

バス路線網決定モデルを用いた広島市バスネットワークの評価

Evaluation of the Hiroshima City Bus Network Using a Transit Network Optimisation Model

村山直輝†・嶋本寛‡・張峻屹§・藤原章正+

By Naoki MURAYAMA†・Hiroshi SHIMAMOTO‡・Junyi Zhang§・Akimasa Fujiwara+

1. はじめに

高密度都市において公共交通は一度に大量の乗客を運ぶことができるため社会の持続的発展ならびに環境問題への対応という観点から効率的な輸送機関である。近年、バス事業は許可制から認可制に変更し、競争原理が導入された。このことより、乗客需要の多い路線へ事業者が集中し、特に中心市街地において複数の系統が重複していることが多い。本研究で対象とした広島市においても同様であり、同一路線への複数路線の重複が、バスの過密化による団子運転の発生、乗客の取り合いによる利益の縮小を引き起こし、必ずしも効率的な路線網とは言い難い状況にある。韓国・ソウル市ではバス路線網の抜本的な再編を実施することにより利用者の増加に成功している。このような事例からみても、路線網の再編は実現不可能な政策ではないが、事前の十分な評価が必要であり、評価をおこなうツールが必要である。

バス路線網決定モデルに関する既往研究において、乗客に異なるバス停への徒歩での移動や異なる路線への乗り換えを認めず総輸送人数最大化を目的関数とする、すなわちODペア間に直通バスがないと乗客は移動できないと暗に仮定した研究^{1) 2)}や、乗り換えを例外的に1回のみ許容した研究³⁾、あるいはフィーダーバスの路線最適化モデルにおいて基幹交通との乗り換え場所を与件と仮定した研究⁴⁾などが多い。またGuan et. al.⁵⁾は路線網と乗客の路線への割り付けの同時決定問題を混合整数計画問題として定式化し、分枝限定法による解法を示している。しかし、彼らのモデルにおいて頻度は決定されないため、乗り換えが発生する場合にアプライオリに決められたペナルティを負荷しているが、乗り換え時のペナルティ（待ち時間）はサービス頻度により規定されるべきである。したがって、多くの路線網決定問題において乗り換え行動を含めた乗客行動を正確に表現できていないといえる。このような問題意識のもと、嶋本ら⁶⁾はバス

路線網とその運行頻度を同時決定するモデルを、先行研究で構築されている乗客配分モデル⁷⁾を制約条件とするMPECとして定式化している。ただし、彼らの研究ではモデルの定式化やその解法に重きが置かれ、実ネットワークを事例とした検証は行われていない。したがって、本研究では嶋本ら⁶⁾が構築したモデルを広島市バスネットワークに適用し、現状の路線網とモデルから得られる最適な路線網を比較することにより、現状のネットワークを評価することを目的とする。

2. 乗客行動を考慮したバス路線網決定モデル

(1)モデルの概要

モデル化にあたり、異なる目的を持つ事業者、乗客の2者間の利害関係を考える。ここで、乗客移動にかかるコスト最小化という目的を持っているとし、事業者は移動コスト最小化という乗客の行動規範を把握していると仮定すると、事業者は施策実施により乗客行動を制御することはできないものの、影響をおよぼすことは可能となる。このような枠組みは均衡問題を制約条件とする最適化問題（MPEC）として定式化可能である⁸⁾。

(2)モデルの前提条件

モデル構築にあたり、以下の前提条件を設定する。

- ・ バスの運行は頻度ベースで行う。
- ・ バス停の位置は固定とする。ただし、すべてのバス停にバスが停車する必要はない。
- ・ 快速バスは考えない、すなわち各路線が通過するすべての停留所に停車する。
- ・ 道路混雑の影響は考慮せず、リンク所要時間を一定とする。
- ・ 路線数と各路線の起終点は固定とする。
- ・ バス1台あたりの乗車可能人数と保有するバス台数を所与とする

(3)定式化

本研究で提案するモデルを、各路線の経路 $\mathbf{r}=(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_L)$ と運行頻度 $\mathbf{f}=(f_1, f_2, \dots, f_L)$ を同時に決定するとし、さらに上位問題を多目的最適化問題として以下のように定式化する。

* キーワード：公共交通計画，ネットワーク分析，バス路線網評価

† 正員，修士（工学），株式会社オリエンタルコンサルタンツ（渋谷区本町3-12-1住友不動産西新宿ビル6号館）

Tel: 082-424-6922, murayama-no@oriconsul.com

‡ 正員，博士（工学），京都大学大学院工学研究科

§ 正員，博士（工学），広島大学大学院国際協力研究科

+ 正員，博士（工学），広島大学大学院国際協力研究科

$$\min_{\mathbf{r}, \mathbf{f}} \psi_m(\mathbf{y}, \mathbf{q}, \mathbf{r}, \mathbf{f}), m = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

such that

$$(\mathbf{y}^*, \mathbf{q}^*) \text{ satisfies (User Equilibrium)} \quad (2)$$

$$C_l(\mathbf{r}_l) \leq C_l^{\max} \quad (3)$$

$$\sum_{l=1}^L f_l C_l(\mathbf{r}_l) \leq N \quad (4)$$

ただし、

- \mathbf{y} : 経路別利用者数
- \mathbf{q} : 路線別乗り損ね確率
- L : 路線数 (所与)
- $C_l(\mathbf{r}_l)$: 路線 l の起終点間の所要時間
- C_l^{\max} : 路線 l の起終点間の所要時間の上限値
- N : 保有する車両台数 (所与)

なお、式(3)は路線長に関する制約条件であり、本研究では右辺を起終点間の最短所要時間の定数倍として4段階で既定する。式(4)は車両台数制約であり、左辺を運行に必要な車両台数として近似する。

a) 上位問題

上位問題の目的関数として、事業者側の視点から総走行時間最小化 (ψ_1) を、乗客の視点から一般化コスト (総移動コスト) 最小化 (ψ_2) を採用する。

$$\psi_1(\mathbf{r}, \mathbf{f}) = \sum_{l=1}^L f_l C_l(\mathbf{r}_l)^2 \quad (5)$$

$$\psi_2(\mathbf{y}, \mathbf{q}, \mathbf{r}, \mathbf{f}) = \sum_{rs \in W} \sum_{p \in h_{rs}^*} y_p \cdot g_p(\mathbf{y}, \mathbf{q}) \quad (6)$$

ただし、

- W : OD ペアの集合
- h_{rs}^* : OD ペア rs における hyperpath 集合

b) 下位問題

下位問題では、乗客配分モデル CapCon-CL (Capacity-Constrained transit assignment model with Common Lines) を用いる。CapCon-CL は頻度ベースで運行される公共交通を想定し、道路交通における利用者均衡に準じるものであり、容量制約条件と common lines problem という公共交通特有の特徴を明示的に加味したモデルである。なお、乗客は以下に示す一般化費用を最小にする経路を探索すると仮定している。なお、common lines problem を考慮しているため、一般化費用を最小にする経路は単一ではなく経路群(hyperpath)となる。

$$g_p = \sum_{a \in A_p} \eta_a \alpha_{ap} c_a + \zeta \sum_{k \in S_p} \frac{\beta_{kp}}{F_{kp}} - \theta \ln \left(\prod_{k \in E_p} (1 - q_k)^{\beta_{kp}} \right) \quad (7)$$

ここに、

$$F_{kp} = \sum_{a \in OUT_p(k)} f_{l(a)} \quad (8)$$

ただし、

- α_{ap} : hyperpath p がリンク a を通過する確率
- β_{kp} : hyperpath p がノード k を通過する確率

- c_a : リンク a のリンクコスト
- q_k : プラットフォーム k における乗り損ね確率
- θ : 乗り損ねのリスクに対するパラメータ
- η_a, ζ : 時間価値パラメータ

である。式(7)において、リンクコスト c_a に乗車時間あるいは徒歩時間コストが課せられており、第1項は移動コストを表している。そして、第2項、第3項はそれぞれ期待待ち時間コスト、乗り損ねコストを表している。なお、本研究においてバス停間に徒歩リンクを設定することにより、異なるバス停への徒歩での移動を許容している。CapCon-CL モデルは、路線別乗り損ね確率 \mathbf{q} と路線別リンク交通量 \mathbf{y} を未知変数とした相補性問題として定式化できる。

Find $(\mathbf{y}^*, \mathbf{q}^*)$ such that

$$\mathbf{y}^* \cdot \mathbf{u}(\mathbf{y}^*, \mathbf{q}^*) = 0, \mathbf{u}(\mathbf{y}, \mathbf{q}) \geq \mathbf{0}, \mathbf{y} \in \Omega \quad (9)$$

$$\mathbf{q}^* \cdot \mathbf{v}(\mathbf{y}^*, \mathbf{q}^*) = 0, \mathbf{v}(\mathbf{y}^*, \mathbf{q}^*) \geq \mathbf{0}, \forall \mathbf{0} \leq \mathbf{q} \leq \mathbf{1} \quad (10)$$

ここに、

$$u_p(\mathbf{y}, \mathbf{q}) = g_p(\mathbf{y}, \mathbf{q}) - m_{rs}^* \quad (11)$$

$$v_{kl}(\mathbf{y}, \mathbf{q}) = f_l z_l - x_{w_{kl}} - (1 - q_{h_{kl}}) x_{b_{kl}}, \forall k \in U_l, l \in L \quad (12)$$

ただし、

- Ω : 交通量保存則を満たす路線別リンク交通量
 - m_{rs}^* : OD ペア rs における最小コスト
 - z_l : 路線 l の車両容量 (単位時間あたり)
 - $x_{w_{kl}}$: プラットフォーム k の路線 l の車両に既に乗車している乗客数 (単位時間あたり)
 - $x_{b_{kl}}$: プラットフォーム k の路線 l の車両に乗車しようとしている乗客数 (単位時間あたり)
 - L : 路線集合
 - U_l : 路線 l が停車するプラットフォームの集合
- である。なお、式(11)は利用者均衡条件を、式(12)は容量制約条件を表している。

(4) モデルの解法

本研究では構築したモデルを、遺伝的アルゴリズム (GA) を多目的最適化問題のために拡張した NSGA-II を用いて解いた。NSGA-II の詳細は参考文献⁸⁾⁹⁾を参照されたい。上位問題における操作変数は各路線の運行経路と運行頻度であるが、それぞれを別々に遺伝子型に変換し交叉・突然変異を行った。ただし、NSGA-II を運行経路探索に適用するにあたり、リンク接続を考慮出来ないという大きな欠点もある。そこで、運行経路探索は稲垣¹⁰⁾の方法により修正する。

3. 広島市バスネットワークの評価

(1) 計算条件

本章では、構築したモデルを適用することにより、広島市バスネットワークに適用し、広島市バスネットワークを評価する。モデルの適用にあたり、広島市の中心市街地の主要な交差点のみにノード（バス停）が存在すると仮定し、68 ノード、228 リンク（両方向）の簡略化ネットワークを設定した(図.1)。バス停間距離は GIS により計測し、バス、徒歩による移動速度をそれぞれ 300m/分、80m/分と仮定して移動時間を算出した。また、乗客需要は 2006 年 10 月のバス会社 3 社分の整理券データの集計値と、広島市により推計された時間帯別利用者数分布をもとに、1 日あたりの朝 7 時から 8 時のピーク時間帯データに加工して使用した。時間価値パラメータは、既往研究¹¹⁾を参考に乗車時間、待ち時間、徒歩時間それぞれ 13 (円/分)、26 (円/分)、50 (円/分) とした。NSGA-II におけるパラメータは図 2 に示すように設定した。また、バスの容量は、乗り込み調査により 45 人台と設定した。

(2) 計算結果

まず、計算結果がパレート解に収束していることを確認するために、図 2 に NSGA-II における世代数と解集合の関係を示す。これを見ると、若い世代では解が平面的に分散しているのに対して、世代が進むにつれ、解

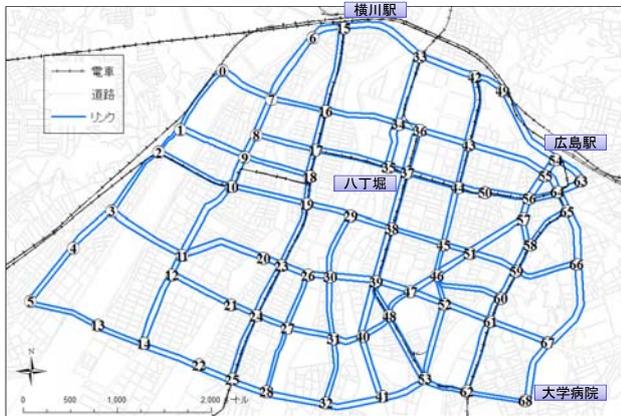


図.1 ネットワークデータ

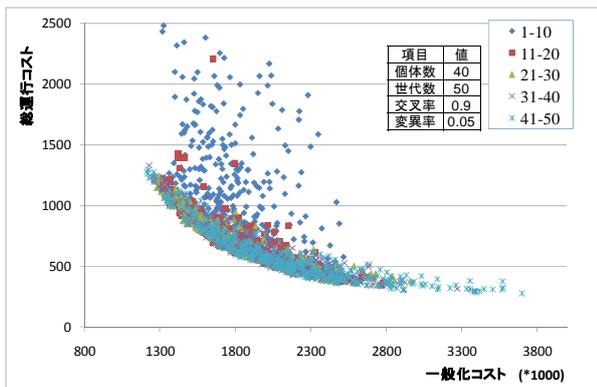


図.2 NSGA-II による解集合

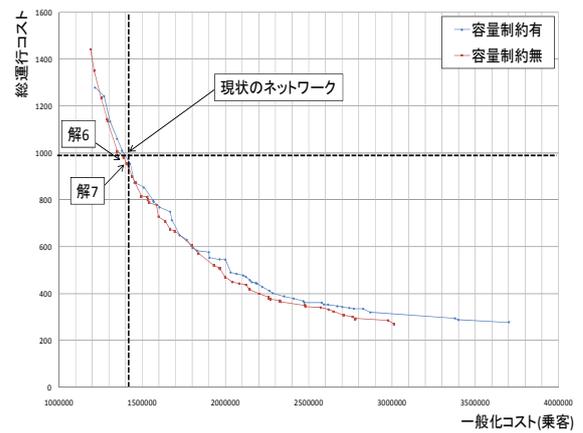


図.3. パレートフロントと現状ネットワークにおけるコスト

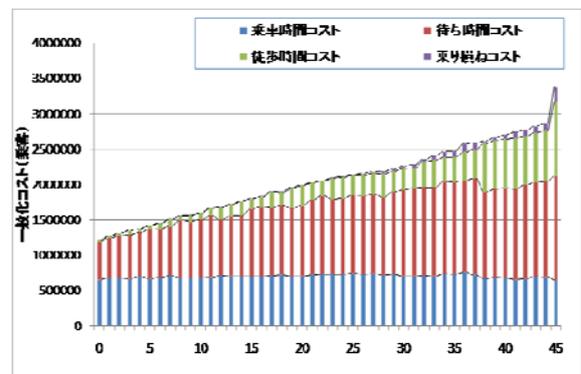


図.4. 各解における一般化コストの内訳

が収束しパレートフロントが形成されていることが確認できる。したがって、以降の計算では世代数を 50 とし計算をすすめる。

図.3 に容量制約を考慮する場合、しない場合それぞれのパレートフロントを示す。また図中の点線は現状ネットワークにおける乗客の一般化コストと事業者の総運行コストを表している。分析によって得られたパレート解に広島市の現状のバスネットワークのバス路線網付加して示している。まず、容量制約の考慮の有無に関わらずパレートフロントの形状が類似しており、本計算の条件下では車両容量の影響は大きくないといえる。また、広島市の現状のバスネットワークバス路線網における一般化コスト、運行コストはパレート解に非常に近接しており、本モデルで採用仮定した 2 つの目的関数から見れば効率的な運行がなされているといえる。一方で、容量制約を考慮しない場合における解 6, 7 (パレート解は一般化コストの小さい順に並べている) は一般化コスト、運行コストともに現状の路線網よりも望ましく、本稿で採用した 2 つの目的関数に関してはこれらの解は現状ネットワークより効率的であるといえる。本研究の下位問題で用いる乗客配分モデルにおいて、一般化コストの内訳 (乗車時間、待ち時間、徒歩時間、乗り損ね) を計

算することが可能であるが、図4 にそれぞれのパレート解における一般化コストの内訳を示す。図3 と同様に、パレート解は一般化コストの小さい順（すなわち、運行コストの大きい順）に並べている。図3 より、運行コストの低下にともない、一般化コストが増加するという結果を得たが、図4 をみると乗車時間コストは一定であるが、待ち時間コスト、徒歩時間コストが増加していることがわかる。

図4 に現状のネットワークと推定結果のOD ペア間の総コスト比率を用いて算出したネットワーク全体の公平性を示す。これより、運行コストの削減に伴い、OD ペア間の格差が大きくなり、公平性が低下することがわかる。

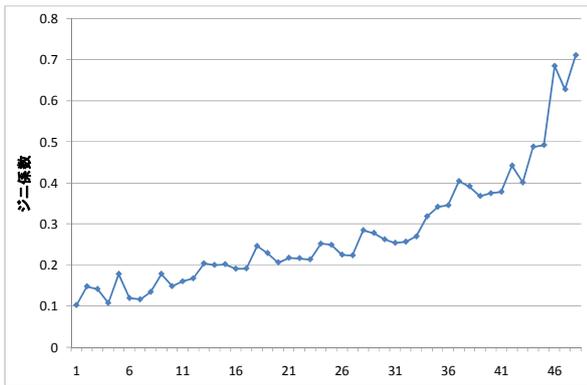


図4. ネットワーク全体の公平性

次に、各道路区間における運行頻度（全路線の集計値）の変化を見ていこう。図5 に現状のバスの運行頻度を示す。図中において、「広島駅」は新幹線も停車する市内最大の JR の駅であり、「横川駅」は西部から市内中心部への玄関口となる JR の駅である。また、「八丁堀」周辺は市内屈指の繁華街である。図5 を見ると、現状の路線網においては広島駅・横川駅から八丁堀を繋ぐ道路区間と、広島駅から大学病院を繋ぐ道路区間で多くの車両が走行していることがわかる。次に、運行コスト・一般化コストの両方が現状のバス路線網より小さい解6 に着目しよう。図6 に各道路区間における解6 の路線網と現状路線網における運行頻度の差を表したものである。図5 および図6 をみると、現状路線網で路線が集中する広島駅・八丁堀間・横川駅・八丁堀間の運行頻度が減少し、それ以外のネットワーク全体について概ね運行頻度が向上している。

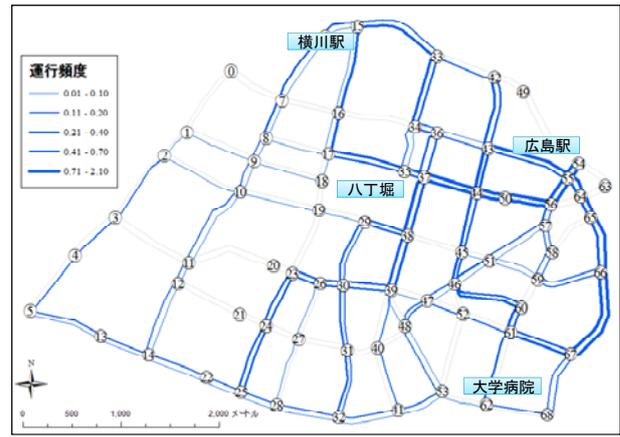


図5. 現状路線網における各道路区間の運行頻度

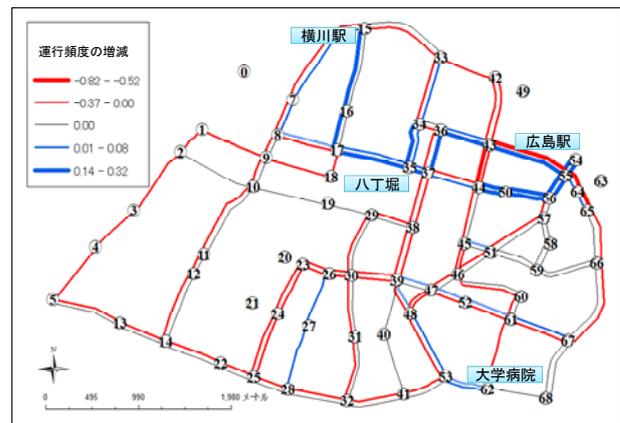


図6. 解6における運行頻度と現状路線網における運行頻度の差

4 まとめ

本研究では、先行研究で構築したバスの路線網・運行頻度決定モデルを広島市実ネットワークに適用し、その結果と現状の路線網を比較することにより、現状の広島市バス路線網を評価した。その結果、現状のバス路線網はパレートフロントに近く、本稿で扱った2つの目的関数に関しては計算対象のバス路線網は効率的であるといえる。一方で、運行コスト、一般化コストともに現状路線網より優れた解の存在が確認された。特に、路線が集中している路線からバスをネットワーク全体に分散させることで、現状路線網よりも両コストの減少を図れることも示され、今後、更なる効率化がはかれる可能性が示唆された。

【謝辞】

本研究を遂行するにあたり、貴重なデータを提供いただいた広島市ならびに広島バス、広島電鉄、広島交通に感謝の意を示します。なお、本研究は第一著者、第二著者が広島大学在籍時に行ったものである。

参考文献

- 1) 高山純一, 宮崎耕輔: バスダイヤを考慮した最適バス路線網再編計画策定に関する研究, 土木計画学研究論文集, 13, 827-836, 1996
- 2) Zhongzhen Yang and Bin Yu: "A Parallel Ant Colony Algorithm for Bus Network Optimization", Journal of Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 22, 44-55, 2007
- 3) 原口友心, 高山純一, 塩土圭介, 加藤隆章: バス路線網再編計画システムの構築に関する研究, 都市計画学論文集, 36, 601-606, 2001
- 4) Prabhat Shrivastava, Margaret O'Mahony: A model for development of optimized feeder routes and coordinated schedule- A genetic algorithms approach, Transportation Policy, 13, 413-425, 2006
- 5) J. F. Guan, Hai Yang and S. C. Wirasinghe: Simultaneous optimization of transit line configuration and passenger line assignment, Transportation Research, 40B, 885-902, 2006
- 6) 嶋本寛, 倉内文孝, Schmöcker, J.-D., 村山直輝: 乗客行動を考慮したバス路線網決定モデル, 土木計画学講演集, 40, CD-ROM, 2009
- 7) Kurauchi, F., Bell, M. G. H. and Schmöcker, J.-D.: Capacity Constrained Transit Assignment with Common Lines, Journal of Mathematical Modelling and Algorithms, 2-4, pp. 309-327, 2003.
- 8) Shimamoto, H., Kurauchi, F., Iida, Y., Bell, M. G. H. and Schmöcker, J.-D.: "Evaluation of Public Transit Congestion Mitigation Measures Using Passenger Assignment Model", Journal of Eastern Asia Transportation Studies, Vol.6, 2076-2091, 2005
- 9) Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A. and Meyarivan, T.: A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II, the Parallel Problem Solving from Nature VI (PPSN-VI), 849-858, 2000.
- 10) 稲垣潤, 長谷川美紀, 北島秀夫: 遺伝的アルゴリズムを用いた経路探索における複数経路候補の決定法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J82- D-I, No.8 1102-1111, 1999
- 11) 平井幹也, 倉内文孝, 飯田恭敬: "融合型公共交通システム実現を目指した交通機関選択行動に関する実験分析", 第30回土木計画学研究講演集, CD-ROM