

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01199

研究課題名(和文) トータルな視点からの鉄道のダイヤ乱れへの対応策の最適化

研究課題名(英文) Optimization of railway system from total viewpoint

研究代表者

富井 規雄 (TOMII, Norio)

千葉工業大学・情報科学部・教授

研究者番号：50426029

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、長時間の運転支障が発生した場合でも良好な運転整理ができるようにすることを目的として、運転整理のしやすい列車ダイヤ(これを「強靱=resilientな運行計画」と呼ぶ)を生成するアルゴリズムを提案した。ここで、代表者らのアイデアとして、運転整理としては、best effortを仮定することとして、すでに開発した最適化アルゴリズムを適用する。また、事故の発生については、過去の事例から、事前に場所、復旧までの時間が確率的にわかっている(これをシナリオと呼ぶ)とする。この問題に対する混合整数計画法によるアルゴリズムを構築し、実用的な成果を得た。

研究成果の概要(英文)：We propose a notion “resilience” of a timetable and introduce an algorithm to make a resilient timetable. We define a timetable is resilient if we can avoid giving significant inconvenience to passengers by doing rescheduling when a large delay occurs. We propose an idea to assume the best efforts are done for rescheduling when we estimate resilience of a timetable. Based on this idea, we introduce an algorithm which produces a timetable which has minimized passengers’ disutility for a series of scenarios of accidents. Although this algorithm is a timetabling algorithm, optimized rescheduling algorithm is built in it. We have implemented the algorithm on CPLEX and confirmed that our approach is very promising.

研究分野：情報工学

キーワード：鉄道 列車ダイヤ 強靱性 アルゴリズム 最適化 混合整数計画法 運転整理

1. 研究開始当初の背景

鉄道において、人身事故や災害など、長時間に渡る運転中止を伴う支障が発生した場合には、一時的にダイヤの変更、具体的には、発車順序の変更、番線の変更、車両の使用計画の変更、途中折り返し運転など（この業務を「運転整理」と呼ぶ）を行ない、利用者になるべく迷惑がかからないようにする。特に、長時間に渡る不通区間が発生する時には、利用者になるべく迷惑をかけない良好な運転整理を行なうことが社会から強く求められている。

しかし、運転整理は、複雑で大規模な組み合わせ問題であること、多数の利用者が存在するために評価尺度を一律に決定することが難しいなどの理由により、現時点においては、指令員と呼ばれる経験を積んだ専門家によって、ほぼ人手で行なわれている。しかし、それには、多大な労力を要することから、コンピュータによる支援が求められてきた[1]。

近年になって、運転整理を自動的に行なうアルゴリズムに関する研究が盛んになってきた[2][3][4]。それらは、設備（駅の配線等）・列車ダイヤ・事故の状況（復旧見込み時刻等）を入力として、ある評価尺度を最小とする運転整理案を出力する。

これまで、鉄道システムの robustness（頑健性）と呼ばれる性質に関する研究が行なわれている。Robust な列車ダイヤとは、一般に、小規模な遅れが生じた時に、他の列車にその遅れが波及しないような列車ダイヤのことを言う。

列車ダイヤの頑健性の評価手法や頑健な列車ダイヤを生成するアルゴリズムについては、多くの研究事例が報告されている[5][6][7]。

頑健性の考察にあたっては、小規模な遅れが想定されている。小規模な遅れに対しては、列車ダイヤの変更（運転整理）は通常不要である。言い換えれば、頑健性の考察にあたっては、運転整理を考慮する必要はない。

一方、現実には、大規模な遅延の発生も少なくなく、そのような場合にも利用者になるべく迷惑をかけないような運転整理を行なうことが望まれる。

よりよい運転整理結果を得るためには、鉄道システムを、運行計画、設備計画、オペレーションのトータルな視点からとらえ、事前にこれらの方策が運転整理結果に与える影響を十分に検証し、その検証結果に基づいてこれらの方策を決定しておくことが必要である。実際、鉄道会社によっては、運転整理時に使用することを考慮して副本線を増設したり、列車の途中折り返し運転に容易に移行できるような運行計画を採用したりといった試みが行なわれている例もある。

運転整理の主な入力は、計画ダイヤ、設備（線路・車両等）、事故の状況（復旧見込み時刻等）、旅客の流動である。言い換えれば、良好な運転整理が行なえるかどうかは、計画ダイヤや

設備に依存する。例えば、駅の番線が1本多く存在すれば、その番線を使って列車の折り返しが可能になり、遅延の回復を早めることができる。さらに別の例としては、列車がある駅に到着後、次の列車として折り返し発車するまでの間に十分な時間を見込んだ計画としておけば、到着列車が遅延しても、その遅延が次に担当する列車に伝播することはない。

図1、図2に、列車ダイヤ（車両運用計画）とダイヤ乱れ時の運転整理結果の関連に関する簡単な例を示す。図1の車両運用計画においては、赤線の部分が不通となり、途中折り返し運転を行なう際には、折り返し列車は遅延することになる。一方、図2の車両運用計画においては、折り返し列車に、遅延は発生しない。

代表者らは、このように、より大規模な乱れを想定し、そのような時にも良質な運転整理が行なえる列車ダイヤ（広くは、鉄道システム）を resilient な列車ダイヤ（鉄道システム）と定義する。また、そのような性質を resilience（強靱性）と呼ぶことにする。

図1、図2は、ごく簡単な例であるが、実際に resilient な列車ダイヤ（車両運用計画）を作成するにあたっては、どこで事故や不通区間が発生するかは、事前に予測不可能であること、どのような運転整理が行なわれるかはその時によって異なる可能性があること、列車ダイヤには多数の列車が含まれていること、折り返しなどが可能かどうかは、設備（番線など）に依存することなどを考慮しなければならない。すなわち、resilient な列車ダイヤの作成は、極めて複雑な問題となる。

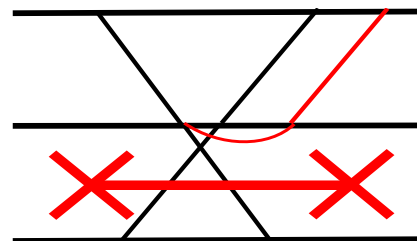


図1: 車両運用計画-1

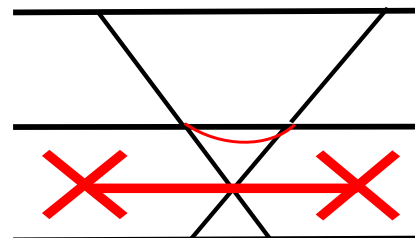


図2: 車両運用計画-2

さらに、resilient な列車ダイヤの実現は、一般には「余裕」を持つことを要求することになる。しかし、過度の余裕は経費の無駄となるため、ダイヤ乱れの頻度・規模、その時の運転整理の実施内容等を勘案して、適切な

方策を決定する必要がある。

上述のように、鉄道会社でこのような方策が考慮されているとはいえ、それらは、経験と勘に基づいて行なわれており、定量的な評価は行なわれていない。また、設備計画、運行計画、オペレーションを含めたトータルな視点からの評価ではないという問題がある。

このような背景から、これまで、鉄道システムの **resilience** という考え方や、**resilience** を高めるために、設備や列車ダイヤの最適化を行なうことを目的とした研究は、ほとんど行なわれていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、長時間の運転支障が発生した場合でも良好な運転整理ができるようにすることを目的として、列車ダイヤを含む運行計画を最適化することを考える（前節の用語を使うと、「**強靱 (resilient) な運行計画**」)。すなわち、与えられた線路設備の条件のもとで、運転整理のしやすいダイヤを生成するアルゴリズムを確立することを目的とする。

3. 研究の方法

強靱な運行計画を作成するアルゴリズムを確立するためには、事故が発生したときに、どのような運転整理を行なうのかに関する妥当な仮定が必要である。ここで、代表者らのアイデアとして、運転整理としては、**best effort** を仮定することとして、最適な運転整理が行なわれるものとする。この仮定によって、代表者らがすでに開発した最適運転整理アルゴリズムが適用できるようになる。

また、事故の発生については、過去の事例から、事前に場所、復旧までの時間が確率的にわかっている（これをシナリオと呼ぶ）と仮定する[8]。

そして、それらのシナリオごとに **best effort** の運転整理が行なわれるとして、評価値である利用者の不効用が最小になるような列車ダイヤを生成するアルゴリズムを、混合整数計画に基づいて構築する（図3）。

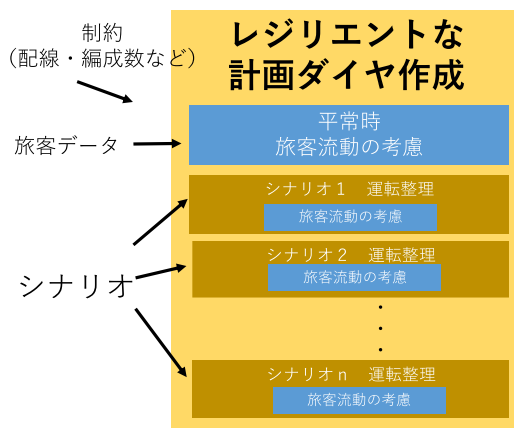


図3: アルゴリズムの全体構成
具体的には、次の手順で研究を実施した（図4）。

(1) 途中折り返し運転を考慮した運転整理アルゴリズムの構築

復旧時刻までに長時間を要すると予想される場合、列車を不通区間の手前の駅で折り返す。これは、部分運休、車両運用計画の変更、折り返し駅での番線変更を同時に作成する必要のある、複雑な問題である。他の運転整理手法をも加味した上で途中折り返し運転を考慮した運転整理アルゴリズムを、混合整数計画法によって作成する。

(2) 運転整理案の resilience を評価するアルゴリズム

運転整理案の **resilience** を利用者の不効用の視点から評価するアルゴリズムを混合整数計画法を用いて構築する。ここで、利用者の不効用は、目的駅までの到達時間、待ち時間、乗り換え回数等によって算出される。

(3) 強靱な列車ダイヤを作成するアルゴリズム

(1)(2)のアルゴリズムを組み合わせ、与えられた一連のシナリオに対して最適な運転整理を行なうとして、その場合の利用者の不効用が最小になるような列車ダイヤを作成するアルゴリズムを作成する。

代表者らのアルゴリズムは、与えられた OD データ(旅客の出発駅・目的駅・出現時刻からなるデータ)に対し、旅行時間(出現時刻から目的駅到着時刻までの時間)が最小になるような計画ダイヤを作成し、そのダイヤにシナリオ(想定しうる遅延・支障発生の場合)ごとに、独立に運転整理アルゴリズムを実行する。すなわち、計画ダイヤの作成と運転整理アルゴリズムを同時に実行して全体の最適化を行なうことが代表者らのアルゴリズムの特徴である。

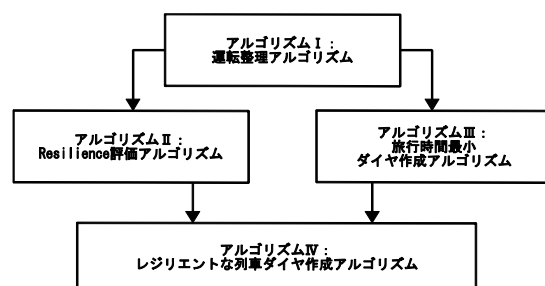


図4: 開発手順

4. 研究成果

次の成果を得た。

- (1) 他の運転整理手法をも加味した上で途中折り返し運転を考慮した運転整理アルゴリズムを、混合整数計画法によって作成した。
- (2) 運転整理案を利用者の不効用の視点から評価するアルゴリズムを混合整数計画法を用いて構築した。
- (3) **resilient** な列車ダイヤを作成するアルゴリズム

与えられた一連のシナリオに対して強靱な列車ダイヤを作成するアルゴリズムを構築した。

さらに、実用規模のテストケースに対して、構築したアルゴリズムを適用し、強靱な列車ダイヤが実用的な時間で出力されることを確認した。

なお、混合整数計画法をこのような複雑な問題に適用する場合、処理時間が問題となる。そこで、アルゴリズムの高速化にも注力した。具体的には、次の方策を実施し、処理速度短縮に効果があることを確認した。

- 決定変数そのものを削減する。
 - 決定変数の決定範囲を縮小する。
 - 一部の決定変数の値をあらかじめ決定しておく。
 - 制約式を簡略化する。
 - 決定変数を整数型から実数型に変更する。
- これらについても、有用な成果であると言える。

<引用文献>

- [1] 富井規雄他：鉄道ダイヤ回復の技術，オーム社，2010.
- [2] Cacchiani V, Huisman D, Kidd M, Kroon L, Toth P, Veelenturf L, Wagenaar J (2014) An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling. *Transportation Research Part B: Methodological* 63:15–37, DOI 10.1016/j.trb.2014.01.009
- [3] Corman F, Meng L (2015) A review of online dynamic models and algorithms for railway traffic management. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 16(3):1274–1284, DOI 10.1109/TITS.2014.2358392
- [4] Fang W, Yang S, Yao X (2015) A survey on problem models and solution approaches to rescheduling in railway networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 16 (6) : 2997–3016, DOI 10.1109/TITS.2015.2446985
- [5] Carey, M. : Ex ante heuristic measures of schedule reliability, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 33, Issue 7, 1999.
- [6] Takeuchi, Y., et al. : Evaluation Method of Robustness for Train Schedules, *Quarterly Report of RTRI*, No.4, Vo.48, pp.197-201, 2007.
- [7] Kroon, L., et al. : Stochastic improvement of cyclic railway timetables, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 42, Issue 6, 2008.
- [8] C. Liebchen, M. Lubbecke, R. Mohring, S. Stiller, 2009. “The Concept of Recoverable Robustness, Linear Programming Recovery, and Railway Applications”, in R.K. Ahuja et al. (Eds.): *Robust and Online*

Large-Scale Optimization LNCS 5868, pp. 1–27.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- (1) 今田京介, 富井規雄：途中折り返し運転を考慮した混合整数計画法による運転整理アルゴリズム, *電気学会論文誌 D (産業応用部門誌)*, 査読有, 137(6), 484-491, 2017, DOI: 10.1541/ieejias.137.484

[学会発表] (計 6 件)

- (1) K. Imada, N. Tomii: An algorithm to make a resilient timetable, *RailLille2017 – 7th International Conference on Railway Operations Research*, 査読有, Lille, France (2017)
- (2) 今田京介, 富井規雄, レジリエントな列車ダイヤ作成アルゴリズム, 第 24 回鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-Rail2017), 朱鷺メッセ, 新潟, Dec. 12, 2017.
- (3) 鹿児島佳祐, 富井規雄, 迂回乗車と臨時列車の運転を考慮した運転整理案作成アルゴリズム, 第 24 回鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-Rail2017), 朱鷺メッセ, 新潟, Dec. 12, 2017.
- (4) 今田京介, 富井規雄：「旅行時間総和を最小にする混合整数計画法による計画ダイヤ作成アルゴリズム」, J-Rail2016 鉄道技術連合シンポジウム, 2016年12月14日, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 東京都渋谷区.
- (5) 今田京介, 富井規雄：「途中折り返し運転を考慮した混合整数計画法による運転整理アルゴリズム」, 平成 28 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 群馬大学, 群馬県前橋市, 2016 年 8 月 30 日.
- (6) 今田京介, 富井規雄：「列車運行計画の強靱性評価手法の開発」, 電気学会交通・電気鉄道研究会資料, TER-16-045, 秋田県総合保健センター, 秋田県秋田市, 2016 年 7 月 7 日.

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
富井 規雄 (TOMII, Norio)
千葉工業大学・情報科学部・教授
研究者番号：50426029