

利用者の利便性向上を目的とした
鉄道システムのスケジューリング
に関する研究

2013年6月

博士（工学）

脇坂 賢

豊橋技術科学大学

邦文要旨

本論文では、鉄道システムにおいて、特に利用者の便益（利便性）の向上を目的として、(i) 終端駅部における運行本数の最大化、(ii) 列車間の乗り継ぎ時の移動について階段移動等を伴わず旅客が円滑に乗り継げるような列車のプラットフォーム割り当て、および、(iii) 列車に遅延が生じた場合でも他の列車にその遅延の副次的波及を防ぎ、定時運行を保つような停車時間配分、の3つの課題を取り上げ、最適化問題として定式化し、現実の事例について適用した結果について論じる。

(i) 列車の運行において、到着列車と出発列車の進路が干渉しやすいことや、列車の折り返しのために停車時間が必要なことなどから、終端駅が特にボトルネックとなる。このボトルネックを解消することを目的として、複線路線の終端駅を対象とする、駅における列車の発着スケジュールの自動作成について、0-1 整数計画問題として定式化する。さらに、2つの仮定を追加した場合について、多項式時間で計算可能な二部グラフ最大マッチング問題からの多項式時間帰着を示し、極めて短時間でスケジュールを生成できることを示す。また、北陸新幹線の開業や東北新幹線の北海道への延伸などにより、今後さらに増発の需要が見込まれる、東北新幹線 東京駅の事例について提案手法を適用した結果について考察する。

(ii) 利用客の立場で考えるとき、階段移動を伴うような列車間の乗り継ぎは好ましいものではない。列車の発着時刻が与えられたときに、各々の列車にどのプラットフォームを利用させるかを決定する問題を列車発着プラットフォーム割り当て問題という。利用客の乗り継ぎに関して、同一面上のプラットフォームで乗り換えが可能である列車の組み合わせ数を最大とするような列車発着プラットフォーム割り当て問題について、0-1 整数二次計画問題として定式化し、さらに、計算速度の向上のために、0-1 整数線形計画問題に変換する。また、本手法を、新幹線の博多駅、および、新大阪駅の事例について適用し、得られた結

果について考察する．

(iii) 列車の運行において，ある列車に遅延（一次遅延）が生じた際に，優等列車の追い抜きや単線路線における列車のすれ違いにより待たされる他の列車に遅延が波及してしまうこと（一次遅延に対して二次的に波及した遅延，以下，二次遅延と呼ぶ）が起こりうる．列車の運行においては，ダイヤの乱れ等，突発的な事態に対応するべく，途中の停車駅において，最低限必要な時間を超える停車時間（以下余裕時分）が随所に配分されている．本研究では，他路線への接続などを考慮し，大域的に影響しない範囲において，余裕時分を適切に再配分し，二次遅延を生じにくい頑健な列車運行ダイヤを生成するアルゴリズムについて論じる．また，実在する3路線の事例について，提案アルゴリズムを適用した場合の運行ダイヤの評価と，遅延に関するシミュレーションを行い，遅延からの回復に関する提案手法の有用性を示す．

Studies on Railway System Scheduling for improvement of Passenger's Convenience

Abstract

This dissertation addresses passenger's convenience in railway system scheduling. The following three points are considered: (i) Maximizing the number of trains in a terminal station; (ii) Minimizing the number of transits including up and down of stairs in a platform assignment of trains; (iii) Minimizing the delay affecting other trains stoppage time distribution that prevents i.e. even if delay may arise on a train, it does not propagate to other trains and on-time services are maintained. This dissertation formulates these three subjects as optimization problems, which are solved for some actual examples.

(i) When a train operates, especially a terminal station may become a bottleneck. This is because: At a terminal station, courses of arriving and starting trains tend to interfere there, and the stoppage time of a train is required. Then, in order to dissolve this bottleneck, we formulate the arrival-and-departure schedule of the train in the station for the terminal station of a double-tracked route as a 0-1 integer programming problem. Furthermore, we show that transformation from the bipartite graph maximum matching problem to this problem is obtained in polynomial time in the case when two assumptions are added. In this case, a schedule is obtained for a short time. Moreover, we consider the result of having applied this technique to the example of Tokyo station where demand of extra trains may be caused by extension of Hokuriku Shinkansen and Tohoku Shinkansen.

(ii) The transit between trains accompanied with movement through up and down

stairs is not desirable for a passenger. When the arrival-and-departure time of each train is given, the problem that determines which platform each train makes use is called Train Platforming Problem. This problem is formulated by a 0-1 integer quadratic programming problem that maximizes the number of combinations of trains that are on the platform of the same island. Furthermore, this problem is formulated to a 0-1 integer programming problem for improvement in calculation speed. Moreover, we consider results obtained by applying this formulation to examples of Hakata Station and Shin-Osaka Station of the Shinkansen.

(iii) In operation of a train, when delay (primary delay) arises on a certain train, it may affect other trains following or kept waiting by crossing of a train i.e. secondary delay is caused. In operation of a train, in order to cope with the unexpected situations, such as disorder of a diagram, at an intermediate stop station, the stoppage time (margin time) exceeding indispensable time is distributed. In consideration of connection with other routes, etc., in the range that does not influence globally, margin time is re-distributed appropriately and the algorithm that generates the stout train operation diagram that does not cause secondary delay easily is discussed. Moreover, the usefulness of the proposed technique about recovery from delay is demonstrated by simulations on actual three examples.

発表論文リスト

(1) 審査付学術雑誌論文

1. 芳田 翔一郎, 脇坂 賢, 増山 繁, “余裕時分再配分方式を用いた遅延に対して頑健な列車計画の生成” オペレーションズ・リサーチ : 経営の科学, Vol.57(4), pp.218-228, 2012. (第 4 章に対応)
2. Ken Wakisaka, Shigeru Masuyama, “Automatic Construction of Train Arrival and Departure Schedules at Terminal Stations,” *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol.6, No.5, pp.590-599, 2012. (第 2 章に対応)
3. 脇坂 賢, 増山 繁, “乗換駅での対面乗り継ぎ可能な列車組み合わせ数の最大化を目的とした列車への発着プラットフォーム自動割り当て,” 電子情報通信学会和文論文誌 A, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J96-A, No.9, pp.614-622, 2013. (第 3 章に対応)

(2) 国際会議

1. Ken Wakisaka, Shigeru Masuyama, “Automatic Construction of Train Arrival and Departure Schedules in Terminal Stations,” *Proceedings of International Symposium on Scheduling 2011*, pp.219–224, 2011. (第 2 章に対応し, 本発表から研究をさらに進め, 論文に纏めたものが, 前述の査読付学術雑誌論文の 2. である)

(3) 国内学会発表（抜粋）

1. 脇坂 賢，増山 繁， 終端駅における列車発着スケジューリングについて， 情報学ワークショップ 2009(WiNF2009) 論文集， pp.69-72, 2009.
2. 脇坂 賢，増山 繁， 新幹線の終端駅に着目した列車発着スケジューリング， 日本オペレーションズ・リサーチ学会 春季研究発表会 2010, pp.24-25, 2010.
3. 芳田 翔一郎，脇坂 賢，増山 繁， 遅延に対して頑健な列車運行計画の生成， 情報学ワークショップ 2010(WiNF2010) 論文集， pp.295-300, 2010.
4. 脇坂 賢，増山 繁， 終端駅における列車発着スケジュールの自動作成に関する研究オペレーションズリサーチ学会第 38 回中部支部研究発表会講演論文集， pp.45-48， 2011.
5. 脇坂 賢，増山 繁， 乗換駅での乗り継ぎの利便性を考慮した発着プラットフォーム割り当てについて， スケジューリングシンポジウム 2011 講演論文集, pp.31-36, 2011.
6. 脇坂 賢，増山 繁， 乗り継ぎ列車間の対面接続の最大化を目的とした列車発着プラットフォーム割り当て, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 春季研究発表会 2012, pp.188-189, 2012.

謝辞

本研究の遂行にあたり，終始暖かく，かつ，適切なお助言を賜り，本論文の取り纏めにあたり懇切なるご指導，及び，多大なる尽力を頂いた豊橋技術科学大学大学院工学研究科増山 繁教授に心より感謝の意を示します．

本論文を纏めるにあたり，有益かつ建設的なご助言，ご指導を頂いた豊橋技術科学大学大学院工学研究科 石田 好輝教授，同大学院工学研究科 清水 良明教授，同大学院工学研究科 藤戸 敏弘教授の皆様方に深く感謝致します．

研究を実際に行う場を提供して頂き，再三に渡って議論にお付き合い頂いた増山研究室（言語データマイニング・アルゴリズム研究室）の皆様，特に同じ鉄道を研究テーマに選び共に取り組んだ芳田翔一郎君に感謝致します．

博士課程を修了する間，多大なる補助を頂いた文部科学省グローバル COE プログラム「インテリジェントセンシングのフロンティア」関係者の皆様，並びに，豊橋技術科学大学グローバル COE 推進室の皆様方に深く感謝致します．

最後に，常に私を励まし，支え続けてくれた両親と，研究の道を志すことを応援してくれた亡き祖父には深い感謝の意を表して謝辞と致します．

目次

第 1 章	序論	1
1.1	鉄道スケジューリングの現状	1
1.2	鉄道スケジューリングに関する研究と需要	6
1.3	本論文の構成	10
第 2 章	終端駅における列車運行本数最大化	13
2.1	まえがき	13
2.2	諸定義	15
2.3	0-1 整数計画問題への定式化による解法	17
2.4	2 部グラフ最大マッチング問題からの帰着による解法	23
2.5	まとめ	26
第 3 章	対面乗り継ぎ最大化を目的とする列車プラットフォーム割り当て	27
3.1	まえがき	27
3.2	諸定義	29
3.3	0-1 整数計画問題への定式化による解法	32
3.4	実例に基づく実験	39
3.5	まとめ	49

第 4 章	列車運行における二次遅延を抑制するリスケジューリング	51
4.1	まえがき	51
4.2	諸定義	54
4.3	余裕時分ネットワークモデルについて	60
4.4	定式化	63
4.5	実路線を対象とした列車計画の生成	65
4.6	遅延に対する頑健性の評価実験	71
4.7	まとめ	76
第 5 章	結び	77
5.1	まとめ	77
5.2	今後の課題	79

目次

1.1.1 鉄道スケジューリングの流れ	3
2.1.1 東北新幹線東京駅構内配線図	15
2.2.1 東北新幹線東京駅における移動可能性	16
2.3.1 得られた列車計画	22
2.4.1 2部グラフ最大マッチングへの帰着	24
2.4.2 2部グラフ最大マッチングの解	24
3.3.1 博多駅(新幹線)構内配線図	33
3.4.1 新大阪駅構内配線図	43
4.2.1 疑似的な路線図	58
4.2.2 列車ダイヤ図	58
4.3.1 余裕時分ネットワーク	63
4.5.1 山陰本線の列車ダイヤ図	67
4.5.2 豊肥本線の列車ダイヤ図	68
4.5.3 関西本線の列車ダイヤ図	70
4.6.1 山陰本線の列車計画の完全遅延回復率	72
4.6.2 豊肥本線の列車計画の完全遅延回復率	72

4.6.3 関西本線の列車計画の完全遅延回復率	72
4.6.4 遅延の長さに関する確率密度関数	75

表目次

2.3.1 同時に行える発着事象の上限 (東北新幹線東京駅)	18
2.4.1 同時可能な組合せの例	23
2.4.2 生成される 1 サイクル中の要素	25
2.4.3 1 サイクルのスケジュール	26
3.3.1 $c_{pa,pd}^{u,u}$:博多駅新幹線上り方面発着競合	34
3.3.2 $c_{pa,pd}^{d,d}$:博多駅新幹線下り方面発着競合	34
3.3.3 真理値表	39
3.4.1 $c_{pa,pd}^{u,u}$:新大阪駅新幹線上り方面発着競合	45
3.4.2 $c_{pa,pd}^{d,d}$:新大阪駅新幹線下り方面発着競合 1	45
3.4.3 $c_{pa,pd}^{h,h}$:新大阪駅新幹線下り方面発着競合 2	46
3.4.4 $c_{pa,pd}^{h,d}$:新大阪駅新幹線下り方面発着競合 3	46
3.4.5 $c_{pa,pd}^{d,h}$:新大阪駅新幹線下り方面発着競合 4	47
3.4.6 計算結果	47
4.6.1 各列車計画の頑健性スコアと完全遅延回復率	76

第1章

序論

1.1 鉄道スケジューリングの現状

近年，CO₂ 排出量削減などの環境問題の観点から，鉄道輸送が見直されつつある．特に日本においては，都市圏の通勤輸送について鉄道の占める割合は高く，新幹線による中長距離輸送も，出張や旅行などさまざまな場面において，欠かせないものとなっている．

日本における鉄道のダイヤ（運行計画）は，経済成長に対応するべく輸送量を増強する際に，狭い国土や，その他歴史的経緯から，限られたリソース（駅，線路，車両）を高効率で運用することで対応してきた経緯がある．さらに，高効率な運行を実現するために，綿密なダイヤを構築し，また，運行を管理するシステムを構築してきた．

この，高効率な運行を可能とする技術は，さらに，自然災害（特に地震）に対する備えの技術とあわせて，日本の先進的な鉄道技術を支える要因となっている．

1.1.1 鉄道スケジューリング作成の流れ

一般的に，鉄道の運行計画は，以下に示す各パラメータ値の決定，ならびに，部分計画の作成によって作成される．図 1.1.1 にその作成の流れを示す．

- (1)-1 運転曲線 横軸に距離 (駅間の列車の位置, 駅から (もしくは基準地点から) x [km] 地点), 縦軸に速度 (x [km] 地点で y [km/h] 出す) をとり, プロットしたもの, 及び, 縦軸に時間 (x [km] 地点に y 秒後に到達する) をプロットしたもの.
- (1)-2 基準運転時分 ある駅から次の駅までの間を走行するのに必要な所要時間を示した値. なお, 駅の停車/通過, 列車の進行方向 (上り/下り), 車種, 両数, 荷重 (旅客の場合, 混雑度, 貨物の場合荷物の重さ) によって, グラフや値は変わってくる. また, カーブ (曲率半径, カント^{*1}の大きさ), 勾配, トンネルの空気抵抗, そして, それらに伴う制限速度などを考慮する必要がある.
- (2) 列車運行図表 いわゆるダイヤグラム. これを, 横に列車, 縦に駅をとり, 表にしたものが時刻表である.
- (3) 車両運用 どの列車にどの車両を割り当てるかという計画
- (4) 乗務員運用 どの列車を誰が運転するか, だれが車掌として乗務するかを割り当てる計画.
- (5) 構内作業計画 駅におけるプラットホーム, 引上線, 留置線等の使用計画や移動手順に関する計画

このうち, 「(1)-1 運転曲線」の作成, および, 「(1)-2 基準運転時分」の自動作成については, 既に 1970 年代には実用化されている. 研究の動向について, 詳しくは 1.2 節で述べることにするが, 「(3) 車両運用」「(4) 乗務員運用」「(5) 構内作業計画」の自動作成に関しては, 近年研究が進み, 部分的に実用化されている. しかしながら, 「(2) 列車運行図表」の作成に関しては, 従来, 紙の上で人が鉛筆, ないし, ペンで書き込んでいたものを, コンピュータのテンキーとマウスで入力するようになり, また, エラー (入力通りに動か

*1 曲線部における内側の線路と外側の線路の高低差. 競輪やモータースポーツにおける「バンク」に相当する.

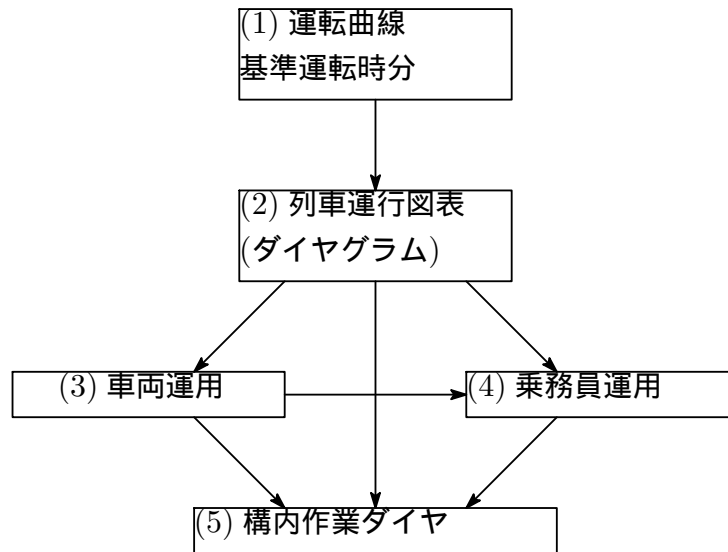


Figure 1.1.1 鉄道スケジューリングの流れ

した場合に列車が事故を起こすなど)を検出する,といった機能の自動化については既
実現されている.また,ここで作成したダイヤから,いわゆる時刻表の出力や,各駅ご
の時刻表や,各列車の乗務員に渡す帳票の出力機能などは,大いに活用されている.しか
しながら,「(2) 列車運行図表」作成の完全自動化は,1.1.2 節で後述する理由により,実
現化に向けた動きはほとんどなく,この計画の作成は人が行うべきだと指摘する専門家も
多い.

1.1.2 鉄道スケジューリングのむずかしさ

鉄道スケジュールが難しい理由として,大きく「問題の規模」によるものと「経営的観
点」によるものがある.

問題の規模

鉄道スケジューリングの難しさの一つが,その問題規模である.

たとえば,東海道新幹線では,上り下り合わせると,一日に500本以上の列車が運行

されている。これらの列車について、さまざまなスケジューリングを行うことになる。

例えば、駅の構内計画（発着時刻が与えられるとき、どのホームに列車を到着させるか、場合によっては引き上げ線などを使用して列車を入れ替えるか）を考えてみる。各列車がどのプラットフォームを使用するか、列車とプラットフォームの組からなる 0-1 変数を考慮すると、変数は数千となる。さらに、これらのすべての列車について、安全に（事故を起こすことなく）運行されなければならない、という絶対制約が満たされなければならない。このとき、ある 2 列車の組を考えるときに、2 列車が同時に駅内に存在する時間が存在するならば、同じホームに割り当ててはならないことは言うまでもない。また、ある列車 T_A の出発と、別の列車 T_B が同時刻ならば、この 2 列車が衝突しないようにしなければならない。しかしながら、 T_A と T_B とが、衝突してしまうか、上手くすれ違うことができるかは、発着プラットフォームの組み合わせによって異なるため、その組み合わせを考慮しなければならない。

乗務員の運用計画を考えるならば、前述の 500 本以上の列車すべてに、運転士と車掌を、各列車の運行に必要な人数以上漏れなく割り当てなければならない。また、各乗務員について、労働基準法に違反しないことや、乗務の開始と終了とが一致しなければならないことなどを考慮する必要がある。また、乗務員は感情を持った「人間」であるので、乗務員間に労働環境のばらつきが発生するならば、不平不満が生じるのは言うまでもないため、このようなことも適宜制約に反映する必要がある。

車両の運用計画を考えるとき、前述の乗務員と異なり、勤務シフト上の問題は生じないが、車両に関しても、一定期間（走行距離、ないし、日数）ごとに車両の整備や検査を行わなければならない。また、車両にも種類（例えば、特急用や通勤電车用）があり、ラッシュで混雑する列車に充当すべき車両と、長距離を走行する優等列車に充当すべき車両は異なり、これらを配慮しなければならない。

以上のように、各問題とも、考慮しなければならない制約は挙げればきりがなく、さらに、現状で計画作成者が無意識に考慮している制約等も存在することが考えられ、尤もらしい運行計画の構築には、制約の数が爆発的に増えてしまう。また、事故を起こさないなどの絶対制約に対し、場合によっては妥協することが許される制約などもあり、その取扱いも、スケジューリングを難しくしている一因である。

鉄道の経営的観点

鉄道事業者が提供する商品（サービス）とは、基本的に列車を運行することであるの言うまでもない。しかしながら、いわゆる「鉄道のダイヤ」は、「商品」でありながら、鉄道事業者にとっては、人（乗務員）、もの（車両）、場所（駅、線路）の使用計画であり、つまりは「生産計画」のような一面も併せもつことになる。

したがって、例えば運行本数を例にとって考えると、利用客にとっては、運行本数が多いほうが、待ち時間が少なく済み、混雑なしに、ゆったり乗れることになり、大変好ましいことである。

その反面、鉄道会社にとっては、運行本数が増えると、必要となる乗務員数（ひいては人件費）が増大する。車両数も余計に必要となり、車両そのものはもちろんとして、それら車両を置いておく車庫のスペースやメンテナンスコストも増大する。また、電力使用量も増えることとなり、鉄道事業者の視点では、好ましいこととは言えない。

つまりは、これらの旅客の利便性（提供されるサービスの質）と運行コストとのトレードオフを考慮する必要がある。

さらに、時と場合によって求められる要素も変化することがある。例えば、ラッシュ時間帯には、需要に見合うだけの輸送量が求められる一方で、ラッシュ時間帯に比べると需要が少なく、本数も少なくなる日中は乗り継ぎの接続や、わかりやすさ（「毎時 分発車」などの覚えやすさ、など）などの要素が求められることとなる。通学需要に関して、各学

校の始業時刻や終業時刻がまちまちである場合もあり，時刻を区切って目的関数を変化させるなどの線引きも困難であることが多い．

以上のような理由から，現状では鉄道スケジューリングに関して，特に経営判断が絡む要素に関してはコンピュータによる完全自動化に向けた動きは非常に少ない．

1.2 鉄道スケジューリングに関する研究と需要

1.2.1 既存研究・関連研究

前節で述べたように，鉄道スケジューリングは，計画が大規模，且つ，その計画が広範囲にわたる．そのため，全計画の作成を網羅的に自動作成することは，現実的でないため，行われていない．鉄道のスケジューリング問題の現状や動向に関しては，和文では，富井の解説論文 [14] が詳しい．また，日本国内の研究に関しては，公益財団法人鉄道総合技術研究所の信号・情報技術研究部において活発に研究されている [28]．電気学会においては，専門委員会が立ち上がり [27]，近年盛り上がっている．

特にダイヤが乱れた際の再計画に関しては平井ら [2] の論文において広く紹介されている．これまでに何度も述べたとおり，問題規模が大きく，計算困難であることから，例えば國松ら [3] や佐藤ら [4] は，基本となる計画 (初期解) が与えられているものに対して計算したり，メタヒューリスティックで解を求める試みを行っている．なお，評価尺度は，乗客の利便性向上や必要コストの減少など，それぞれ異なっている．

駅構内における，発着プラットフォーム割り当てに関する研究としては，Dorotea らの論文 [11] が挙げられる．Dorotea らは， k L -list τ colouring problem を定義した後，ヒューリスティックアルゴリズムを提案し，このアルゴリズムを用いて列車発着プラットフォーム割り当て問題を解いている．この論文の中で， k L -list τ colouring problem が NP 完全

問題のクラスに属することを示し, k L -list τ colouring problem に関して, ヒューリスティックアルゴリズムを提案している. また, この研究では, グラフの節点塗り分け, すなわち, 実行可能な列車に対する発着プラットフォームの割り当てを求めることのみを実現している.

Billionnet ら [6] は, 駅のプラットフォームや線路の配置と発着時刻が与えられたときに, 各列車に対して, 発着するプラットフォームを割り当てる計画を, 彩色問題に帰着させて求めている. また, 発着プラットフォーム割り当てについて, 何らかの目的関数を導入し最適化問題として取り組む研究として, Caray ら [7] や, Caprara ら [8] の論文があるが, これらは, 駅のプラットフォームの使用料の最小化や, 制約の充足数の最大化を目的とする. すなわち, いずれも, 鉄道事業者の視点での最適化であり, 旅客 (利用者) の利便性 (便益) を目的としたプラットフォーム割り当ての研究は, 筆者らの把握する限り, 存在しない. これは, ヨーロッパの鉄道においては, 列車を運行する運行会社と, 線路や駅を保有する公的会社の上下分離で運営されていることに起因する. 日本国内における, 航空会社と空港の関係に近いものがあり, ヨーロッパでは, 各鉄道運行会社が運行し運賃を旅客から徴収する一方で, 各運行会社が施設保有会社に対し施設使用料を納める, という形態をとっている. そのため, 施設利用料を低く抑えるというモチベーションが強く働くことになる. これに対して日本では, 一部の事例^{*2}を除き, 鉄道会社が駅や線路の保有から列車運転, 運行管理のすべてを自前で行う仕組みを取っている.

単線では, 駅等において, 相対する方向に向かう列車の行き違いをさせる交換を考慮し

^{*2} 日本国内では大きく 2 つのケースに大別される. 1 つ目は, 地方路線の第 3 セクター化の事例で, 地元地方自治体などが施設を保有し, 運行会社が借り受ける形となる. 2 つ目は, 空港アクセス線などの場合に公的資金を投じて建設し, 鉄道会社が乗り入れてくる事例である. しかしながら複数の会社の列車が運行される事例は極めて少なく, 線路を借り受ける会社が運行計画に関するイニシアティブを持っている場合が多い.

なければならないため、複線に比べて制約が多いと言える。著者らの知る限り、単線を扱った研究は少ないが、[21]、[22] などがある。Salido ら [21] は、単線路線を対象に、1本の列車に遅延が発生した時に別の列車に遅延を伝播させない度合いを列車計画における遅延に対する頑健性と定義し、評価尺度を提案している。しかしながら、評価尺度の提案に留まっており、実用を想定した列車計画の生成方法については触れられていない。Liebchen ら [22] は、ドイツの単線路線を対象に、2次遅延の発生しにくさを評価値とした頑健性尺度を提案している。しかしながら、この尺度は、交換によって発生する2次遅延について網羅しきれていない。例えば、2回の交換を控える列車において、1回目の交換を行う前に1次遅延が発生したとき、1回目と2回目の両方の交換を考慮しなければ、列車に発生した1次遅延が2次遅延を発生させるか否かを判断することはできないはずである。しかしながら、[22] では、1回目の交換のみで2次遅延の発生の有無を判定している。[23] では、列車の移動時間や停車時間に適切な余裕時分を配分する手法で、遅延に対して頑健な列車計画の生成を行っている。計算機実験では、オランダの北ホラント州の大規模な鉄道網を対象とし、精度の良い解を数十時間程度で得ることに成功している。しかしながら、始終点駅（始発駅または終着駅）における列車の発着時刻の変更を許容しているため、実路線に適用するときを考えると、列車計画以外の様々な計画（例えば、車両や乗務員の運用計画など）に影響を与える可能性が懸念される。一方、国内では、欧州に比べて列車遅延に対する頑健性に関する研究は少ない。武内ら [24] は、混雑度や遅延時間等に基づいた旅客の不効用値を用いて列車計画の評価尺度を提案している。また、乗降時分のばらつきに基づいて1次遅延のモデル化を行い、実在する列車計画に対して余裕時分を接続駅周辺に集中させることで、頑健性が改善された列車計画が生成できることを確認している。しかしながら、[24] で提案している頑健性尺度に最適化された列車計画の生成方法については言及しておらず、余裕時分の配分方法を検討する余地を残している。牛田

ら [26] は、列車遅延の評価指標とその可視化について論じている。牛田らは、複線列車において、「各列車の後続列車との間の実際の列車間隔」から「列車間に最低限必要な間隔（続行時隔）」を引いた「列車間隔の余裕」で、「実査に列車に発生する遅延」を、バッダイndeックス (BI) として提案している。この BI の値が 1 を超える場合、後続列車に対して遅延を伝播する「性質の悪い遅延」として、運行計画のダイヤグラム上で可視化し、実際に東京メトロ東西線に対して適用（著者の牛田は東京地下鉄株式会社の社員）し、ダイヤ改善を図った結果について報告している。

また、特に近年の動向として、非常時の計画構築に関して注目が高まっている。2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災の際に行われた計画停電では、首都圏の鉄道は大きな影響を被った。結果として、各鉄道会社は、計画停電の実施時間帯と輸送需要に応じた、幾通りもの運行計画を、極めて短時間で構築することを余儀なくされた。運行計画の構築の高度化が実現したならば、このような事態における作業を支援できると期待されている [25]。

1.2.2 本論文の立場

1.1 節、1.2 節で述べたように、鉄道システムにおけるスケジューリングに関する研究は活発に行われており、需要も多く、計算機での求解ができるようになってきている。しかしながら、これまでに提案されたものの多くは、実行可能解の求解のみを求めたもの、ないし、鉄道事業者側の視点での最適化に特化したものが多い。

そこで、本論文において、利用者の視点から見た種々のスケジューリングを提案する。但し、事故を起こしてしまってはならないことは言うまでもない。鉄道運行の安全性は必ず確保するものとする。また、利用者側の利便性を極端に追求したスケジューリングとなってしまうとは、鉄道事業者にとって到底受け入れられないスケジュールとなることも

考えられ、実現可能性に乏しくなってしまう。そこで、「鉄道事業者の便益」に相当するものを、制約条件として含ませることとする。本論文では、鉄道利用者の要望として考えられる、以下の3点について取り上げる。

- (i) 運行本数を多くしてほしい
- (ii) 乗り継ぎは楽にしたい
- (iii) できるだけ遅れないで、時刻表通りに運行してほしい

1.3 本論文の構成

まず、第2章では、鉄道運行において、特にボトルネックとなる終端駅について着目し、終端駅における列車運行本数の最大化について取り上げる。最初に、本問題を 0-1 整数計画問題で定式化し、実用時間で計算可能であることを示し、加えて、最小折り返し時間の制約がなく（列車到着後任意の時刻に発車できる）、かつ、各プラットホームに1度ずつ列車が発着する1サイクルを考え、これを複数回繰り返す^{*3}ときについて、多項式時間で終端駅発着数最大化問題が解けることを示す。

第3章では大規模な乗換駅における対面接続最大化について述べる。大規模な乗り継ぎ駅において、階段の上り下りを伴うような乗り換えは利用者にとって不便であり、できることなら、降りた列車から乗り継ぐ列車が、降りたのと同じホーム、ないし、同じ島の反対側のプラットホームに発着したならば、階段の上り下りを伴わずに列車間を乗り継ぐことが可能になる。本章では、この問題を 0-1 整数二次計画問題で定式化し、さらに、これを一次の 0-1 整数線形計画問題に変形する。また、本問題が NP 完全の問題のクラスに

^{*3} 各列車に発着するプラットホームの制限がなく、各列車を、駅内の任意のプラットホームに割り付けることができる場合

属することに言及する．そして，幾つかの実例について計算実験を行った結果について示す．

第4章では，列車の遅延に対する頑健性向上について述べる．特に単線路線を運行する列車に遅延が生じた場合，列車同士がすれ違うことができる駅が限定されていることにより，遅延列車とすれ違う予定の列車にも影響が伝播し（二次遅延），これらの列車の遅れから，さらに他の列車に遅延が伝播する，という事態が容易に起こり得る．そこで，各列車の駅における停車時間を再配分し，遅延が他の列車に伝播しにくいようなスケジュールを作ることにについて，余裕時分ネットワークモデルを提案する．そして，それに基づき，列車の遅延に対する頑健性向上について定式化し，幾つかの实在路線を対象として適用した数値シミュレーションによる評価実験について述べる．

最後に第5章では本論文のまとめと共に，残された課題について述べる．

第 2 章

終端駅における列車運行本数最大化

2.1 まえがき

新幹線輸送について，JR 東海の運行する東海道新幹線では，1 時間に最大 12 本という，非常に高密度で列車が運行されており，輸送量が逼迫してきている．これに対応すべく，中央リニア新幹線の計画も現在着々と進行しているが，東京 (品川)-名古屋間の開業予定は 2025 年と，まだまだ先の話であり，それまでの間に，社会構造の変化などにより，さらなる需要の増大が起こった場合，対応しきれなくなってしまう恐れがある．

また，JR 東日本の管轄する東北・上越・長野新幹線は，東北新幹線の北海道への延伸や，北陸新幹線の金沢への延伸などを控えている．これらにより，需要のさらなる増大が考えられる．それにもかかわらず，東京駅近辺 (特に，各新幹線が集約する，東京-大宮間) について，現状でも 1 時間当たり 14 本と逼迫しており，今後，運行本数が限界に達してしまうことが懸念される．

これらのボトルネックになっている箇所はいずれもその終端駅 (terminal) の東京駅である．なお，本研究では終端駅を，駅から外部へ接続される線路が到着線と出発線の各 1 本からなり，ある 1 方向のみにしか列車が行き来できない駅と定義する．終端駅では，乗

客の全員を降ろす必要がある。特に終端駅が都市部の駅の場合、終端駅が大きな需要地となりここへ向かう乗客が多数いるため、降車に時間がかかってしまう。そして、乗務員の引継ぎや折り返し(方向転換のための諸作業)などを行われる。その後、乗車客も多数いるため、乗車にも時間を要する。これに加え、新幹線や特急などの優等列車では、車内の清掃、座席の転換、給水、車内販売の補充、など、多数の作業をも行わなければならない。結果として、いわゆる「途中駅」に比べて、多大な停車時間を必要とする。

また、終端駅では、すべての番線について、到着進路と出発進路がともに設定可能でなければならない。そのため、その線路の配線は非常に複雑となる。また、列車は当然ながら線路に沿ってしか移動できず、列車同士の進路が競合してしまう(到着列車と出発列車の進路が交差していたならば、同時に動くことは出来ない)ことにより、排他的に列車を移動させなければならない場合が多々発生する。

以上の、停車時間、および、移動の排他性の発生が、都市部終端駅がボトルネックに陥る原因である。これらの、終端駅特有の諸問題を考慮し、現況、および、将来の需要増に対応しうる、より効率的(運行本数を増やすことが可能)な列車の発着スケジューリングが求められる。

また、列車の運行管理は、通常時であれば、あらかじめ計画された、いわゆるダイヤ(時刻表)通りに運行させればよく、自動化もされているが、災害や事故などにより、ひとたびダイヤが乱れてしまったあとの対応は、現状では人手、とくに熟練した司令員の腕に頼るところが大きく、支援技術や自動化が求められている。各駅の列車の処理能力の限界や、この処理能力の限界に対する列車の移動パターンなどの情報は、列車運行の意思決定に対して、非常に有用である。

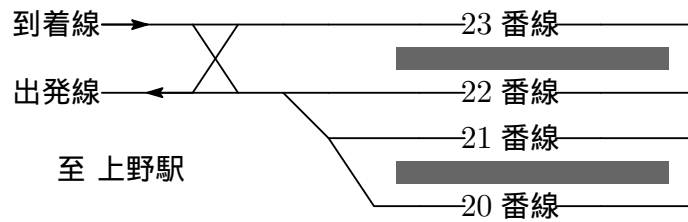


Figure 2.1.1 東北新幹線東京駅構内配線図

2.2 諸定義

2.2.1 終端駅列車発着最適化問題

本研究では，列車の輸送量が逼迫している終端駅を想定する．目的関数（評価尺度）として，駅を発着する列車本数の最大化を考える．なお，時間軸は離散的な時刻を考えるものとする．

終端駅を考えると，その定義より，列車の到着，および，出発はそれぞれ1方向のみに定められる．そのため，同時に動くことの出来る列車数も高々2列車（到着と出発が同時に行われるような場合）に限定される．また，終端駅の性質上，通過列車は存在し得ない．そのため，列車種別等を考慮する必要は無い．

ここで考慮する必要のある制約をまとめると，以下のようになる．

- 各番線には，同時刻に高々1本の列車しか入れないものとする．（本研究では列車の分割や併結は考えない．）
- 列車は必ず到着線からやってくる．また，発車した列車は必ず出発線へ向かう．
- 進路の組み合わせは，一方が駅の各番線，他方が出発線と到着線の2つからなる，完全二部グラフ（図 2.2.1）で与えられるとする．すなわち，列車は，到着線からすべての番線へ到着可能，かつ，すべての番線から出発線へ出発可能とする．

- 複数の列車が同時に駅に到着することは無い。同様に，複数の列車が同時に出発することも無い。
- 列車は，到着列車と出発列車とが互いに競合しない（平面上で交差しない）進路を設定可能であれば，そのような進路をとる。この列車の進路は，到着番線と出発番線の組み合わせにより，事前に計算することが可能である。到着列車と出発列車の組み合わせに対する進路，および，進路間の競合の有無は，到着列車の到着先と出発列車の出発元の組み合わせにより定まる。
- 到着列車と出発列車で進路が競合する場合，いずれか1列車しか動くことは出来ない。
- 到着した列車は，乗客の乗降や折り返し作業のための停車時間を要するため，一定時間経たないと出発できない。（例えば東北新幹線の場合 計12分（降車2分，清掃7分，乗車から発車まで3分））。

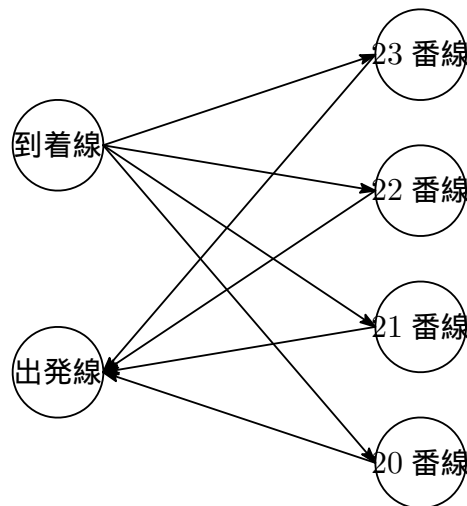


Figure 2.2.1 東北新幹線東京駅における移動可能性

2.3 0-1 整数計画問題への定式化による解法

2.3.1 定式化

前章で述べた，終端駅列車発着最適化問題を，0-1 整数計画問題として定式化する．

記号の定義

- L : 駅のホーム集合．
- t_{max} : 離散的時刻の数．
- $T = \{0, 1, \dots, t_{max} - 1\}$: 実行時間の集合．
- s : 駅での乗降や諸作業に伴う停車時間．
- $c_{a,d}$: $a, d \in L$ とし， a 番線への列車到着事象と d 番線からの列車出発の事象について，同時に行うことが出来る事象の上限．同時に実行可能であれば 2，そうでない ($a = d$ となる場合 (同一ホームを使用しようとする場合)，列車間の進路が平面上で交差し，競合してしまう場合) ならば 1 となる．
- $C = \{c_{a,d} | a, d \in L\}$: 進路発着競合．

なお，東北新幹線の東京駅について，進路発着競合は，表 2.3.1 のようになる．

ある時刻 t に l 番線に列車が到着 (arrive) するとき 1，そうでないとき 0 とす決定変数 $x_{t,l}^a$ ，および，時刻 t に l 番線から列車が出発 (departure) するとき 1，そうでないとき 0 とする決定変数 $x_{t,l}^d$ ，を考える．このとき，目的関数と制約式は以下のように表現される．
なお，初期状態として，時刻 0 において，各番線に列車が存在していないと仮定する．

Table 2.3.1 同時に行える発着事象の上限 (東北新幹線東京駅)

$a \setminus d$	20	21	22	23
20	1	1	1	1
21	1	1	1	1
22	1	1	1	1
23	2	2	2	1

目的関数

$$\text{Maximize } \sum_{t \in \mathbf{T}, l \in \mathbf{L}} x_{t,l}^a \quad (2.3.1)$$

制約条件

- 同時到着不可制約

$$\sum_{l \in \mathbf{L}} x_{t,l}^a \leq 1, t \in \mathbf{T} \quad (2.3.2)$$

- 同時出発不可制約

$$\sum_{l \in \mathbf{L}} x_{t,l}^d \leq 1, t \in \mathbf{T} \quad (2.3.3)$$

- 列車は必ず到着してから出発する.*¹

$$\sum_{t=0}^j (x_{t,l}^a - x_{t,l}^d) \leq 1, j \in \mathbf{T}, l \in \mathbf{L} \quad (2.3.4)$$

*¹ 各番線について、任意の時点で、時刻 0 からその時点までの到着数と出発数は等しいか到着数が 1 だけ大きい

- 列車は、 s だけの時間が経たないと折り返せない。

$$x_{t,l}^d = 0, 0 \leq t < s, l \in \mathbf{L} \quad (2.3.5)$$

$$\sum_{t=0}^{j-s} x_{t,l}^a - \sum_{t=0}^j x_{t,l}^d \geq 0, s \leq j \leq t_{max}, l \in \mathbf{L} \quad (2.3.6)$$

- 番線競合制約

$$x_{t,l_1}^a + x_{t,l_2}^d \leq C_{l_1,l_2}, t \in \mathbf{T}, l_1, l_2 \in \mathbf{L} \quad (2.3.7)$$

- 0-1 制約

$$x_{t,l}^a \in \{0, 1\}, t \in \mathbf{T}, l \in \mathbf{L} \quad (2.3.8)$$

$$x_{t,l}^d \in \{0, 1\}, t \in \mathbf{T}, l \in \mathbf{L} \quad (2.3.9)$$

目的関数 ((2.3.1) 式) として、全時刻での列車の到着数の最大化を考える。(2.3.2) 式は同時刻に複数列車が到着できないこと、(2.3.3) 式は発車することがないことを示した制約である。(2.3.4) は各番線へ複数列車が存在できないことを示す。(初期状態として列車が各番線に存在しないことを考えたとき、任意の番線について、ある時刻までに到着した列車の本数は、同時刻までに出発した列車本数と等しい(番線に列車が存在しないとき)か、または、1 だけ大きい(番線に列車が存在するとき))。(2.3.5)(2.3.6) は、駅の停車時間 s を遵守する制約である。この式で停車時間遵守の制約を表現できていることについては後述する。(2.3.7) は番線競合の制約(到着列車と出発列車が互いに進路が競合するならば、1 列車しか動けない)である。(2.3.8)(2.3.9) は 0-1 整数計画問題を示す。以上の定式化に基づき、ソルバーで実行可能解を計算する。

式 (2.3.5)(2.3.6) に関する補足説明

式 (2.3.5) は、時刻 t について $0 \leq t < s$ の間に出発する列車が存在しないという制約である。初期状態として、列車が存在しない場合を仮定し、かつ、最低限 s [単位時間] の

停車を保障するため、仮に時刻 0 に列車が到着したとしても、時刻 s までの間にその列車が出発することは起こりえない。

これに対して、(2.3.6) 式は $s \leq j < tmax$ 内の任意の時刻 j の出発に関する制約になる。左辺の第 1 項 (1 つめの) は時刻 $j - s$ までの列車到着数の総和、左辺第 2 項 (2 つめの) は時刻 j までの列車出発数の総和となる。ここで、 $s_i = j$ $tmax$ 内の任意の時刻 j におけるプラットフォーム l について考える。

Case 1 最小停車時間制約を満たす列車 t が停車している場合

時刻 $j - s$ までに列車 t がプラットフォーム l に到着していなければならない。第 1 項は、時刻 j までにプラットフォーム l から出発した列車数の総和である。これには列車 t も含まれる。もし、列車 t が時刻 j でまだ出発しないのであれば、第 2 項 (時刻 j までの列車出発数) に列車 t は含まれない。よってこの場合第 1 項は第 2 項より 1 だけ大きくなる。一方、もし、時刻 j で列車 t が出発しようとするならば、第 2 項の出発数に列車 t が含まれ、第 1 項と第 2 項は等しくなる。これらの理由から、式 (2.3.6) が常に満たされる。

Case 2 最小停車時間 s に満たない列車 t が停車している場合

停車中の列車を列車 t とする。この場合、時刻 $j - s$ において、列車 t は到着していない。したがって、第 1 項に列車 t は含まれない。最小停車時間を満たしていないために列車 t は出発できないので、第 2 項も列車 t を含まない。したがって、このとき第 1 項と第 2 項は等しくなり、列車 t が時刻 j にプラットフォーム l から出発しなければ、式 (2.3.6) が満たされる。

もし、時刻 j で列車 t が出発しようすると、これにより第 2 項の値が 1 (列車 t の分) 増加することになり、式 (2.3.6) を満たせなくなってしまう。

Case 3 時刻 j において列車が停車していない場合

時刻 j においてプラットフォーム l から直前に出発した列車を列車 t とする。第 1 項 (時

刻 j までの列車出発数の総和) は, 列車 t を含む. 一方, 第 2 項 (時刻 j までの列車出発数の総和) も, 列車 t を必ず含む. 時刻 $j - s$ の時点で列車 t は既に到着済 (時刻 $j - s$ 時点でホームに停車中または時刻 $j - s$ 時点で列車 t は出発済) でなければならない. なぜなら, 時刻 $j - s$ 時点で列車 t が到着していないのであれば, 時刻 j までの間に出発できるはずがないためである. よって, 制約が守られているならば, 第 1 項と第 2 項は等しくなる.

以上より, 停車時間に関する制約を順守されるとき, 式 (2.3.6) の左辺の値は 0 か 1 でなければならない. なお, 左辺の値が 2 以上となるときは,

- (a) 列車が停車中のプラットフォームに別の列車が到着する場合
- (b) 時刻 $j-s$ から時刻 j までの間に停車時間制約を満たさない列車が出発してしまう場合

が考えられる. (a) の場合, 時刻 $j-s$ から時刻 j までの間のいずれかの時刻で式 (2.3.4) に違反することになる. (b) の場合, 時刻 $j-s$ から時刻 j までのいずれかの時刻で式 (2.3.6) が満たされなくなる.

2.3.2 計算機実験

終端駅発着最適化問題について, ソルバーを利用した計算機実験を行った. 東京駅の 20~23 番ホーム (東北・上越・秋田・山形・長野の各新幹線の発着ホーム) を対象とし, ソルバーには GLPK4.39^{*2}を利用した. なお, 離散的時刻については, 列車が駅手前からホームに停車するまでの時間, 逆に, 列車がホーム上から出発してから列車の末尾までが駅から完全に出て行くまでの時間や, 列車間の最小間隔 (衝突防止等のために, 列車は一

^{*2} <http://www.gnu.org/software/glpk/glpk.html>

定間隔をあけて走らせなければならない) より, 1 単位時間=2 分と定めた. また, 最小停車時間 (折り返し諸作業等の所要時間) を, 実際の値である 12 分 (降車 2 分, 清掃 7 分, 乗車から発車まで 3 分) とした. ([15]などを参考にした) 時刻 0 から時刻 29 までの 30 単位時間分 (実時間における 1 時間分) について計算を行った*3.

2.3.3 計算結果

得られた列車発着パターンを図 2.3.1 に示す. 30 単位時間 (=1 時間) 中の到着本数 18 本という解が得られた.

得られた解を観察すると, 7 単位時間ごとに同じ移動パターンの繰り返しとなっている. 全列車が最短停車時間で発着し, 且つ, 各番線が遊休時間なく使用されており, この 7 単位時間毎のパターンとしては, 最適移動パターンといえる. この搬送パターンを繰り返すことにより, 7 単位時間 (14 分) に 4 本の運行が可能となり, 1 時間当たり 17.1 本の運行が可能である.

現状が 1 時間あたり 14 本の運行であるため, 3 本分, 最大で 4,902 人分の輸送量を確保することが可能*4である.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29		
#20						着						発	着					発	着													
#21		着						発	着						発	着						発	着								発	着
#22					着																											
#23	着																															

Figure 2.3.1 得られた列車計画

*3 計算環境: CPU=AMD Phenom 9750 Quad-Core Processor 2.40GHz, メモリ=2GB

*4 東北新幹線で最大定員である, 新幹線 E4 系列車 (8 両編成:定員 817 名)2 編成連結で運行した場合

2.4 2部グラフ最大マッチング問題からの帰着による解法

終端駅列車発着最適化問題について、次の条件を追加するとき、2部グラフ最大マッチング問題から帰着することができる。

- 最小折り返し時間=1 単位時間とし、任意の時刻で折り返し可能とする。^{*5}
- 全てのホームに列車は1本ずつ発着する「1サイクル」を考える。
- 1サイクルの所要時間の最小化、すなわち、スループットの最大化を考える。

終端駅列車発着最適化問題に帰着し、発着スケジュールを得るまでの過程を説明する。駅における、同時発着可能な移動組合せが、表 2.3.1 のように与えられている場合を例に挙げる。

Table 2.4.1 同時可能な組合せの例

$a \setminus d$	#1	#2	#3	#4
#1				
#2				
#3				
#4				

まず、同時発着可能な移動組合せから、2部グラフを作成する。

「2部グラフの各頂点」と、「各ホームからの発着事象」が対応する。ホーム数ずつのノードを2部グラフの両側に用意する。2部グラフ中の一方の各ノードと各ホームからの

^{*5} 最少折り返し時間=1 単位時間であると、到着した次の時刻に出発となり、実用的ではない。しかし、このあとの手順において停車時間をできるだけ増やせるように配慮する処理を行う。

列車の発事象とを対応させ、他方の各ノードと着事象を対応させる。同時発着可能な組合せを枝で結ぶ。

表 2.4.1 を 2 部グラフに変換したものが図 2.4.1 である。

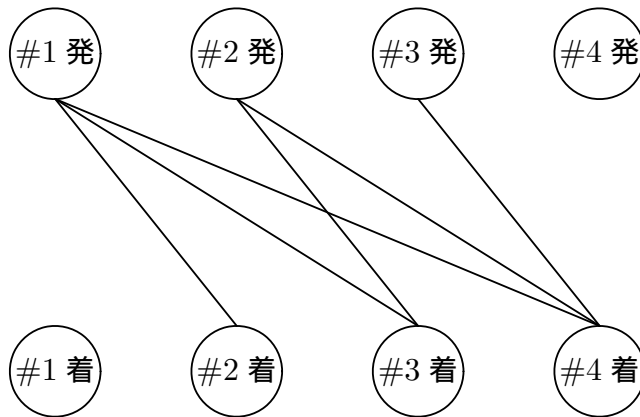


Figure 2.4.1 2 部グラフ最大マッチングへの帰着

こうして得られた 2 部グラフについて、最大マッチングを求める。図 2.4.1 の最大マッチングは、図 2.4.2 となる。

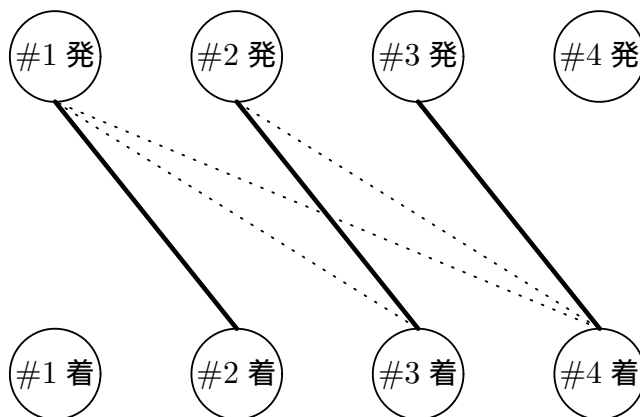


Figure 2.4.2 2 部グラフ最大マッチングの解

枝で結ばれた発着事象を同時に行い、枝で結ばれなかった事象は単独で行う。言い換えると、枝で結ばれた発着事象同士は、ガントチャート上で縦にそろえる。枝で結ばれなかった事象は、同時刻の縦軸に他の発着事象が重ならない。こうして、ガントチャートをつづ

切りにしたような, 1 サイクル内の列車発着パターンの要素を得ることができる. 図 2.4.2 の最大マッチングから得られる, 発着パターンの要素は表 2.4.2 となる.

Table 2.4.2 生成される 1 サイクル中の要素

#1	発			着	
#2	着	発			
#3		着	発		
#4			着		発

この各要素を, 順不同で繋げることによって, 1 サイクルのスケジュールを得ることができる. (最小折り返し時間=1 としていることにより, 任意の時刻で折り返すことが可能なため.)

しかし, 現実的な運用を考える場合, 列車がホームに存在する停車時間ができるだけ長いほうが, 乗客, 鉄道会社双方にとって都合がよい. 列車がホームに存在する時間を最大化することは, 列車がホームに存在しない時間を最小化することと同義である. つまり, 各ホームについて, 列車が出発して, その次の時刻にそのホームへ列車が到着するように, 1 サイクル中の各要素を適切にソートすることで, 表 2.4.3 のようなスケジュールを得ることができる.

2 部グラフ最大マッチング問題は, $O(mn)$ (m : 頂点数, n : 辺の本数) で計算可能であり, 前述の条件を付与し, 限定した場合については多項式時間で計算可能である.

一方, 現実的なスケジューリングにおいては, 停車時間の制約を無視することはできない. また, 全てのホームを均等に使用しないという戦略をとることにより, かえって効率のよい計画を得ることができる可能性がある. これらの点を考慮する場合の計算量の解析が今後必要である.

Table 2.4.3 1 サイクルのスケジュール

	1	2	3	4	5
#1				発	着
#2			発	着	
#3		発	着		
#4	発	着			

2.5 まとめ

本研究では、終端駅列車発着最適化問題を 0-1 整数計画問題として定式化を行い、東北新幹線の東京駅という実例について、ソルバーを用いて、列車の発着本数を最大化するような発着パターンを求めることに成功した。また、いくつかの条件を付与した場合について、2部グラフ最大マッチング問題に帰着できることを示した。

今後の課題として、折り返し時間を考慮する場合の計算量の解析、駅の形状によらない手法の考案などが挙げられる。

第3章

対面乗り継ぎ最大化を目的とする列車プラットフォーム割り当て

3.1 まえがき

近年，鉄道システムのスケジューリングに関する研究が活発になっているが，鉄道事業者側の視点からの効率化，最適化が主であった．これに対して，利用者の立場に立った，輸送の改善を行うようなスケジュールや最適化手法についての研究事例は極めて少ない．

先行研究である [6] では，駅のプラットフォームや線路の配置と発着時刻が与えられたときに，各列車に対して，発着するプラットフォームを割り当てる計画を，彩色問題に帰着させて求めている．また，[11] では， k L -list τ colouring problem を定義した後，ヒューリスティックアルゴリズムを提案し，このアルゴリズムを用いて列車発着プラットフォーム割り当て問題を解いている．しかしながら，これらの研究では，グラフの節点塗り分け，すなわち，実行可能な列車に対する発着プラットフォームの割り当てを求めることのみを実現している．発着プラットフォーム割り当てについて，何らかの目的関数を導入し最適化問題として取り組む研究として，[7][8] などがあるが，これらは，駅のプラットフォームの使用料

の最小化や、制約の充足数の最大化を目的とする。すなわち、鉄道事業者の視点での最適化であり、旅客(利用者)の利便性を目的としたプラットフォーム割り当ての研究は、筆者らの把握する限り、存在しない。これは、ヨーロッパの鉄道においては、列車を運行する会社と、線路や駅を保有する公的会社の上下分離で運営されていることに起因する。これに対して日本では、多くの場合^{*1}、鉄道会社が駅や線路の保有から列車運転、運行管理のすべてを自前で行う仕組みを取っている。そのため、使用料のような目的関数はそぐわない。日本国内の事例を考えると、目的関数として、遅延に対するロバスト性、ないし、旅客の利便性が目的関数となりえる。このなかで、今回は後者に着目することとした。

日本の鉄道の安全性と正確性については、各運行会社、そして、運行に携わる方々に敬意を表す。しかしながら、利用者の視点から現在の運行計画をみた際、改善の余地を感じることは決して少なくない。例えば、2011年3月に、九州新幹線博多-新八代間が開業し、九州新幹線と山陽新幹線がつながった。ところが、東海道新幹線区間から九州まで直通する列車は、現時点では運行されていない。また、各駅停車(こだま、つばめ)しか止まらない駅を利用する際には、優等列車(のぞみ、ひかり、みずほ、さくら)と各駅停車の列車との間で、多くの利用者が乗り換えの必要に迫られる。これら2点の要因から、とりわけ多くの乗り換え需要が想定される駅として、新大阪駅と博多駅が挙げられる。これらの駅は、運行系統の終点駅であり、多数の列車において折り返しのための長時間停車や、車庫との間の入出庫の移動が発生し、列車の運行上きわめて余裕が少ない。このような事情により、乗り換える乗客(しかも、大きな荷物を持っている利用者が多い)は、往々にし

^{*1} 日本では、かつては、上下分離方式は空港アクセス線などのごく限られた事例であったが、近年では第3セクター線(新幹線開通に伴う分離や、和歌山電鉄の事例のように私鉄が廃線しようとした路線を引き受ける事例)のように地方自治体が線路を保有するケースが増えてきている。しかしながら複数の会社の列車が運行される事例は極めて少なく、線路を借り受ける会社が運行計画に関するイニシアティブを持っている場合が多い。

て遠く離れたプラットフォーム間を移動しなければならない。このことは、利便性のみならず、近年重視されているバリアフリーの観点からも好ましいものではない。

この解決方法として、2つの相違なる列車について、同一、もしくは、上下移動を伴わない(同じ面上の)プラットフォームでの乗り継ぎ(以下、対面乗り継ぎ)で乗り換えが可能であれば、利便性は大きく向上する。乗り換えについて、[13]では水平移動、階段などの移動導線ごとに利用者便益について時間評価値を与えており、対面乗り継ぎで接続できることが、利用者にとっての利便性が高いことを示している。

3.2 諸定義

3.2.1 列車発着プラットフォーム割り当て問題

発着プラットフォーム割り当て問題は、駅に関する情報と、列車に関する情報とが与えられるとき、各列車の使用するプラットフォームの割り当てを出力する問題である。駅に関する情報としては、各プラットフォームの配置、接続(各プラットフォームがどの線路と接続しているか)、列車発着に関する制約(プラットフォームの長さや、海外の事例では国際列車の発着の可否など)が与えられる。また、列車に関する情報としては、列車の到着時刻、どの線路からやってくるか、発車時刻、どの線路に向かうか、他、必要に応じて列車の長さ等の情報が与えられる。

3.2.2 目的

任意の期間(一般的に1日間)に駅を発着する全ての列車について、旅客の乗り継ぎ対象となる列車間で対面乗り継ぎ可能となる(乗り継ぎ元列車と乗り継ぎ先列車が同一面上のプラットフォームに割り当てられる)組み合わせについて、このことによる旅客の効用を

最大とするような発着プラットフォームの割り当てを行う。

3.2.3 本節における用語の定義

プラットフォーム 駅において乗客が列車を乗降する場所，および，乗り場に面する線路。

各プラットフォームは，日本国内の鉄道駅における一般的な呼び方に合わせ，「 X 番線」という名前で呼称する。

対面乗り継ぎ 階段を上り下りすることなく列車間を乗り継ぐこと。

島 互いに対面乗り継ぎすることが可能なプラットフォームの集合。

列車 駅外から駅へ到着し，駅から駅外へ出ていく車両または車両の連なり。本論文では，駅外から駅に到着し，駅から出ていくまでを，1つの列車として扱う。たとえば，博多駅において，博多行の「つばめ 322 号」として到着した車両が，折り返しで博多駅始発の「つばめ 331 号」として運転される場合，これらは1つの「列車」となる。

3.2.4 入力

入力として駅に関する情報と列車に関する情報とが与えられる。

駅に関する情報

駅に関する情報として，駅内の線路の接続関係，プラットフォームの配置が与えられる。

列車に関する情報

列車に関する情報としては，任意の列車 t について，以下のものが与えられる。

- 列車 t の到着時刻

- 列車 t がどの線路から到着するか
- 列車 t の到着時にそれが営業列車か回送列車か
- 列車 t の出発時刻
- 列車 t がどの線路へ出ていくか
- 列車 t の出発時にそれが営業列車か回送列車か

3.2.5 出力

各列車に対して、どのプラットフォームを使用するか、という割り当てを出力する。

3.2.6 制約

- 各プラットフォームに、同時に複数の列車が存在することはできない
- 上り、もしくは、下り方面で同時に到着と出発が行われるときは、互いの列車の発着を妨げないような割り当てにしなければならない。たとえば、図 3.3.1 の博多駅において、「熊本行の列車の発車」と「博多総合車両所発東京行の列車の到着」が同時刻に指定されている場合、「熊本行 14 番線発、東京行 13 番線着」という組み合わせで割り当てることができない。
- 列車の接続に関して、「乗り換え時間が w 分以内」の列車に関して考慮するものとする。それ以上の時間の待ち時間が生じる列車間については考慮しなくてよい。
- 回送列車から乗り継ぐ客は存在しない。回送列車へ乗り継ぐ客は存在しない。

3.3 0-1 整数計画問題への定式化による解法

前節で述べた発着プラットフォーム割り当て問題について、0-1 整数計画問題として定式化する。

3.3.1 記号定義

- $\mathbf{T} = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$: 列車集合 . t_1, t_2, \dots, t_n は駅を発着する列車で , n は列車数である .
- \mathbf{U} : 駅の上り方面で駅外部と接続されている線路の集合
- \mathbf{D} : 駅の下り方面で駅外部と接続されている線路の集合
- $\mathbf{DIR} = \mathbf{U} \cup \mathbf{D}$: 駅外部と接続している線路の集合
- $AT(t)$: 列車 t の到着時刻
- $AD(t) \in \mathbf{DIR}$: 列車 t が入構してくる , 駅外部と接続する線路
- $AS(t) \in \{0, 1\}$: 列車 t が到着時に旅客営業列車 , 回送列車のいずれであるかを示すフラグ (営業列車の場合 1, 回送列車の場合 0) . $AS(T) = 0$ のとき , 列車 t からの乗り継ぎについて考慮しない .
- $DT(t)$: 列車 t の出発時刻
- $DD(t) \in \mathbf{DIR}$: 列車 t が向かう , 駅外部と接続する線路
- $DS(t) \in \{0, 1\}$: 列車 t が出発時に旅客営業列車 , 回送列車のいずれであるかを示すフラグ (営業列車の場合 1, 回送列車の場合 0) . $DS(T) = 0$ のとき , 列車 t への乗り継ぎについて考慮しない .
- $\mathbf{P} = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$: 駅プラットフォーム集合 . p_1, p_2, \dots, p_m は駅内のプラットフォームである .

- $\mathbf{I} = \{I_1, I_2, \dots, I_m\}$: 駅プラットホーム島クラス . なお $I_i \subset \mathbf{P}$ とし $\{p_a, p_b\} \subset I_i$ のとき , p_a と p_b は同一の島上に存在し , 対面乗り継ぎが可能であるとする .
- F_{dir}^{arr} : 駅外部と接続する線路 dir から列車が到着できないプラットホームの集合
- F_{dir}^{dep} : 駅外部と接続する線路 dir へ列車が出発できないプラットホームの集合
- $c_{pa,pd}^{d1,d2}$: $d1, d2 \in \mathbf{DIR}, pa, pd \in \mathbf{P}$ とし , $d1$ から pa への到着と , pd から $d2$ への出発が同時に実行可能 (同時に動いても列車がぶつからない) ならば 2 , そうでない (排他的にしか動かすことができない) ならば 1 をとる定数 . なお , $d1 \in \mathbf{U}$ AND $d2 \in \mathbf{U}$ もしくは $d1 \in \mathbf{D}$ AND $d2 \in \mathbf{D}$ の場合のみ考慮すればよい .^{*2}
- $x_p^t \in \{0, 1\}$: 列車 t をプラットホーム p に割り当てるとき 1 , そうでないならば 0 とする 0-1 変数
- w_{t_1, t_2} : 列車 t_1 から t_2 へ対面乗継可能なときの効用 (たとえば列車 t_1 から t_2 への乗り継ぎ旅客数など)

発着競合表について , 博多駅で例示すると , 図 3.3.1 のような線路の配線に対して , 上り方面について表 3.3.1 , 下り方面について表 3.3.2 のようになる .

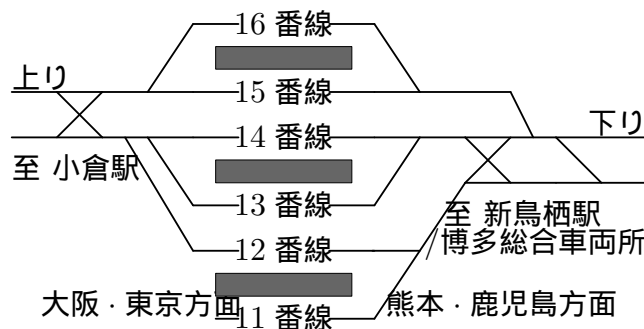


Figure 3.3.1 博多駅 (新幹線) 構内配線図

^{*2} $d1 \in \mathbf{U}$ AND $d2 \in \mathbf{D}$ もしくは $d1 \in \mathbf{D}$ AND $d2 \in \mathbf{U}$ の場合 , $pa = pd$ となる場合を除き , 2 列車の進路が交差することはないため . また , $pa = pd$ の場合は「プラットホームに複数の列車が同時に存在しない」という制約に抵触するため , この定数を用いて制約を表現する必要がない .

Table 3.3.1 $c_{pa,pd}^{u,u}$:博多駅新幹線上り方面発着競合

$pa \setminus pd$	11	12	13	14	15	16
11 番線	1	1	1	1	1	1
12 番線	1	1	1	1	1	1
13 番線	1	1	1	1	1	1
14 番線	1	1	1	1	1	1
15 番線	1	2	2	2	1	1
16 番線	1	2	2	2	1	1

Table 3.3.2 $c_{pa,pd}^{d,d}$:博多駅新幹線下り方面発着競合

$pa \setminus pd$	11	12	13	14	15	16
11 番線	1	1	2	2	2	2
12 番線	1	1	2	2	2	2
13 番線	1	1	1	1	2	2
14 番線	1	1	1	1	2	2
15 番線	1	1	1	1	1	1
16 番線	1	1	1	1	1	1

3.3.2 前処理

前処理として、グラフ GC と GT を生成する。

グラフ GC : 塗り分け (Coloring) グラフ

列車を頂点とし, 異なるプラットフォームを割り当てなければならない列車間を枝で接続して得られる無向グラフ. 列車 t_1 と列車 t_2 について, $DT(t_1) \geq AT(t_2)$ かつ $AT(t_1) \leq DT(t_2)$ が満たされるとき, 列車 t_1 と列車 t_2 はいずれかの時刻で駅内に同時に存在する. 本問題では, 同一プラットフォームに複数の列車が同時に存在することを許容していないため, 列車 t_1 と列車 t_2 には異なるプラットフォームを割り当てなければならない. このような列車 t_1 列車 t_2 の組み合わせについて無向辺で結ぶ.

$GC = (V, EC)$, 但し, 節点集合 $V = \mathbf{T}$, 枝集合 EC , 但し, 枝は以下のように定義される.

```
if ( $DT(t_1) \geq AT(t_2)$ )AND( $AT(t_1) \leq DT(t_2)$ )
then  $(t_1, t_2) \in EC$ 
```

グラフ GT : 乗り継ぎ (Transfer) グラフ

列車を頂点とし, 乗り継ぎの可能性のある (同一面のプラットフォームを割り当てたい) 列車間を枝で接続する有向グラフ. 列車 t_1 から列車 t_2 への乗り継ぎに関して, t_1 の駅到着時および t_2 の駅出発時ともに回送列車でなく, 列車 t_1 の到着時刻から w 分以内に列車 t_2 が出発し, かつ, t_1 の到着元と異なる線路へ列車 t_2 が向かう^{*3}ときに, 乗り継ぎを考慮するものとし, t_1 から t_2 へ有向辺で結ぶ.

$GT = (V, ET)$, 但し, 節点集合 $V = \mathbf{T}$, 枝集合 ET , 但し, 枝は以下のように定義される.

```
if ( $AD(t_1) \neq DD(t_2)$ )AND( $DT(t_2) - AT(t_1) \leq w$ ) AND ( $AS(t_1) = DS(t_2) = 1$ )
then  $(t_1, t_2) \in ET$ 
```

^{*3} t_1 がやってきた方向へ向かう列車へ乗り継ぐと, 後戻りすることとなり, 不正乗車となってしまうため.

二次の目的関数

対面接続最大化を二次式を許容した形で表現すると、次のようになる。

$$\begin{aligned} & \text{Maximize} \quad \sum_{\forall (t_1, t_2) \in ET} \sum_{i \in \mathbf{I}} \sum_{p_1, p_2 \in i} w_{t_1, t_2} x_{p_1}^{t_1} x_{p_2}^{t_2} \\ & \forall (t_1, t_2) \in ET, i \in \mathbf{I}, p_1 \in i, p_2 \in i \end{aligned} \quad (3.3.1)$$

一次の目的関数

ここで、 $y_{p_1, p_2}^{t_1, t_2} = x_{p_1}^{t_1} x_{p_2}^{t_2}$ とおき、目的関数を二次から線形に変形する。なお、この変形に関して、式と同値性を失わないようにするために、後述する制約式 (3.3.9)(3.3.10) を導入する。

$$\begin{aligned} & \text{Mazimize} \quad \sum_{\forall (t_1, t_2) \in ET} \sum_{i \in \mathbf{I}} \sum_{p_1, p_2 \in i} w_{t_1, t_2} y_{p_1, p_2}^{t_1, t_2}, \\ & y_{p_1, p_2}^{t_1, t_2} = x_{p_1}^{t_1} x_{p_2}^{t_2}, \\ & \forall (t_1, t_2) \in ET, i \in \mathbf{I}, p_1 \in i, p_2 \in i \end{aligned} \quad (3.3.2)$$

制約式

プラットフォーム割り当て制約：

$$\sum_{p \in \mathbf{P}} x_p^t = 1, t \in \mathbf{T} \quad (3.3.3)$$

上り方面進路競合制約：

$$\begin{aligned} & x_{p_1}^{t_1} + x_{p_2}^{t_2} \leq c_{p_1, p_2}^{u_1, u_2}, \\ & u_1, u_2 \in \mathbf{U}, AD(t_1) = u_1, DD(t_2) = u_2, \\ & AT(t_1) = DT(t_2), p_1 \in \mathbf{P}, p_2 \in \mathbf{P} \end{aligned} \quad (3.3.4)$$

下り方面進路競合制約：

$$\begin{aligned} x_{p_1}^{t_1} + x_{p_2}^{t_2} &\leq c_{p_1, p_2}^{d_1, d_2}, \\ d_1, d_2 &\in \mathbf{D}, AD(t_1) = d_1, DD(t_2) = d_2, \\ AT(t_1) &= DT(t_2), p_1 \in \mathbf{P}, p_2 \in \mathbf{P} \end{aligned} \quad (3.3.5)$$

発着禁止制約：

$$x_p^t = 0, t \in \mathbf{T}, p \in F_d^{arr}, d \in \mathbf{DIR} \quad (3.3.6)$$

$$x_p^t = 0, t \in \mathbf{T}, p \in F_d^{dep}, d \in \mathbf{DIR} \quad (3.3.7)$$

排他制約：

$$x_p^{t_1} + x_p^{t_2} \leq 1, \forall (t_1, t_2) \in EC, p \in \mathbf{P} \quad (3.3.8)$$

変数 y に関する制約：

$$\begin{aligned} x_{p_1}^{t_1} + x_{p_2}^{t_2} - y_{p_1, p_2}^{t_1, t_2} &\leq 1, \\ \forall (t_1, t_2) &\in ET, I \in \mathbf{I}, p_1, p_2 \in I \end{aligned} \quad (3.3.9)$$

$$\begin{aligned} -x_{p_1}^{t_1} - x_{p_2}^{t_2} + 2y_{p_1, p_2}^{t_1, t_2} &\leq 0, \\ \forall (t_1, t_2) &\in ET, I \in \mathbf{I}, p_1 \in I, p_2 \in I \end{aligned} \quad (3.3.10)$$

0-1 変数制約：

$$x_p^t \in \{0, 1\}, t \in \mathbf{T}, p \in \mathbf{P} \quad (3.3.11)$$

$$\begin{aligned} y_{p_1, p_2}^{t_1, t_2} &\in \{0, 1\}, \\ \forall (t_1, t_2) &\in ET, I \in \mathbf{I}, p_1 \in I, p_2 \in I \end{aligned} \quad (3.3.12)$$

式 (3.3.3) はすべての列車はただ 1 つのプラットフォームに割り当てられることを示す。式 (3.3.4) は同時刻に上り方面で動く列車は、互いに進路を妨げないように割り当てなければならないことを示す。同様に式 (3.3.5) は、同時刻に下り方面で動く列車は、互いに進路を妨げないように割り当てなければならないことを示す。式 (3.3.6) は列車の到着方

向から進路を設定できない (例えば図 3.3.1 において上り方面から 11 番線) ならば, そのプラットフォームに対して列車を割り当ててはならないことを示す. 同様に式 (3.3.7) は, 列車の出発方向に対して進路を設定できない (例えば図 3.3.1 において 11 番線から上り方面) ならば, そのプラットフォームに対して列車を割り当ててはならないことを示す. 式 (3.3.8) は同時刻に駅内に存在する列車は異なるプラットフォームに割り当てなければならないことを示す. 式 (3.3.9) および式 (3.3.10) は目的関数式を (3.3.1) 式から一次式で表現される (3.3.2) 式へ変形する際に, 変数 y に関して式の同値性を失わないために導入する制約である. 式 (3.3.11)(3.3.12) は, 0-1 変数制約である.

3.3.3 k L -list τ colouring problem との関係

本問題は k L -list τ colouring problem [11] に対して, 対面乗り継ぎ最大化を目的関数として考慮したものと考えることができる.

k L -list τ colouring problem は, 彩色問題の一種で, グラフ $G = (V, E)$ における各頂点 $x \in V$ に対して 1 色を割り当てる彩色 $F(x)$ を与える問題である.

- 辺で結ばれている頂点を異なる色で彩色する.
- 各頂点 $x, \forall x \in V$ について, $L(x) = \{A : A \subseteq IN\}$ なるリストが与えられ, 各頂点 x は, $L(x)$ 内のいずれかで彩色しなければならない.
- τ -set が与えられる. τ -set の要素は $(x, y; F(x), F(y))$ という構造の 4 組になっており, x, y の彩色について, $F(x), F(y)$ という組み合わせで彩色してはならない.

式 (3.3.6)(3.3.7) により与えられる各列車の使用可能なプラットフォームの制約が [11] での list $L(x)$ に対応する. また, 式 (3.3.4)(3.3.5)(3.3.8) より与えられる, 発着競合や排他制約などの, プラットホームの割り当て上における制約と, [11] における τ set が対応

する .

[11] で述べられているとおり , k L -list τ colouring problem は NP 完全問題のクラスに属している . そのため , 本問題も NP 困難問題のクラスに属する .

3.3.4 0-1 整数 2 次計画問題から 0-1 整数計画問題へ変換

費用 (目的関数) が二次関数の割り当て問題を線形に変換する手法は、[12] など古典的手法で、目的関数の二次の項 x_1x_2 について、 $y = x_1x_2$ という変数を導入し、以下の制約を加える。

$$(1) \quad x_1 + x_2 - y \leq 1$$

$$(2) \quad -x_1 - x_2 + 2y \leq 0$$

$$(3) \quad y = \{0, 1\}$$

この変形が成立することは、真理値表を作成すると明らかである。

Table 3.3.3 真理値表

x_1	x_2	x_1x_2	y	
0	0	0	0	(2)(3) より
0	1	0	0	(2)(3) より
1	0	0	0	(2)(3) より
1	1	1	1	(1)(3) より

3.4 実例に基づく実験

2 件の実例について、実データ (時刻表データ) を用いて実験を行う .

3.4.1 実験1：新幹線博多駅の事例

博多駅の新幹線ホーム（東海道・山陽新幹線）に関する事例について実験を行う。2011年3月12日改正ダイヤについて、JR時刻表2011年3月号（(株)交通新聞社発行）に基づき、同誌掲載日（3月～6月）のうち、運行本数が最も多い5月3日の列車データ（ $AT(t), AD(t), AS(t), DT(t), DD(t), DS(t)$ に相当するデータ）を作成する。なお、JR時刻表に記載されていない事項については、付録に記載する要領で車両運用、および、回送列車発着時刻を推測してデータを作成する。また、目的関数について、 w_{t_1, t_2} について重みを考慮せず（ $w_{t_1, t_2}: t_1, t_2 \in ET$ ならば1, $t_1, t_2 \notin ET$ ならば0）、対面接続できる列車の組数の最大化とする。

- 乗り換えを考慮する時間 w は、15分（乗り継ぎ時間が15分を超える列車間は乗り継ぎを考慮しない）とする。
- 駅の線路配線は図3.3.1に倣う。
- 11番線に上り方面から到着／上り方面へ出発する列車を割り当てることはできない。
- 11番線と12番線、13番線と14番線、15番線と16番線とが、対面乗り継ぎ可能である。

以上より、駅の構造に関する入力は以下ようになる。

- $\mathbf{U} = \{u\}$
- $\mathbf{D} = \{d\}$
- $\mathbf{P} = \{p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}, p_{15}, p_{16}\}$
- $\mathbf{I} = \{I_1, I_2, I_3\}$

- $I_1 = \{p_{11}, p_{12}\}$
- $I_2 = \{p_{13}, p_{14}\}$
- $I_3 = \{p_{15}, p_{16}\}$
- $F_u^{arr} = \{p_{11}\}$
- $F_d^{arr} = \emptyset$
- $F_u^{dep} = \{p_{11}\}$
- $F_d^{dep} = \emptyset$
- $w_{t_1, t_2} : \{t_1, t_2\} \in ET$ ならば 1, $t_1, t_2 \notin ET$ ならば 0
- $c_{pa, pd}^{u, u}$: 表 3.3.1 のとおり
- $c_{pa, pd}^{d, d}$: 表 3.3.2 のとおり

列車の運用 (使用車両の同定) について

1. 山陽新幹線 九州新幹線を直通する列車に関しては, 到着列車と出発列車は時刻表のとおり扱う.
2. 山陽新幹線 博多南線 (博多総合車両所に併設される博多南駅と博多駅との間を行き来する列車) を直通する列車に関しては, 到着列車と出発列車は時刻表のとおり扱う.
3. 山陽新幹線 山陽新幹線と折り返す列車に関して, 「博多駅到着時刻と博多駅始発列車の入線時刻とが一致し, 発着するプラットフォームが一致する列車は, 同一車両が折り返し使用されるものと推定する.
4. 九州新幹線 九州新幹線と折り返す列車に関しては, 車両形式 (800 系/N700 系) が一致し, 同一ホーム上で (九州新幹線) 博多着 博多発と対応付けることができる列車は, 同一車両が折り返し使用されるものと推定する.

5. 上記規則で対応付けることのできない博多始発列車は，博多総合車両所から回送列車として入線すると推定する．
6. 上記規則で対応付けることのできない博多終着列車は，博多総合車両所へ回送列車として出発すると推定する．

回送列車の発着時刻について

1. 博多総合車両所から回送され，上り（大阪・東京方面）へ向かう列車の到着時刻は，時刻表の入線時刻に倣う
2. 博多総合車両所から回送され，九州新幹線（熊本・鹿児島）へ向かう列車は，列車の出発時刻の3分前もしくは同一プラットフォームの前列車の出発3分後のうち後となる時刻に到着すると推定する．
3. 博多駅から博多総合車両所へ回送する列車の博多駅出発時刻は，同一ホームに次列車が到着する3分前もしくは博多駅到着時刻の10分後のうち先となる時刻に出発すると推定する．
4. 但し2. および3. で推定した時刻に関して，他列車の発着と同時刻で競合する場合，もしくは，前後の列車との列車間隔が3分に満たない場合，「プラットフォーム内で前後の列車と3分の間隔を確保する」「同一方面へ到着/出発する列車との運行間隔を3分あける」の両方の条件を満たす最近傍の時刻に調整する

3.4.2 実験2：新幹線新大阪駅の事例

新大阪駅の新幹線ホーム（山陽・九州新幹線）に関する事例について実験を行う．2011年3月12日改正ダイヤについて，駅構内の発着時刻表に基づき，閑散期平日（臨時列車が運行されない平日）の列車データ（ $AT(t)$, $AD(t)$, $AS(t)$, $DT(t)$, $DD(t)$, $DS(t)$ ）に相当

するデータ)を作成する．なお，回送列車について，毎日運行されるものについては，すべて含むものとする．一方，新幹線電気軌道総合試験車(通称ドクターイエロー)などの不定期の事業用列車は含めない．また，目的関数について， w_{t_1, t_2} について重みを考慮せず ($w_{t_1, t_2}: t_1, t_2 \in ET$ ならば 1, $t_1, t_2 \notin ET$ ならば 0)，対面接続できる列車の組数の最大化とする．

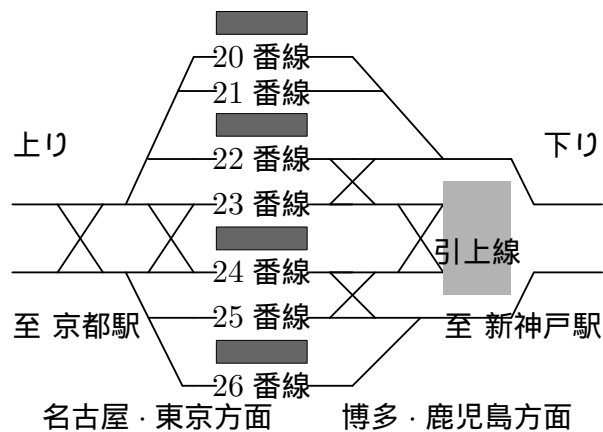


Figure 3.4.1 新大阪駅構内配線図

- 乗り換えを考慮する時間 w は，15 分 (乗り継ぎ時間が 15 分を超える列車間は乗り継ぎを考慮しない) とする．
- 駅の線路配線は図 3.4.1 に倣う．
- 21 番線と 22 番線，23 番線と 24 番線，25 番線と 26 番線とが，対面乗り継ぎ可能である．
- 20 番線，21 番線，26 番線に引き上げ線から移動する列車を割り当てることはできない．
- 20 番線，21 番線，26 番線に引き上げ線へ移動する列車を割り当てることはできない．

以上より，駅の構造に関する入力は以下のようになる．

- $\mathbf{U} = \{u\}$
- $\mathbf{D} = \{d, h\}$
- $\mathbf{P} = \{p_{20}, p_{21}, p_{22}, p_{23}, p_{24}, p_{25}, p_{26}\}$
- $\mathbf{I} = \{I_1, I_2, I_3, I_4\}$
- $I_1 = \{p_{20}\}$
- $I_2 = \{p_{21}, p_{22}\}$
- $I_3 = \{p_{23}, p_{24}\}$
- $I_4 = \{p_{25}, p_{26}\}$
- $F_u^{arr} = \emptyset$
- $F_d^{arr} = \emptyset$
- $F_h^{arr} = \{p_{20}, p_{21}, p_{26}\}$
- $F_u^{dep} = \emptyset$
- $F_d^{dep} = \emptyset$
- $F_h^{dep} = \{p_{20}, p_{21}, p_{26}\}$
- $w_{t_1, t_2} : \{t_1, t_2\} \in ET$ ならば 1 , $t_1, t_2 \notin ET$ ならば 0
- $c_{pa, pd}^{u, u}$: 表 3.4.1 のとおり
- $c_{pa, pd}^{d, d}$: 表 3.4.2 のとおり
- $c_{pa, pd}^{h, h}$: 表 3.4.3 のとおり
- $c_{pa, pd}^{h, d}$: 表 3.4.4 のとおり
- $c_{pa, pd}^{d, h}$: 表 3.4.5 のとおり

Table 3.4.1 $c_{pa,pd}^{u,u}$:新大阪駅新幹線上り方面発着競合

$pa \setminus pd$	20	21	22	23	24	25	26
20 番線	0	1	1	2	2	2	2
21 番線	1	0	1	2	2	2	2
22 番線	1	1	0	2	2	2	2
23 番線	1	1	1	0	2	2	2
24 番線	1	1	1	1	0	2	2
25 番線	1	1	1	1	1	0	1
26 番線	1	1	1	1	1	1	0

Table 3.4.2 $c_{pa,pd}^{d,d}$:新大阪駅新幹線下り方面発着競合 1

$pa \setminus pd$	20	21	22	23	24	25	26
20 番線	0	1	1	1	1	1	1
21 番線	1	0	1	1	1	1	1
22 番線	1	1	0	1	1	1	1
23 番線	1	1	1	0	1	1	1
24 番線	2	2	2	2	0	1	1
25 番線	2	2	2	2	1	0	1
26 番線	2	2	2	2	1	1	0

3.4.3 結果

実験 1 および 実験 2 について、汎用ソルバー CPLEX Optimization Studio Academic Research Edition 12.3 を使用し、計算を行った。計算機のスペックは、CPU:Phenom

Table 3.4.3 $c_{pa,pd}^{h,h}$:新大阪駅新幹線下り方面発着競合 2

$pa \setminus pd$	20	21	22	23	24	25	26
20 番線	0	0	0	0	0	0	0
21 番線	0	0	0	0	0	0	0
22 番線	0	0	0	1	2	2	0
23 番線	0	0	1	0	2	2	0
24 番線	0	0	1	1	0	1	0
25 番線	0	0	1	1	1	0	0
26 番線	0	0	0	0	0	0	0

Table 3.4.4 $c_{pa,pd}^{h,d}$:新大阪駅新幹線下り方面発着競合 3

$pa \setminus pd$	20	21	22	23	24	25	26
20 番線	0	0	0	0	0	0	0
21 番線	0	0	0	0	0	0	0
22 番線	2	2	0	1	2	2	2
23 番線	2	2	2	0	2	2	2
24 番線	2	2	2	2	0	2	2
25 番線	2	2	2	2	1	0	2
26 番線	0	0	0	0	0	0	0

X4 2.4GHz; Memory 2GB である。計算結果は表 4.6.1 に示すとおりである。

Table 3.4.5 $c_{pa,pd}^{d,h}$:新大阪駅新幹線下り方面発着競合 4

$pa \setminus pd$	20	21	22	23	24	25	26
20 番線	0	0	2	2	2	2	0
21 番線	0	0	2	2	2	2	0
22 番線	0	0	0	2	2	2	0
23 番線	0	0	1	0	2	2	0
24 番線	0	0	2	2	0	1	0
25 番線	0	0	2	2	2	0	0
26 番線	0	0	2	2	2	2	0

Table 3.4.6 計算結果

	実験 1:博多駅	実験 2:新大阪駅
全列車本数	286 列車	333 列車
対面乗り継ぎさせたい列車の組	269 組	333 列車
現行ダイヤで対面乗り継ぎ可能な列車の組	95 組	91 組
本提案手法で接続させることのできた列車の組	171 組	234 組
計算所要時間	156.59[sec]	276.62[sec]

3.4.4 考察

本手法を適用することにより、駅における発着時刻を変更することなく（すなわち、既存ダイヤに対して変更を加えることなく）、現状の 2 倍から 3 倍近い本数を対面乗り継ぎ可能に割り当てることが可能であることが示された。ただし、本提案手法では、現状で対

面乗り継ぎ可能な列車の組について、提案手法適用後にも対面乗り継ぎ可能となることを保障していない。また、列車の組の数のみに着目しているため、列車を乗り継ぐ利用者の数を加味していない。そのため、実際には乗り継ぐ乗客が少ない列車間を接続できるようにした一方で多数の乗客が乗り継ぐ列車間で対面乗り継ぎ可能であったものが接続できなくなっている可能性を含む。全体の傾向として、直通列車が、進行方向を向いて左側の外側寄りに割り当てられ、折り返し列車が中央寄りのホームに割り当てられる傾向がみられた。これは、日本国内において列車の運行が左側通行であることに起因し、直通列車が他列車の発着を極力妨げず、他の列車の影響を受けにくいように、進行方向左外側に割り当てられたためと考えられる。

博多駅の割り当てについて

11番線は、上り方面と接続されていないため、下り方面（九州新幹線、および、博多南線）から到着し、折り返し下り方面へ向かう列車のみにしか割り当てることができない。発着本数の多いラッシュ時間帯については、下り方面の折り返し列車が11番線に割り当てられ、これらの列車と接続できる博多始終着列車が12番線に現状以上の組み合わせの列車が割り当てられていた。一方、閑散時には、これらのホームの使用頻度が下がっている。具体的には、たとえば、九州新幹線折り返し列車が14番線に割り当てられるとき、この列車と接続できる、山陽新幹線方面へ向かう博多始発列車が13番線に割り当てられる。次いで、その出発後に、山陽新幹線方面からの博多終着列車が13番線に割り当られ、14番線の折り返し列車（九州新幹線方面へ向かう）とうまく接続させる、といったパターンが多くみられた。

新大阪駅の割り当てについて

特に、20番線と23-24番線の使用方法に、現状と大きな違いが見られた。現状では、下り方面（山陽新幹線新神戸駅方面）から到着し、折り返し下り方面へ向かう列車（主に九州新幹線直通列車、および、山陽新幹線のこだま）は、20番線に割り当てられている。23番線、24番線は、東京発の新大阪止まりの列車、新大阪始発の東京行き列車の一部が発着する。これに対して本手法を適用した結果、特に閑散時について、現状で20番線を発着していた列車も、23-24番線に割り当てられるようになった。これにより、東海道新幹線、山陽新幹線共に、新大阪始終着列車間の接続が良くなり、これに伴い、対面で接続できない20番線の使用頻度が著しく低くなっていた。

3.5 まとめ

本研究では、乗客の乗り継ぎ利便性を向上（階段移動を伴わない乗り継ぎを最大化）する発着プラットフォーム割り当て問題について考え、定式化し、ソルバー CPLEX を利用して博多駅、および、新大阪駅の実例について計算を行った。今後の課題として、本問題を解く実用的な近似アルゴリズムの開発を目指す。また、今回の実験では旅客流動量（乗り継ぎ人数）を考慮していない。もし旅客流動のデータが入手できたならば、それを考慮した計画の作成、および、その検証を行いたい。

第4章

列車運行における二次遅延を抑制するリスケジュールリング

4.1 まえがき

近年，国内の都市部には高い鉄道需要があり，鉄道会社はその需要に応えるべく特に平日早朝の通勤ラッシュ時にはほとんど余裕の無い列車運行を行っている．そのため，小さな1次遅延（歩行者の踏切への進入や旅客の駆け込み乗車等によって直接引き起こされる最初の遅延）は日常的に発生しており，1次遅延が次々に2次遅延（他の列車の遅延が原因で副次的に発生する遅延）を発生させ，大規模なダイヤ乱れに繋がることも少なくない．大規模な列車の遅延は，旅客や貨物に多大な影響を与えることになる．その被害額は列車の最大遅延時間の2乗に比例し，特に大都市圏では40分の遅延は1億円以上の被害額になるとの報告もある [16]．また，用地を確保しにくい都市の一部では，需要の高さに関わらず複線（任意の場所で列車同士の行き違いを行える区間）化できず，単線（一部の駅や信号所でのみ行き違いを行える区間）のまま運行を続けている区間も少なくない．単線では，対向列車の待ち合わせを行う必要がある都合上，複線区間に比べて遅延が伝播し

やすい。さらに、大規模な2次遅延の引き金になる1次遅延はその65%が10分以下の小さなものであるという調査結果 [16] もあることから、近年、国内では、小さな1次遅延が発生しても、その遅延を波及させることなく自動的に回復させることができる頑健な列車計画（列車が何時にどの駅からどの駅へ走るのがを定めた計画）への関心が高まってきている。

一般的に各列車の駅間の移動時間（運転時分）や駅における停車時間（停車時分）は、若干の余裕を見込んで設定されている。この余裕を余裕時分と呼び、旅客乗降に伴う停車時間の延長等で生じた比較的小さな遅延を回復する目的で活用されている。余裕時分は、全区間に一律に与えられている訳ではなく、各駅の乗降者数や混雑が発生する時間などに関する調査データ、および、列車計画を作成する担当者の経験と勘に基づき、遅延が発生しやすいと考えられる区間に重点を置いて設けられている。余裕時分の配分の仕方により、大規模な遅延を引き起こすリスクや遅延の収束のしやすさ等に大きな違いが現れる [17]。

欧州では、列車計画の頑健性に関する研究が盛んである [18]。[19]、[20] では、複線路線を対象に、遅延が回復するまでの時間の短縮や、遅延時の旅客満足度の低下の抑制等、良好な結果が得られている。しかしながら、これらの研究では全ての列車を同等に扱っているものがほとんどであり、区間や時間帯等に関する列車毎の事情を反映させにくいという問題が残る。また、単線では、駅等において、相対する方向に向かう列車の行き違いをさせる交換を考慮しなければならないため、複線に比べて制約が多いと言える。著者らの知る限り、単線を扱った研究は少ないが、[21]、[22] などがある。[21] では、単線路線を対象に、1本の列車に遅延が発生した時に別の列車に遅延を伝播させない度合いを列車計画における遅延に対する頑健性と定義し、評価尺度を提案している。しかしながら、[21] では、評価尺度の提案に留まっており、実用を想定した列車計画の生成方法については触れていない。[22] では、ドイツの単線路線を対象に、2次遅延の発生しにくさを評価値

とした頑健性尺度を提案している。しかしながら、この尺度は、交換によって発生する 2 次遅延について網羅しきれていない。例えば、2 回の交換を控える列車において、1 回目の交換を行う前に 1 次遅延が発生したとき、1 回目と 2 回目の両方の交換を考慮しなければ、列車に発生した 1 次遅延が 2 次遅延を発生させるか否かを判断することはできないはずである。しかしながら、[22] では、1 回目の交換のみで 2 次遅延の発生の有無を判定している。[23] では、列車の移動時間や停車時間に適切な余裕時分を配分する手法で、遅延に対して頑健な列車計画の生成を行っている。計算機実験では、オランダの北ホラント州の大規模な鉄道網を対象とし、精度の良い解を数十時間程度で得ることに成功している。しかしながら、終始点駅（始発駅または終着駅）における列車の発着時刻の変更を許容しているため、実際に実路線に適用するときを考えると、列車計画以外の様々な計画（例えば、車両や乗務員の運用計画など）に影響を与える可能性が懸念される。

一方、国内では、欧州に比べて列車遅延に対する頑健性に関する研究は少ない。[24] では、混雑度や遅延時間等に基づいた旅客の不効用値を用いて列車計画の評価尺度を提案している。また、乗降時分のばらつきに基づいて 1 次遅延のモデル化を行い、実在する列車計画に対して余裕時分を接続駅周辺に集中させることで、頑健性が改善された列車計画が生成できることを確認している。しかしながら、[24] で提案している頑健性尺度に最適化された列車計画の生成方法については言及しておらず、余裕時分の配分方法を検討する余地を残している。

本研究では、単線区間を含む国内の鉄道路線を対象とし、余裕時分の最適な配分によって 10 分以下の小さな 1 次遅延に対して頑健な列車計画を生成する手法を提案する。

4.2 諸定義

4.2.1 問題の対象

本研究では、単線を含む国内の鉄道路線を対象に列車計画の生成を行う。複線では路線内のどこでも交換が行えるのに対し、単線では交換を行える場所が、交換のための設備を備えた一部の駅や信号場のみに制限される。つまり交換を行う際、交換を行う場所に先に到着した列車 t_1 には、もう一方の列車 t_2 の到着を待つ時間が発生することになる。ここで、列車 t_2 の到着が遅れると、列車 t_1 の出発が遅れる。さらに、交換後に遅れて出発した列車 t_1 が次に交換を行う場所に到着するまでに列車 t_1 が遅延を回復できなければ、さらに、別の列車に遅延が伝播していく可能性がある。このような交換による待ち時間や遅延の伝わりやすさ等から、単線は、複線よりも、遅延に対する頑健性を持つ列車計画の生成が困難であると考えられる。

4.2.2 列車計画の生成に関する諸事情

列車計画の生成に関しては、実路線における様々な事情を考慮する必要がある。その中でも、本研究に特に関係の深いものを以下に示す。

交換駅や終着駅に遅延を持ち越すと多くの旅客の満足度が低下する可能性がある。交換駅の場合、遅延した列車と待ち合わせをしている列車にそのまま2次遅延が発生し、待ち合わせ列車の旅客を遅延に巻き込むことになる。終着駅の場合、遅延した列車の待ち合わせをしている列車は、遅延した列車を待つ以外に「予定通りに出発する」という選択をすることもできる。しかしながら、待ち合わせ列車が遅延した列車を待たずに出発すると、遅延した列車の乗客の一部は、予定していた列車への乗り換えに失敗し、目的地への到着

がさらに遅れることになる。結局、終着駅への到着が遅れることは旅客の満足度の低下を引き起こすものであるといえる。一方、1次遅延のほとんどは小規模なものであるため、2次遅延さえ発生させなければ、旅客がそれぞれの目的の駅に到着した時の遅延は僅かであり、旅客の満足度の低下は小さいものと考えられる。そのため、本研究では2次遅延を極力発生させず終着駅への到着に間に合うことに重点を置いた評価尺度を定義する。

1次遅延発生には偏りが存在していると考えられる。一般的に、1次遅延が発生する原因は、悪天候、人身事故、システムの不具合等、予測が困難なものが多い。しかしながら、通勤ラッシュ時の都市部の駅では、旅客乗降に伴う停車時間の延長が発生しやすいことや、踏切の多い区間では人身事故が発生する確率が高いこと等、実際には1次遅延が発生する時間や場所には偏りが存在すると言える。そのため、本研究では1次遅延発生の偏りを反映させられる評価尺度を定義する。

終始点駅の発着時刻の変更は、列車計画を含む諸々の計画に大きな影響を与える可能性がある。まず、列車が定刻に始発駅を出発するには、その時刻までに、使用する車両が始発駅に存在していなければならないため、駅構内の車両の移動手順を決定する計画の変更が余儀なくされる。また、この車両が複数の路線で使用されるものであれば、車両の運用計画も変更しなければならなくなる。また、列車を動かすためには乗務員が必要になるため、乗務員の運用計画も書き換えられる。これらについては、終着駅についても同様のことが言える。さらに、終始点駅付近では他の路線と線路を共有している可能性が考えられるため、複数の路線の列車計画を考慮しなければならなくなる。つまり、一本の列車の終始点駅における発着時刻を変更するためには、同時に多くの計画を考慮しなければならない。そのため、本研究では全ての列車の始発駅における出発時刻と終着駅の到着時刻は既存の列車計画に従うこととする。

大き過ぎる余裕時分は旅客の満足度を低下させる可能性がある。ところで、任意の列車

は、始発駅を出発後、駅間の移動と、駅および信号所での停留のみを繰り返して終着駅に到着する。そこで、本稿では、この駅間の移動作業と、停留作業を総称して作業と呼ぶことにする。ある作業に割り当てられた余裕時分は、その作業を実行するまでに発生した遅延に対してのみ有効である。何故なら、過去の余裕時分で未来の遅延を回復させることはできないからである。そのため、余裕時分は、一般的には交換駅や終着駅の直前に割り当てるのが良いと考えられる。また、駅間の列車の移動時間よりも、遅延が発生しやすい駅での停車時間に余裕時分を割り当てた方が良いという考え方や、運行中にトラブルが発生した時に駅間よりも駅構内の方が対処がしやすいという考え方から、実際の列車計画では、移動作業より停留作業に余裕時分を多く割り当てる傾向がみられる。以上の考え方に従うと終着駅直前の駅か交換駅での停車時間に全ての余裕時分を配分することが良いということになる。しかしながら、終点直前で列車がなかなか出発しなければ、旅客の不満が高まってしまう。そのため、本研究では、各作業に割り当てられる余裕時分に上限を設定することとする。

4.2.3 問題定義

まず、4.2.2に基づいて、遅延に対する頑健性を定量化した頑健性スコアの定義を行う。

頑健性スコア 全移動作業と全停留作業の集合 A_o における任意の作業 $a \in A_o$ に対して発生した 1 次遅延が a 以降の作業で回復可能な遅延時分の最大値を s_a , 任意の作業 $a \in A_o$ における重要度 (作業 a で発生した 1 次遅延が伝播した時に影響を受ける旅客の数 , および , 遅延の発生しやすさ等を考慮して与えられる数値^{*1}) を $W(a)$ とした時の $\sum_{a \in A_o} W(a)s_a$ の値 . 但し , 回復可能とは , 1 次遅延が伝播せず , かつ , 作業 a を行う列車が終着駅への予定到着時刻に間に合うことである .

また , 4.2.2 と頑健性スコアに基づいた頑健性最大化問題を以下のように定義する .

頑健性最大化問題 全列車の全事象 (出発 , 到着) 集合 V_o , 全作業 (移動 , 停留) 集合 A_o , 各作業を実行する最小所要時間 $L : A_o \rightarrow \mathbb{Z}^+ \cup \{0\}$, 作業毎に割り当てられる余裕時分の上限 $U : A_o \rightarrow \mathbb{Z}^+ \cup \{0\}$, 各作業の重要度 $W : A_o \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$, 各列車の始発駅出発事象 $P \subset V_o$ と終着駅到着事象 $Q \subset V_o$ の発生時刻 $\tau(a) : P \cup Q \rightarrow \mathbb{Z}^+ \cup \{0\}$ が与えられた時に , 頑健性スコアを最大化する余裕時分 x_a ($a \in A_o$) を求める . ただし , $x_a \leq U(a)$ ($a \in A_o$) であり , 隣接する各事象 $i, j \in V_o$ の発生時刻 ϕ_i, ϕ_j について $\phi_j - \phi_i = L(a) + x_a$ ($a = (i, j) \in A_o$) である .

余裕時分の下限については , 陽に扱わないことにする . なぜなら , 余裕時分の下限を考慮する必要がある場合は , 最小所要時間を予め余裕時分の下限值を含んだものにしておくことで対応できるからである .

4.2.4 具体例

シンプルな例を用いて頑健性スコアと頑健性最大化問題について説明する . ここでは , 図 4.2.1 に示すような , A 駅 (St.A) , B 駅 (St.B) , C 駅 (St.C) , D 駅 (St.D) からなる直線

^{*1} 重要度の具体的な算出方法については , 本稿では触れない .

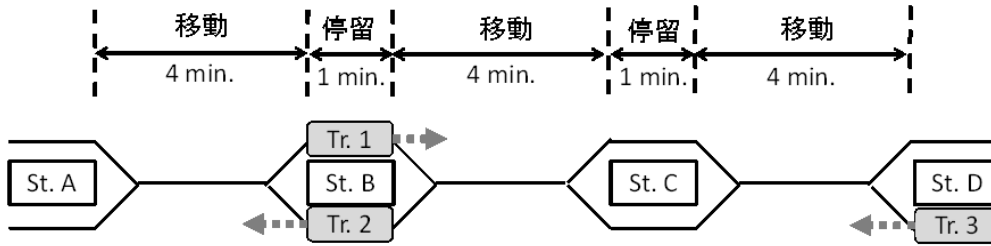


Figure 4.2.1 疑似的な路線図

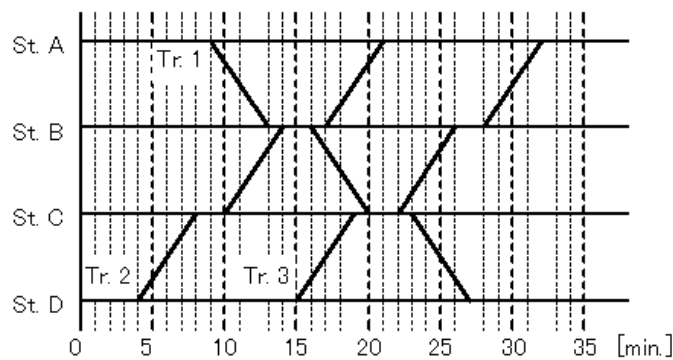


Figure 4.2.2 列車ダイヤ図

状の路線と，A 駅から D 駅へ向かって走行する列車 1(Tr.1)，D 駅から A 駅へ向かって走行する列車 2(Tr.2)，列車 3(Tr.3) を考える．ここで，問題を単純化するために，全ての隣接する駅間の移動時間は常に 4 分，最小停車時間は 1 分，全作業の重要度は 1 とする．列車 1, 2, 3 の運行は図 4.2.2 の列車ダイヤ図で表される．列車ダイヤ図とは，列車計画を図に表したもので，横軸が時刻，縦軸が駅を表わしており，列車の運行をスジと呼ばれる折れ線で表現している．例えば，列車 2 について見てみると，4 分に D 駅を出発し，8 分に C 駅に到着して 2 分停留した後，10 分に C 駅を出発するといった運行の情報が読み取れる．以上の条件から設定された頑健性最大化問題では，各列車の B 駅と C 駅の発着時刻のみを変更させて頑健性スコアが最大になる実行可能（停車時間や移動時間を守り，列車同士が衝突することが無い）な列車計画を作成することになる．

図 4.2.2 の一部を変更し，頑健性スコアの変化を確かめる．ここで，頑健性スコアの定義を振り返ると，全ての列車は，他の列車に遅延を伝播させず，かつ，終着駅までには完全に遅延が回復していなければならなかった．まずは，列車 2 の C 駅出発時刻を 1 分早めた場合を考えてみる．このとき，駅間の移動時間は常に 4 分とするため，B 駅到着時刻も 1 分早まる．よって，B 駅において列車 2 が到着してから列車 1 が出発するまでの時間に 1 分の余裕が生まれる．ここで，この余裕は，列車 2 の C 駅出発から B 駅到着までの間で発生した遅延に対して有効（遅延の回復に使用できる）である．一方，D 駅出発から C 駅出発までの間で発生した遅延に対しては影響はない．従って，列車 2 の頑健性スコアは 1 単位向上していると言える．このように，列車の運行を早めることによって遅延に対する頑健性が向上する場合がある．しかしながら多くの場合，ある列車の頑健性を向上させることによって，別の列車の頑健性が低下する．ここで，列車 1 の B 駅出発時刻を 1 分早めた場合を考える．この時，列車 1 は C 駅における列車 3 との待ち合わせに 1 分の余裕が生まれ，列車 1 の頑健性スコアは 1 単位向上する．しかしながら，列車 2 の視点から考えると，B 駅における列車 1 との待ち合わせの余裕が 1 分減少したことになる．これにより，列車 2 の D 駅出発から B 駅到着までの運行の余裕が 1 分減少する，D 駅出発から B 駅到着までの運行は 3 つの作業から構成されているため，列車 2 の頑健性スコアは 3 単位減少し，列車計画全体として頑健性スコアは 2 単位減少したことになる．このように，列車の運行を早めることによって列車計画の頑健性が低下する場合もあることが言える．

4.3 余裕時分ネットワークモデルについて

4.3.1 概要

余裕時分ネットワークとは、列車の事象（出発または到着）を示すノードの集合を V 、事象間の作業やその他事象間の時隔（時間間隔）を示すアークの集合を A とし、列車計画の回復能力（各作業の回復可能な遅延の上限）を表現することを目的とした有向グラフである。ここで、アーク集合 A には、重要度 $W: A \rightarrow R_{\geq 0}$ 、最小所要時間 $L: A \rightarrow Z^+ \cup \{0\}$ 、余裕時分の上限 $U: A \rightarrow Z^+ \cup \{0\}$ が定義されている。また、作業 $a \in A$ に割り当てられている余裕時分を変数 x_a で表現し、事象 $i \in V$ の発生時刻を変数 ϕ_i で表現する。

4.3.2 アークの種類

アーク集合 A はそれぞれ異なる意味を持つ 4 種類のアークから構成されている。

ontime アーク 遅延が発生していない時の運行を構成する作業アーク（移動または停留を表すアーク）を ontime アークと呼ぶ。任意の ontime アーク a については、

$W(a), L(a), U(a)$ は 0 以上の任意の値を設定する。

deadline アーク これ以上遅れると終点への到着時刻に間に合わない、もしくは、2 次

遅延を発生させてしまう、といった運行を構成する作業アークを deadline アーク

と呼ぶ。deadline アーク a については、 $W(a) = 0$ とし、 $L(a)$ は対応する（同じ

列車の同じ作業）ontime アークと同じものとする。 $U(a)$ については、 a の始点が

始発駅からの出発事象か終着駅への到着事象であれば $U(a) = 0$ 、そうでなければ

$U(a) \rightarrow \infty$ とする。

recovery アーク 本アークと始点を共有する作業アークが示す作業以降で回復できる遅延の上限を表わすアークを recovery アークと呼ぶ。recovery アーク a については、 $W(a)$ は a と始点を共有している ontime アーク b の重要度 $W(b)$ と等しいものとし、 $L(a) = 0$ 、 $U(a)$ については 0 または ∞ とする。

conflict アーク 安全性を保障するために^{*2}特定の事象間に確保すべき時隔アークを conflict アークと呼ぶ。conflict アーク a については、 $W(a) = 0$ とし、 $L(a)$ は 0 以上の任意の値、 $U(a) \rightarrow \infty$ とする。

ここで、1 つ以上の ontime アークで構成される列車の運行を予定運行ライン、1 つ以上の deadline アークで構成される列車の運行を最遅運行ラインと定義する。

ある列車 t の運行を表現した余裕時分ネットワーク例を図 4.3.1 に示す。ここで、円は事象を表わしており、円上の数値はその事象の発生時刻を表わしている。また、水平に並んだ事象は、発生時刻以外は列車 t の同じ事象（上段から順に A 駅からの出発、B 駅への到着、B 駅からの出発、C 駅への到着）を表わしている。

太線で示すアークは ontime アークであり、予定運行ラインを構成している。列車 t が遅延していなければ、列車 t は予定運行ラインに沿って時刻 0 に A 駅を出発し、時刻 3 に B 駅に到着して時刻 5 に B 駅を出発し、C 駅に到着する前に全余裕時分を使い切って時刻 12 に終点である C 駅に到着する。

点線で示すアークは deadline アークであり、最遅運行ラインを構成している。列車 t が回復可能な限界まで遅延している時、列車 t はこの最遅運行ラインに沿って運行すること

^{*2} 例えば、ある交換駅で列車 t_1 が対向列車 t_2 を待っている状況を想定する。この時、 t_1 が t_2 を待たずに交換駅を出発すると、線路上で t_1 と t_2 は衝突する。そこで、 t_2 の交換駅到着後、一定時間経過するまで t_1 を出発させないという制約を設けることで、 t_1 と t_2 の衝突を回避させている。余裕時分ネットワーク上では、 t_2 の交換駅到着事象から t_1 の交換駅出発事象までの間に conflict アークを張ることでこれを表現している。

になる．例えば，B 駅の到着時刻で考えると，列車 t は時刻 7 までに B 駅に到着できれば，今後さらに遅れることが無い限りは時間通りに C 駅に到着することができる．

細線で示すアークは recovery アークであり，作業毎に回復可能な遅延の上限を表している．例えば，B 駅の到着時刻は，列車 t に遅延が発生していなければ時刻 3，回復できる限界まで遅延していれば時刻 7 である．従って，B 駅の到着事象間に張られた recovery アークは，A 駅出発時に遅延が発生していないと仮定して，A 駅出発から B 駅到着までに回復可能な遅延の上限は 4 であることを表している．また，始発駅（A 駅）からの出発事象か終着駅（C 駅）への到着事象を始点とする recovery アークは，常に $U(a) = 0$ としているが，これらはそれぞれ始発駅からの出発時刻と終着駅への到着時刻の固定を意味している．

鎖線で示すアークは conflict アークであり，安全の為に事象間に確保すべき時隔を表わしており，列車の交換や追越などの表現を目的としている．ここでは，列車 t の B 駅到着が時刻 7 を過ぎると，時間通りに C 駅に到着できなくなり，かつ，conflict アークに接続された B 駅到着ノード（中央）を始点とする conflict アークを介して別の列車に遅延が伝播する可能性があることを示している．ここでは，conflict アークの終点ノードの発生時刻が 8 であるため，conflict アーク a について $L(a) = 1$ とすると，列車 t の B 駅到着が時刻 7 より遅いと，別の列車に遅延が伝播する．

ちなみに，余裕時分ネットワーク N_s を構成するアークの余裕時分 x_a ($a \in A$) が一つでも負になる時，その作業 a は実行できないため， N_s が示す列車計画は実行不可能である．

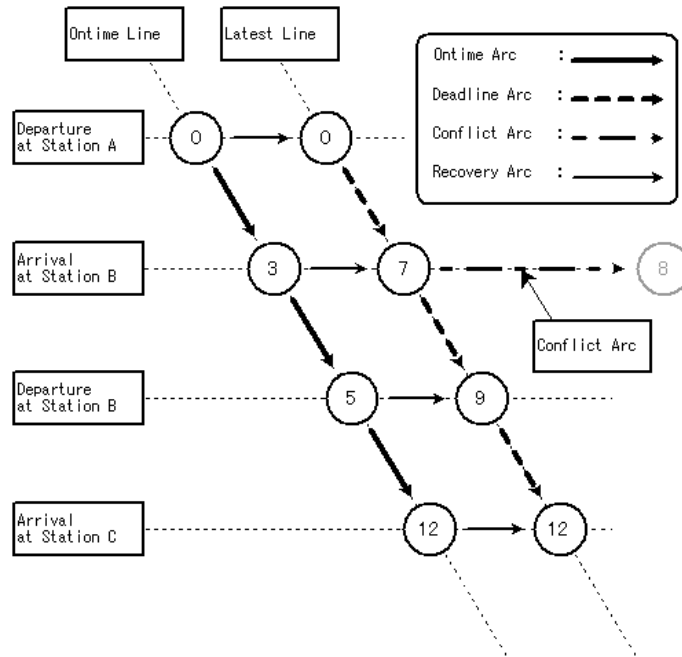


Figure 4.3.1 余裕時分ネットワーク

4.3.3 頑健性スコアとの関係

各作業 $a_o \in A_o$ における作業 a_o 以降で回復可能な遅延時分の最大値 s_{a_o} と、各アーク $a \in A$ の余裕時分 x_a の間には以下の関係が成り立つ。

$$\sum_{a \in A} W(a)x_a = \sum_{a_o \in A_o} W(a_o)s_{a_o} \quad (4.3.1)$$

式 (4.3.1) により、余裕時分ネットワークを用いることで頑健性スコアが容易に計算できることが分かる。紙面の都合上、式 (4.3.1) の導出の詳細については省略する。

4.4 定式化

上記の余裕時分ネットワークモデルに基づき、頑健性最大化問題を整数計画問題 (式 (4.4.1)-4.4.6)) として定式化した。

式 (4.4.1) は目的関数であり、作業毎の余裕時分の頑健性スコアの最大化を示している。

$$\max. \sum_{a \in \mathbf{A}} W(a)x_a \quad (4.4.1)$$

$$\text{s.t. } \phi_j - \phi_i = L(a) + x_a, \quad a = (i, j) \in \mathbf{A} \quad (4.4.2)$$

$$x_a \leq U(a), \quad a \in \mathbf{A} \quad (4.4.3)$$

$$\phi_i = \tau(i), \quad i \in \mathbf{P} \cup \mathbf{Q} \quad (4.4.4)$$

$$x_a \in \mathbf{Z}^+ \cup \{0\}, \quad a \in \mathbf{A} \quad (4.4.5)$$

$$\phi_i \in \mathbf{Z}^+ \cup \{0\}, \quad i \in \mathbf{V} \quad (4.4.6)$$

式 (4.4.2) は事象 $i, j \in \mathbf{V}$ 間の時間間隔に関する制約であり，各作業 $a = (i, j)$ ($a \in \mathbf{A}$) に要する時間は最小所要時間 $L(a)$ と余裕時分 x_a で構成されていることを表わしている．式 (4.4.3) は，作業毎に割り当てられる余裕時分には上限が存在することを表わしている．式 (4.4.4) は，列車毎の開始事象（始発駅からの出発）と終了事象（終着駅への到着）の発生時刻は元の列車計画に従うことを表わしている．式 (4.4.5)，式 (4.4.6) は変数の取る範囲が正の整数であることを表わしている．これは，多くの鉄道会社は，一般的に 10 秒刻みや 15 秒刻みで列車の発着時刻を設定していることを考慮している．

4.5 実路線を対象とした列車計画の生成

4.5.1 実験の概要

様々な実路線の列車計画を対象に頑健性最大化問題を解き，新たに生成された列車計画の特徴について考察する．頑健性最大化問題は，ネットワークシンプレックス法を用いて最適解を導出することができるが，今回は事例研究であるため，詳細には触れない．

4.5.2 パラメータの設定

実験にあたって，頑健性最大化問題のパラメータ（発着時刻 τ ，最小所要時間 L ，余裕時分の上限 U ，重要度 W ）の設定を行う．まず，終始点駅の発着時刻 τ は，既存の列車計画と同じ値を使用する．次に，最小所要時間 L ，余裕時分の上限 U ，重要度 W の設定であるが，これらについては実データが入手できなかったため，以下のような仮想的な数値で代用する．

- 移動作業と停留作業の最小所要時間 L は，入力とする列車計画で実際に用いられている所要時間のうち最小のものを，区間および駅ごとに求めて使用する．ただし，速度や停車駅の異なる複数の列車種別が存在する場合，移動作業については，それぞれの列車種別ごとに最小所要時間を求める．また，客扱いを行わない列車（回送列車，貨物列車など．以下，非旅客列車）が存在する場合は，客扱いを行う列車（以下，旅客列車）とは区別して停留作業の最小所要時間を求める．
- conflict アークの最小所要時間 L は，入力とする列車計画で実際に用いられている所要時間のうち，最小のものを使用する．ただし，交換に伴う conflict アークと追越に伴う conflict アークは区別する．

- 移動作業と停留作業に配分する余裕時分の上限 U は、それぞれ、入力とする列車計画で実際に用いられている所要時間のうち、最大のものと最小のものとの差を区間または駅ごとに求めたものの最大値とする。ただし、複数の列車種別が存在する場合、それぞれの列車種別ごとに移動作業の余裕時分の上限を求める。ただし、非旅客列車については、停車時間が長いことによる不都合は少ないと考えられるため、停留作業の余裕時分の上限は無量大とする。
- 通過駅の停留作業については、最小所要時間 L と余裕時分の上限 U は共に 0 とし、新たに生成される列車計画において停車駅が増えることを回避する。
- 重要度 W は、全ての作業について 1 とする。本来の W は、作業ごとの 1 次遅延の発生確率や、発生した 1 次遅延が回復可能でないときに影響を受ける旅客の数に基づいて決定すべきである。しかしながら、このような作業毎の遅延の発生確率や列車毎の旅客数に関する統計データは、入手が困難であるため、今回は全ての作業の重要度は等しいものとする。

また、列車の交換を行う駅は変更しないものとする。

4.5.3 山陰本線の列車計画

旧列車計画と比べた新列車計画の特徴を明らかにするために、単位時間あたりの列車本数が比較的少ない単線路線を対象に、列車計画の生成を行う。ここでは、山陰本線の園部-綾部間の平日早朝（午前 6 時半から午前 8 時半）の既存の列車計画を入力として頑健性最大化問題を解き、新たな列車計画を得た。図 4.5.1 に、既存の列車計画（以下、旧列車計画）と新しく生成された列車計画（以下、新列車計画）それぞれの列車ダイヤ図を示す。ここで、スジの端に示された記号は列車名を、駅名の最初に 印が付いている駅は交換設備のある駅をそれぞれ表している。さらにここでは、点線で旧列車計画を、実線で新列車

計画を表わしている。

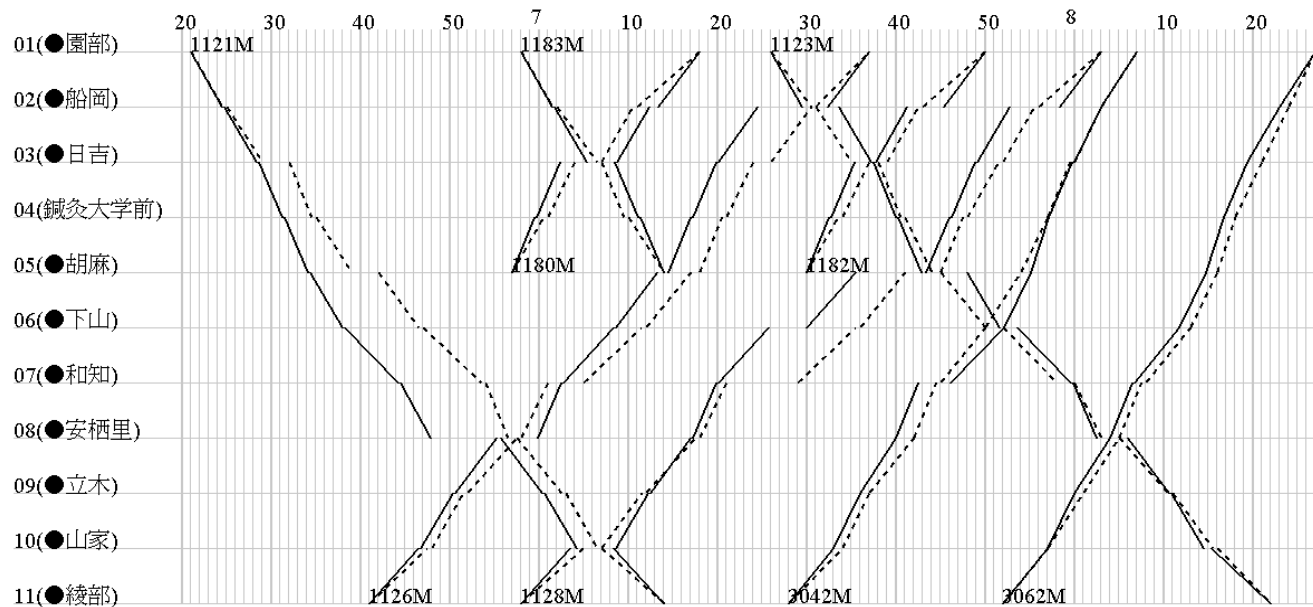


Figure 4.5.1 山陰本線の列車ダイヤ図

図 4.5.1 より、山陰本線の旧列車計画では、例えば 1128M 列車を見ると、和知駅に 5 分以上の長い停車時間を確保していることから、列車 1 本あたりに多くの余裕時分が与えられていることが推測される。また、新列車計画の 1121M 列車を見ると、園部駅出発からしばらくは、全く余裕時分を消費せずに運行を行い、安栖里駅で初めて余裕時分を割り当てていることが読み取れる。これは、1 次遅延が発生した作業以降の余裕時分のみが遅延を回復できることに起因していると考えられる。例えば、1121M 列車において、下山駅停留中に 1 次遅延が発生する場合について考える。新列車計画では、下山駅より先に存在する安栖里駅に割り当てられた余裕時分を用いて、遅延を回復することができる。しかしながら、旧列車計画では、下山駅より前に存在する胡麻駅に割り当てられている余裕時分は、下山駅で発生した遅延の回復には全く役に立たない。従って、新列車計画では、なるべく「別の列車との交換が発生する駅」か「終点駅」に到着するまで、余裕時分を割り当てないようにしていると推測できる。ところで、1128M 列車について、下山駅の余裕

時分を全て胡麻駅に回せば，山家-胡麻間で発生した遅延に対してより頑健になるように考えられるが，これは，胡麻駅の停留作業に対する余裕時分を，上限を上回らないように割り当てた結果，その一部が直前の停車駅である下山駅に繰り上げられたものであると考えられる．

4.5.4 豊肥本線の列車計画

豊肥本線は，沿線に多数の学校が存在し，通学路線として平日早朝の利用者が集中する単線路線である．そこで，豊肥本線の熊本-肥後大津間の平日早朝（午前6時半から午前9時）の既存の列車計画を旧列車計画として頑健性最大化問題を解き，新列車計画を得た．

図4.5.2に，旧列車計画と新列車計画それぞれの列車ダイヤ図を示す．図4.5.1と同様に，点線が旧列車計画を，実線が新列車計画を表している．

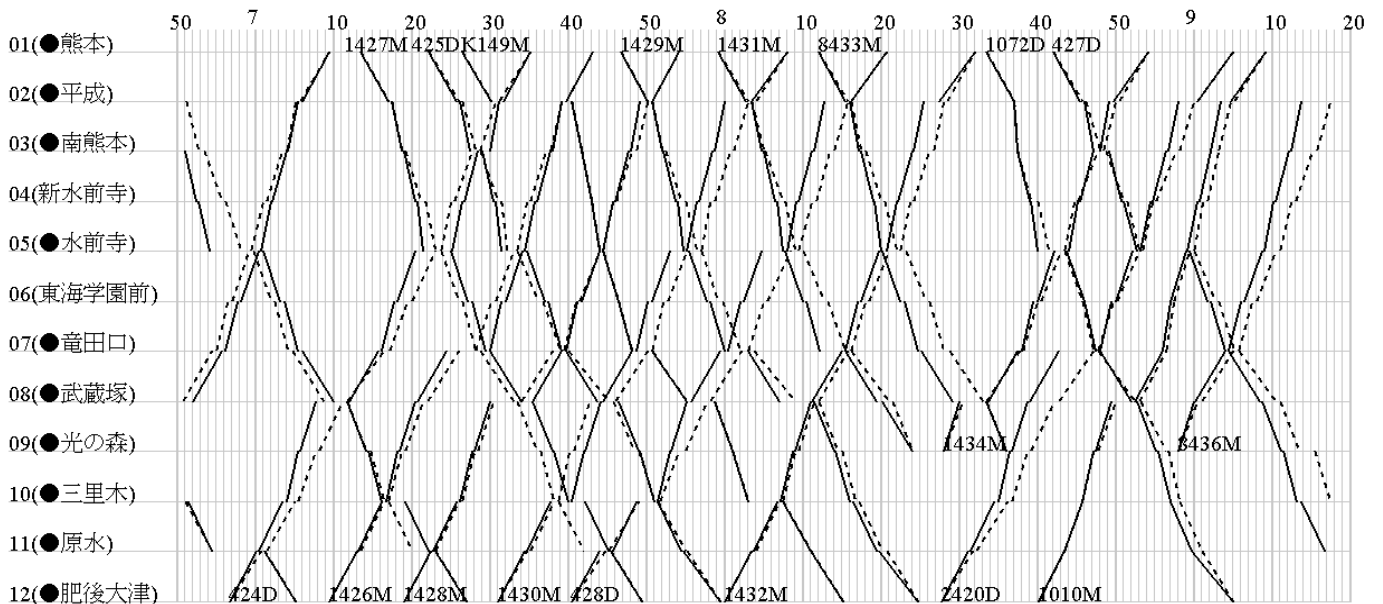


Figure 4.5.2 豊肥本線の列車ダイヤ図

図4.5.2より，豊肥本線では列車1本につき，4，5回の交換が行われているが，旧列車計画では，交換の為の待ち合わせ時間（交換を行う駅に列車が到着してから，交換相手の

列車が交換を行う駅を出発するまでの時間)は長くても2分程度である。交換の為の待ち合わせ時間が短いと、交換相手の列車に遅延を伝播させる可能性が高くなるため、豊肥本線では、全体として余裕の少ない運行が行われていると考えられる。これに対して、新列車計画では、交換の為の待ち合わせ時間が多くなっている箇所(水前寺駅における425D列車と1426M列車、竜田口駅での1429M列車と428D列車など)が多数みられる。山陰本線の例より、交換の為の待ち合わせ時間を、より多く確保するためには、より早く、交換を行う駅に到着すればよい。実際に、新列車計画では、旧列車計画に比べて、全体的に作業の実施が早められている(特に、2420D列車や8433M列車など)。しかしながら、これとは逆に、1427M列車の水前寺-竜田口間のように、新列車計画のスジが旧列車計画のスジより遅くなっている箇所も見られる。これは、1427M列車自身ではなく、水前寺駅で1427M列車と交換を行う424D列車の待ち合わせ時間を確保した方が(頑健性を向上させた方が)、列車計画全体としての頑健性スコアが向上すると判断された結果であると考えられる。

4.5.5 関西本線の列車計画

関西本線は、多くの利用者がある名古屋駅に直結する路線であり、通勤時間帯には多数の列車が運行されている。また、関西本線は単線と複線が混在しており、さらに、急行列車による緩行列車の追越も行われている。そこで、関西本線の名古屋-亀山間の平日早朝(午前6時から午前9時)の既存の列車計画を旧列車計画として頑健性最大化問題を解き、新列車計画を得た。図4.5.3に、旧列車計画と新列車計画それぞれの列車ダイヤ図を示す。図4.5.1や図4.5.2と同様に、点線が旧列車計画を、実線が新列車計画を表している。また、駅名右側の縦線は、1本の区間は単線を、2本の区間は複線を表している。複線区間では、任意の場所で列車の交換を行えるが、列車の追越は行えない。

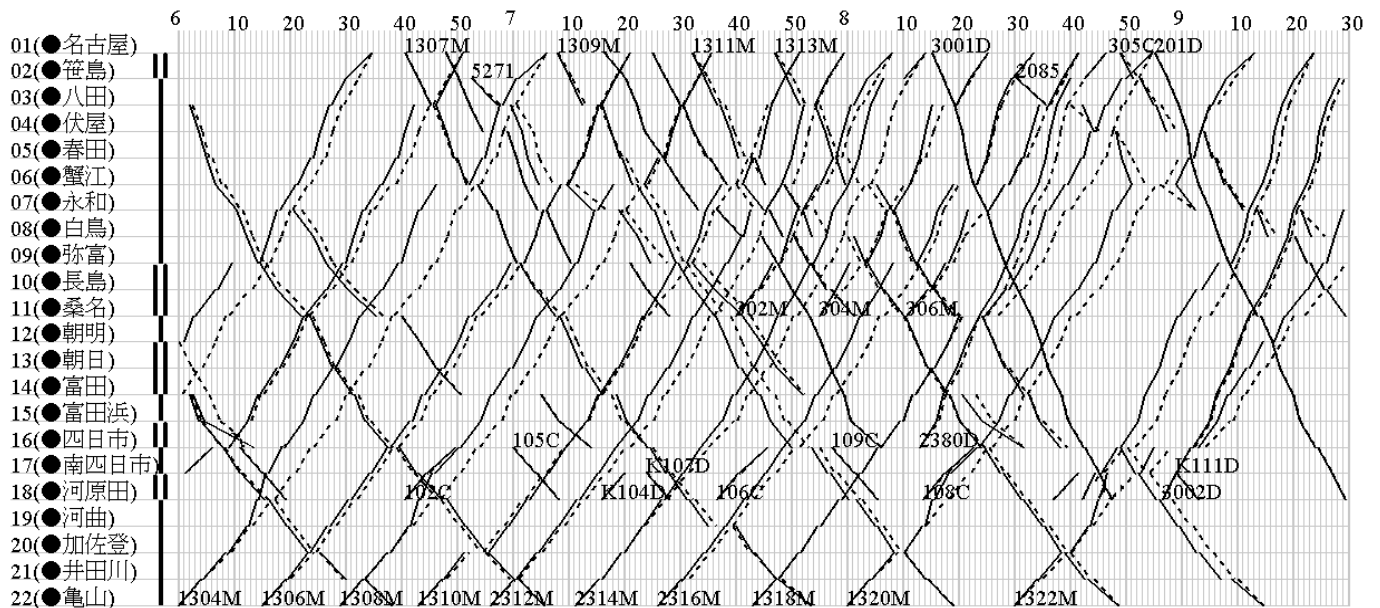


Figure 4.5.3 関西本線の列車ダイヤ図

図 4.5.3 より、関西本線は、豊肥本線より単位時間あたりの列車の運行本数が多いことがわかる。旧列車計画では、交換の為に待ち合わせ時間が 30 秒となっている箇所（304M 列車と 1311M 列車など）もあり、特に 7 時 40 分から 8 時 10 分までの名古屋-桑名間（うち、笹島-弥富間は単線）などは、1 駅移動するたびに別の列車との交換を行うという、極めて過密な運行が行われている。その中で、2312M 列車は、白鳥から蟹江まで、3 回連続で交換が発生している。ここで、新列車計画では、2312M 列車の白鳥-永和間のいずれの交換においても、2312M 列車が 2 分程度到着が遅れたとしても交換相手の列車に 2 次遅延は発生しない。しかしながらその分、2312M 列車の交換相手となる列車については、僅かでも遅れると、2312M 列車に 2 次遅延が発生するという、余裕のない運行を強いられていることが分かる。これより、列車 1 本あたりの交換回数が多いと、1 本の列車の遅延に対する頑健性を確保するために、他の複数の列車の遅延に対する頑健性を諦めなければならぬ状況が発生する可能性があることがわかる。

4.6 遅延に対する頑健性の評価実験

4.6.1 モンテカルロシミュレーションによる頑健性評価実験

実験の概要

本実験では、列車計画の遅延に対する頑健性の定量的な評価を試みる。具体的には、山陰本線と豊肥本線と関西本線、それぞれの旧列車計画（既存の列車計画）と新列車計画（4.5章で生成した列車計画）に対して様々な長さの1次遅延を発生させ、その1次遅延が終着駅までに完全に回復させることが可能な確率（以下、完全遅延回復率）を求める。本実験では、完全遅延回復率を以下の手順を10,000回繰り返して得られる *Score* の平均値とする。

Step 1 列車計画の発着時刻を初期化する。

Step 2 任意の列車の中から、作業を1つ選択する。

Step 3 Step 2で選択した作業に1分以上15分以下の1次遅延を発生させる。

Step 4 Step 3で発生させた1次遅延が、2次遅延を発生させずに、終着駅までに完全に回復した場合 $Score = 1$ 、そうでない場合 $Score = 0$ とする。

□

ここでは、Step 2で選択される作業と、Step 3で発生する1次遅延の長さはランダムに決定されるものとする。

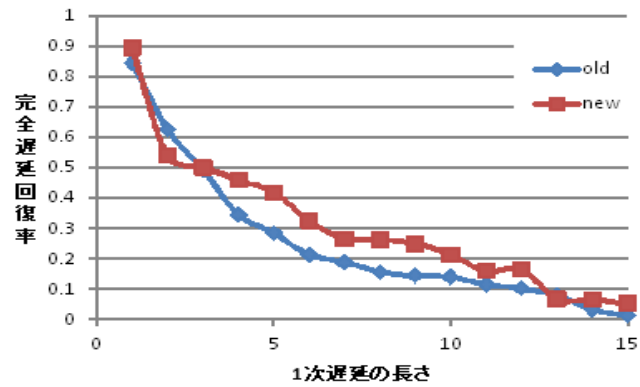


Figure 4.6.1 山陰本線の列車計画の完全遅延回復率

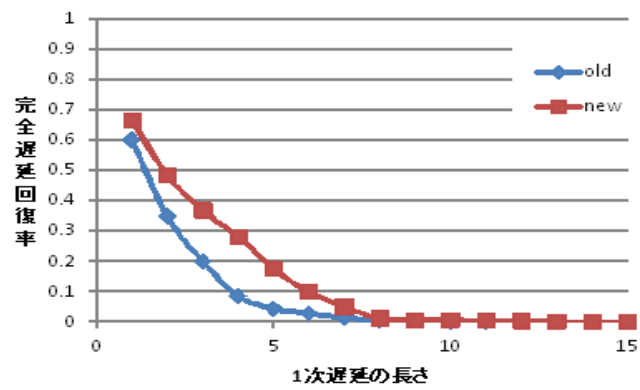


Figure 4.6.2 豊肥本線の列車計画の完全遅延回復率

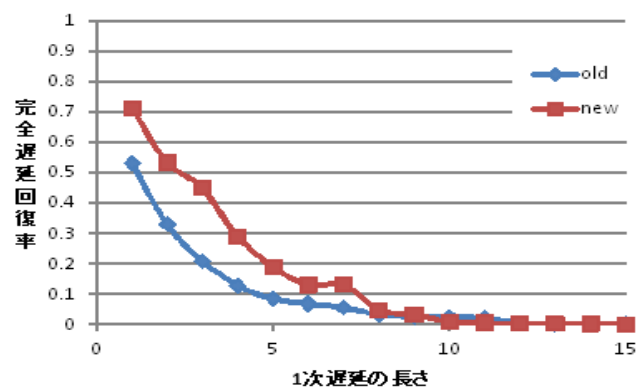


Figure 4.6.3 関西本線の列車計画の完全遅延回復率

実験結果と考察

山陰本線の旧列車計画と新列車計画における，1分から15分までの長さの1次遅延に対するそれぞれの完全遅延回復率を図4.6.1に示す．同様に，豊肥本線と関西本線についてもそれぞれ図4.6.2，図4.6.3に示す．図4.6.1，4.6.2，4.6.3について，のプロット(old)は旧列車計画を，のプロット(new)は新列車計画を示している．豊肥本線と関西本線において，新列車計画では，旧列車計画に比べて，あらゆる長さの遅延に対して完全遅延回復率が向上している．また，旧列車計画においては，関西本線より豊肥本線の方が，3分以下の遅延に対する完全遅延回復率が高いが，新列車計画では逆転している．これは，単位時間あたりの列車本数は関西本線の方が多いが，関西本線は部分的に複線となっていることによって，駅で待ち合わせを必要とする交換が減少し，関西本線の潜在的な頑健性に寄与した結果なのではないかと考えられる．一方，山陰本線では，新列車計画は旧列車計画に比べて，2分の遅延に対する完全遅延回復率が低下している．これは，前章の考察で述べたように，新列車計画では，ある列車の余裕を確保するために，別の複数の列車の余裕を消費している事に起因していると考えられる．比較的小さい遅延に対して頑健な列車計画を作成するためには，交換の為の待ち合わせ時間の下限値を増やして強制的に余裕時分を確保させる方法が挙げられる．

4.6.2 遅延の長さに対する確率密度を考慮した頑健性評価実験

実験の準備

現実に発生する1次遅延は，その長さごとの発生確率に偏りが存在する[16]．そこで，この偏りを1次遅延の長さに対する確率密度関数 $f_{exp}(d)$ として表し，前章までに使用した列車計画に $f_{exp}(d)$ に沿って様々な大きさの1次遅延を発生させたときの完全遅延回復

率を求め、列車計画の頑健性評価を行う。

まず、確率密度関数 $f_{exp}(d)$ を定義する。[16] を見ると、遅延の長さとその確率密度は指数分布に従っていると推測できる。また、0 超 10 分以下の遅延は全体の 65% を占めていると読み取れる。そこで、これらを $f_{exp}(d)$ に反映させることにする。指数分布は、正のパラメータ λ に対して確率密度関数 $f(d; \lambda)$ が

$$f(d; \lambda) = \lambda e^{-\lambda d} \quad (4.6.1)$$

確率分布関数 $F(d; \lambda)$ は

$$F(d; \lambda) = 1 - e^{-\lambda d} \quad (4.6.2)$$

で与えられる。ここで、10 分以下の遅延は全体の 65% であるため

$$F(10; \lambda) = 1 - e^{-10\lambda} = 0.65 \quad (4.6.3)$$

である。式 (4.6.3) を λ について解くと

$$\lambda = -0.1 \ln 0.35 \quad (4.6.4)$$

である。以上より、この時の遅延長 d に対する確率密度関数 $f_{exp}(d)$ は

$$f_{exp}(d) = -(0.1 \ln 0.35) e^{-(0.1 \ln 0.35)d} \quad (4.6.5)$$

と表される。得られた確率密度関数 $f_{exp}(d)$ は図 4.6.4 に示すような曲線を描く。

また、頑健性スコアは、路線内の駅数や列車本数に依存するため、異なる路線の列車計画の頑健性を比較することはできない。そこで、駅数や列車本数の影響を排除するために、頑健性スコアを ontime アークの重要度 W の総和で割って得られる正規化された頑健性スコアを用いて以降の議論を行うことにする。

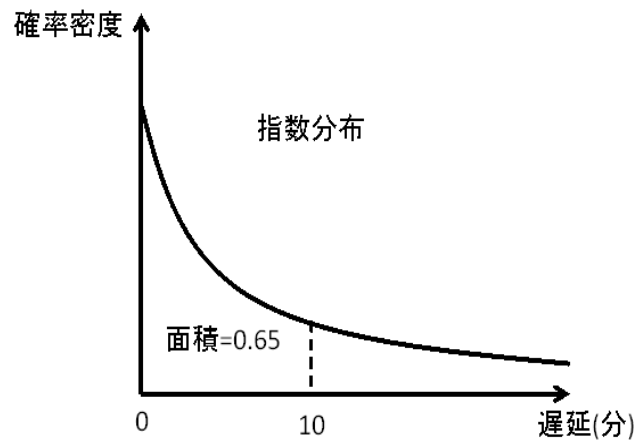


Figure 4.6.4 遅延の長さに関する確率密度関数

実験結果と考察

山陰本線と豊肥本線と関西本線，それぞれの旧列車計画と新列車計画に対して，4.6.1章と同様の手順で実験を行った．但し，Step 3 で発生させる 1 次遅延の長さ毎の生起確率は確率密度関数 $f_{exp}(d)$ に従うものとする．表 4.6.1 に，実験によって得られた各列車計画毎の完全遅延回復率を示す．表 4.6.1 を見ると，全ての路線において，既存の列車計画に比べて新列車計画の方が頑健性スコアが高い．頑健性スコアの差は完全遅延回復率にも現れており，旧列車計画に比べて新列車計画では，山陰本線で 5.9%，豊肥本線で 6.3%，関西本線で 9.2% の完全遅延回復率の向上が見られる．ところで，山陰本線は 1 時間当たりの列車本数が他の 2 路線に比べて少ないにも関わらず，改善の幅が 3 路線の中で最も小さい．これは，山陰本線は，旧列車計画において全体的に余裕のある運行が行われており，比較的小さい遅延に対してはほとんど改善の余地が無かったこと，比較的大きい遅延に対しては，遅延の確率密度関数の定義から，発生確率が低かったことなどが原因であると考えられる．

Table 4.6.1 各列車計画の頑健性スコアと完全遅延回復率

スコア	山陰本線		豊肥本線		関西本線	
	旧	新	旧	新	旧	新
頑健性スコア (正規化)	2.64	5.36	1.19	2.31	1.47	3.19
完全遅延回復率 [%]	30.8	36.7	13.7	20.0	15.0	24.2

4.7 まとめ

本研究では、列車計画の遅延に対する頑健性を扱うモデルを提案した。また、単線路線における列車の交換、列車や区間毎の遅延の発生しやすさ等の細かい事情を反映させられる、実用性を意識した頑健性尺度を提案した。さらに、実路線である山陰本線、豊肥本線、関西本線の列車計画を対象に、頑健性尺度に最適化された列車計画の再構成を行った。その結果、提案手法によって再構成された列車計画は、既存の列車計画に比べて、山陰本線で5.9%、豊肥本線で6.3%、関西本線で9.2%、完全遅延回復率（2次遅延を発生させずに終着駅までに完全に1次遅延を回復させる確率）が向上しており、提案手法によって生成された列車計画は、既存の列車計画より1次遅延に対して高い頑健性を持っていることが確認できた。

今後の課題としては、列車の交換を行う駅の変更の許容や、現実の遅延の発生しやすさをより厳密にパラメータに反映させること等が挙げられる。また、今回のモデルでは、終始点駅への到着が1分でも遅れると2次遅延が発生するという厳しい制約を設けていた。しかしながら実際には、他の路線の列車やバス等への乗換に多少の余裕が存在するため、これらの余裕をモデルに反映させることも検討したい。

第5章

結び

5.1 まとめ

本論文においては，利用者（乗客）の利便性を考慮した鉄道スケジューリングに関する研究について述べた．まず，第2章では，終端駅における列車運行本数の最大化について述べた．複線の終端駅における列車発着数最大化問題について，列車運行本数を最大化する0-1整数計画問題による定式化を行い，実例について適用した結果について述べた．また，最小折り返し時間の制約がなく（列車到着後任意の時刻に発車できる），かつ，各プラットフォームに1度ずつ列車が発着する1サイクルを考え，これを複数回繰り返す^{*1}場合について，多項式時間で終端駅発着数最大化問題が解けることを示した．

第3章では，列車発着プラットフォーム割り当て問題 (Train Platforming Problem) に関して大規模な乗換駅における対面接続最大化について述べた．

利用者が乗り継ぐ可能性のある列車間について，乗客が階段の上り下りを伴わずに乗り継げる列車の組み合わせを最大化する問題について，0-1整数二次計画問題で定式化した

^{*1} 各列車に発着するプラットフォームの制限がなく，各列車を，駅内の任意のプラットフォームに割り付けることができる場合

後，これを 0-1(線形) 整数計画問題に変換し，新大阪駅，および，博多駅について適用した実験結果について述べた．

また，本問題が，既存研究で述べられている k L -List τ colouring problem の特殊形であることを示し，NP 完全問題のクラスに属することを示した．

第4章では，列車の遅延に対する頑健性向上について述べた．ある列車に遅延が生じた際に，その列車と何らかの形で関係(すれ違い，追い抜きなど)する他の列車に遅延が伝播(二次遅延の発生)する可能性がある．そこで，各列車の駅における停車時間の再配分を行い，遅延が伝播しにくいスケジュール作成を試みた．そのために，余裕時分ネットワークモデルを提案して定式化し，幾つかの实在路線について適用した数値シミュレーションによる評価実験について述べた．

以上のように，本論文においては

- (i) 運行本数を多くしてほしい
- (ii) 乗り継ぎは楽にしたい
- (iii) できるだけ遅れないで，時刻表通りに運行してほしい

との利用者のニーズに応えるため，

- (i) 運行本数を増やすうえでボトルネックとなる，終端駅における，運行本数の最大化手法
- (ii) 乗り継ぎにおいて，利用者にとって障害となっている階段移動を伴わない乗り継ぎの最大化手法
- (iii) 列車の遅延が他の列車に伝播しにくい，頑健な運行計画の構築手法

の三点について論じた．

5.2 今後の課題

既に述べたように、利用者（乗客）の利便性を考慮した鉄道スケジューリングに関し、種々のアルゴリズムを提案している。これらのアルゴリズムの性能はいくつかの制限を置いたモデルにおいて保証されているため、アルゴリズムの一般性や、妥当性について課題がいくつか残る。最後にそれらについて述べる。

第 2 章に関する今後の課題

1. 第 2 章では、適用する駅を複線で接続している駅に限定した。そもそも、複々線の場合、何れかの駅で複線へと束ねられることが多い（例：名古屋鉄道 金山駅）。そのため、終端駅部においても複線である事例は、日本国内では極めて少ない。複数の路線が乗り入れる駅では、路線ごとに乗り場も運用もわかれていることが多く（例：阪急電鉄 梅田駅）、この場合には、運行系統ごとに複線の終端駅として扱えば、本論文での提案手法を適用可能である。しかしながら、名古屋駅における関西本線と中央本線の列車のように、一部の列車が互いの路線で車両を共用する駅もわずかながら存在し、このような場合について、相互に発着プラットフォームを制限することなく、本数の最大化を図る場合には、本章での提案手法を適用できない。本章では、複線の終端駅であるが故に、同時刻に移動する列車が高々 2 本である、という性質を利用し、列車間の進路支障に関する制約を考えたが、複線よりも規模の大きい（駅に対して 3 本以上の線路で外部と接続する）場合については、列車間の進路支障関係の組み合わせ数が爆発し、スケジュールを構築することが困難になると考えられる。
2. プラットホームの長さが充分にある場合（もしくはプラットフォーム長に対して列車

の長さが十分短い場合)、且つ、折り返しの停車時間が長い列車が存在する場合について、同一線上にあるプラットホームに、2本の列車*2を止める駅がいくつか存在する(例:西武鉄道池袋駅,京阪電気鉄道淀屋橋駅)。線路上しか走行できないという鉄道の性質上、スタックのように LIFO: Last In First Out で使用せざるを得ない。先述の駅の西武池袋駅,京阪淀屋橋駅では、ホームの終端寄りに、折り返し時間が必要な特急を止めて、使用している。優等列車と普通電車とが混在している駅においては、このような使用方法を考慮することで、より多くの本数の列車を運行できる可能性がある。

第3章に関する今後の課題

1. 第3章では、新大阪駅,ないし,博多駅における乗り継ぎに関する、対面乗り継ぎの最大化を考えた。しかしながら、例えば東海道新幹線の京都駅や名古屋駅のように、方向別に必ず同じ島に発着する駅や、新神戸駅のようにすべての列車が同じホームに発着する駅も存在する。そこで、乗り継ぎ元列車と乗り継ぎ先列車ともに、このような駅を発着する場合、乗換駅を適切に変更することにより、列車間を対面接続できることがある(例えば、博多発東京行の「のぞみ」から、のぞみが停車しない米原駅に行くことを考える場合、乗り継ぎ駅を京都駅とすることで、仮に新大阪で対面接続しない列車間でも、京都駅では対面接続できる)。このような列車について、乗り継ぎの利便を適切に広報することを行えば、新大阪駅での接続を考慮から外す、もしくは、目的関数において重みを小さくすることにより、より多くの旅客にとって、対面乗り継ぎが可能となることが考えられる。

*2 理論上ではそれ以上の数の列車を止めることも可能だが、筆者が把握する限り終端駅ではそのような事例を聞いたことがない

2. 第3章では、目的関数として、旅客が乗り継ぐ可能性がある列車の「組の数」の最大化を考えた。しかしながら、第3章で述べたように、各列車間を乗り継ぐ旅客人数と必ずしも一致しない。より旅客の便益の向上を考えるならば、乗り継ぎ人数を考慮する必要がある。これは、目的関数における各項（二次計画問題での定式化における各二次項）に対して、実際に乗り継ぐ人数を重みとして加重することにより、実現することができる。
3. そもそも旅客のODデータですら入手が極めて困難（鉄道会社が提供しない）な状況下で、各列車間の乗り継ぎ人数を計上することは極めて困難である。さらに、鉄道会社ですら、列車間の乗り継ぎ人数のデータを所持していない可能性が高い。乗り継ぐ列車が乗り継ぎ元、乗り継ぎ先ともに指定席である場合には把握できるかもしれないが、いずれか一方、または、両方が自由席利用の場合、旅客が利用した列車の特定はできない。各駅の利用人数からの推測が必要となる。しかしながら、乗り継ぎ時の旅客の列車選択の思考が人により異なる^{*3}ため、乗り継ぎ客数の推定方法が必要となる。

第4章に関する今後の課題

1. 第4章の定式化において、駅の重要度（停車時間を割り振るべき重み） α に関して、細かい言及は避けた。計算実験においては、各駅の一日における乗降人数を重みとして使用した。しかしながら、例えば学校最寄駅と企業が多く立地する駅とでは、朝の通勤通学ラッシュ時間帯は一致するが、帰宅ラッシュの時間帯は異なることが考えられる。さらに、各列車・各駅の乗降人数が判明したとしても、その客層

^{*3} 早く着くことを望む乗客もいれば、多少遅くとも空いている列車を好む乗客もいる。また、時間帯によっては弁当や土産を購入する乗客も考えられる。

の傾向(乗降に時間がかかる高齢者の利用が多い傾向のある駅が存在なども考えられる)なども影響することが予想される。[26]では、列車遅延の評価指標とその可視化について論じられており、このような「遅延の質」を適宜荷重により考慮することにより、より頑健なダイヤ構築が可能となる可能性がある。

2. 第4章では、始発駅と終点駅における発着時刻は変更を許容しない、という制約を設けた。他路線との接続や、車両や乗務員の運用の問題、場合によっては駅の容量の問題(発着線が1本しかない駅に、列車が折り返さないうちに次の列車が到着してもらっては困る)。しかしながら、始終着駅での接続にも余裕が設けられており、その範囲内では発着時刻の変更が許容できることも考えられる。また、本数が多い路線では、列車間の接続を厳格に考える必要がないこともある。また、そもそも始終着駅の発着時刻が適切でないために、遅延に対して貧弱であることも考えられる。そのため、始終着時刻の変更を許容(たとえば、一定の時間幅で変更可、もしくは、始終着駅における容量内で発着可、など)するモデルの検討が考えられる。

参考文献

- [1] 富井規雄, 鉄道のスケジューリング問題: 難しさと面白さ, オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, 53(8), 427-432, 2008.
- [2] 平井力, 列車ダイヤ乱れ時の再スケジューリングアルゴリズム, オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, 53(8), 446-452, 2008.
- [3] 國松武俊, 平井力, 富井規雄, 利用者デマンドを反映した列車ダイヤ作成アルゴリズム, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), 129(1), 10-20, 2009.
- [4] 佐藤達広, 角本喜紀, 村田智洋, 条件変化に伴う再計画を考慮した鉄道車両基地構内入換スケジューリング方式, 電気学会論文誌 C 電子・情報・システム部門誌, 127(2), 274-283, 2007.
- [5] 列車ダイヤ研究会, 列車ダイヤと運行管理, 成山堂書店, 2008.
- [6] Alain Billionnet, Using Integer Programming to Solve the Train-Platforming Problem, TRANSPORTATION SCIENCE, Vol. 37, No. 2, pp. 213-222, 2003.
- [7] Malachy Carey, Sinead Carville, SCHEDULING AND PLATFORMING TRAINS AT BUSY COMPLEX STATIONS, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 37, Issue 3, p. 195-224, 2003.
- [8] Alberto Caprara, Laura Galli, Paolo Toth, Solution of the Train Platforming Problem, ATMOS 2007 - 7th Workshop on Algorithmic Approaches for Trans-

- portation Modeling, Optimization, and Systems, 2007.
- [9] Partha Chakroborty, Durgesh Vikrama, Optimum assignment of trains to platforms under partial schedule compliance, *Transportation Research Part B: Methodological*. Volume 42, Issue 2, pp.169-184, 2008.
- [10] M.R.Garay, D.S.Johnson, G.L.Miller, C.H.Papadimitrius, The complexity of coloring circular arcs and chords, *SIAM J. Algebraic Discrete Methods*, 1(2):216-227, 1980.
- [11] Dorotea De Luca Cardillo, Nicola Mione, k L-list τ colouring of graphs, *European Journal of Operational Research*, Volume 106, Issue 1, pp.160-164, 1998.
- [12] Lawler, E. L., The quadratic assignment problem, *Management Sci.*, 9, 586, 1963.
- [13] 国土交通省鉄道局監修「鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル 2005」, 財団法人運輸政策研究機構, 2005.
- [14] 富井規雄, 鉄道のスケジューリング問題:難しさと面白さ, *オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学*, 53(8), 427-432, 2008.
- [15] 列車ダイヤ研究会, 列車ダイヤと運行管理, 成山堂書店, 2008.
- [16] 国土交通省: “鉄道輸送トラブルによる影響に関する調査について”, 2009.
- [17] 富井規雄: “列車ダイヤのひみつ - 定時運行のしくみ”, 成山堂, 2005.
- [18] 富井規雄: “列車ダイヤの頑健性の評価とアルゴリズムに関する海外研究の動向調査”, *Ken-yusha, Inc., Annual Review No.11*, 17-21, May 2009.
- [19] Rob M.P. Goverde, “Railway timetable stability analysis using max-plus system theory”, *Transportation Research Part B* 41, 179-201, 2007.
- [20] Xavier Delorme, Xavier Gandibleux, Joaquin Rodriguez, “Stability evaluation of a railway timetable at station level”, *European Journal of Operational Research*

- 195, 780-790, 2009.
- [21] Miguel A. Salido, Federico Barder, Laura Ingolotti, “Analytical Robustness in Single-Line Railway Timetabling”, *ARRIVAL Technical Reports* No.215, January 2009.
- [22] Christian Liebchen, Michael Schachtebeck, Anita Schobel, Sebastian Stiller, Andre Prigge, “Computing delay resistant railway timetables”, *Computers & Operations Research* 37, 857-868, 2010.
- [23] Leo Kroon, Rommert Dekker, Gabor Maroti, “Stochastic Improvement of Cyclic Railway Timetables”, *Transportation Research Part B: Methodological* Vol.42, No.6, 553-570, 2008.
- [24] 武内陽子：“旅客の不効用値に基づく列車ダイヤの頑健性評価”，日本オペレーションズ・リサーチ学会 2008 年春季研究発表会アブストラクト集, 188-189 .
- [25] 富井規雄, 「無計画停電」と鉄道, 鉄道車両と技術, No.177 (2011).
- [26] 牛田貢平, 運行実績データを活用した列車遅延の評価指標, オペレーションズ・リサーチ 57(8), 407-413, 2012
- [27] 電気学会・鉄道における運行計画・運行管理業務高度化に関する調査専門委員会, 鉄道ダイヤ回復の技術, オーム社, 2010.
- [28] 鉄道総合技術研究所運転システム研究室, 鉄道のスケジューリングアルゴリズム - コンピュータで運行計画をつくる -, エヌ・ティー・エス, 2005.
- [29] 富井規雄, 鉄道システムへのいざない, 共立出版, 2001.
- [30] 富井規雄, 鉄道ダイヤのつくりかた, オーム社, 2012.