

運賃の設定がデマンドバスサービスの適用性に及ぼす影響*

Applicability of DRT Service considering Fare Arrangement*

磯崎 晶光[†]・吉村 充功[‡]・奥村 誠[§]

By Akimitsu ISOZAKI, Mitsunori YOSHIMURA and Makoto OKUMURA

1. はじめに

日本は少子高齢化により 2006 年を境に人口が減少すると言われている。都市近郊の住宅団地もその例外ではなく、その地域の住民の足として利用されてきた団地と都心を結ぶバスは、各団地への直行バスを維持できる需要量を確保できなくなり、路線の統廃合が不可避となる。このとき、幹線道路のみを走る幹線バスと、幹線を走りながら各団地に迂回する迂回型バス、利用者の呼び出しに応じて団地に迂回する迂回型デマンドバス（DRT）等に集約されていく可能性がある¹⁾。

近年、これらの問題に対応すべく都市近郊でのデマンドバスサービスの適用可能性を探る社会実験が、多摩ニュータウンの“のりタク”²⁾、帯広市の“フレ愛りりんバス”³⁾といった形で実施されている。これらの実験では、デマンドバスによる Door-to-Door のサービスを提供して地域住民のアクセスをどのように確保して需要をいかに集めるかということに主眼がおかれている。しかしながら、これまでデマンドバスサービスと運賃の関係について明らかにされた研究はない。

ところで、デマンドバスは呼び出しを行うことで、すでに乗車していた利用者に対する乗車時間の増加、これから乗車しようとする利用者に対するバス停での待ち時間の増加といった負の外部効果が発生する⁴⁾。そのため、利用者が多すぎると外部効果を制御できなくなり、逆に少なすぎると運行コストをまかなう事ができないため、適用地域での需要の厚みが重要となる。帯広のケースでは提供したサービスに

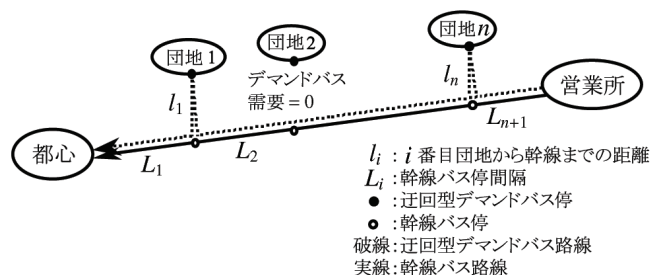


図-1 バス路線の概要

対して利用者が増加しデマンドサービスの維持が難しくなったことが報告されている。そこで、適切な運賃を設定し利用者を制御することで、これまでデマンドバスが適用できないと思われてきた地域に対して適用できるようになる可能性がある。

本研究では都市近郊の団地群に対して、幹線バスとデマンドバスを組み合わせたバスサービスを提供する状態を考える。このとき運賃を設定することでデマンドバスが有効な地域の条件が異なることを明らかにし、デマンドバスの適用における運賃設定の重要性を明らかにする。

2. モデルの設定条件

本研究では図-1のような都市形態を想定し、以下の仮定のもとで分析を行う。

- 郊外の営業所と都心を結ぶ幹線道路に沿って n 個の団地が存在する。団地 i の中心部から幹線道路までの距離を l_i (km)、幹線道路上の団地 ($i-1$) の分岐点から、団地 i の分岐点までの距離を L_i (km) とおく。
- 郊外の営業所と都心間には、幹線道路のみを走行する幹線バス (M) と、呼び出しにより各団地に迂回するデマンドバス (D) が運行される。幹線バスのバス停は、幹線道路上の団地への道

*Key words: 公共交通運用, DRT, 交通制御

[†] 学生員, 広島大学大学院 工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1, TEL&FAX 082-424-7849)

[‡] 正会員, 博(工), 日本文理大学 工学部 (〒870-0397 大分市一木 1727, TEL 097-524-2611)

[§] 正会員, 博(工), 広島大学大学院 工学研究科

路の分岐点にあり, デマンドバスのバス停は団地の中心部にある. それぞれの時刻表は所与とし, 渋滞などによる遅れは考えない. 幹線バスとデマンドバスの運行間隔 (h /台) をそれぞれ I^M, I^D とする. 走行速度はバスの種類に関係なく v_b (km/h) で一定とする. また, バス停での停車時間は無視する.

- 利用者のアクセスとして, 幹線バス利用時の団地中心部から幹線バス停までを考え, その他のアクセス時間は無視する. 徒歩速度は v_w (km/h) で一定とし, 幹線バス利用者は, バス到着予定時刻にバス停に到着するように自宅を出発する.
- デマンドバスは利用者がバス停到着と同時にバス停のボタンを押すことにより呼び出すとする. また, 時刻表には郊外側のバス停に全く迂回せず, 最短の時間で当該バス停に到着する場合の時刻が記載されている. そのため, 利用者は時刻表記載時刻の l_i/v_b (h) 前にバス停に到着しデマンドバスを呼び出す.
- 団地 i の利用者数 (需要) は X_i (人/ h) とし, 全員が都心まで乗車する. なお, 利用者の選好は等質とする.
- バスの容量制約および車内の混雑は考慮せず, 利用者は希望したバスに必ず乗車できるとする.

3. 不効用と社会的総費用最小化問題の定式化

利用者は幹線バス利用とデマンドバス利用の効用を比較し, 一方を選択する. 利用時に発生する効用はすべて負の効用であるため, ここでは不効用として定式化する.

団地 i の利用者が各バス (M, D) を利用する時の不効用 f_i^M, f_i^D (円) は, 希望時刻にバスがないことによる家での待ち時間 (a), 幹線バス停までの徒歩時間 (b), 乗車時間 (c), デマンドバスが郊外側で迂回した場合に発生するバス停での待ち時間 (d) の各期待不効用と, 各バスの運賃 $Fare_i^M, Fare_i^D$ (円) からなるとし, 以下のように定義する. a, b, c, d は各

不効用の時間価値 (円/ h) である.

$$f_i^M = a \frac{I^M}{2} + b \frac{l_i}{v_w} + c \sum_{j=1}^i \frac{L_j}{v_b} + Fare_i^M \quad (1)$$

$$f_i^D = a \frac{I^D}{2} + d \left(\sum_{k=i+1}^n \frac{2\delta_k l_k}{v_b} + \frac{l_i}{v_b} \right) + c \left(\sum_{j=1}^i \frac{L_j}{v_b} + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{2\delta_j l_j}{v_b} + \frac{l_i}{v_b} \right) + Fare_i^D \quad (2)$$

ここで, デマンドバスは他の団地の利用者から呼び出された場合のみ迂回するので, 利用者はデマンドバスの効用を確定的に把握することは出来ない. 団地 i のデマンドバス利用者の発生がポアソン分布に従うと仮定すると, デマンドバス迂回確率 δ_i は以下のように定義できる.

$$\delta_i = 1 - \exp(-\sigma_i X_i I^D) \quad (3)$$

デマンドバス選択確率は利用者不効用を用いて以下の2項ロジットモデルで与えるとする. ただし, α は不効用のスケールパラメータである.

$$\sigma_i = \frac{1}{1 + \exp\{\alpha(f_i^D - f_i^M)\}} \quad (4)$$

バス1台あたりの運行コストは, バスの運行時間に比例すると仮定する. 幹線バスとデマンドバスの単位時間当たりの総運行コスト g^M, g^D は, それぞれ, 1台のバスが単位時間走行した場合のバス運行コスト MOT, DOT (一定) (円/ h /台) と, バスの運行時間の積を運行間隔 (h /台) で除したものと定義する. デマンドバスの運行コストは運転手の拘束時間を考慮し, 全ての団地に迂回した場合で考える.

$$g^M = (MOT) \left(\sum_{j=1}^{n+1} \frac{L_j}{v_b} \right) \frac{1}{I^M} \quad (5)$$

$$g^D = (DOT) \left\{ \sum_{j=1}^n \left(\frac{L_j + 2l_j}{v_b} \right) + \frac{L_{n+1}}{v_b} \right\} \frac{1}{I^D} \quad (6)$$

運賃は利用者と事業者間での取引であり, 社会全体ではキャンセルされる. そこで, 社会的総費用 TC (円/ h) は以下のように定義できる.

$$TC = \sum_{i=1}^n \left\{ (f_i^M - Fare_i^M) (1 - \sigma_i) X_i + (f_i^D - Fare_i^D) \sigma_i X_i \right\} + (g^M + g^D) \quad (7)$$

社会全体としては, 社会的総費用 TC を最小化することが望ましい. このとき, 政策的に操作可能な

表 - 1 運賃差 0 円のケース

徒歩 時間価値	バス台数		運行間隔 (h/台)		デマンドバス 利用者数 (人)	幹線 + デマンド 社会的総費用	幹線のみ 社会的総費用
	デマンド	幹線	デマンド	幹線			
1,500	14	6	0.186	0.367	54.94	¥ 85,337	¥ 84,925
1,600	14	6	0.186	0.367	56.00	¥ 85,810	¥ 85,925
1,700	14	6	0.186	0.367	57.08	¥ 86,262	¥ 86,925

表 - 2 運賃差 100 円のケース

徒歩 時間価値	バス台数		運行間隔 (h/台)		デマンドバス 利用者数 (人)	幹線 + デマンド 社会的総費用	幹線のみ 社会的総費用
	デマンド	幹線	デマンド	幹線			
1,500	13	7	0.200	0.314	42.61	¥ 85,014	¥ 84,925
1,600	13	7	0.200	0.314	43.63	¥ 85,607	¥ 85,925
1,700	13	7	0.200	0.314	44.67	¥ 86,182	¥ 86,925

変数は運行間隔と運賃である。よって、社会的総費用最小化問題は次のように定式化できる。

$$\min_{I^M, I^D, Fare_i^M, Fare_i^D} TC \quad (8a)$$

s.t.

$$\left(\frac{2 \sum_{i=1}^{n+1} L_i}{v_b} \right) / I^M + \left(\frac{2 \sum_{i=1}^{n+1} L_i + \sum_{i=1}^n 2l_i}{v_b} \right) / I^D = \text{const.} \quad (8b)$$

$$I^M \geq 0, \quad I^D \geq 0 \quad (8c)$$

式 (8b) は総バス台数に関する制約条件である。左辺第 1 項が幹線バス台数、第 2 項がデマンドバス台数を示す。郊外の営業所から都心へ運行した後、バスは郊外の営業所に戻る。その場合、幹線道路のみを走る幹線バスに比べ、団地に迂回して走行するデマンドバスは余分に所要時間がかかることを考慮し、営業所と都心の最大往復時間を運行間隔で除した総バス台数に制約を設けた。式 (8c) は運行間隔の非負条件である。

この場合、均衡解は解析的に求めることが出来ず数値計算に頼る必要がある。初期値としてデマンドバスと幹線バスの運賃差 $\Delta Fare_i (= Fare_i^D - Fare_i^M)$ と各バス台数を与える。さらに、団地ごとのデマンドバス選択確率 σ_i を与え、式 (3) からデマンドバス迂回確率 δ_i を求め、得られたデマンドバス迂回確率 δ_i を代入した利用者不効用から式 (4) の右辺を計算する。求めた σ_i と初期値として与えた σ_i の整合が取れるように、 σ_i を更新しながら繰り返し計算を行う。各バス台数の初期値を変更し、それぞれに得られた社会的総費用 (7) を比較し、最も小さくなった組み合

わせを最適解とする。

4. 運賃差がデマンドバスの適用可能性へ与える影響

(1) 分析の考え方

本研究では、徒歩時間に対する抵抗が居住者の層、つまり地域によって異なると考え、徒歩の時間価値 (b) を地域の代表値として考える。つまり、 b が小さい地域は他の時間価値との差が小さくなるため、利用者は徒歩だけではなくバス乗車時間や、バス停におけるバス待ち時間の不効用の影響を同時に評価する。これは、比較的若い世帯の多い地域を意味する。逆に b が大きい地域は、バス乗車時間やバス待ち時間以上に徒歩による抵抗が大きくなるため高齢者の多い地域を表すことを意味している。

デマンドバスの適用可能条件を明らかにするために、ここではデマンドバスと幹線バスの運賃差と、徒歩時間価値 (b) の組み合わせによる最適解を算出し、同様の地域に幹線バスのみで運行を行った際の最適解を比較する。

(2) 定数値の設定

簡単化のため、幹線バス停間隔 L_i 、団地と幹線バス停の間隔 l_i 、需要 X_i を一定とし、それぞれ L, l, X とおく。定数値は、家での時間価値 $a = 350$ (円/h)、バス乗車時間価値 $c = 600$ (円/h)、バス停での待ち時間価値 $d = 450$ (円/h)、幹線バス運行費用 $MOT = 3,500$ (円/h/台)、デマンドバス運行費用 $DOT = 2,800$ (円/h/台)、需要 $X = 10$ (人/h)、バス速度 $v_b = 15.0$ (km/h)、徒歩速度 $v_w = 3.0$ (km/h)、幹線バス停間隔 $L = 1.5$ (km)、団地 ~ 幹線間隔 $l = 0.3$ (km)、団地数 $n = 10$

表-3 運賃差 200 円のケース

徒歩 時間価値	バス台数		運行間隔 (h/台)		デマンドバス 利用者数 (人)	幹線 + デマンド 社会的総費用	幹線のみ 社会的総費用
	デマンド	幹線	デマンド	幹線			
1,400	11	9	0.236	0.244	29.48	¥ 84,040	¥ 83,925
1,500	12	8	0.217	0.275	31.58	¥ 84,755	¥ 84,925
1,600	12	8	0.217	0.275	32.48	¥ 85,449	¥ 85,925

表-4 運賃差 500 円のケース

徒歩 時間価値	バス台数		運行間隔 (h/台)		デマンドバス 利用者数 (人)	幹線 + デマンド 社会的総費用	幹線のみ 社会的総費用
	デマンド	幹線	デマンド	幹線			
1,100	8	12	0.325	0.183	8.31	¥ 80,969	¥ 80,925
1,200	8	12	0.325	0.183	8.63	¥ 81,890	¥ 81,925
1,300	8	12	0.325	0.183	8.97	¥ 82,805	¥ 82,925

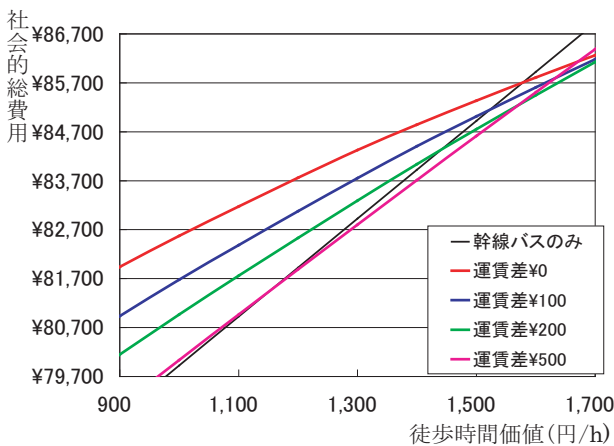


図-2 社会的総費用の推移

(個), スケールパラメータ $\alpha = 0.005$, 総バス台数 20 台とした。なお, 実用性を考慮して, 運賃差 $\Delta Fare_i$ は団地によらず一定とする。

(3) 数値計算結果

幹線バスとデマンドバスを組み合わせで運行し運賃差を 0 円, 100 円, 200 円, 500 円に設定して計算した結果と幹線バスをみの運行の場合の社会的総費用を表-1 から表-4 に示す。また各ケースの徒歩時間価値と社会的総費用のグラフを図-2 に示す。

社会的総費用は徒歩時間価値が大きくなるにしたがって増加する。デマンドバスを適用するには, 幹線バスとデマンドバスを組み合わせたときの社会的総費用が, 幹線バスをみの値よりも小さくなる必要がある。図-2 より, 運賃差が大きくなるにつれて社会的総費用の交差する徒歩時間価値の値が小さくなるため, 交点より右側のデマンドバスを適用できる範囲が拡大している。これは, 徒歩の時間価値が大きい場合, 幹線バスの不効用が増加するため利用

者はデマンドバスを多く利用するようになる。しかし, デマンドバスは負の外部性を持つため利用者が多くなりすぎると不効用が卓越してしまう。そのため, 社会的総費用が幹線バスをみのケースと比べ, 高くなる。そこで, 運賃差をつけることでデマンドバスを適切な利用人数に制限し, 社会的総費用を抑えることが可能となってくる。

5. おわりに

本研究では, デマンドバスと幹線バスに適切な運賃差を設定することで, デマンドバスの適用できる地域が拡大することに着目して分析を行った。その結果, 両バスの運賃差を適切に設定することで, これまでデマンドバスの適用が不利になっていた地域に対して, デマンドバスを適用することができるようになり, 社会的に見てもより最適な状況が作り出せる可能性があることを明らかにした。

今後の課題として, 現在の均衡解は解析的に求めることが出来ていない。団地数を減少させるなどにより, 解析的に解を求める必要があると考える。また, 地域ごとにどのような時間価値の値を用いるべきかの検討を行うことが考えられる。

参考文献

- 1) 鈴木文彦: 路線バスの現在・未来, グランプリ出版, 2001.
- 2) 吉田樹・秋山哲男: 都市部における DRT システムとその適用可能性, 土木計画学研究・講演集 CD-R, Vol.31, No.256, 2005.
- 3) 若菜千穂・原文宏・佐藤徹也: 帯広市のフレックスバスの運行システムと適応性, 土木計画学研究・講演集 CD-R, Vol.31, No.254, 2005.
- 4) 磯崎晶光・吉村充功・奥村誠: 都市近郊デマンドバス運用に関する理論的考察, 土木計画学研究・論文集, Vol.21, No.4, pp.847-852, 2004.