

都市近郊デマンドバス運用に関する理論的考察*

Theoretical Analysis of On-Demand Bus in the Suburbs*

磯崎 晶光[†]・吉村 充功[‡]・奥村 誠[§]

By Akimitsu ISOZAKI and Mitsunori YOSIMURA and Makoto OKUMURA

1. はじめに

郊外の団地と都心を結ぶバスは、将来的に人口が減少すると、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等に集約されていく可能性がある¹⁾。

デマンドバスは運行方式の柔軟性が利点とされている²⁾。しかし、呼び出しに応じて迂回することにより、すでに乗車している利用者の所要時間の増加、郊外側での迂回による到着時刻の遅延に起因する都心側での待ち時間の増加といった、外部効果が発生する。デマンドバスを効率的に運用するためには、バス運行コストと利用者不効用に影響する外部効果を取り込んだ検討が必要である。しかし、バス運行に関する外部効果を扱った既存研究は、鈴木³⁾に限られており、蓄積に乏しい。

本研究では都市近郊を想定し幹線バスと迂回バスを組み合わせ、事業者の運行コストと全利用者の不効用からなる社会的総費用を最小化するような幹線バス、迂回バスの最適な運行間隔を導出する。

2. モデルの考え方

本研究では図-1のような都市形態と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

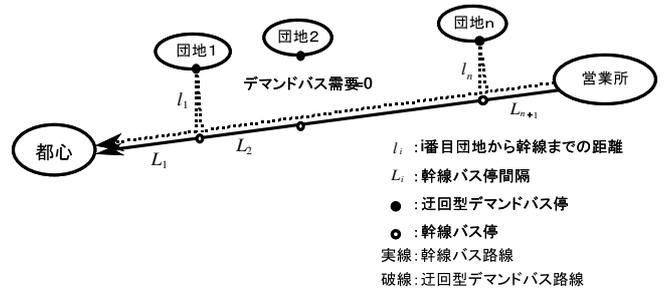


図-1 バス路線の概要

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、幹線バス (M) と、迂回バス (D) が存在する。それぞれのバス時刻表は所与とし、渋滞などによる遅れは考えない。幹線バスと迂回バスの運行間隔 (h /台) をそれぞれ I^M, I^D とする。なお、単位時間のバス総台数 $1/I (= 1/I^M + 1/I^D)$ は一定とする。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。
- 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) で一定とする。利用者は、バス停のバス到着予定時刻に到着するとする。また、バス停での停車時間は無視する。
- 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。
- バスの容量制約と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。

*Key words: 公共交通運用, 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 0824-24-7849)

[‡] 正会員, 博(工), 日本文理大学工学部 (〒870-0397 大分市一木 1727-162, TEL 097-524-2611)

[§] 正会員, 博(工), 広島大学大学院工学研究科

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迂回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、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/h) は、家で待ち時間 (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)、 σ_i は迂回バスの団地 i への迂回確率で、迂回バスの運行形態または、利用者の呼び出し確率によって決定される。

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

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

バス1台当たりの運行コストは、バスの走行時間に比例すると仮定する。単位時間当たりの各バス (M, D) の運行コスト g^M, g^D (円/h) は以下の式で定義する。 MOT, DOT (円/h/台) はそれぞれのバスの単位運行コストである。

$$g^M = (MOT) \left(\sum_{j=1}^{n+1} \frac{L_j}{v_b} \right) \frac{1}{I^M} \quad (3)$$

$$g^D = (DOT) \left\{ \sum_{j=1}^n \left(\frac{L_j + 2\sigma_j l_j}{v_b} \right) + \frac{L_{n+1}}{v_b} \right\} \frac{1}{I^D} \quad (4)$$

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。ただし、 δ_i は団地 i の利用者の迂回バス選択確率である。

$$TC = \sum_{i=1}^n \left\{ (f_i^M - Fare_i^M) (1 - \delta_i) X_i + (f_i^D - Fare_i^D) \delta_i X_i \right\} + (g^M + g^D) \quad (5)$$

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

最小化問題は以下のように定式化できる。

$$\min_{I^M, I^D, Fare_i^M, Fare_i^D} TC \quad (6a)$$

$$\text{s.t.} \quad \frac{1}{I^M} + \frac{1}{I^D} = \frac{1}{I} \quad (6b)$$

$$I^M \geq 0, \quad I^D \geq 0 \quad (6c)$$

式 (6c) は運行間隔の非負条件である。

4. 想定する運行形態

本研究では、幹線バスと迂回バスの組み合わせとして以下の3つのケースを想定し検討する。

(1) 完全迂回バスと幹線バス (完全迂回)

迂回バスが全ての団地に迂回する。バスは迂回時間を想定した時刻表通りに運行され、遅れは発生しないため、 $d = 0$ とする。また、全ての団地に迂回するため、迂回確率は $\sigma_i = 1$ となる。

運行間隔 I^M, I^D が与えられたとき、式 (6a) の値を小さくするには各団地の $(f_i^M - Fare_i^M)$ と $(f_i^D - Fare_i^D)$ を比較して、その団地の利用者全員に値の小さい方のバスを利用させる必要がある。 $f_i^M - Fare_i^M \equiv \tilde{f}_i^M$ 、 $f_i^D - Fare_i^D \equiv \tilde{f}_i^D$ とおくと、 $\tilde{f}_i^D - \tilde{f}_i^M$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} \tilde{f}_i^D - \tilde{f}_i^M &= \left[a \frac{I^D}{2} + c \left\{ \sum_{j=1}^i \left(\frac{L_j + 2l_j}{v_b} \right) - \frac{l_j}{v_b} \right\} \right] \\ &\quad - \left[a \frac{I^M}{2} + b \frac{l_j}{v_w} + c \sum_{j=1}^i \frac{L_j}{v_b} \right] \\ &= \frac{a}{2} (I^D - I^M) - b \frac{l_j}{v_w} + c (2i - 1) \frac{l_j}{v_b} \quad (7) \end{aligned}$$

$\tilde{f}_i^D - \tilde{f}_i^M$ は i について増加関数であるため、社会的総費用を最小にする解は、都心から k 番目の団地までの利用者には迂回バスを ($k+1$) 番目より郊外側の団地の利用者には幹線バスを利用させるというパターンになる。

各 k に対して以上のような利用がなされるとき TC を比較し、 TC を最小とする団地 k^* 、各運行間隔 I^{M*}, I^{D*} 社会的総費用 TC^* を求める。なお、社会的総費用に運賃は影響しないことから、求めた団地 k^* で完全迂回バスと幹線バスの選択が切り替わるように運賃差 ($Fare_i^D - Fare_i^M$) を設定して利用者不効用の大小を操作すれば、この最適解は実現できる。

(2) 迂回団地限定バスと幹線バス（迂回限定）

次に，上の問題で迂回バス利用者がいない団地には迂回しないとした，迂回団地限定バスを考える．迂回団地限定バスにおいてもバスの遅れは発生しないため， $d = 0$ とする．迂回バスが迂回しない団地の利用者は幹線バスを利用する．

最適解の導出方法は完全迂回ケースと同様である．迂回団地限定バスは切り替え団地 k よりも郊外の団地には迂回しない．最適解において， $f_i^D - f_i^M \leq 0$ であれば， $i \leq k$ の団地の利用者は必ず迂回団地限定バスを利用する． $f_i^D - f_i^M > 0$ のとき，運賃差が無ければ，迂回団地限定バスが迂回する団地でも幹線バスが利用されるため， $f_i^D - f_i^M < 0 (i \leq k)$ となるように幹線バスの運賃を迂回団地限定バスよりも高く設定して，最適な状態に誘導する必要がある．

(3) 迂回型デマンドバスと幹線バス（デマンド）

上述の2種類の迂回バス利用者は，完全情報の下で不確実性を含まずに利用するバスを選択できるのに対して，迂回バスが，利用者からの呼び出し（バス停設置のボタンを押す）に応じて団地へ迂回するケースを考える．迂回型デマンドバスでは，他の団地の利用者から呼び出された場合のみ迂回するため，利用者は事前にこのバスの効用を正確に把握できない．利用者の迂回バス選択確率 δ_i を以下の2項ロジットモデルで与える．ただし， α は不効用のスケールパラメータである．

$$\delta_i = \frac{1}{1 + \exp\{\alpha(f_i^D - f_i^M)\}} \quad (8)$$

ここで，各団地の時間当たりの利用者が少ないときには，団地 i への迂回確率は，利用者の選択確率で近似でき， $\sigma_i = \delta_i$ と仮定できる．

団地 i での利用者の迂回型デマンドバス選択確率は，運賃差を操作することにより，社会的総費用に影響を与えることなく制御できる．均衡状態では，運賃差は不効用差 $(f_i^D - f_i^M)$ に等しいので，式(8)の関係より， δ_i を操作変数とすることができる． δ_i の最適値は式(6a)の数値計算により求める必要がある．ここでは，以下の総当り法によって計算する．迂回型デマンドバス運行間隔 I^D ，団地ごとの利用者の選択確率 δ_i を与え，式(6a)に代入して社会的総費用を求める． I^D ， δ_i の組み合わせの中で社会的総

費用が最小となる運行間隔 I^{D*} ，選択確率 δ_i^* を求める．

5. 最適運用に関する数値計算

それぞれのケースの最適解における TC を数値計算を用いて比較した．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．定数値を $a = 1,000$ ， $b = 5,000$ ， $c = 1,500$ ， $d = 3,000$ ， $MOT = 20,000$ ， $DOT = 20,000$ ， $I = 0.25$ ， $X = 10$ ， $v_b = 20$ ， $v_w = 4$ ， $L = 2.5$ ， $l = 0.8$ ， $n = 10$ と設定した．

(1) 社会的総費用，運行間隔の比較

表-1 に数値計算結果を示す．社会的総費用が最小となる運行形態は迂回限定ケースであった．デマンドケースでは，いずれか1つの団地の利用者が全員，迂回型デマンドバスを利用することが最適となる．なお，迂回型デマンドバスを利用する団地が1つしかないときは，他の団地へ外部効果は発生しない．

また，完全迂回ケースに比べて，迂回限定ケースでは，迂回する団地を減らすことによる運行費用の削減分がアクセスの増加による損失よりも大きいいため，社会的総費用を小さくするのに有効である．そのため，迂回バスの運行本数が増加しているにもかかわらず，迂回団地数は減少している．

(2) 団地ごとの利用者不効用

各ケースにおいて，幹線バス，迂回バスの運賃差が必要であるかを検討するために，団地ごとの運賃以外の利用者不効用 (f_i^M, f_i^D) を比較する．

なお，デマンドケースの最適解は1つの団地に迂回することであり，どの団地に迂回するかには依存しないので，ここでは10番目の団地だけに迂回す

表 - 1 数値計算結果

	TC	I^D	I^M	迂回バス 利用団地
完全迂回	¥ 325,692	0.721	0.383	1-7
迂回限定	¥ 316,770	0.689	0.393	1-5
デマンド	¥ 326,436	1.120	0.320	いずれか1つ

表-2 運賃差のないデマンドケース結果

	TC	I^D	I^M	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5	δ_6	δ_7	δ_8	δ_9	δ_{10}
差額無し	¥331,622	1.03	0.33	0.156	0.172	0.190	0.209	0.230	0.252	0.275	0.299	0.325	0.352

るケースを示している。

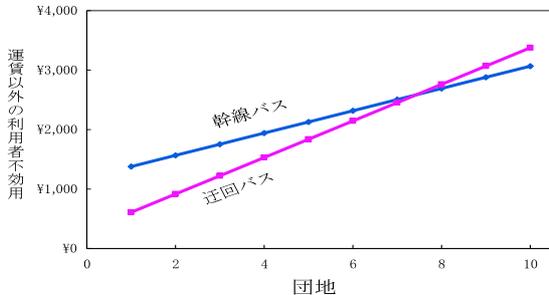


図-2 完全迂回ケース

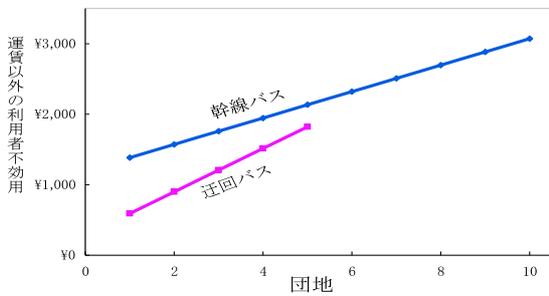


図-3 迂回限定ケース

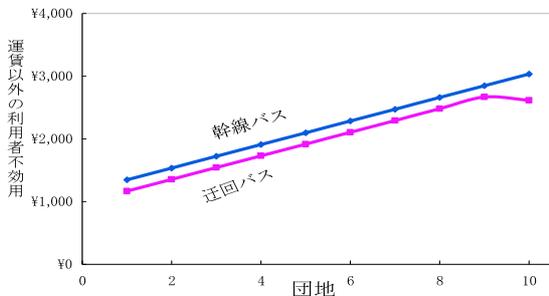


図-4 デマンドケース

完全迂回ケース(図-2)は7番目と8番目団地の間で利用者不効用のグラフが交わっているため、幹線バスと迂回バスに運賃差をつけなくても自動的に7番目までが迂回バスを使うという最適解が達成できる。迂回限定ケース(図-3)も同様に、迂回バスが利用できる団地1~5の全てで迂回バスの不効用の方が小さいため、運賃差をつけなくても最適解が実現する。デマンドケース(図-4)では、迂回バス利用者不効用がすべての団地において幹線バス利用者不効用よりも小さくなっている。ロジックモデルでは、不

効用の大きな方を選択する利用者が必ず残るため、厳密に最適解を実現することは不可能であるが、1番目団地から9番目団地の迂回バス運賃を幹線バスよりも数千円高く設定すれば、最適解に近い状況が実現できる。

(3) 運賃差のないデマンドケース

もし、デマンドケースにおいて迂回バスと幹線バスの運賃差がつけられない場合には、利用者の選択確率は中間的な値となる。その場合の均衡解は以下のようにして計算できる。

数値計算において、初期値として与えた選択確率 δ_i を、式(8)に代入して(その際の各利用者不効用は f_i^M , f_i^D と書き換える)左辺の δ_i と右辺で各利用者不効用に代入して得られた値の整合が取れるように繰り返し計算を行った。その結果を表-2に示す。結果として得られた社会的総費用は、先の3つのケースのどれよりも劣る結果となった。

6. おわりに

本研究では、迂回型デマンドバスは柔軟な運行ができるという正の効果以外に、呼び出しによって他の利用者に対して所要時間の増加などの外部不経済をもたらすことに着目して、社会的総費用を最小にする最適な運行形態についての分析を行った。この際、完全迂回バスなどの他の運行形態との比較も行った。数値計算を通して、都市近郊では不確実性の要素の強い迂回型デマンドバスを導入するよりも、迂回する団地をあらかじめ決めて走行する迂回団地限定バスが有効な場合があることを示した。

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) 秋山 哲男・中村 文彦：バスはよみがえる，日本評論社，2000。
- 3) 鈴木 勉：通勤バス停留所の最適配置，都市計画学会論文集，No.22，pp.247-252，1987。