

震災後の鉄道輸送再開のあり方 —最適化モデルによるアプローチ—

Approaches to Resuming Railway Transportation After Earthquakes
—An Optimization Model Approach—

仲野 ゆい*
Yui NAKANO

*地域計画学・レジリエンス計画研究室（指導教員：奥村 誠 教授）

The management of stranded commuters after a massive earthquake in a metropolitan area is a critical issue for preventing secondary confusion during railway service resumption. This study proposes introducing a pre-determined “transport order” and attempts to derive a highly acceptable sequence using mathematical optimization. To derive the order, we developed a three-step approach: exploring a solution that satisfies tolerance limits for rapidity and directness, creating priority weights based on the ideal solution, and verifying the reproducibility using a weight-based model. Based on the developed method, a simulation targeting the Greater Tokyo Area was conducted using population distribution data from Mobile Spatial Statistics. Numerical experiments demonstrated that the proposed method generates a robust transport order that remains stable even under uncertain disaster scenarios with reduced transport capacity.

Key Words: stranded people, disaster, optimization model, rail transport, Tokyo metropolitan area

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災では、首都圏において鉄道各線が運行を停止し、約 515 万人に及ぶ帰宅困難者が発生した。その後、関係機関によりガイドラインの策定・改訂が進められ¹⁾、一斉帰宅の抑制や一時滞在施設の確保、鉄道再開時の新たな混乱発生の防止等が進められてきたが、鉄道輸送再開後の具体的な帰宅方策については未だ定まっていないのが現状である。

発災直後の混乱した状況下において、刻一刻と変化する路線の復旧状況や膨大な帰宅困難者の動的分布をリアルタイムに収集し、即座に最適な輸送計画を策定・実行することは極めて困難である。したがって、発災前にあらかじめ「誰から、どのような経路で帰宅させるか」という大枠の「輸送順序」を定めておき、事前に周知しておくことが、輸送再開後の混乱を抑制し円滑な帰宅を実現する上で、現実的かつ有効な手立てとなるのではないかと考える。ここで、策定する輸送順序の実効性を担保するためには、その順序が利用者にとって納得できるものがあることが必要となる。帰宅困難者輸送に関する先行研究には、社会的な課題解決のみに主眼を置いた輸送計画を提案したもの²⁾があるものの、導き出された結果に対して、行動変容を求められる当事者が納得感を得られるかという点については言及されていない。

そこで、本研究では、災害後の鉄道復旧時における混乱を解消する方法として、事前に「輸送順序」を与えておく方策の導入を提案し、受容性の高い輸送順序を導出するための手法を提案することを目的とする。

2. 本研究の特徴

(1) 本研究のアプローチ

受容性の高い輸送順序を導出するために、本研究で

は数理最適化を用いた以下の 3 段階のアプローチを採用する。第一に、「制約条件付き最適化（Step 1）」を行う。ここでは、各利用者の輸送順序・経路に対する許容限界を最適化モデル上の制約条件として設定し、全ての利用者が許容範囲内に収まる実行可能解を導出する。第二に、第一段階の計算結果を用いた「輸送順序の作成（Step 2）」を行う。Step 1 の解において出発時刻が早いグループほど高い優先度を持つと解釈し、出発順序に対応した重みを定義する。第三に、「重み付き最適化モデルによる検証（Step 3）」を行う。算出した重みを目的関数に組み込んだモデルを構築し、優先度を反映した重みを用いた制御で許容範囲を満たす輸送が再現可能かを確認する。さらに、鉄道ネットワークを変動させて計算を行い、災害時の不確実性に対する輸送順序の頑健性を検証する。

(2) 許容範囲の設定

帰宅困難者が許容できる範囲を定量的に示すための指標として、以下の 2 つの観点から設定する。

① 迅速性：システム全体で最も早く帰宅できる人と比較した際の「到着時刻差」を設定する。これが許容限界値内に収まることを条件とすることで、特定のグループに対する不当な遅れを防止する。

② 直達性：OD に付与された経路の中で最短所要時間を持つ経路と比較した「所要時間差」を設定する。これが許容限界値に収まることを条件とすることで、過度な迂回による移動時間の増大を抑制する。

(3) 本研究の対象

帰宅困難者問題が最も深刻化すると予想される首都圏を対象とする。人口分布は、モバイル空間統計による 2024 年 4 月の平日 15 日～19 日の 15 時時点の平均分布を用い、ここから抽出される帰宅困難者数の推計値を需要とする。鉄道ネットワークは、災害時の物理的な遮断予

測は困難であるため、まずは通常時の標準的なネットワークを用いた計算を行う。対象とする移動は、東京都23区内を出発地とし、郊外方向へ向かう移動を含む OD とし徒歩帰宅者を考慮して、OD間距離が 15km 以上である移動を抽出する。

3. 数理最適化モデルの構築

(1) モデルの基本定義

最適化モデルに用いる主要な記号定義を表 3-1 に示す。本モデルでは、共通の出発駅・到着駅および出発可能時刻を持つ移動をグループ g として扱う。ここで、出発可能時刻は、都心を横断する広域 OD における都心部への流入時間のずれを考慮するために設定するものである。また、計算負荷の低減と現実的な経路選択を考慮し、最短経路との所要時間差が上限値 θ_{travel} 以内となる経路のみを候補経路集合 R_i として定義する。決定変数は、「グループ g の需要のうち、経路 r を選択し、出発時刻 k_0 に割り当てる人数 x_{g,r,k_0} 」と定義する。

(2) Step 1 : 許容範囲制約付き最適化モデル

式(1)のように各利用者の「迅速性（到着時刻）」と「直達性（所要時間）」の双方を考慮したコスト最小化を目的関数 Z とした最適化モデルを構築する。

$$\text{Min } Z = \sum_{g \in G} \sum_{r \in R_i} \sum_{k_0 \in k_{0,g,r}} ((k_0 + F_{i,r}) + F_{i,r}) \cdot x_{g,r,k_0} \quad (1)$$

制約条件として、式(2)～式(4)の容量制約、需要制約、非負制約に加え、以下の 2 つの許容条件を課す。なお、式(2)において $T_{i,r,s}$ は ODペア i が経路 r で区間 s に到達するまでの所要時間を表す。

$$\sum_{g \in G} \sum_{r \in R_i} \sum_{k_0 \in k_{0,g,r}: k_0 + T_{i,r,s} = k} x_{g,r,k_0} \leq C_{s,k} \quad (2)$$

$$\sum_{r \in R_i} \sum_{k_0 \in k_{0,g,r}} x_{g,r,k_0} = D_g \quad (3)$$

$$x_{g,r,k_0} \geq 0 \quad (4)$$

①迅速性制約：到着時刻が、ネットワーク全体での最早到着可能時刻 T_{min}^{all} に許容限界値 B_{arr} を加えたデッドラインを超過しないこと。

$$(k_0 + F_{i,r}) \cdot x_{g,r,k_0} \leq (T_{min}^{all} + B_{arr}) \cdot x_{g,r,k_0} \quad (5)$$

②直達性制約：経路の所要時間 $F_{i,r}$ が、最短所要時間 F_i^{min} に許容限界値 B_{travel} を加えた上限を超過しないこと。

$$F_{i,r} \cdot x_{g,r,k_0} \leq (F_i^{min} + B_{travel}) \cdot x_{g,r,k_0} \quad (6)$$

(3) Step 2 : 輸送順序の作成

Step 1 で得られた解 x_{g,r,k_0} に基づき、各グループの平均出発時刻を第一キー、平均到着時刻を第二キーとして全グループの順位付けを行い、順位 $Rank_g$ を決定する。この順位を用いて、上位のグループほど大きな値となる重み係数 W_g を式(7)により算出する。ここで N_{max} は全グループ数、 $offset$ は定数である。

表 3-1 モデルの記号定義

記号	定義
$G(g)$	共通の OD・出発可能時刻を持つ移動需要グループ
$I(i)$	ODペアの集合
$R_i(r)$	ODペア i に対する候補経路の集合
$S(s)$	鉄道ネットワーク上の区間集合
$K(k)$	区間 s の出発時刻の集合
$K_{0,g,r}(k_0)$	グループ g が経路 r を選択した際に選択可能な出発時刻の集合
x_{g,r,k_0}	グループ g の需要のうち、経路 r ・出発時刻 k_0 に割り当てる人数
D_g	グループに属する移動需要量
$F_{i,r}$	ODペア i が経路 r を利用した際の所要時間
F_i^{min}	ODペア i における最短所要時間
$C_{s,k}$	区間 s の時刻 k における列車の輸送容量
W_g	グループ g の重み係数
T_{min}^{all}	ネットワーク全体での最早到着可能時刻
B_{arr}, B_{travel}	迅速性および直達性の許容限界値

$$W_g = N_{max} - Rank_g + offset \quad (7)$$

(4) Step 3 : 重み付き最適化モデルによる検証

Step 2 で算出した重み係数 W_g を導入し、以下の目的関数 Z' を最小化するモデルを構築する。

$$\text{Min } Z' = \sum_{g \in G} \sum_{r \in R_i} \sum_{k_0 \in k_{0,g,r}} W_g \cdot (k_0 + (k_0 + F_{i,r})) \cdot x_{g,r,k_0} \quad (8)$$

このモデルにより得られた解からグループごとの平均到着時刻および平均所要時間を算出し、Step 1 で用いた許容限界値 B_{arr} および B_{travel} を超過していないかを判定することで、輸送順序の有効性を検証する。

4. 検証用データの作成

(1) 鉄道ネットワークデータの作成

国土数値情報の「鉄道（ライン）」データから駅および路線の接続関係を取得し、Yahoo!路線情報の運行情報を用いて所要時間と運行頻度を設定することで、グラフ構造を持つ鉄道ネットワークデータを構築する。災害時の不安定な状況を考慮し、1 分単位の厳密なダイヤではなく、30 分間隔の離散時間モデルを採用する。広域ネットワークにおける計算負荷を軽減するため、複数路線が乗り入れる乗換駅は独立ノードとして維持しつつ、単独路線のみの駅については同一市区町村内の代表駅（乗降客数最大駅）に集約する簡略化を行う。輸送容量の設定においては、各路線の車両編成数および定員に対し、災害時の混雑率として 150%（肩が触れ合う程度）を許容する設定とし、これに 30 分あたりの運行本数を乗じて区間容量 $C_{s,k}$ を算出する。

(2) 帰宅困難者 OD データの作成

モバイル空間統計（2024 年 4 月の平日 15 時時点）の

500m メッシュデータを用い、滞在地市区町村と居住地市区町村が異なる人口を帰宅困難者として抽出する。駅単位の OD データを作成するため、以下の手順で出発駅、到着駅および候補経路を定義する。

①出発駅の設定：各メッシュの重心から最短距離の駅を探査し、そのメッシュの帰宅困難者を当該駅の出発需要として割り当てる。

②到着駅の設定：居住地市区町村内のどの駅に帰宅するかを定めるため、夜間人口（0 時～5 時）と昼間人口の差分から、そのメッシュへ帰るべき「要帰宅者数」を算出し、これを居住地市区町村内の最近傍駅に集計する。この集計値の比率を各駅の「受け入れ割合」とし、出発駅に割り当てられた需要をこの割合に従って居住地内の各駅に配分することで到着駅を決定する。

③広域 OD の集約：千葉・埼玉・神奈川間で東京都心を横断するような長距離移動については、都心部から郊外への移動区間を分析対象とするため、出発駅を「東京駅」に再集約する。その際、本来の出発地から東京駅までの移動時間を考慮し、距離に応じて 30 分～120 分の出発可能時刻 d を設定する。以上を踏まえ、設定した対象 OD 数を表 4-1 に示す。

④候補経路の算出：各 OD ペアに対して所要時間が短い順に最大 3 本の経路を抽出する。代替経路としての有効性を保つため、既に選出された経路と 7 割以上の区間が重複する経路は除外対象とし、多様な選択肢をモデルに与えるようにした。

5. 数値実験

(1) 計算条件の設定

第 4 章で作成したデータセットに対し、提案手法を適用した。Step 1 における許容範囲の設定として、迅速性に関する許容限界値 B_{arr} を 1380 分、直達性に関する許容限界値 B_{travel} を 30 分に設定した。また、候補経路の探索範囲を決定するパラメータ θ_{travel} については、 B_{travel} と整合させ、計算上の探索範囲を効率化するために 30 分に設定した。Step 2 において重みを算出するためのパラメータとして、計算上の安定性を保つためのオフセット定数 $offset$ を 1.0×10^6 に設定した。

(2) 標準ケースにおける有効性検証

まず、標準的な鉄道ネットワークを用いて Step 1 を行った結果、全ての帰宅困難者を許容範囲内に帰宅させる実行可能解が得られた。このとき、99.9% の利用者が最短経路を選択していた。次に、算出された重み W_g を用いて Step 3 を行った結果、到着時刻分布（図 5-1）の形状は Step 1 の理想解と非常に類似した傾向を示し、重みによって輸送順序を事前に与えておくことで、混乱の生じない輸送を実現できることが確認された。経路選択（図 5-2）に関しては、最短経路利用率は 59.1% となったが、残りの約 4 割も全て候補経路として与えられた直達性許容範囲の迂回経路を選択しており、分散帰宅としての妥当性が保たれている。

表 4-1 対象 OD (網掛け部以外) および OD ペア数

	d	東京都	埼玉県	千葉県	神奈川県
東京都 23区内	0	10723	9237	9626	11860
	30			590	259
埼玉県	60			1196	1064
	120			119	350
千葉県	30		198		324
	60		1049		1258
神奈川県	120		219		446
	30		185	719	
神奈川県	60		1347	1466	
	120		249	217	

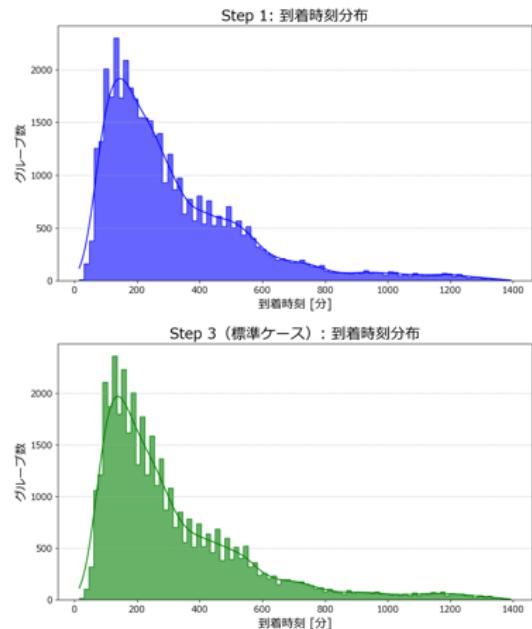


図 5-1 Step 1 と Step 3 における到着時刻の分布

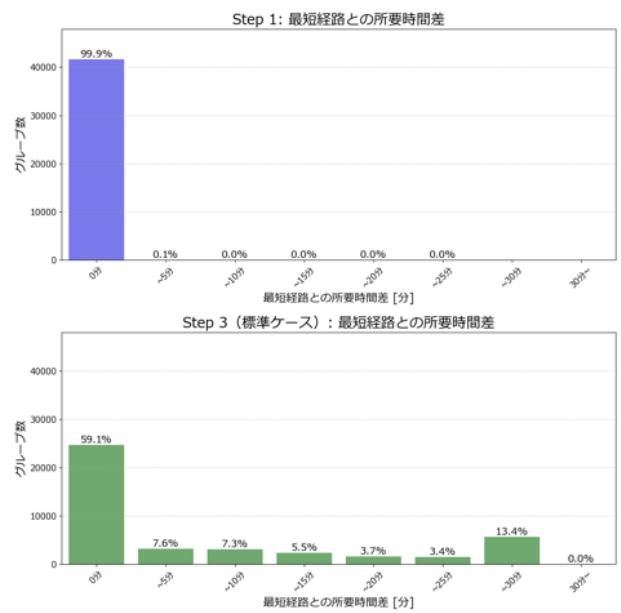


図 5-2 Step 1 と Step 3 における所要時間差

(3) 輸送容量変更時の安定性検証

Step 1 で算出された出発時刻は、あくまで計算時に仮定した移動需要と輸送資源に対する最適解である。しかし、実際の災害時において、それらが事前に想定した通りであるとは限らない。したがって、不確実性の高い災害時においては、状況が変化しても揺らぎにくい相対的な「輸送順序」を策定しておくことが有効である。そこで本節では、Step 2 で得られた重みについて、条件が変わっても著しい混乱が生じないことを検証するための方法を示すべく、一例として特定のシナリオを仮定し、Step 3 の計算を行った結果を示す。

本稿では、一例として輸送容量を一律 80% に制限し、かつ輸送力の小さい下位 10% の路線を 120 分間運休させる「輸送容量縮退ケース」を作成した。この条件下で、標準ネットワークから Step 2 で算出した重み W_g を適用し、Step 3 の計算を行った。結果として、ボトルネックの発生により出発時刻には大幅な遅延が生じ、図 5-3 に示すように到着時刻分布全体が遅い時間帯へスライドすることが確認された。このとき、図 5-4 で標準時と縮退時の輸送順序の相関を確認すると、プロットは対角線と平行な帯状のラインを形成し、高い相関が維持されていた。これは、輸送容量の変化により、少々到着時刻が後ろ倒しになったグループはあるものの、相対的な順序は維持されたことを意味する。これより、絶対的な時刻に遅れが生じた場合であっても、この相対的な順序という基準を守ることで、利用者の秩序ある誘導が可能となり、現場での混乱を回避できることが示唆された。

6. おわりに

本研究では、災害後の混乱抑制策として「輸送順序」の導入を目指し、受容性の高い輸送順序を導出する 3 段階の数理最適化手法（許容解の探索、輸送順序の作成、再現性検証）を提案した。さらに、ネットワーク縮退シナリオにおける検証を行い、出発時刻には遅延が生じるもの、相対的な輸送順序は状況変化に対して頑健であることを確認した。これにより、揺らぎにくい「輸送順序」を導入する本提案の有効性が示された。

今後の課題には、第一に、多様な被災シナリオへの適用性の検証がある。本研究では、特定のシナリオで重みの有効性を示したが、実際の被災状況は無限に存在する。今後、各関係機関で議論していく際には、より多岐にわたるシナリオで検証を行い、Step 1 の重みでは対応しきれないケースに対しては、復旧状況に応じて重みを更新することで、多様な状況で適用できる輸送順序を策定する必要がある。また、利用者への具体的な通知方法や誘導策の詳細についても、今後の検討が必要である。

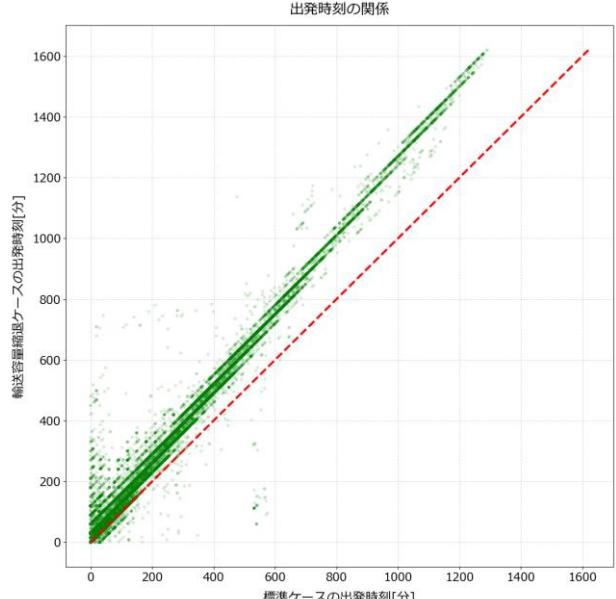


図 5-3 標準ケースと輸送容量縮退ケースの出発時刻の関係

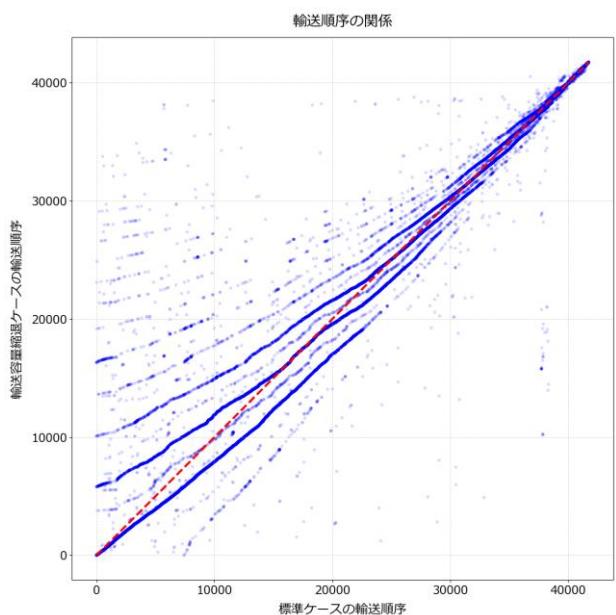


図 5-4 標準ケースと輸送容量縮退ケースの輸送順序の関係

参考文献

- 1) 内閣府（防災担当）：大規模地震の発生に伴う帰宅困難者対策のガイドライン, 2024.
- 2) 西山直輝, 室町泰徳：震災発生後の首都圏鉄道における駅滞留者の過剰発生を抑制する方策に関する研究, 公益財団法人日本都市計画学会都市計画論文集, Vol.50, No.3, pp.352-357, 2015.
- 3) 国土交通省：国土数値情報ダウンロードサイト
<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>
- 4) NTT ドコモ：モバイル空間統計とは
<https://mobaku.jp/>