所要時間信頼性に着目した公共交通ネットワークのサービス評価に関する研究*

Evaluation of Public Transport Services by Travel Time Reliability *

倉内文孝†・杉本一走‡・嶋本寛§・飯田恭敬**

By Fumitaka KURAUCHI† • Isso SUGIMOTO‡ • Hiroshi SHIMAMOTO§ • Yasunori IIDA**

1. はじめに

環境問題や資源エネルギー問題への関心の高まりより，自動車交通を抑制する施策が注目されている．しかしながら，その受け皿となるべき公共交通機関も十分整備されているとはいえず，自動車交通から公共交通への転換を妨げているといえる．公共交通の利用促進のためには公共交通システムのサービス改善が必要不可欠であり，その際には様々な視点・観点から公共交通サービスの評価基準を設定する必要がある．本研究では所要時間信頼性の概念を用いて公共交通サービスの評価をめざす．ここでは公共交通の混雑効果を表現可能な乗客流配分モデルを活用し，所要時間信頼性を評価するための枠組みを示すとともに，簡単な計算例を示す．

2. 公共交通における所要時間信頼性評価

(1) 交通信頼性評価の必要性

高度に成熟した社会においては，予期せぬ遅れが重大な損失を招く危険性がある．社会の循環機能を担う交通に対しても，従来の平均値での評価のみならず，その変動も評価すべきといえる．そのひとつの方法が交通信頼性評価である．これは，交通サービスの信頼性を遅れなく目的地まで到着できる確率といった指標で評価するものである．従来道路交通サービスの評価方法として，様々な評価指標，評価方法が提案されているが，本研究では所要時間信頼性に着目することとした．所要時間信頼性は，所要時間が xx 分である確率，あるいは *y*%で到着することが可能な所要時間，といったもので評価され，評価値計算においては所要時間の平均値だけでなくその分布を同定する必要がある．

(2) 公共交通における所要時間変動要因

道路交通における所要時間の変動の主たる要因は交通需要の超過による混雑であり，所要時間信頼性は，ネットワーク上のリンクの所要時間分布を求め，その分布のたしあわせによって表現される．一方，軌道系公共交通機関について考える場合には，乗客需要の大小にかかわらず駅間の所要時間は一定と仮定できる．道路上の公共交通機関であるバスは，ラッシュ時には遅れが生じるが，遅れは乗客需要に依存しているわけではなく，道路上を走る他車両に依存している．すなわち，乗客需要によって停留所間の所要時間が大きく変動するものではなく，道路交通とは異なった考え方を適用する必要がある．

公共交通において生じる所要時間の変動要因は 2 つ考えられる．第 1 点目は，運行がある頻度を持ったサービスであることにより生じる列車到着までの待ち時間である．都市間鉄道などにおいては時刻表が決められており，特に我が国では定時性も高いため時刻表にあわせて駅へ向かえば良い．しかしながら，バス交通や複数の交通機関を乗り継ぐ際には，運行頻度に起因する待ち時間が大きくなってしまうことも多く，予期せぬ所要時間増加が生じることもある．第 2 点目は，列車が混雑していることによって乗車できず，次の列車に乗らざるを得なくなるといった混雑による影響である．これら 2 つの現象をどのように評価していくかが重要になる．

3. 乗客配分モデル

(1) 乗客配分モデルの概要

道路交通において配分理論が多数提案されているように，公共交通においても乗客流を配分するモデルが多く提案されている [1),2),3)]．これらはある一定の頻度で公共交通が運行されていることを仮定し，

* Keywords: 所要時間信頼性，乗客流配分，公共交通運用，サービス評価

† 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）

‡ 正員，修（工），（株）日本航空（〒140-8637 東京都品川区東品川 2-4-11 JAL ビルディング，TEL 03-5769-6474）

§ 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

**フェロー会員，工博，京都大学名誉教授

道路交通における利用者均衡配分に準ずる乗客流を求めることに主眼がおかれている．その際に，頻度ベースのサービスにおいては，所要時間が最短の路線を選択することが必ずしも期待所要時間を最小にするわけではなく，複数の路線群のうちどれを選択するかを決定する問題（common lines problem）を考慮する必要がある．また，乗客需要の増加による混雑効果についてどのように考慮するかについてもいくつかの方法が提案されている．

a) Common Lines Problem

公共交通において，利用者は目的地まで直行で行くのか，それとも途中で乗り換えを有する路線を使うのか，といった選択を迫られることになる．その際，先に来た列車やバスに乗車するという乗り方が期待所要時間を最短にすることがある．つまり，「目的地までたどり着くことができる路線群のうちどの路線集合を選択するか」，ということを乗客は決定する必要があり，この問題が common lines problem と定義されている．Chriqui and Robillard[4)]は，common lines problem の解法を示した．n 本のバス路線があったとする．それぞれの Line の乗車時間は t_i，運行頻度は f_i とする．列車の到着はランダム到着であり，到着時間分布は指数分布に従うと仮定し，乗客は路線集合 A に含まれるサブ経路集合 S を選択し，その経路集合のうち最初に出発地に到着するバスを利用すると仮定する．その結果，サブ経路集合 S を選択する場合の目的地までの期待所要時間 T_S は以下で与えられる．

$$T_s = \sum_{i \in s} t_i f_i \Big/ \sum_{i \in s} f_i + 1 \Big/ \sum_{i \in s} f_i \tag{1}$$

第 1 項が期待所要時間を，第 2 項が期待待ち時間を表す．また経路集合内での経路分岐率 q_i は以下のように路線のサービス頻度に依存して配分される．

$$q_i = f_i \Big/ \sum_{k \in s} f_k \tag{2}$$

(1)式で示された期待所要時間最小化問題として common lines problem を解くことが可能である．

b)　混雑効果の表現方法

乗客の集中による混雑効果を表現する方法としては，有効頻度を用いるアプローチと容量制約によるアプローチが提案されている．有効頻度を用いるアプローチとは，乗客需要の増加による混雑によって乗り損ねが生じれは，結果的に実質的な運行頻度が低下すると考え，実際の列車の運行頻度に対して混雑により運行頻度を減少させる方法である．De Cea and Fernandez[2)]は，混雑により生じる待ち時間を BPR 型の関数として定義し，その逆数を有効頻度として活用する方法を提案している．一方，容量制約によるアプローチ[3)]とは，列車容量を明示的に制約条件としてモデルに取り込み，容量を超える需要については乗車できなくするものである．乗り損ねた需要は次の時間間隔へ持ち越されることで遅れを表現するとともに，乗り損ねることによって生じる予想外の遅れに対するリスクをコストとして計上することで混雑効果を表現している．本研究では，混雑による所要時間の増加を所要時間分布として表現可能であるため，有効頻度の概念を用いたモデルを用いることにする．

(2)　定式化

式(1)の第 2 項が期待待ち時間と表現されるが，De Cea and Fernandez のモデルでは，これに加えて混雑に起因する待ち時間を加味する．すなわち，ノード i における路線 l に関する待ち時間 w_{il} は，

$$w_{il} = 1/f_l + \alpha_l \left(\frac{v_{il}}{f_l \kappa_l} \right)^n \tag{3}$$

と定義される．ここで，

α_l, n：パラメータ

v_{il}　：ノード i において路線 l に既乗車の乗客数

κ_l　：路線 l の車両容量

である．さらに，この待ち時間を用いて，有効頻度 f'_l を次のように定義する．

$$f'_{il} = 1/w_{il} \tag{4}$$

式(1)および(2)の f の代わりに f'を用いることで，混雑を考慮した期待所要時間を求めることができる．なお，式(3)で定義される待ち時間増加により，(1)で示される所要時間関数は単調増加関数となる．乗客需要が増加することによって最短期待所要時間経路の所要時間が増加し，他の利用されていない経路と等しくなるまで増加するとその経路も利用される．最終的に，利用されている経路の所要時間は等しく，

利用されていない経路はそれ以上である利用者均衡状態が達成される．詳細は省略するが，この均衡状態は変分不等式問題として定式化されている．

4. 所要時間分布の算定方法

本研究で用いるモデルは混雑効果を有効頻度の減少で表現している．また，式(2)を用いて経路集合内の経路への分岐確率を求めていることより，この手法は暗に列車の到着分布を有効頻度で規定される平均待ち時間を有する指数分布と仮定していることになる．すなわち，所要時間 t_l，有効頻度 f'_l の路線 l を用いる場合，目的地までの所要時間が t 以下である累積分布関数 $P_l(t)$は次のように計算できる．

$$P_l(t) = \begin{cases} 0 & t < t_l \\ 1 - e^{-f'_l(t - t_l)} & t \geq t_l \end{cases} \quad (5)$$

さて，前述のように乗客は common lines の考え方により複数の路線から先に到着した列車に乗車する．そのため，(5)で示されるような分布をもって到着する複数の列車を用いる場合の所要時間分布を算定する必要がある．そのために，各列車の到着時間分布は互いに独立であると仮定する．

(1) 並列システムにおける計算方法

駅間に複数の路線が運行しており，それらにより common lines が形成されているとしよう．このときの所要時間分布の累積分布は，路線集合に含まれる車両のうち少なくともひとつが所要時間 t 以下で到着する確率と表現できる．

$$1 - \prod_{l \in S} P_l(t) = 1 - \prod_{l \in S} \left(1 - e^{-f'_l(t - t_l)}\right) \quad (6)$$

(2) 直列システムにおける計算方法

次に，目的地まで到着するのに L 個の複数路線を乗り継ぐものとしよう．このとき，目的地に t 以下で到着する確率は，各路線の確率密度関数 $p_l(t)$を用いることにより次のように表現できる．

$$\int_0^t p_1(x_1) \cdot \int_0^{t-t_1} p_2(x_2) \cdots \int_0^{t-(t_1+t_2+\cdots+t_{l-1})} p_L(x_L) dx_L \cdots dx_2 dx_1 \quad (7)$$

上式からも明らかなように，この確率を計算するためには，L 個の多重積分が必要となり，数理的に解を求めることは容易ではない．しかしながら，各列車の到着分布について独立性を仮定していることより，動的計画法の概念により積分を簡略化可能である．今，k 個の路線（l=1,...,k）を考え，所要時間が c_k 以下となる確率 $J_k(c_k)$を考えよう．このとき，$J_k(c_k)$は次の再帰方程式で表現できる．

$$J_k(c_k) = \int_0^{c_k} p_k(x_k) \cdot J_{k-1}(c_k - x_k) dx_k \ . \quad (8)$$

よって，L 個の多重積分は，L 回の積分を繰り返すことで対応可能である．

(3) 複合的なシステムにおける計算方法

並列システム及び直接システムが混在する複合的なシステムの場合，直列システムが積分を要することもあり，解析的に解くことはもはや不可能である．しかしながら，再帰方程式の関係によって，目的地ごとに到着時間分布を作成していくことで数値積分の考え方を用いて計算可能である．

5. ケーススタディ

(1) 設定条件

提案した手法の有効性を確認するために，簡単なネットワーク（図-1 参照）において適用計算を試みた．このネットワークにおいては図-2 に示すような 13 の乗車方法が存在する．この図において，例えば R0 は Line I のみを利用する方法であり，R12 は，まず駅 A で Line I および Line II のどちらか先にきた列車に乗車し，Line I に乗車したのであればそのまま目的地へ，Line II に乗車したのであれば，駅 B で下車し，Line I か Line III の先に到着した列車に乗車することを示す．乗客配分をゼロフロー時，需要 100（人／分），ほぼ全ての容量を使い切る 200（人／分）の 3 ケースについて計算してみた．なお，パラメータα_l，n はそれぞれ 10，1 として計算している．その中から信頼性の観点から最適になる乗車方法の特徴について考察したい．

(2) 計算結果の考察

3 つの需要ケースについて乗客配分を行い，その結果からえられた全ての乗車方法の期待所要時間を図-3 に示す．このネットワークにおいては，OD 需要の大小に関わらず，R12 が最短所要時間となっている．次に，OD=0，200 のケースについて全ての乗車方法の所要時間分布関数を示したのが図-4(a), (b)である．この結果より，所要時間の信頼性の観点から見ると R12 の乗車方法が有利であるとはいえない．例として，90%の確率で実現可能な所要時

間の大小によって経路を評価するとすれば R0 が最適という結果となる．すなわち出発地から目的地までの直行便でかつ多頻度であるという点が有利に働いている．現実的にも利用者は所要時間の不確実性を避け，目的地へ乗り換えなしで移動可能な路線を好む傾向があると考えられ，所要時間の平均値のみの比較だけではなく，本研究で提案するような信頼性の概念を導入することが重要であることをこの結果は示唆しているといえる．また，需要が増加して行くにつれて混雑が生じ，所要時間信頼性が減少していく様子が確認できる．

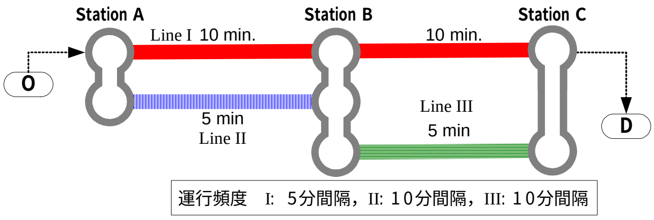


図-1　計算ネットワーク

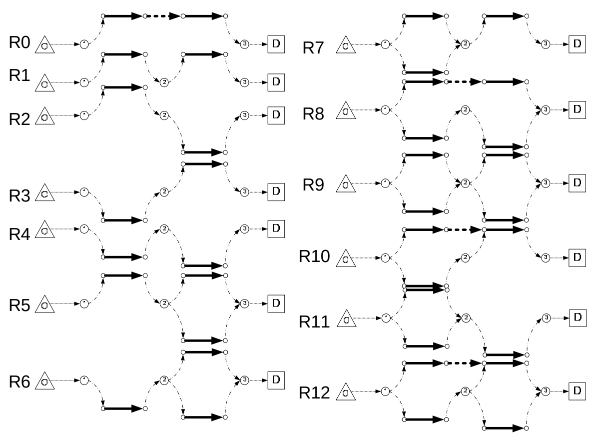


図-2　全ての乗車方法

6.　おわりに

以上本研究では，乗客配分モデルを用いて公共交通サービスの所要時間信頼性の評価方法について説明を加えた．簡単なネットワークにおける適用計算の結果，平均所要時間では最短な経路でも所要時間信頼性の観点からは必ずしも有利ではないことが確認された．公共交通のサービスレベルを評価するにあたっては平均値の概念だけでなく，所要時間分布から算出される信頼性の概念も考慮に入れることの重要性が示唆された．なお，今回の定式化においては，あくまで利用者は期待所要時間を最小化する仮定の下での行動結果から分析を加えているが，今後所要時間を信頼性指標として行動規範に反映したモデル化を行っていきたい．

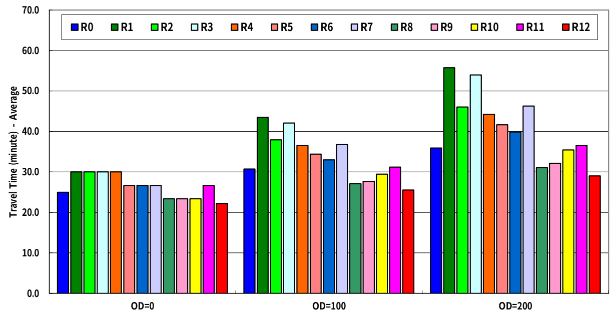
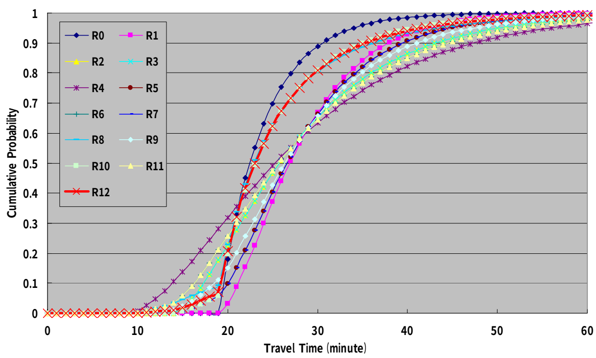
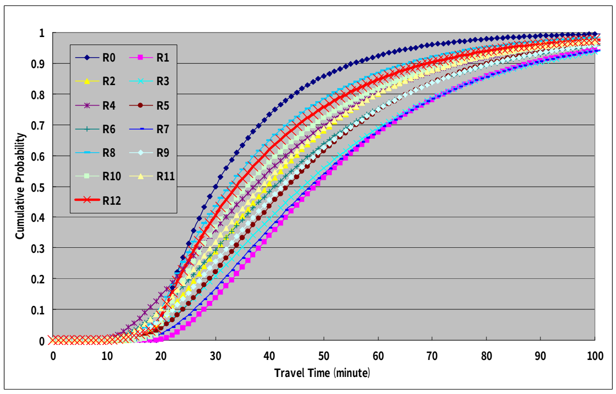


図-3　乗車方法ごとの平均期待所要時間



(a)　OD=0（passengers/minute）



(b)　OD=200（passengers/minute）

図-5　所要時間分布関数

【参考文献】

1) Spiess, H. and Florian, M. “Optimal Strategies: A New Assignment Model for Transit Networks”, *Transportation Research*, **23B**, 83-102, 1989
2) De Cea, J. and Fernandez, E.: “Transit assignment for congested public transport systems: An equilibrium model”, Trans. Sci. 27,133–147, 1993.
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) Chiriqui, C. and Robilland, P. “Common Bus Lines”, Transportation Science, 9, 115-121, 1975.