

都市近郊デマンドバス運用に関する理論的検討

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に見合った需要量を期待できないため、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等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利点とされている。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バス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、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上で、運行形態の特性を明らかにすることが重要である。

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。

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。

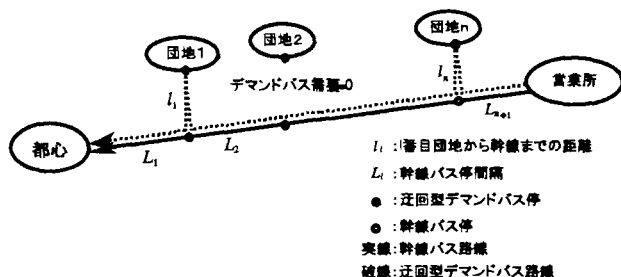


図-1 バス路線概要図

- 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。
- バス利用者のバス停へのアクセス時間は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、バス時刻表をふまえ丁度バスが到着する時刻にバス停に着くとする。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、 σ_i は迂回バスの団地 i へのバス迂回確率である。

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

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

キーワード: デマンドバス, 最適制御問題

連絡先: 〒739-8527 広島市鏡山 1-4-1, TEL&FAX: 0824-24-7827
〒870-0397 大分市一本 1727, TEL: 097-524-2611

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) に応じて団地へ迂回する。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効用を正確に把握できないため、利用者の迂回バス選択確率 δ_i を以下の 2 項ロジットモデル形で与える。ただし、 α は不効用のスケースを表す。

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

ここで、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。

5. バス最適運用に関する数値計算

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。

それぞれのケースにおける社会的総費用 (TC) を最小化する運行間隔は完全迂回では、 $TC = 468,898$ で $I^D = 1.106$, $I^M = 0.323$ となる。これは迂回バスを 66 分、幹線バスを 19 分ごとに 1 本運行することになる。このとき都心側の 1～4 番目の団地のバス利用者が迂回バスを利用する。迂回限定では、迂回バスを都心側の 1 番目から 4 番目団地まで迂回するように設定し、以降の団地には迂回しないとした場合に、 $I^D = 0.792$, $I^M = 0.365$ となり、 $TC = 455,374$ で最適となる。デマンドでは、 $I^D = 0.650$, $I^M = 0.406$ となり 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し、 $TC = 473,182$ 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、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。