

都市近郊デマンドバス運用における外部効果の分析

広島大学 学生員 ○磯崎 晶光
 日本文理大学 正会員 吉村 充功
 広島大学大学院 正会員 奥村 誠

1. はじめに

都市圏における都心と郊外を結ぶバス路線は、将来的に人口が減少すれば、現在の個別の団地ごとの直行バス方式では大量の需要を期待することができない。路線の統廃合が予想され、結果として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に集約されることが考えられる。

デマンドバスは運行方式の柔軟性が注目されている。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、さらに、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。社会的に最適なバスの運用をするためには、外部効果を明らかにして、運賃として内部化する必要がある。

本研究では都市近郊のデマンドバスの特性を明らかにするため、幹線バスと迂回バスを組み合わせ、バス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幹線バス、迂回バスの最適な運行間隔を理論的に導出する。また、そのモデルを用いて迂回型デマンドバスを呼び出すことによる外部効果を明らかにする。

2. モデル構築のための仮定

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。

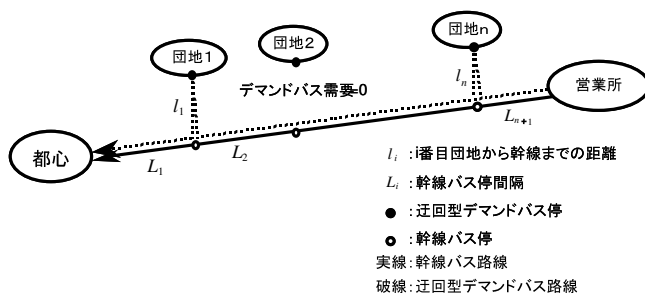


図-1 バス路線概要図

- 郊外のバス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。

- 郊外のバス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。バスの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。
- バス利用者のアクセス時間として、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。また、バス利用者は、バス時刻表を踏まえ丁度バスが到着する時刻にバス停に到着するとする。また、バス停での停車時間は無視する。
- 団地iのバス利用者数（需要）は X_i (人/h) という固定値であるとし、全員が都心まで乗車とする。なお、バス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しないとし、利用者は希望したバスに必ず乗車できるとする。

3. 効用と社会的総費用最小化問題の定式化

団地iのバス利用者が各バス (M, D) を利用する時の利用者不効用 f_i^M , f_i^D は、家での待ち時間(a)、幹線バス停までの徒歩時間(b)、バス乗車時間(c)、デマンドバスの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 $Fare_i^M$, $Fare_i^D$ からなり、以下のように定義する。a, b, c, dは各不効用の時間価値、 σ_i は迂回バスの団地iへのバス迂回確率である。

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

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

バス利用者は f_i^M , f_i^D を比較し、不効用の小さい方のバスを利用する。

また、各バス (M, D) の運行コスト g^M , g^D は以下の式で定義する。MOT, DOTは1台1時間あたりのそれぞれのバス運行コストである。

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

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

社会的総費用 TC を考えるに当たって、バス運賃はバス利用者と事業者間での取引にな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 は以下のように定義できる。ただし、 δ_i は団地 i のバス利用者の迂回バス選択確率である。

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

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。

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

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

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

4. 想定するバス運行形態

迂回型デマンドバスの有効性を検討するため、迂回バスとして以下の3つのケースを想定し検討する。

- 完全迂回バスと幹線バスの組み合わせ（**完全迂回**）

迂回バスが全ての団地に迂回する。バスの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。なお、この問題設定下で式 (6) の理論解を求めると、最適解においては、各バス利用者のうち都心側の団地のバス利用者が迂回バスを、郊外側のバス利用者が幹線バスを利用する。

- 迂回団地限定バスと幹線バスの組み合わせ（**迂回限定**）

迂回バスが、あらかじめ決められた都心側の団地のみ迂回する。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必ず利用するとする。

- 迂回型デマンドバスと幹線バスの組み合わせ（**デマンド**）

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）に応じて各団地へ迂回する。バスの呼び出しにより外部効果が発生する。他の団地への迂回は呼び出された場合のみ行われるが、利用者は事前にこの不効用を正確に把握で

きないため、利用者の迂回型デマンドバス選択確率 δ_i を以下の2項ロジットモデル形で与える。ただし、 α は不効用のスケールを表す。

$$\delta_i = \frac{1}{1 + \exp\{\alpha(f_i^D - f_i^M)\}} \quad (7)$$

迂回型デマンドバスの団地 i への迂回確率は、 $\sigma_i = \delta_i$ と仮定する。

以上の3つのケースについて、式 (6) の社会的総費用最小化問題を求解して最適なバス運行間隔を理論的に導出できる。また、得られた最適解を用いて、式 (8) の右辺第2,3項を求めると、迂回型デマンドバスについて外部効果を明らかにできる。なお、外部効果を内部化するためには外部効果をその発生源であるバス利用者の運賃に上乗せする必要がある、その額は次式で求めることができる。

$$Fare_i^D = \overline{Fare_i^D} + c \sum_{j=i+1}^n \left(\frac{2l_j}{v_b} \delta_j X_j \right) \frac{1}{\delta_i X_i} + d \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{2l_j}{v_b} \delta_j X_j \right) \frac{1}{\delta_i X_i} \quad (8)$$

$\overline{Fare_i^D}$ は、外部効果に関係しない基本運賃である。

5. バス最適運用に関する数値計算例

求められた理論解を用いて、それぞれのケースで起こりえる状況を数値計算を用いて検討した。簡単化のため、幹線バス停間隔 L_i 、団地～幹線バス停間隔 l_i 、需要 X_i を団地に依らず一定とし、それぞれ、 L 、 l 、 X とおく。定数値を $a = 1,000$ 、 $b = 4,000$ 、 $c = 1,500$ 、 $d = 2,000$ 、 $MOT = 20,000$ 、 $DOT = 20,000$ 、 $I = 0.25$ 、 $X = 10$ 、 $v_b = 15$ 、 $v_w = 3$ 、 $L = 3$ 、 $l = 0.8$ 、 $n = 10$ と設定した。

デマンドケースでは、9番目、10番目団地のバス利用者が迂回型デマンドバスを利用する。外部効果を内部化するためには、迂回型デマンドバスの基本運賃に加え、9番目団地では160円、10番目団地では213円を利用者に負担させる必要がある。また、最適な運行間隔は、 $I^D = 0.650$ 、 $I^M = 0.406$ となり、このとき $TC = 473,182$ となった。

6. おわりに

本研究では、迂回型デマンドバスの運行の柔軟性という正の効果だけに着目するのではなく、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、理論的な分析を行った。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。数値計算を通して外部効果の大きさを明らかにするとともに、都市近郊では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明らかにできた。紙面の都合上、異なる定数値に対する数値計算例は当日発表する。