

時空間ネットワークを活用した 鉄道遅延の動的シミュレーションモデルの構築

多田 京右¹・柳沼 秀樹²・寺部 慎太郎³・海野 遥香⁴・鈴木 雄⁵

¹学生非会員 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)
E-mail: 7621516@ed.tus.ac.jp

²正会員 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)
E-mail: yaginuma@rs.tus.ac.jp

³正会員 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)
E-mail: terabe@rs.tus.ac.jp

⁴正会員 東京理科大学助教 理工学部土木工学科 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)
E-mail: unoharuka@rs.tus.ac.jp

⁵正会員 東京理科大学助教 理工学部土木工学科 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)
E-mail: yusuzuki@rs.tus.ac.jp

首都圏の鉄道ネットワークは利便性の向上を念頭に相互直通運転や高頻度運行が実施されてきた。しかしながら、施策の負の効果として慢性的な列車遅延が発生しており、早急な解決が求められる。列車遅延は、混雑等により乗降時間が増加した結果、列車が遅れる現象であり、後続列車に伝搬するという動的な性質を有している。問題解決にあたり、費用や空間制約の面からソフト対策をより強化していくことが必須である。本研究では、鉄道遅延対策評価を念頭に、遅延現象の動的な性質を運行ダイヤに基づく時空間ネットワークで表現した recursive logit 型の鉄道経路選択モデルを構築する。時間軸を保有する時空間ネットワークに対して経路列挙を必要としない recursive logit モデルを適用することで、首都圏全体における交通量配分に成功した。これにより、慢性的な混雑緩和に向けた施策提案が期待される。

Key Words: Railway network , Time-Space network , Recursive Logit model , Train delays , Congestion

1. はじめに

高度経済成長期を境に、首都圏における鉄道網は都心部を中心に放射状に整備されてきた。さらに混雑緩和や利便性向上を目的とした相互直通運転により、高頻度な運行や相互直通運転などの施策を展開することで大量輸送を可能とし、鉄道は首都機能を支える代表交通手段として利用されている。首都圏鉄道は、通勤・通学の足として重要な機能を持っているため、朝と夕方方の通勤・通学ラッシュ時には多くの利用者が集中してしまうことで列車内混雑が発生しており、また運行本数を増加させた高頻度運行の弊害として、ラッシュ時間帯における慢性的な列車遅延が問題となっている。遅延には 10 分以内の短期的遅延と 10 分以上の長期的遅延に分類されるが、このうち短期的遅延は、乗降時間の増加が停車時間に影響して列車が遅れる現象であり、さらに運行ダイヤに沿って後続列車に伝搬するという動的な性質を有する。首都圏ではすでに輸送量が限界を迎えているが、首都圏には国の重要な機関を始め商業ビルや住宅地など様々な施設が既設されているため、新線建設やホームの増設などのハード対策では費用や空間制約の面から遅延の解消が難しいのが現状である。

このようなことからダイヤ改正やテレワークの推奨による利用客の削減などのソフト対策をより強化していくことが必須である。しかしながら、四段階推定法に基づく従前の鉄道遅延対策評価では、駅と路線をグラフとして表現した交通量配分が用いられており、時間軸上の変化である遅延を明示的に記述できない根本的な問題を有している。

2. 既往研究のレビューと本研究の位置付け

(1) 既往研究のレビュー

本研究で用いる時空間ネットワークに関する研究として、田口ら¹⁾は首都圏の鉄道網を対象として実時間利用者流動水系システムを構築した。この研究の特徴としては、列車の運行を 1 列車単位で明示的に直接表現している点、首都圏の全路線を対象として出発地から目的地までの移動を一貫して扱っている点などが挙げられる。このシステムは、駅利用者の予測、乗換駅の特性分析・最適ダイヤの設定といったシステムの改善・拡張を図るとともに、鉄道改善策について詳細に検討し、具体的な提案を試みるものである。

一方、動的な経路選択による交通量配分モデルに関

する研究として、Fosgerau et.al.²⁾ は、従来の経路選択モデルの選択枝集合が必要という点と、出発後の動的な行動の変化 (en-route choice behavior) を考慮できないという点を指摘し、リンクベースでの逐次的に経路を選択する経路配分モデルを提案し、逐次的に接続するリンクを評価するアルゴリズムを構築した。

(2) 本研究の位置付け

本研究では、鉄道遅延対策評価を念頭に、動的な運行ダイヤ (時間軸) を考慮した時空間ネットワークによる交通量配分モデルを構築する。まずは首都圏の鉄道ネットワークに対して時間軸を加味した時空間ネットワークを構築し、鉄道運行の動的状態を静的に表現する。その後、時空間ネットワーク上で交通量配分モデル構築し、遅延問題を分析・評価する。これにより、計算コストが高い動的なシミュレーションから、既存のモデルを利活用できる静的な配分モデルに変換することが可能になり、計算負荷を軽減させた実務的な遅延の分析と評価が可能になると期待される。

また、経路選択モデルに関して、Recursive Logit モデルの適用を提案する。従来型の経路選択モデルの課題点として、経路ベースでのモデル構築のため経路数の膨大さから生じる選択枝集合列挙の困難さが挙げられ、大規模ネットワークに対応するモデルの構築が困難であった。一方、提案する Recursive Logit モデルはリンクの逐次選択で表現することにより、経路やネットワークを構成するリンク単位で経路選択確率を定義できる。ここで、逐次選択型とは隣接するリンクの価値を考慮できるモデルのことを指し、リンクが次に接続するリンクを逐次考慮する形で各リンクの選択確率が推定可能となるモデルのことである。これにより選択枝集合列挙の難しさを解決することが見込まれる。

そして、シミュレーションにあたっては逐次平均法を用いる。上記の Recursive Logit モデルを用いて算出した交通量配分結果を初期実行可能解として、BPR 関数による既存のリンクコストの更新及び更新したリンクコストによる交通量配分を繰り返し行うことで、交通容量や交通量を加味した収束を狙う。これにより、交通量が多いリンクに対して遅延を表現するだけでなく、遅延を加味した交通量の算出が可能になると期待される。

3. 首都圏鉄道を対象とした 時空間ネットワークの構築

(1) 時空間ネットワークの概要

鉄道ネットワークは、駅をノードとして路線にリンクしたグラフを基本として考える。通常、鉄道ネットワーク上で旅客流動を再現しようとする、鉄道が持

つ時間依存性により動的な問題を解くことになる。そこで、通常の鉄道ネットワークに時間軸を設定し、3次元の静的なネットワークを構築する。この3次元ネットワークを時空間ネットワークと呼ぶ。時空間ネットワークではノード数およびリンク数が膨大な量になってしまうが、ネットワークフロー問題を静的に解くことができ、動的に解く場合と比べてはるかに簡単に解を得られる。

(2) データの概要

時空間ネットワークは列車の動きを静的に表すために用いるネットワークである。通常とのネットワークとの違いは、位置情報だけでなく時間に関する情報も必要となる。本研究では2018年9月11日(火)における時刻表を使用する。以降、このデータを時刻表データと呼ぶ。

また、時空間ネットワークは3次元のネットワーク構造を持つ。そのため、ネットワークを構築する際には、各ノードの空間座標が必要になる。空間座標 (x, y, z) のうち、 x と y については駅データ.jp³⁾ を用いて緯度及び経度データを抽出し、 z は各ノードが持つ時刻の情報を与えることでネットワークを作成していく。

(3) ネットワークの構成

鉄道利用者の行動は以下のように分類できる。

- ・ 駅で列車に乗る
- ・ 列車に乗って次の駅に移動する
- ・ 駅で列車を降りる
- ・ 駅で待ち合わせを行う同一路線に乗り換える
- ・ ある駅から別の路線の駅に乗り換える

ここで、同一駅での同一路線内で乗り換えることを待ち合わせと呼ぶ。また、ある路線から別の路線に乗り換えることを乗り換えと呼ぶ。これらの行動の分類を元に、時空間ネットワークにおけるノードとリンクを以下のように定義する。

- ・ 着ノード：列車の駅への到着を表すノード
- ・ 駅ノード：列車の駅を表すノード
- ・ 発ノード：列車の駅からの発車を表すノード
- ・ 降車リンク：該当駅での降車を表すリンク
- ・ 乗車リンク：該当駅での乗車を表すリンク
- ・ 着発間リンク：列車の到着から発車までの駅での停車を表すリンク
- ・ 走行リンク：列車に乗って次の駅に移動する行動を示すリンク
- ・ 待ち合わせリンク：駅で待ち合わせをする列車への乗り換えを示すリンク
- ・ 乗り換えリンク：駅から別の路線の駅への乗り換えを示すリンク

表-1 構築した時空間ネットワークの規模

要素	数値
路線数	139
ノード数	1743843
リンク数	55011452

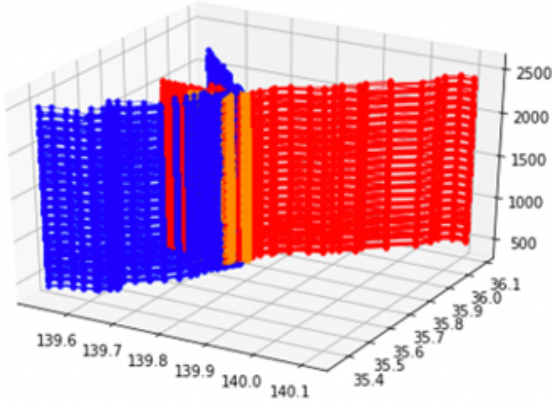


図-1 構築した時空間ネットワークの一部

これらのノードおよび及びリンクを元に、構築した時空間ネットワークの規模を表-1に、構築した時空間ネットワークの全体像を図-1に示すまとめる。

なお、首都圏全体の鉄道網の全範囲を図に起こすと各リンクとノードが入り混じり混乱を招く恐れがあるため、図-1での図示は京浜東北線・銀座線・丸ノ内線の3路線に留めておく。図-1を拡張した時間軸を保有するネットワークにおいて交通量配分モデルを適用し、評価・分析を行う点が、本研究最大の特徴である。

4. RL 型確率的利用者均衡配分の構築

(1) 経路選択モデルの概要

本研究では Fosgerau et al.²⁾ によって提案された、選択肢を列挙する必要がない経路選択モデルである Recursive Logit モデルを適用する。従来のモデルでは選択肢集合として全利用経路の列挙が必要という問題が挙げられる。特に都市圏のような複雑なネットワークを持つ場所では全経路のパターンを列挙するのは非現実的である。

Recursive Logit モデルは経路を構成するリンクを選択肢集合とし、リンクごとに選択確率を求め、リンク選択確率の相乗によって経路の選択確率を求める。これにより全経路の列挙必要性がなく、リンクの選択肢集合だけで経路の選択確率を計算することができる。

(2) RL モデルの定式化

以下では Fosgerau et al.²⁾ に倣い Recursive Logit モデルについて概説する。Recursive Logit モデルでは、ネットワークの上流側リンクから隣接する下流側リンク a に移動する際に得られるリンク効用 $u(a|k)$ を以下のように定義する。

$$u(a|k) = v(a|k) + V^d(a) + \mu\varepsilon(a) \quad (1)$$

ここで、 $v(a|k)$ はリンクペア (k, a) の移動にかかる瞬時効用、 $V^d(a)$ はリンク a から目的地 d までの期待最大効用、 $\varepsilon(a)$ は標準ガンベル分布に従う誤差項、 μ はスケールパラメータ、 $A(k)$ はリンクから流出する下流側リンクの集合である。

式 (1) の効用関数のもとでランダム効用最大化に基づく行動原理を仮定すると、リンク k からリンク a に移動する条件付き確率は式 (2) の多項 Logit モデルにより与えられる。

$$P(a|k) = \frac{e^{\frac{1}{\mu}(v(a|k)+V^d(a))}}{\sum_{a' \in A(k)} \delta(a'|k) e^{\frac{1}{\mu}(v(a'|k)+V^d(a'))}} \quad (2)$$

本モデルの特徴は、意思決定者はリンク k からリンク a へ移動する際、当該リンクペア (k, a) の移動にかかる瞬時効用に加えて、リンク a より続く下流側の期待最大効用を考慮してリンク a を逐次的に選択すると考える点にある。これにより、出発地から目的地までの経路選択問題を、再帰的なリンク選択問題に分解することができるため、動的計画法の考え方を援用することで効率的にネットワーク上の経路選択問題を解くことができる。具体的には、まず下流側の期待最大効用を以下のベルマン方程式によって定義する。

$$V(k) = E[\max_{a \in A(k)} (v(a|k) + V^d(a) + \mu\varepsilon(a))] \quad (3)$$

ここで、遷移確率を Logit モデルとして表していることから、式 (3) で定義される期待最大効用は以下のログサム形式に書き換えることができる。

$$V(k) = \begin{cases} \mu \ln \sum_{a \in A(k)} \delta(a|k) e^{\frac{1}{\mu}(v(a|k)+V^d(a))} & \forall k \in A \\ 0 & k = d \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $\delta(a|k)$ は a が k から流出する下流側のリンクである場合 1、そうでない場合 0 を取るダミー変数、 A は対象ネットワーク内全ての実リンク、 d は最終目的地を表現するダミーリンクである。また、以降、両リンクを合わせたリンク集合を $\bar{A}(= A \cup d)$ と記述する。式 (4) を元に両辺を指数化すると式 (5) となる。

$$e^{\frac{1}{\mu}V(k)} = \begin{cases} \sum_{a \in A(k)} \delta(a|k) e^{\frac{1}{\mu}(v(a|k)+V^d(a))} & \forall k \in A \\ 1 & k = d \end{cases} \quad (5)$$

さらに $z(|\bar{A}| \times 1)$ を

$$z_k = \exp\left(\frac{1}{\mu}V^d(k)\right) \quad (6)$$

を $z_k = \exp\left(\frac{1}{\mu}V^d(k)\right)$ を要素として持つベクトルとし、また $M(|\bar{A}| \times |\bar{A}|)$ を、

$$M_{ka} = \begin{cases} \delta(a|k) \exp\left(\frac{1}{\mu}v(a|k)\right) & a \in A \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

を要素にもつインシデンス行列とする。加えて、 b を $b_k = 0 (k \neq d)$, $b_d = 1$ を要素にもつベクトルとし、 $I(|\bar{A}| \times |\bar{A}|)$ を単位行列とすると、ベルマン方程式は以下の線形方程式により表現される。

$$z = Mz + b \Leftrightarrow (I - M)z = b \quad (8)$$

行列 $I - M$ に逆行列が存在することがベルマン方程式が解を持つこと条件であり、これが満たされれば、 $V^d(k)$ を連立一次方程式の解として求めることができる。

さらに、モデルのマルコフ性により、通過した経路をリンク選択の系列として $\sigma = \{k_0, k_1, \dots, k_i, \dots, k_l\}$ と表すと、経路選択確率は以下のように定義される。

$$\begin{aligned} P(\sigma) &= \prod_{i=0}^{l-1} P(k_{i+1}|k_i) \\ &= \prod_{i=0}^{l-1} e^{\frac{1}{\mu}(v(k_{i+1}|k_i)+V^d(k_{i+1})-V^d(k_i))} \quad (9) \\ &= e^{-\frac{1}{\mu}(V^d(k_0))} \prod_{i=0}^{l-1} e^{\frac{1}{\mu}v(k_{i+1}|k_i)} \end{aligned}$$

また、リンクベースの選択確率はリンク交通量予測にも適用させることが可能である。リンク a の期待交通量を $F(a)$ とすると、リンク a の期待交通量は、リンク a から生じる交通量 $G(a)$ とリンク a に接続されたリンク k から流れてくる交通量 $\sum_{k \in A} P(a|k)F(k)$ の和で表現することができる。

$$F(a) = G(a) + \sum_{k \in A} P(a|k)F(k) \quad (10)$$

この式を変形し、以下の式 (11) を求めることでリンクごとの期待交通量を求めることが可能である。

$$F = (I - P^T)^{-1}G \quad (11)$$

また、パラメータは最尤推定法により推定する。対数尤度関数 LL は次式で表される。

$$\begin{aligned} LL(\beta) &= \ln \prod_{n=1}^N P(\sigma_n) \\ &= \frac{1}{\mu} \sum_{n=1}^N \sum_{i=0}^{I_n-1} \{v(k_{i+1}|k_i) - V(k_0)\} \end{aligned} \quad (12)$$

(3) プリズム制約に基づく経路集合の限定

RL モデルは経路選択枝を列挙せずに交通量を算出できる反面、リンク数が膨大になることによる計算負荷の増大が課題としてあげられる。その中で近年、大山ら⁴⁾は RL モデルの数値計算上の問題を解決するための経路集合限定手法を提案した。まず状態 s を、空間 (ノードまたはリンク) k 及び選択ステージ t の組 $s = (t, k)$ によって定義し、3次元にネットワークを拡張する。ここで、選択ステージ t は旅行者の意思決定のタイミングを意味しており、所要時間を意味していない。また、効用関数 $v(a|k)$ は t に依存せず、モデルは静的である。さらに、状態ネットワークに選択ステージ制約 T を導入する。 T は旅行者が経験できる最大の選択行動回数を表す。旅行者はステージ T かそれ以前に目的地 d に到着する必要がある、最終的な状態は常に $S_T = (T, d)$ である。この考えを用いてネットワーク上の状態数の削減を行い、実行可能経路集合を限定する。この選択ステージ制約 T は、OD ペアごと ($T = T_{od}$) に定義されることが望ましい。実経路情報から最大ステージを観測することで T を設定する。

出発地 o から空間 k に到達するために必要な最小ステップ数を $D^o(k)$ 、状態 k から状態 d に到達するために必要な最小ステップ数を $D^d(k)$ とする。 $D^o(k)$ 及び $D^d(k)$ はグラフ G 上の最短経路探索によって算出可能である。 $D^o(k)$ 及び $D^d(k)$ に基づいて、初期状態 $s_0 = (0, o)$ 及び状態 $s = (t, k)$ の存在可能条件は次のように定義される。

$$I^{od}(t, k) = \begin{cases} 1 & \text{if } D^d(k) \leq T - t, D^o(k) \leq t \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

つまり、旅行者は $I^d(t, k) = 1$ を満たすステージ t に限って、空間 k を利用することができる。ステージ t における状態集合 S_t^d は、限定された集合 $S_t^d \equiv \{s = (t, k) | I^d(s) = 1\}$ として定義される。2つの状態 $s = (t, k)$, $s' = (t+1, a)$ 間の遷移は、両状態が存在し、かつ空間的に接続されている場合のみ可能であり、この状態接続条件 $\Delta^d(s'|s) = \Delta_t^d(a|k)$ は次のように定義される。

$$\Delta_t^d(a|k) = I^d(t, k)\delta(a|k)I^d(t + 1, a) \quad (14)$$

接続する状態のペアを表すエッジの集合 E_t^d は、 $E_t^d \equiv \{(s, s') = ((t, k), (t + 1, a)|\delta^d(s'|s) = 1)\}$ として限定される。ここで制約 Δ は、旅行者にとって移動可能な空間集合が選択ステージ t によって変わることを意味している。つまり、実行可能経路集合 ψ^d は、削減後の状態拡張ネットワーク (S^d, E^d) 上で定義される経路集合となり、時空間プリズムの形をなす。

(4) 逐次平均法によるリンク交通量の更新

本研究において、遅延施策の検討にあたって逐次平均法⁵⁾を用いる。逐次平均法による求解アルゴリズムを図-2に示す。

前述の Recursive Logit モデルを用いて算出した現況再現結果 x_a^1 を初期実行可能解として、既存のリンクコスト t_a^n の更新及び、更新したリンクコスト t_a^n による補助解 y_a^n を算出することで、降下ベクトル d_a^n は式 (15) のように表される。

$$d_a^n = y_a^n - x_a^n \quad (15)$$

また、降下ステップサイズ ς を

$$\varsigma = 1/(n + 1) \quad (16)$$

とした時、リンク交通量の更新として、新たなリンク交通量 x_a^{n+1} は式 (17) により表現される。

$$x_a^{n+1} = x_a^n + \varsigma d_a^n \quad (17)$$

ここで、収束判定に際しては式 (18) を用いる。

$$\frac{\sqrt{\sum_{z \in A} (\bar{x}_a^{n+1} - \bar{x}_a^n)^2}}{\sum_{a \in A} \bar{x}_a^n} < \epsilon \quad (18)$$

ただし、

$$\bar{x}_a^n = \frac{x_a^n + x_a^{n-1} + x_a^{n-2} + \dots + x_a^{n-m+1}}{m} \quad (19)$$

すなわち、 \bar{x}_a^n は直近 m 回分の移動平均である。

交通量配分を繰り返し行うことで、交通容量や交通量配分結果を加味した収束を狙う。これにより、交通量が多いリンクに対して遅延を加味した交通量の算出が可能となる。

(5) BPR 関数によるリンク所要時間の設定

逐次平均法適用時に際し、交通量過多による鉄道遅延を表現する上で、各リンクコストの更新に BPR 関数¹⁾を用いる。使用する BPR 関数を式 (20) に示す。

$$t_a(x_a) = t_a^0 \left(1 + \alpha \left(\frac{x_a}{c_a}\right)^\gamma\right) \quad (20)$$

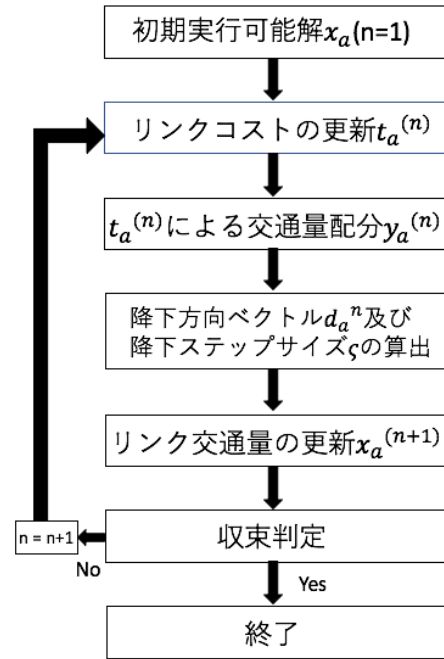


図-2 逐次平均法を用いた求解アルゴリズム

$$\begin{cases} \alpha = 0.02, \gamma = 4.5 & 7:30 \text{ まで} \\ \alpha = 0.1, \gamma = 4.5 & 7:30 \text{ 以降} \end{cases} \quad (21)$$

t_a はリンク a の通過時間、 t_a^0 はリンク a の自由走行時間、 x_a はリンク a の交通量、 c_a はリンク a の交通容量である。

遅延の影響を表現する際に、鉄道ネットワークの各交通リンクに対して、式 (20) の旅行時間と混雑度を考慮したリンクコスト関数を定義した。これにより、現況再現結果による交通量に対してリンクの所要時間が変化し、事実上の遅延を表現することが可能となる。この関数は、鉄道利用者の認知所要時間を表しており、一般的に鉄道利用者の経路選択に使われる一般化費用と同じ関係にある。

式 (20) では、列車の乗車定員を超える通過人数が可能であるが、田口¹⁾を参考として、式 (21) のパラメータを設定している。BPR 関数により各リンクにおける所要時間を更新しつつ、更新された鉄道ネットワークにおける交通量配分を行う。

5. 首都圏鉄道ネットワークへの適用

(1) データの概要

ネットワークに与える OD データおよび交通量として、平成 27 年に実施された第 12 回大都市交通センサスデータ⁶⁾を用いる。大都市交通センサスは首都圏における鉄道やバスなどの公共交通機関の利用実態を解

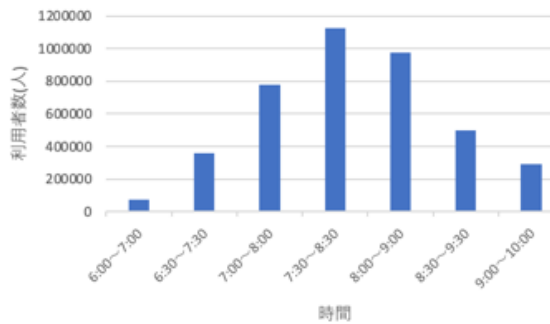


図-3 時間帯別利用者数

明するために行われている交通統計調査である。本研究では鉄道定期券調査におけるトリップ分解後データ、鉄道路線コード表、鉄道駅コード表を用いる。

任意の OD に対して時空間ネットワークを用いて経路の提案を行うために、OD それぞれに対して出発駅・到着駅及び出発時間・到着時間に関するデータをまとめていく。これらを用いて、出発地から目的地までの所要時間及び乗り換えダミーを変数として、任意の OD 間にて Recursive Logit モデルによる経路選択のシミュレーションを行い、交通量配分結果をまとめていく。

(2) 基礎集計

シミュレーションにあたり、大都市交通センサスデータ⁶⁾を用いて基礎集計を行い、データの傾向を確認した。大都市交通センサスが対象としている 139 路線に関して、1 時間単位での時間帯別における利用者数の集計を図-3 に示す。この図から、首都圏における朝の鉄道利用者数は特に 7:00-9:00 の時間帯での利用者が多いことが分かる。時間帯別の利用者数に関する基礎集計から、今回のシミュレーション事例は朝のラッシュ時間帯として利用者の多い 7:00-9:00 の時間帯を対象として行っていく。

(3) パラメータ推定結果

交通量配分にあたり、まずはパラメータ推定を行う。表-2 にパラメータ推定結果を示す。午前 7:00-9:00 にトリップを開始・終了している 22754 のサンプルを大都市交通センサス⁶⁾から抽出し、リンク数 6110 の 2 次元ネットワークを対象にパラメータ推定を行った。ここで、交通量配分に関しては時空間ネットワークを用いて配分を行う。しかし、大都市交通センサスにおいてリンクごとの正確な時間情報がないため、パラメータ推定に関しては首都圏全範囲を対象に 2 次元ネットワークの中で行う。その際、プリズム制約に基づき経路集合を限定することで、DAG 構造を担保した。説明変数としては、移動時間、乗換リンクダミーの 2 つとなっ

表-2 パラメータ推定結果

回数	所要時間	t 値	乗換ダミー	t 値
1	-0.7757	-20.08	-2.9551	-12.92
2	-0.7968	-21.57	-2.6575	-12.52
3	-0.8115	-20.31	-2.7789	-12.96
4	-0.7376	-21.68	-2.7243	-13.5
5	-0.7242	-21.69	-2.4967	-12.81
6	-0.7434	-21.18	-2.9004	-13.06
7	-0.8134	-20.1	-2.7319	-11.54
8	-0.8008	-21.27	-2.2001	-10.69
9	-0.7738	-19.73	-3.2271	-13.44
10	-0.7348	-22.92	-2.665	-13.89
Average	-0.7712	-21.05	-2.7337	-12.73

ている。また、2 次元ネットワークにおけるパラメータの有用性を示すために、22754 サンプルのうち 1000 サンプルをランダムで抽出し、それぞれにおける結果を示す。

モデルのパラメータはいずれも 5% 有意で推定された。また両説明変数ともにマイナスの値となっており、利用者は移動時間が短い経路や、乗換回数が少ない経路を好む傾向にあることが確認できる。

(4) RL による交通量配分の結果

本モデルの精度確認ならびに遅延施策検討を実施する上でのベンチマークのとしてベースラインを構築するために、まずは鉄道利用者の現況再現を行う。ここで、現況再現とは大都市交通センサスに掲載されている発着駅および時間を元に利用者の利用経路を交通量配分により算出したものである。現況再現を行うにあたって、対象範囲は首都圏全範囲とし、時間帯は上記に述べた時間帯とする。なお、考慮するネットワークのリンク数は 778272 である。Recursive Logit モデルによる交通量配分を行う際に、リンク数の膨大さによって計算負荷が増大することを避けるため、利用者は出発時刻から 10 分以内の鉄道に乗車し、目的地に到着できる範囲内で目的地に到着することができるリンクをあらかじめ抽出したうえで経路を選択できるものとする。現況再現の結果に関して、駅間断面別交通量に関する大都市交通センサスの実データと Recursive Logit モデルによる現況再現結果を比較したものを図-4 に示す。

決定係数 R^2 は 0.9297 となり、Recursive Logit モデルによる現況再現はうまく表現できていると言える。そ

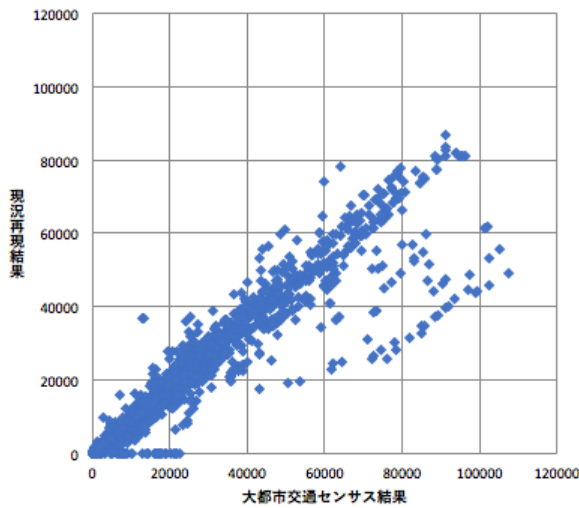


図-4 実データと現況再現結果の駅間断面交通量による比較

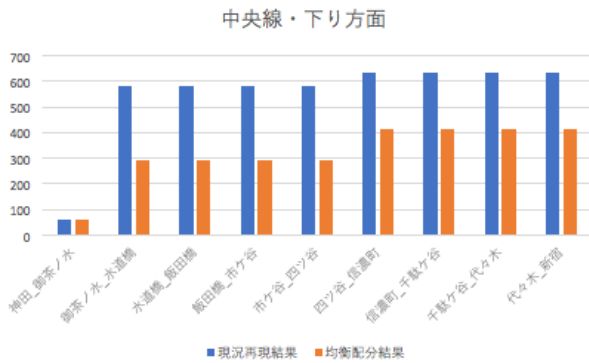


図-5 均衡配分による駅間断面交通量の変化 (中央線・下り方面)

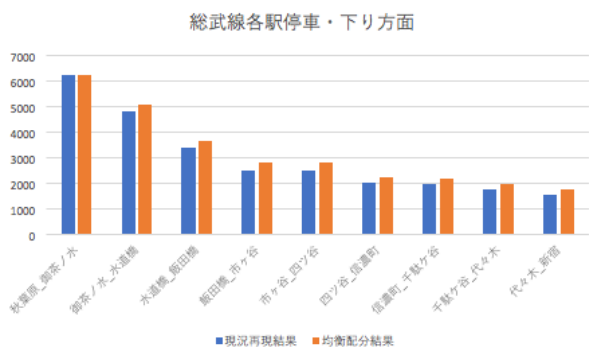


図-6 均衡配分による駅間断面交通量の変化 (総武線各駅停車・下り方面)

の中で、大都市交通センサスによる実データよりも現況再現結果の方が交通量が少ない過小評価部分が多少見受けられる。この部分のほとんどが山手線における駅間リンクであり、同一区間による緩行列車よりも優等列車に交通量が傾いていると考えられる。

(5) 均衡配分の結果

前述の RL による結果を初期実行可能解 x_a^1 として、逐次平均法を適用する。今回は小規模なネットワークでの適用事例として、東京メトロ東西線・JR 総武線各駅停車・JR 中央線快速・東葉高速鉄道の 4 路線とした。前述の RL による結果と逐次平均法を適用した結果の比較に関して、図-5 には中央線快速下り方面に対する結果を、図-6 には総武線各駅停車下り方面に対する結果を示す。図-5 及び図-6 は、それぞれの該当路線の駅間断面交通量を示す。ここで、式 (18) における逐次平均法の収束条件となる ϵ の値は 0.001 とした。

結果の一例として、中央線快速と総武線各駅停車における御茶ノ水-新宿間・下り方面の並行区間を比較する。並行区間において優等列車となる中央線快速の利用者数は減少し、並行区間において緩行列車となる総武線各駅停車の利用者数は増加している。逐次平均法を用いることで、現況再現結果とリンク a に対する交通容量 c_a を考慮した交通量配分が可能となり、現況再現結果との変化が示された。これらの手法を用いて、今後遅延施策の検討に適用することが期待される。

6. おわりに

本研究では、まず首都圏鉄道を対象とした時空間ネットワークを構築した。またそのネットワークに対して Recursive Logit モデルを用いてリンク単位での逐次選択による交通量配分を行うことで、遅延施策検討のベンチマークとなる鉄道利用者の現況再現を行い、駅間断面交通量によって実データと配分結果の比較を行なった。首都圏の鉄道ネットワーク網は複雑であり、出発地点から到着地点までの経路選択枝が膨大であるという側面を考慮すると、経路選択枝列挙の必要ない Recursive Logit モデルの実用性が大いにあると考えられる。また、Recursive Logit モデルはリンク単位での経路選択となるため、対象ネットワークのリンク数が膨大であると計算負荷の増大が懸念されるが、この課題に関してはサンプルごとに利用可能性のあるリンクの削減を行い、極力計算負荷を軽減させた上で交通量配分を行なった。

そして、遅延施策検討のために逐次平均法を用いて交通量配分を実施した。現況再現結果及び交通容量を加味したリンクコストの更新によって、既存の交通量に対して交通量の変化が生じたことが見て取れる。

今後の課題として、逐次平均法適用時の対象範囲の拡大があげられる。遅延施策の検討を行うにあたり、全ての OD を考慮するためには首都圏全範囲での配分が不可欠である。今回は 4 路線のみでの実行にとどまったが、今後は範囲を拡大させて上で、ソフト対策による遅延施策の評価を行っていく。

参考文献

- 1) 田口東, 鹿島茂, 鳥海重喜, 斎藤正俊: 首都圏の実時間鉄道利用者流動系システムの構築—領域型時空間ネットワークモデルの活用, 運輸政策研究, Vol8 No.1, 2005 Spring.
- 2) Fosgerau, M., Frejinger, E. and Karlstorm, A.: A link based network route choice model with unrestricted choice set, Transportation Research Part B: Methodological, Vol56 pp.70-80, 2013.
- 3) 株式会社コードプラス: 駅データ.jp, <
<http://www.ekidata.jp/company.php>>
- 4) 大山雄己, 羽藤英二: 時間構造化ネットワーク上の確率的交通配分, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol73 p186-200, 2017.
- 5) 土木学会: 道路交通需要予測の理論と適用 第 II 編 利用者近郊配分モデルの展開, 2006.
- 6) 国土交通省: 第 12 回大都市交通センサス平成 28 年度調査 首都圏報告書, <
<http://www.mlit.go.jp/common/001179760.pdf>>, 2016.

(2022. 9. 30 受付)

Development of a dynamic simulation model of railway delays
using time-space network

Kyosuke TADA, Hideki YAGINUMA, Shintaro TERABE,
Haruka UNO, Yu SUZUKI

The railway network in the Tokyo metropolitan area has been operated with interconnection and high-frequency service in order to increase convenience. However, the negative effects of these measures have resulted in chronic train delays, and urgent solutions are required. Train delay is a phenomenon in which a train is delayed due to an increase in boarding and alighting time caused by congestion, etc., and has a dynamic nature in that it propagates to subsequent trains. In this study, we construct a recursive logit-type railroad route selection model that expresses the dynamic nature of delay phenomena in a time-space network based on operation schedules, with a view to evaluating railway delay countermeasures. By applying the recursive logit model, which does not require route enumeration, to a time-space network with a time axis, we succeeded in allocating traffic in the entire Tokyo metropolitan area. This model is expected to be used to propose measures to alleviate chronic congestion.