

1207 列車運行実績データの可視化

学[電]○稲川真範(千葉工大) 正[電]富井規雄(千葉工大) 牛田貢平(東京地下鉄(株))

Visualization of Train Operation Record Data

Masanori INAGAWA† Norio TOMII† Kohei USHIDA‡

†Chiba Institute of Technology 2-17-1 Tsudanuma Narashino, Chiba 275-0016 Japan

‡Tokyo Metro Co., Ltd. 3-19-6 Higashi Ueno Taito-ku Tokyo 110-0015 Japan

Several visualization methods of train operation record data obtained from train control systems are introduced. Visualization of the data is helpful to identify overall situation of occurrence of delays and the propagation to other trains and to confirm effectiveness of revision of timetables to make them more robust. We present several visualization methods together with our experience to apply them to actual train operation record data of Tokyo Metro, the largest subway company in Tokyo.

Keywords: train operation record, train operation, visualization, robustness

1. はじめに

近年、特に大都市圏においては、ラッシュ時に列車の遅延が頻繁に発生することに対して社会的関心が集まっており、それを受けて行政による調査も行なわれるようになった[1]。文献[1]においては、遅延の発生もさることながら、最初に発生した遅延(初期遅延)が他の多数の列車に伝播してさらなる遅延を引き起こす状況にあることが分析されている。

このような事情を背景に、鉄道会社においては、列車に小規模の遅延が生じてもそれがなるべく他の列車に伝播しないようにすること(一般にこのような列車ダイヤを「頑健な列車ダイヤ」、この性質のことを「列車ダイヤの頑健性(robustness)」と呼ぶ)に強い関心が持たれるようになってきた。

列車ダイヤの頑健性を向上させるためには、現状における列車の日々の運行状況に関するデータを取得した上で、それらを仔細に分析し、ダイヤや設備上で問題と考えられる箇所をあらいだすことが必要になる。しかし、日々多数の列車が運行されている状況においては、列車の運行状況の把握や分析を人手だけで行なうことは容易ではない。

一方、運行管理システムの機能向上にともなって、駅における列車の着時刻・発時刻の実績データが電子データとして取得できるようになってきた。それらを活用することで、運行状況の分析や問題点の検出が可能であると考えられる。しかしながら、それらのデータの量はあまりにも膨大であるため、生の数字をながめるだけでは分析は難しい。また、状況の分析や問題点の検出にあたっては人間による意思決定が不可欠であるため、人間が見てわかりやすく、一目で状況を把握できるようにデータの表示形式をくふうすることが求められる。

これまで、列車の運行実績データの表示や分析については、[2]や[3]などの研究成果が報告されている。しかし、それらにおいては、運行実績データを棒グラフ等で表示するのみで、人間の意思決定を支援することを目的とした実績データの表示形式についての検討は行なわれていない。

本研究では、列車の運行実績データの分析を通じて列車の運行計画をより頑健にする作業を支援することを目標と

して、運行計画の改善作業を、「概観」「特定」「提案」「予測」「評価」の5つのフェーズに分け、特にそのうちの「概観」「評価」の目的に合致した列車運行実績データの表示形式を提案する。

2. 列車運行実績データの活用

本稿でいう「列車運行実績データ」とは、運行管理システムによって取得された列車の駅への実績着時刻と実績発時刻のデータのことを指す。列車運行実績データは、近年では、csv形式などの汎用的なファイルフォーマットで取りだせることが一般的になっており、他のソフトウェアで加工することも容易にできるようになっている。

3. 運行計画の頑健性の向上

3.1 頑健な運行計画への関心

本来、頑健性は、列車ダイヤだけで決まるものではなく、車両・乗務員運用計画などを含めた運行計画、配線・信号システム等の設備の条件、利用者の流動、運行管理の手法なども深く関連する。すなわち、頑健性は、鉄道システム全体に対して定義される概念であると考えられる必要がある[4]。このことは、頑健性を向上させる施策としてさまざまな方策がありうることを意味しており、専門家がさまざまな観点からそれらの方策の優劣を比較評価して意思決定を行なうというプロセスが不可欠であることを示唆している。

運行計画の頑健性は、近年、内外において多くの注目を集めている。国内においては、経路案内システムの普及による利用者の列車遅延に対する意識の変化、相互直通運転の拡大による遅延の伝播範囲の拡大等を背景に、鉄道会社においては、遅延が生じてもなるべくそれが他に拡大しないようにすることに強い関心を持っている[5]。ヨーロッパにおいては、上下分離施策の枠組みの中で、多額の補助金を受けて列車を運行するインフラ会社は列車の定時性について責任を負っており、それを反映して、頑健な運行計画を作成することについて多数の研究成果が報告されるようになってきた[6][7][8]。

3.2 運行計画の頑健性の向上の手順

運行計画の頑健性向上の手順は、おおむね、次のようであると考える。

- 1.〔概観〕問題が発生しているかどうかを概観する。
- 2.〔特定〕問題を引き起こしている原因を特定する。
- 3.〔提案〕問題の原因を解決する方策を提案する。
- 4.〔予測〕解決方策を実施した時の効果を予測する。
- 5.〔評価〕解決方策を実施した時の効果を評価する。

- (1) 概観：列車の運行状況に対して、なんらかの問題が発生していないかどうかを概観する。特定の1日ではなく、ある程度長い期間を対象として、問題の発生の有無を効率的に検知できることが望まれる。また、問題の発生を検知した後は、状況を絞り込むなどして、その問題が発生している状況を特定できる機能が望まれる。
- (2) 特定：概観フェーズで抽出された問題を引き起こしている原因を特定する。例えば、概観フェーズで、「x列車の終着駅着がいつも遅延する」ことが問題として抽出されたとして、その原因として、「先々行列車のa駅での乗降時分の伸び」あるいは、「途中駅折返しとなっている先行列車の遅延に起因する交差支障の発生」などの事象を特定することが目的となる。特に都市圏においては、運行計画は非常に複雑であり、様々な要因が複雑に絡まりあっている。それを効率的に解きほぐす手法が求められる。
- (3) 提案：特定フェーズで抽出された問題を解決するための方策を提案するフェーズである。例えば、
 - ・ b駅での途中折返し列車をやめる。
 - ・ y列車のc駅での停車時分を α 秒延ばす。
 - ・ z列車のd駅～e駅間の走行時分に β 秒余裕をつける。
 - ・ w列車のf駅の停車時分を γ 秒以下に抑える方策をとる。などの方策を提案することになる。
- (4) 予測：提案フェーズで抽出された問題を解決するための方策・施策を実現した時の状況を予測する。
- (5) 評価：予測フェーズで実施された方策・施策の導入の効果を評価するための定量的指標を出力するフェーズである。このフェーズでは、
 - ・ マクロな視点からそれらの効果を概観すること。
 - ・ ミクロな視点から運行計画の細部について問題が発生していないかどうかの確認

の2つを行なうことが求められる。前者は、経営幹部等に報告して投資効果の確認を行なうため等に用いられる。また、後者は、運行計画作成担当者が細部の検証を行なうために用いられる。

3.3 本研究の対象範囲と運行実績データの可視化の必要性

前節で述べた5つのフェーズを実施するためには、人間の高度な判断が不可欠である。その中でも、「概観」、「評価」および「予測」の結果の解釈においては、列車運行実績データ、(あるいは予測データ)を解釈することが必要になる。

しかし、膨大な列車運行実績データを生の形で人間に見せても解釈は困難である。

一般に、膨大な数のデータの性格を表す指標としては、平均値、分散あるいは標準偏差、中央値(median)などが用いられる。しかし、それらの統計的数値は、データの性格を特徴づける数値ではあるものの、人間にとってはいわば数字の羅列であって、人間の直感に訴えるという面では十分ではない。

このようなニーズにこたえるためには、データを可視化手法によって可視化し、それぞれのニーズに合致した人間

の判断に資する形式で表示することが有効であると考えられる。本稿では、それぞれのニーズにあった表示形式で列車運行実績データを可視化する手法として、クロマティックダイヤ図、遅延ダイヤ図、増延ダイヤ図、3次元ダイヤ図を提案し、その有効性を検証する。

4. 列車運行実績データの可視化

4.1 基本的考え方

列車運行実績データの可視化を検討するに際しては、ユーザにとまどいを与えないように、これまでに使用されている見慣れた形式(ダイヤ図)を使用することを基本とする。それに加えて、これまでは必ずしも有効に用いられていなかった新たな情報提示の方法を使用することを検討する。具体的には、「色の活用」、「表示方式の変更」、「3次元表示を有効に活用すること」を検討する。

4.2 可視化の手法

(1) クロマティックダイヤ図

従来のダイヤ図(横軸：時間、縦軸：駅)においては、遅延は、列車をあらわす線(スジ)が計画時刻から横方向にずれていることによって表現される。よって、例えば、列車が駅間で遅延(機外停止を含む)した場合には、他列車よりもスジの傾きが大きくなることなどによって不具合の発生を検知することができる。しかし、この方式では、どの程度の遅延がどの程度の範囲の列車や駅に生じているか、あるいは伝播しているかを視覚的に把握することは容易ではない。

クロマティックダイヤ図は、従来のダイヤ図と同一の2次元表示形式であるが、列車の遅延(発遅延か着遅延かを選択可能)によって、駅間のスジの色を変えて表示する。具体的には、ある時刻の単位(例えば5秒:変更可能)で、スジを青～緑～黄色～赤の20段階のうちの該当する色で表示する(図1)。これにより、列車がどこから遅延しはじめているのか、あるいは、どこから遅延が回復しているのか、また、どのように遅延が伝播しているかを視覚的に把握することができる。

また、1枚のクロマティックダイヤ図に複数日の列車運行実績を重ねて表示することも可能である。これにより、複数日にわたる遅延発生の傾向を色によって直感的に把握することができる。

クロマティックダイヤ図は、3.2の5つのフェーズのうち、特に「概観」フェーズにおいて有効であると考えている。また、「評価」のための材料を提供する手段としても有効に用いることができると考えている。

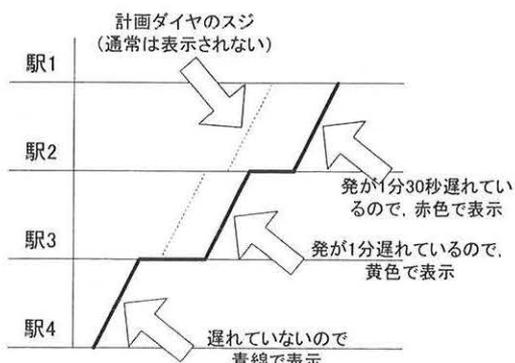


図1：クロマティックダイヤ図の概念図

(2) 遅延ダイヤ図・増延ダイヤ図

遅延ダイヤ図は、計画ダイヤのダイヤパターンを表すために用いられる列車間の相対順序関係に着目した表示形式（曽根式ダイヤ図）を実績ダイヤ図に適用したものである。図2に示すように、通常のダイヤ図と同様に、横軸を時間、縦軸を駅としつつも、横方向の座標値を、「実績着・発時刻と計画着・発時刻の差」を反映したものとしている（始発駅においては実績発時刻）。すべての駅において当該列車の遅延が0であれば、垂直方向のまっすぐな線となる。これによって、当該列車の遅延発生箇所や遅延量、遅延の回復の状況などを直感的に把握することができる。

一方、増延ダイヤ図は、図3に示すように、横方向の座標値を、「直前の着発事象との遅延の差」をもとに決定する（始発駅では実績発時刻）。すなわち、当該列車がある駅で遅延したとしても、そのままの遅延で推移すれば、その駅以降はまっすぐな線となる。これにより、増延の発生箇所、発生列車等を視覚的に把握することができる。

なお、遅延ダイヤ図、増延ダイヤ図ともに、クロマティックダイヤ図と同様に、遅延の量に応じてスジの色が変わる。また、複数日の列車運行実績データを重ねて表示することも可能である。これによって、複数日の運行実績に対して、遅延や増延の発生の傾向を直感的に把握することができる。

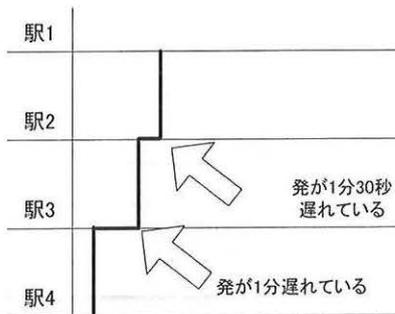


図2：遅延ダイヤ図の概念図（上り列車）

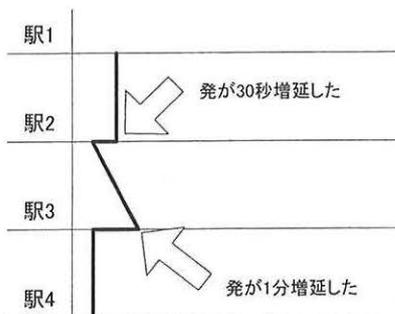


図3：増延ダイヤ図の概念図（上り列車）

(3) 3次元ダイヤ図

3次元ダイヤ図は、図4に示すように、2次元のx軸、y軸方向を通常のダイヤ図と同一としながらも（x軸は時刻、y軸は駅）、3次元のz軸方向に別の情報を表示する。マウス操作によって視点を変えることも可能である。

現在、x軸、y軸方向には、計画ダイヤ（もしくは実績ダイヤ）、z軸のプラス方向に各列車の各駅での遅延の大きさ、または停車時間を表示する機能を実装している。また、z軸の遅延を柱で表し、停車時間の伸びをその上に付した球の大きさで表す機能（バブルダイヤグラム）も実装している。なお、z軸についても、クロマティックダイヤ図と同

様に遅延の大きさに応じて表示色を変えて、遅延発生の傾向を直感的にわかりやすくしている。

また、2つの座標軸を指定して（x軸とy軸、y軸とz軸、x軸とz軸）、2次元状の表示とすることも可能である。その時には、z軸のマイナス方向には、指定されたしきい値以上遅延した列車の比率、あるしきい値以上停車時間が増大した列車の比率等を表示することができる。

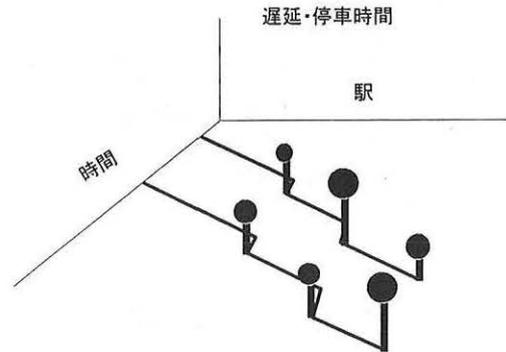


図4：3次元ダイヤ図（バブルダイヤ図）の概念図

5. 可視化手法による列車運行実績データの評価

本稿で提案した可視化手法を用いて、列車ダイヤの改善効果を評価した例を示す。

5.1 対象路線とダイヤの改善

対象とした路線は、東京地下鉄（株）の東西線である。東西線は、東京都の中野と千葉県の上野池袋をむすぶ路線長約30キロメートルの路線である（中野から西船橋方面行きをA線、その逆方向をB線と称する）。また、中野と西船橋の両方でJR中央・総武緩行線、西船橋で東葉高速線との相互直通運転を行なっている。近年、特に千葉県側の人口増加が著しく、混雑が顕在化しており、朝ラッシュ時間帯で主に乗降時間の増加に起因する遅延とその他列車への伝播が恒常的に発生するという問題が指摘されていた。そこで、2009年3月には、遅延の発生や伝播を防ぐこと等を目的としたダイヤの改正が実施された。具体的には、

- ・ B線の快速列車を通勤快速や普通列車として、乗降が増加している葛西～南砂町間に全列車が停車するダイヤ形態に変更し、混雑の平準化を図った。
- ・ A線、B線について朝ラッシュ時間帯前の列車の停車時間を実態にあわせて見直し、ラッシュ時間帯に遅延が伝播しないようにした。
- ・ 通勤快速通過駅において通勤快速の後続となる列車の停車時間を見直した。
- ・ 全体的に列車の停車時秒・間隔を、実態にあわせて5～10秒程度見直し、設備上の限界値に対して余裕を持たせるようにした。

などの点でダイヤの見直しを行なった。また、あわせて、編成内の混雑の平準化を図るために一部乗換駅において列車の停車位置を見直した他、ホーム整理員の増強を行なっている。

5.2 分析結果

本稿で導入したプログラムを用いて分析を行なった。その一部を以下に示す。図5、6には、それぞれダイヤ改正前の2008年6月初旬の平日3日分、ダイヤ改正後の2009年6月初旬の平日3日分（同日付）のA線7時～9時の3次元ダイヤ図を示す。また、図6、7には、同日時間帯のA線での遅延の発生状況を示す。

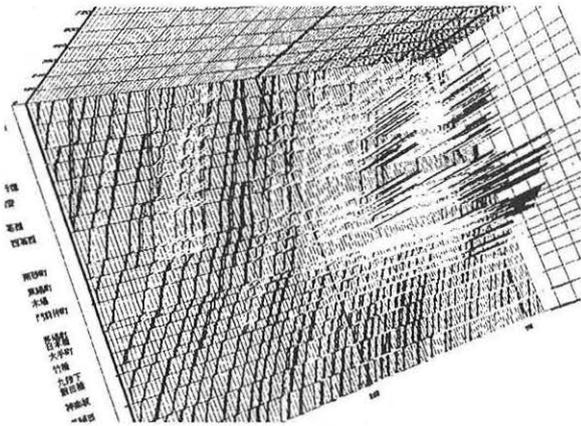


図 5：3次元ダイヤ図（改正前）

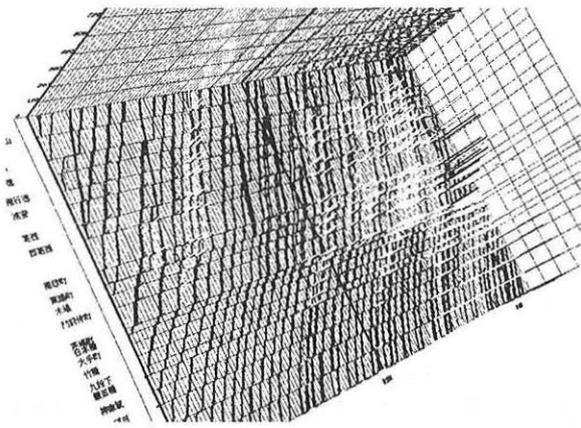


図 6：3次元ダイヤ図（改正後）
改正前に比較して遅延が大幅に減少している。

他の日に対する同様の結果および遅延ダイヤ図、停車時間の増加を示すグラフ等（紙面の都合で本稿には掲載していない）から、特に A 線において遅延の発生や伝播が改正前に比較して大幅に減少していること、停車時間の伸びが抑えられていること等、個々の施策の効果の度合いが明らかになった。また、これらの分析過程で、本稿で提案した可視化手法が有効に用いられうることを確認することができた。

6 おわりに

列車運行実績データの可視化手法を提案し、それらが列車ダイヤの改善効果の確認に有効であることを確認した。今後は、これらの手法をもとにしながらも、より見やすい表示方法を検討するとともに、可視化だけでなく、定量的な方法で頑健性を表す指標を算出する方法の考案に取り組む所存である。また、特定、提案、予測フェーズの支援についても取り組んでいきたいと考えている。

参考文献

[1] 国土交通省「鉄道輸送トラブルによる影響調査」
http://www.mlit.go.jp/report/press/tetsudo08_hh_000003.html
 [2] 武内陽子, 泉利幸, 富井規雄, 「列車運行実績分析システム@Plan の作成とその試用例」, 第 43 回鉄道サイバネティクスシンポジウム論文集, 2006 年 11 月。

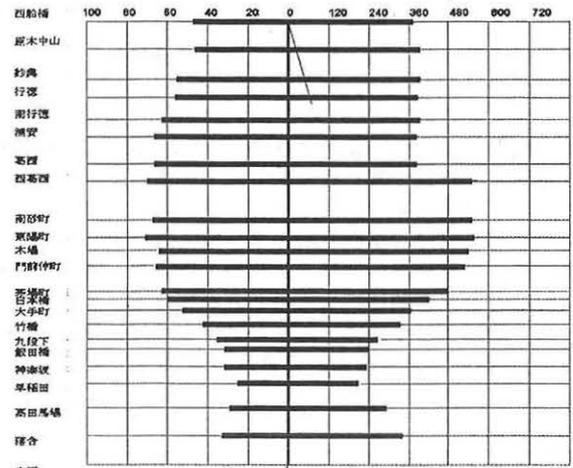


図 7：着遅延が 60 秒以上となった列車の比率（左）とそれらの列車の最高遅延時分（右）（改正前）

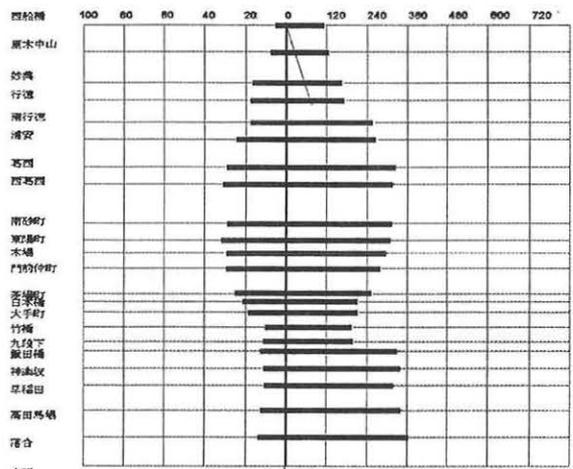


図 8：着遅延が 60 秒以上となった列車の比率（左）とそれらの列車の最高遅延時分（右）（改正後）
遅延する列車の比率が大幅に減少している。

[3] Markus Ullius, Delay Analysis of Rail 2000 1st Phase Using Open TimeTable, *RailDelft*, 1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, Delft, The Netherlands, June 8-10, 2005.
 [4] 武内陽子, 富井規雄: 「鉄道の運行計画の頑健性評価に関する考察」, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-03-40, 2003 年 7 月。
 [5] 牛田貢平: 「ダイヤ乱れへの対処とその課題 - 東京メトロの場合」, 電気学会産業応用部門大会, 2009 年 9 月。
 [6] Malachy Carey, Ex ante heuristic measures of schedule reliability, *Transportation Research Part B*, Vol.33, pp.473-494, 1999.
 [7] Christian Liebchen, Marco Lübbecke, Rolf H. Mohring, Sebastian Stiller, Recoverable Robustness, *Technical Report of ARRIVAL - TR-0066*, 2007.
 [8] Leo Kroon, Rommert Dekker, Gábor Maroti, Stochastic Improvement of Cyclic Railway Timetables, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 42, No.6, pp.553-570, 2008.