

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

芳田 翔一郎*, 脇坂 賢†, 増山 繁‡

1. 序論

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な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など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いる. 1次遅延の一部は次々に**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つな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[1]. また, 用地を確保しにくい都市の一部では, 需要の高さにかかわらず**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[1]もある. このような背景から, 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かを定めた計画)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など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わけではなく, 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などに大きな違いが現れる[2].

欧州では, 列車計画の頑健性に関する研究が盛んである[3]. [4], [5]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など, 良好な結果が得られている. しかしながら, これらの研究ではすべ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, 駅などにおいて, 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, [6], [7]などがある. [6]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, [6]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られていない. [7]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

* よしだ しょういちろう

豊橋技術科学大学大学院工学研究科知識情報工学専攻
〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1 (現所属:(株)ワークスアプリケーションズ)

† わきさか けん

豊橋技術科学大学大学院工学研究科電子・情報工学専攻
〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1

‡ ますやま しげる

豊橋技術科学大学大学院工学研究科情報・知能工学専攻
〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1
受付 11.1.14 採択 12.1.24

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、[7]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。[8]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、列車計画以外のさまざまな計画（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。[9]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、[9]で提案している頑健性尺度に基づいて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。

2. 問題設定

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などから、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。

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、実路線におけるさまざま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、遅延した列車の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「予定どおりに出発する」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わずかであり、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次遅延の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、システムの不具合など、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など、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次遅延発生時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のであれば、車両の運用計画も変更しなければならない。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、本研究ではすべ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。

大きす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。なぜなら、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ほう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ほうが対処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すべ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。

頑健性スコア 全移動作業と全停留作業の集合 \mathbf{A}_o における任意の作業 $a \in \mathbf{A}_o$ 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 $a \in \mathbf{A}_o$ 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、遅延の発生しやすいさを考慮して与えられる数値¹⁾）を $W(a)$ とした時の $\sum_{a \in \mathbf{A}_o} W(a)s_a$ の値。但し、回復可能とは、1次遅延が列車間で伝播せず、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。

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

2.3 問題定義

まず、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。

また、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。

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。

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、すべ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

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。

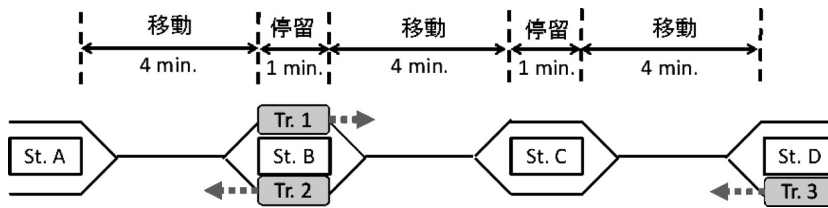


図1 疑似的な路線図

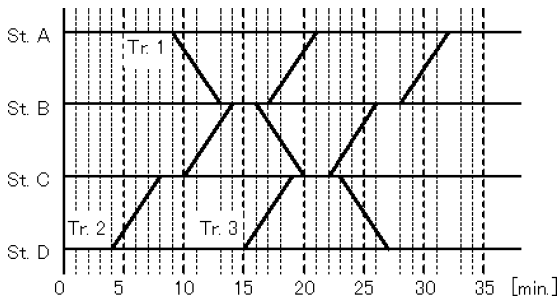


図2 列車ダイヤ図

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ない）な列車計画を作成することになる。

図2の一部を変更し、頑健性スコアの変化を確認する。ここで、頑健性スコアの定義を振り返ると、すべての列車は、他の列車に遅延を伝播させず、かつ、到着駅までには完全に遅延が回復していなければならない。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、列車2の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。したがって、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。

3. 余裕時分ネットワークモデル

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 $W: A \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ 、最小所要時間 $L: A \rightarrow \mathbb{Z}^+ \cup \{0\}$ 、余裕時分の上限 $U: A \rightarrow \mathbb{Z}^+ \cup \{0\}$ 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。

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到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 安全性を保証するために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、一つ以上の **ontime** アークで構成される列車の運行を予定運行ライン、一つ以上の **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 3 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ない限りは時間どおりに 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

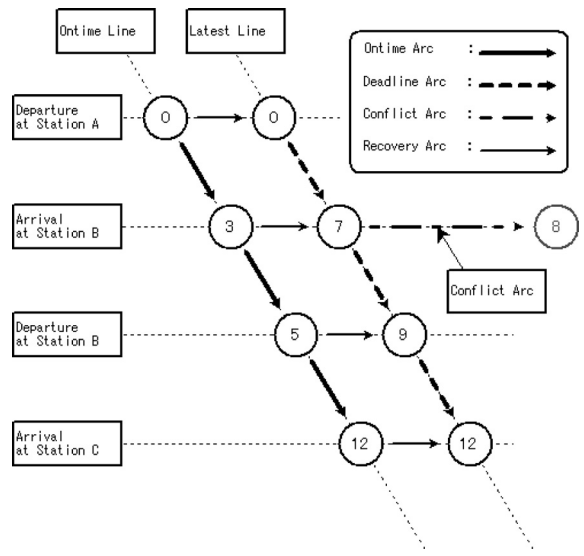


図 3 余裕時分ネットワーク

る。したがって、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) からの出発事象が終着駅 (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、安全のため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、時間どおりに 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 ($a \in \mathbf{A}$) 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。

3.3 頑健性スコアとの関係

各作業 $a_o \in \mathbf{A}_o$ 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 $a \in \mathbf{A}$ の余裕時分 x_a の間には以下の関係が成り立つ。

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。

$$\sum_{a \in A} W(a)x_a = \sum_{a_o \in A_o} W(a_o)s_{a_o} \quad (1)$$

式 (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わかる。紙面の都合上、式 (1) の導出の詳細については省略する。

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 (2-7)) として定式化した。

$$\max. \sum_{a \in A} W(a)x_a \quad (2)$$

$$\text{s.t. } \phi_j - \phi_i = L(a) + x_a, \quad a = (i, j) \in A, \quad (3)$$

$$x_a \leq U(a), \quad a \in A, \quad (4)$$

$$\phi_i = \tau(i), \quad i \in P \cup Q, \quad (5)$$

$$x_a \in \mathbf{Z}^+ \cup \{0\}, \quad a \in A, \quad (6)$$

$$\phi_i \in \mathbf{Z}^+ \cup \{0\}, \quad i \in V. \quad (7)$$

式 (2) 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。式 (3) は事象 $i, j \in V$ 間の時間間隔に関する制約であり、各作業 $a = (i, j)$ ($a \in A$) 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) 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 (5) 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 (6)、式 (7) は変数値が正の整数のみをと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。

5. 実路線を対象とした列車計画の生成実験

5.1 実験の概要

さまざま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。

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制限とする。
- 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、すべての作業について 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、このような作業ごとの遅延の発生確率や列車ごとの旅客数に関する統計データは、入手が困難であるため、今回はすべ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。

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、単位時間当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。

図4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本当たり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。したがって、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すべて胡麻駅に回せば、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。

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5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。

図5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、交換のための待ち合わせ時間（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。交換のため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、交換のため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ほうが（頑健性を向上させたほうが）、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。

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6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や図5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。

図6より、関西本線は、豊肥本線より単位時間当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、交換のための待ち合わせ時間が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

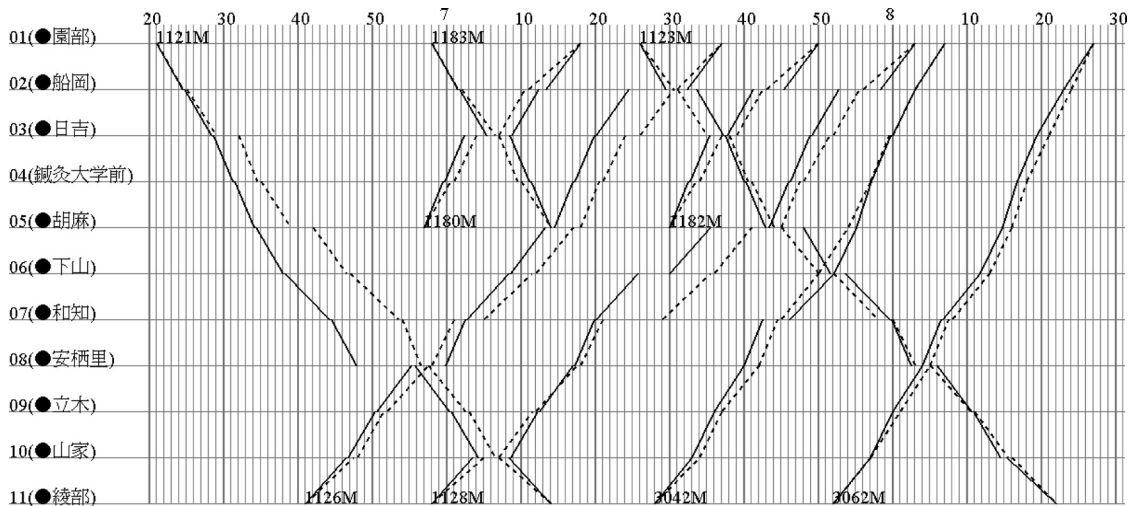


図 4 山陰本線の列車ダイヤ図

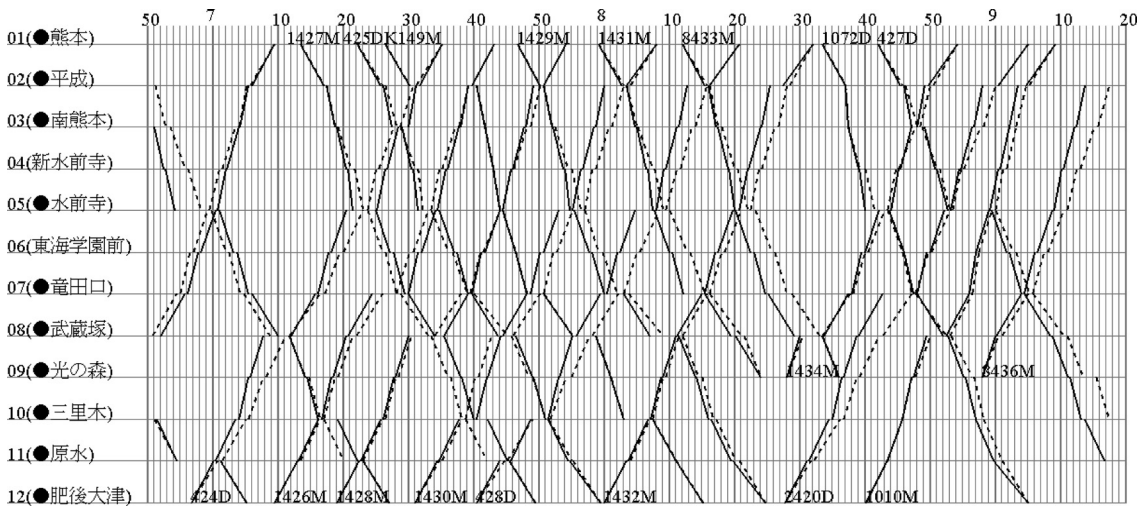


図 5 豊肥本線の列車ダイヤ図

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、わずかでも遅れると、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わかる。これより、列車 1 本当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ない状況が発生する可能性があることがわかる。

6. モンテカルロシミュレーションによる頑健性評価実験

6.1 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（5 章で生成した列車計画）に対してさまざまな長さの 1 次遅延が発生させ、その 1 次遅延を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

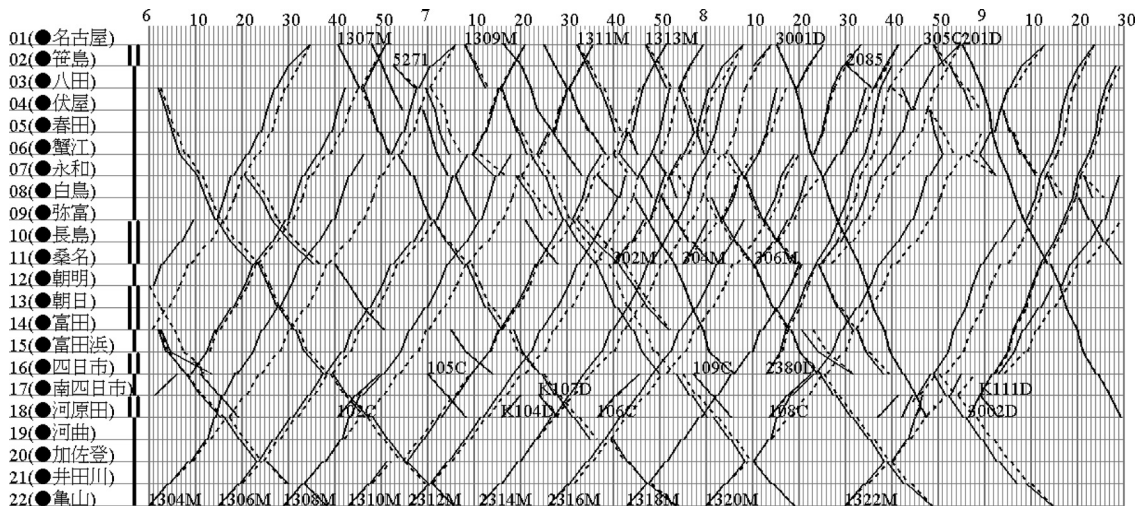


図6 関西本線の列車ダイヤ図

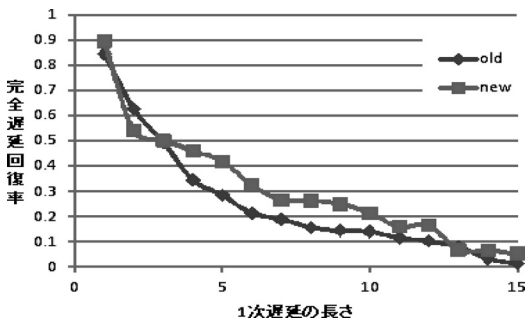


図7 山陰本線の列車計画の完全遅延回復率

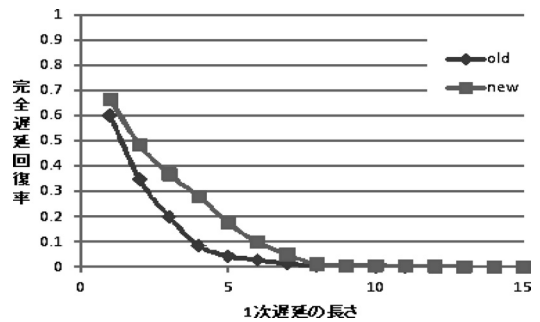


図8 豊肥本線の列車計画の完全遅延回復率

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、作業の一つを選択する。
- 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 次遅延を、2 次遅延を発生させずに、終着駅までに完全に回復させた場合 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。

6.2 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 7 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 8, 図 9 に示す。図 7, 8, 9 について、◆のプロット (old) は旧列車計画を、■の

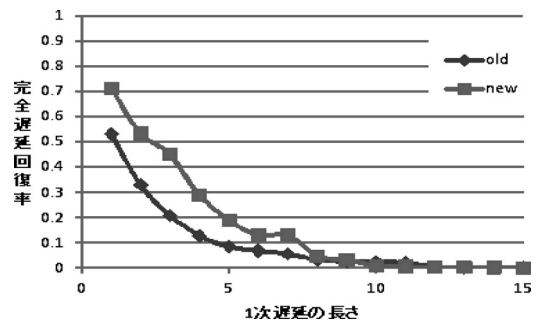


図9 関西本線の列車計画の完全遅延回復率

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ほうが、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、単位時間当たりの列車本数は関西本線の

ほうが多いが、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こと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、交換のため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。

7. 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

7.1 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[1]。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 $f_{\text{exp}}(d)$ として表し、前章までに使用した列車計画に対し $f_{\text{exp}}(d)$ に沿ってさまざまな大きさの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 $f_{\text{exp}}(d)$ を定義する。[1]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 $f_{\text{exp}}(d)$ 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

$$f(d; \lambda) = \lambda e^{-\lambda d} \quad (8)$$

確率分布関数 $F(d; \lambda)$ は

$$F(d; \lambda) = 1 - e^{-\lambda d} \quad (9)$$

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

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

である。式(10)を λ について解くと

$$\lambda = -0.1 \ln 0.35 \quad (11)$$

である。以上より、この時の遅延長 d に対する確率密

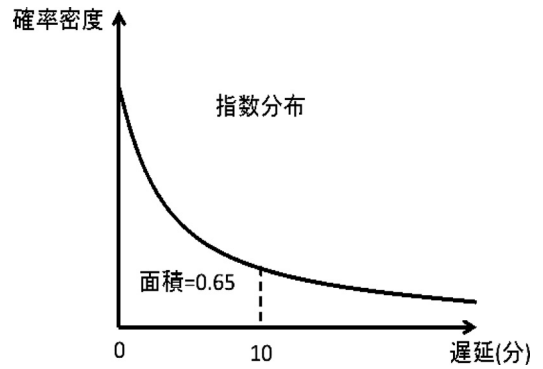


図10 遅延の長さに関する確率密度関数

度関数 $f_{\text{exp}}(d)$ は

$$f_{\text{exp}}(d) = -(0.1 \ln 0.35) e^{-(0.1 \ln 0.35)d} \quad (12)$$

と表される。得られた確率密度関数 $f_{\text{exp}}(d)$ は図10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。

7.2 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、6章と同様の手順で実験を行った。ただし、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 $f_{\text{exp}}(d)$ に従うものとする。表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1を見ると、すべての路線において、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なかったこと、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。

表 1 各列車計画の頑健性スコアと完全遅延回復率

スコア	路線		山陰本線		豊肥本線		関西本線	
	旧	新	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	1.47	3.19
完全遅延回復率 [%]	30.8	36.7	13.7	20.0	15.0	24.2	15.0	24.2

8. 結論

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、列車や区間ごとの遅延の発生しやすさなど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などが挙げられる。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など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。

謝辞 的確なご指摘やご助言により、本稿の質の向上に貢献して下さいました査読者の方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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*, **11**, 17–21, May 2009.
- [4] R. M. P. Goverde, “Railway timetable stability analysis using max-plus system theory,” *Transportation Research Part B*, **41**, 179–201, 2007.
- [5] X. Delorme, X. Gandibleux and J. Rodriguez, “Stability evaluation of a railway timetable at station level,” *European Journal of Operational Research*, **195**, 780–790, 2009.
- [6] M. A. Salido, F. Barder and L. Ingolotti, “Analytical robustness in single-line railway timetabling,” *ARRIVAL Technical Reports*, **215**, January 2009.
- [7] C. Liebchen, M. Schachtebeck, A. Schobel, S. Stiller and A. Prigge, “Computing delay resistant railway timetables,” *Computers & Operations Research*, **37**, 857–868, 2010.
- [8] L. Kroon, R. Dekker and G. Maroti, “Stochastic Improvement of cyclic railway timetables,” *Transportation Research Part B*, **42**, 553–570, 2008.
- [9] 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, 2008.