

## 台風接近時に安全かつ顧客を満足させる列車ダイヤ最適化 Optimizing Train Schedules to Ensure Safety and Maximize Customer Satisfaction during Approaching a Typhoon

高江洲 瑞喜<sup>†</sup>      高橋 由泰<sup>†</sup>      野中 洋一<sup>†</sup>  
Mizuki Takaesu    Yoshiyasu Takahashi    Youichi Nonaka

### 1. はじめに

近年、地球温暖化に伴う気候変動により、台風等の自然災害が激化している[1]。過去には台風接近時に走行していた列車が強風によって横転する事故があった[2]。このような事故を防ぎ安全性を担保するために、大きな風速が観測されると列車は減速もしくは運休する場合がある。しかし、列車の減速や運休によって乗客は目的地へ到達するためにかかる時間が長くなったり目的地へたどり着けなかったりなどの不便を被る可能性がある。さらに、人口減少社会の到来とともに各地の公共交通サービスに対する旅客需要は減少傾向にある[3]。このような状況において利用者の満足度が高いサービスを構築することで、利用者の増加につながる可能性がある。そこで本研究の目的を台風時に安全かつ利用者を満足させるような輸送を実現する当日ダイヤの作成とする。本研究では台風接近時に乗客が途中の駅で降りる可能性があることに着目した。

### 2. 既存研究

[4]は乗客の乗り継ぎを考慮し、目的地にたどり着ける人数を最大化する列車ダイヤ最適化の解法を載せている。この研究では乗り継ぎの考慮は if 文を使った定式化でなされており、これを MILP(混合整数計画問題)に落として解を求めている。

[5]は列車ダイヤに乱れが生じた際に、ダイヤの変更や乗客の行動をシミュレーションすることで全乗客の不満を最小化するような列車ダイヤ最適化を行う。国交省が監修するマニュアルをもとに全乗客の不効用値を求め、その平均を評価値として利用している。この不効用値は乗客のホーム待ち時間・乗り換え回数・列車走行時間・混雑度から求められる。

### 3. 提案手法

#### 3.1 本研究で取り入れるアイデア

台風接近時に列車を稼働させる場合、強風による列車の横転等の事故が生じるリスクがある。本研究では乗客の安全性を確保するために台風が接近する時刻以降は列車が運休するようなダイヤを作成する。台風によって列車が運休する場合、乗客は当初の目的地へたどり着けない可能性がある。その場合、乗客は当初と異なる駅を目的地としてそこを目指す。当初と異なる駅を目指す理由として考えられるものは以下のものが考えられる。

- ・ 当初の目的地と異なる駅で降りてバスやタクシーを利用して当初の目的地へ向かう
- ・ 当初の目的地と異なる駅で降りて宿泊施設を利用する。

当初と異なる目的地で降りるときの不満の要因としては以下のものが考えられる

- ・ 当初と異なる目的地から目的地へ移動するための追加の金銭的・時間的コスト
- ・ 帰宅できないことによる不満・宿泊コスト(宿泊施設を利用する場合)

したがって、台風時に乗客は複数の目的地を持ち、目的地ごとにたどり着いたときの満足は異なると考えられる。以降では目的地は当初の目的地だけでなく当初とは異なる目的地(=途中駅)も意味する。

#### 3.2 本研究で提案するシステム

本研究で提案するシステムは図 1 の通りになっている。鉄道ネットワークモデル・乗客モデル・台風の進路情報を入力し、安全性を確保しつつ全体の不満度が小さくなる運行計画の策定を行い、運行計画と乗客の経路を出力する。運行計画の策定は前日の終電から当日の始発の間にかけて行われ、始発以降は策定された計画に従って列車が稼働する。

本研究は以下の前提条件に従って進められる

- ・ 乗客が利用する時刻や出発駅、目的地が分かっている
- ・ 運転計画の策定は台風が来る当日の朝までに行う
- ・ 台風の進路は分かっている
- ・ 乗車する移動手段の運行計画は全てコントロールできる

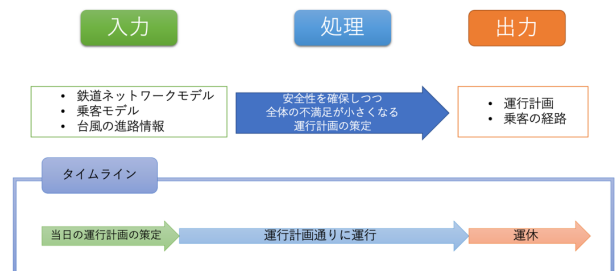


図 1 本研究で提案するシステム

<sup>†</sup> 京都大学大学院 情報学研究科 Graduate School of Informatics, Kyoto University

## 4. 評価実験

### 4.1 モデルについて

本研究では乗客の安全性を確保しつつ全乗客の不満足度の総和を最小化するような列車ダイヤと乗客の移動経路を求める問題を MILP で立式し、数理最適化ソルバーを用いて解いた。

目的関数は以下の式の通りである。

$$\sum_{k \in K} q^k f(k)$$

ここで  $K$  は全乗客グループを意味する。本研究では乗客グループを「出発駅・目的駅・途中駅で降りるときの満足度・出発駅に着く時刻」が同じ乗客の集合とする。 $q^k$  は乗客グループ  $k$  の構成人数、 $f(k)$  を乗客グループ  $k$  の不満足度とする。

制約は「乗客が目的駅へ安全に到達できるかどうかを判定するための制約」と「乗客の不満足度を定めるための制約」の 2 つから成る。

「乗客が目的駅へ安全に到達できるかどうかを判定するための制約」は  $z^{k,l,s} (=1$  なら安全性を考慮せずに乗客グループ  $k$  が路線  $l$  の駅  $s$  にたどり着ける。0 ならそれ以外) と  $b_{i,s} (=1$  なら駅  $s$  に着くとき列車  $i$  が安全に稼働するか。0 ならそれ以外) から  $z^{k,l,s} (=1$  なら乗客グループ  $k$  が路線  $l$  の駅  $s$  に安全にたどり着ける。0 ならそれ以外) を求めるための制約である。 $z^{k,l,s}$  は文献[4]を利用して求める。 $b_{i,s}$  に関しては以下の制約がある

$$b_{i,s-1} \geq b_{i,s} - ①$$

$$b_{i,s} = 0 \text{ if } t_{i,s}^{arr} > typ_s - ②$$

ただし、 $t_{i,s}^{arr}$  は列車  $i$  が駅  $s$  に到着する時刻を表す変数、 $typ_s$  は駅  $s$  に台風が来る時刻を表すパラメータである。式 ① はある駅が稼働していなければその次の駅も稼働しないことを意味しており、② は列車が駅に到着する時刻よりも前に台風が接近する場合はその列車は稼働しないことを意味している。 $z^{k,l,s}$  に関しては以下の式が成り立つ。

$$z^{k,l,s} = 1 \text{ if } z^{k,l,s-1} = 1 \text{ かつ } b_{i,s} = 1$$

これは「安全性を考慮せずに目的駅にたどり着き」なおかつ「目的駅にたどり着くときに列車が安全に稼働している」なら「乗客は目的駅へ安全にたどり着ける」ことを意味している。

「乗客の不満足度を定めるための制約」は  $f(k) (=$  グループ  $k$  の乗客の不満足度) を定めるための制約となっており、以下の制約がある

$$f(k) = \min_{z^{k,l,s}} \{g(k, l, s) + C_{k,l,s}^{target}\}$$

$g(k, l, s)$  はグループ  $k$  の乗客が路線  $l$  の駅  $s$  を目的駅としたときに移動中の不効用値であり、[6]に記載されている費用便益分析の一部を用いて求める。 $C_{k,l,s}^{target}$  はグループ  $k$  の乗客が路線  $l$  の駅  $s$  を目的駅としたときに生じる不満足度であり、今回の実験ではこの値の適切な求め方が分からないので仮の定数値を利用する。

### 4.2 入力ケース

今回の実験では 2 つのケースに対して実験を行った。対象となる路線は地下鉄東西線・地下鉄烏丸線・JR 奈良線である。路線図は図 2 の通りである

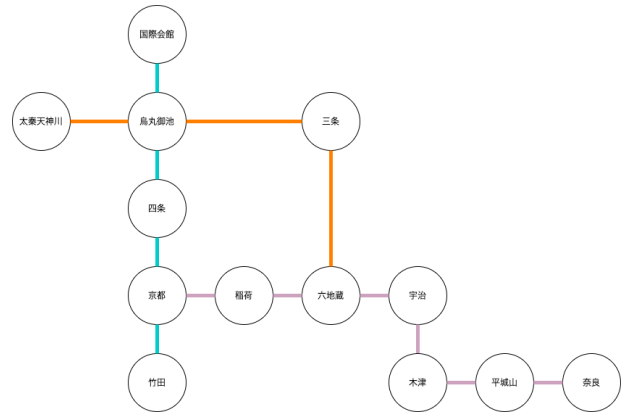


図 2 路線図(出発駅・目的駅・乗換駅のみ図示)

入力として与えられる乗客グループは 6 つあり、それぞれのグループの人数は 100 とする。また、各グループの乗客が使用する経路は予め入力で与え、乗り換え時間は 5 分とする。各乗客グループは列車を使わずに始発駅に留まる場合は 100000 の不満足度がかかり、途中駅で降りる場合は表 1 に書いてある通りの不満足度がかかる。入力として与えられる列車は各路線に 1 本ずつ(上り・下りと普通・みやこ快速は区別する)出ており、表 2 の通りである。

表 1 乗客グループ

#	出発駅	目的駅	途中駅(不満足度)
1	国際会館	竹田	四条(10000)
2	京都	平城山	宇治(10000), 奈良(10000)
3	太秦天神川	六地藏	なし
4	烏丸御池	平城山	四条(10000), 宇治(1000), 奈良(1000)
5	烏丸御池	平城山	四条(10000), 宇治(10000), 奈良(10000)
6	竹田	六地藏	京都(10000), 稲荷(10000)

表 2 列車

#	路線(み快=みやこ快速)	駅数	発	行
1	烏丸線-上り	15	竹田	国際会館
2	烏丸線-下り	15	国際会館	竹田
3	東西線-上り	17	太秦天神川	六地藏
4	東西線-下り	17	六地藏	太秦天神川
5	奈良線-上り-普通	21	奈良	京都
6	奈良線-下り-普通	21	京都	奈良
7	奈良線-上り-み快	8	奈良	京都
8	奈良線-下り-み快	8	京都	奈良

各乗客が出発駅に来る時刻は 1000 となっており、台風が接近する時刻は入力ケース 1 では 1100 で入力ケース 2 では 1050 となっている。なお、東西線はすべての区間が地下にあるため台風が接近しても安全に稼働できる。

表 3 入力ケースごとの台風接近時刻

	台風接近時刻
入力ケース 1	1100
入力ケース 2	1050

#### 4.3 実験環境

実験使用したマシンは MacBook Air (Retina, 13-inch, 2020), メモリは 16GB, プロセッサは 1.1 GHz クアッドコア Intel Core i5 である。実験用プログラムで使用した言語・ライブラリは Python・pulp・CPLEX となっている。

#### 4.4 実験結果

実験を行った結果、乗客の移動経路は表 4, 5 の通りになった。なお、どちらのケースも実行時間は 0.01 秒未満だった。

表 4 乗客の移動経路(ケース 1)

	乗客の経路
グループ 1	烏丸線: 竹田(1000 発)→京都(1028 着)
グループ 2	奈良線: 京都(1000 発)→平城山(1061 着)
グループ 3	東西線: 太秦天神川(1000 発)→六地藏(1035 着)
グループ 4	烏丸線: 烏丸御池(1014 発)→京都(1020 着) 奈良線・み快: 京都(1025 発)→奈良(1072 着)
グループ 5	烏丸線: 烏丸御池(1014 発)→四条(1015 着)
グループ 6	烏丸線: 竹田(1014 発)→京都(1020 着) 奈良線・み快: 京都(1025 発)→六地藏(1038 着)
評価値	2528000

表 5 乗客の移動経路(ケース 2)

	乗客の経路
グループ 1	烏丸線: 竹田(1000 発)→京都(1028 着)
グループ 2	奈良線: 京都(1000 発)→宇治(1024 着)
グループ 3	東西線: 太秦天神川(1000 発)→六地藏(1035 着)
グループ 4	烏丸線: 烏丸御池(1014 発)→四条(1015 着)
グループ 5	烏丸線: 烏丸御池(1014 発)→四条(1015 着)
グループ 6	烏丸線: 竹田(1000 発)→京都(1007 着) 奈良線・み快: 京都(1012 発)→六地藏(1025 着)
評価値	3774000

ケース 1 の評価値はケース 2 と比べて低い値を出しているが、これはケース 1 の台風が接近する時刻がケース 2 と比べて遅いので制約が緩くなり、その分良い解が得やすくなったためだと考えられる。

グループ 2 の乗客はケース 1 では平城山で降りているがケース 2 では宇治で降りている。これは台風が接近する時刻が早まったことで当初とは異なる目的駅で降りざるを得なくなったためだと考えられる。グループ 4 も同様に途中駅で降りざるを得なくなったと考えられる。

#### 5. まとめ

台風時は乗客が途中駅で降りる可能性があるので途中駅を目的駅の一つと見なすことで複数の目的駅を持つと解釈し、そこに注目した。乗客の安全性を確保しつつ満足度を最大化するような問題を MILP で定式化し、数理最適化ソルバーを使って実験を行った。実験の結果乗客が複数の目的駅を持つ場合は台風が接近する時間が変化させることで目的駅が変わることを確認した

今後の課題としては途中駅で降りたときの適切な満足度の求め方を決める・乗客が取りうる経路を入力で与えるのではなく数理モデルに組み込む・規模の大きいデータ(乗客グループ・駅・路線の数を増やしたケース)で実験の実施などがある。

#### 参考文献

- [1] 森本 輝. “気候変動時代の防災対策の確立に向けて.” 水文・水資源学会誌, 2019, 32.3: 125-127
- [2] 九州旅客鉄道株式会社 日豊線南延岡駅構内列車脱線事故 (旧航空・鉄道事故調査委員会), 2008
- [3] 国土交通省 「地域公共交通サービスの評価に関する調査研究」 <https://www.mlit.go.jp/pri/kikanshi/pdf/2016/61-2.pdf> (2021/6/18)
- [4] ZHOU, Yu, et al. Last train scheduling for maximizing passenger destination reachability in urban rail transit networks. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 129: 79-95.
- [5] 國松武俊, et al. 利用者デマンドを考慮した運転整理案作成アルゴリズムの開発. RTRI REPORT, 2009, 23.8.
- [6] 国土交通省 鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル (2012年改訂版)