

災害時における鉄道ネットワークの 最適運用戦略の検討

山本 脩真¹・柳沼 秀樹²・寺部 慎太郎³・康 楠⁴・田中 皓介⁵

¹非会員 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒270-0022 千葉県野田市山崎2641)

E-mail:7618536@ed.tus.ac.jp

²正会員 東京理科大学講師 理工学部土木工学科 (〒270-0022 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 (〒270-0022 千葉県野田市山崎2641)

E-mail:terabe@rs.noda.tus.ac.jp

⁴正会員 東京理科大学嘱託助教 理工学部土木工学科 (〒270-0022 千葉県野田市山崎2641)

E-mail:kangnan@rs.tus.ac.jp

⁵正会員 東京理科大学嘱託助教 理工学部土木工学科 (〒270-0022 千葉県野田市山崎2641)

E-mail:tanaka.k@rs.tus.ac.jp

2011年3月11日に発生した東日本大震災において、首都圏において鉄道をはじめとした交通網の麻痺により、当日中に自宅に帰れない帰宅困難者が首都圏全体で約515万人発生した。鉄道の運転再開後には、旅客がホームに集中し混乱が生じたため再び運転を停止せざるを得なくなった。首都直下型地震の発生により東京都だけでも約490万人の帰宅困難者の発生が想定されており、鉄道の運転再開に向けた具体的な対策の検討が喫緊の課題となっている。

本研究では、大規模地震災害時を念頭に、帰宅困難者の早期解消に向けて、首都圏を対象とした運転再開線区の最適復旧戦略を検討した。具体的には、災害時の駅内混雑（待ち行列）を考慮した準動的な頻度ベース旅客経路配分モデルを構築し、様々な災害発生シナリオの下で運転再開時のシミュレーションを行った。

Key Words : Dynamic shortest hyperpath, Queue model, route choice behavior, big earthquake

1. はじめに

(1) 背景と目的

2011年3月11日に発生した東日本大震災において、首都圏にでは建築物の倒壊といった大規模な被害は免れたが、鉄道をはじめとした交通網ネットワークの麻痺により、当日中に自宅に帰れない帰宅困難者が首都圏全体で約515万人発生した。近い将来に発生が予測される首都直下型地震では、東京都だけでも約490万人の帰宅困難者の発生が想定¹⁾されており、鉄道の運転再開に向けた具体的な方策の検討が喫緊の課題となっている。首都圏における帰宅困難者解消に向け、効率的な線区を円滑に復旧させることで、多くの帰宅困難者の解消につながると考える。しかしながら、復旧要員、資材等の制約下においては、多くの帰宅困難者を輸送可能な路線から復旧していくことが必要である。本研究では、災害時の駅における列車待ちの混雑を考慮して時々刻々と変化する実

交通を再現することで、帰宅困難者を早期に解消するであろう最適運用に関する戦略を検討する手法の開発を目的とする。

(2) 既往研究の整理と本研究の位置づけ

災害時の運転再開線区の検討に関する研究は、金子ら²⁾が OD 間の接続性評価した上で、目的地への到達可能率を地域別に算定し、GIS 上に表示するシステムを用いて検討を試みている。ここでは、OD 間の接続性を用いての検討のため、待ち時間や混雑等の検討はされていない。

鉄道ネットワークにおける旅客の経路配分に関する研究として、Spiess and Florian³⁾は、待ち時間に起因する不確実性を考慮した公共交通機関の経路選択問題をモデリングしている。具体的には、頻度ベースで運行される公共交通を対象に、利用者が期待所要時間を最小にする「Strategy」もしくは「Hyperpath」と呼ばれる経路選択枝群を選択すると仮定した乗客配分モデルを構築している。また、Trozzi ら⁴⁾は Hyperpath に、駅での待ち混雑を考慮した「Dynamic Hyperpath」と呼ばれる準動的な利用者配分モデルを構築している。

本研究では、首都圏鉄道ネットワークに対して、Dynamic Hyperpath 概念に基づく公共交通機関の準動的な経路選択モデルを適用し、大規模災害後の鉄道運行再開による混雑指数の変化をシミュレートする。具体的には、Trozzi らが提案した準動的頻度ベース乗客配分モデルを首都圏ネットワークにおいて適用し、運行再開後の各駅の混雑率の推移と帰宅困難者の推移を算出するシステムを開発する。その上で、各路線の復旧順序を変化させることによって混雑率や帰宅困難者の推移がどのように変化したのかを評価する。Trozzi らが示したモデルを用いることにより、首都圏鉄道ネットワークにおける運行再開後の時々刻々と変化する駅の混雑状況を見ることができ、本論が提案する方法を用いることで、今後起こりうる大規模災害後の鉄道運行再開時の各駅の混雑を推察することができ、運行再開へ向けた復旧作業の順序を検討する指標になることが期待される。

2. Dynamic Hyperpath 概念を用いた準動経路配分モデルの構築

(1) Dynamic Hyperpathの概要

Dynamic Hyperpathに基づくモデルはTrozziらにより、基本的な定式化と求解法が提案された。従来のHyperpathモデルは静的なモデルであるため、災害時のような時々刻々と利用者数が増えることによって発生する待ち時間の変化に対応できない。Dynamic Hyperpathでは、従来のHyperpathモデルの待ち時間にQueue概念を用いることによって列車待ち本数を導出し、動的に待ち時間の変化を考慮することが可能である。そのため、この手法を本研究が対象とする災害時の混雑状況についても適用することができる。

(2) Hyperpath

Hyperpathはcommon liens problemにより定義される経路集合である。ここで、common lines problemとは、頻度ベースで運行されている公共交通機関における特有の問題であり「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、それらの路線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。Spiess and Florianはattractive setに含まれる経路集合をhyperpathと定義し、(1)路線は頻度に基づいて運行されているため乗客に期待待ち時間が発生する、(2)乗客はランダムに駅に到着し、最初に到着した路線に乗り、という2つの仮定の下に期待所要時間が最小となるhyperpathを選択する最適戦略を提案している。hyperpathは通常の経路とは異なり「経路群」であり、乗車方法の組み合わせと解釈することができる。

大規模災害後の運行は通常の時刻表運行とならず、おおまかな運行頻度を示すような運行形態になると考えられるため、当該手法の首都圏鉄道ネットワークへの適用は妥当であると考えられる。

ここで、hypetpthモデルについて概要を示す。出発地 s と目的地 t を結ぶhyperpathを p とする時、ノード集合 lp 、リンク集合 Ap 、および経路分岐確率 Tp からなるグラフ $Hp=(lp, Ap, Tp)$ で表現される。hyperpath p の一般化費用 gp は以下のような式で表わされる。ここでは所要時間と待ち時間のみ考慮している。

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

ここで、

t_a : リンク a の移動時間

φ : 乗車時間に関する価値パラメータ

ψ : 待ち時間に関する価値パラメータ

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。

第一項は所要時間による費用、第二項は待ち時間による費用を表している。また、一般化費用は分岐確率に従い確率的に表現される。 $1/F_{ip}$ はノード i における期待待ち時間を示しており、リンク a の運行頻度 f_a を用いて式(2)のように表わされる。

$$1/F_{ip} = 1/\sum_{a \in A_p} f_a \quad (2)$$

式(1)で示した期待一般化費用が最小となるHyperpathの算出はDijkstra法に準じた手法を用いて算出が可能である。

(3) Queueモデル

Queueは待ち行列モデルの一つである。待ち行列とは、顧客がサービスを受けるために行列に並ぶような確率的に挙動するシステムの混雑現象を数理モデルを用いて解析することを目的とした理論である。本研究での例として、列車の許容量を超えない人数が駅にいる場合は待ち行列は発生せず、許容量を超えた人数が駅にいる場合に待ち行列が発生する状態を表し、ここから列車待ち本数を導出することができる。

Queueモデルには、Physical QueueモデルとPoint Queueモデルが存在する。Physical Queueを用いる場合、待ち行列は物理的な行列の長さを考慮する必要がある。これにより、駅構内への入場規制や乗客の乗降時間等のホームの容量に影響される現象を考慮しなければならないため、計算が複雑になる。よって、本研究では待ち行列を点で考えることで物理的な長さを考慮しないPoint Queueを仮定する。

(4) 計算手順

Dynamic Hyperpathの計算手順は、以下に示す4つのStepの繰り返しにより構成される。本研究では1分を1サイクルとして計算している。また、前処理として、グラフを

4種類のノードと6種類のリンクを用いて待ち行列のハイパーグラフに変換する必要がある。

Step1 : 最小費用 hyperpath 探索

Step2 : 旅客配分 (network loading)

Step3 : 待ち行列による混雑指数の導出

Step4 : 混雑指数を用いた待ち時間の導出

まず, Step1 で最小費用 hyperpath 探索をして, 旅客が駅に入場した後にどのリンクに向かうかを定める. 初期状態での最小費用 hyperpath 探索は, 従来の Hyperpath 探索と同様の方法で導出する.

次に, Step2 では, 駅へ入場した旅客を Step1 で決められたリンクに配分する.

Step3 では, Step2 で配分された旅客数に応じて待ち行列を求め, 列車待ち本数を導出する. 待ち行列リンクは待ちリンクとは異なることに注意したい. 待ちリンクは混雑の有無に関わらず, 列車の頻度に基づいて算出される列車到着までの待ちである. それに対して, 待ち行列リンクは混雑していない時は発生せず, 混雑しているときにのみ発生するリンクであり, 車両の許容量を踏まえた上で当該旅客が乗車可能な列車到着までの待ちである. ここでは, 旅客が乗車するまでに通り返る列車の数を列車待ち本数としている.

待ち行列の導出から列車待ち本数 $\kappa_a(\tau)$ の導出は以下の式で表現される.

$$e_{a''}(\tau) = \chi_l \cdot \varphi_{a''}(\tau) - q_b^{out}(\tau) \quad (3)$$

$$q_b^{out}(\tau) = q_b^{in}(t_b^{-1}(\tau)) \quad (4)$$

$$e_{a'}(t_a^{-1}(\tau)) = e_{a''}(\tau) \quad (5)$$

$$q_{a'}^{IN}(\tau) = \int_0^\tau q_{a'}^{in}(\theta) d\theta \quad (6)$$

$$e_{a'}^{CUM}(\tau) = \int_0^\tau e_{a'}(\theta) d\theta \quad (7)$$

$$q_{a'}^{OUT}(\tau) = \min \left\{ \begin{array}{l} q_{a'}^{IN}(\theta) + e_{a'}^{CUM}(\tau) \\ - e_{a'}^{CUM}(\theta) : \theta \leq \tau \end{array} \right\} \quad (8)$$

$$q_{a'}^{IN} - q_{a'}^{OUT} = \int_\tau^{t_a(\tau)} e_{a'}(\theta) d\theta \quad (9)$$

$$\kappa_a(\tau) = 1 + \left\lfloor \int_\tau^{t_a(\tau)} \varphi_{a''}(\theta) d\theta \right\rfloor \quad (10)$$

ここで,

a'' : 待ち link

a' : 待ち行列 link

b : 車内待機 link

χ_l : line 1 の輸送量

$\varphi_l(\tau)$: 時刻 τ における路線 1 の頻度

$t_l(\tau)$: 時刻 τ における link 1 の通過に要する時間

$q_l^{in}(\tau)$: 時刻 τ における link 1 への流入量

$q_l^{out}(\tau)$: 時刻 τ における link 1 からの流出量

$q_l^{IN}(\tau)$: 時刻 τ における link 1 への総流入量

$q_l^{OUT}(\tau)$: 時刻 τ における link 1 からの総流出量

$e_l(\tau)$: 時刻 τ における link 1 の容量

$e_l^{CUM}(\tau)$: 時刻 τ における link 1 の総容量.

まず, 時刻 τ における待ち行列リンクの容量を式(3)~(5)を用いて求める. 車両容量と頻度を用いて 1 分当たりの車両容量を求め, そこから降車せずに乗車し続ける人数を引いた値が時刻 τ における待ちリンクの容量となる. 次に, 式(6)~(8)を用いて時刻 τ までのリンクからの総流出量を求める. 総流入量から総容量を引いたものが総流出量となる. 最後に, 式(9)にあるように, 総流入量と総流出量の差分を時刻 τ 以降の容量で積分することで, 待ち行列リンクの通過に要する時間が求められる. 式(10)より, 待ち行列リンクを通過するまでの時間で電車が何本発車するか頻度を用いて導出し, その値を列車待ち本数としている.

Step4 では, Step3 で導出された列車待ち本数を用いて, 経路選択確率ならびに期待待ち時間を導出する. 計算手順は以下の式で表現される.

$$\gamma_a(\tau) = f_a(w, \tau) \cdot \prod \bar{F}_z(w, \tau) \quad (11)$$

$$f_a(w, \tau) = \frac{\varphi_a^{\kappa_a} \cdot \exp(-\varphi_a \cdot w) \cdot w^{\kappa_a - 1}}{(\kappa_a - 1)!} \quad (12)$$

$$\bar{F}_z = 1 - \int_0^x f_z(w, \tau) \quad (13)$$

$$p_{a|h}(\tau) = \begin{cases} \int_0^{+\infty} \gamma_a(\tau) dw & a \in h \\ 0 & a \notin h \end{cases} \quad (14)$$

$$t_{a|h}(\tau) = \frac{1}{p_{a|h}} \cdot \int_0^{+\infty} w \cdot \gamma_a(\tau) dw \quad (15)$$

$$w_h(\tau) = \sum_{a \in h} p_{a|h}(\tau) \cdot t_{a|h}(\tau) \quad (16)$$

ここで,

a : 対象 link

h : hypergraph の link 集合

$p_{a|h}$: 経路選択確率

$t_{a|h}$: 期待待ち時間

$w_{a|h}$: 期待総待ち時間

$\gamma_a(\tau)$: 路線選択確率

$f_a(w, \tau)$: アーラン分布の確率密度関数

\bar{F}_z : 生存関数(survival function)

まず, 式(11)~(13)より, アーラン分布の確率密度関数を用いて路線の選択確率を求める. 次に, 式(14)(15)より路線選択確率を用いて経路選択確率と期待待ち時間を求める. 最後に, 式(16)から経路選択確率と期待待ち時間の積を用いて期待総待ち時間を求める. これにより Hyperpath を計算するために必要となる各リンクの費用を全て求めることが可能となる. これらの費用を用いて

Step1 から再度繰り返し計算をする。

Trozziらは、Step4の後に逐次均衡配分を行っているが、本研究ではその計算を行わずに分析を行う。本研究では災害時を想定しているため、利用者均衡が保たれるための、全ての利用者は旅行時間を最小とするよう行動する、利用者は常に利用可能な経路について完全な情報を得ているといった2つの条件のうち、後者を満たさないと仮定する。よって、本研究は均衡配分の計算を行わずに分析を行う。

3. 運転再開のシミュレーション分析

(1) 分析対象

本研究で運転再開に向けて検討する路線を図-1 に示す。山手線と 23 区から 5 つの方向に放射状に延びる路線を対象とする。山手線内の分析対象駅は、主要乗換駅 8 駅とする。各駅の帰宅困難者数は、山手線以外の各路線のピーク時の乗車人数を基に算出している。帰宅困難者の定義は初乗り駅が山手線の駅から 20km 以上の駅で

あり、最終降車駅が上記の駅である利用者を指す。それぞれの対象となる駅は、武蔵小金井駅、新子安駅、西船橋駅、馬橋駅、北浦和駅とした。

本研究では、まず全路線を同時に復旧させた場合を想定したシミュレーション分析を試算する。

(2) 分析結果

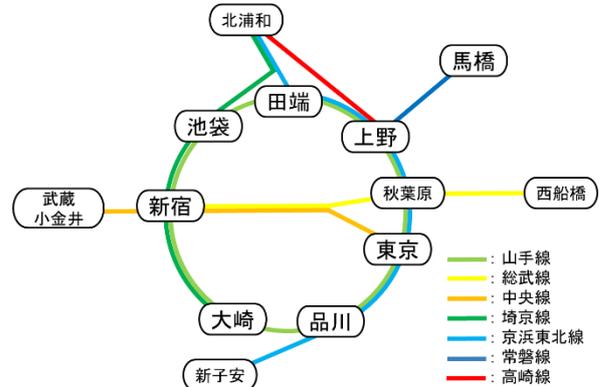


図-1 対象となる路線と駅

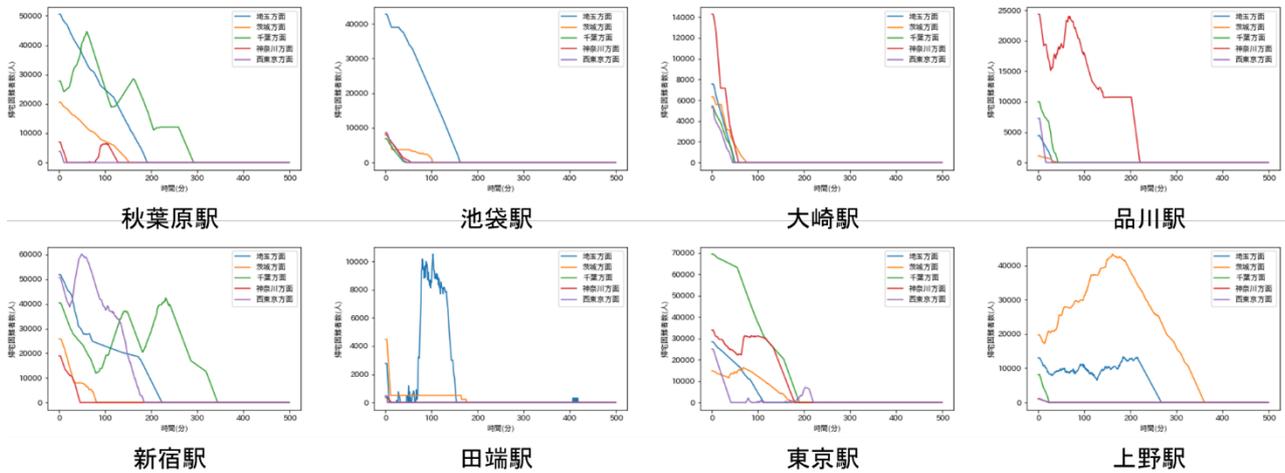


図-2 帰宅困難者数の推移

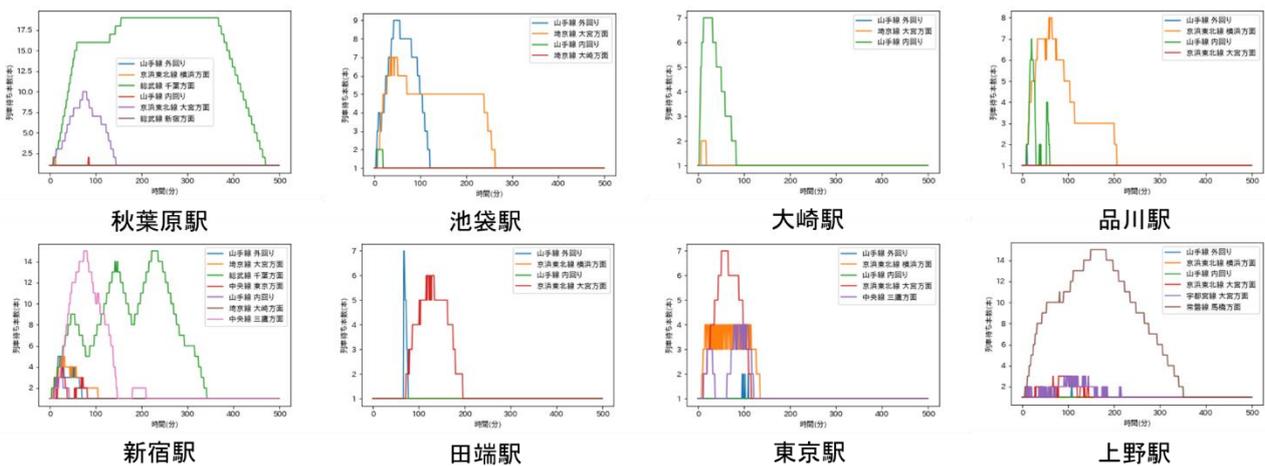


図-3 列車待ち本数の推移

本研究では山手線8駅を出発駅として、各方面を目的地としたシミュレーションを行った。図-2は山手線の各駅の帰宅困難者数の推移を示したグラフであり、図-3は各駅の列車待ち本数を示したグラフである。図-2において、池袋駅、大崎駅はシミュレーション開始後から一定に減少しているが、他の駅は最初に減少した後に、帰宅困難者数が増加している箇所がある。これは、それらの駅が各方面の最終乗換駅となっていることにより、各駅から帰宅困難者が集中していると考えられる。東京駅は、最終乗換駅ではないが、中央線の始発駅となっていることが要因であると考えられる。これに応じて形で各駅の列車待ち本数は上昇している。特に、秋葉原駅、新宿駅、上野駅の混雑が激しいことが確認できる。これは、西東京方面、千葉方面、茨城方面への乗換駅が1つもしくは2つに限定されるため、非常に混雑していると推察される。品川駅、田端駅も神奈川方面、埼玉方面への最終乗換駅であるが、それらの駅以外での乗り換えが可能であるため、大きな混雑が発生しなかったと推察される。

帰宅困難者の集中は大規模な混雑に繋がり、大規模な混雑は利用者の混乱だけでなく、鉄道の運転再開にも大きな影響が発生すると考えられるため、大きな混雑の発生は避けるように運用を行う必要がある。

4. まとめ

本研究では、Dynamic hyperpath による準動的配分を災害時の列車運行に対して適用した。その結果、各方面への最終乗換駅が非常に混雑することが示された。また、都心部の路線よりも都心から郊外へ延びる路線から優先的に復旧し、帰宅困難者を少しずつ移動させることで、大規模な混雑の発生を避けることが最適と考える。

今回のシミュレーションでは、小規模ネットワークでの分析に留まり、大規模ターミナル駅である東京駅があまり混雑しなかったなど、実際とは異なると想定される結果が得られている。よって、今後の課題として、首都圏全体での適用がある。首都圏全体でシミュレートすることにより、より現実的な予測が可能となる。これにより各ターミナル駅の混雑が度合いの高低が検証ができるため、より詳細な運転再開線区の検討が可能になる。また、全路線一斉に復旧した場合のみでなく、郊外へ延びる路線から順次復旧させるなどの、多様な復旧のシナリオを踏まえて検討することで様々なシチュエーションでの適用が可能となる。その他にも駅間の距離が短い場合、徒歩での移動をする帰宅困難者が発生すると考えられるため、移動手段の一つとしてモデルに組み込んで検討することで、より現実に近いシミュレーションになると考える。

参考文献

- 1) 中央防災会議首都直下地震対策検討ワーキンググループ：首都直下地震の被害想定と対策について(最終報告)2013年12月
- 2) 金子雄一郎・佐野在人・横山茂樹・井上真志：災害対策のための鉄道の運転状況に基づく OD 間接続性評価システムの構築，土木学会論文集 F6(安全問題)，Vol.70, No.2, I_99-I_106, 2014
- 3) Spiess, H. and Florian, M.: Optimal strategy: A new assignment model for transit network, Transportation Research Part B: Methodological, Vol.23, pp.83-102, 1989.
- 4) Valentina Trozzi, Guido Gentile, Michael G.H. Bell, Ioannis Kaparias : Dynamic user equilibrium in public transport networks with passenger congestion and hyperpaths, Transportation Research, Part B 57, 266-285, 2013.

OPTIMAL MANAGEMENT STRATEGY OF RAILWAY NETWORK IN EARTHQUAKE

Shuma YAMAMOTO, Hideki YAGINUMA, Shintaro TERABE, Nan KANG and Kosuke TANAKA

In this research, we consider a line section that gives priority to resuming railway operation, in order to resolve early disappearance of those who are unable to return home in the event of a disaster. Using the Dynamic Hyperpath model, real traffic is reproduced based on congestion of stations at the time of disaster, and simulation is performed. As a result of the analysis, it was shown that large congestion occurred at the final transfer station from within the Yamanote Line. For this reason, in order to avoid the occurrence of large congestion, we think that it is necessary to restore from the city line extending from the city center to the suburbs instead of resuming operation from the city center line.