

遅延リスク推定に基づく列車ダイヤ改善手法

坂口 隆* 中村 達也** 石原 裕介**

A Timetable Improvement Method Based on Delay Risk Estimation

Takashi SAKAGUCHI Tatsuya NAKAMURA Yusuke ISHIHARA

Urban mass transit railways have a problem that a trivial delay caused by passenger congestion is liable to propagate widely. For this matter, a delay propagation model of which explained variables are stoppage time and running time has been constructed according to a substantial investigation of the situation of urban transportation operation. Then, a delay propagation simulator that simulates railway transportation with probabilistic variability in the model and visualizes delay risks derived from the results of the simulation has been developed. This paper presents a method of delay risk estimation and a timetable improvement based on the simulation and shows an example of a case study result of timetable improvement.

キーワード：遅延伝播, 遅延リスク, 確率的運行シミュレーション, シミュレーションモデル

1. はじめに

高密度大量輸送を担っている都市圏の鉄道は、混雑に伴う僅かな遅れが、以降の各駅での旅客集中を招いて雪だるま式に遅延が大きくなり、後続の列車、待避列車、折返し列車などにその遅延が伝播することによって、広範囲に遅延が波及しやすいという問題を抱えている。輸送計画策定時に、遅延伝播の緩衝として、駅間走行時分、停車時分、折り返し時分などを単に増加させれば、所要時分の増加や輸送力低下に伴う混雑の増加を招くことになり、列車ダイヤの修正によってサービスを低下させずに慢性的な遅延を低減できる可能性（最適性）やその方法については未だよく分かっていない。

ダイヤの頑健性（遅延の起こりにくさおよび広がりにくさ）に関連する過去の研究として、文献1)では、旅客流動と列車運行を模擬するモンテカルロシミュレーション²⁾によって、列車ダイヤを変更したときの運行の乱れとそれに伴う旅客の不効用（不便さ）の増加を予測し、その結果から列車ダイヤを評価する手法を提案している。しかし、同研究では列車ダイヤ全体を評価するアプローチであるため、遅延波及の発端となる初期遅延を起こしやすい箇所や遅延が伝播しやすい箇所など、列車ダイヤを局所的に評価することができないため、直接的に列車ダイヤの修正箇所や修正方法を知ることには応用できない。運行実績に基づいて遅延対策を検討する取り組みもこれまでに多数行われているが、現状分析を目的

としたものや、駅設備などの改善を目的として特定の駅での遅延のみを扱っているものが多い^{3) 4)}。

列車ダイヤ改善に関する最近の研究事例としては、東京地下鉄における山村らの研究⁵⁾がある。これは、運行実績ダイヤ上で、遅延が発生した各点に対し、その点における後続列車との運転時隔に含まれる余裕時分が小さいほど遅延が後続列車に伝播する確率が高くなるという考え方に基づいた評価指標（バッファインデックス）に基づいて列車ダイヤを評価改善するものである。この手法は列車ダイヤの局所的な遅延リスクを定量化することができるため実用性の面で非常に優れているが、その反面、実績データに基づいているため次のような課題が残る。

- ・ある列車・駅（以下では各列車の各駅の着発場面を、ダイヤ上の「点」「箇所」などと表現する）での遅延時分の確率分布は、複数の点の時刻設定の組み合わせに依存するものと考えられることから、ダイヤを修正した後の遅延状況をバッファインデックスから推定することが困難である。

- ・ダイヤの改善効果を検証するには、そのダイヤを実施した後に運行実績を収集し分析する必要があるため時間と手間を要し、そのため複数の改善案を比較検討することが困難である。

- ・運行実績ダイヤは、遅延を回復させるために指令員が行った運転整理（時隔調整）の結果を含んでいるため、時隔調整が行われなかった場合の潜在的な遅延リスクが評価できない。

走行時分や停車時間は、基準運転時分や推定旅客数に基づいてある程度見積もることができるが、実際には、運転士の運転方法、接続交通機関の状況、旅客の行動、

* 信号・情報技術研究部 運転システム研究室

** 信号・情報技術研究部 運転システム研究室（現 西日本旅客鉄道株式会社）

特集：信号通信・運輸

駅員の合図や車掌のドア扱いのタイミングなど、予測不可能なランダム性の高い要因によって大きなばらつきが生じる。本稿では、初めに、そのような列車運行の状況を確率的に再現するコンピュータ・シミュレーション手法について述べた後、シミュレーションの結果に基づいてダイヤの各時刻における遅延リスクと、その原因となる初期遅延（単独で発生する遅延）および遅延伝播の発生箇所を推定する手法を提案する。そして、これらの手法を用いて試作した列車ダイヤ改善支援プログラムの概要と、同プログラムを用いて実施した列車ダイヤ改善のケーススタディの結果について紹介する。

2. 列車運行の分析に基づくシミュレーションモデルの検討

コンピュータ・シミュレーションによって列車運行を再現するためには、運行にまつわる各事象がどのように影響しあっているのかを定量的に捉える必要がある。そこで、列車運行を各時間要素に分けて分析を行い、推定式を検討した。これは、ある要素の推定式の出力（＝被説明変数）が他の要素の入力（＝説明変数）となっていれば、それらの変数が表す各事象間の依存関係が定量的に捉えられたことになるからである。以下にその結果について述べる。

2.1 停車時間

実際のある日のある列車、ある駅での停車時間は、そのケースにおいて最も時間を要した車両ドアでの乗降時間に依存し、しかもその位置は決まっていない（変動する）と考えるのが自然であるが、ここでは実用性を考慮し出来るだけ運行モデルを単純化する観点から、駅ごとに平均的に最も混雑している車両ドア位置の中から注目する位置を一つ決めて、その位置での乗降が停車時間に影響するという前提を置く。また、降車客が全員降り終わる前に乗車と降車が交錯したり、乗車待ちの列が乗車し終わってからもドアが閉まる直前まで途切れ途切れに何人かの旅客がやって来て乗車したりすることが普通で

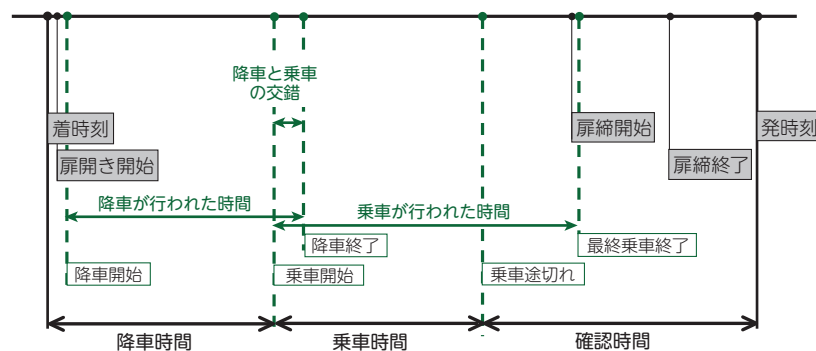


図1 停車時間の構成

あり、降車時間、乗車時間について、どこからどこまでという一般的な定義はない。一方、停車時間と乗降人数の間に正の相関があることは明白なので、停車時間を推定するモデルを考える場合、降車時間、乗車時間は、それぞれ、降車人数、乗車人数との相関ができるだけ高くなるように定義することが望ましい。そこで、ここでは、図1に示すように、列車の到着から注目するドアにおいて乗車が開始された時点までを降車時間、その時点から同位置の乗車待ちの列がすべて乗車し終えて乗車の流れが途切れた時点までを乗車時間、その時点からドアが閉まって列車が発車するまでを確認時間と定義する。これらの各要素について、モデル線区のラッシュ時間帯を対象に観測データを収集し、線形重回帰分析を行った結果を以下に示す。

(1) 乗降時間

図2の赤でプロットした点は、ある駅の観測ドア位置から各列車に乗車した人数（ドア乗車人数）と乗車時間の関係を調べた結果である。黒の実線で示した回帰直線に対し、誤差が赤い破線の範囲に分布しており、乗車人数が多いほど誤差が拡大していることがわかる。この場合の回帰直線の傾きは一人当たりの乗車時間を表す。したがって、ドア乗車人数から乗車時間を推定するためには、一人当たりの乗車時間を推定するのではなく、単位時間あたりの乗車人数（流量）を推定したうえで、流量

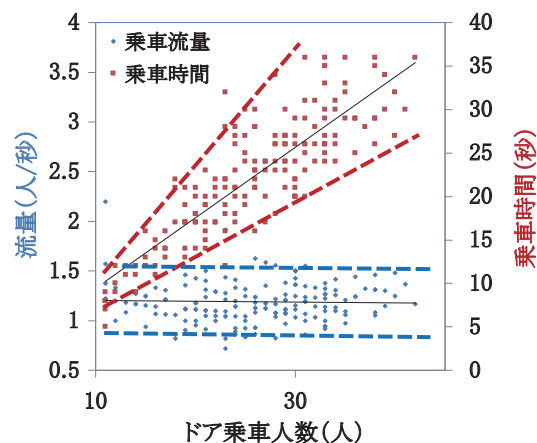


図2 乗車人数と乗車時間の関係

と乗車人数から乗車時間を求めるのが妥当である。図2の青い点は赤の各点に対応する流量をプロットしたものである。流量は乗車人数によらずほぼ一定（回帰直線の傾きは 8×10^{-4} ）であり、誤差は青の破線の範囲に分布していることから、流量の分布（平均および分散）は乗車人数に依存せず一定であることが確認できる。

なお、降車に関しても、これと同様

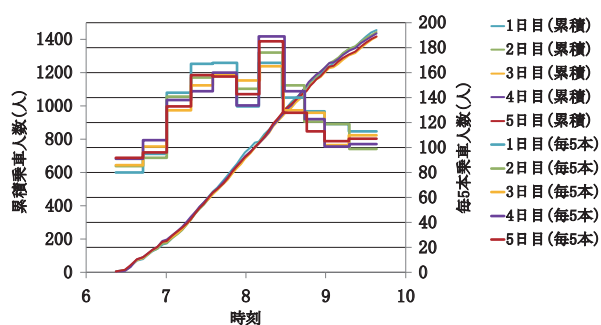


図3 乗車人数の調査結果

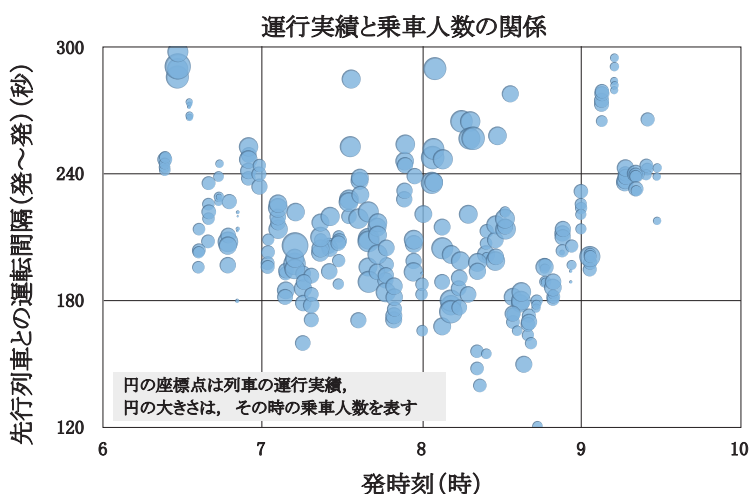


図4 運行実績と乗車人数

の傾向が見られることから、降車流量を推定し、降車流量と降車人数より降車時間を求める手順とするのが妥当であると言える。

(2) 乗降人数

降車・乗車時間を推定するためには、降車・乗車の各人数が先に推定されなければならない。

図3はある駅の対象乗降位置における乗車人数の平日5日間の調査結果である。この間に大きなダイヤの乱れはなく、累積乗車人数は5日間ではほぼ一致していることが分かる。その一方で列車単位の乗車人数には大きなばらつきがある（グラフは列車遅延の影響を取り除くため5本単位で集計）。これらのことから、累積乗車人数の曲線が示すようなほぼ一定の乗車客発生確率分布の下で、外乱（例えば接続列車の遅れなど）によって一部の列車への乗客の集中とその分散が発生しているものと考えられる。図4は図3の元となった個別（各日各列車）の乗車人数をその時の運行状況と対比したものである。もし外乱による影響が小さければ、任意の同一時間帯（縦方向）について、運転間隔が大きいほど乗車人数が増える（円が大きくなる）傾向が現れなければならないが、必ずしもそうでないことから外乱による乗車人数のばらつきが比較的大きいことがわかる。

一方、降車人数の場合は、上流駅での乗降人数と当駅の時間帯別平均降車人数からある程度推定できることが

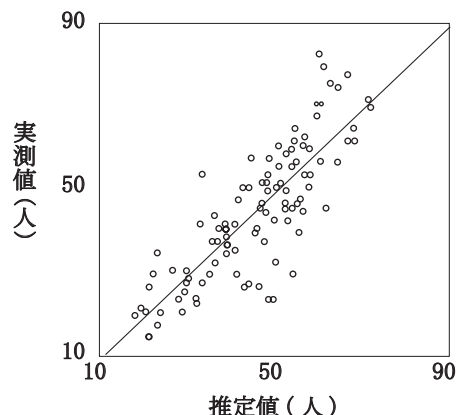


図5 重回帰による降車人数の推定結果

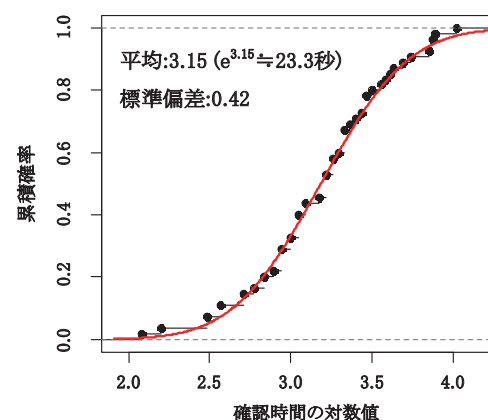


図6 確認時間の確率分布

わかった。図5は、ある駅の降車人数を、同駅の平均降車人数、当列車上流駅の乗車人数、同降車人数を説明変数とする重回帰により推定した結果である。この例では、2倍以上の誤差が乗じたケースがあるものの、実測値と推定値の相関係数は0.813、標準誤差は8.96であった。

(3) 確認時間

確認時間の分析にあたっては、車掌による意図的計画的な時間調整を含まないように、列車遅延が発生している状況下での確認時間の実績を抽出して分布を調べた。つまり、乗降が終わった（途切れた）時点で既に所定発時刻を過ぎている状況から、閉扉、安全確認、出発合図を経て列車が始動するまでの時間の分布である。確認時間の対数値に対し、抽出データ件数全体を1.0とした累積確率分布を求めた結果を図6に示す。図中の赤線はこの分布に合致する平均3.13（23.3秒）標準偏差0.42の正規分布である。この結果から、乗降にかかる時間以外に平均約23秒もの時間を、混雑状況や遅延に関わらず必要とし、それが数%の確率で時として1分程度にまで及ぶことがあるということが分かる。

2.2 走行時間

列車が駅1、駅2の順に停車するものとする。先行列車の駅2の発時刻を T_2 、続行列車の駅1の発時刻を T_1 、

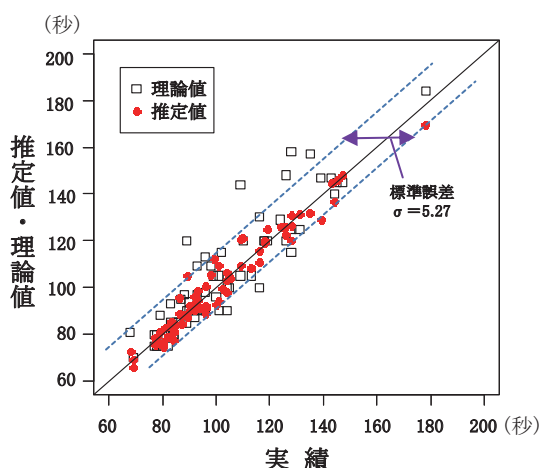


図7 駅間運転時分の推定結果

駅1から次の駅2までの基準運転時分を t_1 、列車ダイヤ設定上の駅2の先行列車と続行列車との追い込み時隔(発時刻～着時刻に必要なとする最小間隔)を t_2 とすると、理論上、続行列車の駅間最小運転時間は

$$t_{min} = \max(t_1, T_2 + t_2 - T_1) \quad (1)$$

となる。理論上とは、先行列車の影響を受けずに常に上位の信号現示で閉そく区間を走行することを前提としたときに、最短時間で走行できる運転曲線に従って運転した場合という意味である。一方、ダイヤ上で駅間運転時分に余裕時分 t_{add} が付加されていて、駅間を $t_1 + t_{add}$ で運転する場合と仮定した場合は

$$t'_{min} = \max(t_1 + t_{add}, T_2 + t_2 - T_1) \quad (2)$$

となる。そこで、モデル線区での実測値を対象に、これらの理論値や余裕時分などと運行状況を表すいくつかの変数を用い、重回帰分析により駅間運転時分の推定を行った。AIC(赤池情報量基準)に基づいてステップワイズ法により説明変数の選択を行った結果、 t_{min} 、 t_1 、 t_{add} に加え、当列車の発駅での発遅延の有無、先行列車の同駅間運転時分、先行列車の次駅での停車時間が有効な説明変数として残った。図7に推定式による推定結果および理論値(t_{min})で推定した結果を示す。

3. 確率的運行シミュレーション

3.1 遅延伝播モデル

前章の分析結果をもとに列車運行シミュレーションに使用する推定モデル(遅延伝播モデル)を構成した。図8に全体概要を示す。要素間を繋ぐ矢印は各要素の算出・推定の入出力関係を表す。橙は推定式により推定される要素であり、例えば、乗車人数は、単位時間入場者数と先行列車との発着時隔を元に推定される。緑色は確率分布(入場者数分布は時刻をパラメータとする)である。水色は推定(確率的要素)を含まず、入力値を基に確定的に計算される。例えば、乗車時間は乗車人数を乗車流量で割った値なので、乗車流量と乗車人数から乗車時間に矢印が張られている。要素のうち赤字で示した着時刻と発時刻は次の駅や後続の列車の推定の入力となり、これによって、各列車、駅の運転時刻間の依存関係が表現

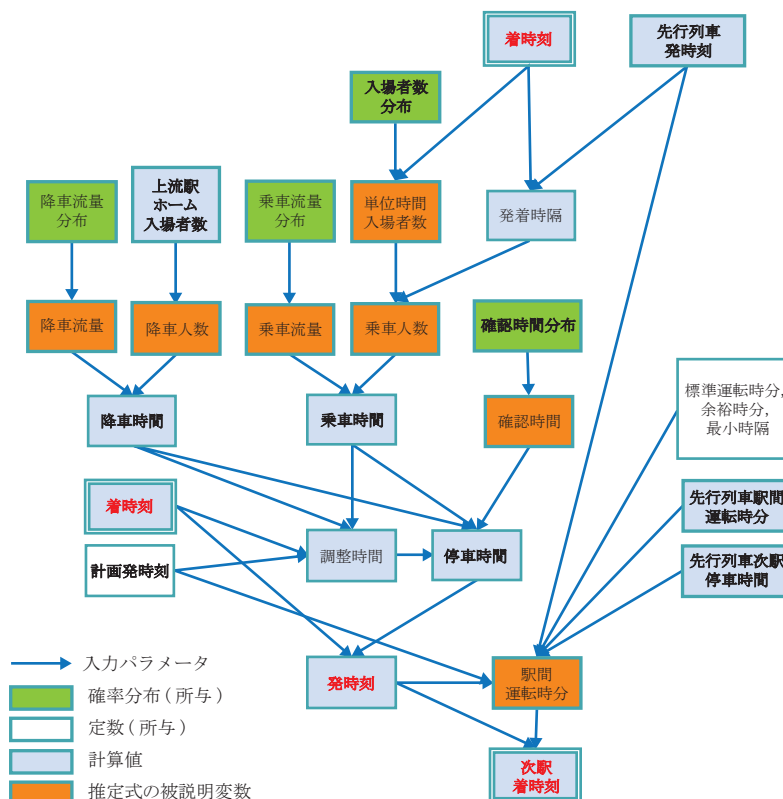


図8 遅延伝播モデル

される。また同様に、列車ダイヤや旅客発生確率などの静的な値（前提条件）との依存関係も示されている。

3.2 シミュレーション方法

1回の列車運行シミュレーションは、列車ダイヤ上で時刻の早い事象から順に遅延伝播モデルにより実績時刻を推定する。その際、確率分布（緑色の要素）については、それに従う確率乱数によって出現値を選択する。乗車人数、降車人数、駅間運転時分の三要素については、回帰式による推定誤差が含まれるので、誤差項を表す確率分布に従って乱数を発生させ、それを計算結果に加える。例えば、図7の駅間運転時分の場合、計算結果に対し、平均0、標準偏差5.27の正規分布に従う乱数を誤差項として加えた値をシミュレーションにおける実績値とする。

4. 遅延リスクの評価と低減

4.1 初期遅延と遅延伝播

列車ダイヤを遅れにくい頑健なものに改善するためには、現行ダイヤ上で遅れの原因となりそうな箇所と、それらによる遅延リスク、すなわち、どの程度の遅れがどの程度の頻度で発生するかという発生確率分布を評価する必要がある。筆者らは、遅れの原因として、他の点の遅延の影響を受けて連鎖的に遅延する「遅延伝播」と、それ以外の単独で発生する「初期遅延」の二つがあると考えた。遅延伝播には、列車のある駅の遅れが次の駅の遅れを発生させる列車に沿った伝播と、同じ駅の後続の列車を遅らせる駅に沿った伝播があるが、これらの点を、影響を受けた点から影響を与えた点に向かって遡ることで初期遅延の発生箇所を見つけることができる。ただし、初期遅延および遅延伝播の方向、それらの強さは運行の度に異なるので、その中で最終的に大幅な遅延を引き起こす確率の高い伝播経路を推定しなければならない。そのうえで、そのようなケースの初期遅延と遅延伝播の連鎖をできるだけ早い段階で断ち切ることができれば、ダイヤ全体の遅延リスクを効率的に下げることができる。

4.2 評価手法

(1) 遅延リスクの評価

列車ダイヤの各点の遅延リスクを評価する指標として、期待遅延時分を用いる。これは各点の遅延量（秒）の期待値である。これをダイヤ全体について合算すれば、そのダイヤ全体の遅延リスクを示す評価値にはなるが、期待遅延時分の非常に高い点がダイヤのある部分に集中して存在するのと、中程度の点が広範囲に存在するのでは、比較評価が難しい（評価者に委ねられる）ため、合算せずに各点の個別の期待遅延時分を示すようにした。

期待遅延時分は、確率的運行シミュレーションを十分

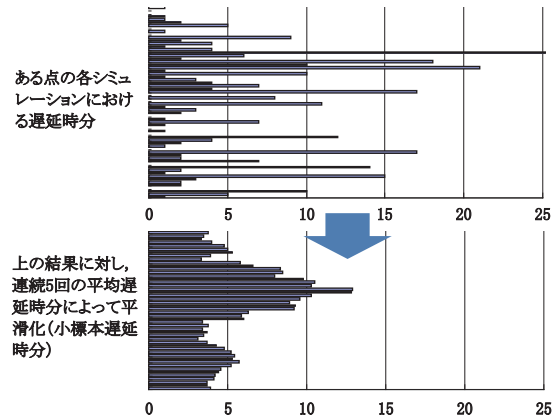


図9 小標本平均遅延時分（秒）

な回数（例えば100回）行い、各点の遅延時分の平均値によって求める。なお、本シミュレーションでは間隔調整などの外部からのダイヤへの調整介入が行われない場合の潜在的な遅延リスクが評価されるため、実際の運行実績と比べると遅延がより伝播し肥大化する可能性がある。

(2) 遅延伝播経路の推定と評価

十分な回数のシミュレーション結果を実行順に並べ、連続するN個の結果（標本）の各点の遅延時分の平均値を求める。Nは適当なサイズ（5～10）の定数である。これを「小標本平均遅延時分」と呼ぶ。小標本平均遅延時分は、シミュレーション実績列の位置の取り方によって変化する。そこで、最初に実績列の先頭からN個を取り、次に、標本の位置を後方に1個ずつスライドさせながら、毎回の各点の小標本平均遅延時分を求め、その変動を観測する（図9）。そして、駅と列車に沿って隣接する2点の変動の同期性が高い箇所を遅延伝播経路として推定する。

4.3 時刻調整の考え方

遅延リスクの高い（期待遅延時分が大きい）点に至る初期遅延および遅延伝播箇所をこれまでに述べた方法で推定し、それらの点について時刻の調整による改善を行う。初期遅延箇所では乗降客数に対し停車時分が不足しているため、乗降客数を減らすか、当該箇所に停車時分を追加することによってリスクが低減できる。乗降客数を減らすには、先行列車の発時刻を下げるか、当該列車の着時刻を上げて先行列車との時隔を削る。逆に遅延伝播箇所では先行列車との時隔が不足しているため、先行列車の発時刻を上げて時隔を確保する。このとき、先行列車の停車時分に余裕がなければさらに着時刻も上げて、先行列車の上流駅の時刻を調整する。当該列車の着時刻を下げて時隔は増加するが、それは見かけの遅延を減少させるだけで実際の着時刻を早める効果はなく、むしろ（早着できないので）平均的には着時刻を遅らせることになり、輸送力を低下させる可能性があるため、時刻の調整はできるだけ先行列車側で行う方がよい。

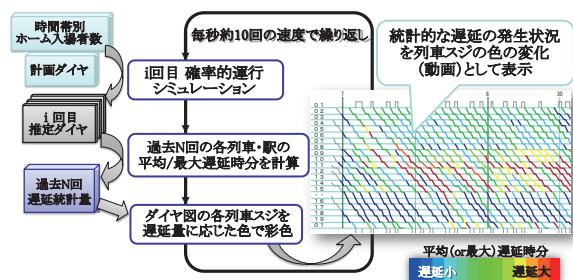


図10 遅延リスク評価改善支援プログラムの概要

4.4 遅延リスク評価改善支援プログラム

上で述べた方法に従った遅延リスク評価・改善を支援するツールを開発した。本ツールは図8に示したシミュレーションモデルの各種係数および確率分布と改善対象の計画ダイヤをデータとして読み込ませ、繰り返し実行したシミュレーション結果に対して、期待遅延時分、小標本平均遅延時分、最大遅延時分などを計算して、色付きダイヤ図の形式で表示するものである(図10)。色付きダイヤ図とは、ダイヤ図の列車線を評価値(この場合は平均遅延時分などの値)によって彩色したものであり、列車線は計画ダイヤに従って描かれるため線の位置は固定されたまま、シミュレーションの都度、色だけが変化する仕様となっている。各点の小標本平均遅延時分の変化を色の変化によって比較できるため、同期を観測して遅延伝播箇所を推定することができる。

5. ケーススタディ

モデル線区において、朝ラッシュ2時間帯の片方向33本の列車を対象に、遅延伝播モデルのパラメータ調査を行い、提案手法によるダイヤ改善のケーススタディを実施した。現実のダイヤを元に、遅延リスク評価に基づいて時刻を変更し、その結果を再び遅延リスク評価することを繰り返し、手作業による評価および時刻調整を実施した。所要時間は約5時間であった。時刻調整量の概要と時刻調整前後における評価結果を表1に、支援ツールを用いた期待遅延時分の比較を図11に示す。この結果より、時刻の微調整によって初期遅延および遅延伝播の主な発生箇所の発生確率を下げることができ、それによって全体の遅延リスクを低減できることがわかる。ただし、時刻調整においては、他線との接続や、乗務員交代の時間などは考慮していないので、この結果の通りに改善できるとは限らない。実際には、そのような外部の条件を考慮して改善を行う必要がある。

6. おわりに

本稿では、列車ダイヤに潜在する遅延リスクとその発

表1 ケーススタディの結果

時刻調整の概要 (全33本の列車の合計)		
駅間運転余裕時分の増減	-5 秒	
停車時分の増減	+25 秒	
運転間隔*の増減	+50 秒	
(1) 時刻調整前後の評価結果	調整前	調整後
平均遅延時分が30秒以上である点の数	11	0
最大遅延時分が3分以上である点の数	8	0
最大遅延時分が2分以上である点の数	75	9

* 後続列車との運転間隔が最も小さい駅での値

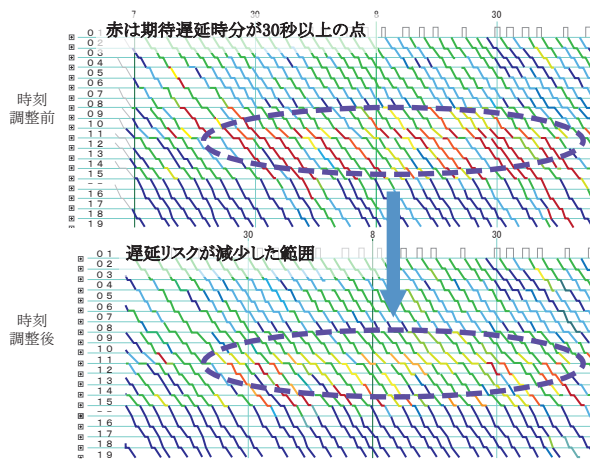


図11 時刻調整前後の期待遅延時分の比較

生源を推定する手法を提案するとともに、それら発生源に対して時刻の微調整を施すことによって、遅延の起こりにくい、より頑健な列車ダイヤへと改善するダイヤ改善のフレームワークを提案した。また、モデル線区におけるケーススタディによって、その方法の有効性を示した。今後は、より遅延が深刻な、慢性的な混雑遅延の問題を抱える路線での検証や、緩急接続などのより複雑な条件を考慮した遅延伝播モデルへの拡張を行って、より汎用性のある手法へと発展させたいと考えている。

文献

- 1) 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・リサーチ学会春季研究発表会 アブストラクト集 2008, pp.188-189, 2008
- 2) 伊藤 俊秀, 草薙 信照: コンピュータシミュレーション, オーム社, 2006
- 3) 青木俊幸, 大戸広道: 停車時分短縮のための駅構造最適化手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.13, No.11, pp.45-50, 1999
- 4) 阪谷崎圭司: 停車時分短縮のための駅構造評価手法, 季刊運輸政策研究, Vol.12, No.2, pp.73-76, 2009
- 5) 山村明義, 牛田貢平, 足立茂章, 富井規雄: 首都圏稠密運転路線における遅延改善策の検証, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, Vol.19, pp.1720, 2012