$

の左辺を全微分して包絡線定理を利用することにより，時間価値 VOT は次式に決まる．

$$VOT = \frac{dY}{dT} = \frac{\partial V / \partial T}{\partial V / \partial Y} = \mu^* \quad (7)$$

所得のshadow priceは1である．都市における時間価値は時間のshadow priceであり，全ての活動を切り替える限界効用の水準に相当する．

(2) 地方における交通行動

地方では活動を切り替えるタイミングがバスの循環の時間間隔(T/m)に規定されることになる．地方での活動の切り替えを図-2の右図に示す．地方において活動 j に待ち時間が生じる条件は，

$$u'_j(\tilde{\tau}_j) = a - j\varepsilon - b\tilde{\tau}_j = h \quad \text{かつ} \quad \tilde{\tau}_j < \frac{T}{m} \quad (8)$$

すなわち， (T/m) 時間間隔でバスが循環してくるまでに活動 j の限界効用が待ち時間の限界効用に到達する場合である．上式より $j > \{a - (bT/m) - h\} / \varepsilon \equiv \bar{j}(m)$ の番号の活動で待ち時間が生じることとなる．待ち時間が生じない活動すなわち $1 < j \leq \bar{j}$ の活動の効用を $u_j^A(T/m)$ ， $j > \bar{j}$ の活動の効用を $u_j^B(\tilde{\tau}_j)$ と表そう．前章と同様に活動 j を行う条件は，活動 j より得られる効用と機会費用の比較によって与えられる．

$$u_j^A\left(\frac{T}{m}\right) \geq p + h_0 \frac{T}{m} \quad (9a)$$

$$u_j^B(\tilde{\tau}_j) \geq p + h_0 \tilde{\tau}_j + (h_0 - h)\left(\frac{T}{m} - \tilde{\tau}_j\right) \quad (9b)$$

式(9b)の右辺第3項は待ち時間に起因する機会費用を意味する．便数が少なく m が小さいほど待ち時間が長くなり，活動の機会費用は増大する．いま， $j \leq \hat{j}$ であれば不等式(9a)ないし(9b)が満たされるような $\hat{j} = \hat{j}(p, m)$ が存在する．以上より，地方においてバス停で待ち時間が発生する状況やバス需要 $d(\cdot)$ は， $m, \bar{j}(m), \hat{j}(p, m)$ の大小関係によって表.1のようにまとめられる．地方における活動数，バス需要はそれぞれ $n^*(p, m)$ ， $d^*(p, m) = n^*(p, m) + 1$ のように，運賃のみならずバスの便数にも依存することがわかる．

表-1 待ち時間とバス需要のパターン

	m, \bar{j}, \hat{j} の大小関係	待ち時間が 生じる活動 \bar{j}	活動数 n^*	バス需要 d^*
1	$\bar{j} < \hat{j} < m$	$\bar{j} < j < \hat{j}$	\hat{j}	$\hat{j} + 1$
2	$\bar{j} < m < \hat{j}$	$\bar{j} < j < m$	m	$m + 1$
3	$\hat{j} < \bar{j} < m$	なし	\hat{j}	$\hat{j} + 1$
4	$\hat{j} < m < \bar{j}$	なし	\hat{j}	$\hat{j} + 1$
5	$m < \bar{j} < \hat{j}$	なし	m	$m + 1$
6	$m < \hat{j} < \bar{j}$	なし	m	$m + 1$

時間価値は都市のケースと同様の手順で導かれる．

$$VOT = \frac{dY}{dT} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{n^*} u'_i\left(\frac{T}{m}\right) + \frac{(m - n^*)}{m} h_0 \quad (10)$$

式(7)のように単一のラグランジュ乗数とは一致しない．利用可能時間 T が追加的に1単位増加したことにより，バスの循環の時間間隔が $(1/m)$ 時間ずつ広がったとすると，そのときの効用の増分は各活動の終端時刻の限界効用に $(1/m)$ 時間を乗じて加算したものに相当する．都市で個人の時間価値を計測する上では，顕在化した一つの活動の限界効用関数と活動時間に関する情報があればよい．それに対して地方では個人のあらゆる活動の限界効用関数を知る必要がある．本章では都市と地方のそれぞれの交通環境の下での住民の最適な活動選択条件，活動時間選択条件を導いた．しかし問題(2a)-(2c)では予算制約，時間制約の下で各活動 i の活動時間 τ_i を導出したに過ぎない．図-2では活動1，活動2，…の順に行うケースについて示したが，逆の順番で行う活動スケジュールも同様に最適行動となる．本研究では各活動の順番を特定した時系列 $(\tau_j, \dots, \tau_{j'}, \dots)$ を活動スケジュールと呼ぼう．最適な活動スケジュールは $\tau_i > 0$ となる活動の順列の数 n^* ! だけ存在する．

4. バス企業の問題

バス企業は前章で導いた需要関数 $d^*(p, m)$ について知っているが，通常それぞれの利用者の活動の順番については知らない．あるいは，仮にパーソントリップ調査データ等を通じた個々の利用者の活動スケジュールに関する情報を入手していたとしても，利用者間で活動の順番は異なる．利用者の数が多くなると，それらは n^* ! 通りのスケジュールの間で均一に分散ようになる．このような状況の下ではバス企業はバスの運行間隔を等間隔に設定することが最適となる．3.(2)に示した等間隔ダイヤはバス企業の最適ダイヤ設計と整合的である．

バス企業は以下に示す問題を解いて運賃 p と運行本数 $(m + 1)$ を決定する．

$$\max_{p, m} p \cdot R d^*(p, m) - c \cdot (m + 1) \quad (11)$$

ただし R は利用者の人数を， c はバス1本あたりの運行費用を表す．固定費用は無視する．また，バス需要 $d^*(p, m)$ ，運行本数 $(m + 1)$ は本来は非負の整数であるが，ここではモデルの取り扱いの簡単化のため $d^*(p, m)$ を p, m に関して連続な関数， m を連続的な値をとり得る実数と仮定しよう．このとき1階の最適化条件は次式で与えられる．

$$d^*(p, m) + p \frac{\partial d^*(p, m)}{\partial p} = 0 \quad (12a)$$

$$p R \frac{\partial d^*(p, m)}{\partial m} - c = 0 \quad (12b)$$

ただしバス需要関数 $d^*(p, m)$ は表-1に示すようにパラメータ環境によって変化する．式(12a)(12b)を満足する (p^0, m^0) が独占市場における市場均衡解となる．市場均衡において達成される利用者の効用水準 U を V^0 とする．

5. 活動の協調と情報提供の効果

表-1に示すパターン1,3,4ではバスが $(m + 1)$ 本運行されているにもかかわらず，個々の利用者の需要は $(\hat{j} + 1)$ 本に止まっている．このとき時刻 $t = 0$ に外出する利用者は時刻 $(\hat{j}T/m)$ には外での全ての活動を済ませて帰宅する．そして当該利用者の帰宅後にも地域では $(m - \hat{j})$ 本のバスが運行していることになる．一方，1日の始めに在宅活動を行う利用者は時間帯が遅いバスを利用している．このように住

民の間で活動スケジュールが異なる場合には、バスの需要本数が同じであってもバス利用の時間帯は異なったものとなる。このときバス企業が個々の利用者の需要よりも多くのバスを供給する意味はある。

さまざま活動の中には、地域住民が同時に開始できるものもある。またイベントの開始時刻の設定等を通じて、住民の活動スケジュールの選択を誘導できる場合もある。本章では極端なケースとして、地域の住民が全ての活動を同時に行うことができる場合を考えよう。バスや活動場所における混雑は生じないものと仮定する。いま、全ての地域住民が活動順序 s に同意したとしよう。活動順序 s の下で最終的に実現する活動スケジュールを、活動番号と活動時間を時系列に並べることによって $\Phi(s) = (\tau_{i'}^1, \tau_{i'}^2, \dots, \tau_i^k, \dots)$ のように表そう。 τ_i^k は活動 i が k 番目に行われるときの活動時間を意味する。そして全ての地域住民が活動スケジュール $\Phi(s)$ を採用するときのバスダイヤを $\Delta = (0, t^1, \dots, t^k, \dots, t^m)$ により表そう。 t^k は $(k+1)$ 番目のバスの運行時刻であり、利用者が k 番目の活動後に乗るバスの時刻に相当する。なおここでは始発の時刻は $t=0$ であり、地域住民の1番目の活動は時刻0に行われるケースを対象とする。またパターン3,4のように待ち時間が発生しない環境を対象とする。パレート改善を実現するダイヤ決定問題は以下のように表される。

$$\max_{p, t^k (k=1, \dots, m)} (pR - c)(m+1) \quad (13a)$$

$$\text{s.t. } t^k = \sum_{\gamma=1}^k \tau_i^\gamma \quad (\text{for } k = 1, \dots, m) \quad (13b)$$

$$u_1'(\tau_1^{k'}) = u_2'(\tau_2^{k''}) = \dots = u_m'(\tau_m^{k''''}) \quad (13c)$$

$$\sum_{i,k=1}^m \tau_i^k = T, \tau_i^k > 0 \quad (\text{for } i, k = 1, \dots, m) \quad (13d)$$

$$u_m(\tau_m^k) \geq p + h_0 \tau_m^k \quad (13e)$$

$$U(p, \Delta) \geq V^0 \quad (13f)$$

ここでは各利用者のバス需要を運行本数に一致させることができる。上問題は条件(13f)によって利用者に方策導入前の効用水準を保証しながら、企業の利潤を最大化する問題になっている。任意の効用水準 \bar{V} と置き換えれば一般的なパレート効率解の導出問題となる。式(13b)は運行時刻と活動時間の関係を表す。式(13c)は都市の交通行動の場合と同様の最適な

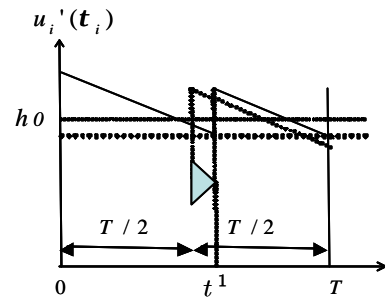


図-3 ダイヤの変更と活動数、バス需要の増加の例

活動切り替え条件を表している。利用者間の活動協調と情報提供によって、式(13c)を満足するようにダイヤ Δ を設定することが可能となる。式(13e)は、最も効用が小さい活動 m の効用が機会費用を上回る条件である。上問題においてバスの運行本数 $(m+1)$ は、ダイヤ Δ と同時に決定する内生変数となる。

なお、バスの運賃と運行本数 (-1) を (p^0, m^0) に留めたまま、運行時刻の変更のみを通じて利用者とバス企業の厚生を改善できる場合もある。図-3は運行本数 (m^0+1) を3本としたまま、2本目の運行時刻を $(T/2)$ から t^1 へ変更したことによって、利用者が以前はキャンセルしていた2番目の活動を行うようになり、バス需要と利用者の効用、企業の利潤が増加するケースを示している。

6. おわりに

本研究では地方における公共交通需要が価格のみならず便数にも依存することを指摘した。そして利用者間の活動の協調とバス企業への活動スケジュールの伝達を通じて利用者とバス企業の厚生を改善を図るダイヤ設計問題の枠組みを定式化した。しかし本稿はアイデアの概略を示したに過ぎない。今後、厳密な数学的証明を与えていく必要がある。また数値計算を通じて解の性質を検討していく必要がある。また本モデルでは特定化した関数を用いたが、今後は議論の一般性について調べていく予定である。

参考文献

- 1) Becker, G.: A theory of the allocation of time, *The Economic Journal*, Vol.75, pp.493-517, 1965.
- 2) Kitamura, R.: A model of Daily Time Allocation to Discretionary Out-of-home Activities and Trips, *Transportation Research B*, Vol.18B, No.3, pp.255-266, 1984.
- 3) 河野達仁, 森杉壽芳: 時間価値に関する理論的考察 - 私的交通のケース -, 土木学会論文集, No.639/IV-46, pp.53-64, 2000.