

乗客配分モデルを用いた公共交通の混雑緩和施策評価手法の検討*
 Evaluation Method of Congestion Mitigation Measures for Public Transport
 Using Transit Assignment Model*

嶋本 寛**・倉内 文孝***・飯田 恭敬****

By Hiroshi SHIMAMOTO**・Fumitaka KURAUCHI***・Yasunori IIDA****

1. はじめに

モータリゼーションの進展によって、全世界において自動車交通をはじめとする道路交通量は著しく増加したが、近年はそれを抑える手段として公共交通の利用促進を図ることが重要となっている。さらに、今後高齢化社会を迎えるにあたり、交通弱者の救済手段としても公共交通がますます重要となっている。一方、大都市を中心に混雑の激しい公共交通が多く存在し、公共交通への利用転換を図るにあたり混雑緩和のための対策が求められている。本研究では、公共交通のサービスレベル、料金、混雑度に応じて乗客流が変化する乗客配分モデルを用いた公共交通施策の評価手法を提案する。本稿では、混雑緩和を目的とし、路線網形状の違いによる混雑程度の違い、料金体系の変更および追加料金の徴収による混雑緩和について検討した結果を報告する。

2. 公共交通乗客配分モデル

(1) モデルの概要¹⁾

本研究で構築した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。利用者はランダムに駅に到着し、また運行頻度や路線網、混雑具合に関して十分な知識を有すると仮定し、そのもとで最短所要時間経路を探索するものとした。構築した乗客配分モデルは次の2点を特徴とする。

a) 容量制約を明示的に考慮している

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が、本研究では乗客需

要がその駅に到着した車両の利用可能容量を越える場合、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 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、目的地に到着可能な路線が複数ある場合、最短所要時間経路は単一経路ではなく、確率的に配分される経路群(hyperpath)となる特徴をいう。本研究では common lines problem を考慮したモデル化を行っている。

(2) 経路選択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利用可能であり、乗客はそのうち経路集合 K に含まれるものを利用すると仮定する。また、列車の到着をポアソン到着と仮定し、各路線の運行頻度 f と所要時間 t が所与とする。次の車両がいつ到着するかわからない場合、路線 i を利用する確率 $p_i(f, t)$ および目的地までの期待所要時間 $T(f, t)$ は次のように計算できる。

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{k \in K} f_k} \dots\dots\dots (1)$$

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

(3) 定式化

本研究では、すべての乗客は式(3)に示す、知覚所要時間(乗車時間と待ち時間の和である所要時間と、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コストの和)と総費用の和である一般化費用を最小にするように経路集合を決定すると仮定した。

$$g_p = T + P \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

$$T = \xi \sum_{a \in A_p} \alpha_{ap} t_a + \eta \sum_{k \in S_p} \beta_{kp} \cdot WT_{kp} - \theta \ln \left(\prod_{k \in E_p} (1 - q_k)^{\beta_{kp}} \right) \dots\dots (4)$$

* Keywords: 公共交通, 乗客配分, 混雑緩和
 **学生員, 京都大学大学院工学研究科都市社会学専攻
 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町, Tel 075-753-5126, FAX 075-753-5907)
 ***正会員, 博(工), 京都大学大学院工学研究科都市社会学専攻(同上)
 ****フェロー会員, 工博, 京都大学大学院工学研究科都市社会学専攻(同上)

$$P = p + \sum_{a \in A_p} \alpha_{ap} c_a + \sum_{k \in S_p} \delta_{kp} \cdot d_k \dots\dots\dots(5)$$

ただし、

T : 知覚所要時間をコスト換算したもの

P : 総費用

θ : 時間価値換算係数

A_p : hyperpath p に含まれるアーク集合

t_a : アーク a の所要時間

p : 運賃(本研究では乗車距離によらないとする)

α_{ap} : hyperpath p がアーク a を通過する確率

β_{ip} : hyperpath p がノード i を通過する確率

S_p : hyperpath p に含まれるプラットフォームを表すノード集合

E_p : hyperpath p に含まれる乗り損ねを表すノード集合

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

c_a : アーク a に課せられる追加料金

δ_{kp} : ノード k において乗り換えれば1をとる変数

d_k : ノード k において乗り換えにかかるコスト

q_k : 路線, プラットフォームごとの乗り損ね確率

θ : 乗り損ねの危険性を表すパラメータ(本研究では100とする)

である。また、紙面の都合上詳細は省略するが、式(4)および(5)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により最小コスト hyperpath を求めることができる。

本研究で構築した乗客配分モデルは、路線別乗り損ね確率 q と路線別リンク交通量 y を未知変数とした相補性問題として次のように定式化できる。

Find (y^*, q^*) such that

$$y^* \cdot u(y^*, q^*) = 0, u(y^*, q^*) \geq 0, y \in \Omega \dots\dots\dots(6)$$

$$q^* \cdot v(y^*, q^*) = 0, v(y^*, q^*) \geq 0, \forall 0 \leq q \leq 1 \dots\dots\dots(7)$$

ただし、

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

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

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 , 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 , 路線 l の車両に乗車しようとする人数

L : 路線集合

U_l : 路線 l に存在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_{kl} は路線 l , 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。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

(1) 計算条件

計算対象ネットワークとして、図-1のようなネットワークを採用した。駅間の所要時間は図中に示したとおりであり、旅客需要は OD(0,5)で200(人/分)、その他の OD ペアで100(人/分)とした。このネットワークに対して、路線形状の違いが乗客行動に及ぼす影響を調べるため、図-2のような4種類の路線網を用いて検討する。それぞれの路線網において、車両容量を150(人/分)、運行時間間隔を5分とし、乗車運賃、乗り換えコストをそれぞれ1回当たり200円とした。時間価値は所得接近法²⁾を用いて、乗車

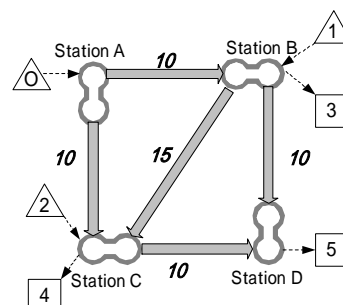


図-1 計算対象ネットワーク

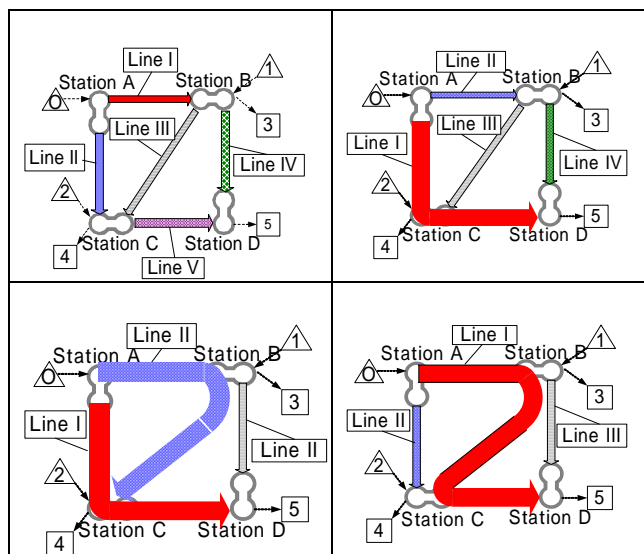


図-2 比較に用いた路線網

時間を 13(円/分) , 乗り換え時間を 26(円/分)とした .

(4) 路線形状の違いによる結果比較

まずは , 4 種類の路線形状の違いによる乗客フローの相違について考察する . 図-3 はすべての OD ペアについて式(3)で定義される一般化費用の総和の比較であり , 表-1 は OD 別到着確率(1 度も乗り損ねずに目的地に到着する確率)である . 図-3 を見ると , 2 区間以上を結ぶ直通路線が通っていない路線網を除いて乗り換えている乗客がいないことがわかる . また , 路線網 の一般化費用が大きいのは , OD(0,5)の乗客全員が乗り換えを嫌って乗車時間の長い Line I(A B C D)を利用したためである . このため , OD(1,4)の到着確率が他の 3 つの路線網に比べて小さくなっている . このように , 路線網の形状の違いによって , 乗客の行動が変化し , それに伴ってネットワーク全体の混雑具合も変化することがここで提案したモデルで表現可能であるといえる .

(5) 共通運賃制度導入による影響

次に , 乗り換えコストの有無による乗客行動の変化について考察する . 欧州の公共交通システムで一般的である共通運賃制度の導入が乗客流に及ぼす影響を考察するのがここでの目的である . 図-4 は乗り換えコストがかからないときの一般化費用の総和である . これと図-3 を比較すると , 路線網 において , 2 区間以上を結ぶ直通路線が通っていないため , 共通運賃が導入されても乗客行動に変化はなく知覚所要時間の総和もほぼ変化していない . また , 路線網 においても一般化費用の総和の変化はわずかであるが , 共通運賃の導入によって OD(0,5)において駅 B で乗り換える経路(A C D)が利用されるようになり , 乗客の行動は変化した . このため , OD(0,3) , (1,5)の到着確率は減少したが , OD(0,4) , (0,5) , (2,5)の到着確率は増加し全体として乗り損ねる乗客数は減少している . 路線網 においては , 共通運賃の導入によって OD(0,5)で乗車時間の長い Line I(A B C D)が利用されなくなったので , 知覚所要時間の総和はおよそ 15%減少した .

またここで興味深いのは , 路線網 と , 路線網 と における乗客行動はそれぞれ同一なことである . 乗換抵抗を考慮していないこのケースにおいて

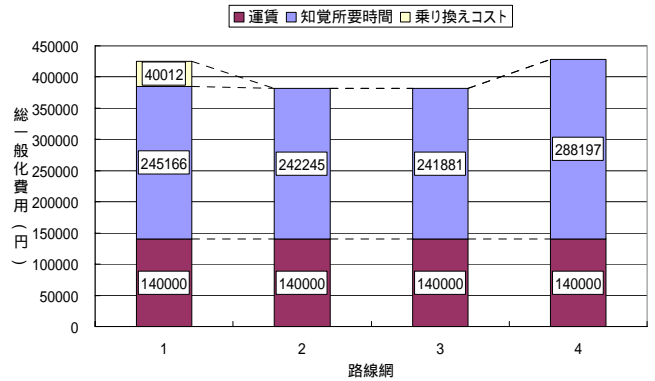


図-3 一般化費用の総和の比較 (乗り換えコストあり)

表-1 OD 別到着確率の比較

乗り換えコスト	路線網	(0,3)	(0,4)	(0,5)	(1,4)	(1,5)	(2,5)
あり	1	0.75	0.75	0.64	1.00	0.86	0.86
	2	1.00	0.50	0.50	1.00	1.00	0.49
	3	1.00	0.58	0.52	1.00	1.00	0.45
	4	0.50	1.00	0.50	0.49	1.00	0.49
なし	1	0.75	0.75	0.64	1.00	0.86	0.86
	2	0.80	0.70	0.71	1.00	0.88	0.70
	3	0.80	0.71	0.71	1.00	0.88	0.70
	4	0.75	0.75	0.64	1.00	0.86	0.86

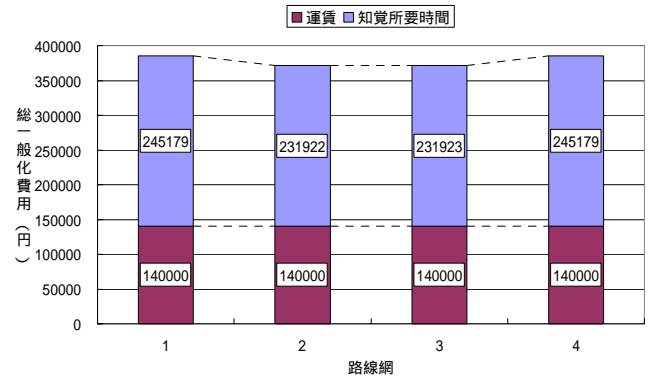


図-4 一般化費用の総和の比較 (乗り換えコストなし)

表-2 各プラットフォームにおける乗り損ね確率 (路線網 , 乗り換えコストあり)

Line	駅	乗り損ね確率
I	A	0.50
	B	0.50
	C	0.50
II	A	0.00
III	B	0.00

は , コスト面から見ると共通運賃を導入すれば路線網 を路線網 , 路線網 を路線網 のように路線網を単純なものに置き換えても乗客に及ぶ影響がほとんどないといえる .

(6) 追加料金による特定路線の混雑緩和効果

乗り換えコストがかかるときに一般化費用が最も大きい路線網 に対して , 特定路線に追加料金を徴収することで乗客流を制御することを考える .

表-2 は路線網 における各プラットフォームにお

ける乗り損ね確率である．これを見ると Line I において混雑が生じている．この混雑を緩和することを目的として，以下では Line I の駅 AB 間，BC 間，CD 間のうち一区間に追加料金を設定することを考える．追加料金は 150 円として計算を進めた．

図-5 は路線網 においてある路線に追加料金を徴収した場合における一般化費用の総和の比較である．追加料金を徴収しても一般化費用の増加はわずかであり，BC 間に課金した場合においては一般化費用の合計は減少している．したがってネットワーク全体から見れば，追加料金の徴収によるメリットは公共交通事業者だけでなく利用者にも及ぶケースもあるといえる．ただし，このようなケースにおいても個別の OD ペアごとに見れば，追加料金を徴収される路線を利用する OD ペアなど一般化費用が増加して不効用を受ける OD ペアも存在することに注意が必要である．表-3 は OD(0,5)間における経路ごとの利用者数である．追加料金の徴収によって，OD(0,5)間の乗客を最小乗車時間経路(A B D または A C D)へ分散させており，知覚所要時間は 15% から 20% 削減された．そのため表-4 を見ればわかるように，特に BC, CD 間に追加料金を徴収した場合においてプラットフォームの混雑も分散されている．最後に，表-5 は OD ペア別の到着確率であるが，追加料金によって OD(0,5)の利用者が増加した路線を起終点とする OD ペアである OD(0,4), (1,5) の到着確率は低下したが，課金される路線を起終点とする OD ペアも含めてその他の OD ペアの到着確率は増加した．以上より，特定の路線に追加料金を徴収することによって混雑が分散される可能性があることが示された．

4. おわりに

本研究では，common lines problem と容量制約条件を考慮に入れた乗客配分モデルを用いて，路線網の形状の違いが乗客行動に及ぼす影響分析を試みた．その結果，路線網の形状によって乗客行動が変化することをここで提案したモデルによって表現可能であることが確認され，混雑具合に及ぼす影響を到着確率などで定量的に表すことができた．また，共通運賃制度の導入や特定路線への追加料金の徴収など料金体系を変化させることによって，混雑の緩和や

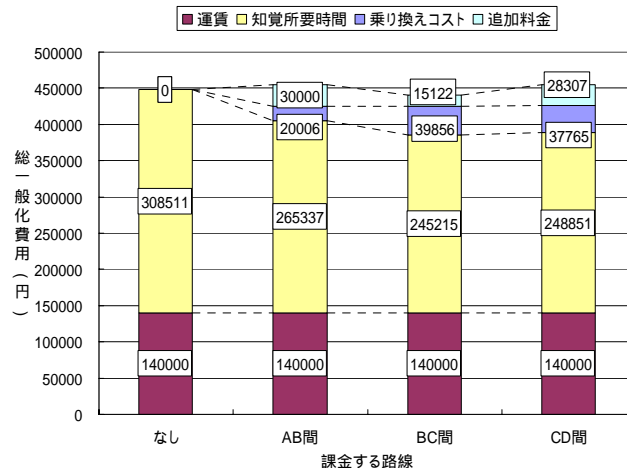


図-5 路線網 における一般化費用の比較 (乗り換えコストあり)

表-3 OD(0,5)間の経路利用人数

	課金する路線			
	なし	AB間	BC間	CD間
A B D	0.0	0.0	100.0	109.5
A C D	0.0	100.0	100.0	79.3
A B C D	200.0	100.0	0.0	11.2

表-4 路線網 における乗り損ね確率の比較

Line	駅	なし	AB間	BC間	CD間
I	A	0.50	0.25	0.25	0.32
	B	0.50	0.25	0.00	0.00
	C	0.50	0.57	0.15	0.15
II	A	0.00	0.25	0.25	0.16
	B	0.00	0.00	0.14	0.14

表-5 路線網 における OD 別到着確率の比較

課金する路線	(0,3)	(0,4)	(0,5)	(1,4)	(1,5)	(2,5)
なし	0.50	1.00	0.50	0.49	1.00	0.49
AB間	0.75	0.75	0.54	0.75	1.00	0.43
BC間	0.75	0.75	0.64	1.00	0.86	0.85
CD間	0.68	0.84	0.64	1.00	0.86	0.85

分散効果を期待できることがわかった．もちろんこのような効果は常に期待できるわけではなく，ネットワークの形状や乗客需要，料金水準によって変化するであろうが，少なくともここで示した分析手法によって路線網の形状や料金体系による影響を検討可能であるといえる．

今後の課題としては，ある路線網における最適な料金体系決定モデルの構築が挙げられる．また，本研究では評価指標として一般化費用の総和と到着確率を用いたが，最適料金体系を決定するときに用いる評価指標についても検討する必要があるといえる．

【参考文献】

- 1) Kurauchi, F., Bell, M.G.H. and Schmöcker, J.-D. Capacity constrained transit assignment with common lines, *Journal of Mathematical Modeling and Algorithms*, 2-4,309-327, 2003.
- 2) 運輸経済研究センター：鉄道プロジェクトの費用対効果分析マニュアル 99, 1999