

社会的費用を最小化する二段階バスネットワークデザイン問題

Bilevel Bus Network Design Problem for Minimizing Social Cost

北海道大学工学部環境社会工学科 ○学生員 秋岡路暉 (Michiki Akioka)
 北海道大学大学院工学研究院 正員 杉浦聡志 (Satoshi Sugiura)
 岐阜大学工学部社会基盤工学科 正員 倉内文孝 (Fumitaka Kurauchi)

1. はじめに

わが国では、高齢化社会の進展により住民の交通手段としての乗合バス（以下、路線バス）の重要性が高まっている。しかし路線バスの輸送需要は年々減少し、また深刻な運転手不足問題により公共交通サービスとしてのバス路線の維持が難しくなっている。そこで、限られた運行者のリソースをより効率的に運用するため、路線の再編や運行計画の見直しが行われてきた。しかし、バス路線の計画を定量的に評価することはそのファクターの多さから難しく、現状では路線や運行計画は経験的に決定される場合が多い。このような背景の元、本研究では、社会にとって最適な路線計画を示すモデルを提案し、路線再編計画時の指標を提供することを目的とする。最適な路線とは社会的費用を最小化する路線と定義し、その運行計画を検討する。

バス路線の計画は NDP (Network Design Problem) として定式化された研究が多く蓄積されている²⁾。NDP とは、利用者や運用者のコスト最小化、または社会全体の効用最大化等を目的として交通ネットワークの形状や運用計画を検討する問題である。Bell ら³⁾はフェリーを例に、ネットワークが全域木 (Spanning Tree) となる制約条件を課し、最適なネットワークを示す新たな NDP の手法を提案した。全域木とは、閉路を持たない全ての頂点が連結されたグラフのことである。全域木状のネットワークでは、ある OD に対し経路がただ一つに決まるため、経路探索を考える必要がない。

本研究では問題の簡約化のため、二段階の解法をとる (図 1 参照)。まず路線網が全域木となる制約条件を課したうえで最適な木を探索し (Step1)、そののち全域木上の路線とその頻度を考える (Step2)。これにより想定される経路の数を限定し、全経路列挙による計算量の増加を回避する。

ところで、全域木状のネットワークは需要を束ねた幹線と支線の構造を作りやすく、このようなネットワークは運行者にとって効率的であり、なおかつ乗客にとりわかりやすいという利点がある。このことから全域木を考えることは、バスのような大規模公共交通機関のネットワークデザインに適しているといえる。

2. 総走行距離最小全域木の制約による問題の簡約化

2.1 入力データについて

本研究では例に豪州キャンベラ市のバスネットワークおよび IC カード乗降記録による OD データを扱う。ただし、実際のバス停は 3000 以上存在し、すべての停留

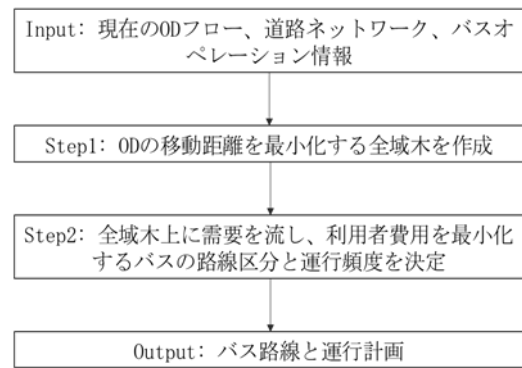


図 1 研究のフローチャート

所をノードとして扱うと問題が煩雑となると判断した。そのため、本研究では地区ごとの代表ノード 111 個を選出し、その代表ノードに地区を発着する OD を集約した。ゆえにアウトプットは実際の走行経路を列挙したものではなく、地区間の最適な結び方を示す路線とその頻度を提案するものとなる。実務上は本モデルの出力となる路線を参照しつつ、通行する道路など細部の検討が必要となる。

2.2 総走行距離最小全域木の作成

利用者費用を最小化する路線を考えるにあたって、全域木作成のための目的関数は、その最適性を損なわないよう設定する必要がある。そのため、本モデルでは OD フロー全体の移動距離が最小となる全域木を作成する。この時、OD w のフローを D 、移動距離を L とすると、目的関数は、

$$f(x) = \sum_w DL \quad (1)$$

と書ける。この $f(x)$ を最小化する全域木を Step2 のインプットデータに与え、路線区分とその頻度を検討する。総走行距離最小全域木の構成には、一般的に知られたアルゴリズムがないため、タブーサーチを用いた手法を導入しているが、紙面の制約のためここでは割愛する。

3. 路線区分と頻度を決定するモデルの定式化

3.1 記号

本研究で用いる記号を以下のように整理する。

x_l : 路線 l の運行台数
 y_{al} : 路線 l がリンク a を経由する場合 1 をとるダミー変数

p_{als}	: 路線 l のリンク a について、目的地 s へ向かう乗客数
N	: グラフ上のノード n の集合
L	: 路線 l の集合
G_b	: バスネットワークを考えるグラフ
G_p	: 乗客ネットワークを考えるグラフ
R	: G_p 上のリンク a のうち、ノーマルリンクの集合
B	: G_p 上のリンク a のうち、バス乗車仮想リンクの集合
Φ	: リンク a がセクション k の順方向リンクなら 1, 逆方向なら -1, それ以外なら 0 をとる変数 ϕ_{ka} の行列
Δ_l	: リンク a が路線 l のデポ出発リンクであれば 1 をとるダミー変数 δ_{al} の行列
t_a	: リンク a のバス所要時間
$\underline{t}, \bar{t}$	: 路線運行時間の上下限
b	: バスの総台数
$\Psi(= \psi_{na})$	: 乗客ネットワークの接続行列
o_{rs}	: ノード r から s へ向かう OD フロー
α	: 運行者費用と利用者費用の重み係数
λ	: 利用者の時間価値
κ	: 運行にかかる台数当たりのコスト
θ	: 乗換ペナルティ
γ	: バスのキャパシティ
τ	: 運行時間幅

3.2 本モデルの仮定と前提

本モデルを考える上で以下の仮定をおく。

- ・ OD 需要は確定的であり、路線再編等による需要変動等は考慮しない。
- ・ 乗客は利用者費用を最小化する経路を選択するものとする。
- ・ バスはすべての OD に対しフローを満足するキャパシティを提供するものとする。
- ・ バス路線は往復で運行するものと仮定し、ある出発点に必ず帰着するものとする。
- ・ 路線 l の一往復運行時間は上限値と下限値を設け、その範囲内を取りうるものとする。

また、モデルを考える上での前提を以下に記述する。

本モデルでは Step1 で得られた全域木上に OD フローを流し、路線区分と頻度を検討する。ここで、バスオペレーションを考えるための仮想的なバスネットワーク G_b (図 2)、および乗客の動きを考えるための仮想的な乗客ネットワーク G_p (図 3) の二種類のネットワークを考える。それぞれのネットワークの詳細については後述する。

また、バス路線数を未知変数として扱うと、ネットワークの形状を確定できない。そこで本モデルでは、路線

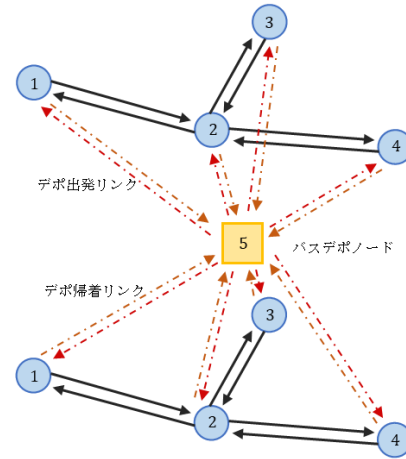


図2 バスネットワーク
(元ノード数4, 路線数2の例)

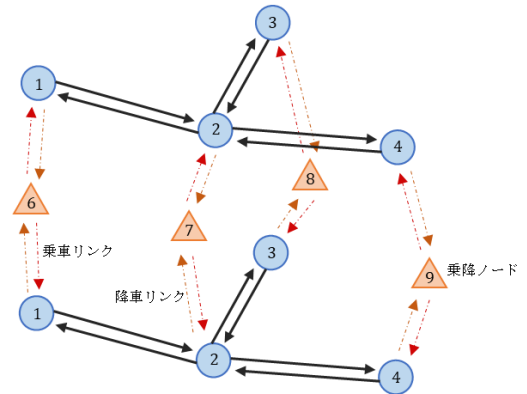


図3 乗客ネットワーク
(元ノード数4, 路線数2の例)

数は与件として計算し、のちに路線数をパラメータとして増減させた場合のアウトプットの変化を考察することとする。

3.3 バスネットワーク

バスネットワークは図 2 に示すようにバス路線の経路と頻度を考えるため、路線数分の全域木に路線の始終点を考えるための仮想デポノードを挿入し、木上の全ノーマルノードと仮想デポノードを接続したネットワークとする。ネットワーク上でバスはデポノードを出発し、あるノーマルノードから路線経路上のリンクを往復、そして元のノードよりデポノードに帰還するとして、路線の運行を表現する。

3.4 乗客ネットワーク

乗客ネットワークは図 3 に示すように乗客のバス乗降とフローを考えるため、路線数分の全域木に代表ノード数個分の仮想乗客乗降ノードを挿入し、それぞれ各路線の元ノードに接続した乗客ネットワークを考える。乗客は OD に対応する乗降ノードを発着するとして乗客の移動を表現する。乗客ネットワークは目的地の数と等しい数用意し、目的地別にフローを考えることで、すべての OD パターン数分についてそのフローを考慮する。これにより未知変数の量を増大させることを回避する。

3.5 定式化

以上の条件を踏まえてバス路線の最適化問題を以下のよう定式化する．この問題は非線形計画問題 (Nonlinear Programing problem) であり，汎用ソルバーでの求解が可能である．

$$\min_{x,y,p} \alpha \sum_l x_l + (1-\alpha) \lambda \sum_s \sum_l \left(\sum_{a \in R} p_{als} t_a + \sum_{a \in B_l} p_{als} \frac{\sum_a t_a y_{al}}{x_l} \right) \quad (2)$$

subject to

$$\sum_a \phi_{ka} y_{al} = 0, \quad \forall l \in L \quad (3)$$

$$\sum_a \delta_{al} y_{al} = 1, \quad \forall l \in L \quad (4)$$

$$\underline{t} \leq \sum_a t_a y_{al} \leq \bar{t}, \quad \forall l \in L \quad (5)$$

$$\sum_l x_l \leq b \quad (6)$$

$$\sum_a \psi_{na} p_{als} = \begin{cases} -o_{rs} & \text{if } j = r \\ o_{rs} & \text{if } j = s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$t_a = \begin{cases} t_a & \text{if } a \in R \\ \frac{\sum_a t_a y_{al}}{x_l} & \text{if } a \in B_l \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

$$\sum_s p_{as} \leq \gamma y_{al} \frac{\tau x_l}{\sum_a t_a y_{al}}, \quad \forall a \in R \quad (9)$$

以下，この定式化について解説を加える．式(2)は最適化問題の目的関数である．社会的費用を最小化するものとして定式化しており，それは運行費用と利用者費用を重み付き和とする．バスの運行費用は運行台数が支配的であると考え，第一項に示す表現とした．利用者費用は乗客の所要時間と時間価値の積であり，第二項によって表現される．もし利用者費用のみを考慮する場合には $\alpha = 0$ ，運行者費用のみを考慮する場合には $\alpha = 1$ を設定すればよい．式(3)から式(6)まではバス路線に関する制約である．式(3)は路線が往復で運行することをリンクごとに表現したバス往復制約である．式(4)はバスがデポノードを始終点とすることを表す制約である．式(5)は路線運行時間制約である．式(6)はバス総運行台数が保有台数以内であることを示す制約である．式(7)から(9)は乗客のネットワークに関する制約条件である．式(7)は j を対応する行とした場合のノードに関する乗客のフロー保存である．式(8)は各リンク通過の所要時間を示す．木上のノーマルリンクにはバスの所要時間 t_a を課す．バス乗車リンクには乗車する路線の平均待ち時間が課せられる．このことより式(9)は各路線の各リンクにおいてバス容量が乗客フローを満たすことを示す制約である．路線 l の一往復運行時間は $\sum_a t_a y_{al}$ であるから，営

業時間 τ 内の運行可能な回数は， $\frac{\tau x_l}{\sum_a t_a y_{al}}$ であり，乗客の

平均待ち時間は， $\frac{\sum_a t_a y_{al}}{x_l}$ と表現できる．

4. おわりに

本研究では，バス路線の再編において，路線網の形状を総走行距離最小全域木となるよう制約した上で，社会的費用を最小化する路線と運行計画を示すモデルを提案した．試算結果については講演時に報告する．

本モデルでは，OD 需要は確定的として，バス路線の利便性による需要変動等は考慮していない．そのため，路線再編による需要変動を考慮し，それをもとに全域木を再検討する Bi-Level 型の最適化手法の導入を今後の課題としたい．

参考文献

- 1) 公益社団法人日本バス協会：日本のバス事業(2018年度版)，
http://www.bus.or.jp/about/pdf/h30_busjigyo.pdf, (2019年12月5日閲覧)
- 2) O.J. Ibarra-Rojas F. Delgado R. Giesen J.C. Muñoz: Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review, *Transport Research Part B*, Vol.77, pp.38-75, 2015.
- 3) Michael G.H. Bell, Jing-Jing Pana, Collins Teyea, Kam-Fung Cheunga, Supun Perera; An entropy maximizing approach to the ferry network design problem, *Transportation Research Procedia*, Vol.38, pp.20-36, 2019.