



岐阜大学機関リポジトリ

Gifu University Institutional Repository

車両容量と路線相関を考慮した乗客配分モデルを用いた公共交通の所要時間信頼性評価

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2017-07-14 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 嶋本, 寛, 倉内, 文孝, SCHMÖCKER, Jan-Dirk メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12099/53171

車両容量と路線相関を考慮した乗客配分モデル を用いた公共交通の所要時間信頼性評価

嶋本 寛¹・倉内 文孝²・Jan-Dirk SCHMÖCKER³

¹正会員 京都大学講師 大学院工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: shimamoto@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1番1)

E-mail: kurauchi@gifu-u.ac.jp

³非会員 京都大学准教授 大学院工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: shmoecker@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

本研究は、容量制約と車両到着に関する相関を考慮した乗客配分モデルを用いて、公共交通ネットワークの所要時間信頼性を評価する手法を提案する。評価に用いる乗客配分モデルにおいて混雑の影響は「有効頻度」を用いて、需要が増加するにしたがって駅における期待待ち時間が増加することにより表現する。したがって、本研究で用いる乗客配分モデルを用いて評価できる所要時間のバラツキの要因は、車両到着の相関と乗客需要の増加による混雑の2点である。本研究では、すべての乗客は期待所要時間最小化を行動規範としてしていると仮定してネットワークに配分し、配分の結果得られる期待所要時間をもとに信頼性を評価する手法を提案する。提案する手法を仮想ネットワークに適用し、容量超過と車両到着の相関が所要時間信頼性に及ぼす影響を評価する。

Key Words : *transit assignment model, correlation of vehicles' arrival, travel time reliability of public transportation*

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、多くの都市において公共交通の利用者数が伸び悩んでおり、その一因として待ち時間の存在があげられる。待ち時間が存在するため、頻度ベースでサービスが提供されている公共交通における最小旅行時間（あるいはコスト）経路は必ずしも乗車時間の短い経路とは限らず、次の車両到着に関する情報提供がされない場合の最小旅行時間経路は、「魅力的な経路集合（attractive lines）に含まれる経路集合の中から最初に到着した車両を利用する」ことであると示されており、attractive linesの決定問題はcommon lines problem¹⁾といわれている。Spiess and Florian²⁾はcommon lines problemと利用者均衡問題を組み合わせた乗客配分モデルを提案し、さらに容量制約条件を組み入れたモデル（Kurauchi et al.³⁾, Cepeda et al.⁴⁾）や動的なモデルへの拡張（Schmöcker et al.⁵⁾）が行われている。

Spiess and Florianのモデルやそれ以降提案された乗客配分モデルの多くは以下の5つの仮定を設定している；i) 乗客はランダムに到着する，ii) 乗客は次の車両到着に関する情報がない，iii) 車両到着間隔は各路線で独立な指数分布に従う，iv) 駅間乗車時間は一定である，v) 乗降時間にともなう発車遅れを考慮しない。条件ii)を緩和するため、著者ら⁶⁾は2路線のネットワークにおいて次の列車到着に関する情報提供を考慮したモデルを提案し、Billi et al.⁷⁾, Gentile et al.⁸⁾はさらに一般的なケースのモデルを提案している。条件v)を緩和するモデルはいくつか提案されている。Lam et al.⁹⁾は停留所における乗降時間を乗降客数の関数として実測データから推定し、運行頻度の関数として乗客配分モデルに組み入れている。Teklu et al.¹⁰⁾はマルコフ連鎖を用いて頻度ベースと時刻表ベースを組み合わせた、Day-to-Day dynamicsを考慮した乗客配分モデルを提案している。彼らのモデルにおいて乗客と車両の動きはマイクロシミュレーションにより表現されているため、乗降客数の増大による発車遅れは表現可能である。しかし、都市部のバスなどで問題となっている団子運転をネットワークレベルで明示的に考慮したモデ

ルは非常に少ないといえる。

団子運転が発生する主な原因は、i) 特定の車両への乗客の集中による乗降時間の増加、ii) 特定の道路区間への車両の集中、の2点が考えられる。Newell and Pot¹¹⁾は単一の路線を対象に i) が原因の団子運転の形成過程について、何らかの原因でバスの到着が遅れた場合、そのバスに多くの乗客が乗車しさらなる遅れが生ずる一方で、後方のバスに乗車する乗客が少なくなるため乗降時間が短くなり、前後のバスの間隔が短くなることを数理的に示している。筆者ら¹²⁾は乗客が経路選択可能なネットワークレベルにおいて、車両到着の相関を表す「相関係数」を定義することにより、ii) の影響による団子運転のみを表現した乗客配分モデルを提案している。この研究において、「相関係数」は乗客フローとは独立であると仮定しているが、筆者ら^{13), 14)}は、「相関係数」を乗降客数の関数として表現するよう拡張することにより、ネットワークレベルにおいて両者の影響による団子運転を表現したモデル構築を行っている。ただし、筆者らの先行研究^{12), 13), 14)}において車両容量が考慮されていない。

本研究では、筆者ら^{13), 14)}のモデルに車両容量制約を考慮できるようさらに拡張したモデルを用いて、停留所における所要時間信頼性を評価する手法を提案する。したがって、本研究において注目する所要時間変動の原因は、乗客集中による混雑と団子運転の2点である。車両容量制約を考慮できるよう拡張したモデルを用いることにより、乗客集中による混雑と団子運転の2つの要因のそれぞれが所要時間信頼性の低下に及ぼす影響を定量的に評価できるようにした点が、本研究の特徴であるといえる。

2. 車両容量と到着に関する路線相関を考慮した乗客配分モデル

本章では、車両容量と車両到着に関する相関を考慮した乗客配分モデルの概要とその解法アルゴリズムについて述べる。

(1) モデル化の前提条件

モデル化にあたり、以下の前提条件を設定する。

1. バスサービスは頻度ベースで提供されており、その運行間隔は路線間の相関を持った確率密度関数に従う
2. 乗客はランダムにバス停に到着し、経路集合に含まれる路線のうち最初に到着する路線を利用する
3. バス停間所要時間は道路混雑によらず一定とする

なお、道路混雑による遅れが所要時間信頼性に及ぼす影響も小さくないと考えられるが、本研究では公共交通に特有の現象である団子運転と乗客集中が及ぼす影響に

特に焦点をあてるために3番目の仮定を設定する。

(2) 経路選択確率の算出

ここでは、1-OD に対して n 本の路線が選択可能であり、乗客が停留所にランダムに到着し最初に到着した車両を利用すると仮定したとき、各路線の選択確率と目的地までの期待所要時間を求める。ただし、記号は以下のように定義する。

K : Attractive line の集合 ($K=\{1,2,\dots,n\}$)

t_k : 路線 k の待ち時間 ($\mathbf{t}=(t_1,t_2,\dots,t_n)^T$)

$\mathbf{g}(\mathbf{t})$: 待ち時間を表す多次元確率密度関数

まず、路線 $i \in K$ が選択されることは路線 i の待ち時間が最小となる確率と等価であるので、路線 i の選択確率 p_i および期待待ち時間 $WT(\mathbf{g}, \mathbf{t})$ は次のように表せる。

$$p_i = \Pr(t_i = w_i) \cdot \Pr(w_i < t_j (j \neq i) | w_i) \\ = \int_{t_i=0}^{\infty} \left\{ \int_{t_1=t_i}^{\infty} \dots \int_{t_{i-1}=t_i}^{\infty} \int_{t_{i+1}=t_i}^{\infty} \dots \int_{t_n=t_i}^{\infty} \mathbf{g}(\mathbf{t}) dt_1 \dots dt_{i-1} dt_{i+1} \dots dt_n \right\} dt_i \quad (1)$$

$$WT(\mathbf{g}, \mathbf{t}) = \sum_{i \in K} \int_{t_i=0}^{\infty} \left\{ \int_{t_1=t_i}^{\infty} \dots \int_{t_{i-1}=t_i}^{\infty} \int_{t_{i+1}=t_i}^{\infty} \dots \int_{t_n=t_i}^{\infty} \mathbf{g}(\mathbf{t}) dt_1 \dots dt_{i-1} dt_{i+1} \dots dt_n \right\} t_i dt_i \quad (2)$$

しかし、式(1), (2)は特殊な確率密度関数である場合を除いて解析的に解くことはもはや不可能である。そこで、本研究ではモンテカルロシミュレーションをベースとした、相関を持つ乱数を繰り返し発生させ、擬似的に路線間の相関を考慮した経路選択確率および期待待ち時間を式(3), (4)により計算する。

$$p_i \approx \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M N(i = \arg. \min_{j \in K} t_j^m) \quad (3)$$

$$WT \approx \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{i \in K} N(i = \arg. \min_{j \in K} t_j^m) \cdot t_i \quad (4)$$

ただし、 M は発生させる乱数の回数、 $\mathbf{x}^m$ は m 回目に発生させる待ち時間を表す乱数の組 (x_i^m はその要素であり、路線 i の待ち時間を表す) であり、 $N(\cdot)$ は $(\cdot)$ を満たす乱数の組数である。なお、各路線の待ち時間は、各路線の運行頻度を平均とする相関を持つ指数乱数の逆数として求めることができる。相関を持つ乱数の発生手順は次節で述べる。

(3) 相関を持つ乱数の発生

本節では相関のある n 組の乱数の発生手順について述べる。詳細は参考文献^{12), 15)}を参照されたい。まず、所与の相関係数行列 $[\rho_{ij}]$ ($i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,n$) の各要素に対して、乱数が従う分布により規定される値 (正規分布、指数分布に従う場合はそれぞれ 1, 1.107) を掛けた行列を作成し、それに対して Cholesky 分解により下三角形行

列 $[c_{ij}]$ ($i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,n$)を求める。次に、 n 個の独立な標準正規乱数 $\{r_1^*, r_2^*, \dots, r_n^*\}$ を発生させ、式(5)により互いに相関のある標準正規乱数 $\{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ を計算する。

$$r_i = \sum_{j=1}^n c_{ij} r_j^* \quad (5)$$

そして以下に示す変換式によりもとの分布に従う相関のある乱数 $\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ に変換する。

$$x_i = F_i^{-1}[\Phi(r_i)] \quad (6)$$

ただし、 F_i 、 Φ はそれぞれもとの分布、標準正規分布に従う累積分布関数である。なお、Cholesky分解が実行可能であるためには、相関係数行列 $[\rho_{ij}]$ が正定値行列である必要がある。

(4) 相関係数の内生化

前節で述べた方法で乱数を発生させるにあたり、相関係数が必要である。筆者らの先行研究¹²⁾では外生的に与えているが、本研究ではバス停において乗降客数が増加すれば乗降に時間がかかり、その結果定時性が低下すると考える。本モデルの枠組みでは、相関係数が大きくなるほど複数のバスがまとまって走行するようになり、結果として定時性の低下を表している¹²⁾ことを考慮して、バス停 k における路線 m と l の相関係数を乗降客数により式(7)のように規定する。(ただし、上段は $\delta_{ml}^k=1$ 、下段は $\delta_{ml}^k=0$ のときに該当する。)

$$\rho_{ml}^k = \begin{cases} 2 \cdot \frac{1}{1 + v_{ml}^k \exp\left\{-\kappa_{ml}^k (x_{al(l)}^k + x_{al(m)}^k + x_{b(m)}^k + x_{b(l)}^k)\right\}} - 1 \\ 0 \end{cases} \quad (7)$$

なお、式(7)の第1項はロジスティック曲線を2倍したものである。 δ_{ml}^k はバス停 k において路線 m と l が同一系統であれば1を、そうでなければ0をとる変数であり、後述するようにケーススタディで同一路線内のみの相関関係を考慮するために導入した。また $x_{al(l)}^k$ 、 $x_{al(m)}^k$ はそれぞれバス停 k 、路線 l における乗車、降車人数であり、 κ_{ml}^k 、 v_{ml}^k はそれぞれ乗車・降車人数に対するスケールパラメータと特定の道路区間への車両集中など乗車・降車人数以外の影響に対するスケールパラメータである。したがって式(7)において ρ_{ml}^k は-1から1の間の値をとるが、乗車人数・降車人数の合計大きいほど1に近づく、すなわち定時性が低下することになる。式(7)で定義した相関係数の式形が所要時間信頼性に影響を及ぼす影響が大きいと考えられ、実データ等を用いて精緻に推定する必要があるが、今後の課題としたい。

(5) 混雑効果の内包

本研究では、De Cea and Fernandez¹⁶⁾と同様の方法で混雑効果を表現する。すなわち、停留所ノード k から流出するリンク a 路線 $l(a)$ の待ち時間 $\omega_{l(a)}^k$ を乗客数に依存するBPR

型の関数として式(8)のように定式化し、その逆数 $f_{l(a)}^k$ を混雑により乗車できない可能性を加味した運行頻度である「有効頻度」とする。

$$\omega_{l(a)}^k = 1/f_{l(a)} + \gamma \left(\frac{v_{bl(a)}^k + v_{l(a)}^k}{f_{l(a)} \pi_{l(a)}} \right)^n, \quad a \in OUT(k) \quad (8)$$

$$f_{l(a)}^k = 1/\omega_{l(a)}^k, \quad a \in OUT(k) \quad (9)$$

ただし、 $f_{l(a)}^k$ は路線 l の実質的な頻度 (名目頻度)、 $\pi_{l(a)}^k$ は路線 $l(a)$ の車両容量、 $v_{bl(a)}^k$ 、 $v_{l(a)}^k$ はそれぞれ停留所ノード k から派生する乗車ノードにおける既乗車人数、乗車希望人数、 $OUT(k)$ はノード k から流出するリンク集合、 n と γ はパラメータである。式(8)において、乗車人数が0人の場合において第2項は0となるため、期待待ち時間は名目頻度の逆数となり、さらに式(9)から有効頻度と名目頻度は一致する。式(9)により規定される有効頻度を平均とする指数分布に従う乱数を発生させることにより、車両到着に関する相関と乗客集中による混雑効果を同時に考慮することが可能となる。なお、式(9)は車両到着が指数分布に従うことを暗に仮定しているが、本研究において車両到着に関する相関を考慮した結果、車両到着が指数分布に従わない可能性があることに注意が必要である。

(6) 一般ネットワークにおけるコスト関数

前節までは、1-ODペアにおける経路コストおよび経路選択確率の算出について述べてきたが、Kurauchi et al.³⁾と同様のネットワーク変換を行うことにより一般ネットワークに拡張することが可能である。このとき、一般ネットワークにおけるhyperpathコストは以下のように定義できる。

$$g_h = \sum_{a \in A_h} \alpha_{ah} c_a + \sum_{k \in S_h} \beta_{kh} WT_{kh} \quad (10)$$

ただし、 h は目的地ごとに定義される hyperpath、 c_a は Kurauchi et al.³⁾と同様の変換を行ったネットワークにおけるリンクコスト、 A_h 、 S_h はそれぞれ、変換を行ったネットワークにおける hyperpath h に含まれるリンク集合、hyperpath h に含まれる停留所ノードの集合である。(詳細な定義は Kurauchi et al.³⁾、嶋本ら¹⁷⁾を参照されたい。) さらに、 α_{ah} 、 β_{kh} は hyperpath h がそれぞれリンク a 、ノード k を通過する確率であり、各ノードにおける通過確率 p_{ah}^k から算出することが可能である。また、 WT_{kh} は停留所 k における hyperpath h の期待待ち時間であり、以下に示すように停留所ノード k から流出する hyperpath h に含まれるリンクの有効頻度の和の逆数として計算できる。

$$WT_{kh} = \frac{1}{\sum_{a \in OUT_h(k)} f_{l(a)}^k} \quad (11)$$

式(10)における第1項、第2項はそれぞれhyperpath h にお

ける期待乗車時間，期待待ち時間を表している．式(10)は線形分離可能であるため，最小コストhyperpath探索にあたりBellmanの最適性の原理の適用が可能となる．このとき，ノード*i*における目的地別に定義されるhyperpath *h*の期待待ち時間 WT_{ih} およびリンク*a*の通過確率 p_{ah}^i は以下のように定義できる．

$$WT_{ih} \approx \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{a \in OUT(i) \cap A_h} N(a = \arg \min_{a \in OUT(i) \cap A_h} t_a^m) \cdot t_a^m, \forall i \in S_h \quad (12)$$

$$p_{ah}^i \approx \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M N(a = \arg \min_{a \in OUT(i) \cap A_h} t_a^m), \forall i \in S_h \quad (13)$$

ただし，*M*は発生させる乱数の回数，*OUT*(*i*)はノード *i* から流出するリンク集合である．

(7) 均衡問題としての定式化と解法

式(13)において目的地別経路選択確率 $\mathbf{p} \in R^{|I|} \times R^{|D|}$ は各路線の待ち時間を表す確率密度関数 $\mathbf{g}(\mathbf{t}) \in R^{|S|}$ の関数である．(|*I*|, |*D*|, |*S*|はそれぞれ変換後のネットワークにおけるリンク数，目的地数，停留所ノード数である．) また式(10)に示す $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ における路線間の相関係数 ρ_{ml} はバス停における乗車・降車人数の関数として定義しているが，バス停における乗車・降車人数は経路選択確率の関数である．さらに，旅客需要と目的地別経路選択確率が与えられれば，マルコフ配分³⁾によりリンク交通量 $\mathbf{x}$ を一意的に求めることが可能である．以上を踏まえて，本研究で構築する乗客配分モデルは以下の不動点問題として定式化できる．

$$\mathbf{x} = f(\rho(\mathbf{x}), \mathbf{p}(\mathbf{x}), \mathbf{f}(\mathbf{x})) \quad \forall \mathbf{x} \in \Omega \quad (14)$$

ただし， $f(\rho(\mathbf{x}), \mathbf{p}(\mathbf{x}), \mathbf{f}(\mathbf{x}))$ は相関係数 ρ ，経路選択確率 $\mathbf{p}$ ，有効頻度 $\mathbf{f}$ の $\mathbf{x}$ に関する合成関数である．ただし式(7)が乗客フロー $\mathbf{x}$ に関して連続ではなくブラウワーの不動点定理¹⁾が成り立たないため，理論的に均衡解の存在を示すことはできないが，1-OD の仮想ネットワークでは均衡解は唯一であることが確認されている^{13), 14)}．

本研究では構築した乗客配分問題を，以下に示すような逐次平均法により解く．

(Step0) $n=0$, $\mathbf{x}^{(0)}=\mathbf{0}$ とする

(Step 1) 式(8), (9)から有効頻度 $\mathbf{f}$ を算出する．

(Step 2) 式(7), (3)から経路選択確率 $\mathbf{p}$ を計算する

(Step 3) 経路選択確率 $\mathbf{p}$ にしたがって，マルコフ連鎖により乗客をネットワークに配分し³⁾， $\mathbf{x}^{kmp}$ を算出する

(Step 4) $\mathbf{x}^{(n+1)}=(1-1/n)*\mathbf{x}^{(n)}+1/n*\mathbf{x}^{kmp}$ により $\mathbf{x}$ を更新する

(Step 5) $\mathbf{x}^{(n+1)}$ が $\mathbf{x}^{(n)}$ に十分近ければ計算終了，そうでなければ $n=n+1$ として(Step1)に戻る

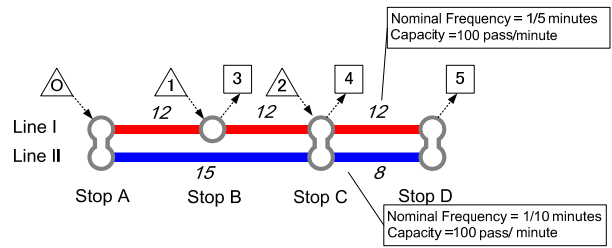


図-1 計算対象ネットワーク

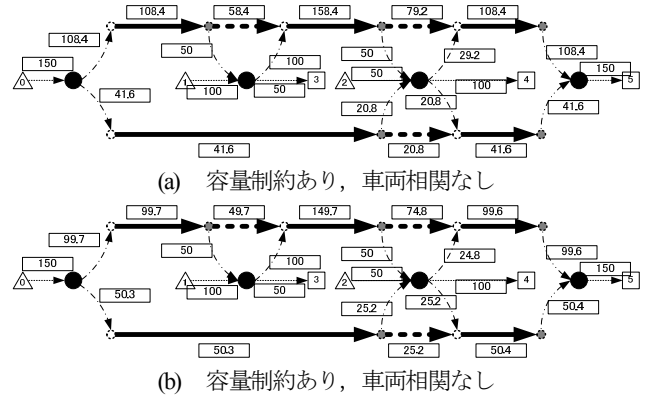


図-1 リンク旅客数の比較

表-1 各停留所における期待待ち時間と相関係数

Line	Stop	容量制約なし 車両相関なし 期待待ち時間	容量制約あり 車両相関なし 期待待ち時間	容量制約あり 車両相関あり	
				期待待ち時間	相関係数
I	A	5.00	7.71	14.98 14.99	0.4902
	B	5.00	8.96	17.49 17.48	
	C	5.00	7.71	14.98 14.98	0.4889
II	A	10.00	11.04	22.52 22.51	-0.6033
	C	10.00	11.04	22.52 22.52	-0.6022

3. 数値計算例

(1) ケース設定

提案した乗客配分モデルを，図-1 に示す仮想ネットワークに適用する．それぞれの路線の運行頻度は図中に示す平均をもつ指数分布に従うと仮定し，また停留所間の所要時間および車両容量は図中に示す通りである．旅客需要は各 OD ペアについて 50（人/分）とし，式(7)および式(8)におけるパラメータを $\nu=50$ ， $\kappa=0.05$ ， $\gamma=10$ ， $n=1$ とする．なお，ここで仮定したパラメータでは，式(7)で規定した相関係数において乗降客数が0のときは ρ は-0.96をとる，すなわち定時性は非常に高くなり，乗降客数が増加するに従って ρ が大きくなる，すなわち定時性が定時性が低下していく状況を表している．また，Line I と Line II 間では別の道路上を走行しているなどの

ために相関が生じず、車両到着に関する相関は Line I 同士および Line II 同士で生じるとする。

以上の条件のもと、車両混雑と団子運転それぞれが所要時間信頼性に及ぼす影響を評価するために以下に示す3種類のモデルの比較を行う。

- i) 容量制約なし，車両相関なし
- ii) 容量制約あり，車両相関なし
- iii) 容量制約あり，車両相関あり

(2) 配分結果

図-2に容量制約あり，車両相関なしのモデルと容量制約あり，車両相関ありのモデルにおけるリンク旅客数を，表-1にそれぞれのモデルにおける各停留所の期待待ち時間と相関係数（車両相関を考慮するモデルのみ）を示す。なお車両相関を考慮するモデルにおいて，先行研究と同様に各路線を仮想的に2本の路線として計算した。したがって，例えばLine Iの停留所Aにおける期待待ち時間は $1/(1/14.98+1/14.99) = 7.49$ として計算可能である。図-2を見ると，両モデルともLine IIにおいて容量超過が生じているものの，Line IIにおいては容量超過が生じていないことがわかる。したがって，表-1を見るとLine Iの有効頻度（期待待ち時間の逆数）は名目頻度と比べると大きな値をとっている。また，車両相関を考慮したモデルにおいて，Line Iの乗降客数が多いためLine Iの相関係数はプラ

スの値であるが，Line IIの相関係数はマイナスの値をとっている。特に，Line Iの停留所Bにおいて相関係数は最大値0.94をとっており，この停留所において団子運転の影響が大きいといえる。

(3) 配分結果を用いた所要時間信頼性評価

次に，各停留所における待ち時間の分布を作成するために，配分結果から得られた有効頻度および相関係数を用いて，10,000 セットの乱数を発生させる。車両相関を考慮しない場合は，停留所における待ち時間は有効頻度を平均とする指数分布に従う乱数を発生させればよい。また車両相関を考慮する場合は，各路線を仮想的に2本の路線として配分を行っているため，待ち時間の分布は前章で示した手順で相関をもつ乱数を発生させ，各乱数セットに対して式(12)にしたがって計算すればよい。

図-3 に各停留所の待ち時間の累積分布を示す。Line I においては，容量制約，車両相関なしのモデルと比べて容量制約を考慮することによりグラフの傾きが緩やかになり，車両相関を考慮することによりグラフがさらに緩やかになっている。特に，停留所 B における前述したように相関係数が 0.94 と大きいため，停留所 B では車両相関を考慮することによりグラフの傾きが大きく緩やかになっている。したがって，Line I では混雑効果により所要時間信頼性が低下し，特に停留所 B では団子運

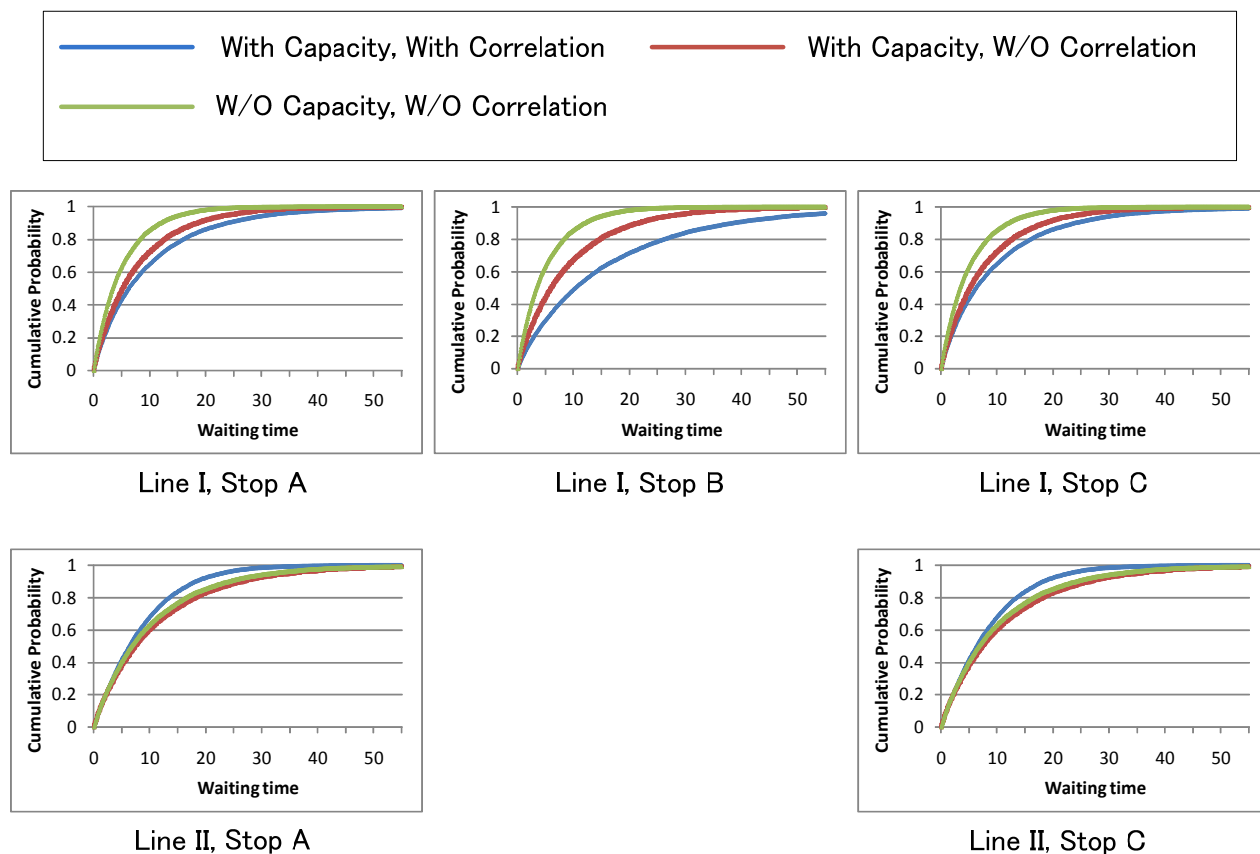


図-3 各停留所における累積待ち時間分布

表2 各停留所における待ち時間の50, 95パーセンタイル値と信頼性指標

Line	Stop	容量制約なし 車両相関なし			容量制約あり 車両相関なし			容量制約あり 車両相関あり		
		t ₅₀	t ₉₅	t ₉₅ /t ₅₀	t ₅₀	t ₉₅	t ₉₅ /t ₅₀	t ₅₀	t ₉₅	t ₉₅ /t ₅₀
I	A	3.4	15.6	4.59	5.2	24.1	4.63	6.3	31.1	4.94
	B	3.4	15.6	4.59	6.0	28.0	4.67	10.4	49.9	4.80
	C	3.4	15.6	4.59	5.2	24.1	4.63	6.3	31.1	4.94
II	A	6.7	31.2	4.66	7.4	34.5	4.66	6.3	23.0	3.65
	C	6.7	31.2	4.66	7.4	34.5	4.66	6.3	23.0	3.65

転によりさらに所要時間信頼性が低下しているといえる。一方で、Line II においては容量制約を考慮してもグラフの傾きは大きく変わらず、混雑効果による所要時間信頼性の低下は小さいといえる。さらに、容量制約と車両相関を考慮した場合の所要時間信頼性が最も高くなっているが、これは前述したように Line II における相関係数はマイナスの値をとっているため、車両相関を考慮する場合のほうがしない場合より定時性が向上するためである。

最後に、表-2に各停留所における待ち時間の50パーセンタイル値および95パーセンタイル値を示す。本研究において、乗客は平均所要時間をもとに利用するhyperpathを決定すると仮定しているため、待ち時間の50パーセンタイル値は乗客がhyperpathを決定するときに参照した値の近似値と見なすことができ、また95パーセンタイル値は最悪の場合の待ち時間と見なすことができる。したがって、以下では待ち時間の95パーセンタイル値と50パーセンタイル値の比である t_{95}/t_{50} を所要時間信頼性指標とする。Line Iにおいて、容量制約および車両相関を考慮しない場合と比べて、容量制約を考慮した場合は所要時間信頼性指標が大きくなり、車両相関を考慮した場合はさらに信頼性指標が大きくなるのがわかる。したがって、Line Iにおいて混雑効果および団子運転により、乗客は想定している待ち時間と比べてさらに大きな待ち時間を経験する可能性があるといえる。一方、Line IIにおいては、容量制約を考慮しても信頼性指標は変わらず、また車両相関を考慮することにより信頼性指標は小さくなっている。したがって、Line IIにおいては混雑効果が生じても乗客が最悪の場合経験する待ち時間は想定している待ち時間と比べて同程度であり、また車両相関を考慮する場合は定時性が向上するために、最悪の場合経験する待ち時間は想定している待ち時間と比べると小さくなるといえる。

4. おわりに

本研究では、まず先行研究で構築した車両到着に関する相関を考慮した乗客配分モデルを、容量制約条件を考慮できるよう拡張した。その上で、拡張したモデルを用いて、乗客集中に起因する混雑と車両到着の相関に起因

する団子運転が所要時間信頼性に及ぼす影響を定量的に評価する手法を提案した。最後に、提案した手法を仮想ネットワークに適用した。

今後の課題として、より大規模なネットワークに適用するための計算アルゴリズムの効率化が挙げられる。また、近年はスマートカードによる料金収受が一般的に行われており、このログデータを解析することによりバスの運行軌跡を類推することができると考えられる。このような実データを用いて運行状況を解析し、式(7)で仮定した相関関係をはじめとした本研究で想定した仮定が妥当であるか検証する余地があるといえる。

参考文献

- 1) Chriqui, C. and Robillard, P.: Common Bus Lines, *Transportation Science*, Vol. 9, pp. 115-121, 1975.
- 2) Spiess, H. and Florian, M.: Optimal Strategies: A New Assignment Model for Transit Networks, *Transportation Research*, Vol. 23B, pp. 83-102, 1989.
- 3) Kurauchi, F., Bell, M. G. H. and Schmöcker, J.-D.: Capacity Constrained Transit Assignment with Common Lines, *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, Vol. 2, No. 4, pp. 309-327, 2003.
- 4) Cepeda, M., Cominetti, R. and Florian, M.: A Frequency-based Assignment Model for Congested Transit Networks with Strict Capacity Constraints: Characterization and Computation of Equilibria, *Transportation Research*, Vol. 42B, pp. 437-459, 2006.
- 5) Schmöcker, J.-D., Bell, M. G. H. and Kurauchi, F.: A Quasi-dynamic Capacity Constrained Frequency-based Transit Assignment Model, *Transportation Research*, Vol. 42B, pp. 925-945, 2008.
- 6) Shimamoto, H., Kurauchi, F. and Iida, Y.: Evaluation on Effect of Arrival Time Information Provision Using Transit Assignment Model, *International Journal of ITS Research*, Vol. 3, pp. 11-18, 2005.
- 7) Billi, C., Gentile, G., Nguyen, S. and Pallottino, S.: Rethinking the wait model at transit stops, *Proceedings of TRISTAN-Workshop*, Guadelupe, 2004.
- 8) Gentile, G., Nguyen, S. and Pallottino, S.: Route Choice on Transit Networks with Online Information at Stops, *Transportation Science*, Vol. 39, No. 3, pp. 289-297, 2005.
- 9) Lam, W. H. K., Zhou, J. and Sheng, Z.-h.: A Capacity Restraint Transit Assignment with Elastic Line Frequency, *Transportation Research*, Vol. 36B, pp. 919-938, 2002.
- 10) Taklu, F., Watling, D. and Connors, R.: A Markov Process

- Model for Capacity Constrained Transit Assignment, In *Transportation and Traffic Theory 17*, edited by R. E. Allsop, M. G. H. Bell and B. G. Heydecker, pp. 483-505, Elsevier, 2007.
- 11) Newell, G. F. and Potts, R. B.: Maintaining a Bus Schedule, *Proceedings of the 2nd ARRB Conference*, Vol. 1, pp. 388-393, 1964.
 - 12) Shimamoto, H., Kurauchi, F., Schmöcker, J.-D. and Bell, M. G. H.: Transit Assignment Model Considering the Inter-dependent of Each Line's Arrival, *Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Systems for Public Transportation*, CD-ROM, 2009.
 - 13) Shimamoto, H., Kurauchi, F., Schmöcker, J.-D. and Bell, M. G. H.: Transit Assignment Model Considering the Correlation of Vehicles' Arrival, *Proceedings of the 89th Annual Meeting of TRB*, Washington, D.C., DVD, 2010.
 - 14) 嶋本寛, 倉内文孝, Schmöcker, J.-D.: 車両到着に関する相関を考慮した乗客配分モデルの開発, 土木計画学研究・講演集, Vol. 39, CD-ROM, 2009.
 - 15) Chang, C.-H., Tung, Y.-K. and Yang, J.-C.: Monte Carlo Simulation for Correlated Variables with Marginal Distribution, *Journal of Hydraul.*, ASCE, Vol. 120, No. 3, pp. 313-331, 1994.
 - 16) De Cea, D. and Fernandez, E.: Transit Assignment for Congested Public Transport Systems, *Transportation Science*, Vol. 9, pp. 115-121, 1993.
 - 17) 嶋本寛, 倉内文孝, 飯田恭敬: 乗客配分モデルを用いた公共交通の混雑緩和施策評価, 土木計画学研究・論文集, Vol. 22, pp. 239-246, 2005.
 - 18) 福島雅夫: 非線形最適化の基礎, 朝倉書店, 2001.

(2012. 2. 25 受付)

EVALUATION OF THE TRAVEL TIME RELIABILITY OF PUBLIC TRANSPORTATION USING A TRANSIT ASSIGNMENT MODEL CONSIDERING THE VEHICLE CAPACITY AND THE CORRELATION OF VEHICLES' ARRIVAL

Hiroshi SHIMAMOTO, Fumitaka KURAUCHI and Jan-Dirk SCHMÖCKER

This paper proposes an evaluation method of the travel time reliability of public transportation network. The method uses a transit assignment model incorporating the capacity constraints and the correlation of the vehicles, where passengers are firstly assigned to a network with the norm of expected waiting time and then travel time reliability is evaluated using the expected waiting time from the output of the model. Since the travel times between stops are assumed to be constant, the sources of fluctuations of the travel time in this study are the waiting times at the stop which depend on the congestion and the correlation among vehicles. Finally, the proposed method is applied to a toy network to demonstrate how the overcapacity and the correlation of vehicles affect travel time reliability.