

乗客配分モデルを用いたバスサービスの評価に関する研究*
京都市バスネットワークを例に
Study on Evaluation of Bus Services Using Transit Assignment Model*
-Case Study on Kyoto City Bus Network-

倉内文孝†・嶋本寛‡・王萍§・飯田恭敬**

By Fumitaka KURAUCHI†・Hiroshi SHIMAMOTO‡・Ping WANG§・Yasunori IIDA§

1. はじめに

本研究では最小費用経路算出アルゴリズムを用いて停留所間の期待最小一般化費用を求め、その値を停留所ペア間で比較することや、料金体系を変化させたケースで比較検討することで、バス交通のサービスレベル評価が可能であることを示す。京都市のバスネットワークを計算対象としサービスレベルの格差などを考察するとともに、一定ゾーン内での乗継無料制度導入によるサービスレベル変化について考察する。

2. 分析方法

(1) 分析方針

本研究では停留所間の最小一般化費用およびその際の所要時間によってサービスレベルを比較評価する。停留所間の移動需要を考慮していないことより、混雑状況を再現あるいは評価することは不可能であるが、逆に需要の大小にかかわらず停留所ペア間のサービスレベルを評価可能であり、少なくとも利用者の公平性の観点から分析することは可能といえる。

(2) 分析の前提条件

計算を進めるにあたり以下を仮定した。

1. バスサービスは頻度ベースで運行されており、到着時間間隔は運行頻度の逆数を平均とするポアソン分布に従う、
2. 乗客はバス停にランダムに到着し、かつ次のバスがいつ到着するかはわからない、

3. 乗客は OD ペア間について期待一般化費用が最小となるような経路を選択するものとする。

1.および 2.は静的な枠組みで問題を取り扱うために設定している。またこれらの仮定より、バス停において魅力的な路線集合のうち最も先に到着した車両に乗車することが期待費用の最小化を実現することとなる。このような期待費用を最小化する乗車方法の決定問題は common lines problem¹⁾と呼ばれる。

(3) 期待一般化費用最小経路の算定方法

期待一般化費用最小経路を算定する際に common lines problem の影響により最適経路は確率的に記述される。ここでは、hyperpath の概念²⁾を援用する。hyperpath は、OD ペア rs を接続する経路集合を示し、hyperpath に含まれるノードの集合 I_p 、リンクの集合 A_p および hyperpath に含まれるノードでの分岐確率 T_p で表現される。また、hyperpath p の一般化費用 g_p は、次のように記述される。

$$g_p = \sum_{a \in A_p} \alpha_{ap} c_a + \sum_{a \in A_p} \phi_a \alpha_{ap} t_a + \varphi \sum_{i \in I_p} \frac{\beta_{ip}}{F_{ip}} \quad (1)$$

ただし、

c_a : リンク a の運賃

α_{ap} : hyperpath p におけるリンク a の通過確率

ϕ_a : リンク a の移動に関する時間価値パラメータ

β_{ip} : hyperpath p におけるノード i の通過確率

φ : 待ち時間に関する時間価値パラメータ

である。 $1/F_{ip}$ はノード i における期待待ち時間を示しており、ノード i が停留所以外である場合には 0、そうでない場合には以下の式で計算される。

$$1/F_{ip} = 1 / \sum_{a \in A_p} \delta_{ai} f_a$$

ただし、 δ_{ai} はリンク a の始点がノード i なら 1、そうでなければ 0 をとるダミー変数であり、 f_a はリンク a の運行頻度を示す。なお、hyperpath p の中に

* Keywords: 公共交通運用, サービス評価, ゾーン内固定運賃制度

† 正員, 博(工), 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻(〒606-8501 京都市左京区吉田本町, Tel 075-753-5126, FAX 075-753-5907, Email: kurauchi@urbanfac.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

‡ 学生員, 修(工), 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻

§ 正員, 西日本旅客鉄道株式会社

** フェロー会員, 工博, 京都大学名誉教授

含まれる全ての単一経路の集合を L_p , 各路線の経路選択確率を q_{lp} とすると, リンク通過確率およびノード通過確率はノードおよびリンクが経路 l に含まれているか否かを示すダミー変数 ε_{al} および γ_{il} を用いて次のように記述できる.

$$\alpha_{ap} = \sum_{l \in L_p} \varepsilon_{al} q_{lp}, \beta_{ip} = \sum_{l \in L_p} \gamma_{il} q_{lp} .$$

式(1)における第1項は, hyperpath p の運賃を示し各リンクにコストが計上されている. 現実的には, 様々な料金体系が設定されていることもあり, 必ずしもリンクレベルで運賃を表現可能とは限らない. しかしながら, このように設定することで計算が簡略化できるため, 運賃体系の表現についてはネットワークの表記方法を工夫することで対応する.

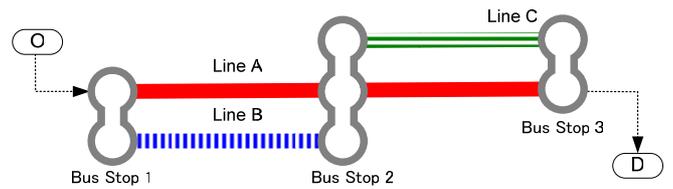
式(1)で示した期待一般化費用を最小化することによって最適経路を算定するが, この定式化においては, 一見 rs 間の考えられうる全ての経路 l を数え上げる必要性がありこれを計算するのは非現実的にみえる. 紙面の都合上詳細は省略するが, 式(1)を適切に変形することで最適性の原理が成立するため, 各目的地 s に対して Dijkstra 法に準じた計算方法による計算が可能である²⁾.

(4) ネットワークの表現方法

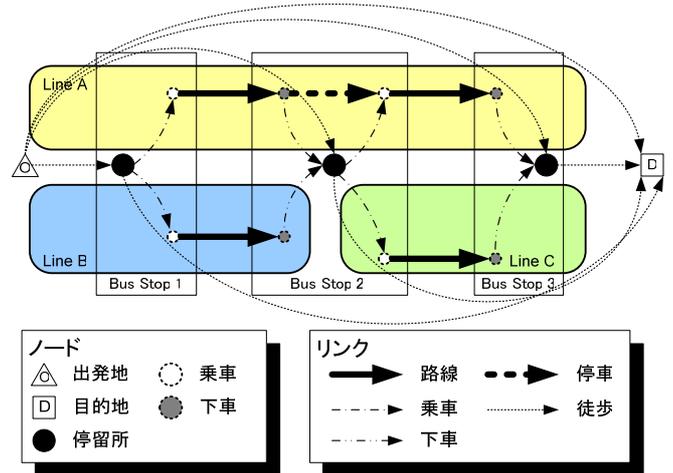
ネットワークは, 先行研究³⁾で提案した方法を基本とし運賃を考慮するための拡張を行った. 図-1(a)で示されるネットワークは, 図(b)のように記述される. 路線ごとにリンクを設定する必要があり多路線の場合には複雑となるが, common lines problem を考慮可能なこと, 目的地ごとの路線利用状況が明示的に表現されることよりこの方法を採用した.

ここで, 図-1(b)に示されたグラフモデルにおける乗車運賃の取扱いについて説明しておく. 本研究では, バスに乗車するたびに均一料金がかかる運賃体系と, 一度料金を支払ってしまえば何回バスを乗り継ごうが料金は一定である, ゾーン内固定運賃制度の2つについて検討を加える. 前者については, 乗車リンクに運賃を負荷することで表現できる. ゾーン内固定運賃制度については, 出発地ノードから全ての停留所ノードへ接続されている徒歩リンクに運賃を設定する. これにより, バスを利用せずに目的地に到達するには OD 間を直接接続するリンクを利用することで運賃を支払う必要がなく, 一度でも

バスを利用する場合には1回だけ料金が負荷されたリンクを通ることになる.



(a) 路線図



(b) グラフモデルによる表現

図-1 ネットワークの表現方法

3. 京都市バスネットワークでのケーススタディ

(1) 計算条件

(a) 計算対象ネットワーク

提案したアルゴリズムを京都市バスのネットワークの主要部分に適用した(図-2 参照). 北大路通, 東大路通, 西大路通と JR 東海道線で囲まれたエリアを対象とし, エリア境界の停留所までを含めた. 対象地域は東西におよそ 4km, 南北に 7km であり 50 の路線が運行されている. 運行頻度および運行経路は 2004 年 11 月 26 日現在の「京都市バス・地下鉄路線図」に記載されている系統ごとの時刻表と運行経路を用いた. 停留所数が 188 であり, 交差点での位置関係により異なる位置に存在するバス停については別々のノードとして設定した. このデータを元にグラフモデルを作成した結果, ノード数 6,278, リンク数 219,576 となった.

運賃は計算対象エリアの中は均一料金区間に設定されており, 1 回バスに乗車するごとに 220 円が徴収される. 乗継割引(一定の条件がそろえば 90 円割引)や一日乗車券(均一料金区間内は 500 円で 1

日乗り放題),回数券(最高5,000円で26回乗車可能)など様々な乗車券が発売されているが,ここでは乗車するたびに220円が課金されるケースを現行運賃制度と位置づけて計算を進めることとする.

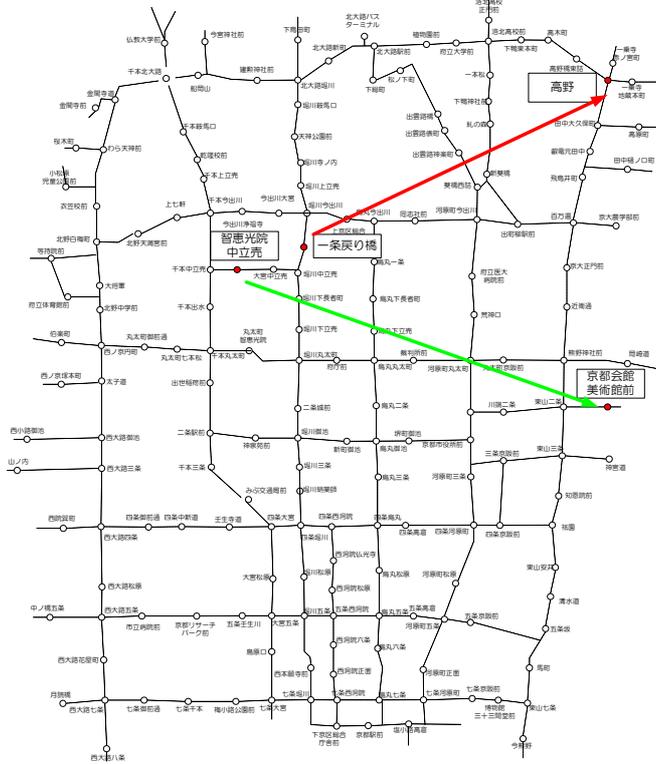


図-2 計算対象ネットワーク

(b) 時間価値パラメータ

本研究では一般化費用の最小化を乗客の経路選択規範としており,徒歩時間,バス停での待ち時間およびバスでの移動時間に関する時間価値パラメータが計算結果に大きな影響を及ぼす.これらの値について適当な文献が見あたらなかったため,ここでは平井ら⁴⁾が推定した値を用いた.この研究では,交通機関選択行動を屋内実験として収集し離散選択モデルによりパラメータ推定を行っており,その結果から乗車時間,待ち時間,徒歩時間の時間価値がそれぞれ12.5円/分,19.7円/分,25円/分と算定されている.

(c) 停留所での乗り継ぎの条件設定

同じ停留所であっても異なる位置にあれば別ノードとして表現することにより,異なるバス停間の移動時間を設定しなければならない.ここでは,道路を横切る必要のない乗り継ぎについては移動時間0分,横切る場合には1分と設定した.

(d) 徒歩時間の計算

徒歩時間については,京都市内のネットワークがほぼ碁盤状となっていることなどにより,各停留所の緯度経度を地図ソフトウェアより取得,東西及び南北距離の和として停留所間距離を計算し,さらに分速80mを仮定することで徒歩時間を算定した.

(2) 現行料金制度におけるサービスレベル評価

(a) 乗車方法

図-3は全停留所ペアを乗車方法ごとに分類したものである.一度だけバスに乗車することが最小費用経路となることが多いが徒歩のみが最適となる停留所ペアも少なからず存在する.2回以上乗り継いで最小一般化費用となるケースは存在しなかった.徒歩での移動が最小経路となったペアを詳細に見ると,943m以下ではバスを利用しない方が適切となった.また3kmを超えるバス停間距離にもかかわらず徒歩が最小費用経路となったものが7ペア存在した.いずれも3回バスを乗り継がないと移動できない停留所ペアであり,運賃に加え乗車時間,待ち時間に起因するコストを考慮に入れると徒歩での移動が最適と計算されたといえる.図-4は停留所ペア間の距離と一般化費用の関係を示したものが同じ停留所間距離でも一般化費用の値が2倍以上となるようなケースも存在しており,停留所ペアによってサービスレベルが大きく異なることがわかる.

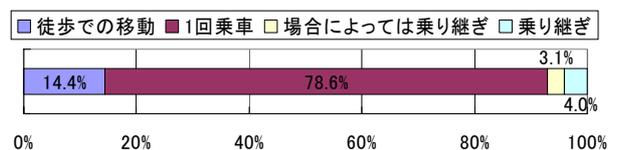


図-3 現行運賃制度での乗車方法の内訳

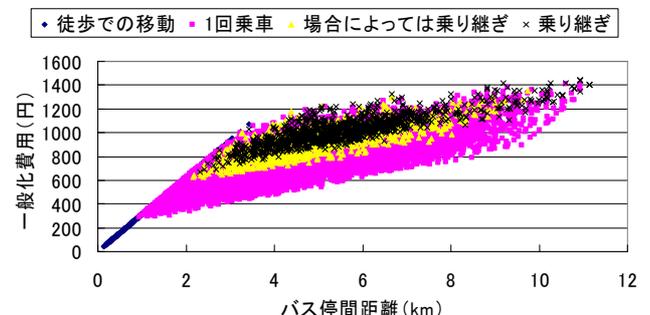


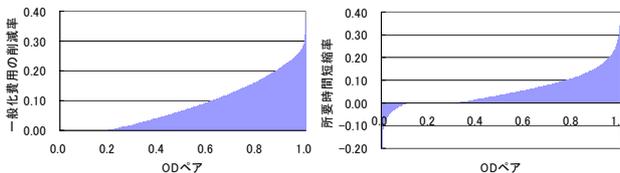
図-4 バス停間距離と最小期待一般化費用の関係

(3) ゾーン内固定運賃制度の導入効果

(a) 一般化費用および所要時間の比較

比較計算例として計算対象区間内での乗継を無料

とした場合についてサービスレベルの向上を一般化費用の削減効果および所要時間短縮効果から確認する。図-5(a)は一般化費用削減比率を示しており、横軸に削減額が小さい順に停留所ペアを並べ替えたもの、縦軸が削減比率を示している。約2割の停留所ペアでは一般化費用に変化がなかった一方で削減率が2割以上の停留所ペアが12%程度存在しており導入効果は停留所ペアごとに大きく異なることがわかる。一方、図-5(b)に所要時間の短縮効果を示すが、興味深いのは10%程度の停留所ペアにおいて所要時間がかえって増加していることである。この理由は徒歩での移動を避け、待ち時間が長くてバスに乗車することを選択した結果であった。停留所ペアごとに期待一般化費用を最小化した際の運賃支払について確認したところ、全体の7%が220円以上から220円に減少、2.4%が徒歩から転換し220円の増加であった。乗継が無料となることで需要を掘り起こす可能性があることをこの結果は示しているといえる。ただし、計算に用いた路線設定は需要を考慮して設定されたものであり、一般化費用削減効果が大きいのは元々バスサービス水準が低いペアであるため7%および2.4%といった値はあくまで参考値であることに注意する必要がある。



(a) 一般化費用の削減 (b) 所要時間の短縮

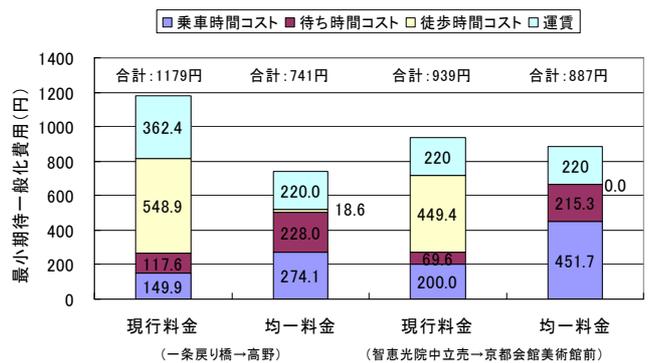
図-5 ゾーン内固定運賃制度の導入効果

(b) 一般化費用および所要時間の内訳

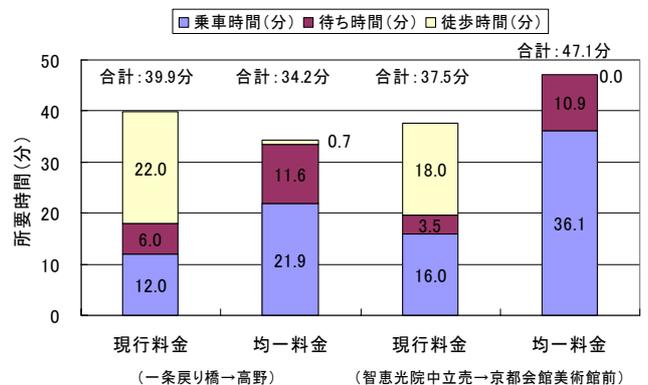
一般化費用の削減率が最大(37%)であった一条戻り橋 高野間および所要時間増加率が最大であった智恵光院中立売 京都会館美術館前の2つの停留所ペアについて、一般化費用及び所要時間の内訳を示したのが図-6(a), (b)である。図(a)よりゾーン内固定運賃制度導入により徒歩時間コストが大幅削減されつつ乗車時間及び待ち時間が増加すること、そして図(b)より全体での所要時間が増加しても徒歩時間を削減するように行動している様子が確認できる。

4. まとめ

本研究では、期待一般化費用最小化を乗客行動の規範と仮定したバスサービスレベルの評価方法を提案した。設定条件に依存している結果であるが、ゾーン内固定運賃制度導入により徒歩時間の大幅な減少および多くの停留所ペアで所要時間短縮が実現されることが示された。今後は乗客需要を負荷し路線ごとの混雑状況を表現すること、設定パラメータの妥当性について検証していくことと、路線設計の変更による乗客流変化について考察する予定である。



(a) 一般化費用



(b) 所要時間

図-6 一般化費用及び所要時間の内訳

【参考文献】

- 1) Chiriqui, C. and Robillard, P. "Common Bus Lines", Transportation Science, 9, 115-121, 1975.
- 2) Nguyen, S. and Pallotino, S.: "Equilibrium traffic assignment for large scale transit networks", European J. Oper. Res. 37, 176-186, 1988.
- 3) 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.
- 4) 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, 2004.