

需要予測を必要としない通勤用デマンドバスの 価格と運行ルート設計

犬伏 陽祐¹・長江 剛志²

¹ 学生非会員 東北大学学生 工学部 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-816)
E-mail: yosuke.inubushi.r6@dc.tohoku.ac.jp

² 正会員 東北大学准教授 大学院工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-814)
E-mail: nagae@tohoku.ac.jp

本研究は、通勤時間帯の渋滞軽減と自宅から最寄りの交通結節点までのファーストワンマイル問題を解決するためのデマンドバスシステムについて、需要予測を必要としないルート選択と価格決定手法を提案する。このシステムは決められた台数および一定の定員のバスを所有する会社を想定し、簡単のため通勤時間帯別の需要変動を無視して、利用者の希望通勤コストを基にルートを決定する。コスト集計には電子端末等を用いた競り上げオークション形式を利用し、虚偽の申告を行う誘引をもたせない(誘引整合的)。このモデルを運行ルートおよび価格の最適化問題として定式化し、ベンダース分解を用いることで、利用者のバス停ごとの希望価格を基にルートを決定するサブ問題と、ルートからバス停ごとの価格を決定するマスター問題に分解し、価格と運行ルートが決定できることを示す。またこれらのサブ問題とマスター問題を交互に解くことにより、社会的利益を最大化できることを示す。

Key Words: 公共交通, デマンドバス, 路線設計, 競り上げオークション, Benders 分解

1. はじめに

少子高齢化及び人口減少による利用者減少に伴ってバス路線が廃止された地域や、自治体の運営するコミュニティバスでは採算が取れない地域において、柔軟な運用が可能なデマンドバスは注目を浴びている¹⁾。

しかしながら、デマンドバスは人口低密度地域での運用に留まらず、通勤交通の方法の一つとしても注目されている。

横浜市青葉区美しが丘のたまプラーザ駅北側地区では東京急行電鉄株式会社が郊外型 MaaS の実証実験²⁾として、たまプラーザ・渋谷間にハイグレード通勤バスを運行したり、美しが丘の住宅地内でのデマンドバス運行を行った。一方でアメリカのFord社が運用していた通勤用のデマンドバスサービス Chariot はさまざまな規制やドライバーのコストがかさむことにより事業を終了した³⁾。しかしながら、自動運転の実用化が目前に迫っており、Chariot が直面した課題について、解決の見通しが立ちつつある。このように働き方改革や郊外住宅地の社会的な環境変化に対する持続可能性などの観点から、また、電子端末の普及により需要情報の収集が以前に比べて容易になったことからデマンドバスの通勤目的運用は今後さ

らに増加すると予想される。本研究ではデマンドバスのルート決定について大規模な予備調査や需要予測を必要としないメカニズム設計を行う。

2. 定式化

本研究では以下に述べるようなモデルを考え、定式化する。まず前提としてデマンドバスは総台数 N_B 、定員 μ であり、単始点単終点とする。利用者集合 \mathbf{P} の各利用者がランダムに分布する地域にいくつかのノードを設定し、これをノード集合 \mathbf{N} とする。それぞれのノードをバスの乗車地点(バス停)とし、ノード i, j 間の運用コストを c_{ij} とする。利用者は必ず始点を除くいずれかのノードでバスに乗り、終点まで乗車するものとする。ノード i, j 間をリンク i, j と呼称し、リンク i, j を通るバスの台数を非負整数値 x_{ij} とすると、

$$\sum_{i, j \in \mathbf{N}} x_{ij} = N_B \quad (1)$$

を満たす。また、リンク i, j を利用者 p がバスに乗って移

動しているかどうかを離散変数 $y_{p,ij}$ で表し、利用者 p がノード i で乗車するかどうかを離散変数 $z_{p,i}$ で表す。それぞれ0または1の値をとり、移動している状態及び乗車するとき1となり、そうでないとき0となるよう設定する。ここで、リンクを移動する人数は通過するバスの総容量以下になることから、 x_{ij} と $y_{p,ij}$ の間には、

$$\sum_{p \in P} y_{p,ij} \leq x_{ij} \mu \quad (2)$$

という条件が成立する。

すべてのノードにおいてバスと利用者の流入量と流出量は一致していることから、それぞれのフロー保存則が成立する。ノード i でのバスフロー保存則は、

$$\sum_{n,i \in N} x_{ni} - \sum_{i,m \in N} x_{im} = \begin{cases} -N_B & (\text{始点}) \\ N_B & (\text{終点}) \\ 0 & \end{cases} \quad (3)$$

となる。同様にノード i での利用者フロー保存則は、

$$\sum_{n,i \in N} y_{p,ni} - \sum_{i,m \in N} y_{p,im} = \begin{cases} -z_{p,i} \\ \sum_{i \in N} z_{p,i} (\text{終点}) \end{cases} \quad (4)$$

となる。ここで、利用者 p がノード i から通勤することで得られる純利得について、通勤することの価値 V_p 、ノード i へのアクセスコストを $a_{p,i}$ として、

$$v_{pi} = \max_{i \in N} \{V_p - a_{p,i}\} \quad (5)$$

と設定する。以上で述べたことから、利用者全体の総利得が最大となるように立式すると、

$$\max \left\{ \sum_{p \in P} \sum_{i \in N} v_{p,i} z_{p,i} - \sum_{i,j \in N} x_{ij} c_{ij} \right\} \quad (6)$$

とできる。すなわち、本研究で解くべき最適化問題[P]は、

$$[P] \max \left\{ \sum_{p \in P} \sum_{i \in N} v_{p,i} z_{p,i} - \sum_{i,j \in N} x_{ij} c_{ij} \right\} \quad (7)$$

$$s. t. \quad \sum_{p \in P} y_{p,ij} \leq x_{ij} \mu \quad \forall (i,j) \quad (8)$$

$$\sum_{n,i \in N} x_{ni} - \sum_{i,m \in N} x_{im} = \begin{cases} -N_B & \text{ノード}i\text{が始点} \\ N_B & \text{ノード}i\text{が終点} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

$$\sum_{n,i \in N} y_{p,ni} - \sum_{i,m \in N} y_{p,im} = \begin{cases} \sum_{i \in N} z_{p,i} & \text{ノード}i\text{が終点} \\ -z_{p,i} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

$$x_{ij} \in \mathbb{Z}_+ \quad (11)$$

$$y_{p,ij} = \begin{cases} 1 & \text{利用者}p\text{がリンク}i,j\text{を移動する} \\ 0 & \text{利用者}p\text{がリンク}i,j\text{を移動しない} \end{cases} \quad (12)$$

$$z_{p,i} = \begin{cases} 1 & \text{利用者}p\text{がノード}i\text{から乗車する} \\ 0 & \text{利用者}p\text{がノード}i\text{から乗車しない} \end{cases} \quad (13)$$

となる。

3. 解法と運用

(6)式について $z_{p,i}$, x_{ij} , c_{ij} については容易に観測可能であるが、 v_{pi} については利用者に依存し、観測が困難である。また、最適化問題[P]は複数の離散変数を持つ大規模な線形計画問題である。そこで本研究では Benders 分解を用いる。

最適化問題[P]に Benders 分解法を適用すると、デマンドバスの運行ルートを決めづけるマスター問題[P_{master}]及び利用者の乗車ノードと運賃を決めづけるサブ問題[P_{sub}]に分解することができ、さらに、サブ問題は双対問題[P_{sub-D}]が機械的に決定される。[P_{master}]の解を与件として[P_{sub-D}]を解き、その解を与件として[P_{master}]を解くといったようにマスター問題とサブ問題を交互に解くことを繰り返すことで最適解が得られる。ここでは、[P_{master}]の解はデマンドバスの運行ルートにあたり、[P_{sub-D}]の解は利用者 p がどのバス停からいくらの運賃を支払うかにあたる。つまり、運用においては、デマンドバスの管理側が運行ルートを提示し、それに応じて利用者側が希望する乗車場所と運賃を伝える行為を毎運行日ごとに繰り返すことになる。

上に挙げた通り、互いの解を基に問題を解くため、特に利用者の希望を適正に把握する必要がある。そのため、本研究では希望調査に競り上げオークション方式を用いる。これは Yahoo!オークションなどで採用されているシステムであり、希望する乗車ノードと運賃を各利用者がリアルタイムに提示し、各利用者の支払い希望上限額まで入札を続ける。支払い希望上限額を超えた場合にはオークションから退出し、オークションの残り参加者がデマンドバスの容量と等しくなった時点でオークシ

ョンを終了し、利用者を各ノードへ割り当てる。その運行日には利用者は割り当て通りに乗車し、管理者はそのオークションの情報を基に次の運行日のルートを決定する。競り上げオークション方式では、虚偽の申告が支配戦略にならないため正確な情報が入手しやすい⁴⁾。これは、利用者にとっては希望の価格で乗ることができ、管理者にとっては需要の把握がしやすくルートを最適化できるという利点がある。

4. おわりに

本研究ではデマンドバスのルート決定と利用者の利得についてその関係を定式化した。次に、Benders 分解法と競り上げオークション形式を用いることで、管理者と利用者が交互に提案をし合うことで最適なルート決定ができることを明らかにした。

今後の課題としては、まず、利用者全員がバス利用をしない場合へと一般化することである。すなわち、自宅から終点までデマンドバスを利用せずに移動した場合の利用者の不利益を考慮に入れることである。次に、移動時間の考慮である。今回は時刻を無視したモデルを用いたが、当然実際の運用ではリンク間の移動時間を考慮する必要がある。また、これに関連して、各リンクにおける渋滞等も考慮する必要がある。実際の運用では曜日ごと、時間帯ごとに渋滞が発生したり、通行止めになったりすることが往々にして有りうる。この場合利用者の時間的損益だけでなく、発進停止を繰り返してバスが燃料を多く消費することなどから、リンクでの運用コストが一定とならないことも考慮に入れる必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省中部運輸局, “デマンド型交通の手引き,” March 2013.
- 2) 東京急行電鉄株式会社, “東急線沿線で、日本初の「郊外型 MaaS 実証実験」を実施,” <https://www.tokyu.co.jp/image/news/pdf/20181031-1.pdf>, October.31 2018.
- 3) Chariot, “Important update from chariot,” <https://blog.chariot.com/2019/01/10/important-update-from-chariot/>, January.10 2019.
- 4) 岩崎敦, 横尾真, 寺田賢二, “架空名義入札に頑健な公開競り上げ式複数同一財オークションプロトコル,” 人工知能学会論文誌, 19 巻 4 号 p.334-342, 2004

(2019.10.4 受付)