

列車ダイヤの頑健性向上に関する検討

信号・情報技術研究部 運転システム研究室
室長 坂口 隆

1. はじめに

大都市近郊圏では、輸送需要に対して投入可能な輸送力がほぼ限界に達しており、駆け込み乗車等による僅かな遅延が積み重なることで後続列車などに遅延が伝播し、広範囲・長時間の遅延に拡大しがちである。運行計画策定時に駅間走行時分や停車時分、折り返し時分を割増しすれば、そのような遅延拡大のリスクは軽減されるが、これらを単純に適用したのでは輸送力低下に伴う混雑増加や所要時分増加などのサービス低下を招く。この問題に対し本研究では、遅延の発生および伝播の原因となる列車および駅を検知し、輸送力や速達性を損なわずに着発時刻の微調整によってそれらを軽減させる列車ダイヤ改善手法の基礎を確立した。以下ではその概要を報告する。

2. 頑健なダイヤに関する過去の研究

ダイヤの頑健性に関連する過去の研究としては、簡易なシミュレーションによって余裕時分の付け替えとそれに伴う列車運行状況の変化を予測し、そこから遅延の影響を受ける旅客の利便性の低下(不効用の増加)の総和を推定することによりダイヤの頑健性を評価する手法を提案している¹⁾。しかし、そこでの頑健性の捉え方は、旅客サービスの安定性に基いたものであり、遅延の起こりにくさや広がりにくさを直接評価するものではないため、遅延の発生や伝播の軽減施策としての利用は難しい。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、データ分析や信号設備改善を目的としたものが多く、ダイヤの頑健性向上手法の確立には至っていない²⁾。

3. 頑健なダイヤへのアプローチ

ここでは、旅客の乗降に伴って発生する最初の遅延を「初期遅延」、ある列車遅延が次の駅での更なる遅延や、後続列車の遅延を引き起こすことを「遅延伝播」といい、初期遅延や遅延伝播の起こりにくさを、ダイヤの「頑健性」、頑健性の高いダイヤを「頑健なダイヤ」と表現する。

上で述べたように本研究では、輸送力や速達性を損なわない範囲の時刻修正によって初期遅延と遅延伝播の軽減を図る頑健性向上手法を検討した。実際の列車運行時の停車時間は、列車の運転方法、旅客数、旅客の行動、駅員の合図や車掌のドア扱いのタイミングなどが複雑に影響し合って結果的に決まるものであるため不確実な要素が多く、同じ列車、駅でも日々異なる。そこで運転時分(停車時分および走行時分)の影響要因を分析し、運転時分を影響要因の組み合わせから確率的に決定することによって実際のランダムな運行現象を模擬する、確率的運行シミュレーション手法を開発した。次に、一つのダイヤ案に対する運行シミュレーションを繰り返し実施することで、シミュレーション結果を統計的に評価し、頻繁かつ大きな遅延の発生箇所と、そこ至る原因となっている初期遅延および遅延伝播の発生箇所を推定し、修正する頑健性向上手法を開発した。

4. 実態調査に基づく確率的運行シミュレーション

4.1 遅延伝播モデル

開発したシミュレーション手法では、図1に示すような運行時分の推定モデル（遅延伝播モデル）によって各列車、各駅の発着時刻の推定を順次行う。

停車時分は、降車時間、乗車時間、確認時間により構成される。確認時間は乗車終了から出発までに要する時間である。乗車・降車時間は、最混雑ドアの乗車・降車人数と乗車・降車速度（毎秒当たりの乗車・降車人数）により決定される。重回帰分析の結果、乗車・降車人数は、運転間隔、当該駅や上流の主要駅での発着間合いにおけるホーム出現旅客数、列車の行先などを説明変数（影響要因）とする推定式により推定できることが分かった。また、走行時分はダイヤ設定上の先行列車との最小時隔、基準運転時分、余裕時分、先行列車の次駅の停車時分、当該列車の発遅延の有無などにより推定できることが分かった。この結果を基に各推定式を構築すると、停車時分は先行列車と当該列車の各駅の発着間合い時間に依存して変化し、また、駅間走行時分も同様に先行列車と当該列車のそれまでの運行に依存して変化するような依存関係を表すことができる。

推定式の計算値は推定対象の期待値（平均値）であるが、実際には、旅客の乗降位置選択行動といった不確実性によってばらつく。これを再現するため、図2のように統計解析によって推定式の推定誤差の分布（実測値からの標準偏差）を求め、推定時は、推定式の計算値に推定誤差に従う乱数を加えた値を推定値とする。

乗降速度や確認時間なども確率的な不確実性があるため、その確率分布を実態調査と統計分析により求め、確率分布に従う乱数を発生させることにより推定する。これまでの列車運行シミュレーションに関する研究では、確認時間は定数で扱うなど、あまり重視されなかったが、今回の実態調査では1分前後の停車時分のうち平均10秒程度の確認時間を要し、対数正規分布に従ってばらついていることが分かったので、それをモデルに組み込み再現する構成とした。

本モデルでは、詳細なOD（着発別利用者数）データを使用するような詳細な旅客の動きを模擬することなく簡易な推定方法により乗降時間を計算することで、非常に高速なシミュレーションを可能にした。

4.2 遅延伝播シミュレータ

遅延伝播モデルによるシミュレーション結果を統計的に評価し、その結果をダイヤ図上に表示するシミュレーションシステム「遅延伝播シミュレータ」を開発した。本システムのシミュレーションの流れを図3に示す。シミュレータは評価対象線区、対象時間帯全体の

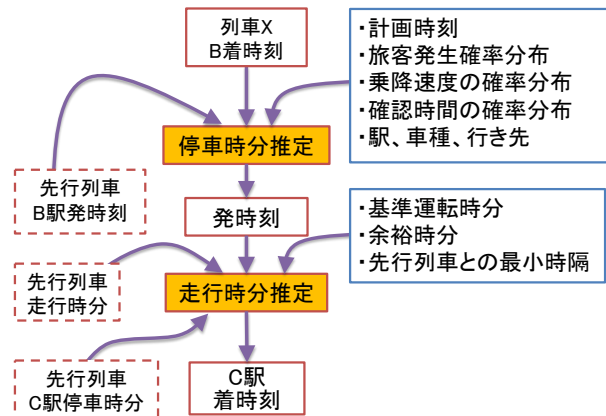


図1 遅延伝播モデルの構成

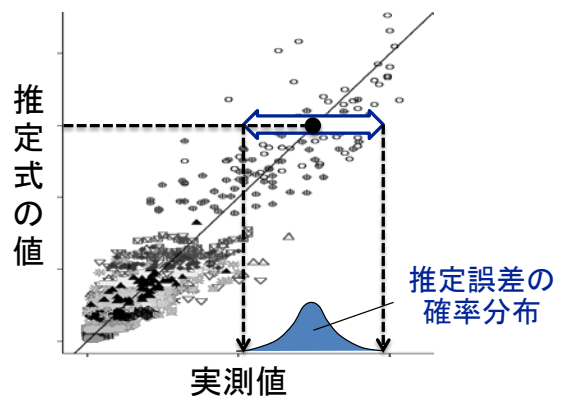


図2 降車人数の推定誤差

運行シミュレーションを1回としてこれを繰り返し実行し、毎回過去N回分のシミュレー

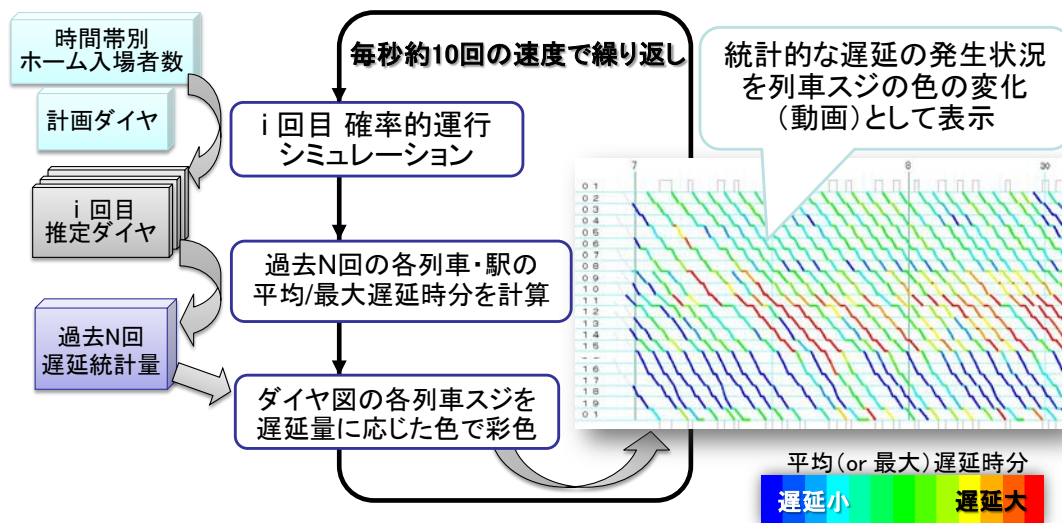


図3 遅延伝播シミュレータの処理フロー

シミュレーション結果の統計量（各列車、各駅着発時刻の平均遅延時分および最大遅延時分）を算出し、ダイヤ画面の各列車スジを統計量に対応する色で彩色する。遅延伝播モデルを使用することで、ラッシュ時間帯 33 本×20 駅の例では、一般的な Windows PC 上で毎秒 10 回以上の速さで動作する。これにより、遅延の発生状況をダイヤ画面上の列車スジの色の変化として観測することができ、この特徴を使って修正が必要な箇所を調べることができる。

5. 頑健性向上方法

5.1 列車ダイヤの評価

現行ダイヤまたは修正ダイヤ案に対して遅延伝播シミュレータを実行することによりダイヤを評価する。シミュレータにおける平均遅延時分は、平均する履歴数Nを大きな値に設定する（長期平均）と平均化されて変動が無くなり、各点の定量的な遅延リスク（遅延確率×遅延量）が表示される。これにより、改善すべき遅延箇所の優先度を判断する。次に、Nを5～20回程度に設定する（短期平均）と、遅延の出現に応じて色が変化する。そこで、遅延が同じようなタイミングで出現する箇所を観測することにより遅延の伝播経路とその先頭である初期遅延箇所を推定する。

5.2 時刻修正の考え方

推定した初期遅延および遅延伝播の発生箇所に対して時刻修正を行う。初期遅延は乗降客数に対して停車時間が不足することにより発生するため、先行列車との間隔を縮小する方法または停車時分を追加する方法により修正する。具体的には、当該列車の上流駅の停車時分または走行余裕時分を削って対象駅の着時刻を上げる、あるいは、先行列車の下流駅の停車時分または走行余裕時分を削って対象駅の停車時分を延ばすなどの方法が考えられる。当該列車の発時刻を下げる方法だと後続列車に遅延が伝播する確率が高くなる可能性がある。遅延伝播は先行列車との間隔が不足することにより発生するので、初期遅延とは逆に先行列車との間隔を拡げる方法により修正する。ただし、手前の駅間走行時分に余裕時分を加算し着発時刻を下げると、後続列車にも影響し、結果として輸送力を低下させる可能性があるため、先行列車の着発時刻を上げる、あるいは、停車時分を短縮して発時刻のみ上げるなど、先行列車側の修正を優先する。

6. ケーススタディの実施結果

モデル線区（一方向）を対象に運行状況調査を行って遅延伝播モデルのパラメータを設定し、現行ダイヤの頑健性向上のケーススタディを行った。表1に、ダイヤ変更の内容と改善効果の評価結果を示す。僅かな時刻変更によって、大幅な頑健性向上効果が得られていることがわかる。なお、本ケーススタディで

は乗務員運用等の詳細な運行条件を考慮しておらず、単純にそのまま適用できるものではないことを付記する。図4に、修正前後の平均遅延（N=200、赤：30秒以上の遅延）の計算結果を示す。また、図5に修正前後の最大遅延（N=365、赤：2分以上の遅延）の計算結果を示す。

表1 変更内容と改善結果

ダイヤの変更内容(ラッシュ2時間の33本を対象)		
運転余裕時分の増減	-5秒	
停車時分の増減	+25秒	
列車間の最小運転間隔*の増減	+50秒	
改善結果	改善前	改善後
平均30秒以上着遅延した列車・駅の数(N=200)	11	0
最大3分以上着遅延した列車・駅の数(N=365)	8	0
最大2分以上着遅延した列車・駅の数(N=365)	75	9

*各列車における先行列車との最小運転間隔

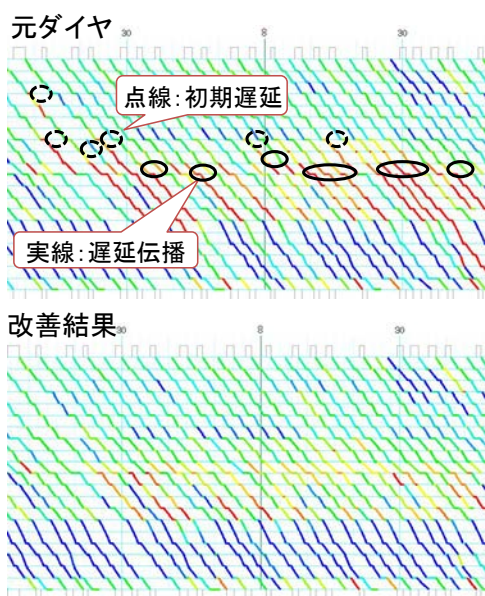


図4 改善結果（平均遅延）

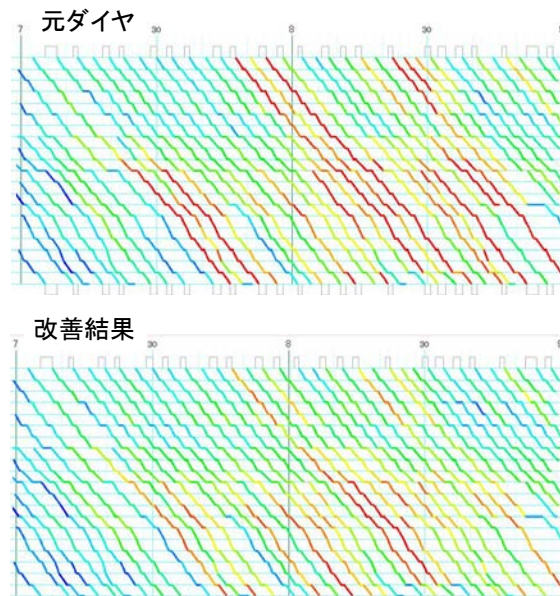


図5 改善結果（最大遅延）

7. まとめ

本テーマではダイヤの頑健性向上の課題に対し、シミュレーションと統計的手法を組み合わせたダイヤ改善手法を提案し、比較的単純な線区を対象に本手法の有効性を確認した。今後は、緩急接続や複雑な線区への適用可能性や、遅延原因箇所の自動推定アルゴリズムなどを検討し、実用性の向上を図りたい。

参考文献

- 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) 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