

運行実績データを活用した列車遅延の評価指標

牛田 貢平

運行管理システムに記録された運行実績データから、日々の列車の運行状況や遅延量を秒単位で把握することが可能になった。遅れに強い安定した列車運行を実現するには、このデータを活用し、遅延によって生じる個々の列車間の影響を詳細に分析することが不可欠である。ところが、従来のように遅延量に基づく分析手法では限界があり、これに代わる新たな遅延の評価指標が必要であった。そこで、東京地下鉄（以下「東京メトロ」という）ではバッファインデックス（Buffer Index）を考案し、列車遅延の評価・分析および列車ダイヤの頑健性向上の手掛かりとしての有効性を示した。

キーワード：運行実績データ、列車遅延の評価指標、バッファインデックス、頑健性の高いダイヤ

1. はじめに

東京メトロは、9路線 195.1 km の地下鉄ネットワークを形成し、1日に 631 万人（2010 年度実績）のお客様にご利用をいただいている。

東京都心部の膨大な輸送需要に対応するため、朝ラッシュ時間帯は最短で 1 分 50 秒間隔（丸ノ内線）と、極めて高密度な列車運行を行っている。また、他鉄道事業者との相互直通運転を行い、郊外から都心部までシームレスな輸送サービスを提供している。

さて、弊社に寄せられる「お客様の声」を分析すると、近年は「定時運転」に対するニーズの高まりが伺える。その理由は、主に二つの要因が考えられる。

一つ目は、実際に遅延が生じていることである。これには、特に朝ラッシュ時間帯に発生する「日常的な遅延」と、人身事故や車両故障などのアクシデント、さらには他社線のダイヤ乱れの影響などによる「突発的な遅延」がある。どちらの場合も直通運転区間の拡大に伴い、以前は限定的だった遅延の影響が、直通線区を介して広域的に伝播するケースが増えており、お客様からみれば遅延発生の原因箇所にかかわらず、「この路線はいつも遅れている」と感じることになる。

二つ目は、ダイヤの「精度」に対する要求の高まりが挙げられる。これは、インターネットや携帯電話による時刻表検索サイトの普及により、「乗車駅 → 下車駅」の発着時刻を事前に調べてご利用になるお客様の増加が推測される。このため、1 分でも目的地への到着時刻が遅れたり、予定の列車に乗り継ぎができなかつ

た場合、お叱りを受けることになる。

これらの状況を改善するには、発生している遅延を詳細に分析し、遅れに強いダイヤ（頑健性の高いダイヤ）に修正する必要がある。

そこで本研究では、列車遅延を定量的かつ客観的に評価する指標の確立、および、高密度運転ダイヤの頑健性向上を図ることを目的とする。

2. 従来の遅延分析

列車遅延の分析は、遅延量（遅延時間）を把握する方法が一般的である。それには、日々の列車の運行状況を詳細に記録しておく必要がある。従来は駅の係員や本社のダイヤ担当者が、時計を見ながら用紙に記録していた。

ところが、この方法では手間と人手がかかるため、長期間にわたり「どの列車が、どの駅で、どの程度遅れているか」といった詳細な遅延データを収集することが困難であった。このため、収集可能なデータのサンプル数を考慮すると、それに基づき詳細な分析を行うには限界があったと言える。

その一方で、現在多くの鉄道会社では運行管理システムの導入が進み、運行実績データを取り出すことが可能になってきた。

運行実績データとは、全列車の走行実績が 1 秒単位で詳細に記録されているものである。データは自動的に記録されるため、手間も人手もかからない。また、長期間にわたりデータを蓄積すれば、精度の高い遅延傾向を導き出すことが可能である。

以上のことから、運行実績データは遅延の分析を行ううえでたいへん魅力的な素材であるが、一つ大きな問題があった。

うしだ こうへい
東京地下鉄株式会社
〒164-0013 東京都中野区弥生町 5-9-11

【注】運行実績データは一般的には非公開

列車番号	時間帯	運番	駅名	着発番線	到着時刻	遅延 (時分)	遅延(秒)	遅延	出発時刻	遅延 (時分)	遅延(秒)	遅延	列車種別
A0875S	8	75	中野	2番線					8:02:32	0:01	2	遅延	普通
A0875S	8	75	落合	1番線	8:05:02	0:00	52	遅延	8:05:32	0:00	57	遅延	普通
A0875S	8	75	高田馬場	1番線	8:07:58	0:00	43	遅延	8:08:39	0:00	39	遅延	普通
A0875S	8	75	早稲田	1番線	8:11:08	0:00	23	遅延	8:11:45	0:00	35	遅延	普通
A0875S	8	75	神楽坂	1番線	8:13:32	0:00	27	遅延	8:14:06	0:00	36	遅延	普通
A0875S	8	75	飯田橋	1番線	8:15:55	0:00	25	遅延	8:17:01	0:00	51	遅延	普通
A0875S	8	75	九段下	1番線	8:17:52	0:00	22	遅延	8:18:30	0:00	20	遅延	普通
A0875S	8	75	竹橋	1番線	8:20:00	0:00	10	遅延	8:20:34	0:00	19	遅延	普通
A0875S	8	75	大手町	1番線	8:22:11	0:00	11	遅延	8:23:12	0:00	27	遅延	普通
A0875S	8	75	日本橋	1番線	8:24:14	0:00	19	遅延	8:25:13	0:00	33	遅延	普通
A0875S	8	75	茅場町	1番線	8:26:07	0:00	27	遅延	8:27:04	0:00	39	遅延	普通
A0875S	8	75	門前仲町	1番線	8:29:07	0:00	27	遅延	8:29:49	0:00	34	遅延	普通
A0875S	8	75	木場	1番線	8:31:04	0:00	24	遅延	8:31:34	0:00	24	遅延	普通
A0875S	8	75	東陽町	1番線	8:32:50	0:00	20	遅延	8:33:39	0:00	39	遅延	普通
A0875S	8	75	南砂町	1番線	8:35:14	0:00	24	遅延	8:35:53	0:00	43	遅延	普通
A0875S	8	75	西葛西	1番線	8:38:26	0:00	31	遅延	8:38:48	0:00	33	遅延	普通
A0875S	8	75	葛西	1番線	8:40:29	0:00	29	遅延	8:43:45	0:01	0	遅延	普通
A0875S	8	75	浦安	1番線	8:45:46	0:00	56	遅延	8:46:07	0:00	52	遅延	普通
A0875S	8	75	南行徳	1番線	8:47:24	0:00	44	遅延	8:47:49	0:00	49	遅延	普通
A0875S	8	75	行徳	1番線	8:49:25	0:00	40	遅延	8:49:45	0:00	40	遅延	普通
A0875S	8	75	妙典	2番線	8:51:32	0:00	32	遅延	8:51:55	0:00	10	遅延	普通
A0875S	8	75	原木中山	1番線	8:54:16	0:00	6	遅延	8:54:36	0:00	6	遅延	普通
A0875S	8	75	西船橋	2番線	8:56:59	0:00	4	遅延	8:58:25	0:00	35	遅延	普通

図 1 「運行実績データ」の例（1 列車の片道分データ）

たとえば図 1 は、東京メトロ東西線の列車が、起点から終点まで運行した場合のデータである。東西線は平日 1 日あたり 600 本もの列車が運転されているため、終日分の運行実績データの量は CSV で出力すると 14 列 ×13,300 行となり、実に 18 万 6 千ものセルが文字や数字で埋まっていることになる。これが 1 週間分、1 カ月分、1 年分と蓄積されれば、その情報量は膨大なものとなる。だが、単なる数字や文字の羅列では、データ量が膨大であるほど全体像は見えにくくなる。

このため、課題となっている列車や時間帯に的を絞りデータを分析することが多く、

- *遅延の全体像を詳細に把握できていなかった。
- *魅力的な素材を十分に活用できていなかった。

というのが実情である。

3. 新たな評価指標（問題把握の視点）

仮に膨大なデータから遅延の全体像が把握できたとしても、ダイヤ担当者の仕事はここからである。遅延を改善するには、ダイヤのどの部分に、どの程度の修正を加えるかを正確に判断する必要があるが、従来のように遅延量に基づく評価・分析する方法では、ダイヤを頑健にするための手掛かりを得るには限界がある。

そこで筆者は、膨大な量の運行実績データを効率よく処理すると同時に、次のような視点から問題を把握するために、新たな列車遅延の評価指標が必要ではないかと考えた。

3.1 遅延のメカニズムが見えるもの

遅延量は常に 0 であることが理想だが、小規模な列

車遅延は日常的に発生している。このうち、駅におけるお客様の駆け込み乗車や急病人の救護、多客による客扱い時間の超過などにより発生するものを一次遅延（primary delay）と言う。

これに対し、一次遅延がほかの列車に伝播して発生するものを二次遅延（secondary delay または knock on delay）と言う [1]。特に高密度運転を行う都市鉄道において、ラッシュ初頭の小さな遅延が、終盤には大きな遅延に拡大したという事例は、この二次遅延が影響している場合が多い。

以上のことから、評価指標は、一次遅延と二次遅延の関係を明確にし、遅延の発生から伝播・拡大、そして終息までの状況を分析することが必要である。

3.2 遅延量（時間）の意味が見えるもの

同じ 30 秒という遅延量でも、その遅延がほかの列車の円滑な運行を妨げるか否か（二次遅延を発生させるか否か）という点において、その数字の示す意味は条件によりさまざまに変化する。

朝ラッシュ時のように列車密度が高い時間帯では、30 秒程度の遅延でも二次遅延が発生し、やがてその路線全体に拡大するおそれがある。一方、ラッシュ以外の時間帯では、30 秒程度の遅延なら二次遅延の発生は皆無であり、当該列車のみが遅れる単独遅延であることが多い。

以上のことから、評価指標は、ダイヤ設定や設備条件などによって変化する遅延量の意味を、明確に判断することが必要である。

3.3 遅延の性質が見えるもの

遅延改善のために、設備の改修や要員の増強といった多額の投資が伴う場合、ダイヤ担当者はその必要性を、社内の投資部門や上層部に説明しなければならない。

ところが前記のとおり、条件により遅延量の意味は変化する。このため、列車運行に関する専門知識がない者に対して単純に遅延量を示しても、それに基づき投資の妥当性や有効性、事業の優先順位などの判断を求めるのは、いささか酷な話である。

以上のことから、評価指標は、その遅延の性質や深刻さを、定量的かつ客観的に評価・分析できることが必要である。

4. 列車遅延の質の数理モデル化

4.1 遅延の質の定義

筆者は指令室に勤務した経験から、「いつもこの駅、この列車から遅延が拡大する」といった、俗にダイヤ上弱い、キツイと呼ばれる箇所に着目し、ここで発生している事象を数理モデル化することで、遅延の質を算出できないかと考えた。

終日の運行状況を見ると、一次遅延は時間帯を問わず発生するが、その多くは単独遅延のまま終息する。このような性質の遅延を改善するために、限られた資金や労力を投入するのは得策ではない。

一方、ラッシュ時間帯では、一次遅延がほかの列車に伝播し二次遅延を発生させる。ダイヤ上弱い、キツイと呼ばれる箇所では、このような事象が日常的に発生しているため、単独遅延で終わる場合よりも深刻な遅延であり、それだけ改善の優先順位は高い。

以上のことから、本研究では、ほかの列車に二次遅延を発生させる性質があるものを、質の悪い遅延と定義した。

4.2 遅延の質の導出 (Buffer Index)

図2に列車ダイヤの構成要素を示す。同一方向に走行する列車の場合、特に駅近傍におけるこれらの条件を考慮しながらダイヤは設定される。これに基づき、次の二つの事例を示す。

まず図3の事例1では、01列車の遅延量を $d1$ (秒)とする。これにより、後続列車に対して停止信号を示す時間は、遅延量と同じく $d1$ だけ後ろに移動することになる。この時、01列車と後続03列車の間にある列車間隔の余裕(bt)と遅延量($d1$)が $bt > d1$ の関係なら、01列車の遅延は bt によって吸収され、03列車に二次遅延は発生しない。

一方、事例2では、01列車の遅延量を $d2$ (秒)とする。この時 $bt < d2$ の関係なら、01列車の遅延は bt で吸収しきれず、後続03列車は $d2 - bt$ (秒)の間、先行01列車の停止信号による速度節制(減速もしくは停止)を余儀なくされる。その結果、03列車に二次遅延が発生する。

以上のことから、遅延の質を数値化するには、遅延量(d)と列車間隔の余裕(bt)の関係から導き出せるのではないかと考えた。これに基づき、弱い、キツイを次のように数理モデル化したのがバッファインデックス (Buffer Index) である。

$$\begin{aligned} & \left[\text{「当該列車の遅延量 (d)」} \right] / \left[\text{「列車間隔の余裕 (bt)」} \right] \\ & = \left[\text{「当該列車の遅延の質 (Buffer Index)」} \right] \end{aligned}$$

事例2のように、遅延量(d)が列車間隔の余裕(bt)を上回ると、バッファインデックス (以下「BI」という)は1を超える。このため、

*BIが1を超える場合は、伝播・拡大する性質をもつ質の悪い遅延。

*BIが大きいほど、より深刻な遅延。と考えることができる。

4.3 BIに基づくダイヤの構築理論

長期間にわたり収集した運行実績データから、日常的に発生しうる遅延量(d)を導き出し、これに基づき算出したBIが1以下となるようにダイヤを設定すれば、理論上は二次遅延が発生しない、頑健性の高いダイヤとなる。

たとえば、列車間隔の余裕が5秒のとき、当該列車の遅延量が8秒であったとする。この場合のBIは

$$(\text{遅延量 } 8 \text{ 秒}) / (\text{列車間隔の余裕 } 5 \text{ 秒}) = 1.6$$

となり、質の悪い遅延であると言える。これを改善するため、BIを1以下に抑えるには、

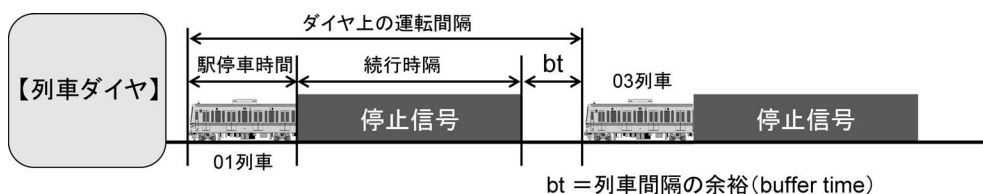
*分子：遅延量を3秒以上抑制する。

*分母：列車間隔の余裕を3秒以上拡大する。

のいずれかの施策を行えば、ダイヤの頑健性は向上する。また、修正幅の「3秒以上」とは、ダイヤや設備に手を入れる際に必要な修正幅の目安となりうる。

BIを改善するための具体的な例を図4に示す。これらは、当該路線の遅延状況に応じて選択のうえ、取り入れるのが望ましい。

たとえば、ある駅で分子(遅延量)をこれ以上小さくすることが困難な場合は、信号設備の改修や駅部分の線路を増やして分母(列車間隔の余裕)を拡大すればよい。それが無理なら、列車の運転間隔を拡大する



用語	意味	備考
駅停車時間	ダイヤ設定上の駅の停車時間。計算式や現地調査の結果から決定される。	この時間の超過が主な遅延原因。
続行時隔	後続列車が先行列車の停止信号の影響を受けずに続行運転可能な最も短い運転間隔。	信号設備のスペックにより左右され、駅によってその時間は異なる。
列車間隔の余裕 (buffer time)	「ダイヤ上の運転時隔」から「(駅停車時間) + (続行時隔)」を差し引いた時間。	遅延の緩衝地帯 (buffer) となる。

図2 列車ダイヤの構成要素

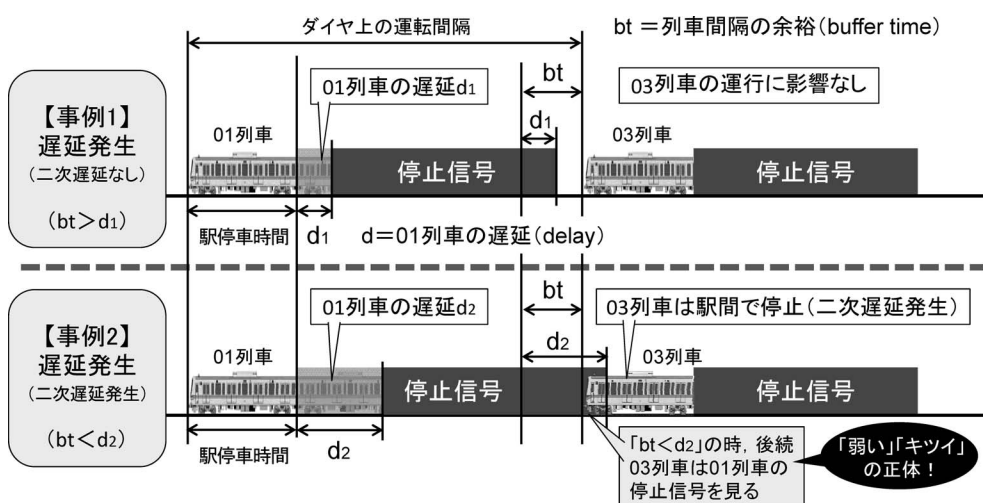


図3 駅停車時間が超過した場合の例

方法もあるが、それは時間帯当たりの輸送力が低下することになり、混雑率の上昇によって逆に遅延量が増加するおそれがあるので注意を要する。

このため、綿密な現地調査などを含め、輸送状況の実態や費用対効果を十分考慮しながら、BIの改善およびダイヤの修正を行う必要がある。

5. 東京メトロにおけるBIの導入例

5.1 最混雑路線で初の本格的な導入

東西線は、JR 中央線中野駅を起点に、高田馬場、飯田橋、大手町、日本橋、茅場町といった都心部の主要駅を経由して JR 総武線西船橋駅に至る、全長 30.8 km の路線である。

同線は、その立地と利便性の高さから、1 日の輸送

人員は 132 万 2 千人（2010 年度実績）と、東京メトロの路線の中では最も多くのお客様のご利用がある。このため、朝ラッシュ最混雑時間帯の乗車率は、木場→門前仲町間で平均 196%（2010 年度実績）となっている。これは弊社のみならず、JR を除く民鉄各社の中では最も高い数字である。

筆者が東西線ダイヤの担当となった 2007 年当時を振り返ると、朝ラッシュ時間帯の運行状況は、アクシデントなどがなくても 5 分以上の遅れが常態化していた。そこで、混雑対策は並行して進めながら、遅延については早急な解決を図ることを目指し、東京メトロでは各部門が連携して、全社的な対応を行うことになった。当然、運行計画に対しても、頑健性の高いダイヤの構築が強く求められた。

分子を小さくする
(一次遅延の抑制)

【主に駅停車時間の
超過を抑制】

- ① 整列乗車の仕方を工夫する。
- ② ホーム整理員を増員する。
- ③ ダイヤ上の駅停車時間を増やす。
- ④ ワイドドア車或多扉車を導入する。
- ⑤ ホーム上の流動を改善し乗降をスムーズにする。
- ⑥ 増発して1列車あたりの混雑率を下げ、乗降時間の短縮を図る。
- ⑦ 車両間の乗車率の偏りを改善し、特定の車両の乗降で駅停車時間が超過することを防ぐ。
- ⑧ その他

分母を大きくする
(二次遅延の抑制)

【主に列車間隔の
余裕を拡大】

- ① 信号設備を改修し、続行時隔を短縮する。
- ② ダイヤ上、運転間隔を拡大し、列車間隔の余裕を捻出する。
- ③ 列車種類の単一化や平行ダイヤ化を行う。(全列車、等間隔で運行)
- ④ ターミナル駅などでは、線路を増やして2面交互発着を行う。(JR中央快速線の新宿駅、中野駅の例)
- ⑤ その他

図4 BIを改善(小さく)する方法

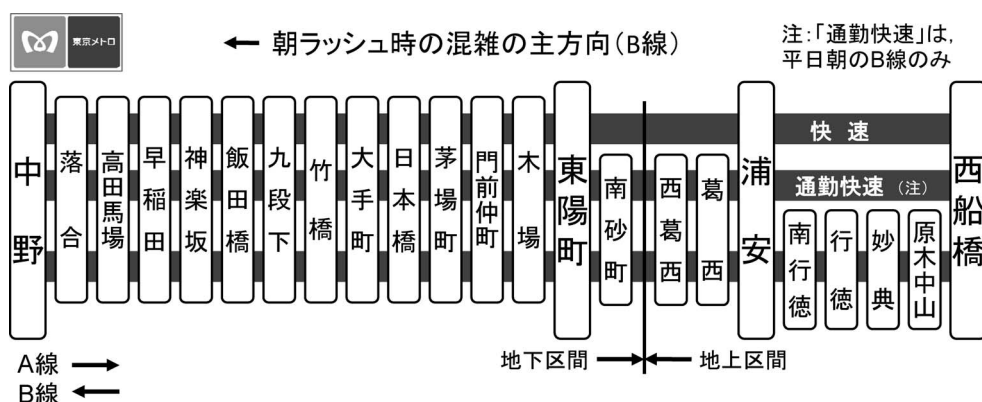


図5 東京メトロ東西線路線図

だが、混雑するB線方向(西船橋→中野)は、現行設備上の限界である1時間当たり27本(20m車×10両編成)の列車が設定されており、従来の手法により改善を行うのは容易ではない状況であった。

そこで、2006年9月に南北線で試験的に導入し、その有効性について一定の効果を確認していたBIを、東西線では本格的に導入してダイヤの再構築を行った。このような理論に基づくダイヤ設定は、弊社ではもちろんのこと、世界でも初の試みであると思われる。

5.2 BI改善のための施策

南北線では、都営三田線と合流する白金高輪駅の発着時刻をBIに基づき設定し、同駅構内で発生する二次遅延を抑制した。これにより、朝ラッシュ時間帯の最大遅延量を29%改善した。

ところが、南北線と比較して列車密度が高い東西線は、どこかで一次遅延が発生すると、二次遅延の発生に直結する状況であった。そこで図6に記した各種施策を実態に応じて組み合わせながら、ボトルネックとなる駅を中心にBIの改善を図った。

まず2008年3月に、ダイヤ上の修正のみで対応可能な施策を実施した。改正後の遅延量をBIに基づき評価した結果、遅延の質の改善に伴う遅延量の減少を確認できた。

これと並行して、社内では設備の改修や要員の手配といったハードおよびソフト両面からの対応を進め、これらの効果の期待値をBIに反映させたダイヤ改正を、翌2009年3月に実施した。

なお、本研究は千葉工業大学・富井規雄先生にご指

分母を小さくする
(1次遅延の抑制)

2008
2009

- ① ダイヤ上の駅停車時間を実態に合わせて見直し。
- ② 朝ラッシュ時間帯の「快速」は「通勤快速」へ種別変更。
- ③ ホーム整理員の増員(全駅で73名体制→150名体制)
- ④ 停止位置の変更によりホーム上の流動を改善(門前仲町駅)

分母を大きくする
(2次遅延の抑制)

2008
2009

- ① 遅延状況に応じ列車間隔を5~10秒拡大。
- ② 進路が交差がする箇所には、遅延量に応じた列車間隔の余裕を付加し、支障を回避。
- ③ 「通勤快速」への種別変更により、混雑が増す浦安以西の区間の平行ダイヤ化を実施。(全列車、等間隔で運行)
- ④ 信号設備を改修し、続行時隔を短縮。

※白抜きの数字は、その施策を実施した時期(西暦)

図6 東西線で実施したBI改善の施策

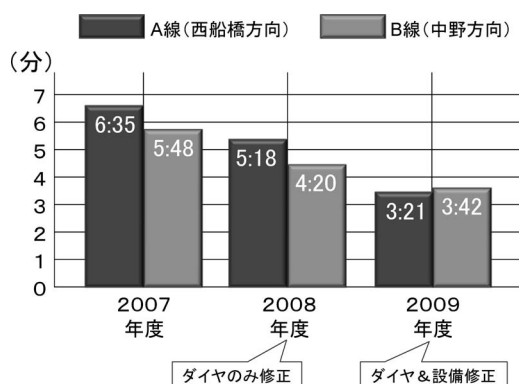


図7 東西線朝ラッシュ時間帯の最大遅延時間の推移

導・ご協力をいただき、現在は運行実績データからBIを簡単に算出することが可能だが、筆者が南北線や東西線ダイヤを担当した当時は自動算出ソフトがなかったため、すべて手計算でBIを算出しダイヤを修正した。

5.3 BI改善の効果と有効性

BI導入前の2007年度から現在までの最大遅延時間の推移を図7に示す。

BIを導入した2008年と2009年の二度にわたるダイヤ改正により、最大遅延時間は44%改善された。特にA線方向(中野→西船橋)の遅延は49%減と、ほぼ半減している。また、慢性的な遅延に関するお客様からのご意見の数は、実に1/10以下に激減した。

以上の結果は、

※BIに基づく遅延の質の評価・分析が有効であること。

※BIに基づくダイヤの構築理論が、高密度運転ダイヤの頑健性向上に有効であること。

を実証したと言える。

ちなみに、現在の東西線ダイヤは、指令員や乗務員

を中心に「(遅延に対して)粘り強さがある」という評価が寄せられている。これは、ダイヤの頑健性が向上したことを裏付けていると言える。

なお、頑健性の高いダイヤを設定すれば、それで遅延が解消するわけではない。実際にそのダイヤどおりに列車が運行されて、初めて改善したと言える。南北線および東西線いずれの場合においても、それは、輸送の現場に携わる社員のスキルとの相乗効果によって達成されたことは、言うまでもない。

6. 遅延の姿の可視化 (Chromatic Diagram)

東京メトロでは、BIの理論の検証と並行して、運行実績データに記録された遅延量を一目で把握できる可視化ツールの開発を行った。こちらも富井先生にご協力をいただきながら、試行錯誤の末に完成したのがクロマティックダイヤ図 (Chromatic Diagram) である。

これは、書式を普段見慣れているダイヤ図に合わせたことが特徴である。これをベースに列車の動きを表すスジの色を、定時運転に近い場合は青色系、遅延量が大きくなるほど赤色系になるよう段階的に表示している。また、BIを同様に表示することで、遅延の質を可視化することも可能である。

たとえば、前項で記した東西線の遅延量の推移を、2008年と2009年で比較したものが図8である。

3分以上の遅延量が連続的に発生している領域を示すと、2009年3月改正後は大幅に縮小していることがわかる。これは、図6で示した各種施策によるBIの改善が、「遅延の質の改善→二次遅延の抑制→ダイヤの頑健性向上→遅延改善」という結果に結びついたことを示している。

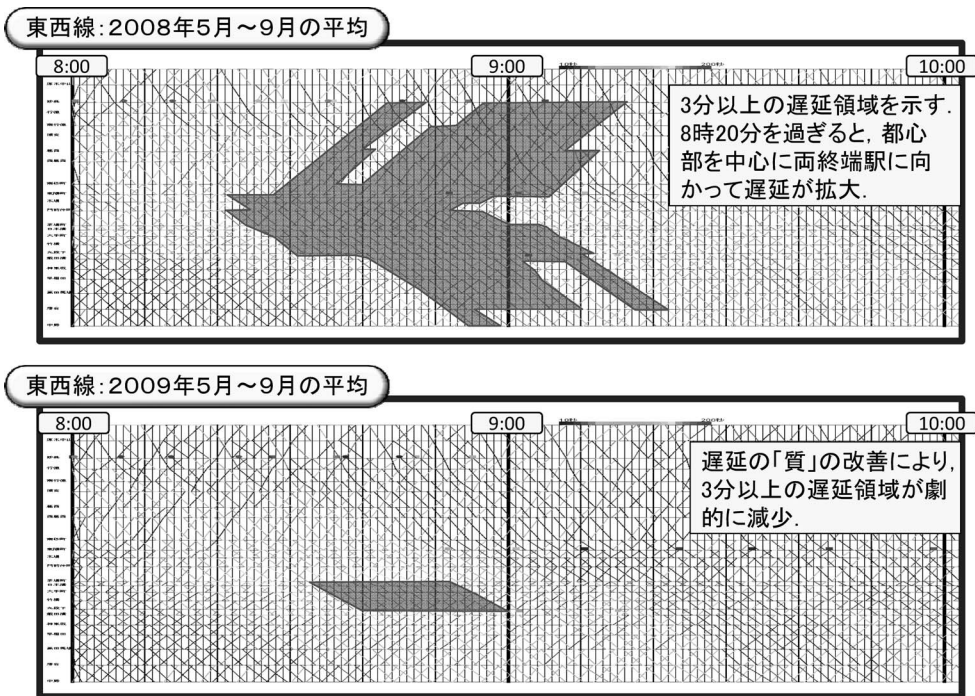


図8 クロマティックダイヤ図による「遅延量」の比較

現在、東京メトロでは、ダイヤ改正時の効果検証や輸送改善計画の策定に際して、クロマティックダイヤ図を活用している。これにより、路線ごとの「遅延の姿」を明確に示すことで、ダイヤ上の課題抽出および遅延に関する情報の共有化に威力を発揮している。

7. まとめ

本研究では、運行実績データから算出した Buffer Index により、列車遅延の質を明らかにした。また、これに基づきダイヤを修正し、最混雑路線である東西線の「遅延量」と「お客様からのご意見の数」を激減させるとともに、改善効果をクロマティックダイヤ図により、一目で確認することを可能にした。

これらの成果は、各種メディアで紹介されたのを始め、海外政府機関のレポートや国際会議の場でとり上げられるなど、大きな反響があった [2][3]。

今後の課題は、用途に応じて BI の算出方法を変化させ、より高い精度で遅延の評価・分析を行うことで

ある。また、BI を活用した遅延シミュレーションの有効性が期待されることから、富井先生にご指導をいただきながら研究を継続中である。

弊社においても、これらのツールを有効に活用しながら輸送品質の管理と向上に努めていくとともに、鉄道全体の安定輸送に寄与したいと考える。

なお、末筆ながら、今回の研究に多大なお力添えをいただいた富井先生には、この場をお借りして厚く御礼申し上げる。

参考文献

- [1] 富井規雄:「鉄道ダイヤのつくりかた」, オーム社, 2012.
- [2] R. Salkonen and T. Mäkelä: Rautatieliikenteen tasallisuuden mittaamisen ja seurannan kaytannot eri maissa Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksia, 42, 2010.
- [3] K. Ushida, S. Makino, and N. Tomii: Increasing robustness of dense timetables by visualization of train traffic record data and Monte Carlo simulation, Proc. of World Congress on Railway Research (WCRR), Lille, France, 2011.