

遅延の波及範囲の観点による列車遅延データ分析手法

○ [電] 國松 武俊 国崎 愛子

中挾 晃介 坂口 隆 (鉄道総合技術研究所)

Evaluation of Train Delay from the viewpoints of Propagation and Influence

○Taketoshi Kunimatsu, Aiko Kunisaki,

Kosuke Nakabasami, Takashi Sakaguchi, (Railway Technical Research Institute)

In recent years, decreasing train delay and improving punctuality in daily bases is one of the most popular problems in commuter rail lines in Japan. Although train operation companies try to make robust timetables by analyzing recorded data of train delay under the current condition, it is difficult to find a clue of modification, for which taking countermeasures are effective.

In this study, we developed a method of evaluating train delay from the viewpoint of its influence. The method quantitatively analyzes impact of a single delay, by estimating its range of propagation. It also predicts change of influence when a countermeasure is taken for it. We applied the method for different rail lines, and confirmed that it can easily extract sets of trains and stations, for which taking countermeasures are effective for decreasing train delay and improving punctuality of a whole rail line.

キーワード: 列車遅延, 運行実績データ, 遅延波及範囲, 遅延対策

Key Words: train delay, recorded data of train operation, delay propagation, countermeasure of delay

1. はじめに

近年、ラッシュ時間帯等における数分程度の慢性的な列車遅延が、様々な路線で課題となっている。鉄道事業者では遅延縮小のため、ダイヤ改正で駅停車時間や運転時間に余裕を付加する、駅ホームを拡張し乗降時間を短縮する等、様々な対策を実施している。

遅延対策の立案には、日々の各列車、駅での遅延を記録した実績列車運行時刻データ (以下「遅延データ」と表記) が活用される。しかし多くの場合、現行ダイヤでの慢性的な遅延箇所を把握する目的での活用に留まり、遅延対策箇所の選定は、担当者が経験的に行っている。その結果、対策立案に現地調査等の多大な労力を要するほか、対策の妥当性を定量的に説明できないという課題も生じている。

本研究では、遅延対策立案を支援する目的で、遅延データを分析し、遅延対策が効果的な箇所を定量的に抽出する手法を、グラフ・ネットワークにおける影響範囲評価手法を拡張して構築した。提案手法を複数路線に適用、抽出された箇所が、担当者の課題認識箇所に含まれることを確認した。さらに、遅延対策が実施されたダイヤ改正後の分析により、遅延縮小を確認し、提案手法の妥当性を実証した。

2. 列車遅延対策と研究の目的

2.1 列車遅延の種類と遅延対策

列車遅延は一般的に、人身事故、信号トラブル等に起因する、数十分レベルの大規模遅延と、本研究で対象とする、混雑による乗降時間の伸び、荷物挟まり、車内急病人対応等に起因し、数分程度の小規模遅延に分類される¹⁾。後者は、比較的頻繁に発生するため、慢性的な遅延には、ダイヤ改正で余裕時分を付加する等の対策を取ることが多い。

また、遅延の波及の観点では、列車遅延は一次遅延と二次遅延とに分類される²⁾。一次遅延とは、遅延の発生源のことであり、まさにその列車・駅での停車時間超過、トラブルが原因で、遅延が発生したものである。二次遅延は、他の列車・駅で発生した一次遅延が波及した結果、遅延が生じた列車・駅である。遅延の波及は、路線、状況により、非常に広範囲に及ぶことがある。例えば、ある路線の普通列車に遅延が発生し、それが特急待避駅で特急に波及し、さらにその特急が、直通先の単線路線で、対向の特急に遅延を波及させ、対向の特急が当該路線で待避する普通列車を遅延させるという形で、一次遅延から数時間経過後しても二次遅延が継続することもある。このような、広域型の

遅延波及に対策を打つためには、一次遅延箇所の特定と、そこからの波及範囲の把握が重要である。一方で、通勤路線のラッシュ時間帯には、乗降時間の所定停車時間からの超過や、他列車への遅延の波及が頻発し、一次遅延と二次遅延が混在する。そのため、これらの区別も重要となる。

さらに、遅延の発生箇所、波及箇所は日々異なる。したがって、遅延対策を行う場合、複数日の遅延状況を詳細に分析し、多くの日で一次遅延が発生している箇所など、対策が効果的な箇所を抽出しなければならない。

遅延対策の検討は、主にダイヤ担当者により行われ、多大な労力を要する。①遅延の把握、②原因の分析、③対策箇所の選定、④対策効果の推定、⑤対策後の効果検証、の5段階の業務を、全て人手で行うためである。特に③は「列車ダイヤのどの列車・駅をどう修正すれば、他の箇所より遅延縮小に効果的か」の判断で、担当者の経験が大きく影響するほか、対策の妥当性の説明が難しい。また、遅延対策としての余裕時分の付加は、速達性や列車本数にも影響するため、必要以上に付加するのは望ましくない。現状、担当者は運行状況を何度も現地調査し、複数の対策案を立案、得失を定性的に比較し社内説明しており、業務の効率性や、対策の客観的合理性が示されない点にも課題がある。

2.2 関連研究

小規模遅延に対する分析手法は、慢性的な遅延を把握する目的で、一定期間内の遅延の平均値等をダイヤ図形式で可視化するクロマティックダイヤ²⁾など、国内でも数多くの既存研究が存在する。遅延の波及の観点でも、遅延の伝搬経路を相関ルールで抽出する手法³⁾が提案されている。海外でも、列車ダイヤの定時性に関する研究は多く見られ、広域での遅延伝搬を推定する手法⁴⁾も提案されている。これらの研究は、遅延対策業務のうち①遅延の把握、②原因の分析、および④対策効果の推定、⑤対策後の効果検証のいずれかを支援するものである。しかし一方で、③対策箇所の選定、の支援には十分では無い。すなわち、現状の遅延状況が把握出来たところで、「どの列車、駅のダイヤをどう修正すべきかの手掛かり発見」「他箇所と比べ、なぜこの箇所への対策が効果的と言えるのかの説明」に関して、担当者を支援する手法とはなっていない。

2.3 研究の目的

以上を踏まえ、本研究では以下の要件を満たす遅延評価手法を構築し、担当者の③対策箇所の選定を支援する。

- ・複数日の実績ダイヤ（遅延）データのみから算出可能
- ・評価結果を、担当者が数字で直感的に理解できる
- ・遅延の波及範囲を把握できる
- ・遅延対策時に期待できる遅延縮小効果を把握できる

3. 遅延の波及範囲の観点による評価手法

3.1 評価の考え方、評価尺度

本研究では、遅延を波及の観点で評価するため「遅延の影響度」という概念を導入する。これは、ある列車・駅・着 or 発時刻での遅延が、その後、何箇所の「列車・駅・着

or 発時刻」の組合せに波及しているのかを示す。例えば、図1では、発生源Aで5分、Bで7分の一次遅延が生じ、遅延量だけをみるとBのほうが大きい。しかし、Aの遅延はその後、当該列車の次駅以降のほか、後続列車3本にも波及し、計28箇所の遅延の原因となっている。一方Bは12箇所に留まり、遅延波及の観点では、BよりAの影響が大きく、対策を優先すべきである。本研究では、この遅延の波及先箇所数を「遅延影響度（DPS：Delay Propagation Score）」と定義する。なお、波及先箇所数は、例えば1分以上等、設定した閾値以上の遅延箇所のみカウントする。

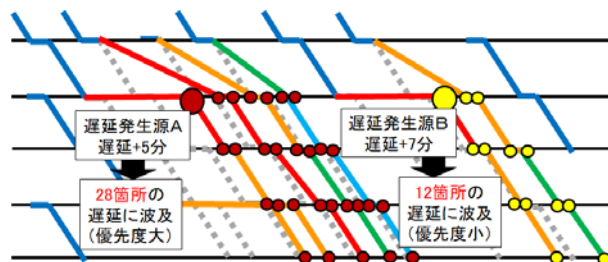


図1 遅延の影響度（DPS）

一方で、遅延対策箇所の選定の観点では、対策効果の見積りも重要である。そこで、仮にある遅延箇所（一次／二次遅延を問わない）の遅延量が1分減少した場合のDPSの減少幅を算出する（図2）。これを「限界影響度（MDPS：Marginal Delay Propagation Score）」と定義する。MDPSは、当該箇所での遅延対策により遅延が解消する波及先箇所数を表しており、MDPSが大きい箇所に遅延対策を打ったほうが、他の箇所より効果的に遅延を減らすことができる。

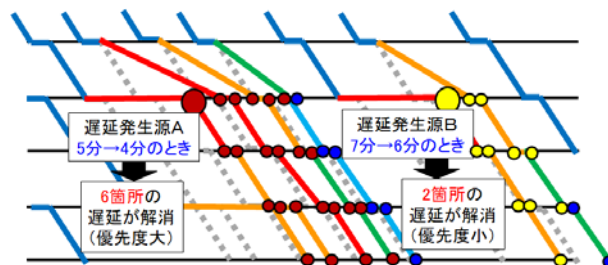


図2 遅延の対策効果値（限界影響度、MDPS）

3.2 遅延波及の判定方法

3.1のDPS, MDPS算出にあたり、遅延の波及箇所を特定する必要がある。本研究では、文献3), 4)の手法を参考に、各日について以下の手順で遅延波及箇所を特定する。

①列車ダイヤに基づくグラフ・ネットワークの作成

列車ダイヤ、および各日の遅延データに基づき、各「列車・駅・着 or 発時刻」の組合せをノード、列車の(1)駅間走行、(2)駅停車、および(3)各駅・番線における「先行列車発車→後続列車到着」、(4)各隣接駅間・線路における「先行列車前駅発車→後続列車前駅発車」と「先行列車次駅到着→後続列車次駅到着」をアークとするグラフ・ネットワークを作成する。ここで、アークは一旦、全て非活性化（無効化）する。

②ノード間の相対遅延に基づくアークの活性化

各アークの始点、終点ノードに対応する遅延量を遅延データから取得し、以下の条件を満たす場合には、遅延波及箇所と判定し活性化する。 α は、続行運転する列車の最小間隔に相当し、例えば $\alpha=3$ 分と設定する。

- ・ (1) (2) のアーク
始点ノード遅延量 $\geq$ 終点ノード遅延量 > 0
- ・ (3) (4) のアーク
始点ノード遅延量 $\geq$ 終点ノード遅延量 > 0 、かつ、
 $0 < \text{終点ノード実績時刻} - \text{始点ノード実績時刻} \leq \alpha$

これらの処理により、運休、順序変更等の運転整理が行われた日を除いては、無効化部分を含めた全体のグラフ構造は毎日同一で、各日で遅延の発生、波及が発生した箇所のみが活性化した部分グラフが作成される。この部分グラフに基づき、各遅延箇所に対し DPS, MDPS を算出する。

3.3 グラフ・ネットワークにおける影響評価手法

ここで、グラフ・ネットワークの構造から各ノードの影響度を評価する手法として、Web サイトのリンク情報から各サイトを評価する「Page Rank」アルゴリズムがある⁵⁾。これは「多くのサイトからリンクが張られるサイトを高く評価」「スコアが高いサイトのリンク先サイトを高く評価」という考えに基づき、グラフ・ネットワーク上で各ノードから到達可能な他のノード数を求め算出している。同様の考え方は、サプライチェーンの機能停止分析⁶⁾等にも適用されている。本研究では、遅延箇所→その直接の原因箇所をリンクと捉え、DPS 算出にこの手法を拡張し適用する。

一方、MDPS の算出は、仮に遅延が 1 分縮小した場合に相当することから、3.2 の部分グラフの各活性化アークについて、その始点、または終点ノードの遅延が 1 分未満の場合には、対策により遅延波及が解消するものとして、アークを無効化する。これにより、各日の遅延対策後の部分グラフを作成した後、DPS と同様の手法により、対策後の評価値を算出する。各ノードについて、DPS と対策後評価値の差分を取り、対策効果値である MDPS を算出する。

3.4 ダイヤに対する平均影響度、対策効果値の算出

ダイヤ修正等の遅延対策の検討においては、個別の日の遅延では無く、1 ヶ月間等の一定期間における、平均的、慢性的な遅延の傾向が重要である。そこで、複数日の DPS, MDPS の算出結果をもとに、その中央値（または平均値）を算出する。ここで、各箇所に対する計算において、遅延が発生していない日の DPS, MDPS は、ともに 0 とする。

4. 複数の実路線への適用と効果

4.1 対象路線と分析する遅延データ

構築した手法を、3 路線の平日 1 ヶ月間の遅延データに対して適用し、DPS, MDPS を算出した。本稿ではそのうち、概ね複雑で、主に都市間の特急、都市圏輸送の快速、普通列車が運行される路線 A の結果を詳述する。路線 A では慢性的な列車遅延が課題となっており、遅延対策のため

のダイヤ改正の検討にあたり、本手法を試験的に適用した。

4.2 ダイヤ改正前における DPS, MDPS の試計算

まず、夕方時間帯を対象に、遅延の中央値に基づき、列車スジを色分けしたダイヤ図を作成した（図 3）。青色等の寒色系は遅延が小さい列車を、赤色等の暖色系は遅延が大きい列車を示す。緑～赤色の列車スジが多数見られ、多くの列車に慢性的な遅延が発生しているのがわかる。しかし、余裕時分の付与等、具体的な遅延対策箇所を検討するにあたっては、図 3 は遅延箇所が多く、優先して対策すべき列車・駅がどれか、1 箇所の対策で効果的に遅延が解消する箇所はどこかについて、手掛かりを得ることは困難である。

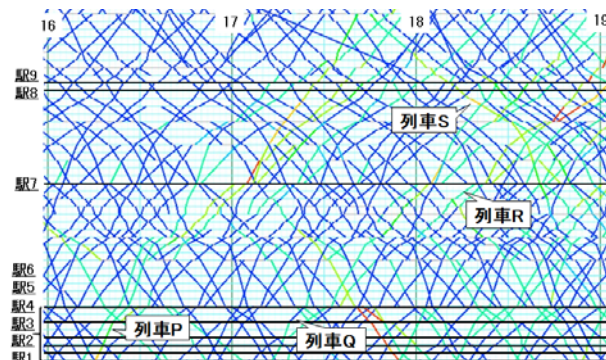


図 3 遅延中央値の色付きダイヤ（ダイヤ改正前）

一方、提案する DPS の中央値を 3.4 に基づき算出し、色付きダイヤ図を作成したものを図 4 に示す。列車スジが青色以外に着色される、慢性的に影響度が大きい列車は一部に留まり、対策を検討すべき列車は限定的となる。

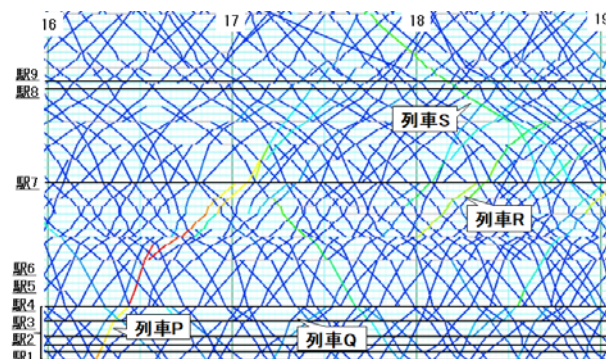


図 4 DPS 中央値の色付きダイヤ（ダイヤ改正前）

表 1 平均 DPS, MDPS ランキング（終日全列車・駅）

	DPS	MDPS	列車	駅	発時刻		DPS	MDPS	列車	駅	発時刻
1	84.8	31.5	P	駅1	16:13	11	65.7	28.9	R	駅6	17:33
2	77.9	28.0	P	駅2	16:14	12	65.4	33.1	Q	駅2	17:13
3	73.7	40.0	Q	駅1	17:12	13	65.4	28.9	**	**	17:31
4	73.2	26.5	P	駅3	16:16	14	63.7	27.9	Q	駅4	17:16
5	71.9	26.5	P	駅4	16:17	15	62.6	21.4	R	駅7	18:22
6	69.8	25.6	P	駅5	16:20	16	60.6	18.1	**	**	18:20
7	69.3	17.8	**	**	22:05	17	59.9	22.8	S	駅9	18:05
8	67.5	26.2	R	駅4	17:17	18	58.5	25.3	**	**	16:03
9	67.2	29.2	R	駅5	17:23	19	58.5	21.8	P	駅6	16:25
10	65.8	16.3	**	**	22:07	20	58.4	22.1	S	駅8	18:09

さらに、路線 A の終日全列車・駅の約 27,000 箇所を対象に、DPS, MDPS の平均値を計算し、DPS の高い順に上位 20 位まで出力したものを表 1 に示す。特急 P,Q の駅 1～6 や、普通 R の駅 4～7、逆方向の快速 S の駅 8.9 が抽出された。これらは、遅延波及が 1 日平均 50 箇所以上あるほか、MDPS も 20 以上のため、遅延対策が相応の効果をもたらすと考えられる。また、これを踏まえてダイヤ担当者にヒアリングした結果、以下のコメントが得られたため、抽出箇所は概ね妥当であると判断できる。

- ・特急 P,Q は、単線の直通元路線 B で遅延が発生し、路線 A に進入しやすい。路線 A で特急 P,Q を待避する快速、普通にも遅延が広く波及しやすいため、路線 B での遅延を解消させる必要があると考えている。

- ・列車 S は、始発駅での平面交差支障と、その後数駅での混雑による乗降時間の延びが遅延の原因である。この列車が遅延すると、極めて広範囲、長時間（約 4 時間）に遅延が波及する。この列車の遅延が、路線 B に直通する特急に波及し、路線 B で逆方向の特急にも波及、逆方向の特急が路線 A の快速、普通列車に波及させるからである。広域的に波及するため、この列車の遅延は、優先的に解消させたい。

4.3 ダイヤ改正後の DPS, MDPS の試算

ダイヤ改正において、遅延状況を踏まえた遅延対策が検討され、結果として、以下を含むダイヤ変更が実施された。

- ・列車 P,Q 等、他線からの直通特急は、他線内のダイヤを見直し、路線 A 進入時の遅延の解消を図る
- ・列車 S は、始発駅での発車番線や、途中駅での停車時間を見直し、始発駅付近での遅延発生を防止する

ダイヤ改正後の遅延中央値の色付きダイヤを図 5 に、DPS 中央値の色付きダイヤを図 6 に示す。図 3、図 5 の比較により、路線 A の遅延は大きく減少したことがわかる。また、図 4,6 の比較により、列車 P,Q,S など、遅延対策を打った列車の DPS は他列車と同水準に低下した。一方、対策未実施の列車 R は、ダイヤ改正後も遅延が残った。

以上より、ダイヤ改正での遅延対策が遅延縮小効果をもたらしたと判断し、提案した DPS,MDPS の指標により、遅延対策業務を支援できることが実証されたと言える。

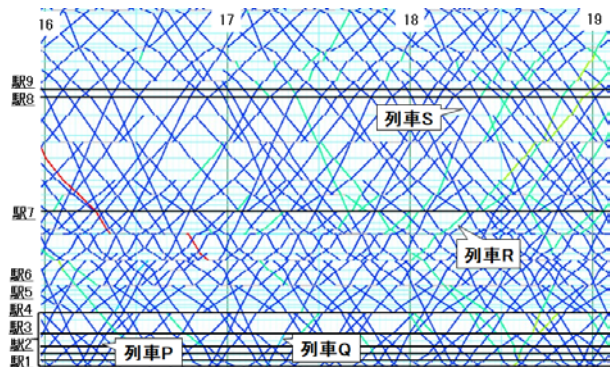


図 5 遅延中央値の色付きダイヤ（ダイヤ改正後）

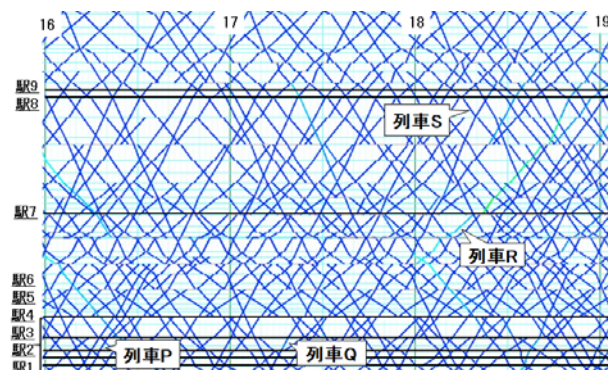


図 6 DPS 中央値の色付きダイヤ（ダイヤ改正後）

5. おわりに

本研究では、鉄道事業者の列車遅延対策のうち、主に対策箇所の選定を支援し、その効率化、品質向上を図る目的で、遅延の影響度を表す DPS, 遅延対策効果を表す MDPS の 2 つの指標を提案した。また、複数路線に適用し、抽出される遅延対策箇所が、ダイヤ担当者が認識する要対策箇所に含まれることを確認した。さらに、ダイヤ改正後の分析により、対策箇所の遅延の縮小を確認し、本手法が遅延対策業務の支援に有効であることを実証した。

提案指標の特長は、複数日の実績ダイヤ（遅延）データのみから算出可能で使用しやすいこと、DPS が遅延の波及範囲に、MDPS が遅延対策時の波及縮小範囲に対応し、数字で示されることから、担当者が直感的に理解しやすいことが挙げられる。これにより、鉄道事業者の社内検討でも、遅延対策の優先順位、妥当性が数字で説明でき、客観的合理的のある経営施策判断に繋がると考えられる。

今後は、影響度に加えて、鉄道を利用する旅客の視点から列車遅延を評価し、各箇所の遅延による「影響旅客数」を算出する手法の構築を予定している。また、提案手法の考え方を拡張し、人身事故等の大規模遅延時における、列車遅延評価手法も検討したいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 国土交通省：東京圏における今後の都市鉄道のあり方について、交通政策審議会答申第 198 号，2016。
- 2) 富井規雄：運行実績データに基づく列車の遅延対策，情報処理学会マルチメディア，分散，協調とモバイルシンポジウム DICOMO2017，2017。
- 3) 河野亜美，富井規雄：相関ルールを用いた遅延伝搬経路の推定，平成 29 年電気学会全国大会論文集，2017。
- 4) Rob M.P. Goverde: A delay propagation algorithm for large-scale railway traffic networks, Transportation Research Part C 18, pp.269–287, 2010。
- 5) L. Page., et. al : The pagerank citation ranking: Bringing order to the web, 1998。
- 6) 中谷隼 他：グラフ理論を用いたサプライチェーン機能停止リスクの構造分析，Development Engineering, Vol.19, pp.23-35, 2003。