

頻度ベース公共交通配分手法の首都圏鉄道ネットワークへの適用*

Application of Frequency base transit assignment model to analyzing railway passenger demand in Tokyo metropolitan area*

柳沼 秀樹**・島野 和樹***・福田 大輔****・シューマッカー ヤンディヤーク†

by Hideki YAGINUMA**・Kazuki SHIMANO***・Daisuke FUKUDA****・Jan-Dirk Schmöcker†

1. 研究の背景と目的

東京都市圏における鉄道需要予測の実務では、非集計行動モデルや確定的・確率的利用者均衡配分等の手法が適用されてきた¹⁾。また既往の学術研究^{2),3),4)}においても、これらの手法に基づき経路重複等の首都圏特有の問題に対応した様々な改良が試みられてきた。

ところで、上記の手法の多くは道路ネットワークを想定した既存の手法から発展してきたものであり、乗車時間の差異や車内混雑に基づいて鉄道利用者の行動を規定している。現実の鉄道ネットワークにおいては、それらの要因に加え、プラットフォームにおける乗車待ち時間、列車容量の制約、ホーム内の混雑、遅延による乗車時間や停車時間の変動等、公共交通機関に特有の要因も存在する。より忠実な現象の記述や予測を行うためにも、これらを明示的・包括的に考慮可能な手法の検討が必要と思われる。

本研究では、Spiess and Florian⁵⁾及び Nguyen and Pallottino⁶⁾により提案された公共交通機関を前提とした経路配分モデルを導入し、首都圏鉄道ネットワークへの適用可能性について検討を行う。具体的には、後述する Common lines problem⁷⁾を前提に、プラットフォームでの待ち時間を明示的に考慮した Hyperpath 概念に基づく経路配分モデルの適用を試みる。本研究によるアプローチの将来的な目標としては、新規路線や短絡線整備によるネットワークの変化の影響や、直通・相互直通による発着駅や頻度の変化の影響を、より厳密に捉えることにある。

2. Hyperpath を用いた経路配分モデル

Hyperpath に基づくモデルは Spiess and Florian, Nguyen and Pallottino により、基本的な定式化と求解法が提案された。その後、容量制約による旅客の積み

残しの考慮や、混雑効果の導入といった改良が進められてきた。また近年、ごく数例ではあるが、実ネットワークへの適用実績も見られる(嶋本ら⁸⁾による京都のバスネットワークへの適用, Schmöcker *et al*⁹⁾によるロンドン地下鉄への適用, Cepeda *et al*¹⁰⁾によるストックホルム(スウェーデン), ウィニペグ(カナダ), サンティアゴ(チリ)の各都市圏鉄道ネットワークへの適用など)。本研究では、より高密度かつ高頻度な我が国の首都圏鉄道ネットワークにおける本手法の適用可能性並びに有用性を検討する。

(1) モデルの前提条件

本研究で用いる鉄道経路配分モデルは、a) 頻度ベースでの公共交通サービス運行, b) 旅行者の En-route chice behaviour (各交通結節点における状況依存的な経路選択)の2つを前提としている。以下にその概要を示す。

a) 公共交通機関の運行方式として頻度ベース運行(時刻表が存在しない一定間隔での運行)を前提としている。これは、欧州の鉄道やバスなど、時刻表が明示的に定められず、「分毎」と言った形でサービスが提供されている状況を直接的に表現したものである。ところで我が国の鉄道では、一般的に時刻表に基づくスケジュールベースで運行されている。しかしながら、首都圏を始めとする大都市では、ピーク時間帯等においても、高頻度かつ一定間隔で鉄道サービスが提供されている。そのため、利用者は時刻表を必ずしも意識せずに行動していると考えられる。非現実的すぎる仮定ではないと考えられる。以上に基づき、本研究では、近似的に頻度ベースでの運行を仮定する。これにより、時間軸を考慮しない静的枠組みでの分析が可能となり、計算負荷やデータ面のコストを下げることができる。

b) En-route chice behaviour とは、トリップ中における利用者の逐次的な経路選択を意味する。未知の予測不可能な出来事に対して利用者がどのように反応するかを記述したものである。より具体的には、乗り換え駅などの交通結節点において、「経路集合に含まれる路線のうち最初に到着した列車を選択する」という利用者の経路選択意思決定を仮定する。すなわち、利用者は各プラットフォーム上などにおいて、逐次的に次に乗車する列車の選択を行うことを意味する。一方、これに対して、非集計モデルや利用者均衡配分における経路選択原理は、Pre-trip choice behaviour となってい

* キーワーズ：鉄道需要予測，経路配分モデル，Hyperpath

** 学生会員 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-M1-11

TEL 03-5734-2577, FAX 03-5734-3578

E-Mail yaginuma@plan.cv.titech.ac.jp)

*** 非会員 元東京工業大学学生

**** 正会員 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻

† 正会員 京都大学大学院 都市社会学専攻

る。これは、出発前の経路選択行動を意味し、実行可能な経路集合の比較を行い、それぞれの平均的特徴や特性に基づいて、唯一の経路をトリップの事前に1つ選択するものである。複数の路線が利用可能な都市圏では、En-route chice behaviour が利用者の行動として適しているという指摘もあることから¹¹⁾、本研究でもこの利用者行動原理を仮定する。

(2) Hyperpath

Hyperpath とは、Common line problem により定義される経路集合である。ここで Common line problem とは、「目的地に乗り場を共有している複数の路線を用いて到達することが可能な場合、それらの経路から魅力的な経路集合 (attractive set) を選択する問題」と定義される⁷⁾。Attractive set に含ませる経路集合を、Spiess and Florian は「Strategy」、Nguyen and Pallottino は「Hyperpath」とそれぞれ命名した。本研究では Hyperpath という表記を統一的に用いる。

Spiess and Florian は、(1) 各公共交通の路線は頻度ベースで運行され、利用者に待ち時間が発生する (前提条件 a)、(2) 利用者はランダムに駅に到着し、最初に到着した路線に乗り乗る (前提条件 b) という条件のもとで、利用者は期待一般化費用が最小となる hyperpath を選択する行動原理を提案している。すなわち Hyperpath とは、通常の経路とは異なる「経路群 (乗車方法の組合せ)」という概念である。例えば、発駅から着駅に2つの路線が利用可能であるとしよう。経路は路線1と路線2という2経路のみであるが、Hyperpath は先に到着した路線に乗り乗る行動を考慮できるため、「路線1かつ路線2」という経路を加えた3つの乗車パターンを明示的に取り扱うことができる。

(3) 一般化費用の定式化

出発地 r と目的地 s を結ぶ hyperpath を p とする。以降、サフィックス p は hyperpath に含まれることを意味する。また鉄道ネットワークは、ノード集合 I_p 、リンク集合 A_p 、および経路分岐確率集合 T_p からなるグラフ $H_p = (I_p, A_p, T_p)$ で表現される。ここで、リンク a の経路分岐確率 $\tau_{ap} \in T_p$ は以下のように定義される。

$$\tau_{ap} = f_{l(a)} / F_{ip} \quad \forall i \in S_p, \forall a \in OUT_p(i) \quad (1)$$

$$F_{ip} = \sum_{a \in OUT_p(i)} f_{l(a)} \quad (2)$$

ここで、 $f_{l(a)}$: 路線 l に属するリンク a の運行頻度 (1/分)、 S_p : ストップノード (プラットフォーム)、 $OUT_p(i)$: ノード i から流出するリンク集合である。

分岐確率は、列車がポアソン到着に従うと仮定し、最終的には頻度の重みとして導出される⁵⁾。このとき一般化費用 g_p は以下の式で表わされる。ここでは所要時間と待ち時間のみを考慮している。

$$g_p = \phi \sum_{a \in A_p} \alpha_{ap} t_a + \psi \sum_{i \in I_p} \beta_{ip} [F_{ip}]^{-1} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{ap} &= \sum_{l \in V_p} \epsilon_{il} \cdot \lambda_{lp} & \forall i \in I_p \\ \beta_{ip} &= \sum_{l \in V_p} \delta_{al} \cdot \lambda_{lp} & \forall i \in A_p \\ \lambda_{lp} &= \prod_{a \in A_p} \tau_{ap}^{\delta_{al}} & \forall l \in V_p \end{aligned}$$

ここで、

t_a : リンク a の移動時間、 V_p : 経路集合

ϕ : 乗車時間に関する時間価値パラメータ

ψ : 待ち時間に関する時間価値パラメータ

α_{ap} : hyperpath p におけるリンク a の通過確率

β_{ip} : hyperpath p におけるノード i の通過確率

λ_{lp} : 経路 l を選択する確率

ϵ_{il} : 路線 l がノード i を通過するとき 1、それ以外で 0

δ_{al} : リンク a が路線 l に含まれるとき 1、それ以外で 0 である。

式 (3) の第一項は、期待総旅行時間による費用、第二項は期待総待ち時間による費用である。また、分岐確率の影響により費用が確率的に変動することにも注意されたい。

(4) 計算手順

頻度ベース公共交通配分モデルの計算手順は、以下に示す3つの Step により構成される。

Step1: ネットワークのグラフモデルへの変換

Step2: 最小費用 hyperpath 探索

Step3: 交通量の配分

まず Step1 では、アクセスやイグレス、乗車、降車などといった鉄道利用者の移動を詳細に表現するため、5種類のノードと7種類のリンクを用いたハイパーグラフでネットワーク表現する (図 - 1)。ここで、停留所ノードに接続する「乗車リンク」に待ち時間が付加さ

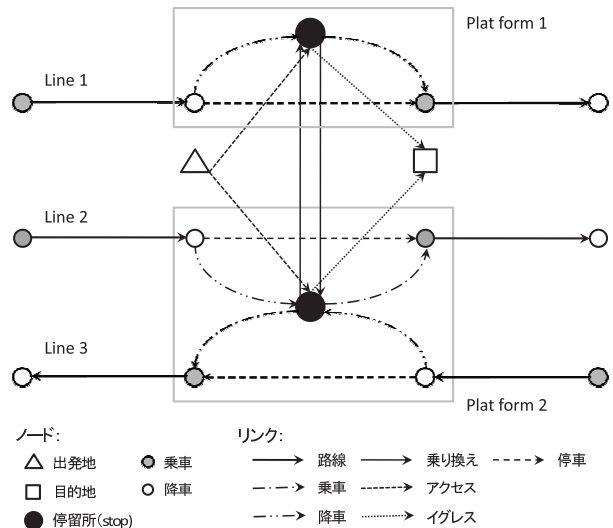


図 - 1 グラフモデルによるネットワークの表現

れるため路線の頻度を設定し、それ以外のリンクは待ち時間が発生しないため $+\infty$ の値を設定する。

次に **Step2** では、前述した期待一般化費用が最小となる hyperpath の探索を行う。全ての hyperpath を列挙して一般化費用を計算することは、ネットワーク規模の拡大に応じて困難となるため、Dijkstra 法に準じた手順で探索が行われる。具体的には、ある 1 つの着地点から後ろ向きに路線を組み合わせた場合の費用を計算し、全ての発地点へと探索を行う。以下に計算手順を示す。なお、アルゴリズム表記は既往研究^{6),12)} に準じているが、一部に変更を加えている。

Step2.1: 初期化

Set: $M_1 := A, M_2 := \phi, M_3 := \phi$

$\gamma_{ss} := 0, \gamma_{is} := \infty \quad \forall i \in I - \{s\}$

Step2.2: 着地点 s から費用が最小となるリンクを探索

Find: a^* such that $a^* = \min_{a \in M_1} c_a + \gamma_{j(a)s}$

Set: $M_1 = M_1 - \{a^*\}, M_2 = M_2 + \{a^*\}$

Step2.3: ノードラベルの更新

if $i(a^*) \in S$ then

Find: K such that $\gamma_{i(a^*)s} := \min T(f, \gamma_{j(a^*)s}^*)$

$\forall a \in OUT(i(a^*)) \cap M_2$

if $a \notin K$ then

Set: $M_2 = M_2 - \{a\}, M_3 = M_3 + \{a\}$

else

if $\gamma_{i(a^*)s} \geq c_a + \gamma_{j(a^*)s}$ then

$\gamma_{i(a^*)s} = c_a + \gamma_{j(a^*)s}$

else

Set: $M_2 = M_2 - \{a\}, M_3 = M_3 + \{a\}$

Step2.4: 繰り返し

M_1 が空になるまで、**Step2.2** と **Step2.3** を実行

ここで、 M_1 :計算対象リンク、 M_2 :最小費用 hyperpath となるリンク、 M_3 :計算終了リンク、 γ_{js} :ノード j から着地点 s までのコスト、である。

なお、**Step2.3** において最適な乗車リンクの組み合わせ K を決定するためには、全組み合わせについて比較を行うことになる。すなわち、 2^n のオーダーで計算量が増加し、計算時間の大半を占めている。実適用においては、考慮すべき改善点であり、並列化アルゴリズムの開発を別途進めている。

最後に、得られた最小費用 hyperpath に交通量の配分を行う。本研究では Spiess and Florian が提案した手法を適用する。これは、1 つの発地点から前向きに着地点に向かって行い、停留所ノードにおいて分岐確率を用いて交通量を配分を行う。

3. 首都圏鉄道ネットワークにおける試算

(1) データ概要

本研究では、首都圏の鉄道ネットワークを用いてモデルの試算を行う。データの作成には、首都圏の鉄道時刻表並びに平成 17 年度大都市交通センサスの個票を用いた。対象区間は、発地点をさいたま市と上尾市とし、着地点を台東区、中央区、千代田区、および港区とする。一般的に利用が想定される 29 路線 (JR12 路線、地下鉄・私鉄 17 路線) を設定した (図 - 2)。直通・相互直通を含む分解路線数は 100 であり、基本となるネットワークは駅ノード数 370、リンク数 1769 であった。また、グラフに変換したネットワークはノード数 2193、リンク数 9243 であった。以下にデータ作成の概要を示す。

まず鉄道時刻表より、駅ノード、路線リンク、運行頻度、駅間所要時間の情報を抽出し、基本ネットワークデータを作成した。ところで首都圏の都市鉄道のような場合、同一路線内でありながら発着駅が異なる運行パターンが多く存在する。このような場合には、路線を発着駅別に分解し、それぞれの運行頻度を算出した上で個別の路線として設定を行った。また、直通・相互直通についても同様の処理を行った。図 - 3 に埼京線の分解例を示す。埼京線単体では、大宮 新宿間に 4 つの運行パターンが存在する。また、川越線との直通運転、りんかい線との相互直通運転についても同様に処理し、合計 13 の運行パターンをそれぞれ 1 つの路線としてデータ化した。

次にセンサス個票より個人の利用経路を集計して、駅間断面交通量を算出した (拡大処理は行っていない)。なお一部のデータについて、利用路線名や列車種別等に欠損・不明があったためそれらは除外した。このような集計化の問題点として、対象路線外からの流入・流出交通量を十分に除外できていない区間が存在することが挙げられる。また、列車種別に関するデータが普通、快速、有料列車の 3 種別のみであるため、複数の快速列車が運行する路線においては一部のリンクで正

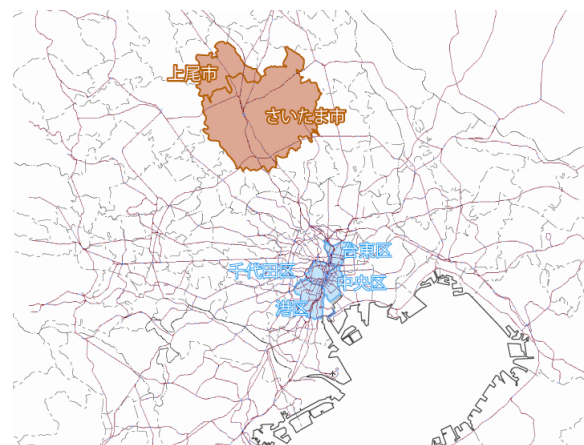


図 - 2 本研究の対象区間

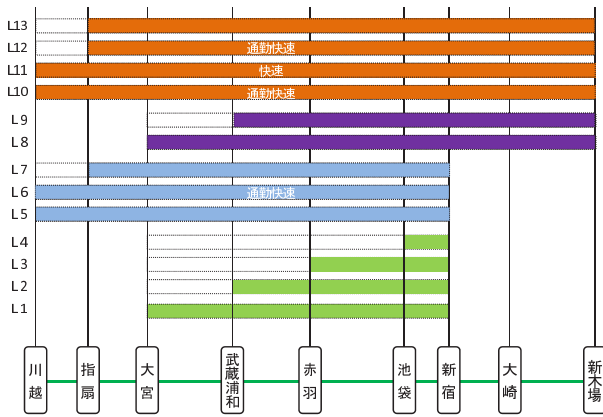


図 - 3 路線分解の例

確な集計がなされていない。そのため、厳密には交通量が一致しないリンクが存在している。今後は検証方法や集計方法を再度検討する必要がある。

(2) モデルの計算結果

グラフモデルにおいて路線リンク以外のコストをゼロに設定し、最小構成での試算を行った。また、一般化費用の乗車時間価値パラメータ ϕ 、待ち時間価値パラメータ ψ は、それぞれ 1 と設定した。これは両者の価値が等しいことを意味する。

図 - 4 に観測リンク交通量と配分リンク交通量のプロット結果を示す。RMSE 誤差は 4029.81 であり、 R^2 は 0.70 であった。但し個別に見ると、良好な結果が得られているリンクが存在する一方で、大きく過大、過小となるリンクが存在していることが分る。今回の対象地域である大宮 赤羽間では、東北本線と高崎線が過小評価となり、湘南新宿ラインが過大評価となった。また、上野駅に接続するリンクでは、山手線と京浜東北線が過小評価となり、地下鉄銀座線が過大評価となった。これと同様の現象が複数の路線が存在する駅で確認された。原因として、乗り換え時間を考慮していないために乗車時間の短いリンクへと次々と乗り換

えが発生している可能性が考えられる。また、全体的に京浜東北線で過小評価となるリンクが数多く見られた。特に赤羽 上野間では、一部のリンクが最小費用 hyperpath から除外され、推計値がゼロとなっている。その原因の 1 つとして、路線全体としては高頻度であるものの異発着駅での運行パターンが多く、路線分解により個々の頻度が低くなったことが考えられる。

以上の試算により、実適用に向けた今後の課題として、a) 乗り換え時間の考慮、b) 路線分解の改善等が浮き彫りとなった。まず、乗り換え時間を導入することで、過剰な乗り換えを抑え、不自然なリンクは最小費用 hyperpath から除外することができる。また、路線分解については、De Cea and Fernandez¹³⁾ が提案した route section による表現が考えられる。これは、発ノードと着ノードを並走する複数の路線を 1 つにまとめて表現する方法である。hyperpath 探索時には route section を適用し、最終的に分解した同一路線内の頻度を用いて配分が可能と考えられる。

(3) 感度分析

表 - 1 には、乗車時間価値パラメータ ϕ を 1 に固定し、待ち時間価値パラメータ ψ を変化させて配分を行った感度分析の結果を示す。ケース間でさほど大きな差は見られないものの、 $\psi = 1.0$ 前後で若干の有意な変化が確認された。また、 R^2 は $\psi = 1.5$ で最大となるのに対し、RMSE 誤差は $\psi = 0.8$ で最小となっている。各結果における hyperpath およびリンク交通量を確認した結果、 ψ が低い場合には、旅行時間の影響が

表 - 1 待ち時間価値パラメータ ψ の感度分析

ψ	R^2	RMSE
0.5	0.675	4003.897
0.8	0.681	3987.096
1.0	0.703	4029.805
1.2	0.703	4031.287
1.5	0.704	4041.711

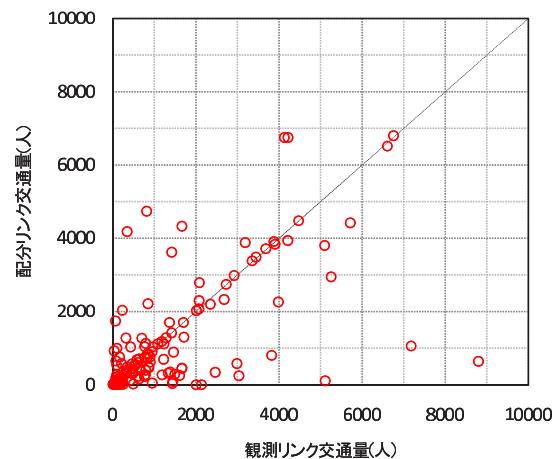
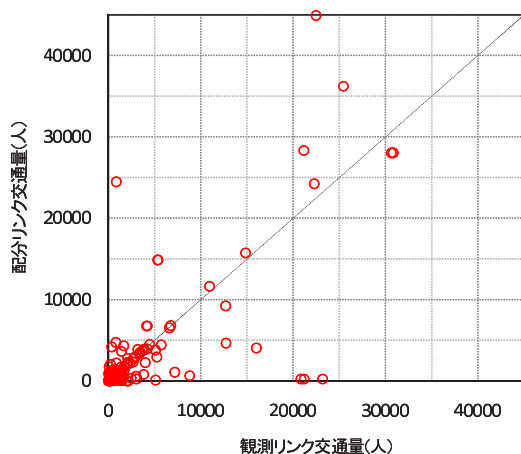


図 - 4 時間価値の相対比が 1.0 の場合の配分結果 (右図は左図左下部分の拡大表示)

卓越するため、利用者が少ないリンクが除外されていたことが分った。これにより、 $RMSE$ は若干ではあるが増加し、一方でリンク交通量がゼロとなるために R^2 が低下するという結果が得られたと推察される。

4. おわりに

本研究では、首都圏鉄道ネットワークに公共交通機関配分モデルの適用を試みた。その結果、小規模の実ネットワークで計算可能であることを示した。但し先述の通り、乗り換え時間の考慮、路線データの表現方法に関する課題点が明らかとなっており、今後は課題点を踏まえた改良を行う必要がある。

参考文献

- 1) 森地茂監修: 東京圏の鉄道のあゆみと未来, 運輸政策研究機構, 2000.
- 2) Yai, T., Iwakura, S. and Morichi, S.: Multinomial Probit with Structured Covariance for Route Choice Behavior, *Transportation Research Part B*, Vol.31, No.3, pp.195–207, 1997.
- 3) 日比野直彦, 兵藤哲朗, 内山久雄: 高密度な鉄道ネットワークへの実適用に向けた非 IIA 型経路選択モデルの特性分析 -改良型 C-Logit モデルの提案-, 土木学会論文集, No.765/ -64, pp.131–142, 2004.
- 4) 円山琢也, 原田昇, 太田勝敏 :大規模都市圏への交通需要統合型ネットワーク均衡モデルの適用, 土木計画学研究・論文集, No.19, 2002.
- 5) Spiess, H. and Florian, M.: Optimal Strategies: A New Assignment Model for Transit Networks, *Transportation Research Part B*, Vol.23, No.2, pp.83–102, 1989.
- 6) Nguyen, S. and Pallotino, S.: Equilibrium Traffic Assignment for Large Scale Transit Networks, *European Journal of Operational Research*, Vol.37, pp.176–186, 1988.
- 7) Chiriqui, C. and Robillard, P.: Common Bus Lines, *Transportation Science*, Vol9, pp.115–121, 1975.
- 8) 倉内文孝, 嶋本寛, 王萍, 飯田恭敬 :最小費用 Hyperpath 探索アルゴリズムを用いたバスサービス評価に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.23, 2006.
- 9) Schmöcker, J.D. and Bell, M.G.H. and Kurauchi, F.: A quasi-dynamic capacity constrained frequency-based transit assignment model, *Transportation Research Part B*, Vol.42, No.10, pp.925–945, 2008.
- 10) Cepeda, M., Cominetti, R., Florian, M.: A frequency-based assignment model for congested transit network with strict capacity constraints: characterization and computation of equilibria, *Transportation Research Part B*, Vol.40, No.6, pp.437–459, 2006.
- 11) Cascetta ,E.:Transportation System Analysis Models and Applications 2nd Editon, Springer, 2009.
- 12) 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.
- 13) De Cea, J. and Fernandez, E.: Transit Assignment for Congested Public Transport Systems: An Equilibrium Model, *Transportation Science*, Vol.27, pp.133–147, 2001.