

乗客行動を考慮したバス路線網決定モデル*

Bus Network Configuration Determinant Model Considering Passengers' Behaviour*

嶋本寛†・倉内文孝‡・Schmöcker, Jan-Dirk§・村山直輝+

By Hiroshi SHIMAMOTO†・Fumitaka KURAUCHI‡・Jan-Dirk SCHMÖCKER§・Naoki Murayama+

1. はじめに

高密度都市において公共交通は自動車交通と比較して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とされている。しかし、特にバス交通に着目すると、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く、必ずしも効率的な路線網とはいえず、難く路線網の効率化が求められている。韓国・ソウル市ではバス路線網の抜本的な再編により利用者数を増やしており、路線網の再編は不可能な政策とはいえないが、事前の十分な評価が必要であることは言うまでもなく、評価のための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リ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。

以上から、先行研究で提案されている路線網決定モデルの多くにおいて乗り換え行動を含めた乗客行動の取り扱いが不十分であることが明らかになったが、本研究では先行研究で構築した乗客配分モデル⁶⁾を制約条件とするMPECとして定式化することにより、移動コスト最小化という行動規範のもとであるが、路線網変更にもな

う乗り換え行動を含めた乗客の経路選択行動を明示的に表現した路線網計画モデルの提案を行う。なお、本研究では静的な乗客配分モデルをベースとしているため、原口ら³⁾が考慮しているような運転士のスケジューリングやバスの回送、待機は考慮していない。

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、運行事業者と乗客という2種類の利害関係者を考え、事業者、乗客とも運行、あるいは移動にかかるコスト最小化という目的を持っているとする。また、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⁷⁾。

(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。

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

such that

* キーワーズ: バス路線網決定, MPEC, 多目的最適化
† 正員, 博士(工学), 広島大学大学院国際協力研究科
(〒739-8529) 東広島市鏡山 1-5-1, Tel: 082-424-6922,
shimamoto@hiroshima-u.ac.jp
‡ 正員, 博士(工学), 岐阜大学工学部
§ 正員, MSc, CTC, 東京工業大学理工学研究科
+ 学生員, 広島大学大学院国際協力研究科

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

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

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

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、本研究では右边を起終点間の最短所要時間の定数倍として表現する。また式(4)は車両台数制約であり、左辺を近似的に運行に必要な車両台数と見なしている。

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。

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

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

ただし、

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

なお、式(4)の左辺を運行に必要な車両台数と定義しているため、式(5)は総走行時間と見なすことができる。また式(6)における g_p は hyperpath p の一般化費用であり定式化は次節に示す。

b) 下位問題

下位問題では、先行研究で構築された乗客配分モデル CapCon-CL (Capacity-Constrained transit assignment model with Common Lines)⁶⁾を用いる。CapCon-CLは頻度ベースで運行されてい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。このモデルにおいて、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。

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

ここに、

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

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

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

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

ここに、

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

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

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-II⁸⁾ を用いて解いた。NSGA-IIの詳細は参考文献⁷⁾⁸⁾を参照されたい。上位問題における操作変数は各路線の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。

経路探索にGAを用いる長所の1つとして、最短経路のみならずその他の経路も記憶されることであるが、バス路線は需要に応じて設定すべきもので必ずしも起終点

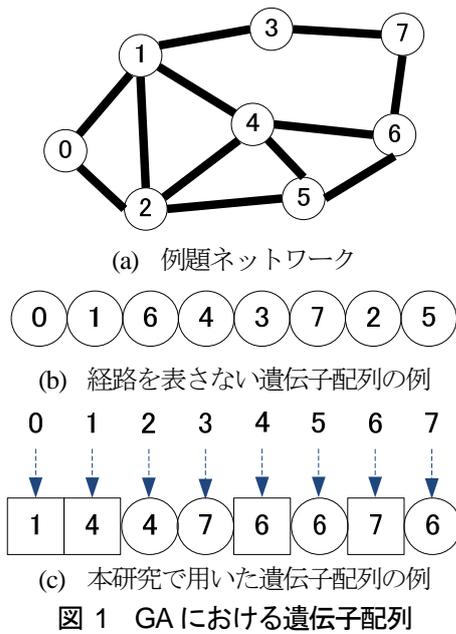


図 1 GAにおける遺伝子配列

間を最短に結ぶものではないことを鑑みれば、本研究においてGAを用いた経路探索の長所と合致しているといえる。ただし、経路を表す遺伝子型を巡回セールスマン問題 (TSP) と同様に変換すれば、図 (b)の例でノード 1 から 6 へのリンクが存在しないように、経路を表さない致死遺伝子が多数発生する。そこで本研究では稲垣ら⁹⁾によって提案されたGAを用いた経路探索手法を用いる。彼らの手法において、図 (c)に示すように経由するノード番号を遺伝子として遺伝子型を設計している。図 (c)においてノード番号 m から n への経路は m 番目の遺伝子座に n を格納することを起点ノードから終点ノードに到達するまで繰り返し、途中一度も経由しないノードについては、そのノードが接続しているノード集合の中からランダムに 1 つを選択して格納する。したがって、本手法で必要とする遺伝子座の数は経由するノード数によらずネットワーク上の総ノード数に等しくなる。なお、図 (c)の例は、起点・終点をそれぞれ 0, 7 とすれば「0→1→4→6→7」という経路を表している。なお、本研究で用いた遺伝子型に対応した交叉・突然変異方法も提案されているが、紙面の都合上詳細は省略する。

3. ケーススタディ

(1) 計算条件

構築したモデルを、図 2に示す仮想ネットワークに対して適用する。各ノードにバス停が存在するとし、バス停間の所要時間を 2 分 (バス)、12.5 分 (徒歩) とする。時間価値パラメータに関しては、乗車時間、待ち時間、徒歩時間に対してそれぞれ 13 (円/分)、26 (円/分)、50 (円/分) とし、乗り損ねに対するリスクパラメータ θ を 100 とした。またOD需要を 2→14, 2→17, 10→14,

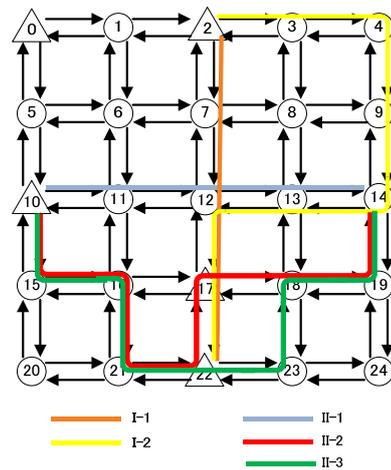


図 2 計算対象ネットワーク

表 1 車両容量を考慮しないときのパレート解

Solution	Line I (2→22)		Line II (10→14)		Passengers' Cost	Operational Cost
	Type	Frequency	Type	Frequency		
0	I-2	5	II-2	5	33540.00	102.40
1	I-2	5	II-3	5	33540.00	102.40
2	I-2	5	II-1	5	34320.00	64.00
3	I-1	5	II-1	5	35100.00	25.60
4	I-1	5	II-1	10	46800.00	19.20
5	I-1	10	II-1	5	46800.00	19.20
6	I-1	10	II-1	10	58500.00	12.80
7	I-1	15	II-1	10	70200.00	10.67
8	I-1	15	II-1	15	81900.00	8.53
9	I-1	20	II-1	15	93600.00	7.47
10	I-1	15	II-1	20	93600.00	7.47
11	I-1	20	II-1	20	105300.00	6.40

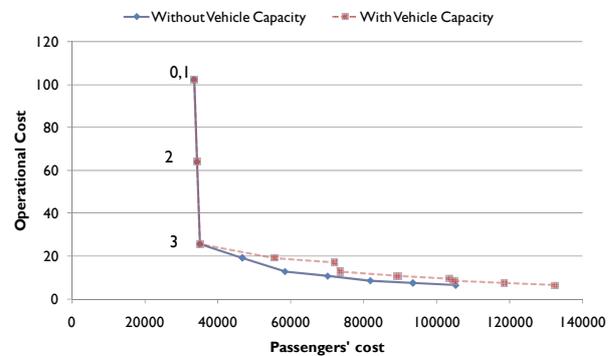


図 3 パレート解およびパレートフロント

10→22 についてそれぞれ 30 (人/分) とした。バス路線について、2→22 (Line I) と 10→14 (Line II) の 2 路線あるとし、それぞれの運行頻度は、1/5, 1/10, 1/15, 1/20 から決定するものとする。また、1 車両あたりの定員を 300 人とする。

(2) 計算結果

表 1に車両容量を考慮しないときのパレート解を示す。表中のTypeは図 2に示したものに対応しており、また解は乗客の移動コスト (ψ_2) を小さい順に並べている。解番号 0 あるいは 1 の解においては運行頻度が両路線とも

最大の 1/5 であり、また路線も起終点間の最短経路ではなくすべての旅客需要ペアを直通で結ぶ形状である。解番号が大きくなるにつれ、起終点間を最短で結ぶ経路が選ばれるようになり、また運行頻度も小さくなっていき、運行コストは小さくなっていくものの乗客コストは大きくなっていくことがわかる。図 3 に車両容量を考慮 (300 人台) した場合と考慮しない場合におけるパレートフロントを示す。図中の解番号は表 1 のものと対応づけている。解番号 0, 1, 2, 3 においては車両容量の考慮の有無に関わらず同一のパレート解であるが、以降の解では同一の運行コストに対して車両容量を考慮したほうが乗客コストは常に大きくなっている。これは、サービスレベルが低下して乗り損ねが発生し、式(7)における第 3 項の乗り損ねコストが加算されたためである。なお、解番号 0, 1, 2, 3 において乗客コストはほぼ同一であるにも関わらず運行コストは大きく異なっている。表 1 および図 2 を見れば、解 0, 1 においては路線 I, II とも起終点間の最短経路ではなく、解 2 においては路線 I のみが起終点間の最短経路ではなく、解 3 においては両路線とも起終点間を最短経路で結んでいる。次に乗客コストの内訳を示した図 4 を見ると、解 0 および 1 については全旅客需要ペア間を直通で結んでいるため待ち時間は少ないものの乗車時間は大きくなっている。また解 2 においては路線 II (10→14) が起終点間の最短経路となったため OD ペア (10→14) の乗車時間コストは小さくなったものの OD ペア (10→22) の待ち時間コストが大きくなっている。これはバス停 12 において乗り換えが必要となったためである。また解 3 においては OD ペア 2→17 においても乗車時間コストが小さくなったものの、新たに OD ペア 2→14 でも乗り換える必要が生じているため、待ち時間コストが大きくなっていることがわかる。

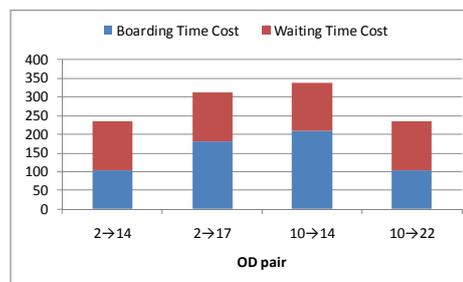
4. おわりに

本研究では、先行研究で構築した乗客配分モデルを下位問題とした MPEC として定式化したバス路線網決定モデルの提案を行った。提案したモデルは乗客配分モデルを内包していることにより、乗客行動をより正確に表現できるという特徴を有している。そして、提案したモデルを簡易ネットワークに適用した結果を示した。より詳細な分析結果については、講演時に示す。

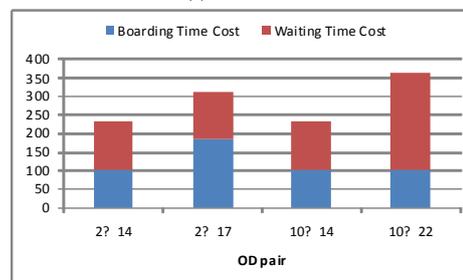
謝辞：本研究は科学研究費補助金 20760349 (若手研究 B, 研究代表者・嶋本寛) および 20656080 (萌芽研究, 研究代表者・倉内文孝) の援助により行われているものである。ここに記し、感謝の意を示します。

【参考文献】

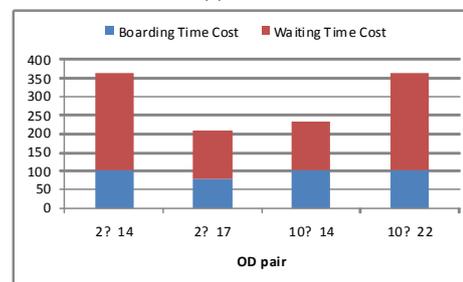
1) 高山純一, 宮崎耕輔：バスダイヤを考慮した最適バス路線



(a) 解0, 1



(b) 解2



(c) 解3

図 4 各解における乗客コスト内訳の比較

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) 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.

7) 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

8) 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.

9) 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