第Ⅳ部門

公共交通における乗客配分モデルの構築

京都大学大学院工学研究科　学生員　○嶋本　寛
京都大学大学院工学研究科　正会員　倉内文孝
京都大学大学院工学研究科　フェロー　飯田恭敬

1　はじめに

本研究においては，より一層の利便性向上が求められる公共交通の計画評価のための乗客配分モデルを提案する．乗客配分モデルを定式化し，ケーススタディを通じてモデルの挙動確認を行う．

2　公共交通乗客配分モデル

2.1　モデルの概要

本研究で構築する乗客配分モデル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配分に準ずるものである．利用者は運行頻度や路線網について十分な知識を有すると仮定し，その元で最短所要時間経路を探索するものとした．提案した乗客配分モデルは以下の 2 点を特徴とする．

a)　容量制約条件を明示的に加味している [1]

既存の乗客配分モデルにおいては，列車容量を明示的に考慮したものが少ない．そのため，乗客需要がその駅に到着した車両の利用可能容量を超える場合，積み残しが生じることを明示的に考慮した．また，この積み残しによって起こりうる所要時間増加をリスク項としてコスト関数に負荷する．

b)　common lines problem[2]を考慮している

common lines problem とは，公共交通などの運行間隔に伴って待ち時間が生じる場合に，あるプラットフォームを共有し，目的地に到達可能な路線が複数ある場合，最短所要時間経路が確率的に配分される経路群（hyperpath）となる特徴をいう．この common lines problem を考慮したモデル化を行っている．

2.2　路線分岐確率および期待所要時間

ある乗車駅から降車駅までに複数の路線が運行されているとし，そのうちの路線集合 K に含まれるものを利用すると仮定しよう．また，電車の到着をポアソン到着とする．路線の運行頻度 $\mathbf{f}$ と所要時間 $\mathbf{t}$ が所与の場合，路線 i を利用する確率 $p_i(\mathbf{f},\mathbf{t})$および目的地までの期待所要時間 $T(\mathrm{f},\mathrm{t})$は次のように計算できる．

$$p_i(\mathbf{f},\mathbf{t}) = \frac{f_i}{\sum_{k\in K} f_k} \qquad (1)$$

$$T(\mathbf{f},\mathbf{t}) = \frac{1+\sum_{k\in K} f_k t_k}{\sum_{k\in K} f_k} \qquad (2)$$

式(1)は運行頻度に準じて乗客は路線に振り分けられることを意味している．

2.3　乗客配分モデルの定式化

本研究では，すべての乗客は式(3)に示す移動に要する時間とプラットフォームにおける期待待ち時間の総和として定義される期待所要時間と，満車のために乗車することができない可能性に起因するリスクの総和を最小にするように経路集合を決定すると仮定した．

$$g_p = \sum_{a\in A_p} \alpha_{ap} c_a + \sum_{k\in S_p} \beta_{kp}\cdot WT_{kp} - \theta \ln\left(\prod_{k\in E_p}(1-q_k)^{\beta_{kp}}\right) \qquad (3)$$

ただし，

c_a　：アーク a の所要時間

λ_{lp}　：hyperpath p からある経路 l を選択する確率

β_{ip}　：hyperpath p がノード i を通過する確率

$$\beta_{ip} = \sum_{l\in P_p} \varepsilon_{il}\lambda_{lp}, \forall i \in I_p \qquad (4)$$

ε_{il}　：パス l がノード i を通過すれば 1 をとる変数

I_p　：hyperpath p に含まれるノード集合

α_{ap}　：hyperpath p がアーク a を通過する確率

$$\alpha_{ap} = \sum_{l\in P_p} \delta_{al}\lambda_{lp}, \forall a \in A_p \qquad (5)$$

A_p　：hyperpath p に含まれるアーク集合

δ_{al}　：アーク a が路線 l に含まれれば 1 をとる変数

WT_{ip}　：hyperpath p を選択したときの，期待待ち時間であり式(2)で t_i=0 としたもの

q_k　：k における乗り損ね確率（プラットフォーム，路線ごとに定義）

θ　：乗り損ねの危険性に対するパラメータ

である．なお，紙面の都合上詳細は省略するが，式(3)は線形分離可能であり，最適性の原理が満たされるため，ダイクストラ法に準じた解法を適用可能することで最小コスト hyperpath を求めることができる．

乗客配分モデルは，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，

Hiroshi SHIMAMOTO, Fumitaka KURAUCHI, Yasunori IIDA

次のように定式化できる.

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

$$\mathbf{y}^* \cdot \mathbf{u}(\mathbf{y}^*, \mathbf{q}^*) = 0, \mathbf{u}(\mathbf{y}^*, \mathbf{q}^*) \geq \mathbf{0}, \ \mathbf{y} \in \Omega \quad \cdots\cdots (6)$$

$$\mathbf{q}^* \cdot \mathbf{v}(\mathbf{y}^*, \mathbf{q}^*) = 0, \mathbf{v}(\mathbf{y}^*, \mathbf{q}^*) \geq \mathbf{0}, \ \forall \mathbf{0} \leq \mathbf{q} \leq \mathbf{1} \quad \cdots\cdots (7)$$

ただし,

$$u_p(\mathbf{y}^*, \mathbf{q}^*) = g_p(\mathbf{y}^*, \mathbf{q}^*) - m_{rs}^* \quad \cdots\cdots (8)$$

$$v_{kl}(\mathbf{y}^*, \mathbf{q}^*) = f_l z_l - x_{w_{kl}} - (1 - q_{h_{kl}}) x_{b_{kl}}, \forall k \in U_l, l \in L \quad \cdots\cdots (9)$$

Ω ：交通量保存則を満たす路線別リンク交通量

z_l ：路線 l の車両容量

$x_{w_{kl}}$ ：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

$x_{b_{kl}}$ ：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

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. 式(8)における u_p は, OD ペア rs ごとの最小コスト m_{rs}^* と hyperpath p のコスト差を示しているため, 式(6)は利用者均衡条件となる. また, 式(9)の v は路線 l がプラットフォーム k を出発した時点での空き容量を表しているため, 式(7)は容量制約条件となる. 以下では, この相補性問題を逐次平均法を用いて解いた.

3 ケーススタディ

3.1 計算条件

本研究では, 駅 AD 間を 2 本の路線が平行して通っており, 公共交通サービスは右方向のみ提供されているものとした. 駅間の所要時間, サービス頻度および車両容量は図中に示した通りである. 旅客需要は各 OD ペア間で 100(人/分)とした.

3.2 計算結果

図 2 は情報提供がない場合(θ=10)の配分結果である. これを見ると, 容量制約条件が満たされており, また Line I の駅 CD 間以外の路線において容量制約条件が有効に機能していることがわかる. **表 1** は θ=10 のときの OD(0,4)間の hyperpath コストおよびフローを表したものである. コストの大きい hyperpath A は選択されず, 利用されている他の経路のコストは等しいことから利用者均衡条件が成立していることが確認できる.

3.3 情報提供の効果

構築した乗客配分モデルを用いて情報提供効果について検討してみる. 基本モデルにおいては次の車両がいつ到着するかがわからないとしているが, ここでは

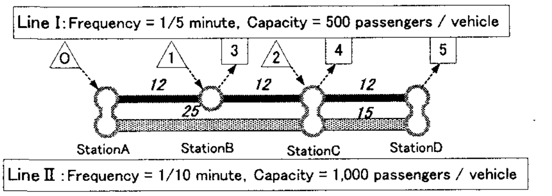

図 1 計算対象ネットワーク

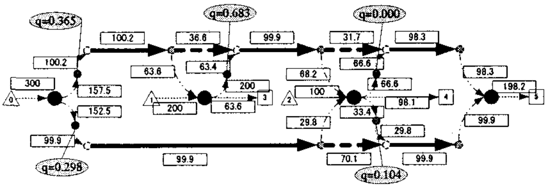

図 2 配分結果(θ=10, 情報提供なし)

表 1 hyperpath コストと OD(0, 4)フロー(θ=10)

		hyperpathA (Line I のみ)	hyperpathB (Line II のみ)	hyperpathC (Line I or II)
情報なし	期待費用	33.54	28.54	28.54
	乗客数	0.00	13.81	86.19
情報あり	期待費用	32.73	29.36	26.48
	乗客数	0.00	0.00	*100.00*

それぞれの路線がいつ到着するかをプラットフォームにおいて情報提供されるものとする. このとき, **図 1** のような 2 路線の場合, 路線分岐確率は以下のようになる. (ただし, $t_1 - t_2 \geq 0$ と仮定する.)

$$p_1 = \frac{f_1}{f_1 + f_2} \exp(-f_2(t_1 - t_2)), p_2 = 1 - p_1 \quad \cdots\cdots (10)$$

表 1 に示す結果を情報の有無で比較すると, 情報提供によって最短コストとなる hyperpath が変化することがわかり, 情報提供によって乗客流が変化することをこのモデルによって表現可能であることがわかる. 全ての OD ペアについて式(3)で定義した経路コストの総和を計算すると, 情報なしのケースで 16,996 分, 情報ありで 16,441 分と, およそ 3.2%の減少となりこのケースでは情報提供により総コスト減少が確認された.

4 おわりに

本研究では, 容量制約条件と common lines problem を考慮に入れた乗客配分モデルを構築し, モデルの挙動確認を行った. 今後の課題としては, 時間帯別配分の検討, 実際のネットワークへの適用があげられる.

【参考文献】

1) Kurauchi, F., Bell, M. G. H. and Schöcker, J.-D. "Capacity Constrained Transit Assignment with Common Lines", *Journal of Mathematical Modeling and Algorithms*, forthcoming.

2) Chiriqui, C. and Robilland, P. "Common Bus Lines", *Transportation Science*, **9**, 115-121, 1975.