

正 [土] ○山村 明義† 牛田 貢平† 足立 茂章† (東京地下鉄)

正 [電] 富井 規雄‡ (千葉工業大学)

Delay Reduction Measures in Dense Transportation Operation

Akiyoshi YAMAMURA† Kohei USHIDA† Shigeaki ADACHI† Norio TOMII‡

†Tokyo Metro Co., Ltd. 3-19-6 Higashi Ueno Taito-ku Tokyo 110-8614 Japan

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

In recent years, reducing delays during the rush hours in Greater Tokyo area has become one of the most important issues to the railway companies. Tokyo Metro has successfully reduced serious delays caused by high congestion in Tozai Line by means of introducing drastic transportation measures. Tokyo Metro achieved this improvement, in particular by using train operation record data and rescheduling and change of station staff operation and improvement of train devices.

Keywords : train delay, train timetable, dense operation, delay measures, train operation record data

1. はじめに

近年、首都圏における朝ラッシュ遅延は、鉄道事業者にとって最重要課題の一つとなっており、遅延改善の手法や研究が議論されるようになってきた。

首都圏において、遅延の主な原因として、混雑による乗降時間超過等による遅延（以下「乗降遅延」という）と、急病旅客の救護や戸挟み等による遅延（以下「異常時遅延」という）に分けられる。

朝ラッシュ時においては、異常時遅延も発生しているが、各駅での乗降遅延による遅延が慢性的に発生しているため、徐々に遅延が増加していく傾向が観測されている。なぜなら、朝ラッシュの輸送力を確保するためには列車間隔を短く設定する必要があり、特に稠密に運転されている時間帯においては、停車時間設定が限りなく限界値に近い設定となっており、一度遅延が発生すると、後続列車に遅延が伝播していくからである。

東京地下鉄では、平成19年度から平成22年度にかけて、混雑・遅延の最も激しかった東西線において、乗降遅延に着目し、列車運行実績データや、後述するクロマティックダイヤ図等を用いて、実遅延の定量的な把握と分析を実施し、その結果に基づいて、遅延の発生・伝播防止に最も効果があると考えられる施策を実施した¹⁾²⁾。施策については、ダイヤ改善に加え、駅オペレーション等のソフト面から、信号設備、駅設備、車両設備等のハード面に渡る、より広範な改善対策を実施した³⁾。

本稿では、実遅延の定量的分析と、乗降遅延に着目した対策内容と効果を検証すると共に、稠密運転路線における今後の遅延改善策について考察する。

2. 列車運行実績データを活用した遅延の把握

2.1 列車運行実績データの活用

前述した列車運行実績データとは、運行管理システムから取得できる、毎日の全列車・全駅の発着時刻の記録である。東京地下鉄では、汎用性の高いCSV形式で取得している。

列車運行実績データが取得できる以前は、ダイヤ担当者が実際に駅や列車に赴き、実績時間を記録する手法が取られていた。しかし、この手法は作業が非効率であると共に、サンプル日数も確保できず、詳細な分析が困難であった。列車運行実績データが取得できるようになってからは、日々の遅延量を日々観測できるようになり、詳細な分析ができるようになった。

2.2 クロマティックダイヤ図の活用

東京地下鉄では、平成20年6月から、列車運行実績データの取得を開始し、より精度の高い遅延分析を可能とした。しかし、全列車・全駅の発着データは、1日分でも非常に大きなデータ量であり、これを長期間に渡り分析するとすると、容易な作業ではなかった。

そこで、これら膨大なデータから、遅延量を容易に把握でき、かつ遅延の原因となる箇所や時間帯を一目で把握できないかという発想のもと、遅延量を可視化したダイヤ図「クロマティックダイヤ図(図1参照)」を開発した。このダイヤ図の見方は、定時運行に近いと青色、遅延量が増大してくると徐々に赤色へ変化し、遅延の発生や実態がわかる仕組みとなっている。本稿では、3分の遅延で赤色になる表示としている。

クロマティックダイヤ図の開発に伴い、視覚的にも遅延を把握できたことで、遅延対策の必要な箇所を特定することができるようになった。

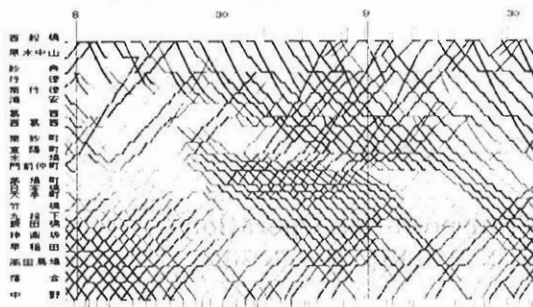


図1 クロマティックダイヤ図

3. 東西線の路線概要

東京地下鉄東西線は、中野駅から西船橋駅の全長30.8kmの路線で、中野駅ではJR線、西船橋駅ではJR線、東葉高速線との相互直通を行っており、1日の輸送人員平均は約130万2千人(2011年度実績)、混雑率は木場駅→門前仲町駅で最大199%(2011年度実績)であり、首都圏において最も混雑率の高い路線の一つである。

朝ラッシュ時においては、西船橋駅から大手町駅方面へ向かうB線(図2参照)が混雑する。特に西船橋駅～南砂町駅間で乗車旅客多数による混雑、東陽町駅～門前仲町駅間では乗降旅客交錯による混雑、茅場町駅～大手町駅間では降車旅客多数による混雑が確認されている。

長期の旅客需要予測においても、少子化の影響はあるものの、沿線開発の進行等により当面横ばいで推移すると予測されている。

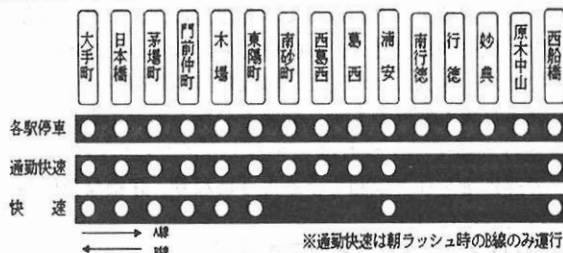


図2 東西線一部路線図

4. 遅延実態の把握と原因の推定

このような路線環境の中、平成19年頃までは、輸送トラブルがなくても最大遅延は5分超が慢性化していた。特に、主方向であるB線の西船橋駅から茅場町駅までの高混雑による駅停車時間の超過、及びそれが原因で発生する遅延の伝播が大きな問題となっていた。

列車運行実績データを取得できるようになった平成20年6月の朝ラッシュ主方向であるB線をクロマティックダイヤ図に表わしてみると図3のようになった。

これを分析すると、8時30分前に西葛西駅付近から遅延量が立ち上がり、最混雑区間である、木場駅→門前仲町駅間で遅延が大幅に増大、門前仲町駅で停車時間が延び、9時にかけて茅場町駅手前で列車スジの傾きが緩やかとなり、遅延の積み上げを確認することができた。列車スジの傾きが緩やかになっているということは、その駅間で列車の運転時間が超過していることを意味する。

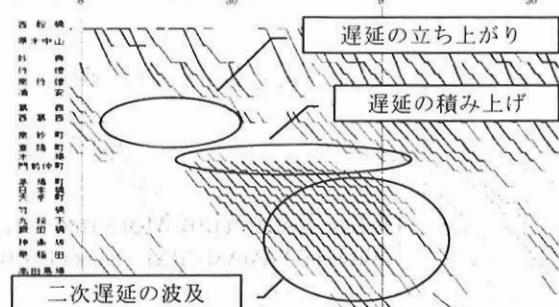


図3 平成20年6月クロマティックダイヤ図

以上より、遅延改善にあたっては、クロマティックダイヤ図から読み取れる遅延状況と、駅や列車の実情を考慮し、前述したソフト面の対策と、ハード面の対策の双方から総合的に見直すこととした。具体的には表1のとおりで、主要の各項目について説明する。

項目	内容	実施時期
ダイヤ改正	・ Buffer Index に基づくダイヤ修正 ・ 快速を通勤快速化とし混雑率を平準化	H20.3.15 H21.3.14
門前仲町駅停止位置変更	・ 乗降車両の分散化 ・ 停車時間短縮	H20.9.28
ホーム整理員の増員	・ 停車時間短縮	H20.10.1
接近信号の設置	・ 駅間運転時間の抑制 ・ 二次遅延の防止	H20.11.29
早起きキャンペーンの実施	・ ピーク乗車時間の分散化	継続実施
ワイドドア編成の集中投入	・ 停車時間短縮	H22.5.7~ 順次投入

表1 東西線遅延改善策一覧

5. 遅延改善策

5.1 ソフト面の改善策

(1) 遅延の質を考慮したダイヤ設定

列車運行実績データの取得により、遅延量の詳細な分析が可能となったが、遅延改善を行う上で、ダイヤのどの部分をどの程度修正することが有効なのか、ということを経験的に求め、また評価できる手法についても同時に検討を行った。

そこで考案したものが、Buffer Index (バッファインデックス) の考え方である⁴⁾。この考え方は、一次遅延が発生した場合に、その遅延の頻度と大きさに対して、どの程度後続列車の遅延を発生させるかを表す指数を意味する。すなわち、Buffer Index は遅延の質を表す指標であると考えられる。

Buffer Index の考え方について、図4を用いて示す。まず、01列車に遅延 Delay が発生した場合、後続の03列車との列車間隔の余裕 Buffer よりも遅延 Delay が小さければ、遅延は余裕分に吸収され、03列車の遅延を誘発しないこととなる。しかし、遅延 Delay が列車間隔の余裕 Buffer よりも大きい値の場合、余裕分で吸収しきれないため、03列車の遅延を誘発することとなる。これが、後続列車への遅延の伝播の仕組みである。この理論を数理的に考えると以下(1)式となる。

$$BufferIndex = \frac{Delay}{Interval - Squrt} \dots\dots\dots(1)$$

Buffer Index = 当該列車の遅延の質

Delay = 当該列車の遅延量

Interval = 当該列車と後続列車の列車間隔

Squrt = 最小運転時隔

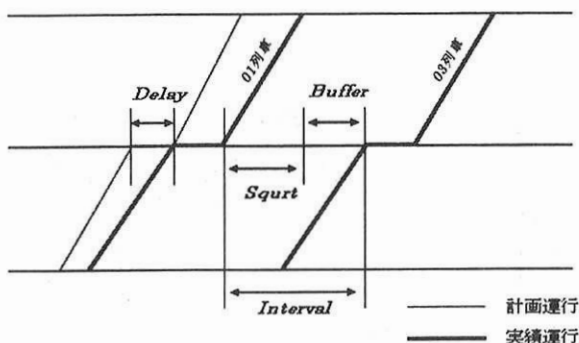


図4 Buffer Index の概要

この理論を基に Buffer Index の値を見ると、理論上遅延を吸収でき得る値である1以下が望ましいということになる。そこで、Buffer Index の値を1以下にするために、分子の値を小さくするか、分母の値を大きくするかという議論になる。分子を小さくする施策については、遅延そのものを解消するための施策として、停車時間の付加や、ホーム整理員の増員、混雑率の高い優等列車の廃止などが考えられる。一方、分母を大きくする施策としては、列車間隔を広げる、もしくは最小運転時隔を短縮することとなるが、信号設備などの改良が必要となる。

このように、遅延の質を分析することで、ダイヤ上の弱点を理論的に見出せると共に、対策を打たなければならない箇所を把握できるようになった。実際、平成20年3月及び平成21年3月のダイヤ改正時には、この手法で遅延の質が悪い駅を分析し、その駅に対して停車時間及び列車間隔を再調整した。

また、平成21年3月のダイヤ改正時には、始発～朝ラッシュ後までの全ての快速列車について、浦安駅以西は各駅停車とする通勤快速化を行った。これは、混雑の激しい浦安駅以西の列車による混雑率不均等が原因で、各駅列車停車駅が混雑過多となり、遅延が増加していたが、快速を通勤快速化することで、混雑率の平準化と Buffer の効率的配置を図ったものである。

(2) 駅オペレーションの改善

平成20年3月のダイヤ改正において、Buffer Index に基づきダイヤ修正をしたものの、なお停車時間が超過している駅に対しては、警備員を含むホーム整理員の増員を実施した。これは主に旅客の混雑や駆け込み乗車によるドア挟みの防止、乗降促進、旅客流動の整理を行う要員で、混雑箇所、駆け込み多発箇所等の重要箇所に要員を配置し、西船橋駅～大手町駅間で、従来の73名体制から150名体制への増員を図った。

5.2 ハード面の改善策

(1) 列車の信号設計の改良

遅延分析においては、停車時間の超過に加え、運転時間の超過が観測された。その中でも、信号展開による改善を図ることが効果的である箇所については、信号設計の改良を行うこととした。

具体的には、主に採用していた一段ブレーキ制御について、列車幅輦の見受けられる箇所に接近コードを設置し、列車幅輦時に先行列車へより接近できる設計とした。

従来のCS-ATCでは、ATCコード毎にブレーキ作用と緩解を繰り返し、減速・停止する仕組みであったが、空走時間による時間損失と、ブレーキ作用と緩解の繰り返しから乗り心地が悪かったため、一段のブレーキで停止できるように軌道回路長を設計し、追込み時間の短縮と乗り心地改善を図った。これが一段ブレーキ制御である。

しかし、この一段ブレーキ制御については、朝ラッシュのような稠密運転時に先行列車に接近した場合、低速で軌道回路に進入することにより、停止位置が手前となり、追込みが悪くなる(図5参照)。

これが遅延の伝播に繋がることから、特に列車幅輦の目立つ駅間については一段ブレーキ制御の概念を見直し、可能な範囲で接近コードを設置した。このことにより、列車幅輦時に、より先行列車に接近した位置まで進行できるようになった(図6参照)。

東西線においては、駅間幅輦の懸念のあった西葛西駅～南砂町駅間、門前仲町駅～茅場町駅間に接近コードを設置し、駅間列車接近時の追込み改善を図った。

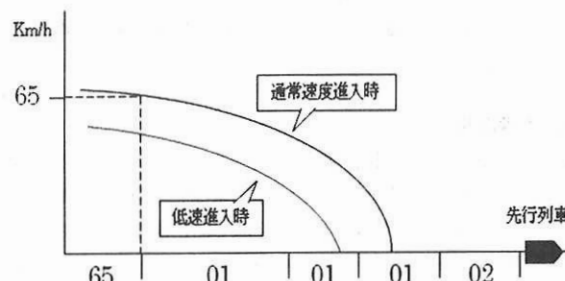


図5 一段ブレーキ制御のブレーキパターン

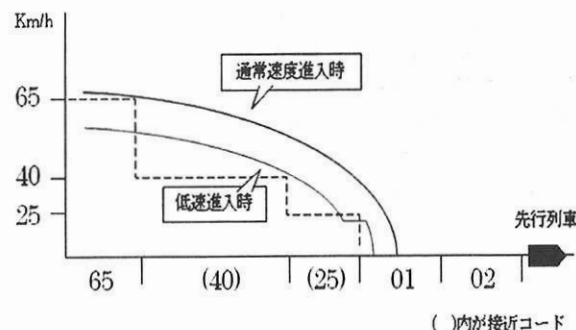


図6 接近コードのブレーキパターン

(2) 駅設備改良による改善

東西線の最混雑区間である木場駅→門前仲町駅にあっては、門前仲町駅の停車時間の改善が求められていた。門前仲町駅の特徴として、先頭車両付近にある都営大江戸線との乗換口が混雑することに加え、先頭車両が女性専用車両のため、特に2両目以降から降車して乗り換える旅客がホーム狭小部に滞留し乗降に時間を要する状況にあった。このため、旅客流動を少しでも円滑にするため、列車の停止位置を最大限前方へ移動することにより、ホーム狭小部での滞留を解消すると共に、女性専用車以外の車両からの乗降をスムーズにすることとした。

(3) 車両設備改良による改善策

停車時間超過の対策として、車両設備改善による施策も検討した。東西線の高混雑駅については、車内混雑のため乗降に時間を要する、といった現象が見受けられた。具体的には、西船橋駅～南砂町駅間ではほとんどが乗車一方であり、都心部に近づくにつれ、乗車スペースがなくなり乗車に時間を要していた。東陽町駅～門前仲町駅間では乗降客が交錯、特にこの区間は左右のドアが交互に開くことで、降車客が降り切るのに相当時間を要していた。茅場町駅～大手町駅間では降車一方となるが、階段付近の車両については、高混雑によりスムーズに降車できない状況が見られた。

そこで、車両ドアについて、従来のドア幅 1300mm の編成（ノーマル車）よりも広い、ドア幅 1800mm の編成（ワイド車）を投入することで、乗降時間短縮を図ることとした。このワイド車は従来5編成導入されていたが、平成22年5月から13編成を追加で順次投入し、特に朝ラッシュ時間帯に集中運用することで乗降時間短縮を図ることとした。

6. 改善結果

前項で挙げた遅延改善策を実施したことで、平成22年にかけて大幅に遅延が改善された。まず、列車運行実績データが取得できるようになった平成20年6月と平成22年6月のB線（中野駅方向）の平均遅延を、クロマティックダイヤ図で比較すると図7のとおりとなった。

まず、西船橋駅から中野駅方面へ遅延の推移を見ると、西葛西駅付近から、ホーム整理員増員による乗降時間の縮小効果で、遅延を表す色に変化はなく、遅延が拡大していないことがわかる。また、南砂町駅では、ホーム整理員増員による乗降時間縮小効果に加え、接近コード設置による運転時間縮小効果で、同じく遅延が拡大していない。茅場町駅では、門前仲町駅の旅客流動円滑化に伴う停車時間縮小効果と接近コード設置による運転時間縮小効果で、3分以上を示す赤色部分が大幅に減少した。

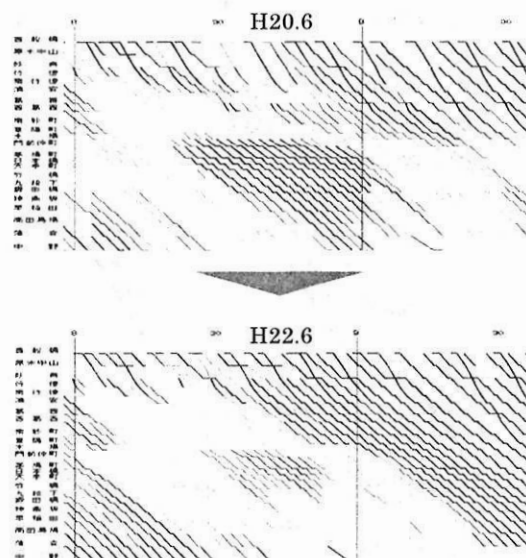


図7 H20.6とH22.6のクロマティックダイヤ図比較

7. まとめ

列車運行実績データを活用したことにより、遅延の原因を詳細に把握できたことで、効率的に改善策を実施することができた。しかし、高混雑に対する輸送対策、又は一次遅延全般の防止という課題については、今後も検討していかなければならない。

また、本稿で述べてきたソフト・ハード両面からの総合的な遅延改善策は、今後、遅延が問題となる他路線において、その路線の特徴を考慮しながら、総合的遅延改善を進めていきたい。

参考文献

- 1) 稲川真範, 富井規雄, 牛田貢平:「列車運行実績データの可視化」, J-Rail2009, 第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, 2009
- 2) 牛田貢平:「列車運行実績データの可視化手法によるダイヤ検討への応用」, 運転協会誌, Vol.52, No.8, 2010
- 3) 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」, 交通・電気鉄道研究会, 2012
- 4) Kohei USHIDA, Shingo MAKINO, Norio TOMII: Increasing Robustness of Dense Timetables by Visualization of Train Traffic Record Data and Monte Carlo Simulation, WCCR2011- World Congress on Railway Research, Lille, France (2011)