

千葉工業大学  
博士学位論文

列車運行実績データの分析に基づく  
総合的な遅延対策に関する研究

2019年3月

山村明義

# 要 旨

鉄道を利用する旅客の定時運行へのニーズは極めて高く、列車遅延を解消することは鉄道事業者にとって重要な課題のひとつである。しかし、混雑率が高く、かつ2分～2分30秒間隔で運行する列車の遅延対策は容易ではない。また、信号設備やホームなどの設備改良を伴う遅延対策の意思決定は、大規模な投資と工期が長期間に渡るため高度な経営判断となることが多い。

東京地下鉄株式会社（以下、東京メトロという）では、旅客の定時運行ニーズに応えるべく、列車の運行状況を定量的に分析するため、全列車の全駅における到着時刻と発車時刻を記録した列車運行実績データを蓄積している。この列車運行実績データは、日々の運行状況を分析する上で多くの有益な情報が含まれており、膨大なデータから有益な情報を引き出し、対策に結び付けていくことが有意義であることは言うまでもない。本研究は、列車運行実績データの分析に基づく総合的な遅延対策について論じる。

第1章「序論」では、東京メトロ各路線の列車運行の現状や、1990年以前を振り返り220%を超える混雑率への対応として列車本数を増やし、列車間隔が短縮したことで遅延が増大しやすい状況となった経緯や、これまでに取り組んできた遅延対策など研究の背景を述べ、研究の目的を明らかにする。

第2章「これまでの遅延対策の取り組みとその効果」では、遅延発生と伝播のメカニズムについて述べ、遅延対策と対策実施に向けた課題を明らかにする。また、本研究の重要な位置づけである列車運行実績データの原理や、これまでに実施した遅延対策の効果について述べる。なお、これら遅延対策の効果については、第5章で記述する列車運行シミュレーションの条件として使用する。

列車の遅延は、計画時刻と実際の運行時刻の差異によって生じる。また、それらの時刻は、駅停車時間と駅間の運転時間という2つの要素で決定される。第3章「列車運

行実績データの可視化手法とその評価」では、これら2つの要素について、計画駅停車時間、計画運転時間との差異を視覚的に把握するための手法について述べる。ここでは、稲川、富井、牛田らが提案したクロマティックダイヤ図、遅延ダイヤ図、三次元ダイヤ図について、実務者の視点から比較評価を行なった結果を述べる。これらの手法により、ダイヤ作成担当者が、遅延の発生状況、伝播状況を直感的に把握し、その後の改善に資する知見を得ることができる。

第4章「列車運行実績データの分析に基づく遅延対策指標の提案とその評価」では、遅延の現状を定量的に評価するための指標を提案する。ここでは、駅停車時間増大量の指標であるED値と運転時間増大量の指標であるER値に基づいたED/ER分析及びER値が増加から減少に転じるER回復変化点に着目することで、定量的に対策箇所を選定できることを示し、これらの手法を東京メトロ半蔵門線の遅延対策に適用し評価した結果を述べる。

第5章「列車運行実績データの分析に基づく列車運行シミュレーションアルゴリズムの提案」では、連続する列車がそれぞれの駅を出発する時刻の差（本論では、出発時間差という）と運転時間の関係を示し（以下、運転時間特性という）、運転時間特性を用いた高精度な列車運行シミュレーションアルゴリズムを提案する。このシミュレーションを東京メトロ千代田線、半蔵門線に適用し、数秒の駅停車時間の変化が及ぼす遅延への影響を詳細に分析できることを示す。

第6章「駅間運転方法の変更による追い込み時間の短縮に基づく列車ダイヤの頑健性の向上」では、従来と異なった駅間の運転方法を採用することによって、列車間隔の余裕時間を生み出し、それによって頑健性を向上させることが可能であることを示し、その運転方法を見出すアルゴリズムを提案する。これによって、ある列車に遅延が発生したとしても、それが後続の列車に波及することが抑えられる。

第7章「結論」では、本研究で得られた成果、今後の課題について述べる。

遅延対策の推進には、「Plan-Do-Check-Act」のサイクル（以下、PDCA サイクルという）を廻していくことが重要である。特に、「Plan」を論理的に構築することは、対策の意思決定に寄与するだけでなく、Do 機能、Check 機能、Act 機能をより有益に働かせることができ、より効果的な対策の展開へとつなげることができる。本研究を「列車運行実績データの分析に基づく総合的な遅延対策に関する研究」とし、第3章～第5章で論じる遅延の可視化、遅延対策指標、列車運行シミュレーションは、いずれも「Plan」の論理性向上の役割を担い、PDCA サイクル全体に寄与するものであること、また、第6章で論じる頑健性を向上させる運転方法は、駅停車時間の短縮が困難である場合の最終的な改善手法「Act」となりうることを示す。これらを通して、列車運行実績データが総合的な遅延対策のPDCA サイクルを廻していくための基本となることを示す。

# Summary

Passengers of railways have a strong need for punctuality. Thus, it is one of the most important missions of railway undertakings to decrease delays of trains. However, it is not easy to decrease delays especially for railway lines where congested trains are running frequently.

Tokyo Metro Subway Co., Ltd. (hereafter, Tokyo Metro) has been accumulating historical train traffic records. The data contain arrival and departure times of all the trains at all the stations and could be useful to quantitatively analyze the situation of train operation in order to satisfy passengers' desire for punctuality. In this thesis, the author discusses how to establish effective delay reduction measures from a total point of view based on the analysis of historical train traffic records.

In Chapter 1, current situations of each line of Tokyo Metro are described. Since 1990, frequency of trains has been increased to reduce the congestion. As the result, there appeared a tendency that small delays began to occur very often because headways became shorter. In this chapter, delay reduction measures which have been performed in Tokyo Metro until now are explained and based on this, the background and the aim of this thesis are clarified.

In Chapter 2, a mechanism of delay occurrence and propagation are explained and issues to be settled to devise and realize more effective delay reduction measures are proposed. It is also explained how we can obtain historical train traffic records, which play a key role in this thesis. The findings in this chapter are used as preconditions of the train traffic simulation of Chapter 5.

In Chapter 3, approaches to visualize the difference between the planned and the actual times are discussed. Three kinds of visualization are introduced. Results of evaluation conducted by practitioners are also introduced.

In Chapter 4, indices to evaluate the current situations of delays are discussed. It is shown that analysis using ED, which is an index to evaluate the increase of dwell times and ER, which is an index to evaluate the increase of running times is helpful to quantitatively identify the point where delay reduction measures should be applied.

In Chapter 5, a new idea called "difference of departure times" is introduced. The difference of departure times means the time interval between the departure time of a train from a station and the departure time of the previous train

from the next station. It is shown that the running time of the train is very well estimated by using the difference of departure times. Using this idea, a simulation algorithm which is very simple but works very fast with a high accuracy is introduced.

In Chapter 6, a new approach to reducing the headway time by changing the driving pattern of trains between stations is introduced. An interactive system to produce a train performance curve which increases the buffer time between trains is introduced.

In Chapter 7, results obtained by this research together with problems left as future works are described.

In order to effectively promote delay reduction, it is by far the most important to follow the “Plan-Do-Check-Act” cycle. In particular, to logically construct the Plan phase is very important because this is helpful to let “Do, Check and Act” phases work more effectively. As the result, it becomes possible to extend more useful countermeasures for delay reduction. In this thesis, it is shown that the visualization of delays, indices for delay reduction measures and train traffic simulation which are described in Chapter 3, 4 and 5 respectively bear a role of enhancement of the logics in the Plan phase and contribute to the whole PDCA cycle. The approach to adopt a new driving patterns in order to reduce the headway introduced in Chapter 6 is regarded as an ultimate measure to reduce delays in the Act phase. By a combination of all these approaches, it was shown that analysis of historical train traffic records constitutes the basics of the PDCA cycle for the delay reduction from the total point of view.

# 目次

図目次	vi
表目次	ix
<b>第 1 章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 研究の背景	1
1.1.1 東京地下鉄株式会社線の列車運行の現状	2
1.1.2 輸送力増強と遅延増大の関係	3
1.1.3 情報化の急速な進展に伴う遅延認識の変化	4
1.1.4 これまでの遅延対策と遅延に対する認識	5
1.1.4.1 東京メトロ全路線の遅延状況	5
1.1.4.2 遅延対策の認識	6
1.1.5 列車運行実績データの必要性	7
1.1.6 行政の方針	7
1.1.7 遅延対策の取り組みと関連研究の動向	9
1.2 研究の目的	10
1.3 論文の概要	11
<b>第 2 章 これまでの遅延対策の取り組みとその効果</b>	<b>13</b>
2.1 はじめに	13
2.2 遅延発生 の 現状	13
2.3 遅延発生 と 伝播 の メカニズム	14
2.4 遅延対策 と 課題	15
2.5 列車運行実績データの整備	16
2.5.1 遅延実態調査の課題	16

2.5.2	列車運行実績データの原理	17
2.6	遅延対策の効果	20
2.6.1	乗降促進要員の配置とその効果	20
2.6.2	信号設備改良とその効果	20
2.6.3	ワイドドア車両の導入とその効果	23
2.7	遅延対策実績の活用	24
<b>第3章</b>	<b>列車運行実績データの可視化手法とその評価</b>	<b>25</b>
3.1	はじめに	25
3.2	第3章の関連研究と問題点	25
3.3	列車運行実績データの可視化	26
3.3.1	クロマティックダイヤ図	26
3.3.2	遅延ダイヤ図	27
3.3.3	三次元ダイヤ図	28
3.4	実務者からの評価	28
<b>第4章</b>	<b>列車運行実績データの分析に基づく遅延対策指標の提案と その評価</b>	<b>30</b>
4.1	はじめに	30
4.2	第4章の関連研究と問題点	31
4.3	列車運行実績データからの遅延伝播メカニズムの分析	32
4.4	遅延拡大モデルと遅延推定関数	33
4.5	遅延対策指標の提案	35
4.5.1	遅延対策指標の考え方と必要性	35
4.5.2	自己遅延の遅延対策指標 $ED_i$ : <i>Exceeding dwell time</i>	36
4.5.3	従属遅延の遅延対策指標 $ER_i$ : <i>Exceeding running time</i>	37
4.5.4	$ER$ 回復変化点	38



4.5.5 遅延対策指標に基づく対策箇所の決定方法（ED/ER 分析）の提案	38
4.6 遅延対策指標に基づく遅延対策とその評価	40
4.6.1 対象路線とその特徴	40
4.6.2 平成 25 年度 遅延対策実施前の半蔵門線の運行実績と遅延対策（対策ステップ 1 の決定）	40
4.6.3 平成 26 年度 遅延対策前の半蔵門線の運行実績と遅延対策（対策ステップ 2 の決定）	42
4.6.4 遅延対策の評価	44
4.6.5 提案手法の有効性	46
<b>第 5 章 列車運行実績データの分析に基づく列車運行シミュレーション</b>	
<b>アルゴリズムの提案</b>	<b>47</b>
5.1 はじめに	47
5.2 第 5 章の関連論文と問題点	47
5.3 列車運行実績の分析	50
5.4 前方駅での発車時間差に基づく列車運行シミュレーション方式	53
5.4.1 基本的な考え方	53
5.4.2 予想運転時間の推定	55
5.4.3 シミュレーションアルゴリズム	60
5.5 妥当性の検証	63
5.6 遅延対策の効果の推定の適用例	66
5.6.1 遅延対策効果の推定	66
5.6.2 乗降促進要員配置の効果推定の適用例	66
5.6.2.1 千代田線における乗降促進要員配置の検討	66
5.7 列車運行シミュレーションの汎用性と効果推定値の検証	71

5.7.1	汎用性の検証	
	半蔵門線の列車運行シミュレーション	71
5.7.2	効果推定値の検証	
	半蔵門線対策ステップ1の効果推定との比較	74
5.7.3	列車運行シミュレーションの有効活用の提案	75
<b>第6章 駅間運転方法の変更による追い込み時間の短縮に基づく列車</b>		
<b>ダイヤの頑健性の向上</b>		
6.1	はじめに	79
6.2	列車運行に関する制約と運転曲線	81
6.2.1	列車運行に関わる制約	81
6.2.2	列車ダイヤ作成時に考慮すべき制約	81
6.2.3	頑健性の向上	83
6.3	駅間運転方法の変更による追い込み時間の短縮	84
6.3.1	目的	84
6.3.2	考慮すべき条件	85
6.3.3	インタラクティブシステム	86
6.3.4	列車走行シミュレーション	87
6.3.5	使用手順の詳細	87
6.4	適用例とその評価	89
6.4.1	使用手順の詳細	89
6.4.2	想定以上の遅延に対する評価	91
6.5	信号設備改良への応用	93
6.5.1	信号機の移設	93
6.5.2	信号機移設の効果の検討例	94

<b>第 7 章 結論</b>	<b>.....97</b>
7.1 本研究により得られた成果	.....97
7.2 今後の課題	.....103
<b>謝辞</b>	<b>.....104</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....105</b>
<b>研究業績</b>	<b>.....109</b>

## 図目次

1.1	輸送力・輸送人員・混雑率の変遷	2
1.2	列車運行計画の構成要素	3
1.3	列車運行の状況	5
1.4	東西線 11 月平日の遅延状況（朝ラッシュ 1 時間の平均遅延量）	6
2.1	列車運行計画の構成要素	14
2.2	運行実績データの測定方法	18
2.3	乗降促進要員の効果	20
2.4	門前仲町～茅場町間の信号設備改良（40 コードを追加）	21
2.5	門前仲町～茅場町間の信号設備改良の効果	22
2.6	西葛西～南砂町間の信号設備改良の効果	22
2.7	ノーマルドア車とワイドドア車の比較	23
3.1	クロマティックダイヤ図	26
3.2	遅延ダイヤ図	27
3.3	三次元ダイヤ図	28
4.1	半蔵門線路線略図	32
4.2	半蔵門線運行実績データ（2017 年 6 月 平日）	33
4.3	運行実績データの分析結果（図 4.2 の分析）	33
4.4	遅延拡大モデル	34
4.5	ED/ER 分析概略図	39
4.6	対策前の遅延対策指標	40
4.7	対策ステップ 1 後の遅延対策指標	43

4.8	対策ステップ1の効果推定と対策前後の遅延状況	45
4.9	対策ステップ2の効果推定と対策前後の遅延状況	45
5.1	列車運行計画の構成要素	49
5.2	千代田線路線略図	50
5.3	運転時間の実績	51
5.4	列車間隔の実績	52
5.5	前列車の駅停車時間に対する後続列車の運転時間	53
5.6	駅停車時間増大に伴う運転時間の増大	54
5.7	千代田線各駅間の運転時間特性図	57
5.8	シミュレーションフロー	62
5.9	クロマティックダイヤ図 (2017.10.11)	64
5.10	赤坂到着時点の遅延状況	64
5.11	駅到着時刻の差異のヒストグラム	64
5.12	運転時間の差異のヒストグラム	64
5.13	シミュレーション結果 運転時間係数 $a=1.0$	65
5.14	駅停車時間を短縮した場合の効果 (2017.10.11)	68
5.15	赤坂到着時点の遅延状況 (2017.9.29)	69
5.16	駅到着時刻の差異のヒストグラム	69
5.17	運転時間の差異のヒストグラム	69
5.18	駅停車時間を短縮した場合の効果 (2017.9.29)	69
5.19	半蔵門線の運転時間特性	72
5.20	清澄白河到着時点の遅延状況	73
5.21	駅到着時刻の差異のヒストグラム	73

5.22 運転時間の差異のヒストグラム	73
5.23 半蔵門線遅延対策の効果推定（対策ステップ1）	74
5.24 運行実績の再現（2013.5.30）	76
5.25 永田町駅停車時間5秒短縮時	77
5.26 永田町駅停車時間7秒短縮時	78
6.1 運転曲線	82
6.2 追い込み時間の概念図	83
6.3 追い込み時間短縮の概念図	84
6.4 最小追い込み運転曲線の概念図	88
6.5 運転曲線の修正例	88
6.6 先行列車の駅停車時間延長に対する後続列車遅延への影響	92
6.7 低速運転の効果	93
6.8 信号機移設の概念図	94
6.9 上野駅の信号機設前後の追い込み時間の比較	95
6.10 三ノ輪～入谷駅間の信号機移設前後の運転曲線	95
6.11 入谷駅の信号機移設前後の追い込み時間の比較	96
7.1 遅延対策のPDCAサイクル	101
7.2 半蔵門線の朝ラッシュ3時間帯の遅延量 (2018.9.21 社員共有データ)	102
7.3 永田町駅の朝ラッシュ3時間帯の各列車の駅停車時間 (2018.9.21 社員共有データ)	102

# 表目次

1.1 東京メトロ線の朝ラッシュ時の運行状況	1
2.1 ワイドドア車両の効果	24
4.1 遅延対策の優先度	42
4.2 遅延対策前後の遅延対策指標の比較	44
5.1 運転時間特性抽出に用いた列車運行実績データ	58
5.2 千代田線各駅間の運転時間係数	60
5.3 半蔵門線各駅間の運転時間係数	71
6.1 変更運転曲線とその影響	90

# 第 1 章 序論

## 1.1 研究の背景

### 1.1.1 東京地下鉄株式会社線の列車運行の現状

2018 年 3 月末現在，東京地下鉄株式会社（以下，東京メトロ）の路線長は 195.1km，相互直通運転を行っている他社線の営業距離は 344.3km となり，相互直通運転の営業エリアは首都圏中心部から約 40km 圏まで拡大した。利用旅客は 1 日 742 万人，「東京を走らせる力」をグループ理念に掲げ日々の安定輸送を経営の基本としている<sup>1)</sup>。

東京メトロの前身である営団地下鉄は，戦後，高度経済成長や東京オリンピックなどを背景に，新線建設を積極的に進めてきた。地下鉄路線網が拡大し利便性が高まると，利用旅客は著しく増加し通勤時間帯の路線の平均混雑率が 220%を超えた時期もあったが，積極的な輸送力増強により混雑緩和に取り組んできた。

2018 年 3 月末時点の各路線の朝ラッシュ時の運転間隔と混雑率を表 1.1 に示す。路線ごとに差異はあるものの，最短の運転間隔は丸ノ内線の 1 分 50 秒，南北線，副都心線を除き 2 分～2 分 30 秒となっており，混雑率が 200%を超える路線はなくなっている。しかし東西線 199%，千代田線 178%，半蔵門線 173%とまだまだ高い混雑率となっている<sup>1)</sup>。

更なる輸送力増強を検討し，計画列車本数を増やしても，慢性的な遅延が更に増大し，朝ラッシュ時の実質的な

表1.1 東京メトロ線の朝ラッシュ時の運行状況

路線名	路線長	運転間隔	平均混雑率
銀座線	14.3km	2'00"	160%
丸ノ内線	27.4km	1'50"	165%
日比谷線	20.3km	2'15"	157%
東西線	30.8km	2'20"	199%
千代田線	24.0km	2'05"	178%
有楽町線	28.3km	2'30"	163%
半蔵門線	16.8km	2'20"	173%
南北線	21.3km	3'45"	156%
副都心線	11.9km	3'20"	151%

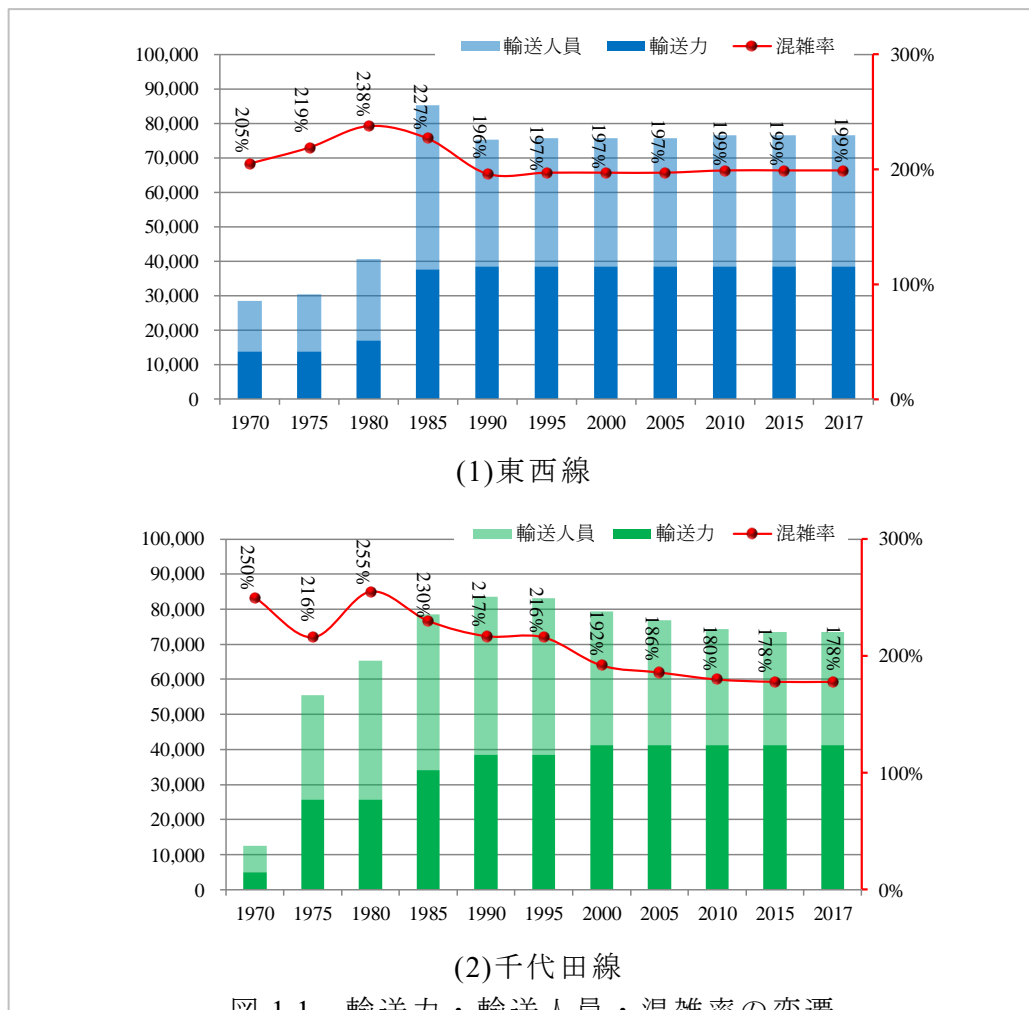
2018年3月末現在



運転本数は増えるどころか低下することも懸念される。

### 1.1.2 輸送力増強と遅延増大の関係

東京メトロの長年に渡る輸送力増強の取り組みを、図 1.1 に東西線と千代田線の輸送力増強と朝ラッシュ時の平均混雑率の変遷として示す。両路線共に1990年以前は混雑率が220%を超えていたが、輸送力増強により混雑は徐々に緩和されている。一方で、輸送力を増強し、列車運行本数が増えることで、近年大きな課題となっているのが慢性的な遅延である<sup>1)</sup>。



輸送力増強と遅延増大は相反する課題として密接に関係する。輸送力増強のために列車本数を増やすと、列車間隔が短縮し遅延は小さな輸送トラブルで増大するようになる。このことについて解説する。

列車の運行計画は図 1.2 のように構成される。列車間隔 (*Train interval*) は、駅停車時間 (*Dwell time*) と追い込み時間 (*Minimum headway*) と余裕時間 (*Buffer time*) で構成される<sup>2</sup>。追い込み時間と余裕時間の和を時隔 (*Headway*) といい、列車が出発してから次列車が到着するまで時間を示す。輸送力増強により 1 時間あたりの列車本数が増えると列車間隔は短縮する。ここで混雑率の高い東西線、千代田線、半蔵門線の現状を踏まえながら列車間隔が短縮した場合の各構成要素の影響をみる<sup>3</sup>。

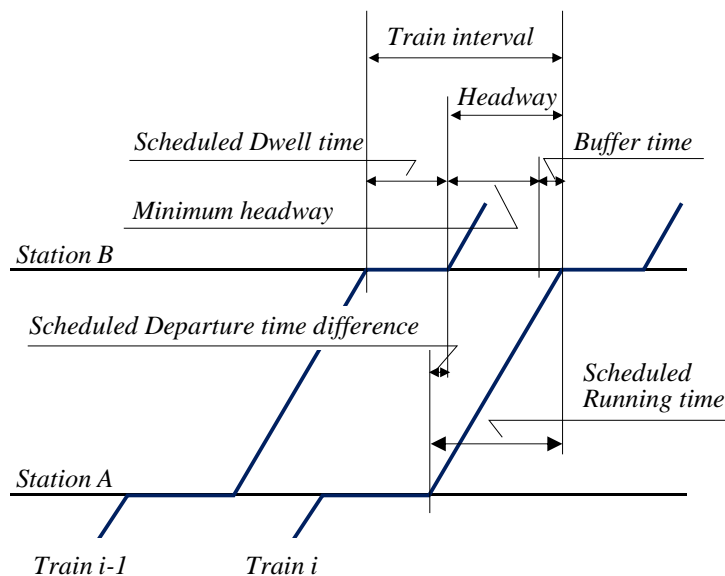


図 1.2 列車運行計画の構成要素

駅停車時間は旅客の乗降のために必要な時間であるが、混雑に応じた乗降時間の増大や駆け込み乗車等での車両扉の再開扉で増大する。現在の計画駅停車時間は殆どの駅が 30 秒~45 秒程度となっているが十分な時間設定とは言えず、慢性的に計画時間を超過している駅もある。この対応として、列車本数を増やした場合、輸送力が向上し旅客の乗降時間が短縮すると考えられる。よって、

一般的には輸送力増強によって列車間隔を短縮する場合、計画駅停車時間の短縮を検討するが、先の3路線は現状においても設定時間が不足しており難しい。

追い込み時間は、軌道条件、信号設備と車両の性能によって決定され、運行計画上一定の時間として定められる。実際の追い込み時間（遅延により列車間隔が短くなり余裕時間が無くなっている）ので、実際の追い込み時間（*Headway*）は、前列車が駅を出発してから次列車が到着するまでの時間をいう）は、前列車の駅停車時間が延びるために、次列車は駅間での一旦停止や減速で速度が低下し、増大している。列車間隔を短縮しても、追い込み時間についてはそもそも計画上短縮することができない要素である。

余裕時間はまさにダイヤ計画上の余裕であり、運転間隔を短縮する場合はまずこの時間の短縮を検討する。しかし、先の3路線については現状でも余裕時間はどの駅間でも0秒～5秒程度と十分なものではなく、本来の役割である駅停車時間や追い込み時間の増大を吸収できる機能を担っておらず、列車間隔短縮時間をこの要素で調整することは難しい。

これまで述べてきたとおり、輸送力増強のため運行本数を増やし列車間隔を短縮する場合、駅停車時間か、余裕時間を短縮する必要があるが、そもそも調整できる余地がなく、今後の輸送力増強は難しい状況である。これまでの輸送力増強の結果、現状の駅停車時間、余裕時間も充分ではない状況であるので遅延は発生しやすく、また増大しやすい状況となっている。

このように、輸送力増強と遅延増大には密接な関係がある。

### 1.1.3 情報化の急速な進展に伴う遅延認識の変化

近年、遅延に対する旅客の改善要望は大変強くなっている。その背景には、スマートホンやタブレットなどの普及により NaviTime、駅すばーなどの検索アプリが充実し、誰でも、どこでも経路選択、所用時間、運賃等の正確な情報を把握できるようになった事が挙げられる。例えば、1分単位の所用時間の差異を把握し経路選択することはもはや一般的となった。更に、東京メトロや

東日本旅客鉄道株式会社は、各列車の運行状況（在線位置、遅延量など）をスマートフォンアプリとして提供するなどのサービスを開始し、情報提供強化に努めている。

情報化の急速な進展は、この様にあらゆる生活場面において正確な情報を容易に取得できる環境を提供し、個々人の選択の幅を上げた一方で、列車遅延に着目すれば、選択した所要時間情報と異なる結果をもたらした場合、それに対するご意見は、大変に厳しいものとなっている。

鉄道事業者への遅延改善ニーズは高く、取り組みは不可欠である。

### 1.1.4 これまでの遅延対策と遅延に対する認識

#### 1.1.4.1 東京メトロ全路線の遅延状況

最近の東京メトロ全路線の遅延状況を見る。2017年第4四半期(1月～3月)の列車運行の現状を定時運行率として図 1.3 に示す。定時運行率とは朝ラッシュ 1 時間の全駅における全列車を対象とした到着遅延 2 分以下の割合を路線毎に示したものであり、昨年度と今年度を比較している。図 1.3 から以下がわかる。

- (1) 定時運行率 60%を超えているのは副都心線(61%)と南北線(63%)のみである。
- (2) 千代田線は 38%と最も低迷しており、かつ 2 年連続である。次いで低迷しているのは東西線 46%、半蔵門線 47%となっている。
- (3) 一昨年度と比較して日比谷線は-13%、東西線は-14%と両路線の悪化は著しい。

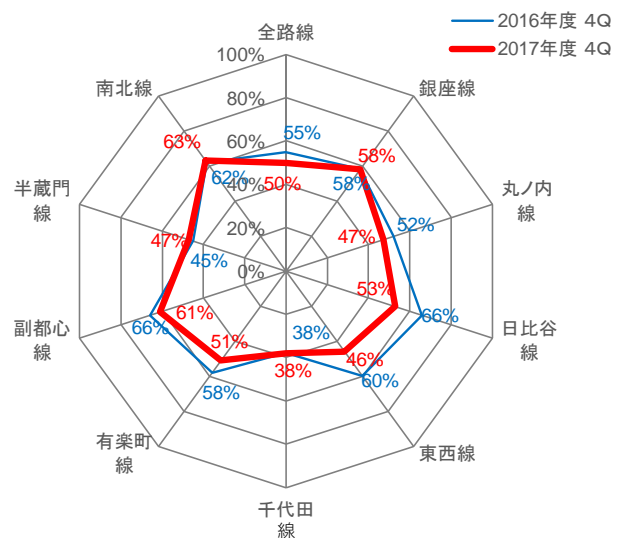


図 1.3 列車運行の状況

### 1.1.4.2 遅延対策の認識

最も混雑している東西線の遅延状況の変化を見る(図 1.4)。東西線では 2008 年(H20 年)当時,最も遅延が大きい路線として,積極的な遅延対策を展開した。内容は以下のとおりである。

- (1) 門前仲町駅の列車停止位置を変更(2008 年実施済み)
- (2) 西船橋～大手町駅間に乗降促進要員を配置(2010 年実施済み)
- (3) ワイドドア車両の導入(2010 年～順次導入)
- (4) 西葛西～南砂町駅間の信号設備の改良(2010 年実施済み)
- (5) 門前仲町～茅場町間の信号設備の改良(2010 年実施済み)
- (6) 門前仲町駅のホームを拡幅(2013 年実施済み)
- (7) 南砂町駅ホームの 2 面 3 線化(現在改良中)
- (8) 茅場町駅のホーム延伸(現在改良中)
- (9) 九段下～飯田橋駅間の折返し線の設置(現在改良中)

(1)～(5)の対策の結果,2010 年(H22 年)から 2012 年(H24 年)にかけて東西線の遅延は着実に縮小傾向にあった。しかし,2013 年(H25 年)に再び増加に転じている。これまでの取り組みとその結果を通して,以下のとおり認識している。<sup>4,5</sup>

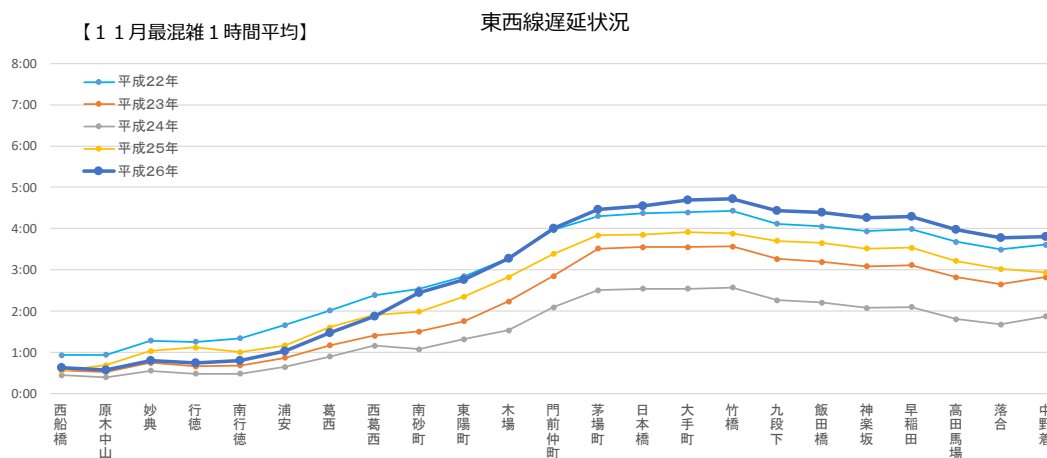


図 1.4 東西線 11 月平日の遅延状況 (朝ラッシュ 1 時間の平均遅延量)

- (1) 遅延対策の実施により一時的に遅延が縮小しても、営業線各駅の状況（大規模なビル・集客施設の建設など）の変化により更なる対策が必要となる場合がある。
- (2) よって遅延対策は、抜本的に設備機能を改善する対策と、駅停車時間が増大傾向にある場合や、駆け込み乗車が多発している場合には、駅ホームに乗降促進要員を配置するなど営業線各駅の状況の変化に合わせて実施する対策に分けて検討し、遅延状況をモニタリングしながら対策を再考しなければならない。

### 1.1.5 列車運行実績データの必要性

先に述べたとおり、対策を講じても再び悪化する遅延への対応には、遅延の状況をより正確に、詳細に把握するためのシステム的な仕組みを整備する必要がある。そのため東京メトロでは、2008年に全路線を対象に、全駅・全列車の駅到着時刻と発車時刻を記録するシステムを整備し、列車運行実績データの蓄積を開始した。それまでの遅延量調査は、人力調査であったため、調査サンプル数が限定的であったことや、特定駅での調査であったため傾向分析が充分ではないなどの問題があった。遅延状況を常にモニタリングしていくためには、列車運行実績データの整備は不可欠となっていた。

一方、列車運行実績データは非常に有益なデータであるが、全駅・全列車の着発データは、いわゆるビックデータの類である。より有効に活用していくためには、膨大なデータから重要なメッセージを抽出するための手法の研究が不可欠となった。

### 1.1.6 行政の方針

公共交通である鉄道は、行政の方針に基づく取り組みが求められている。平成28年4月20日交通政策審議会「東京圏における今後の都市鉄道のあり方について」において、列車遅延に対して、（5）信頼と安心の都市鉄道の中で

「遅延の見える化」と「鉄道事業者における取組の促進」について答申されており、遅延に関する適切な指標の設定や、遅延の見える化や、列車運行実績データを活用した分析を行うことで効果的な対策を講じていくべきと述べられている<sup>6</sup>。以下、交通審議会答申の抜粋を示す。

---

#### (5) 信頼と安心の都市鉄道<sup>7</sup>

信頼と安心の都市鉄道東京圏の都市鉄道においては短時間の遅延が慢性的に発生しているほか、長時間の遅延も広範囲に発生しており、発生回数も増加していることから、対策を行うことが重要である。平時はもとより異常気象時や輸送トラブル発生時においても、鉄道利用者からの信頼が厚くいつでも安心して利用できる「信頼と安心の都市鉄道」を実現する必要がある。安全運行が最優先であるという大前提を徹底しつつ、信頼性の向上を図るため、以下の取組が必要となっている。

##### (ア) 遅延の「見える化」

遅延対策について、鉄道事業者に対して更なる改善の取組を求めるとともに、鉄道利用者に対しても理解と協力を求めていくためには、まず遅延に関する適切な指標を設定し、遅延の現状と改善の状況を分かりやすく「見える化」することが特に重要である。

国において、遅延の発生状況について毎年公表し、経年で確認できるようにするとともに、鉄道事業者においても自らの運行実績データの詳細な分析や他の鉄道事業者との比較を行い、これらに基づいた効果的な遅延対策を行うべきである。

##### (イ) 鉄道事業者における取組の促進

日常的に短時間で発生する遅延（以下「日々の小規模な遅延」という。）は、混雑に起因するものが多く、遅延の発生源となる障害の解消のため、駅ホームの増設・拡幅、信号設備・運行管理システムの改良等のハード面の対策や、乗降・乗換えを円滑化するための駅係員による案内等ソフト面の対策

が有効であり、運行実績データ等の分析を踏まえ取組を促進すべきである。

(以下、省略)

---

### 1.1.7 遅延対策の取り組みと関連研究の動向

これまでの遅延調査は、列車の運行実績を系統的に取得できなかったため、特定の駅あるいは駅間において、特定の列車を対象にしていた。また、人的調査のため特定の日に行われ、旅客の乗降数などで容易に変化する遅延状況を把握するには十分とは言えない調査であった。よって、遅延対策の判断は、運行計画担当者らの経験に頼らざるを得ない状況であった。

一方、列車の運行ダイヤの頑健性を高める研究では、以下のような提案がなされている。

まず頑健性指標の定義に関して、Carey は、運行計画の信頼性を測る、あるいは、より信頼性の高い運行計画を生成するプロセスを支援するためヒューリスティックな推定手法を提案している<sup>8</sup>。また、Takeuchi らは、頑健な計画ダイヤが持つべき、定性的および定量的特性を調べる方法として、モンテカルロシミュレーションにより頑健性評価指数を計算する手法を提案し、これに基づいて列車運行計画の頑健性を評価している<sup>9</sup>。

頑健な運行計画を作成するアルゴリズムに関しては、Kroon らは、確率的な外乱に対して効果的な（頑健性の高い）計画ダイヤを作成するため、余裕時間の配分に関する確率的最適化モデルを提案している<sup>10</sup>。更にこのモデルを適用した計画ダイヤについて、実証実験を行い、所与の計画ダイヤに比較的小さな変更を適用することによって、列車の平均遅延を大幅に減少させることを示している。また、芳田らは、単線区間を含む国内の鉄道路線を対象とし、余裕時分の最適な配分によって 10 分以下の小さな 1 次遅延に対して頑健な列車計画を生成する手法を提案している<sup>11</sup>。列車の遅延に対する頑健性を扱うモデルの提案、実用性を意識した頑健性評価尺度の提案、さらに、



実路線である山陰本線，豊肥本線，関西本線の列車計画を対象に，頑健性尺度を最適化した列車計画の再構成を行い，既存の列車計画に比べて，各路線で完全遅延回復率（2次遅延を発生させずに終着駅までに完全に1次遅延を回復させる確率）が向上したことを示している。

運行実績データの活用に関しては，Labermeierらは，列車の到着時刻と出発時刻，信号現示変化とその時刻のデータ分析により，1次遅延と2次遅延を区別し定量化している<sup>12</sup>。1次遅延とは技術的または人為的原因による遅れ，2次遅延とは他の（遅れた）列車によって生じた遅延として，駅停車時の遅延が2次遅延（他列車との接続待ちによる遅延）の影響が大きいことや，1次遅延と2次遅延を分離する手法を示している。

しかし，稠密に列車を運行している路線を対象として遅延対策を実施すべき箇所を定量的評価にもとづいて選定する手法や，対策効果を高精度に推定する手法は報告されていない。

## 1.2 研究の目的

鉄道事業者に求められていることは，混雑緩和に取り組みつつも，同時に，遅延が容易に拡大しないよう遅延に対する頑健性を高める施策を講じていくことである。頑健性を高めるためには，遅延拡大現象への理解を深め，どこの駅あるいは駅間においてどのような対策を講じるべきかを選定する分析手法を確立する必要がある。これらの基礎データとなるのが列車運行実績データである。今後，首都圏の鉄道事業者において，列車運行実績データを用いたシステムの整備・活用が促進されるものと推測される。

本研究では，この列車運行実績データを活用することで，これまでとは異なる手法で，遅延現象を把握し，対策すべき駅あるいは駅間を選定し，対策を実施した場合の効果を推定する遅延対策の一連のプロセスをシステムとして論理的に構築することを目的とする。これにより列車運行実績データの蓄積から得られる具体的な知見，活用方法を示すことでそのシステム整備が促進される

こと、また本研究の成果が広く活用され、あるいは更なる研究が促進されることで、鉄道事業者において遅延対策がより活発に推進されることを目指す。

### 1.3 論文の概要

本論文は、「列車運行実績データの分析に基づく総合的な遅延対策に関する研究」と題し全 7 章から構成している。

第 1 章「序論」では、東京メトロ各路線の列車運行の現状や、1990 年以前を振り返り 220% を超える混雑率への対応として列車本数を増やし、列車間隔が短縮したことで遅延が増大しやすい状況となった経緯や、これまでに取り組んできた遅延対策など研究の背景を述べ、研究の目的を明らかにする。

第 2 章「これまでの遅延対策の取り組みとその効果」では、遅延発生と伝播のメカニズムについて述べ、遅延対策と対策実施に向けた課題を明らかにする。また、本研究の重要な位置づけである列車運行実績データの原理や、これまでに実施した遅延対策の効果について述べる<sup>3</sup>。なお、これら遅延対策の効果については、第 5 章で記述する列車運行シミュレーションの条件として使用する。

列車の遅延は、計画時刻と実際の運行時刻の差異によって生じる。また、それらの時刻は、駅での停車時間と駅間の運転時間という 2 つの要素で決定される。第 3 章「列車運行実績データの可視化手法とその評価」では、これら 2 つの要素について、計画駅停車時間、計画運転時間との差異を視覚的に把握するための手法について述べる。ここでは、稲川、富井、牛田らが提案したクロマティックダイヤ図、遅延ダイヤ図、三次元ダイヤ図について、実務者の視点から比較評価を行なった結果を述べる。これらの可視化手法の活用を高めることで、ダイヤ作成担当者らは遅延の発生状況、伝播状況を把握し、その後の改善に資する知見を得ることができる。

第4章「列車運行実績データの分析に基づく遅延対策指標の提案とその評価」では、遅延の現状を定量的に評価するための指標について述べる。ここでは、駅停車時間増大量の指標であるED値と運転時間増大量の指標であるER値に基づいたED/ER分析及びER値が増加から減少に転じるER回復変化点に着目する手法を提案する。これにより、ダイヤ作成担当者は、遅延対策を実施すべき箇所を定量的に選定することが可能になる。さらに、これらの手法を東京メトロ半蔵門線の遅延対策に適用し評価した結果を述べる。

第5章「列車運行実績データの分析に基づく列車運行シミュレーションアルゴリズムの提案」では、連続する列車がそれぞれの駅を出発する時刻の差（以下、出発時間差という）と運転時間の関係を示し（以下、運転時間特性という）、運転時間特性を用いた高精度な列車運行シミュレーションアルゴリズムを提案する。これにより、遅延対策を実施した場合の効果を定量的に推定することが可能になる。さらに、このシミュレーションを東京メトロ千代田線、半蔵門線に適用し、数秒の駅停車時間の短縮が及ぼす遅延対策としての効果を詳細に分析できることを示す。

第6章「駅間運転方法の変更による追い込み時間の短縮に基づく列車ダイヤの頑健性の向上<sup>13)</sup>」では、従来と異なった駅間の運転方法を採用することによって、列車間隔の余裕時間を生み出し、それによって頑健性を向上させることが可能であることを示し、その運転方法を見出すアルゴリズムを提案する。これによって、ある列車に遅延が発生したとしても、それが後続の列車に波及することが抑えられる。

第7章「結論」では、本研究で得られた成果、今後の課題について述べる。

## 第2章

# これまでの遅延対策の取り組みとその効果

### 2.1 はじめに

本章では、まず、本論文の基礎となる内容について述べる。首都圏の稠密路線において、列車の運行計画がどのように策定されているか述べた上で、遅延の発生と伝播のメカニズムやこれまで実施してきた遅延対策と課題について述べる。

次に、本論文の第3章以下は、列車運行実績データの分析に着目した内容となっている。よって、本章において列車運行実績データの原理について述べ、最後にこれまで実施してきた主な遅延対策とその効果をまとめる。遅延対策効果の定量的な把握は、遅延対策の効果推定を行う際の列車運行シミュレーションの条件としての活用を目的としたものである。

### 2.2 遅延発生の現状

日本の鉄道輸送は、緻密な運行計画により世界でも類をみない定時性の高い運行が実現されていると言われている。一方、首都圏の朝ラッシュ時間帯に着目すると、列車の平均混雑率が180%を超える線区が依然として多く、駅ホーム上も多くの旅客で混雑している。そのため、混雑による乗降時間の増加、駆け込み乗車やそれに伴うドア挟み、車内急病人救護など小規模なトラブルが頻発し、その結果、駅停車時間が延びて列車が遅延するという現象が慢性的に発生している。また首都圏では、相互直通運転が行なわれている路線が多く、これにより遅延は広範囲に拡大する傾向にある<sup>14</sup>。

実際、首都圏ではこれらの小規模なトラブルによる遅延がかなり多く発生しており、5分以上の遅延が発生した場合に発行する「遅延証明書」の発行率も高い。またこれら小規模なトラブルによる旅客の乗降時間増大に関しては、特に乗降人数の多い都心部において深刻化する状況にある<sup>6</sup>。

### 2.3 遅延発生と伝播のメカニズム

図 2.1 において、列車 1 の B 駅の発車が乗降時間の延長によって遅延した場合、その遅延量が余裕時間以下であれば、後続の列車 2 は、B 駅に定時に到着することが可能である<sup>2</sup>（以下では、所定駅停車時間に余裕時間を加えた値を許容駅停車時間という）。しかし、列車 1 の駅停車時間が許容駅停車時間を超えると、後続の列車 2 は、減速もしくは駅間で停止することとなり、運転時間が増大して B 駅への到着が遅れる。遅延が発生する基本パターンのひとつである。

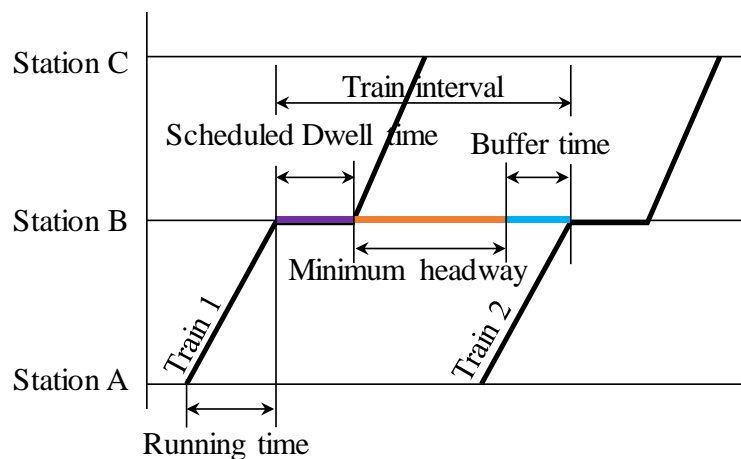


図 2.1 列車運行計画の構成要素

余裕時間は、遅延を発生させないための重要な要素であるが、稠密路線では、混雑緩和の観点から必要な列車本数と必要な駅停車時間を確保しようとすると、十分な余裕時間を設けることは難しい。そのため、遅延が発生しやすい状況にあり、一旦遅延が発生すると後続列車に伝播し、短時間に拡大する。更に、遅延した列車は、先行列車との間隔が開くため、次駅以降で、より多くの旅客が乗車することになり、駅停車時間が延長して遅延が増大する悪循環にも陥る<sup>15</sup>。

## 2.4 遅延対策と課題<sup>16</sup>

遅延に対する改善案のいくつかを紹介すると、一点目は計画ダイヤ（ダイヤ改正時に作成されるダイヤ）における対策が挙げられる。快速列車の停車駅の追加（普通列車しか止まらない駅では列車あたりの乗降人数が多くなるため、快速列車を停車させることによって乗降人数を平準化する）、途中駅折返し列車の削減による折返し駅での駅停車時間の増大や混雑率の不均衡の防止、運転間隔の見直し、駅停車時間の見直しなどいくつかの項目が含まれている。

二点目として、信号設備の改良がある。信号設備の機能を向上し、図 2.1 の追い込み時間を短縮することによって、列車間隔を変更せずに余裕時間の拡大を図ることができ、遅延拡大の抑止に効果を発揮する。

三点目は駅ホーム上の取扱いの改善である。乗降に時間がかかる場合や、混雑によって戸挟みが頻繁に発生する状況には、閉扉を補助する要員を配置して駅停車時間の短縮を図る。また、列車の扉の再開閉の発生を防止する効果も期待できる。今後、多くの駅にホームドアが導入される計画となっているが、ホームドアの導入により駅停車時間は延びることが分かっており、乗務員と駅係員の連携の見直しなど更なる取扱いの改善が必要となる。さらに、ホーム上の混雑は円滑な乗降を妨げるため、列車の停止位置の変更などの対策によってホーム上の旅客流動を改善することによっても、駅停車時間の増大を抑制できる可能性がある。

四点目に駅ホームの改良がある。旅客流動によって乗降が阻害されている場合、階段やエスカレータの新設、ホームの拡張、改札機の増設などによって流動の改善を図り、結果として駅停車時間の増大を抑制できる可能性がある。また、列車が交互発着できるよう駅ホームを増設し、合わせて線路形状を変更して新たなルートを設置することで駅間停止を抜本的に改善することができる。

五点目にワイドドア車両の導入である。旅客の乗降がより円滑になり駅停

車時間の増大を抑制できる可能性がある。

六点目に指令員による運転間隔調整<sup>17,18</sup>である。指令員は、運行管理モニタ等により列車の運転間隔のバラツキや、他の列車と比較して遅延が大きく増大している列車を認識できるため、駅停車中の先行列車の乗務員に出発時刻の調整を指示することで可能となる。列車あたり30秒～120秒程度の調整をきめこまかく行なっている。

これら遅延対策を実施するには、多くが大規模な投資と長期に渡る改良工事が必要となること、更に用地が必要となる場合もあり、投資判断は困難を極める。一方、乗降促進要員の配置は、投資は掛らないが、根本的な改善が図れるわけではないので、終わりのない経費を見込まなければならない。

これらの対策のうち、異なる駅で実施してもおよそ同じ効果が期待できる乗降促進要員の配置、信号設備改良、ワイドドア車両の導入については、これまでの実績としてその効果を後述する。

## 2.5 列車運行実績データの整備

### 2.5.1 遅延実態調査の課題

これまでの遅延分析は、乗換駅や終端駅など特定駅において、各列車の到着時刻と出発時刻を測定する方法や、特定列車において各駅の到着時刻と出発時刻を測定する方法で行なってきた。現在でも殆どの鉄道事業者は、この方法を用いている。しかし、これらは限定した値しか測定していないこと、および人手による測定であることから、以下の3点について充分とは言えなかった。

- (1) 分析項目の課題 特定駅での測定では、当該駅の列車毎の遅延量は分析できるが、各駅及び各駅間での遅延の変化量や、列車相互の影響の分析は難しい。特定列車での測定では、当該列車の各駅及び各駅間での遅延の変化量は分析できるが、各駅の遅延の変化量などの分析は難しい。
- (2) サンプル数の課題 測定者による測定のため、サンプル数（日数、駅

数、列車本数)が限定される。また、第1章で述べたように、遅延対策を講じて一旦は効果が見られても、沿線環境の変化で再び遅延が増大するような場合もあり、遅延状況は常にモニタリングする必要があるが難しい。

- (3) データ精度の課題 遅延の起点となる現象は、駅停車時間の10~20秒程度の増大であり、その影響分析は秒単位の精度と信頼性が求められるが、測定者による場合は、精度と信頼性において問題がある。

東京メトロではこれらの課題を解消するため、運行管理システムから、日々の列車運行実績データを取得するシステムを整備した。このシステムによって記録されるデータは、日々の全ての列車の全ての駅での到着時刻と出発時刻の秒単位の実績値を含む。列車運行実績データと運行計画データから個々の列車の遅延量を算出し、遅延発生の起点となる現象や、遅延が拡大する現象が分析できるようになり、上記(1)~(3)の課題は解消された。

## 2.5.2 列車運行実績データの原理

列車運行実績データは、運行管理システムから取得される。その原理を以下に説明する。本来、鉄道においては、到着時刻は「列車が停止した時刻」、出発時刻は「列車が動き始めた時刻」として定義されている。しかし、運行管理システムは列車の速度をリアルタイムで把握しているわけではないため、速度の変化から到着時刻、発車時刻を得ることはできない。そこで、駅付近の軌道回路の情報を用いて到着時刻・発車時刻を算出する。ここで、軌道回路とは、列車の存在を検知するために鉄道において広く用いられている仕組みである。線路をある距離（その長さは状況によって異なるが、おおむね数百メートル。ただし、駅の近傍ではもっと短い）の区間に区切り、レールに電流を流すことによって、それぞれの区間をある種の電気回路とする。そして、その区間に列車が存在する時には、列車の車軸によってその回路が短絡される。これを検知することによって、その区間に対する信号を「停止」として、他の列車の進入を防止し、追突等の重大な事故を防ぐ。列車



が、ある区間に進入した時刻（「落下時刻」という）、およびその区間から退出した時刻（「こう上時刻」という）は、運行管理システムで把握することができる。そこで、駅付近の軌道回路の落下時刻とこう上時刻から、列車の到着時刻と発車時刻を求める。

図 2.2 に典型的なケースを示す。図 2.2 において、網掛けの長方形は駅のホームを表す。S<sub>1</sub>がこの駅の軌道回路（ホームトラック）の始端、S<sub>3</sub>が終端である。S<sub>2</sub>は、列車の停止位置である。A は、列車がホームトラックに進入した状態、B は、列車が停止している状態、C は、列車全体がホームトラックから退出した状態を表す。

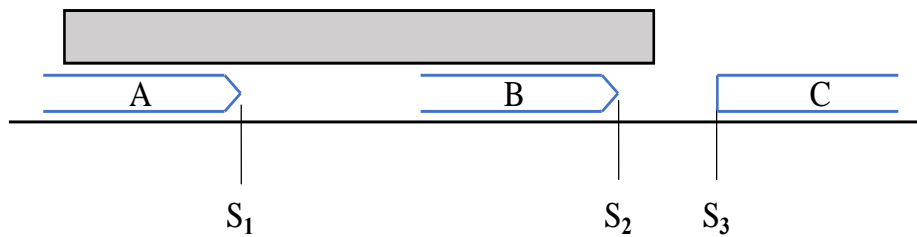


図 2.2 運行実績データの測定方法

状態 A の開始時刻（列車の落下時刻）は、運行管理システムで把握できる。状態 A の開始時刻から状態 B の開始時刻までの所要時間  $t_1$  がわかれば、状態 A の開始時刻に  $t_1$  を加えることによって、到着時刻を得ることができる。

$$\text{列車の到着時刻} = \text{状態 A の落下時刻} + t_1 \quad \dots\dots\dots(2-1)$$

同様に、状態 B の開始時刻から状態 C の開始時刻（列車のこう上時刻）までの所要時間  $t_2$  がわかれば、状態 C の開始時刻から  $t_2$  を減じることによって、発車時刻を得ることができる。ここで、 $t_1$ 、 $t_2$  は、駅ごとに計算や実測によってあらかじめ算出した値を運行管理システムに保持させておく。そし

て、運行管理システムは、これらの値を用いて到着時刻、発車時刻を算出する。

$$\text{列車の発車時刻} = \text{状態 C のこう上時刻} - t_2 \quad \cdots \cdots \cdots (2-2)$$

なお、運転士の運転方法に差異があれば  $t_1$ ,  $t_2$  を一定値とする方式では誤差が生じることになるが、予備的な調査によれば、運行実績データと停車時刻・発車時刻の実測値との差異は±2 秒程度におさまっており、この方法によって算出された運行実績データは以下の分析に十分な精度を有していると判断している。

列車の運行実績を把握するためのデータとしては、本章でいう列車運行実績データ以外にも、いくつかの候補がありうる。その一つは、GPS<sup>14</sup>である。例えば、運転士を支援するシステムを構築する上で、列車の走行位置を把握するために GPS を用いているものがある。しかし、現時点では、GPS を車上に搭載したシステムが広く普及しているわけではない。もう一つの候補として、運行状況記録装置がある。これは、福知山線列車脱線事故を契機として、おもに事故の原因調査に資するデータを取得することを目的として列車に設置が義務付けられることとなった装置である<sup>19</sup>。列車の位置や操縦記録などが時々刻々と記録され（会社によって仕様の細部は異なる）、事故の分析だけでなく、列車の運行状況を分析する上で有用な情報を含んでいると考えられる。ただし、主たる目的が事故原因の解析であることから、現時点ではデータは車上に蓄積されるのみで、取得するためには、その都度車両基地に赴いて、それぞれの列車のデータを抽出しなければならないなど、日々のデータを包括的に取得しようとする現実的ではない労力を要するものとなっている。

このような事情から、本研究では、東京メトロの全路線で取得可能となっている運行実績データを使用することとしたものである。

## 2.6 遅延対策の効果

### 2.6.1 乗降促進要員の配置とその効果

東京メトロ線で最も混雑率の高い東西線における遅延対策として、2008年から西船橋～大手町駅の計15駅に、それまで166名配置していた乗降促進要員を244名(+78名)に増員し、1駅平均16名の配置とした。この時の駅停車時間の短縮効果を図2.3に示す。

図2.3は配置した区間の中で特に混雑の激しい葛西～日本橋間の8駅について、輸送トラブルがなかった平日を対象に「2008年9月(配置前)の朝ラッシュ1時間の駅停車時間の平均」と「2009年9月(配置後)の朝ラッシュ1時間の駅停車時間の平均」を比較したものである。調査対象8駅における短縮効果は最大-5秒、平均-3.1秒であった。なお、南砂町駅では効果が見られないが(+1秒)、比較した期間で乗降旅客数が約10%増加しており、その影響と考えられる。

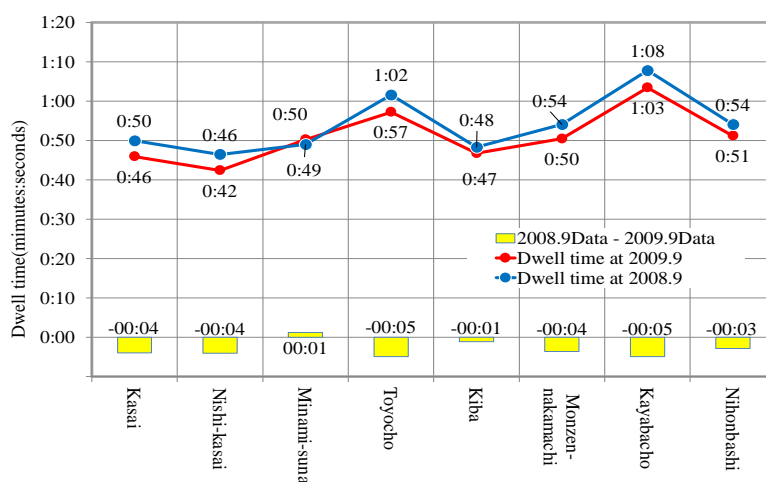


図 2.3 乗降促進要員の効果

### 2.6.2 信号設備改良とその効果

遅延対策としての信号設備改良には主に2つあり、駅直前の位置で閉そくを細かくすることで追い込み時間を短縮する方法(一般的に高コストで効果

大)と、駅間で中間コードを追加する方法(一般的に低コストで効果小)がある。閉そくを細かくする改良については、これまでに改良可能な箇所はほぼ実施しており、現在は中間コードの追加が主な改良となっている。

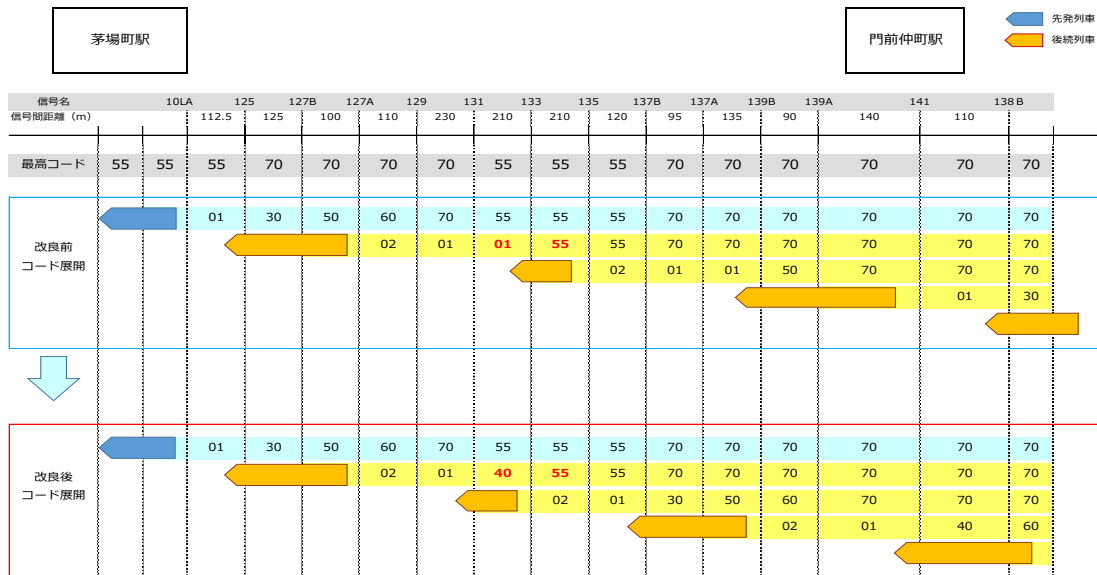


図 2.4 門前仲町～茅場町間の信号設備改良 (40 コードを追加)

門前仲町～茅場町間の中間コードを追加した改良事例を図 2.4 に示す。図中の「02」とは信号コードが流れていない絶対停止区間、「01」とは停止信号、その他の数字、例えば「55」とは制限速度 55km/h を示している。改良後(下段)は「01」が「40」となっており、この改良により 2 番目の後続列車は約 210m 茅場町に接近できる(一閉そく接近可能)。実際は、その一閉そく移動可能となった間に、茅場町に停止している列車(青)が発車することで、一旦停止しなくなる。その結果、図 2.5 に示している通り、これまでは平均運転時間 190 秒、偏差 25.9 であったが、対策により平均運転時間は 183 秒となり 7 秒短縮、偏差は 19.6 となり安定度は 24.3%改善した。

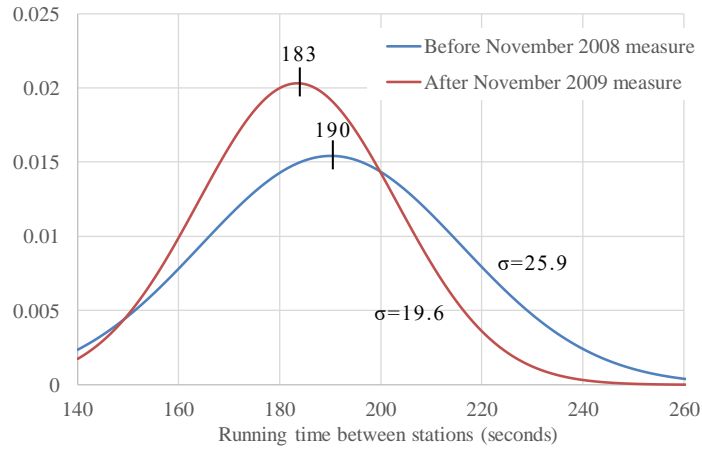


図 2.5 門前仲町～茅場町間の信号設備改良の効果

同じ時期に西葛西～南砂町間でも同様の信号設備改良を実施した。図 2.6 に示すが、この区間では平均運転時間は 16 秒短縮、運転時間の安定度は 38.9%改善した。

信号設備改良の効果は、駅間距離や既存閉そくの条件で効果の違いはあるが、運転時間で約 5 秒短縮、安定度で約 20%程度の向上の改善を見込むことができる。

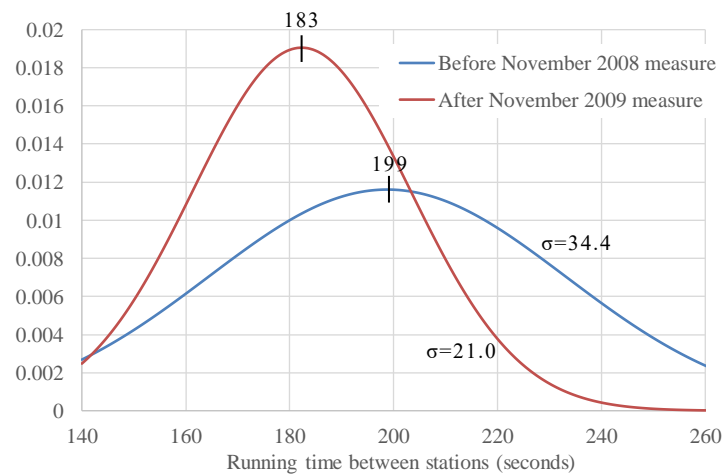


図 2.6 西葛西～南砂町間の信号設備改良の効果

### 2.6.3 ワイドドア車両の導入とその効果

東西線において旅客の乗降時間を短縮するため、車両ドアの開口幅を1300mm から 1800mm に拡大したワイドドア車両（図 2.7）を導入した。車両ドア開口幅の拡大は、約一人分に相当する。

東西線の朝ラッシュ時間帯に混雑率が高まる区間である葛西～日本橋間 8 駅（表 2.1 中に赤枠で示す。なお、最混雑区間は木場～門前仲町駅間である）を抽出すると、最大 -8 秒、平均-4.1 秒であった（表 2.1）。全測定駅の平均は-2.4 秒となっており混雑率が高い区間において駅停車時間の短縮効果が顕著に表れている。

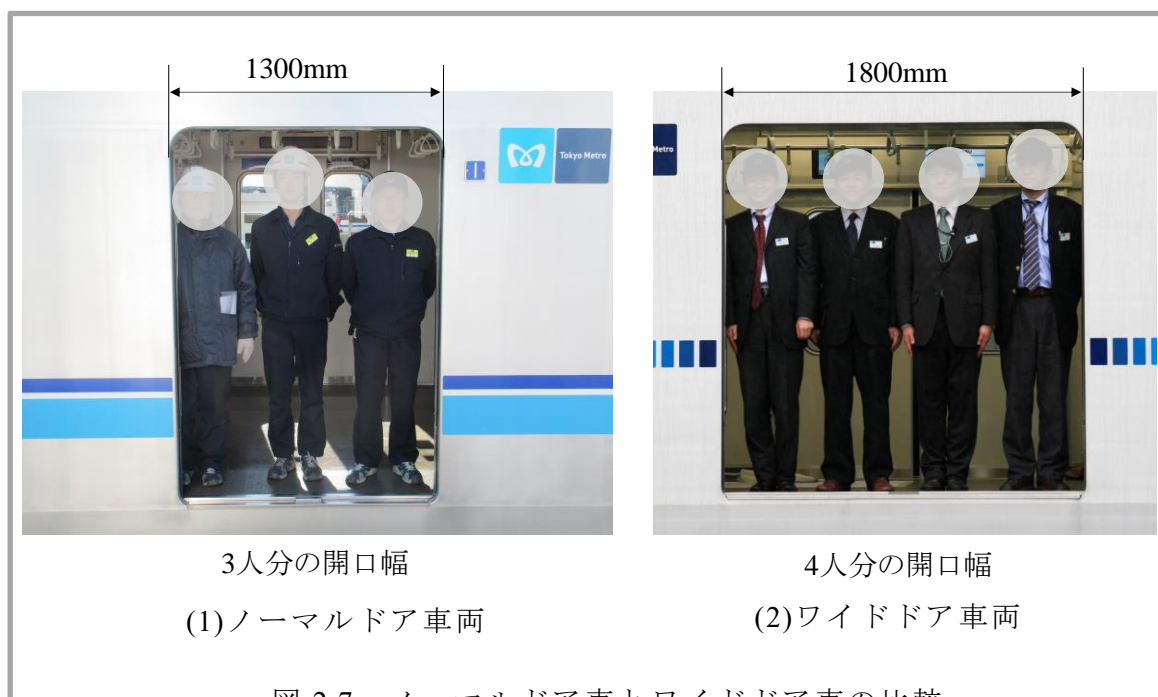


図 2.7 ノーマルドア車とワイドドア車の比較

表 2.1 ワイドドア車両の効果

駅名	所定停車時間	ノーマル車	ワイド車	短縮時秒
原木中山	25	33	32	-1
妙典	30	34	35	1
行徳	30	36	35	-1
南行徳	35	36	34	-2
浦安	35	48	49	1
葛西	35	51	47	-4
西葛西	40	51	43	-8
南砂町	50	54	54	0
東陽町	50	62	57	-5
木場	45	52	48	-4
門前仲町	45	54	49	-5
茅場町	60	69	62	-7
日本橋	50	53	51	-2
大手町	45	49	49	0
竹橋	30	30	30	0
九段下	40	31	29	-2
平均				-2.4

8 駅の短縮効果  
平均 -4.1 秒

## 2.7 遅延対策実績の活用

どこの駅あるいは駅間で遅延対策を実施すべきかの検討にあたって、第4章でED/ER分析、第5章で列車運行シミュレーションアルゴリズムを提案し、対策効果を推定することについて述べる。本章で述べた個々の対策効果は、駅停車時間あるいは運転時間の短縮であるが、最終的な判断基準は遅延がどの程度縮小するかである。これらの対策効果を列車運行シミュレーションアルゴリズム（第5章）に組み込むことで、遅延量の縮小効果を高精度に推定可能となる。

## 第3章 列車運行実績データの可視化手法とその評価

### 3.1 はじめに

朝ラッシュ時に頻繁に発生する小規模な遅延の問題に対して<sup>20</sup>、このような遅延を防止するための様々な方策をとっている<sup>3</sup>。しかし、どのような方策をどこに適用すべきかを決定するためには、ある程度の期間について遅延の発生状況や伝播状況を把握することが必要である。また、駅停車時間や走行時間の増加など、遅延発生の要因となる事象を把握することも望まれる。第2章において、遅延の発生と伝播のメカニズムや列車運行実績データを取得し記録することが可能になったことを述べた。しかし、列車運行実績データはデータ量が膨大であること、かつ、単なる数字の羅列であることから、実務者が有益な知見を得るためには、それらデータの可視化が必要となった。

本章では運行実績データの可視化手法として、稲川、富井、牛田らが提案したクロマティックダイヤ図、遅延ダイヤ図、三次元ダイヤ図について、実務者の視点から比較評価を行なった結果を述べる。

### 3.2 第3章の関連研究と問題点

公共交通機関の運行関連データの可視化に関する研究としては主に以下3つが報告されている。Palomoらは、地下鉄を対象に、ダイヤ図状の図形の上に利用者へのサービス状況を可視化する手法を提案している<sup>21</sup>。Maiらは、ダイヤ図状の図形にAPC-Automatic Passenger Counting systemのデータを合せて表示する方法を提案している<sup>22</sup>。Byonらは、バスのプローブデータをモザイク状の図形で可視化する手法を提案している<sup>23</sup>。しかし、いずれにおいても、遅延の発生状況や伝播状況、遅延発生要因の把握については言及されて



いない。

### 3.3 列車運行実績データの可視化

#### 3.3.1 クロマティックダイヤ図<sup>24</sup>

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、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できない。

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、列車の遅延によって、スジの色を変える。具体的には、ある時刻の単位(例えば5秒)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。これにより、列車がどこから遅延しはじめているのか、どのように遅延が伝播しているのかどこから遅延が回復しているのかを視覚的に把握することができる。

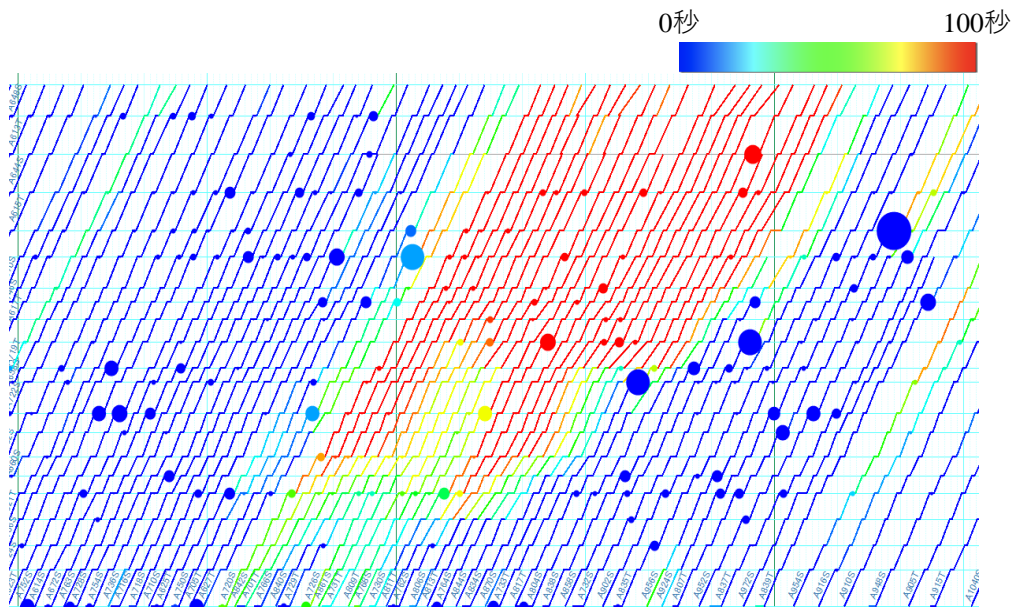


図 3.1 クロマティックダイヤ図

また、複数日の平均値・中央値などで彩色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傾向を色によって直感的に把握することができる。さらに、稠密に列車が運転される路線での遅延発生の主要因である駅停車時間の増加傾向を見るために、駅停車時間もしくは駅停車時間の増大に応じた丸を描画する機能も有する（図 3.1）。これにより、例えば、停車時間の増大による遅延が、列車間隔が大きいところで発生しているのであればダイヤを修正して間隔を調整する、全体に駅停車時間の増大が頻発しているのであれば、駅のホーム監視要員を増強するなど、どのような施策を実施するのが適切かについての知見を得ることができる。

### 3.3.2 遅延ダイヤ図<sup>24</sup>

遅延ダイヤ図は、列車間の相対順序関係に着目した表示形式である。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、遅延の回復の状況を直感的に把握することができる。（図 3.2）

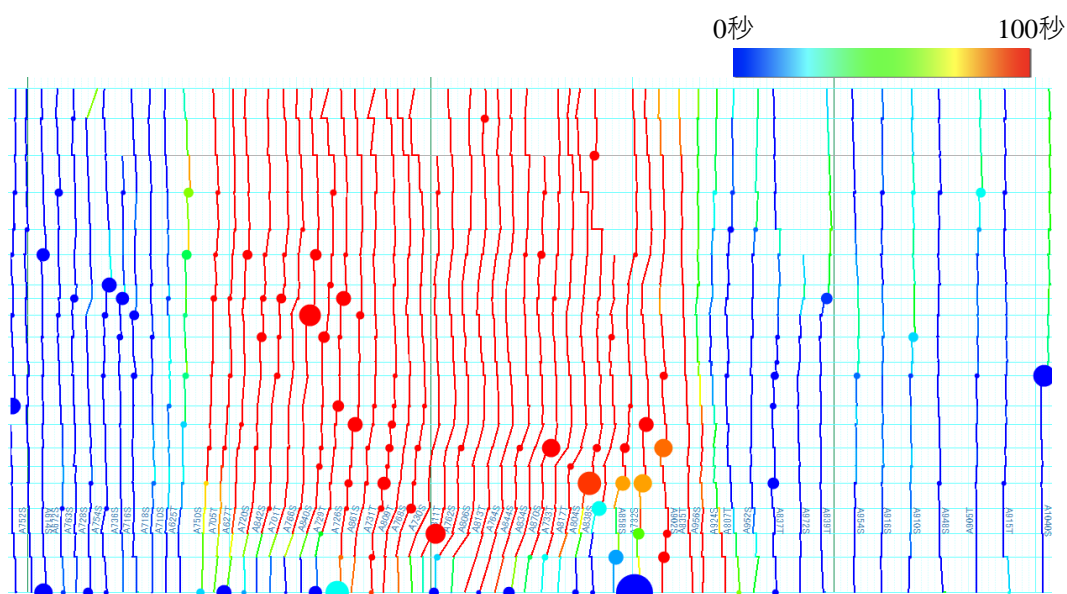


図 3.2 遅延ダイヤ図

### 3.3.3 三次元ダイヤ図<sup>24</sup>

クロマティックダイヤ図にZ軸を追加して、3次元としたものである。Z軸は、遅延の大きさを表す。遅延量の詳細な変化を直感的に把握することができる。(図3.3)

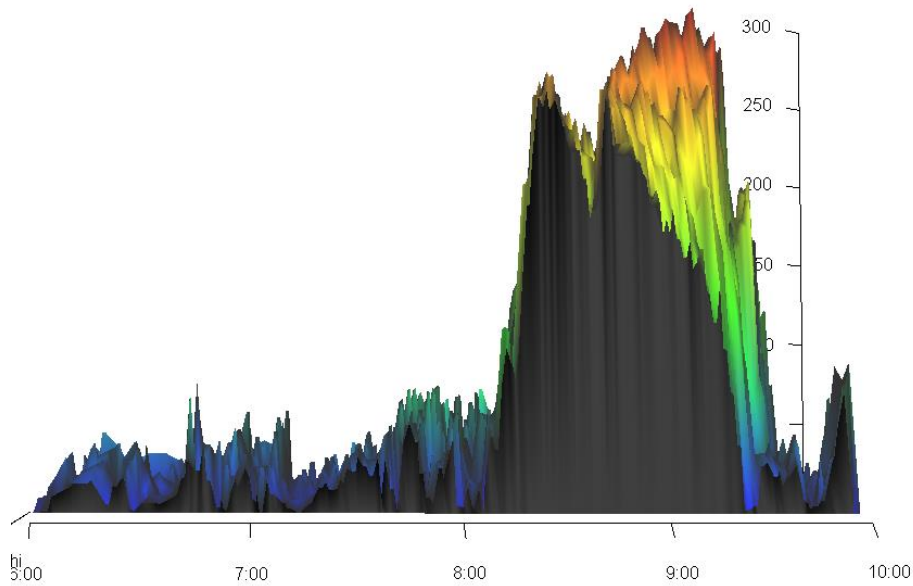


図3.3 三次元ダイヤ図

### 3.4 実務者からの評価

これら3種類の可視化手法をダイヤ作成に携わる実務者に示し、意見を求めた。主なものを次に示す。

- クロマティックダイヤ図
  - 遅延の伝播状況を直感的に把握することに有用。
  - 見慣れたダイヤ図と同一の形式であるのがよい。
  - 施策実施前後の違いなど、2枚を比較すると特に有用。
  - 専門でない人に、遅延対策の効果を説明する際に有用。
  - 遅延状況が視覚的に一目で分かるため、上司に説明する際、1本でも赤いスジが残っていると、その理由を問われる。

- 駅停車時間の増加を表す丸が非常に有効。駅停車時間の増大を防ぐ方策を実施した駅での効果が把握できる。
- 遅延ダイヤ図
  - 遅延が駅・駅間のいずれで発生したかがわかりやすい。
  - 遅延は色でもわかるので、それほど有用ではない。
  - 待避がない路線はよいが、待避があると見にくい。
- 三次元ダイヤ図
  - 列車1本1本の分析には不向き。専門家向きではない。
  - クロマティックダイヤ図では、一定値以上の遅延は全て赤になるが、三次元ダイヤ図ではそのようなことがなく、遅延の大きさが常にわかりやすいのが有用
  - 立体の形状から、遅延の発生傾向の類似度を把握することができるのが有用
  - 駅方向、時間方向、水平方向にカットできるので、その断面の遅延状況が一括して見られて有用
  - その時以降の遅延の増加・減少の傾向が見透かすような形で立体的にわかるのは有用
  - Z軸は、遅延ではなく、他の情報（混雑率など）がよい。

本章では、列車運行実績データの可視化手法を提案し、それに対する実務者の意見を紹介した。長期間のデータの可視化によって傾向や特徴の俯瞰が可能になり、対策必要箇所や対策後の効果の把握が容易になった。引き続き、他の可視化手法についても研究を進めて行く。

## 第4章 列車運行実績データの分析に基づく遅延対策指標の提案とその評価

### 4.1 はじめに

これまで述べてきた通り、首都圏の朝ラッシュ時間帯は1時間に30本～24本（2分～2分30秒間隔）の列車を運行しておりその遅延対策は容易ではない。首都圏では、長年に渡って混雑率の高まりに合わせて列車運行本数を増やしてきたが、列車運行本数の増加に伴い、慢性的な遅延が発生するという問題が顕在化してきた。

この様な状況において鉄道事業者に求められていることは、混雑緩和に取り組みつつも、同時に、遅延が容易に拡大しないよう遅延に対する頑健性を高める施策を講じていくことである。頑健性を高めるためには、遅延拡大現象への理解を深め、どこの駅あるいは駅間に対策を講じるべきかを選定する分析手法を確立する必要がある。

第2章で述べたとおり東京メトロでは、全路線の列車運行実績データを取得している。一方で、列車運行実績データから遅延対策を導き出すための手法は確立されていなかった。現在、全駅における全列車の運行実績データを秒単位で取得している鉄道事業者は2～3社と少ないが、2016年4月20日交通政策審議会「東京圏における今後の都市鉄道のあり方 について」の答申<sup>25</sup>では、「遅延に関する適切な指標を設定し、遅延の現状と改善の状況を分かりやすく「見える化」することが特に重要である。」との提言がなされており、今後、指標化、見える化等の取り組みが促進されることになることは必至である。

この様な現状を踏まえ、遅延対策の優先順位の判断、および、遅延対策による効果ポテンシャルの定量的推定を可能とする遅延対策指標の開発に取り組んできた<sup>26</sup>。

本章では、4.2項において関連研究と問題点について触れ、4.3項において実際の運行管理モニタの実績ダイヤを用いて稠密路線における遅延の発生・拡大の実態について述べた上で、遅延伝搬メカニズムの分析について示す。これらに基づいて4.4項では実績ダイヤを基に遅延拡大モデルを提案し、遅延推定関数を導出する。更に4.5項においては遅延推定関数から導いた遅延対策指標を提案し、4.6項においてその指標を用いた実路線での遅延対策の実施例を述べ、遅延対策指標の有効性の評価を行なう。

## 4.2 第4章の関連研究と問題点

列車の遅延防止を対象とした研究は、近年注目を集めている。稲川らは、列車の運行実績データを可視化することによって、遅延の発生や伝播の状況を直感的に把握する手法を導入している<sup>24</sup>。遅延が伝播しにくい鉄道の運行計画（列車ダイヤ）のことを頑健なダイヤと呼び、その性質を（列車ダイヤの）頑健性と言う。Careyは、列車ダイヤの頑健性を事前に評価するためのヒューリスティックな指標を提案している<sup>8</sup>。Takeuchiらは、シミュレーションによる利用者の不効用の推定による頑健性評価手法を示している<sup>9</sup>。Konoらは、列車運行実績データから遅延の伝播状況を推定することによって、事後に頑健性を推定する手法を提案している<sup>27</sup>。さらに、Kroonら、Ushidaら、芳田らは、それぞれ、確率的最適化、モンテカルロシミュレーションなどによって頑健なダイヤを作成するアルゴリズムを導入している<sup>10,11,28</sup>。また、落合は、シミュレーションによって、遅延を拡大させない列車の運転方法の検討を行なっている<sup>29</sup>。岩倉らは、都市鉄道の時間信頼性の経済評価手法を提案し、遅延対策の効果について経済便益推計を行なった結果を示している<sup>30</sup>。

しかし、これらのいずれの研究においても、遅延対策を目的とした指標やそれを用いた分析手法、その効果の推定手法については触れられていない。

### 4.3 列車運行実績データからの遅延伝播メカニズムの分析

2017年（平成25年）6月のある平日の半蔵門線（駅の配置を図4.1に示す）の実績ダイヤを図4.2に示す。これは、運行管理を行なう指令所の監視画面の一つとして運行管理システムの運行管理モニタに表示されるものである。縦軸が駅名、横軸が時間で、各駅の発着時刻を直線で結んだものである（黒線が計画ダイヤ、赤線が実績ダイヤ）。

また、図4.3は図4.2を処理したもので、渋谷～半蔵門間の5駅の駅停車時間の増大量の合計、渋谷～半蔵門間の4駅間の運転時間の増大量の合計である。縦軸は遅延量、横軸は走行順に並べた列車番号であり、列車番号を囲んだ赤枠は、遅延対策の対象とする朝ラッシュ1時間の列車27本である。

図4.3からは、ラッシュ時間前半は駅停車時間のみが増大し、ラッシュ時間中程から徐々に運転時間が増大し、一旦、運転時間が増大傾向になると、駅停車時間が増大しない場合でも、運転時間の増大傾向は継続していることがわかる。これらの傾向は、ある列車の駅停車時間の増大に起因して、後続列車には駅間での減速や一旦停止が発生し、徐々に運転時間が増大すると、平均速度が低下した状態で列車間隔が詰まり易くなり、前列車の駅停車時間が増大していない列車にも運転時間増大の傾向が継続することを示している。

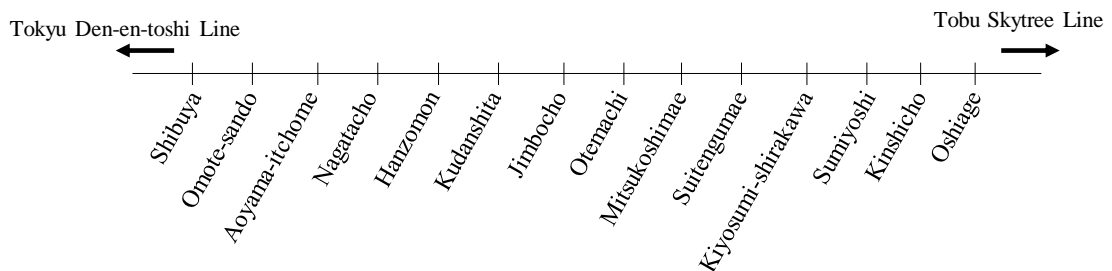


図 4.1 半蔵門線路線略図

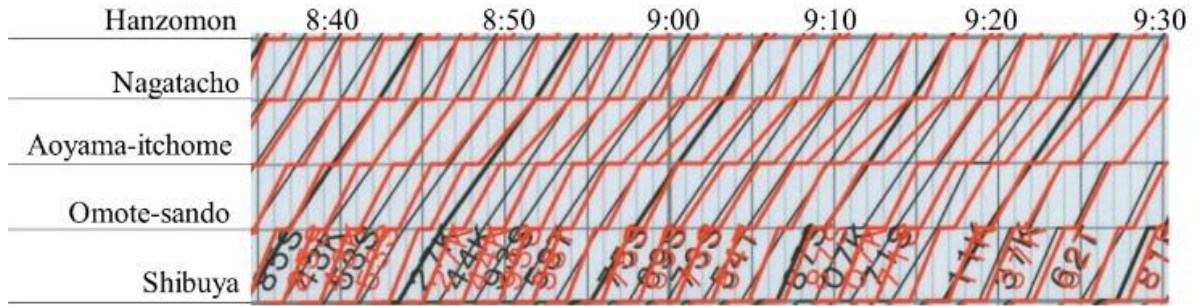


図 4.2 半蔵門線運行実績データ（2017年6月平日）

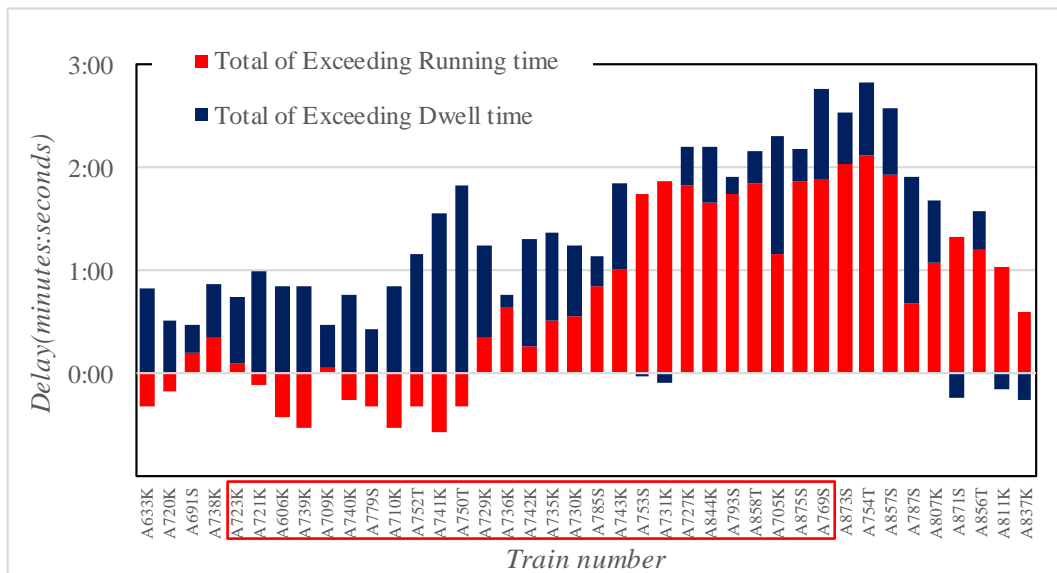


図 4.3 運行実績データの分析結果（図 4.2 の分析）

#### 4.4 遅延拡大モデルと遅延推定関数

余裕時間（Buffer time）を十分に設けることのできない稠密運行路線においては、特段の輸送障害がなくても駅停車時間の増大等に起因して運転時間が増大し、短時間に遅延が拡大する。図 4.4 に一般的な遅延の拡大状況に基づく遅延拡大モデルを提案する。図中に使用している記号等は以下のとおりである。



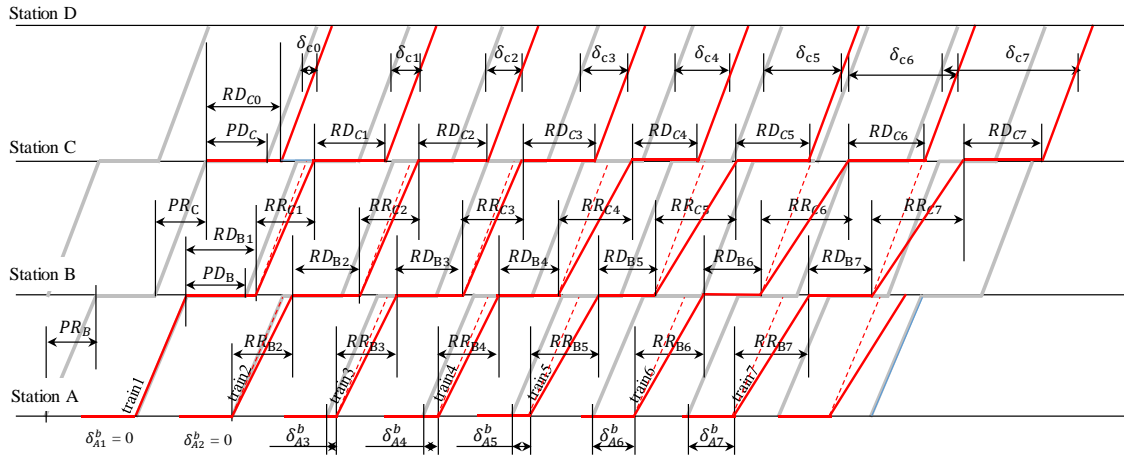


図 4.4 遅延拡大モデル

〈図 4.4 で使用している線種及び記号〉

- ・ 灰色線：計画ダイヤ
- ・ 赤色線：実績ダイヤ（運行実績データでは駅到着時刻と出発時刻が記録される）
- ・ 赤色破線：計画ダイヤと同じ駅間運転時分で走行した場合のスジ
- ・  $PD_i$ ：駅  $i$  の許容駅停車時間（一定）
- ・  $RD_{ij}$ ：駅  $i$  の列車  $j$  の実績駅停車時間
- ・  $RR_{ij}$ ：駅間  $i$  における列車  $j$  の実績運転時間

〈解説及び数式で使用している記号〉

- ・  $PD_i$ ：駅  $i$  の計画駅停車時間（一定）
- ・  $PR_i$ ：駅間  $i$ （駅  $i-1$ ～駅  $i$  間）の計画運転時間（一定）

図 4.4 は、駅 B と駅 C において、 $RD_{Bj} > PD_B$ 、 $RD_{Cj} > PD_C$  となった場合の遅延の拡大を表現するモデルである。駅停車時間  $RD_{Bj}$  と  $RD_{Cj}$  の増大に起因して、駅間を走行している列車の運転時間（ $RR_{Bj}$  と  $RR_{Cj}$ ）も増大する。駅  $i$  における列車  $j$  の遅延量  $\delta_{ij}$  は、A が基準駅であるとして、基準駅遅延量を  $\delta_{Aj}^b$  とすると(4.1)式となる。なお、ここで、基準駅とは、遅延分析対象区間の直

前の駅のことをいい、基準駅遅延量は、その駅の発遅延量のことをいう。

$$\delta_{ij} = \delta_{Aj}^b + \left\{ \sum_{k=1}^i (RD_{kj} - PD_k) \right\} + \left\{ \sum_{k=1}^i (RR_{kj} - PR_k) \right\} \dots\dots\dots (4.1)$$

ここで、第2項は駅停車時間の増加による遅延変化量、第3項は運転時間の増加による遅延変化量を表わし、第2項と第3項の和（以下  $\Delta\delta_{ij}$  とする）が基準駅からの遅延変化量となる。このうち、第2項は遅延が発生する原因であるため自己遅延、第3項は自己遅延に従属して生じる遅延であるため従属遅延と名付ける。

列車  $i$  の駅  $j$  における自己遅延を  $Sel_{ij}$ 、従属遅延を  $Sub_{ij}$  として、基準駅からの遅延変化量  $\Delta\delta_{ij}$  を(4.2)式で表す。

$$\Delta\delta_{ij} = \sum_{k=1}^i Sel_{kj} + \sum_{k=1}^i Sub_{kj} \dots\dots\dots (4.2)$$

## 4.5 遅延対策指標の提案

本項では、これまでの議論に基づいて、遅延対策の優先順位とその効果の推定を目的とした指標（遅延対策指標）を導入する。

### 4.5.1 遅延対策指標の考え方と必要性

稠密路線においては、「遅延の発生」と「遅延の拡大」は、異なる原因によって引き起こされる。運行実績データの予備的分析の結果から、各駅における駅停車時間の増加は、いわゆるトラブル（急病人の救護等）を除けば、ほとんどが10秒前後の比較的小さな値であり、また、乗降旅客が多く駅停車時間が増大しやすい駅の手前の区間など運転時間の増加には発生しやすい区間が存在することが判明している。さらに、4.3項で述べた通り遅延の主たる要因は、朝ラッシュ時間帯の前半では、駅停車時間の増加の累積（自己遅延）、

朝ラッシュ時間帯の中程以降では、運転時間の増加の累積（従属遅延）である。

稠密路線において、効果的な遅延対策を講じるためには、各駅及び駅間において、どの程度の量と頻度で自己遅延が発生し、更に従属遅延が発生しているかを分析する必要がある。そのためには、自己遅延と従属遅延を区別し、各々別の指標を用いる必要がある。自己遅延指標のみの悪化であれば、その遅延が原因となって広範囲に遅延が伝播しているわけではないことから、対策を施すべき優先度は低いと判断できるが、従属遅延指標の悪化に至っており、その量及び頻度が高い場合は、優先度が高いと判断できる。

1日の最大遅延は、最も列車の運転頻度が高く、列車間隔に余裕がない朝ラッシュ時間帯の約1時間の中で発生する。そのため、この時間帯の列車を対象として（図4.3参照。赤枠の中の列車が対象列車）、遅延対策指標を導くこととする。

#### 4.5.2 自己遅延の遅延対策指標 $ED_i$ : *Exceeding dwell time*

駅停車時間の増加が遅延発生要因となる列車は、(4.3)式の条件に該当する列車である。よって、駅停車時間の増加に関する指標は、(4.3)式の条件をもとに抽出する。

$$K_{s(j)} = RD_{ij} - PD_i > 0 \quad \dots\dots\dots(4.3)$$

(4.3)式の条件に該当する列車 $K_{s(j)}$ について、その列車本数を $K_s$ として、駅 $i$ における許容駅停車時間超過量平均 $\overline{ED}_i$ を(4.4)式より求める。

$$\overline{ED}_i = \frac{1}{K_s} \left\{ \sum_{j=1}^{K_s} (RD_{ij} - PD_i) \right\} = \frac{1}{K_s} \left\{ \sum_{j=1}^{K_s} Sel_{ij} \right\} \quad \dots\dots\dots(4.4)$$

また、(4.3)式の条件を満たしている列車の比率を、許容駅停車時間超過率

$\mu_{ed}$ と名付け、対象とする列車本数を  $K$  として(4.5)式より求める。

$$\mu_{ed} = \frac{K_s}{K} \dots\dots\dots (4.5)$$

(4.4)式及び(4.5)式の積として定めた(4.6)式を、駅  $i$  における自己遅延の遅延対策指標  $ED_i$  と名付ける。

$$ED_i = \overline{ED}_i \cdot \mu_{ed} \dots\dots\dots (4.6)$$

### 4.5.3 従属遅延の遅延対策指標 $ER_i$ : *Exceeding running time*

運転時間の超過によって遅延を拡大させる列車は、(4.7)式の条件に該当する列車である。よって、運転時間の超過に関する指標は、(4.7)式の条件をもとに抽出する。

$$K_{d(j)} = RR_{ij} - PR_i > 0 \dots\dots\dots (4.7)$$

(4.7)式の条件に該当する列車  $K_{d(j)}$  について、その列車本数を  $K_d$  として、駅間  $i$  における運転時間超過量平均  $\overline{ER}_i$  を(4.8)式より求める。

$$\overline{ER}_i = \frac{1}{K_d} \left\{ \sum_{j=1}^{K_d} (RR_{ij} - PR_i) \right\} = \frac{1}{K_d} \left\{ \sum_{j=1}^{K_d} Sub_{ij} \right\} \dots\dots\dots (4.8)$$

また、(4.7)式の条件を満たしている列車の比率を運転時間超過率  $\mu_{er}$  と名付け、(4.9)式より求める。

$$\mu_{er} = \frac{K_d}{K} \dots\dots\dots (4.9)$$

(4.8)式と(4.9)式の積として求めた(4.10)式を、駅間  $i$  における従属遅延の遅延対策指標  $ER_i$  と名付ける。

$$ER_i = \overline{ER}_i \cdot \mu_{er} \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

#### 4.5.4 ER 回復変化点

(4.11)式が成り立つ区間を ER 回復変化点と名付ける。

$$ER_i - ER_{i+1} > 0 \quad \dots\dots\dots (4.11)$$

この式は、駅  $i$  において、従属遅延が極大値（局所的最大値）をとっていることを示している。

ER 回復変化点となりうる駅としては、例えば、他路線への乗換のために多くの旅客が降車する駅が挙げられる。このような駅（駅 A とする）で、車内混雑率は大幅に低下する。そして、その次の駅（駅 B とする）での乗降人数が多くない場合、駅 B では、自己遅延、従属遅延共に発生しないため、駅 A が ER 回復変化点として抽出されることになる。

ER 回復変化点に対しては、対策優先順位を高くすべきであると考えられる。その理由は、従属遅延は、発生すると後続の列車や発生区間の上流側の区間に伝播する性質があるため、遅延が局所的最大となる駅に対策すると、多くの列車や箇所に対して遅延回復の効果が見込めるためである。

よって、ER 回復変化点に該当する駅にまず対策を講じ、手前の区間に対する効果などを見極めてから、次の対策区間を新たに検討するという、段階的なやり方が実用的である。

#### 4.5.5 遅延対策指標に基づく対策箇所の決定方法（ED/ER 分析）の提案

ED/ER 分析とは、 $x$  軸に ED 値、 $y$  軸に ER 値をとることで遅延対策優先箇所の選定と対策効果ポテンシャルを算出する分析方法である。図 4.5 を

用いて解説する。まず，運行実績データから ED 値，ER 値を算出し，図 4.5 に示すように ED 値を  $x_1$ ，ER 値を  $y_1$  として ED 値，ER 値の算出結果をグラフ上にプロットする。図 4.6 の A～D の領域は以下のような意味を持つ。

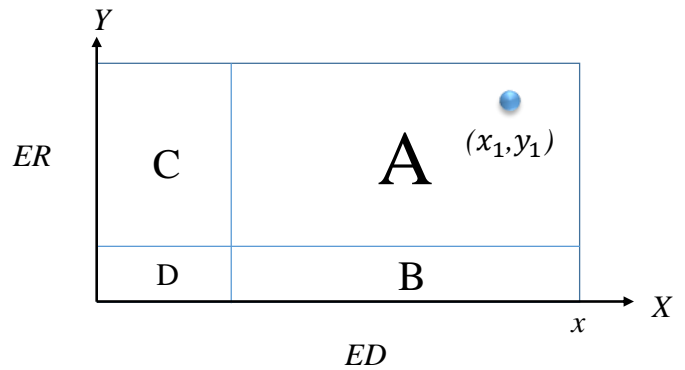


図 4.5 ED/ER 分析概略図

領域 A：前列車の駅停車時間が増大したことで運転時間が増大している領域

領域 B：駅停車時間が増大している領域

領域 C：前列車との運転間隔が詰まったことで運転時間が増大している領域

領域 D：問題のない領域

領域 A・B と領域 C・D の境界となる ED の値は，駅停車時間の増大が問題となるケースであるので，第 2 章図 2.1 でいう余裕時間がその目安となる。

領域 A・C と領域 B・D の境界となる ER の値は，運転時間の増大が問題となる目安の値となる。この値は，路線等の状況にもよるが，これまでの分析から，概ね 10 秒程度が目安になると考えている。

対策の優先順位は，前節で述べた理由により，ER 回復変化点を最優先とし，ついで，領域 A，B，C の順とする。

対策による期待効果  $x_1 + y_1$  を対策効果ポテンシャルと名付ける。各領域内の優先順位は，対策効果ポテンシャルの大きさから判断する。

実際の対策の順序を決定するにあたって，連続する複数の駅の優先順位が高い場合には，一斉に対策を行なうことは必ずしも容易でない場合があること，対策の効果を見極めながら段階的に対策を実施することが得策であると考え

られることから、ED、ERの値をもとに、対策する駅を順次決定する。具体的には、図4.4で説明すると、駅Cとその直前の駅BのED値、ER値が共に高く優先順位が高いと判断された場合は、駅CのED値( $RD_{Cj}$ )を下げる対策をとることで、駅CのER値( $RR_{Cj}$ )だけでなく、駅BのED値( $RD_{Bj}$ )、ER値( $RD_{Bj}$ )が下がる可能性が高いなどのことを考慮して、対策を行なう駅を決定する。

## 4.6 遅延対策指標に基づく遅延対策とその評価

### 4.6.1 対象路線とその特徴

東京メトロ半蔵門線は、渋谷～押上間を運行する営業キロ16.8km、14駅の路線である。東急田園都市線、東武スカイツリーラインと相互直通運転を行っており、朝ラッシュ時間帯には、1時間に27本の列車を2分15秒間隔で運行し、混雑率は約173%（渋谷→表参道間）である。半蔵門線の遅延は、混雑区間である渋谷～永田町間で大きく拡大する傾向があり、永田町以降は九段下～神保町間、半蔵門～清澄白河間でも拡大傾向のある路線であった。

### 4.6.2 平成25年度 遅延対策実施前の半蔵門線の運行実績と遅延対策（対策ステップ1の決定）

図4.6(1)は対策前のED値、同図(2)は対策前のER値、同図(3)は対策前のED/ER分析図である。図4.6(1)より、路線の中でED値が相対的に大きいのは、青山一丁目、永田町、九段下、図4.6(2)よりER値が相対的に大きいのは、渋谷～永田町の各駅間、半蔵門～九段下間、水天宮前～清澄白河間である。ただし、水天宮前～清澄白河間のER値が大きくなる原因は、折返し列車によるもので、折返し線への進入速度が低速であるために後続列車に影響を与えているためであることが判明している。

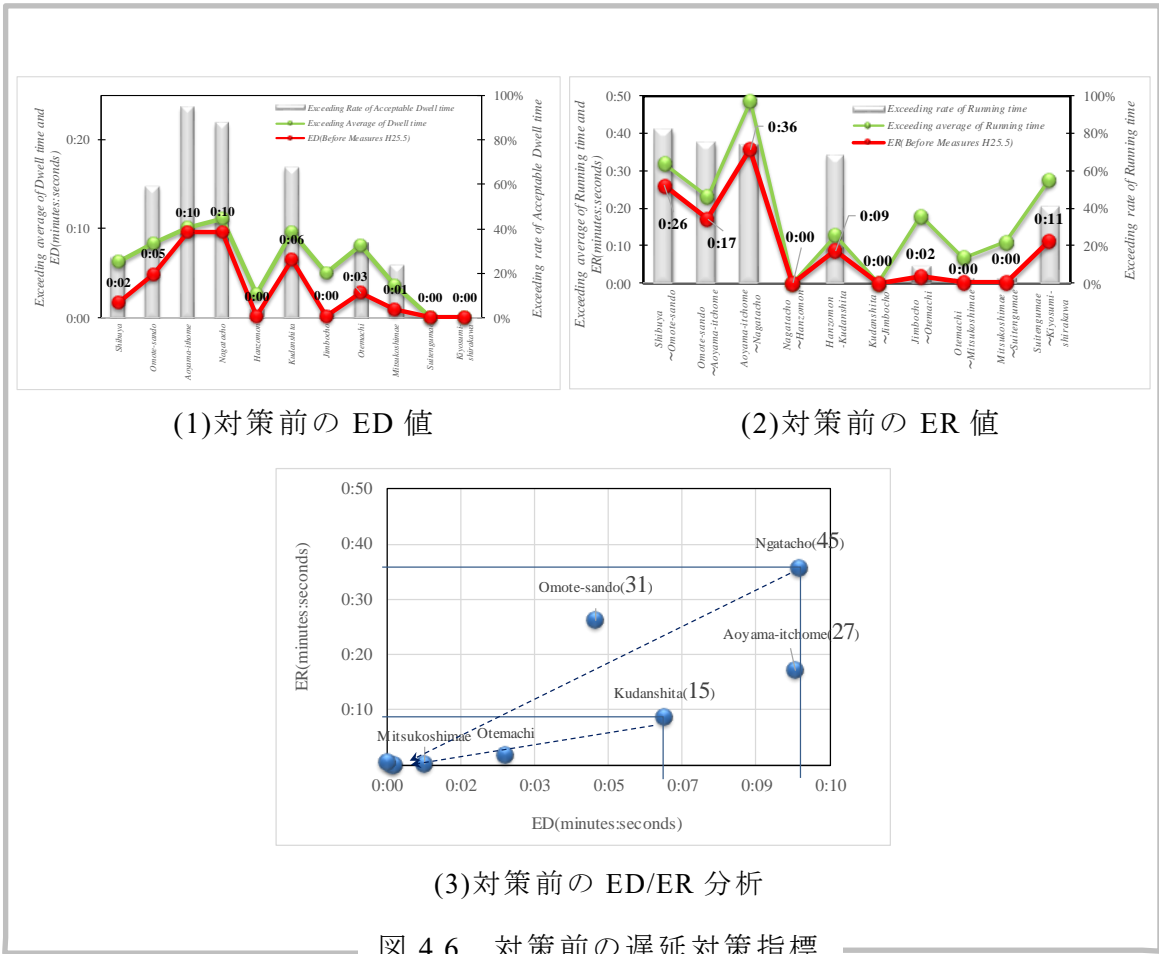


図 4.6 対策前の遅延対策指標

対策優先順位と対策効果ポテンシャルを表 2.1 に示す。対策ポイント欄には駅名のみを記載しているが、例えば永田町であれば、青山一丁目～永田町間及び永田町駅の対策を含む。また、下線を付している永田町、表参道は、ER 回復変化点と重複していることを示す。表 4.1 によれば、優先順位は永田町、表参道、青山一丁目、九段下となる。一方で、表参道、青山一丁目については、その直後の駅である永田町での対策効果を見極めた上で段階的に進めることが望ましいと考えたため、対策ステップ 1 では、以下の A, B, 2 つの対策を実施することとした。なお、図 4.6(3)の ED/ER 分析図内の ( ) 内の数値は、対策効果ポテンシャルである。

対策 A：青山一丁目～永田町間及び永田町駅への対策 検討の結果、信号設備改良が困難なことから、永田町駅に乗降促進要員を配置して自己遅延の



縮小を試みた。更に、その効果により青山一丁目～永田町間の従属遅延も縮小することを期待した。

対策 B：半蔵門～九段下間及び九段下駅への対策 九段下～神保町間の信号設備を改良し、九段下駅の出発条件を改善し、自己遅延の縮小を試みた。その効果により、半蔵門～九段下間の従属遅延も縮小することを期待した。

表 4.1 遅延対策の優先度

ED/ER Analysis Area	Measure Points	Potential
Recovery changing section of ER	Nagatacho	45sec
	Omote-sando	31sec
Area_A	<u>Nagatacho</u>	45sec
	<u>Omote-sando</u>	31sec
	Aoyama-itcho	27sec
Area_B	Kudanshita	15sec
Area_C	-	-

High Priority ↑

#### 4.6.3 平成 26 年度 遅延対策前の半蔵門線の運行実績と遅延対策（対策ステップ 2 の決定）

対策ステップ 1 実施後の遅延対策指標を図 4.7(4)～(6)に示す。図 4.7(1)～(3)は、比較のために示した対策実施前の遅延対策指標（図 4.6）である。また、表 4.2 として遅延対策前後の各指標及び対策効果ポテンシャルの変化を示す。

対策ステップ 1 を講じたことで、対象箇所の指標は大幅に改善された。永田町は対策効果ポテンシャルが-40 秒となった。また、2 次的な効果として表参道は-9 秒、青山一丁目は-13 秒、対策効果ポテンシャルが減少している。これら 2 次的な効果は、ER 回復変化点に対策を講じた結果、従属遅延が改善した。表参道、青山一丁目は、対策ステップ 1 実施後も計 36 秒の対策効果が

テンシタルが存在していることから、対策ステップ2として渋谷～表参道間、表参道～青山一丁目間の信号設備改良（対策C）を実施した。

対策C：渋谷～表参道間、表参道～青山一丁目間 両区間の信号設備を改良し、従属遅延を縮小する。対策効果ポテンシタルが小さいため、要員配置は行なわず効果を確認することとした。

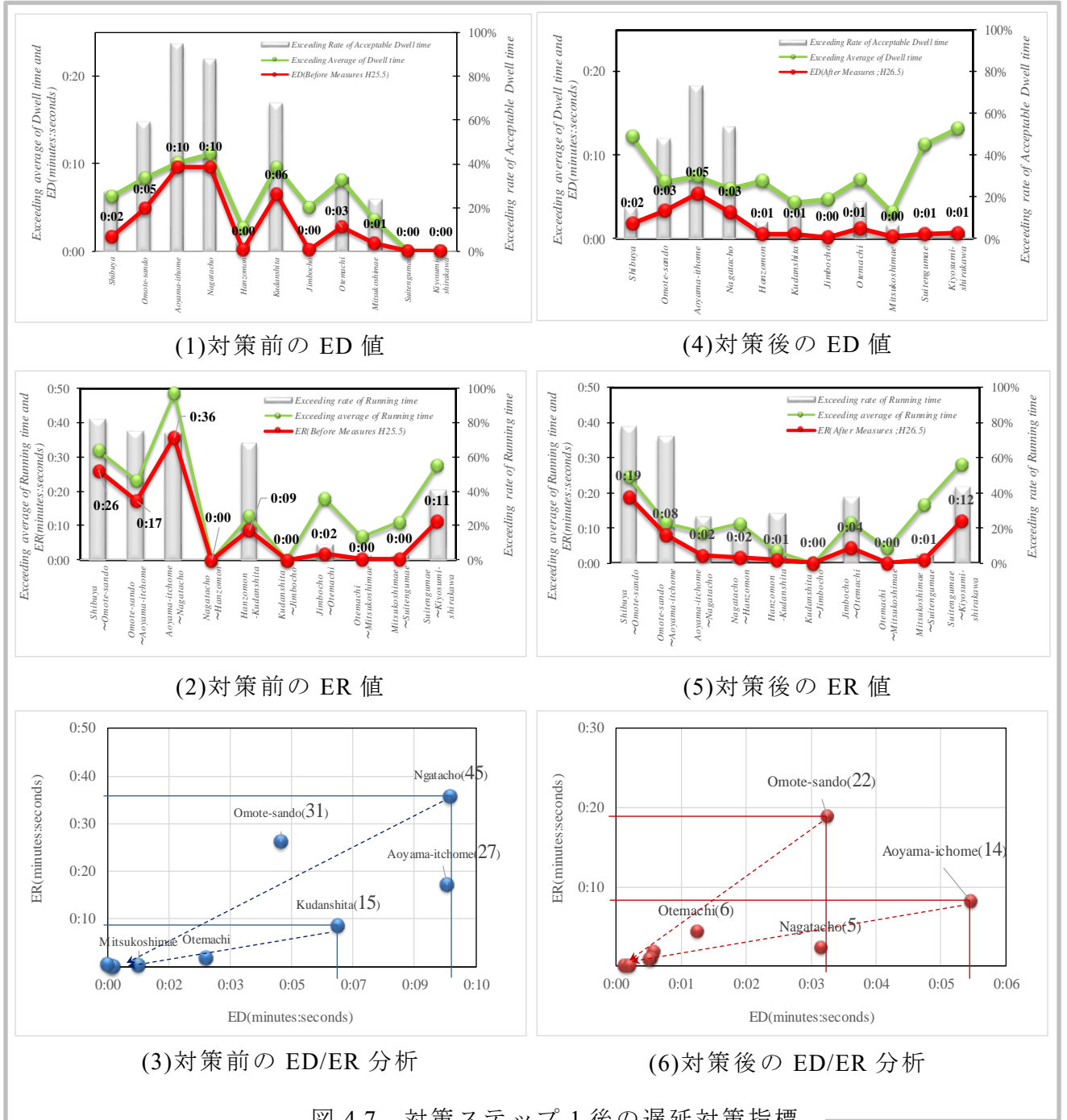


図 4.7 対策ステップ1後の遅延対策指標

表 4.2 遅延対策前後の遅延対策指標の比較

(minutes:seconds)

	Before Measures H25.5			After Measures H26.5			⑥-③
	ED ①	ER ②	Potential of Measures effect ③	ED ④	ER ⑤	Potential of Measures effect ⑥	
Omote-sando	0:05	0:26	0:31	0:03	0:19	0:22	-0:09
Aoyama-ithome	0:10	0:17	0:27	0:05	0:08	0:14	-0:13
Nagatacho	0:10	0:36	0:45	0:03	0:02	0:05	-0:40
Hanzomon	0:00	0:00	0:00	0:01	0:02	0:02	0:02
Kudanshita	0:06	0:09	0:15	0:01	0:01	0:02	-0:14
Jimbocho	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	-0:00
Otemachi	0:03	0:02	0:04	0:01	0:04	0:06	0:01
Mitsukoshimae	0:01	0:00	0:01	0:00	0:00	0:00	-0:01
Suitengumae	0:00	0:00	0:00	0:01	0:01	0:01	0:01

#### 4.6.4 遅延対策の評価

対策ステップ1実施前の遅延状況（青線）、対策効果ポテンシャルに基づいた推定遅延（赤線）、対策後の遅延状況（黄線）を図4.8に示す。また、対策ステップ2に対する同様の図を図4.9に示す。

ここで、推定遅延は、運行実績データから算出した実際の遅延拡大量の平均値から、対策効果ポテンシャルを減じることによって求めた。図4.8に示しているとおり、対策ステップ1により、永田町駅の遅延量は、推定効果-45秒のところ実際の効果は-69秒であった。また九段下駅の遅延量は、推定効果-60秒のところ実際の効果は-79秒であった。対策Aの実施による渋谷~青山一丁目間の改善効果を見極めたところ、同区間でも計-22秒の改善効果があり、推定遅延以上の遅延短縮効果が得られた。対策Bについても、半蔵門と九段下間の変化量を見ると、対策効果ポテンシャル以上の効果があった。

対策ステップ2で実施した対策Cについては、ほぼ対策効果ポテンシャルに基づいた推定遅延と同等の効果であり、結果として渋谷~永田町を連続して対策を講じたことで遅延を吸収する効果まで得られた。

一方で、神保町~大手町間及び大手町駅の遅延は増加した。図4.9では神保町~大手町間及び大手町駅の遅延は約5秒増加した。神保町までの列車の流れ

が改善されたことで、大手町駅の自己遅延が、神保町~大手町間の従属遅延に影響を与えやすくなったことが原因と推定される。

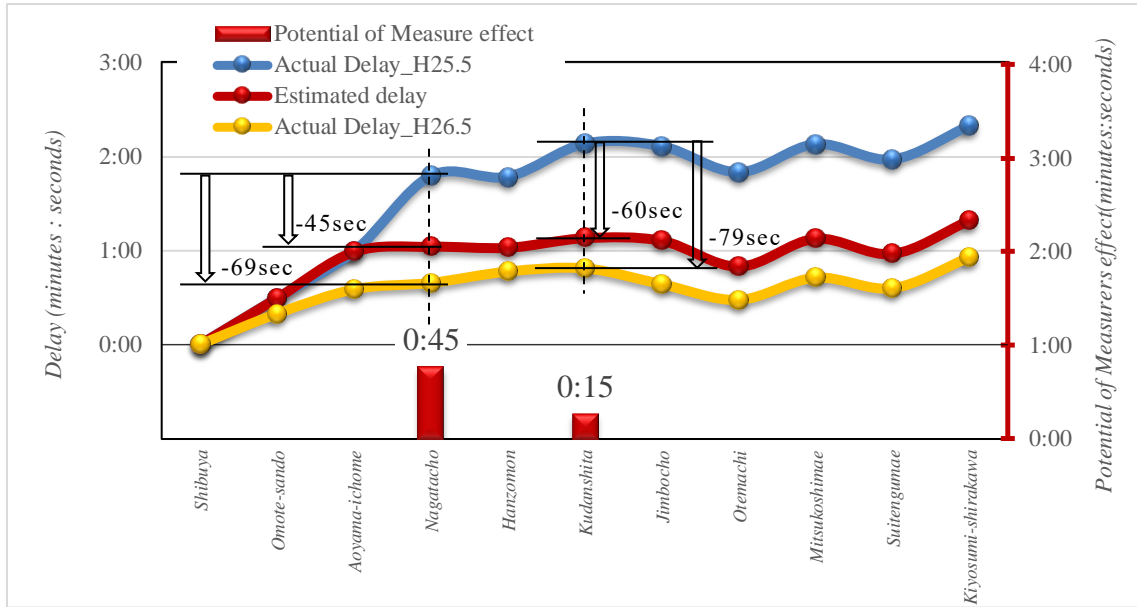


図 4.8 対策ステップ 1 の効果推定と対策前後の遅延状況

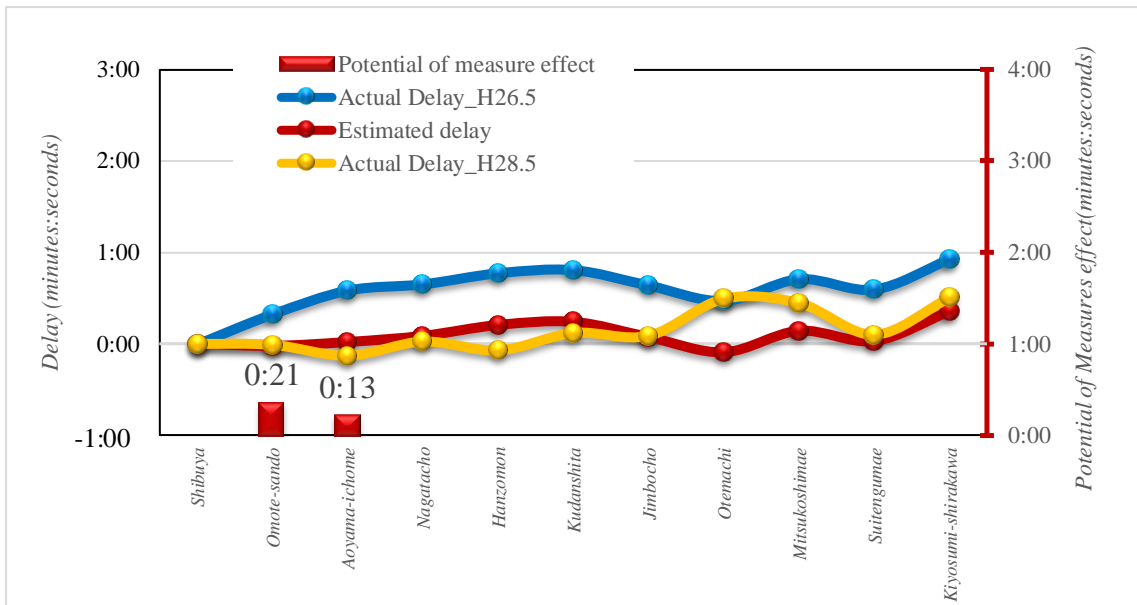


図 4.9 対策ステップ 2 の効果推定と対策前後の遅延状況

#### 4.6.5 提案手法の有効性

従来から、遅延対策の必要性が認識されていたものの、対策箇所の選定は経験に基づいて ad hoc に行なわれていたのが実情であり、また、効果を定量的に推定することも行なわれていなかった。一方、前節の結果から、提案手法による指標を用いることにより、遅延対策を実施すべき箇所の選定、及び、遅延対策を実施した際の効果を定量的に推定することが可能になると判断できる。これにより、限られた経営資源を効果的に活用して遅延対策をより効率的に行なうことが可能になると考えられる。

## 第 5 章 列車運行実績データの分析に基づく列車運 行シミュレーションアルゴリズムの提案

### 5.1 はじめに

第 4 章では遅延対策を効果的に推進するため、遅延対策の優先順位の判断、および、対策効果ポテンシャルの定量的推定を可能とする遅延対策指標について述べた。遅延対策を加速していくためには、対策を実施した場合の効果を、起こりうるさまざまな状況に対して、より詳細に推定できることが必要である。

本章では、過去の列車運行実績データを用いて、実際に起こりうる運転時間や実際の追い込み時間（第 1 章 1.1.2 で解説。前列車が駅を出発してから次列車が到着するまでの時間をいう）などの値を推定し、それをシミュレータに組込む方法をとる。さらに、運行実績データから、列車運行、特に運転時間に関する規則を抽出し、それに基づいてシミュレーションを行なう方式を提案する。具体的には、キーとなる規則として、後方駅での先行列車との出発時間差と運転時間との関係を見出し、それを用いて列車の到着時刻を決定する。これにより小乱れが発生した時の列車運行を高い精度で推定することが可能となったことを示す。

以下、5.2 項では、シミュレーションモデルについて解説する。5.3 項では、その分析をもとに、既存手法の問題点を指摘する。5.4 項では、それらの問題点を解決することを目的として、出発時間差に基づく列車運行シミュレーションアルゴリズムを提案する。5.5 項では、提案アルゴリズムの精度の面からの評価を行ない、5.6 項では遅延対策効果の推定への適用例を紹介する。5.7 項では、第 4 章の半蔵門線における遅延対策に適用することで本シミュレーションアルゴリズムの汎用性と効果推定値を検証する。

### 5.2 第 5 章の関連論文と問題点

さまざまな状況に対する遅延対策の効果を推定するためには、列車運行シミュレーションが有効な手段となる。

列車運行シミュレーションのモデルは、**microscopic model** と **macroscopic model** に大別される<sup>31</sup>。**microscopic model** とは、列車の動きを物理学における物体の運動と捉え、Newton の運動方程式に基づいて、連続的にその速度と位置を計算で求めていく方式である<sup>32,33,34</sup>。列車の時々刻々の位置が推定できるため、信号設備の設計、列車ダイヤの詳細な検討などに用いられる。**microscopic model** は、列車の動きを詳細に推定可能であるという特徴があるが、その一方では、膨大かつ多岐にわたるデータを準備しなければならないという問題がある。具体的には、列車の性能に関する条件（ノッチごとの引張力、重量、ブレーキ性能、走行抵抗など）、線路の条件（曲線半径、勾配、速度制限箇所など）、信号の条件（信号機の建植位置、現示など）である。また、実行速度は、**macroscopic model** より遅い。

**macroscopic model** は、列車の駅への到着、駅からの発車をイベントとし、これらイベントの生起時刻を推定することを目的とする。すなわち、列車の駅間の挙動については、推定対象としない。**macroscopic model** では、**microscopic model** で必要であった膨大かつ多岐にわたるデータは必要ではなく、実行速度も **microscopic model** より速い。鉄道においては、**macroscopic model** としては、イベントドリブン方式と最長経路アルゴリズムに基づく方式（以下、最長経路法）が知られている。イベントドリブン方式は、半導体の設計をはじめとして世の中で広く用いられている方式で<sup>35</sup>、列車運行の予測に応用する場合には、列車の到着と発車をイベントとして、次に生起可能なイベントとその生起時刻を順に決定していくことでシミュレーションを行なう<sup>36</sup>。最長経路法では、列車の到着と発車のイベントをノード、ノード間の時間的関係をアークとする有向グラフで列車ダイヤを表現し、仮想的な開始ノードから各ノードへの最長経路の重みを計算することによって列車運行を予測する<sup>37</sup>。一般には、列車ダイヤに順序等の変更が発生しないという前提において、イベントドリブン方式よりも高速に動作することが知られている。

イベントドリブン方式、最長経路法のいずれにおいても、列車運行の予測において用いられる数値は運転時間、駅停車時間、追い込み時間（図 5.1 の *Headway* を示す。以下、式中では時隔という）の3種類である。その概念を図 5.1 に示す。なお、図 5.1 は、待避のないシンプルなダイヤに対するものであるが、待避がある場合も、基本的な考え

方は同じである。

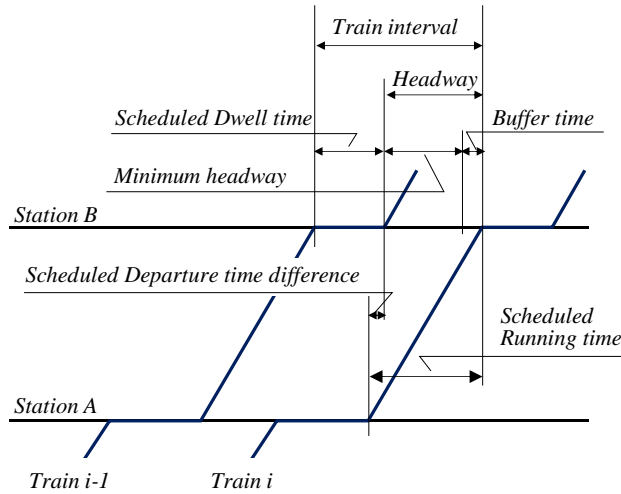


図 5.1 列車運行計画の構成要素

いずれの方式においても、発車時刻・到着時刻は、次の式で求められる。

$$\text{発車時刻} = \max (\text{当該列車の着時刻} + \text{駅停車時間}, \text{計画発時刻}) \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

$$\text{到着時刻} = \max (\text{先行列車の発時刻} + \text{時隔}, \text{当該列車の後方駅発時刻} + \text{運転時間}, \text{計画着時刻}) \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

これらの式において、駅停車時間としては、駅ごと・時間帯ごと等にあらかじめ定められた最低限必要な駅停車時間（最小駅停車時間）、運転時間としては、ダイヤ作成に用いられる駅間の最小運転時間（基準運転時間 - 若干の余裕を含んでいる<sup>8)</sup>）、時隔としては、最小追い込み時間（ダイヤ作成において用いられる、信号設備上許容される最小の値に適切な余裕を加えたもの<sup>38)</sup>）が用いられる。

遅延対策の検討のためには、設備等の条件を様々に設定してシミュレーションを繰り返す必要がある。そのため、準備すべきデータと処理速度の点からは、macroscopic model を使用することが適切である。

ただし、macroscopic model に対する懸念事項として、現実の列車運行における運転時



間や時隔が、それぞれ、基準運転時間や最小追い込み時間と一致しているかどうかがある。それらが一致していないのであれば、シミュレーション結果に、現実との差異が生じるためである。そこで、列車運行実績データを用いて、現実の列車運行における運転時間と時隔に対する予備的な検討を行なうこととした。その結果を以下で述べる。

### 5.3 列車運行実績の分析

予備的な検討のために、朝ラッシュ時における現実の列車運行実績の分析を行なった。対象としたのは、東京メトロ千代田線（概略の路線図を図 5.2 に示す）の 2017 年 9 月 29 日金曜日の朝ラッシュ時（綾瀬発 7 時 5 分ころから 9 時 5 分ころ）の綾瀬から代々木上原方向の列車のデータである。この日は、7 時 19 分に、図 5.3、図 5.4 中の最初の列車 A727K よりも 12 本前の列車に、西日暮里にて 2 分 30 秒の遅延が発生し、そのために、最大 5 分程度の遅延が発生している。典型的な小乱れの日である。その結果を、図 5.3～図 5.5 に示す。

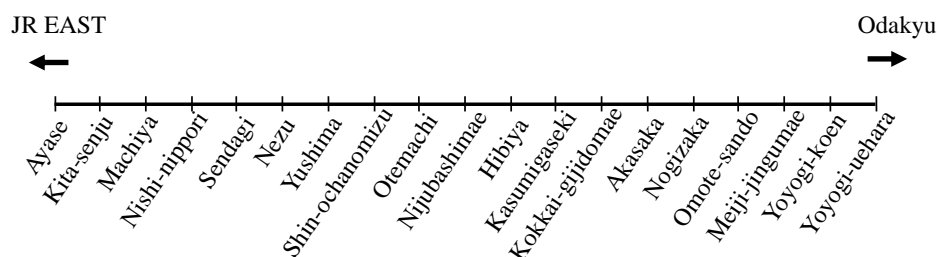


図 5.2 千代田線路線略図

図 5.3～図 5.5 から次がわかる。

- (1) 実際の運転時間は、基準運転時間よりもさらに短い場合がある（図 5.3）。これは、基準運転時間は若干の余裕を含んでおり、列車が遅延している場合には、回復運転を行なうことによって、それよりも短い値で列車が運転されることがあるためである。

また、実際の運転時間が、基準運転時間を大きく上回っている場合もある（図 5.3）。これは、稠密に列車が運転されている路線では、先行列車の発車が遅延した場合、後続列車は、駅の手前で停止（駅間停止）したのち、再度起動することにな

り、この場合、駅間での減速・加速・停車時間によるロスに加えて、車掌の放送（起動前に注意を促す放送）を待つ時間等が余分に必要になることによる。

図 5.3 は、町屋～西日暮里駅間において、A621K 列車（青枠）から徐々に運転時間が増大し、最も増大したのは A827S 列車（赤枠）の 4 分 1 秒（この区間の基準運転時間は 2 分 5 秒である）であったことを示しており、また、北千住～町屋駅間では、A739S 列車（黄枠）から増大し、A815 列車（緑枠）が 3 分 40 秒（この区間の基準運転時間は 2 分 55 秒である）で最大であったことを示している。これらは共に、実際の運転時間が基準運転時間を上回っている実例である。

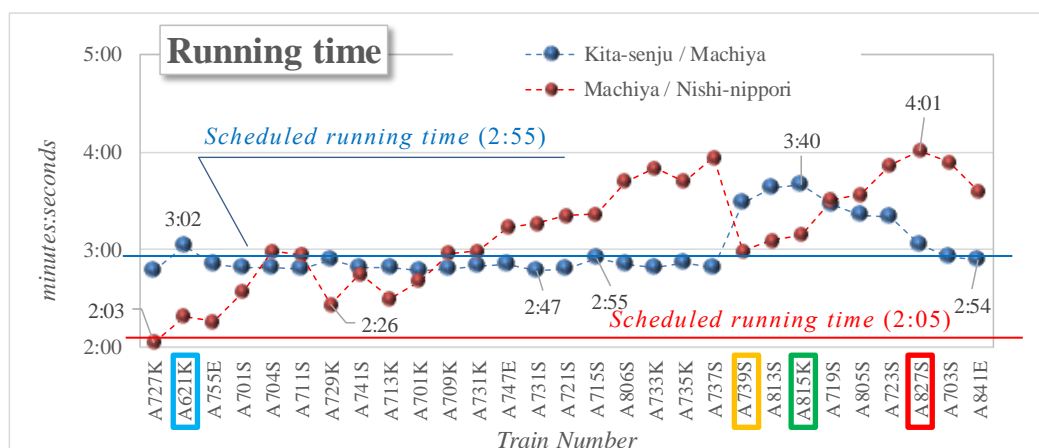


図 5.3 運転時間の実績

- (2) 実際の時隔は、ほぼ全列車について、最小追い込み時間より大きく、また列車毎にバラツキが見られる。更に、連続する北千住駅と町屋駅を比較すると、バラツキ状況にも差異が見られる(図 5.4)。これは、駅間停止によって先行列車との間隔が開く場合があることや、実際の時隔は列車が駅に進入する時の走行速度等によって変動する<sup>39</sup>などの要因によるものである。

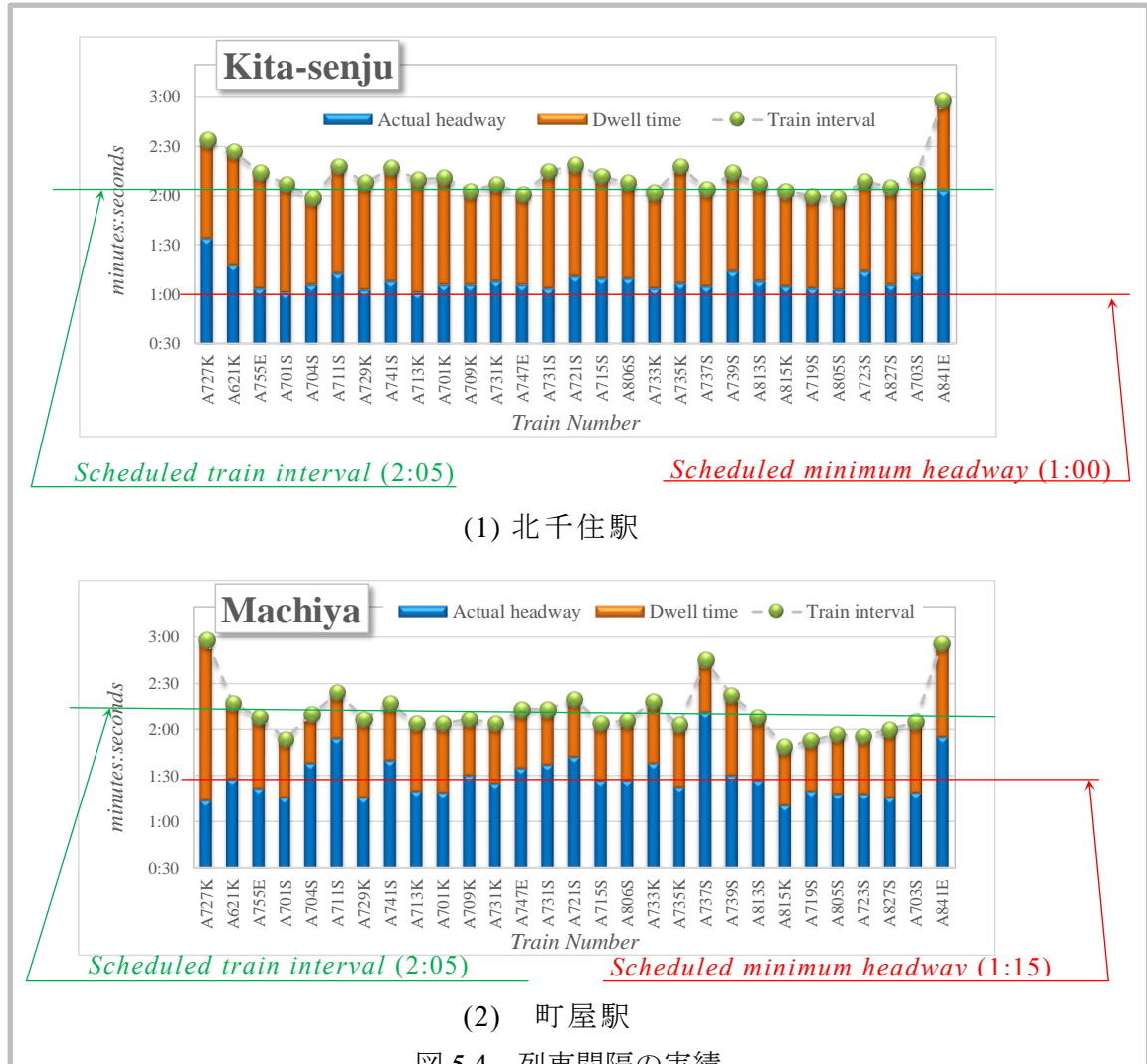


図 5.4 列車間隔の実績

(3) 実績列車間隔（ある列車の着から次の列車の着までの時間）は、実績駅停車時間と実績時隔の和に等しくなっている。このことから、余裕時間は、遅延のために食いつぶされていることがわかる（図 5.4。なお、北千住駅、町屋駅の所定駅停車時間は、それぞれ、60 秒、45 秒である）。

(4) 先行列車の駅停車時間が延びると、後続列車のその駅までの運転時間が増大する。ただし、その間には、規則性は見出せない（図 5.5 は一例である）。これらの傾向は、他の小乱れの日についても同様であった。

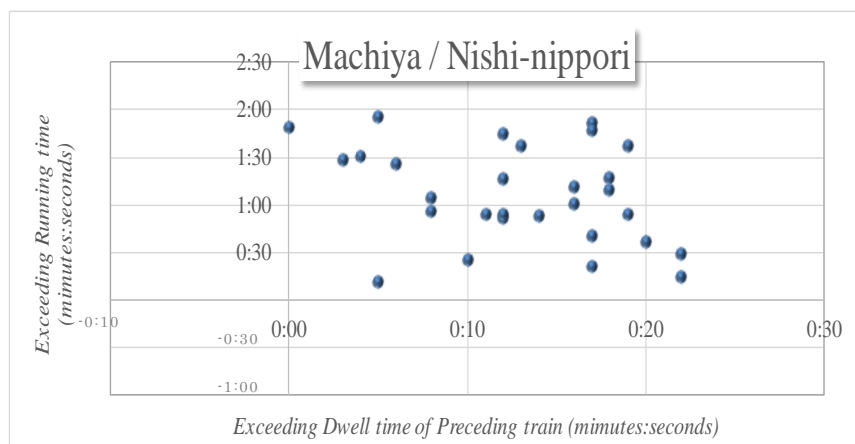


図 5.5 前列車の駅停車時間に対する後続列車の運転時間

これらのことは、次を示唆している。

- (1) 精度の高いシミュレーションを実現するためには、時隔、運転時間については、計算で算出される最小追い込み時間、基準運転時間ではなく、現実に出現する値（実質的な最小追い込み時間、実質的な最小運転時間）を使用する必要がある。
- (2) (5.2) 式は、理論上の最小値である基準運転時間を用いているため、第二項よりも第一項が支配的となる。すなわち、到着時刻は、「時隔」を主たる要因として決定されることになる。一方、図 5.4 からわかるように、実際の時隔は、最小追い込み時間よりも大きく、またバラツキが大きい。かつ、図 5.5 からわかるように、駅停車時間との明らかな相関も見られない。このことから、時隔を主たる要因として到着時刻を決定する方式では、列車運行を正確に予測することは難しい。そのため、到着時刻の推定については、(5.2) 式は適切ではなく、(5.2) 式に代わる新たな式を用いる必要がある。

## 5.4 前方駅での発車時間差に基づく列車運行シミュレーション方式

### 5.4.1 基本的考え方

本章では、macroscopic model を用いつつも前節での分析によって見出された問題を解決するために、次の考え方に基づく列車運行シミュレーション方式を提案する。

- ① 駅停車時間、時隔については、ある程度の期間にわたる運行実績データを用いて、現実的であると考えられる値を決定する。
- ② (5.2) 式にかわって、(5.3) 式を提案する。

$$\text{到着時刻} = \max (\text{先行列車の発時刻} + \text{時隔}, \text{当該列車の後方駅発時刻} + \text{予想運転時間}, \text{計画着時刻}) \dots\dots\dots (5.3)$$

各列車の実際の運転時間や駅停車時間、時隔は、運行実績データから知ることができる。従って、必要に応じて、列車ごとに運転時間、駅停車時間、時隔の長期間にわたる実績データを取得し、そのデータをもとに、これらの値を決定することも可能である。これにより、よりきめ細かく実態に即して、これらの値を決定できる。

(5.3) 式を提案する背景は、次のとおりである。

図 5.6 に示すように、先行列車 (Train j-1) の駅 i での駅停車時間が増大し、遅延が発生した場合 (実績を赤線で示す)、後続列車 (Train j) の実際の運転時間は基準運転時間よりも大きくなる。この時、「状況」に合致した運転時間 (これを、予想運転時間と呼ぶ) の推定が可能であれば、運転時間を主たる要因として到着時刻を決定することによって、到着時刻をより正確に予測できる可能性がある。

なお、図 5.6 内の各記号の意味は、以下のとおりである。

- $RR_{ij}$  : 列車 j の駅間 i における運転時間
- $RD_{i(j-1)}$  : 列車 j-1 の駅 i における駅停車時間
- $m_p$  : 時隔

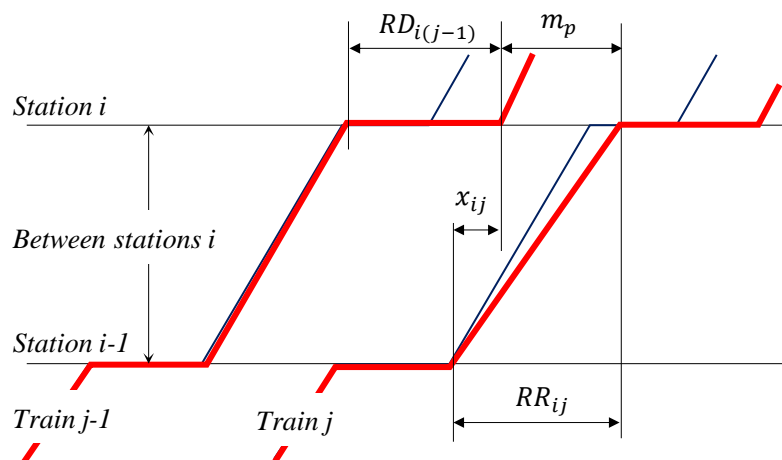


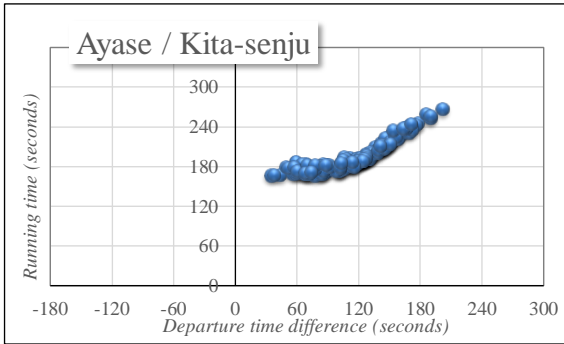
図 5.6 駅停車時間増大に伴う運転時間の増大

### 5.4.2 予想運転時間の推定

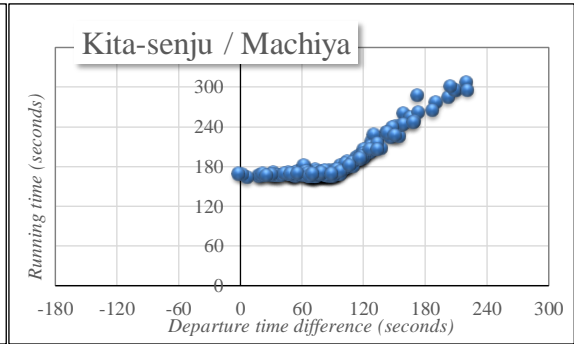
前節の議論に基づいて、「状況」に応じた運転時間を推定する方法について検討した（以下の記号は、図 5.6 と同様である）。列車  $j$  の駅間  $i$  における運転時間  $RR_{ij}$  は、先行する列車  $j-1$  の駅  $i$  における駅停車時間  $RD_{i(j-1)}$  に起因して増大する。列車が稠密に運転されており、かつ、駅間距離が比較的短い路線においては、その値は、駅  $i$  における列車  $j-1$  の発時刻を  $y_1$ 、駅  $i-1$  における列車  $j$  の発時刻を  $y_2$  として、 $x_{ij} = y_1 - y_2$ （以下、出発時間差という）の関数になる。

$$RR_{ij} = f(x_{ij}) \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

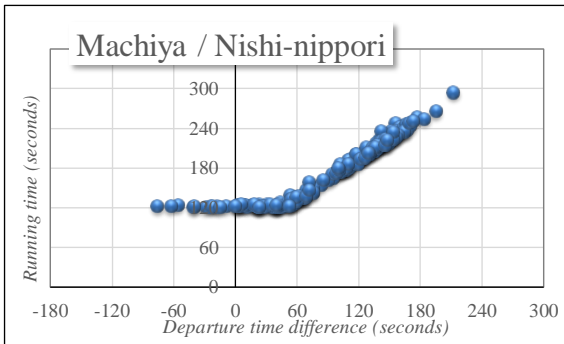
このことについて、運行実績データから関数  $f$  の推定が可能かどうかの分析を行なった。その結果（一部）を図 5.7 に示す。



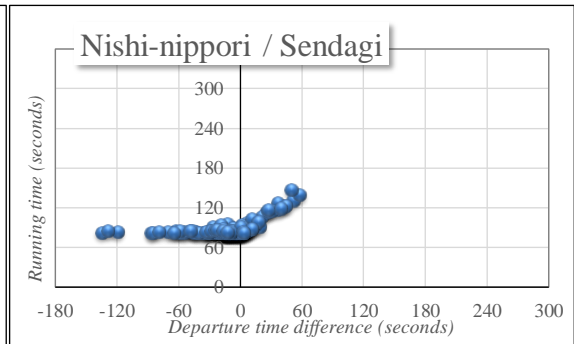
(1)綾瀬～北千住間



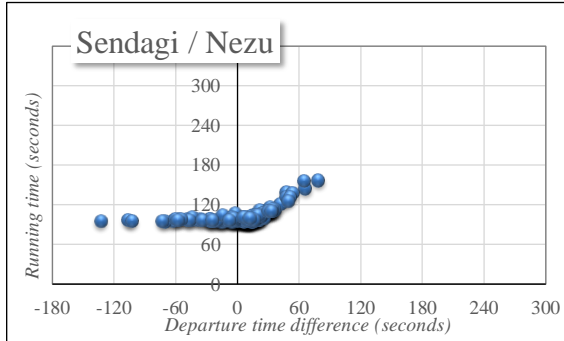
(2)北千住～町屋間



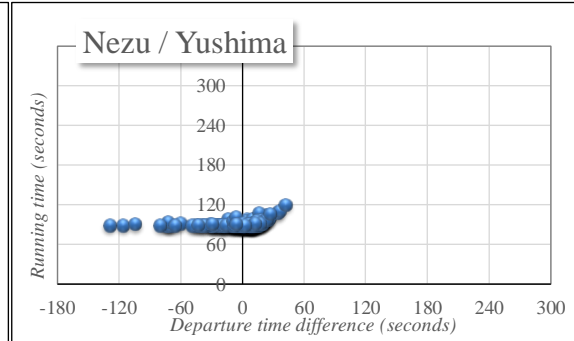
(3)町屋～西日暮里間



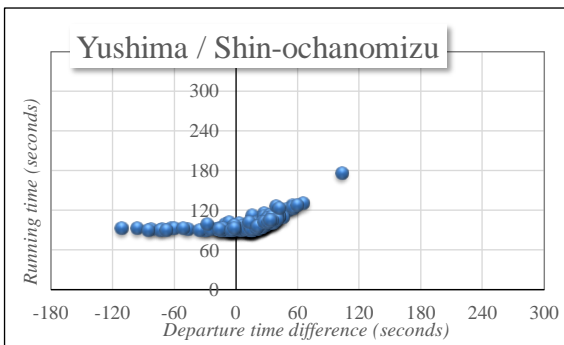
(4)西日暮里～千駄木間



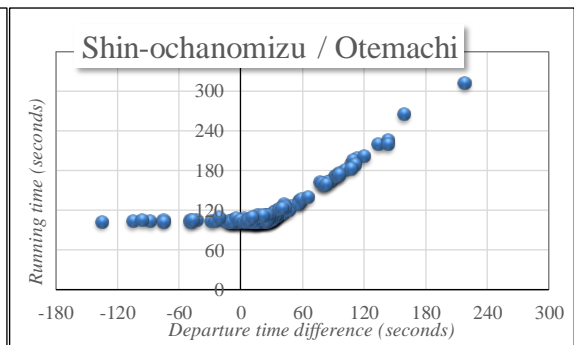
(5)千駄木～根津間



(6)根津～湯島間



(7)湯島～新御茶ノ水間



(8)新御茶ノ水～大手町間

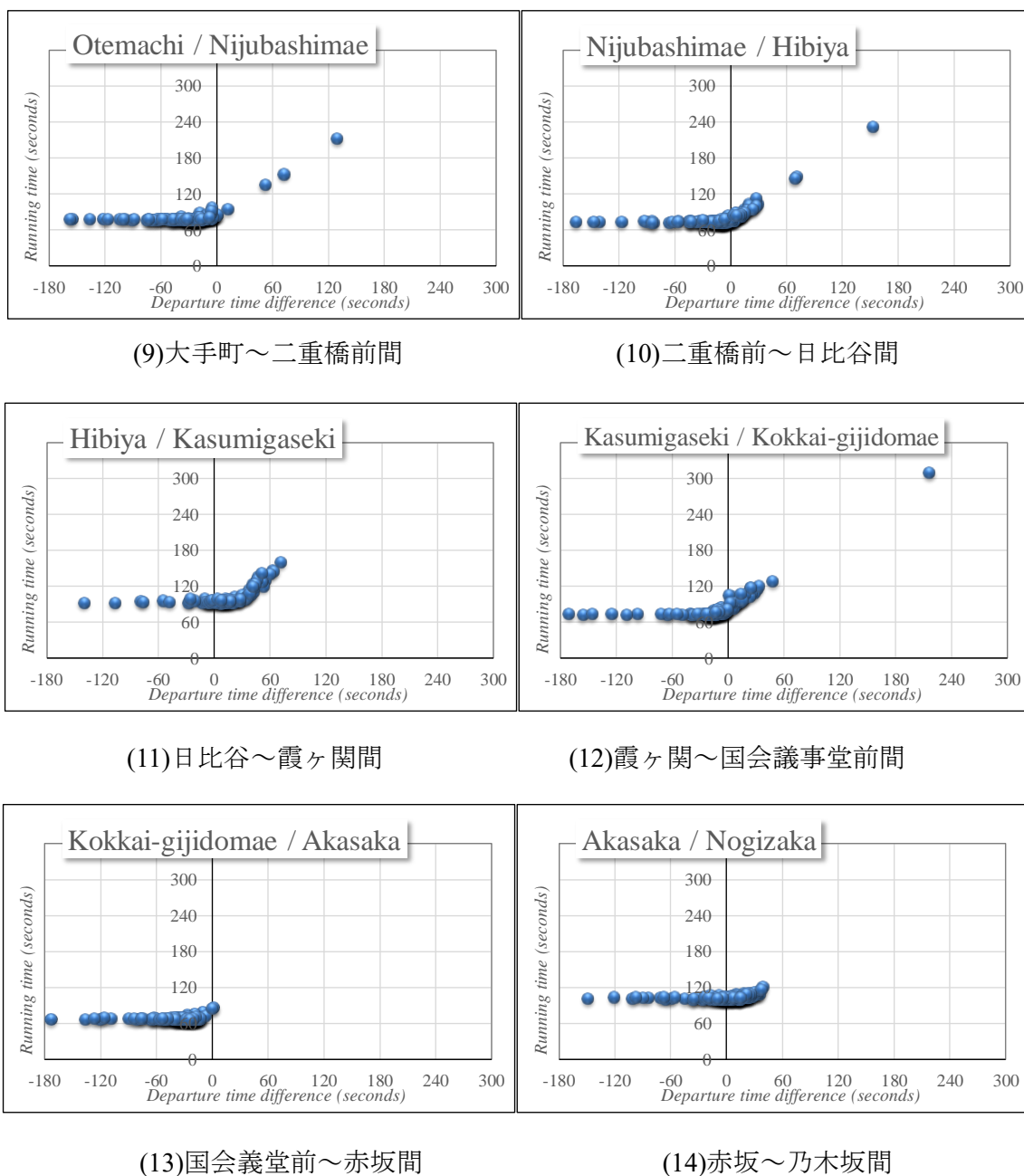


図 5.7 千代田線各駅間の運転時間特性図

図 5.7 の分析に用いたデータは以下のとおりである。

- (1) 対象路線：東京メトロ千代田線
- (2) 対象日：2017 年 9 月の平日 4 日間（大きな輸送障害がないにも係らず 5 分以上の遅延が発生した平日。詳細を表 5.1 に示す）



(3) 対象時間帯：運行本数が稠密になる朝ラッシュ 2 時間

(4) 対象列車本数：52 本/日

表 5.1 運転時間特性抽出に用いた列車運行実績データ

Date	Maximum Delay	Article
2017. 9. 5(TUE)	6'00"	3 minutes trouble occurred at 8:17 in Yoyogi-uehara
2017.9.11(MON)	10'00"	4 minutes trouble occurred at 7:37 in Odakyu line
2017.9.19(TUE)	8'47"	2 minutes trouble occurred at 7:48 in Nishi-nippori
2017.9.29(FRI)	5'00"	2.5 minutes trouble occurred at 7:19 in Nishi-nippori

図 5.7 を運転時間特性図と名付ける。横軸は出発時間差 $x_{ij}$ ，縦軸は運転時間 $RR_{ij}$ で、綾瀬駅～乃木坂駅までの各駅間の運転時間特性を示している。

各区間の運転時間特性を比較すると、綾瀬～北千住間，北千住～町屋間などのように運転時間が増大しやすい区間と，根津～湯島間，国会議事堂～赤坂間などのように増大しにくい区間がある。また，増大しやすい区間では，運転時間が一定の領域と，線形的に増大する領域に分けられる。

運転時間特性がこのような形状になる理由は，次の通りである。

- ・ 出発時間差がある値より小さい場合，後続列車は，先行列車の影響を受けることなく駅に到着することができる。そのため，この時の運転時間は，実質的な最小運転時間に一致する。
- ・ 出発時間差がある値を越えると，後続列車は，先行列車の影響を受けて走行することになり，走行速度の低下や駅間停止が発生する。そのため，出発時間差に比例して，運転時間が大きくなる。
- ・ ただし，駅によって閉そくの切り方や信号現示系統が異なり，それに伴って運転士の

運転の仕方も異なるため、運転時間が大きくなる度合いは、駅によって異なる。

図 5.7 から、駅間  $i$  の一定領域と線形増大領域の境界となる出発時間差を  $x_{mi}$  , 一定領域の運転時間を  $r_{mi}$  とすると、予想運転時間  $r_{(x_i)}$  は、次の式によって算出できる。

$$x_i \leq x_{mi} \text{の時,} \\ r_{(x_i)} = r_{mi} \quad \dots\dots\dots(5.5)$$

$$x_i > x_{mi} \text{の時,} \\ r_{(x_i)} = a_i x_i + b_i \quad \dots\dots\dots(5.6)$$

ここで、 $a_i$  ,  $b_i$  は、駅間  $i$  に対する係数（運転時間係数と呼ぶことにする）で、図 5.7 における  $x_i > x_{mi}$  の部分を線形近似することで求められる。また、 $r_{mi}$  は、駅間  $i$  の実質的な最小運転時間に相当する。これら  $a_i$  ,  $b_i$  ,  $r_{mi}$  は、駅・方向毎に定められる。また、境界値  $x_{mi}$  は、

$$x_{mi} = \frac{r_{mi} - b_i}{a_i} \quad \dots\dots\dots(5.7)$$

として算出される。

図 5.7 から求めた千代田線各駅間の運転時間係数を表 5.2 に示す。表 5.2 に示すように、駅間によって  $a$  ,  $b$  の値が異なっている。 $a$  の値が大きいことは、その駅間では、出発時間差がわずかに大きくなった場合でも、運転時間が大きく延びることを意味している。これは、例えば、閉そくが細かく切られており、先行列車が停車している場合でもその駅に接近できる駅においては、いったん駅間停止が発生すると、駅に近いので、再起動後、高い速度を出すことができず、その結果、運転時間が大きくなるなどの場合に発生する。

表 5.2 千代田線各駅間の運転時間係数

Between stations	Running time of prescribed area ( $r_m$ )	Coefficient ( $a$ )	Constant ( $b$ )	Departure time difference ( $x_m$ )
Ayase / Kita-senju	174.6	0.97	71.72	106.06
Kita-senju / Machiya	169.1	1.10	67.71	92.17
Machiya / Nishi-nippori	122	1.03	70.51	49.99
Nishi-nippori / Sendagi	83.5	0.83	86.01	-3.02
Sendagi / Nezu	98.1	1.29	70.28	21.56
Nezu / Yushima	90.1	1.29	71.32	14.55
Yushima / Shin-ochanomizu	93.2	0.83	78.85	17.28
Shin-ochanomizu / Otemachi	105.3	1.04	77.96	26.28
Otemachi / Nijubashimae	77.2	0.85	89.27	-14.20
Nijubashimae / Hibiya	73.4	0.94	78.18	-5.08
Hibiya / Kasumigaseki	94.8	1.43	57.15	26.32
Kasumigaseki / Kokkai-gijidomae	73.6	1.05	83.80	-9.71
Kokkai-gijidomae / Akasaka	67.8	0.70	80.23	-17.75

### 5.4.3 シミュレーションアルゴリズム

最長経路法にもとづく従来のアルゴリズムでは、前述のように、到着時刻を (5.2) 式によって算出していた。これを、(5.3) 式を用いて到着時刻を算出するように修正することによって、本章で提案する出発時間差から運転時間を推定する手法にもとづくシミュレータの構築が可能になる。

また、分岐線がなく、同一性能の列車が連続して走行する待避がないダイヤに対して、一方の列車のみをシミュレーション対象とする場合には、さらに簡便なアルゴリズムによるシミュレータの実現が可能である。このアルゴリズムを次に示す。

#### シミュレータメイン

1. 駅 0 での列車  $n$  ( $n=0, \dots, N$ ) の発時刻 ← 列車  $n$  の駅 0 での実績発時刻
2. 列車 0 の駅  $m$  ( $m=1, \dots, M$ ) の着時刻 ← 列車 0 の駅  $m$  での実績着時刻
3. 列車 0 の駅  $m$  ( $m=1, \dots, M$ ) の発時刻 ← 列車 0 の駅  $m$  での実績発時刻
4. **for** ( $m$  を 1 から  $M$  まで 1 ずつ増やす)
5. **for** ( $n$  を 1 から  $N$  まで 1 ずつ増やす)
6. 列車  $n$  の駅  $m$  の着時刻  
 ←  $\max$  (列車  $n$  の駅  $m$  の計画着時刻,  
 列車  $n-1$  の駅  $m$  の発時刻 + 駅  $m$  の時隔,  
 列車  $n$  の駅  $m-1$  の発時刻 + 列車  $n$  の駅  $m-1$  から駅  $m$  までの予想運転時間)
7. 列車  $n$  の駅  $m$  の発時刻

← max (列車  $n$  の駅  $m$  の計画発時刻,  
列車  $n$  の駅  $m$  の着時刻 + 駅  $m$  での駅停車時間)

8. **endfor**

9. **endfor**

### 列車 $n$ の駅 $m-1$ ~ 駅 $m$ までの予想運転時間を算出する関数

1.  $x$  ← 列車  $n-1$  の駅  $m$  の発時刻 - 列車  $n$  の駅  $m-1$  の発時刻
2. **if** ( $x \leq ((\text{駅 } m-1 \text{ から駅 } m \text{ の運転時間} - b_m) / a_m)$ )  
**return** 駅  $m-1$  から駅  $m$  の運転時間
3. **else return** ( $a_m * x + b_m$ )

このアルゴリズムは、シミュレーション対象範囲の最初の駅の各列車の発時刻と最初の列車の各駅の着発時刻が与えられたときに、(5.1)式と(5.3)式を繰り返し適用しながら、その後の列車の各駅の着時刻と発時刻を求めていく。なお、 $a_m$ 、 $b_m$  は、前節で導入した運転時間係数である。

このアルゴリズムは、単純な二重の繰り返しのみを行なうアルゴリズムであるので、最長経路法において必要であったトポロジカルオーダリング<sup>40</sup>や、各経路からの重みを比較してそのノードへの最長経路の重みをその都度決定する処理が不要となり、より高速に動作する。このアルゴリズムは、シンプルであるため、既存の表計算ソフトウェア等への実装も容易である。その場合の計算フロー概略図を図 5.8 として示す。図 5.8(1)として各記号をダイヤグラムで示し、図 5.8(2)としてシミュレーションフローを示す。シミュレーションフローで赤枠として示している駅の駅停車時間は列車運行実績データを使用し、運転時間特性は表 5.2 を使用している。なお、シミュレーション対象範囲の最初の駅の発遅延と最初の列車の実績時刻が与えられた時に、その後の列車運行をシミュレートする手順を記述したが、ある駅のある列車の駅停車時間が外乱によって延びた場合をシミュレートしたい時には、該当する箇所の駅停車時間にその値を設定しておくことで対応可能である。

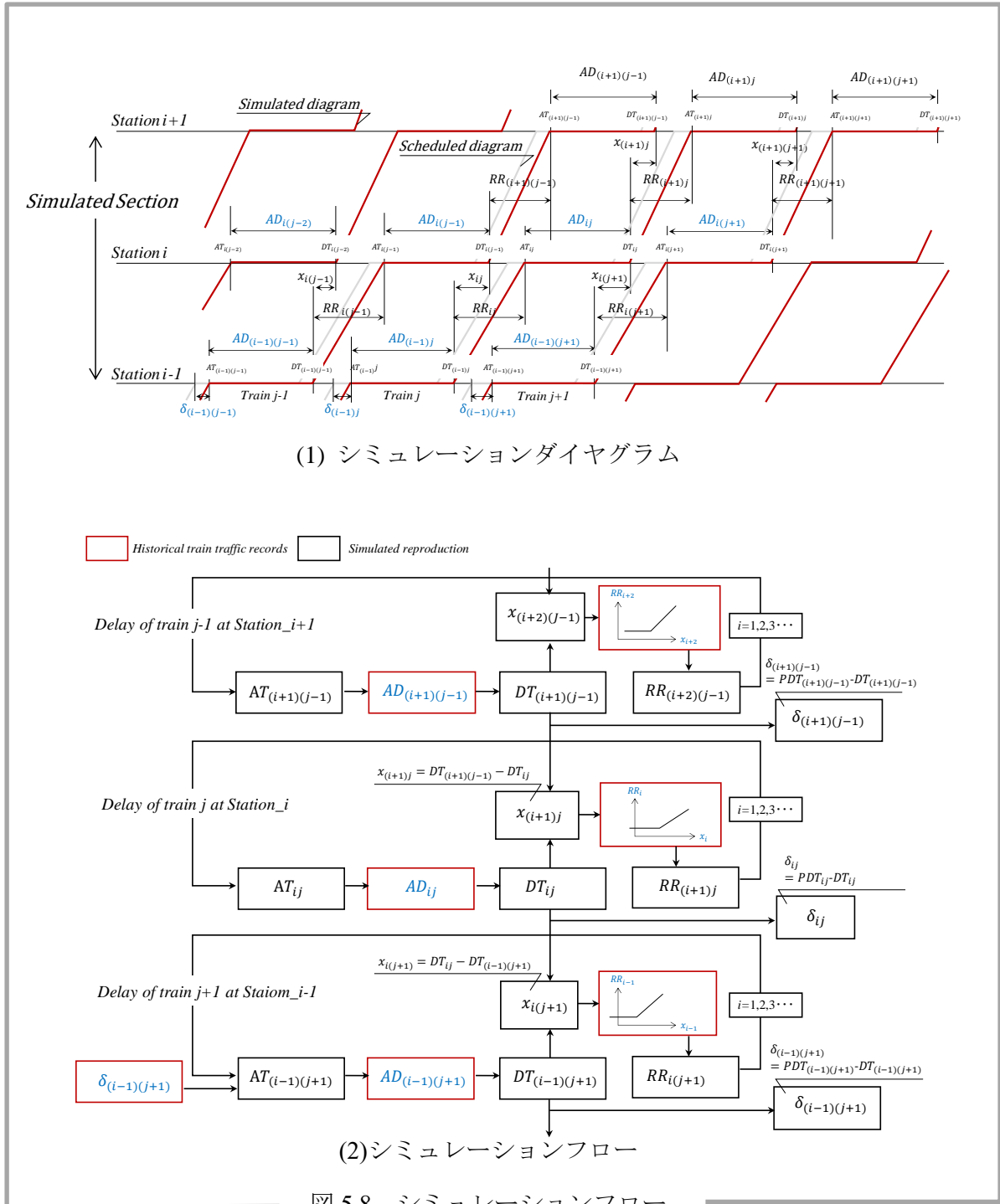


図 5.8 シミュレーションフロー

## 5.5 妥当性の検証

提案アルゴリズムによるシミュレーション結果と、実際の運行実績データとの比較により、提案アルゴリズムの再現性を評価する。具体的には、次の4項目について、実績とシミュレーション結果を比較する。

- ① 遅延の発生と増大の状況 - 具体的には、問題となる値以上の遅延が生じ始める時間・場所（駅）およびその後の遅延の伝播状況
- ② 一定値（本章では、95秒とする）以上の遅延が生じた列車の本数
- ③ 対象区間における運転時間の増大量の合計
- ④ 対象区間の各駅の着遅延

なお、対象区間は、線区始端駅から遅延が最大となる駅の次の駅までの区間とする。

比較結果を図5.9～図5.12に示す。使用したデータは、千代田線で、最大遅延が5分程度であった2017年10月11日である。千代田線では最大遅延が発生する駅は、霞ヶ関駅または国会議事堂駅であるため、対象区間は、線区始端の綾瀬駅から国会議事堂駅の次の赤坂駅までとした。

①、②については、クロマティックダイヤ図を示す（図5.9(1)、(2)）。クロマティックダイヤ図は、遅延を色で表したダイヤ図で、ここでは95秒以上の遅延の場合、色が赤になるように設定した。①、②については、クロマティックダイヤ図から、きわめてよく一致していると判断できる。③、④については、赤坂駅到着時の遅延を示す（図5.10(1)、(2)）。シミュレーションにあたっては、綾瀬駅出発時点の遅延（黄色線）、および綾瀬駅～赤坂駅間の各駅停車時間には、この日の実績値を用いた。シミュレーション結果として綾瀬駅～赤坂駅間の運転時間の増大量の合計（赤棒）および赤坂駅到着時点の遅延量（緑線）を比較する。

第5章 列車運行実績データの分析に基づく  
列車運行シミュレーションアルゴリズムの提案

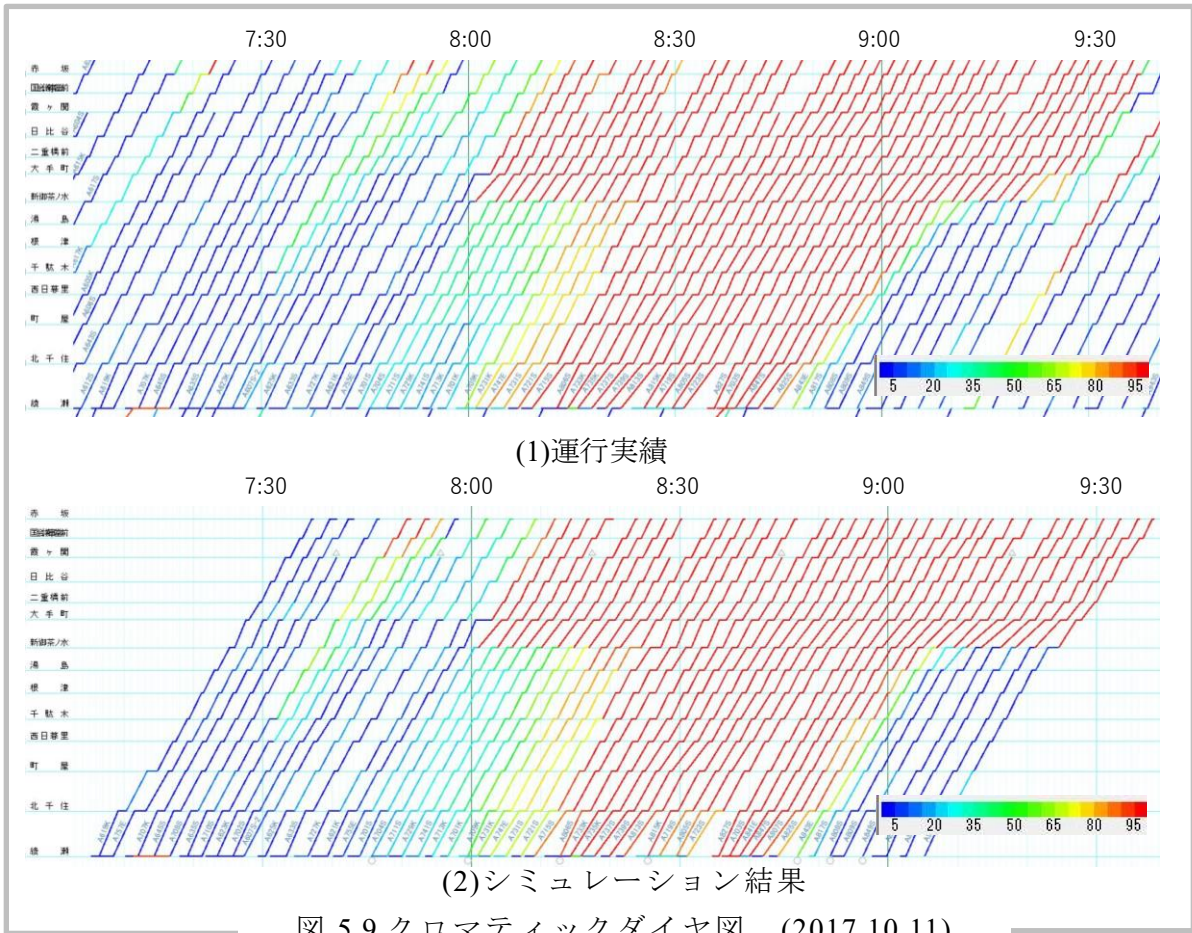


図 5.9 クロマティックダイヤ図 (2017.10.11)

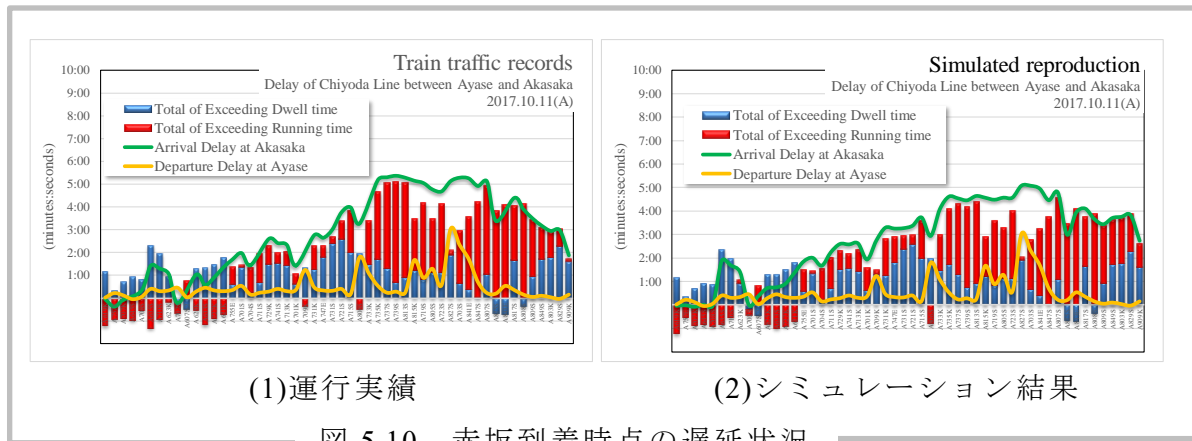


図 5.10 赤坂到着時点の遅延状況

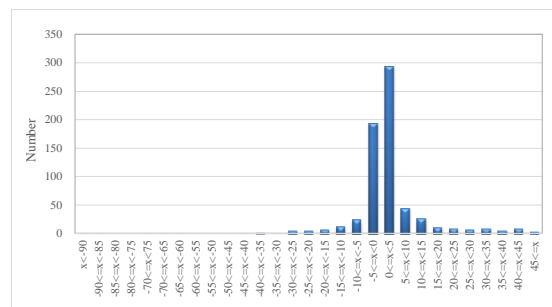
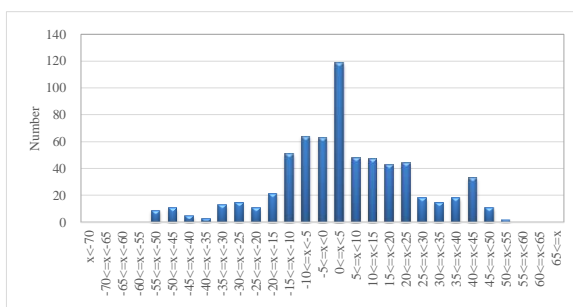


図 5.11 駅到着時刻の差異のヒストグラム

図 5.12 運転時間の差異のヒストグラム

図 5.11 に、北千住駅から赤坂駅間の全 13 駅における全 52 列車の到着遅延の差異をヒストグラムの形で示す。これは、(運行実績データ)-(シミュレーション結果)で求めた値ごとの件数である。さらに、図 5.12 に、対象範囲の全列車に対する運転時間の差異のヒストグラムを示す。

図 5.10 では、綾瀬駅～赤坂駅間の運転時間増大量、赤坂到着遅延の増減状況はよく一致していると言える。また、図 5.11 から、個々の遅延量の相違は、最大でも 1 分程度であり、概ね 30 秒程度の差異に収まっている(正確には、約 82%の事例が±30 秒以下の差異に収まっている)。また、図 5.12 からは、運転時間の差異は、概ね 15 秒程度の差異に収まっていることがわかる。実際、約 95%の事例が±30 秒以下の差異に収まっている。なお、他の小乱れの日についても実験を行なった結果、同様の結果であったことを確認した。

本手法の有効性を確認するために、各駅間について、 $a$  をすべて 1.0 としてシミュレーションを行ない、その時の着遅延の現実の結果との差異を調べた。その結果を図 5.13 に示す。図 5.11 と比較して、差異が大きいことがわかる(着遅延の値が実際よりも大きくなることは、遅延対策の効果を過小に見積もってしまうことを意味する)。この結果から、本章で提案した、運行実績データから出発時間差と運転時間の関係を見出し、それをもとに到着時刻を推定する手法は有効に機能していると言える。

ここで検討対象としているのは、5 分から 10 分程度の遅延である。このことを勘案すると、提案手法は、遅延対策の効果を推定するためのシミュレーション手法として十分な精度を有していると判断できる。

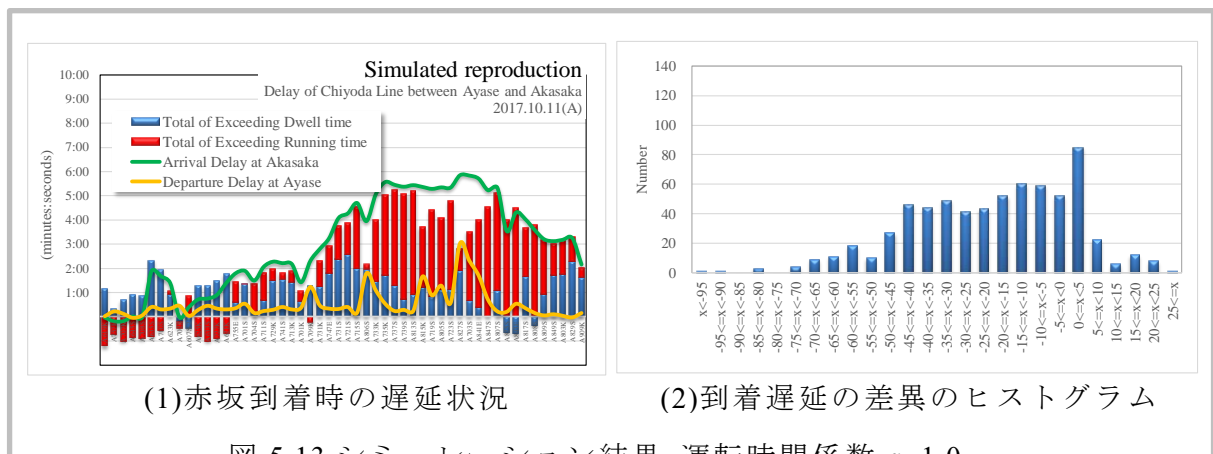


図 5.13 シミュレーション結果 運転時間係数  $a=1.0$



## 5.6 遅延対策の効果の推定への適用例

### 5.6.1 遅延対策効果の推定

本節では、本章で提案するシミュレータによる遅延対策施策の効果の推定の例を紹介する。例えば、駅停車時間の増大を防止する施策の効果の推定する場合、施策を導入した場合の各駅での駅停車時間を別途推定し、その値と、想定する初期遅延に対してシミュレーションを行なう。また、駆け込み乗車により車両ドアを再度開閉する（15～30秒程度駅停車時間が増大）など、突発的な事象による駅停車時間の増大を扱うためには、あらかじめそれら事象の発生確率と増大時間を求めておき、それに沿って駅停車時間を増大させて、シミュレーションを行なう。これにより、ダイヤ全体に対する効果を推定することが可能になる。

### 5.6.2 乗降促進要員配置の効果推定の適用例

小規模の遅延は、ほとんどの場合、駅停車時間の増大によって引き起こされる。また、駅停車時間が増大する要因としては、混雑に伴う乗降時間の増大、駆け込み乗車などに伴う再開扉などがある。それらを防ぐための対策として、ホームに十分な数の乗降促進要員を配置することがありうる。しかし、乗降促進要員の配置には、多くの要員の確保が必要になり、多大なコストが発生する。よって、乗降促進要員の配置が遅延対策に効果的である駅を事前に見極めた上で配置する駅を決定することが望まれる。

#### 5.6.2.1 千代田線における乗降促進要員配置の検討

第2章 2.6.1 乗降促進要員の配置とその効果で述べたが、乗降促進要員を配置した駅での測定結果から、およそ1車両に1名を配置した場合、駅停車時間の短縮効果は、最大-5秒、平均-3.1秒であることが判明している。そこで、この値を用いて、乗降促進要員の配置がダイヤ全体に与える効果を推定した。

千代田線において運転時間が延び易い駅間は、運転時間特性（図 5.7）を見ると、綾瀬～北千住間、北千住～町屋間、町屋～西日暮里間、新御茶ノ水～大手町間である。4駅間のうち、北千住駅には既に乗降促進要員を配置していることから、乗降旅客の多い西

日暮里駅、大手町駅に乗降促進要員を配置した場合の効果を検討する。以下では、西日暮里駅に配置した場合の推定結果、大手町駅に配置した場合の推定結果を示す。

図 5.14 は 2017 年 10 月 11 日の朝ラッシュ時に乗降促進要員を配置した場合の効果を推定した結果である。図 5.14(1)には、図 5.10(2)で示したこの日のシミュレーション結果（黄線）と、西日暮里駅の駅停車時間のみを実績駅停車時間から 5 秒減じた値とした場合のシミュレーション結果（青線）、大手町駅の駅停車時間のみを実績駅停車時間から 5 秒減じた値とした場合のシミュレーション結果（赤線）を示す。

図 5.14 (1) 赤坂駅着遅延の比較を見ると（黄線と青線の比較）、西日暮里駅に要員を配置した場合には、ほとんど遅延短縮効果はない。一方、大手町駅に配置した場合は、特にラッシュ後半において 2 分程度の遅延縮小効果が見られ、現状よりも早期に遅延が縮小する（黄線と赤線の比較）。図 5.14 (2) の運転時間増大量の分布（この図は全駅間の全列車の運転時間増大量の分布である）からは、現状および西日暮里駅配置の場合には運転時間の増大が顕著であった列車（赤枠で示す）で、運転時間の増大は、ほぼなくなっている。このような事情から、大手町駅に乗降促進要員を配置した場合には、特にラッシュ後半に向けて遅延縮小の効果があったものと考えられる。更に、運転時間特性の変化を見ると、大手町駅に配置した場合は大手町駅で最大運転時間が 1 分 30 秒程度縮小している一方で（図 5.14 の(5)と(6)の比較）、西日暮里駅に配置しても、運転時間の縮小効果はほとんど見られない（図 5.14 の(3)と(4)の比較）。

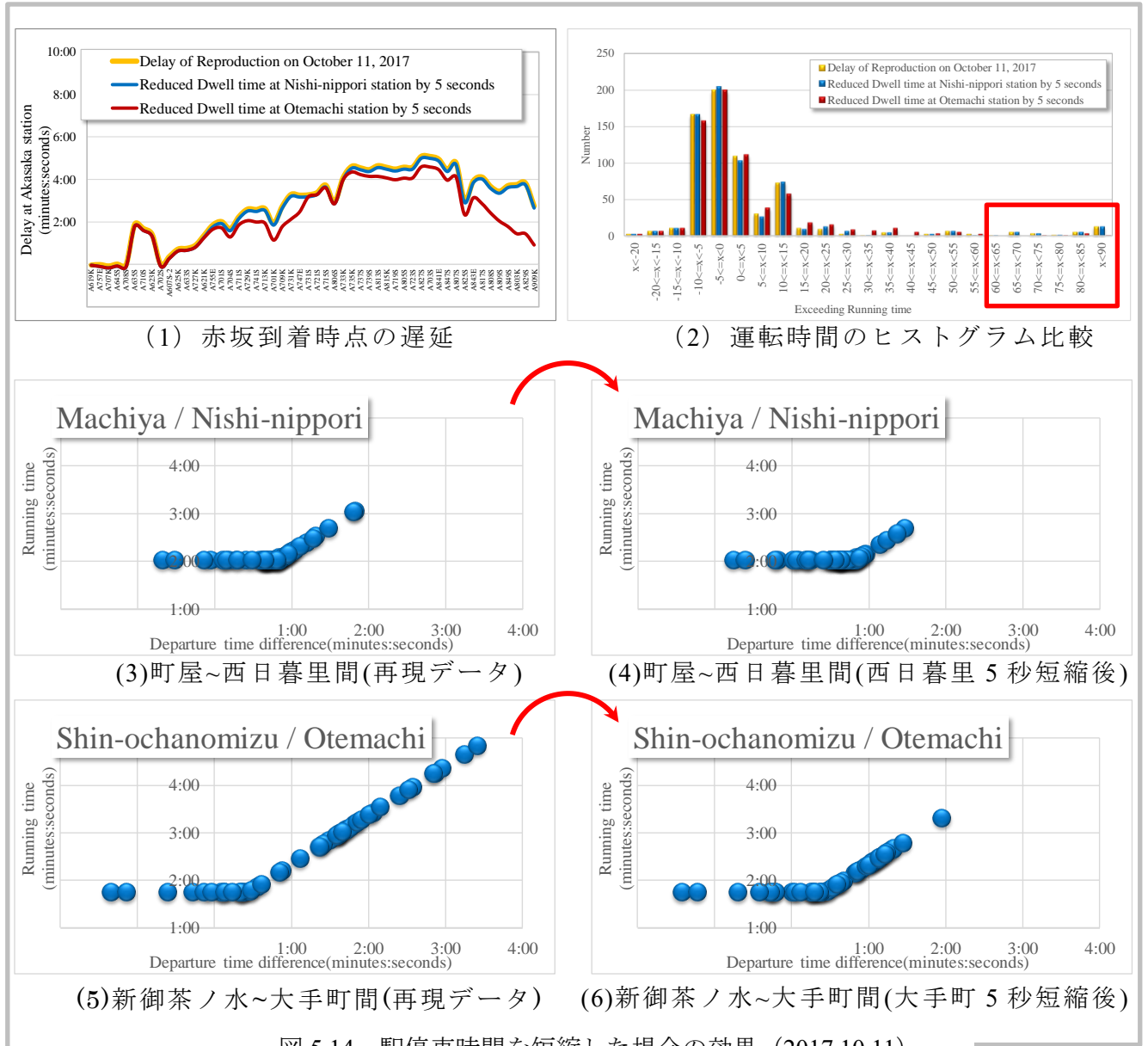


図 5.14 駅停車時間を短縮した場合の効果 (2017.10.11)

次に、図 5.15 として千代田線の 2017 年 9 月 29 日の(1)運行実績データと(2)シミュレーション結果を示す。この日の最大遅延も 4 分程度であるが、両者の遅延状況は酷似している。以下、詳細に分析する。

第 5 章 列車運行実績データの分析に基づく  
列車運行シミュレーションアルゴリズムの提案

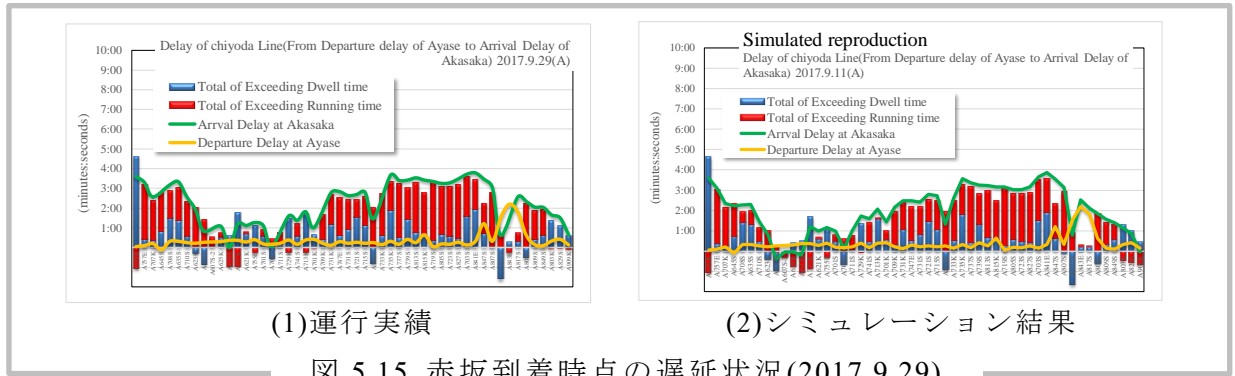


図 5.15 赤坂到着時点の遅延状況(2017.9.29)

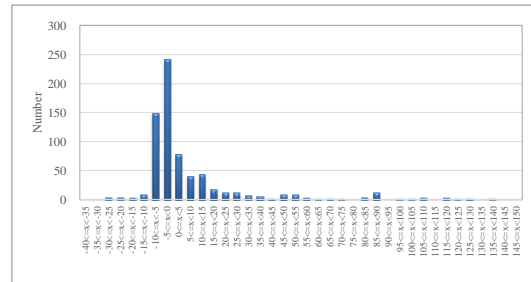
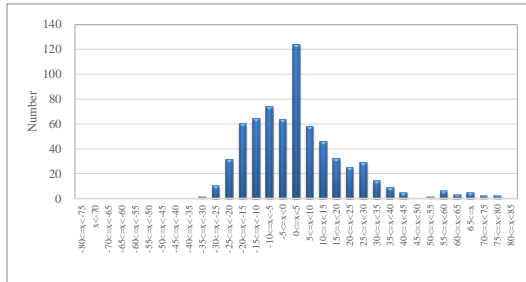


図 5.16 駅到着時刻の差異のヒストグラム

図 5.17 運転時間の差異のヒストグラム

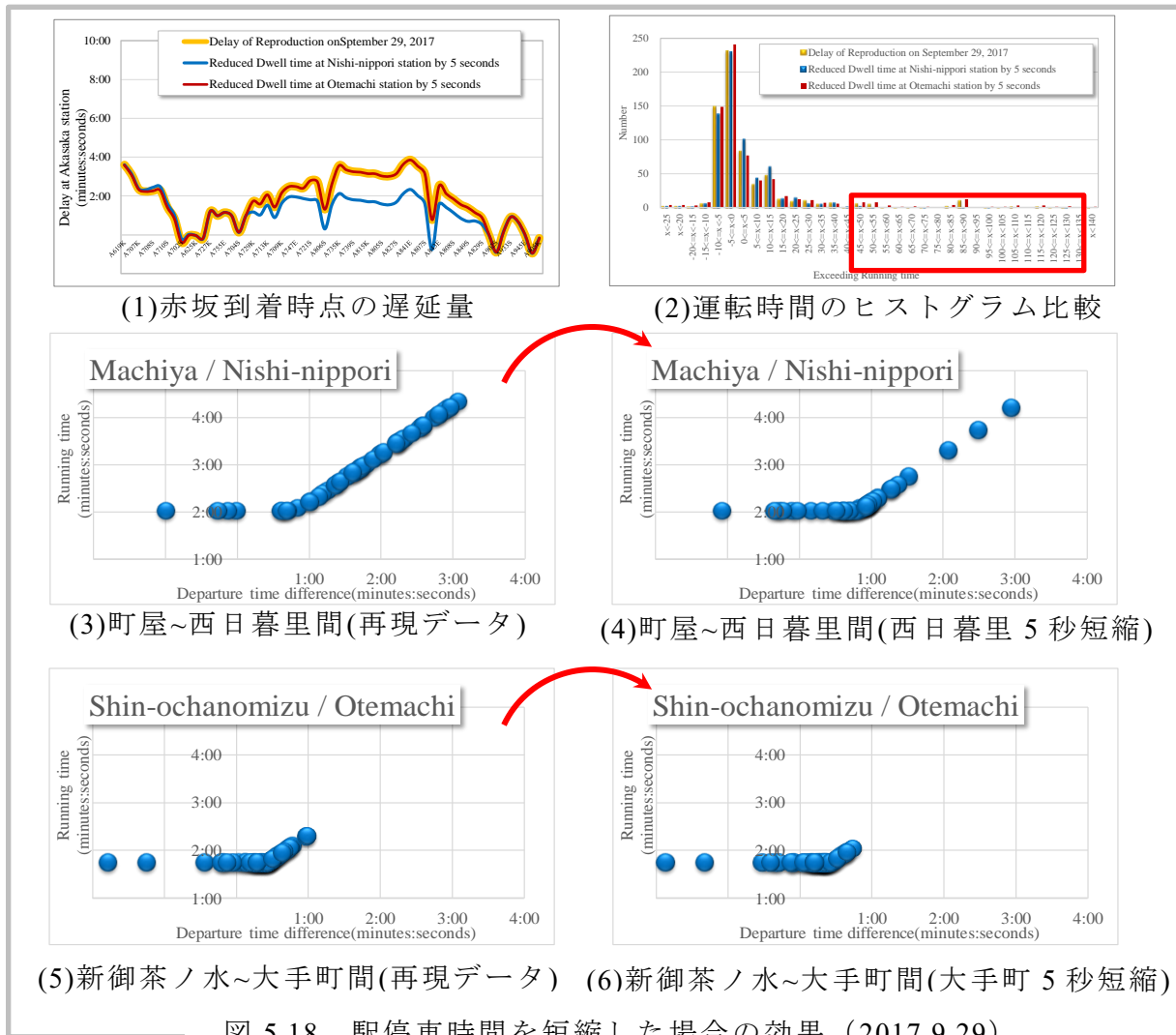


図 5.18 駅停車時間を短縮した場合の効果 (2017.9.29)

図 5.15 の運行実績とシミュレーション結果の詳細な比較として、図 5.16 に駅到着時刻の差異、図 5.17 に運転時間の差異をヒストグラムとして示す。2 時間帯の全列車の各駅到着時刻の誤差は $\pm 30$  秒以内が 93.2% (図 5.16)、各駅間の運転時間の差異は $\pm 10$  秒以内が 75.6% (図 5.17) と高い精度で再現されている。

図 5.18 に、西日暮里駅と大手町駅で各々駅停車時間を 5 秒短縮した場合の検討した結果を示す。図 5.18(1)は、現状を再現したシミュレーション結果 (黄線)、西日暮里駅の駅停車時間のみを 5 秒短縮した場合の結果 (青線) と、大手町駅の駅停車時間のみを 5 秒短縮した場合の結果 (赤線) を比較している。10 月 11 日とは異なる結果となり、大手町駅での短縮には効果がないが、西日暮里駅での短縮には 2 分程度の遅延縮小効果がみられる。

図 5.18(2)~(6)を見ると、(2)より西日暮里駅での短縮した場合に運転時間の増大がほとんどなくなっており (赤枠で示す)、(3)と(4)の比較により運転時間の増大が縮小していることがわかる。一方で、大手町駅での短縮に対しては(5)と(6)の比較により効果なかったことがわかる。なお、両日共に、町屋駅での短縮には効果が見られなかった。

どの駅に乗降促進要員を配置するのが得策であるかを決定するためには、対象日や駅停車時間の条件を変えた様々なケースに対するシミュレーションを実行し、場合によっては以下のような視点で傾向分析を行うことも必要となる。

- ・ イベントなど特殊要因の有無
- ・ 遅延の発生頻度、最大遅延量への影響、遅延全体の縮小度合い
- ・ 遅延対策の難易度
- ・ 遅延の伝播範囲

西日暮里駅と大手町駅の場合は、最大遅延や遅延全体の縮小度合いから判断すると、西日暮里駅に配置することが有効と言える。一方で、西日暮里駅で停車時間を短縮しても効果がない場合があることを踏まえて PDCA を廻し、判断する必要がある。

この様に、様々なケースに対する検討を行なうためには、本章で提案した実績データを基にしたシミュレーション方式は、非常に適していると言える。

## 5.7 列車運行シミュレーションの汎用性と効果推定値の検証

本シミュレーションを他路線に適用することで汎用性を検証すると共に、遅延対策の効果推定値の精度を検証する。この目的のため、本シミュレーションを半蔵門線に適用し、第4章 図4.8で示した遅延対策の効果推定との差異を明らかにする。

### 5.7.1 汎用性の検証 半蔵門線の列車運行シミュレーション

列車運行シミュレーションを半蔵門線に適用し汎用性を検証する。まず、半蔵門線の各駅間の運転時間特性を図5.19(1)~(10)に示す。図5.19は、第4章(図4.6など)で使用した2013年5月13日、21日、24日、30日(対策ステップ実施前)の列車運行実績データから求めたもので、いずれも最大遅延が10分以下(小規模な輸送トラブルのみ)の4日間である。

表5.3は、図5.19から求めた運転時間係数である。なお、図5.19(6)九段下~神保町間の運転時間特性は、乗務員と駅係員の連携による特殊な取り扱いの影響がでている。この区間は駅間が短く(266m)、2軌道回路となっており神保町駅で先行列車が出発した後、九段下駅の後続列車の出発信号がでる仕組みとなっていた。それを踏まえた遅延対策として、九段下駅を発車する列車は、旅客の乗降後ただちに車両ドアを閉めて出発準備を整え、出発信号がでたら直ぐに発車するという取り扱いを実施していた。そのため、九段下~神保町間の運転時間特性は、出発時間差(横軸)の変化量が少なく、運転時間は最小時間で一定である。後述する本項シミュレーション(信号設備改良の効果)では、この区間の運転時間は最小であったため、九段下駅で前列車の発車を待つことによって生じていた駅停車時間の増大量6秒(表4.2)を効果として見込む。

表5.3 半蔵門線各駅間の運転時間係数

Station-to-station name	Minimum running time (rm)	Coefficient (a)	Constant (b)	Departure time difference (xm)
Shibuya / Omote-sando	105.9	0.99	84.08	22.04
Omote-sando / Aoyama-itcho	99.9	0.91	83.54	17.98
Aoyama-itcho / Nagatacho	105.0	1.02	81.51	23.03
Nagatacho / Hanzomon	91.9	1.07	89.50	2.24
Hanzomon / Kudanshita	130.0	0.96	84.20	47.71
Kudanshita / Jimbocho	49.9	1.00	49.90	0.00
Jimbocho / Otemachi	125.9	0.92	96.30	32.17
Otemachi / Mitsukoshimae	70.0	0.94	80.19	-10.84
Mitsukoshimae / Suitengumae	119.0	1.00	77.00	42.00
Suitengumae / Kiyosumi-shira	141.0	1.05	64.97	72.41

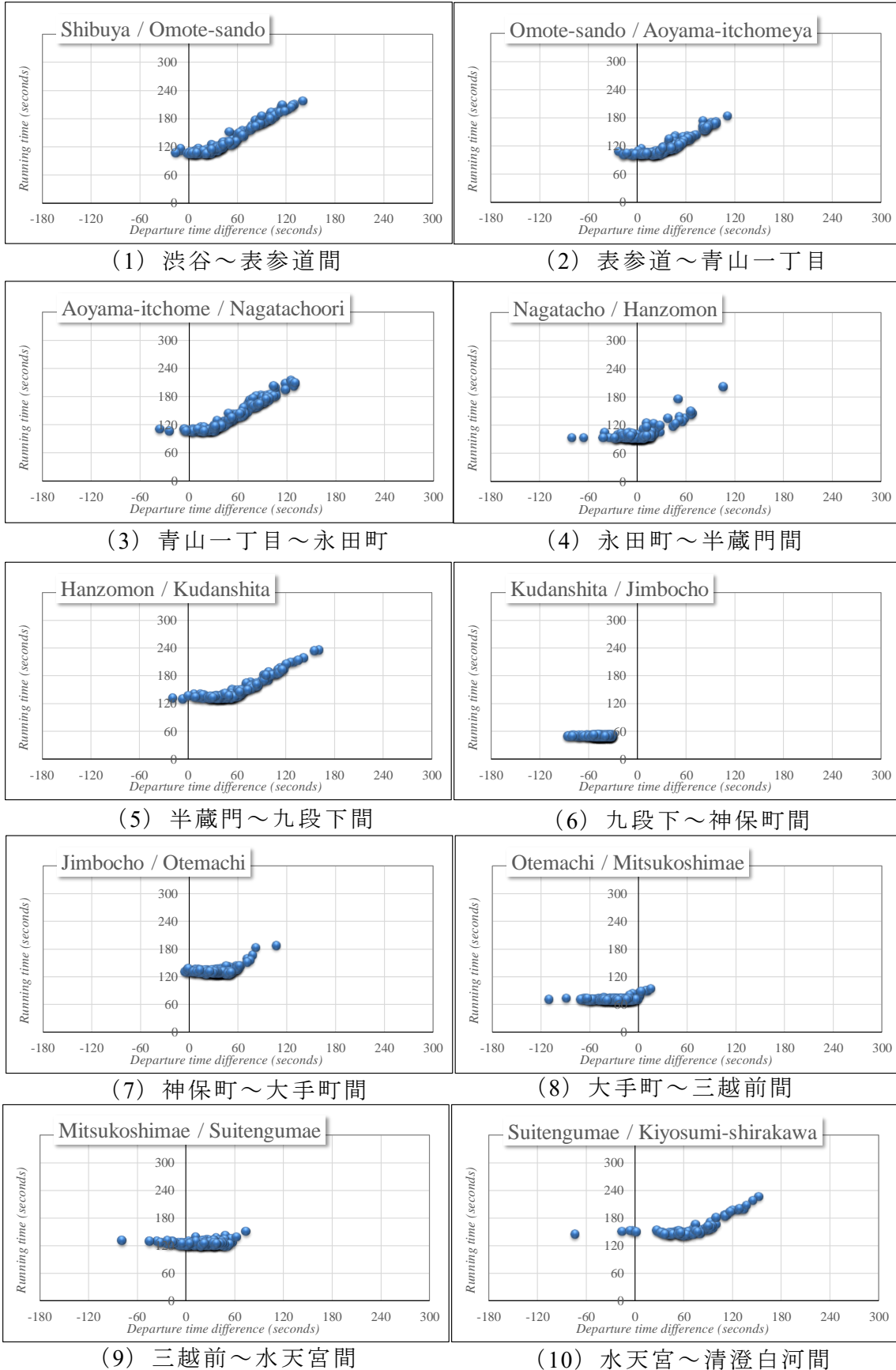


図 5.19 半蔵門線の運転時間

再現精度を確認する。図 5.20 として第 4 章の対策ステップ 1 実施前の 2013 年 5 月 30 日の渋谷から押上方向の運行の(1)運行実績と(2)シミュレーション結果を示す。千代田線遅延分析(図 5.10 など)と同様に、渋谷駅発遅延(黄線)と表参道～住吉間の駅停車時間の増大量(青棒)は運行実績データを活用し、渋谷～清澄白河間の運転時間の増大量(赤棒)、清澄白河駅到着時点の遅延量(緑線)が計算結果である。

半蔵門線の再現精度は、図 5.21 の各駅到着時刻の差異は $\pm 30$ 秒以内が 78.1%、図 5.22 の各駅間の運転時間の差異は $\pm 10$ 秒以内が 78.4%であった。ここでも千代田線と同様に高い再現精度となっており、本シミュレーションの汎用性が確認された。なお、東西線、日比谷線でも本シミュレーションの適用が可能であることを確認している。

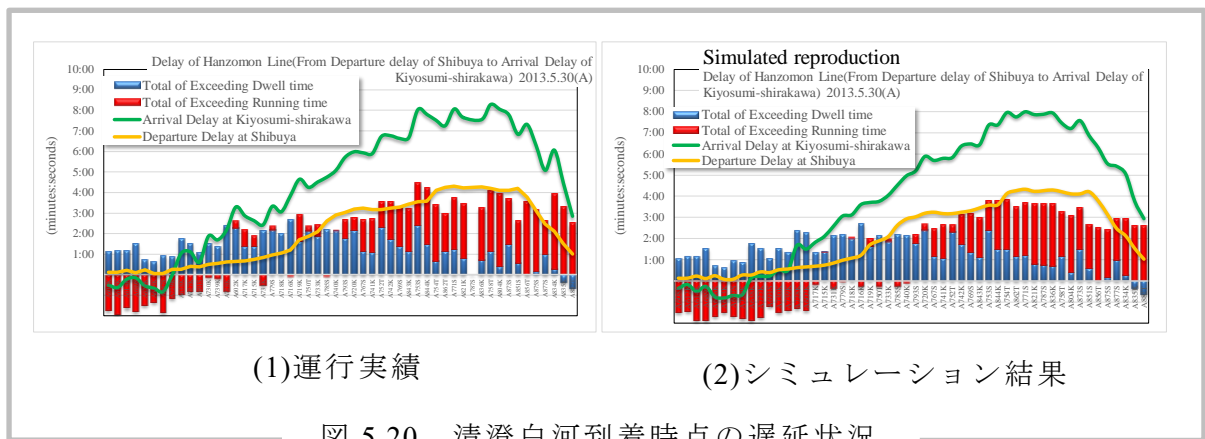


図 5.20 清澄白河到着時点の遅延状況

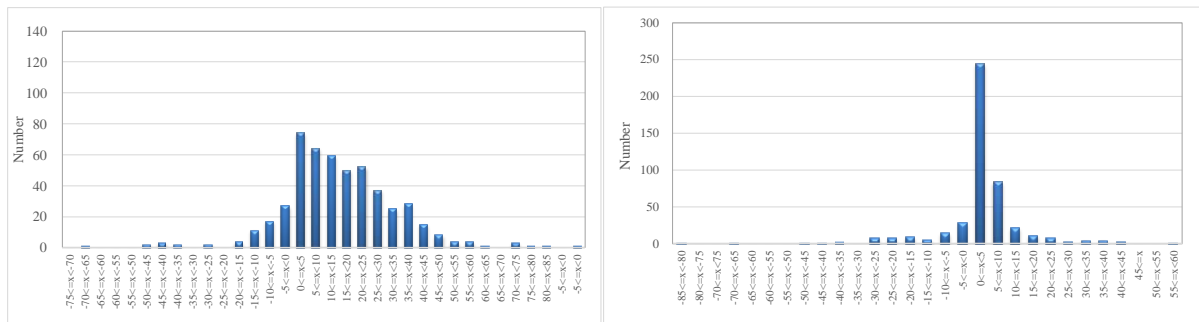


図 5.21 駅到着時刻の差異のヒストグラム 図 5.22 運転時間の差異のヒストグラム



### 5.7.2 効果推定値の検証 半蔵門線対策ステップ 1 の効果推定との比較

従来の遅延対策の効果は、運行実績から対策効果ポテンシャルを差し引くことで推定していた。その手法により求めた第 4 章 図 4.8 は、第 4 章 4.6.2 項で示した対策ステップ 1 の効果を示したもので、対策 A である永田町駅への乗降促進要員の配置と、対策 B である九段下～神保町間の信号設備の改良の効果として、対策前の ED 値と ER 値の増大が共に解消された場合の路線全体の遅延縮小効果を推定している。

図 5.23 として本シミュレーションによる効果推定結果を示す。永田町駅と九段下駅の駅停車時間を 5 秒短縮した場合の効果推定する。なお、九段下～神保町間の信号設備改良の効果は九段下駅の駅停車時間の短縮として設定した。(本項冒頭で記載)

シミュレーションの結果、永田町駅での到着遅延の短縮効果は-67 秒、九段下駅では-83 秒であった。第 4 章 図 4.8 で示した通り、遅延対策による実際の効果は、永田町駅で-69 秒 (誤差率 3.0%)、九段下駅で-79 秒 (誤差率 4.8%) であり、推定値の誤差率は共に 5%以下で実際の効果とよく一致した推定値となっていることが検証できた。

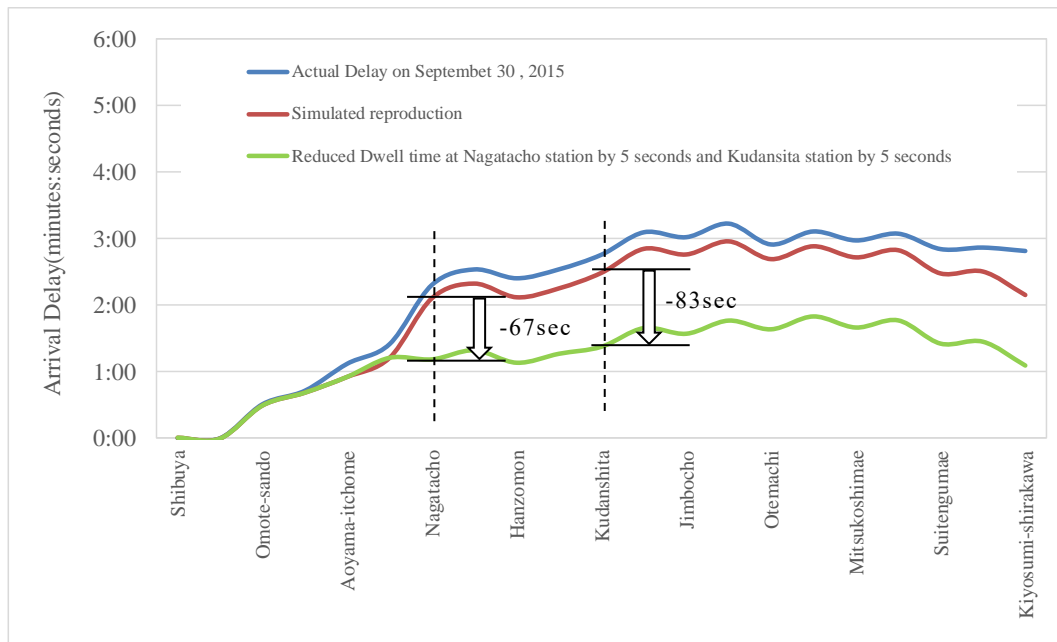


図 5.23 半蔵門線遅延対策の効果推定 (対策ステップ I)

### 5.7.3 列車運行シミュレーションの有効活用の提案

遅延は、駅停車時間の増大（自己遅延）と運転時間の増大（従属遅延）の和として発生する。対策実施駅を選定した場合、その駅において自己遅延の短縮目標値（従属遅延が解消される値）が明確になることは意義が大きい。

図 5.23 の再現データ（赤線）の運転時間特性を図 5.24 に、図 5.23 の効果推定結果（緑線）の運転時間特性を図 5.25 に示す。なお、(1)渋谷～表参道間、(2)表参道～青山一丁目間、(3)青山一丁目～永田町間の3駅間の運転時間特性であり、運行実績データ（○）と、シミュレーション結果（●）を比較している。これらから以下のことがいえる。

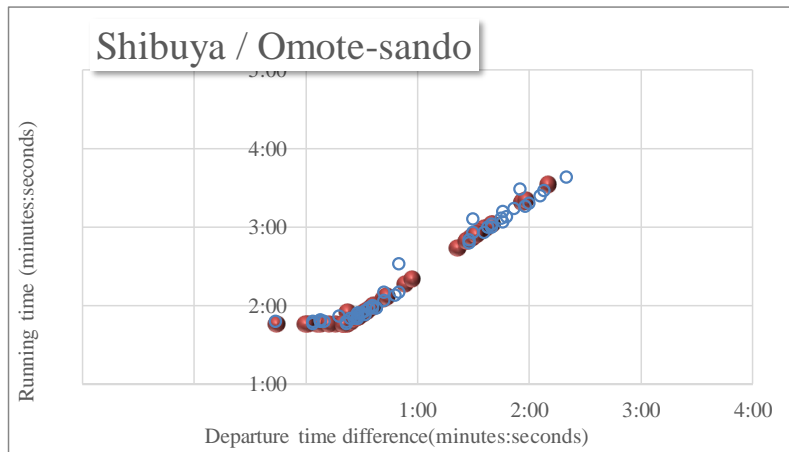
(1) 図 5.24 は、渋谷駅～永田町駅間の3区間共に運行実績データ（○）とシミュレーション結果（●）の運転時間特性の様子が、よく一致していることを示している。

(2) 図 5.25 は、永田町駅の駅停車時間を5秒短縮した場合の運転時間特性である。永田町駅の駅停車時間が5秒短縮したことで、(3)青山一丁目～永田町間の運転時間の増大が1分程度縮小していることを示している。

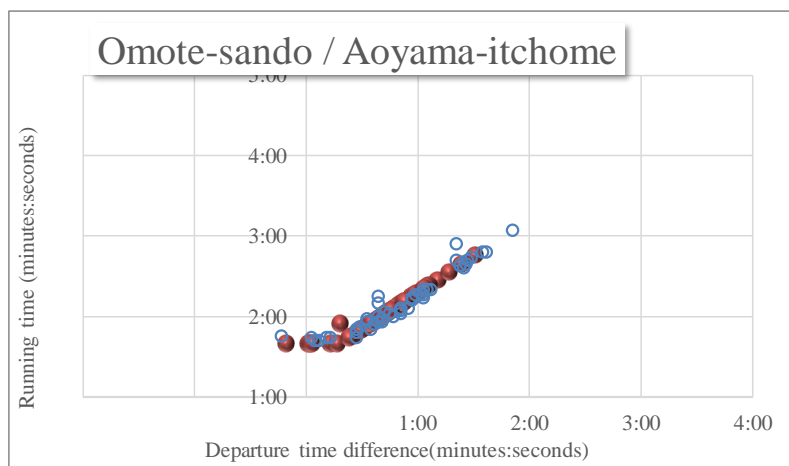
これらを踏まえて、図 5.26 として、永田町駅の駅停車時間が7秒短縮した場合の運転時間特性を示す。ここでは、7秒短縮したことで従属遅延の発生が抑えられていることが分かる。このことは、第4章表 4.2 に、実際の遅延対策効果として、永田町駅の ED 値が7秒短縮したとき、ER 値がほぼゼロ（36秒から2秒に縮小）になった事実と一致する。

このように、本シミュレーションを有効に活用することで、従属遅延を防止するための自己遅延の短縮目標値の算定などが可能である。

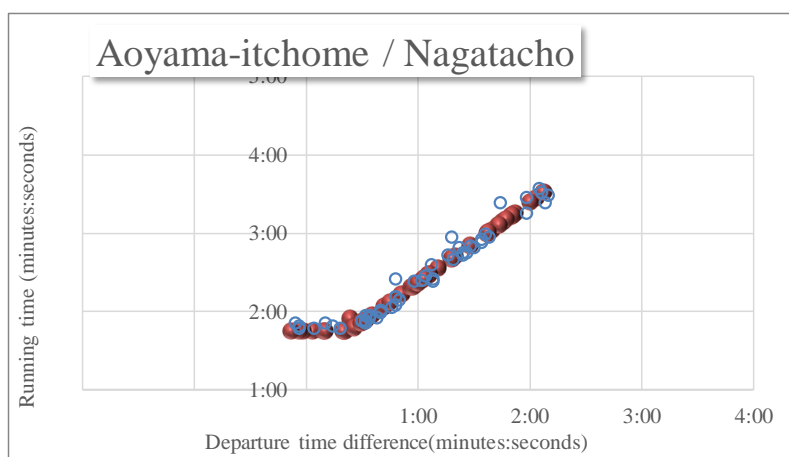
○ : 運行実績データ  
● : シミュレーション結果



(1) 渋谷～表参道間



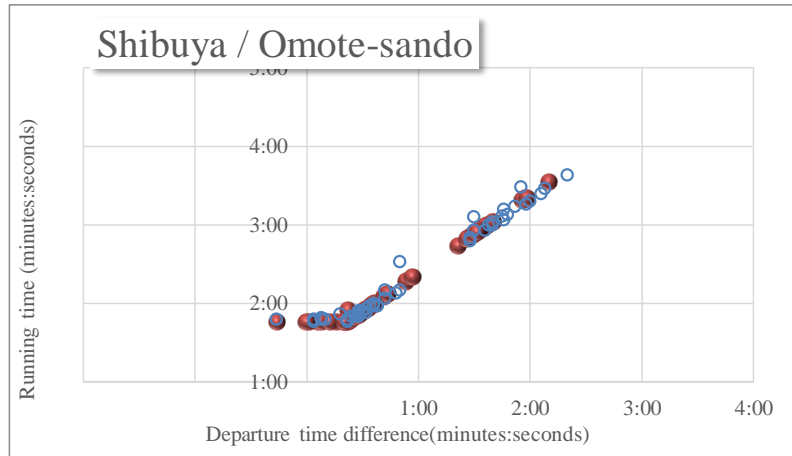
(2) 表参道～青山一丁目間



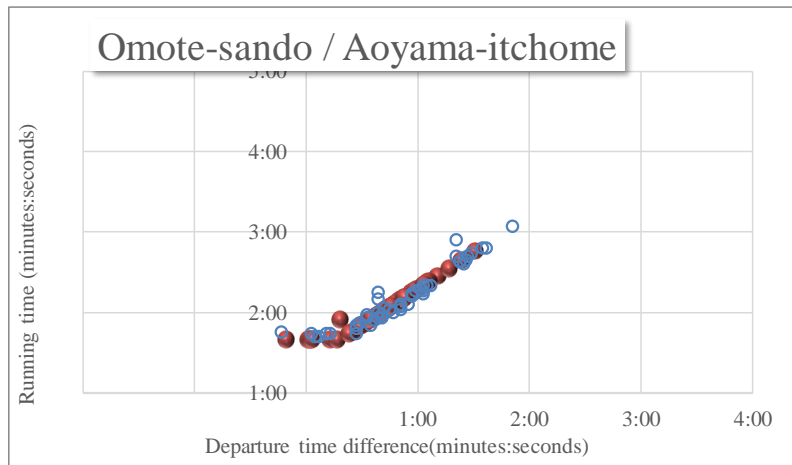
(3) 青山一丁目～永田町間

図 5.24 運行実績の再現(2013.5.30)

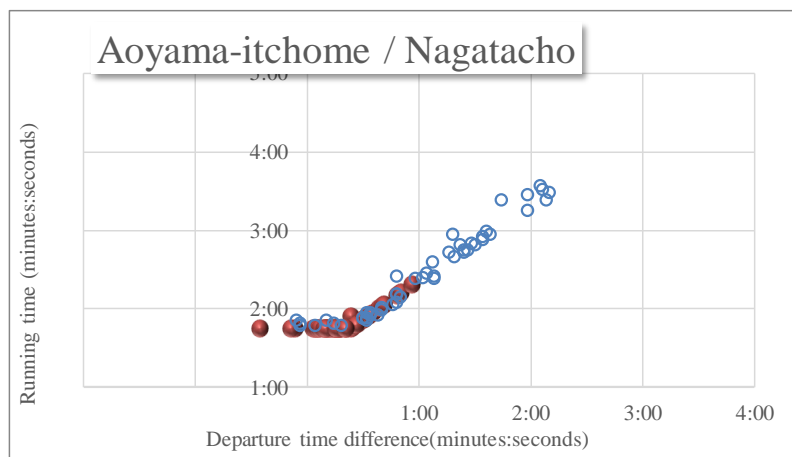
○：運行実績データ  
●：シミュレーション結果



(1) 渋谷～表参道間



(2) 表参道～青山一丁目間



(3) 青山一丁目～永田町間

図 5.25 永田町駅停車時間 5 秒短縮時

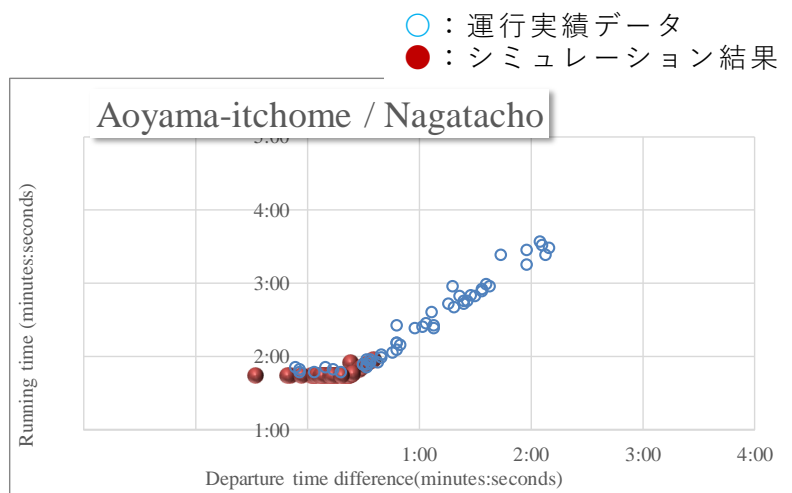


図 5.26 永田町駅停車時間 7 秒短縮時

本章で提案したシミュレーションアルゴリズムは、自己遅延（駅停車時間の増大）の数秒の変化に対する路線全体の遅延量を推定することが可能である。遅延は、自己遅延と従属遅延（運転時間の増大）の和であり、従属遅延は運転時間特性によって求められ、運転時間特性は自己遅延によって決定される出発時間差に依存している。

このことは、本シミュレーションアルゴリズムが列車運行の基本特性を加味したものであること、有効活用の一例を示したが、自己遅延の変化を詳細に検証できる本シミュレーションアルゴリズムを活用することで、遅延対策の推進に有意義な検証を行うことが可能であることを示した。

東京メトロの遅延対策は、従属遅延への対策である信号設備改良と次章で述べる運転方法の変更を除き、多くの遅延対策は自己遅延の短縮を目的にしている。この実態からも、本シミュレーションアルゴリズムの有効活用について、今後も研究を継続していきたい。

## 第 6 章 駅間運転方法の変更による追い込み時間の 短縮に基づく列車ダイヤの頑健性の向上

### 6.1 はじめに

3 章から 5 章では、遅延の発生状況を把握する手法、遅延対策を実施すべき箇所を特定する手法、遅延対策の効果を推定する方法について述べてきた。一方で、2 章で述べたこれまでの遅延対策手法とは異なった考え方に基づく遅延対策手法やその評価も、対策の選択肢拡大のため必要である。第 6 章では、これまで検討されていなかった列車の運転方法を変更することによる新たな遅延対策手法を提案し、その効果を検証する。

日々発生する小規模の遅延に対し、鉄道会社では、遅延の発生を防止すること、また、発生した遅延をできるだけ他の列車に波及させないようにすること、言い換えれば列車ダイヤの頑健性を向上させることに注力している。第 6 章では、この頑健性を向上させるための方策について述べ、新たな遅延対策として提案する。

小規模の遅延の原因はほとんどの場合、駅停車時間の超過であることから、鉄道会社は駅停車時間の増大を防ぐための方策を実施している。具体的には乗降促進要員の増強、ワイドドア車両の導入、列車停止位置の変更、列車の間隔に注意を払ったダイヤの修正などである<sup>45</sup>。

一方で、さまざまな要因によって駅停車時間の増大が避けられないのであれば、その影響が後続の列車に及ばないようにする方策も有効である。そのためには、ある列車の発から次の列車の着の間の時間に、駅停車時間の増加を吸収するに足る余裕（列車間隔の余裕）が含まれている必要がある。

列車が駅に進入する際に現行よりも低速で走行することを許容すれば、先行列車との間に確保しなければならない間隔（保安上の理由による。この間隔を、本稿では「追い込み時間」と呼ぶ）を短縮できることが知られている<sup>39</sup>。このような運転方法を採用することによって追い込み時間を短縮できれば、その短縮分を用いて列車間隔の余裕を増やすことができる。その結果、軽微なトラブルが起きた場合でも、後続の列車に遅延が

波及しないようにできることが期待される。

列車が現行よりも低速で駅に進入することを許容することによって追い込み時間を短縮できるという事実は、定性的には知られており、理想的な条件下においては、解析的に最適値を求めることができることも示されている<sup>39</sup>。しかし、現実に適用可能な運転方法を見出すためには、実用性を考慮する必要がある。具体的には、信号システムの条件、前後の列車との相互作用、運転士の心理的負担、現行の運転方法との相違、乗客の乗り心地などが考慮されていること、また、駅間の運転時間の増加が過大でないことなどを考慮する必要がある。

駅間での列車の運転方法を定めたチャートを列車運転曲線（以下、運転曲線といい、一般的にランカーブともいう）と呼ぶ。運転曲線は、現在ではほとんどの会社でコンピュータを用いて作成されており<sup>41</sup>、また、運転曲線レベルでのシミュレーションが可能なシステムも多くの国で実用的に用いられている<sup>32,33,34,42,43,44</sup>。しかし、追い込み時間の短縮を目的として、上述のような複雑な条件を加味して現実に適用可能な運転方法を見出すアルゴリズムの構築や、現実の路線に対する適用結果の評価についてはこれまで報告されていない。

本章では、列車間隔の余裕を増大することを目的として、これらの複雑な条件を加味した上で、従来と異なった駅間の運転方法を採用することによって、追い込み時間を短縮できるような列車の具体的運転方法を作成するシステムを提案する。前述のような複雑多岐にわたる条件を考慮する必要があるため、人間の介入に基づくインタラクティブシステムを導入する。本システムは、ある種のシミュレーションによって、運転方法等に関する人間からの指示を守った運転曲線を出力する機能を有する。人間の指示とそれにもとづくシミュレーションを繰り返し、求める運転曲線を得ることができる。また、その際、異なった条件に基づいて複数の運転曲線を出力し、それらの中から望むものを取捨選択することも可能である。

以下、6.2項では、列車運行に関する制約を紹介し、6.3項では、提案アルゴリズムを導入する。そして、6.4項において現実の路線への適用例と評価を述べる。

## 6.2 列車運行に関する制約と運転曲線

### 6.2.1 列車運行に関わる制約

鉄道において、衝突や追突などの重大事故を防止するための仕組みが、「閉そく」と呼ばれる考え方である。駅間をいくつかの区間（閉そく区間）に区切り、それぞれの閉そく区間には、同時には1つの列車のみが存在するようにする。具体的には、閉そく区間の入り口に信号機を設置し、その閉そく区間に列車が存在する時には、信号機を赤（停止現示という）にする。この時、停止現示にもかかわらず、列車がこの閉そく区間に入ろうとした場合には、ATS (Automatic Train Stop) と呼ばれる装置によって非常ブレーキがかかる。

現在では、東京メトロを含む多くの鉄道会社で、この考え方をさらに発展させた信号システムである ATC (Automatic Train Control) が用いられている<sup>38</sup>。基本的な考え方としては、閉そく区間ごとに許容運転速度を設定し、列車の速度がそれを超えた時には、ATC によって自動的にブレーキがかかる。先行列車に接近した時には、許容運転速度は、ATC によって先行列車が存在しない場合よりも低い値に設定され、追突などの事故を未然に防止する（より列車が接近すると、許容運転速度が 0 = 停止現示 となり、後続列車が駅間で停止してしまうこともある。これを駅間停止と呼ぶ）。なお、許容運転速度は運転台に表示され、運転士は、これに従って列車を運転する。

### 6.2.2 列車ダイヤ作成時に考慮すべき制約

列車ダイヤ（以下、ダイヤ）の作成においては、それぞれの列車の各駅の発時刻、着時刻、使用番線などを定める必要がある。その際、次の3つの制約が重要である。

(1) 運転時間 ダイヤを作成する際には、ある駅の発時刻に運転時間を加えることによって次の駅の着時刻を求める。ここで、運転時間とは、列車が駅間を走行するのに要する時間のことを言い、現行では、列車が駅間を走行する際に、走行速度に関する制約（曲線、分岐器、信号等）を守った上で、次の駅に最も早く着くような運転を行なった時<sup>2</sup>の所要時間を用いることとしている。運転時間は、運転曲線を作成することによって算出する。実際に列車が駅間を走行する場合には前に列車が存在し、位置関係によっては



その列車から走行速度について影響を受ける場合がある。しかし、運転曲線の目的は、列車を最も早く到達させるための運転方法を得ることであるため、先行列車の影響を受けない場合の運転曲線を作成する。

図 6.1 に運転曲線の例を示す。運転曲線は速度と時間を表す 2 つの曲線（速度曲線、時間曲線）によって構成される。横軸は距離を、縦軸は速度と時間を表す。図中の青い線は信号による速度制限を表す（以下の図でも同様）。速度曲線は、それぞれの場所（キロ程）での列車の速度を表しており、どのような速度で駅間を走行するかを読み取ることができる。また、時間曲線からは駅間の所要時間を読み取ることができる。

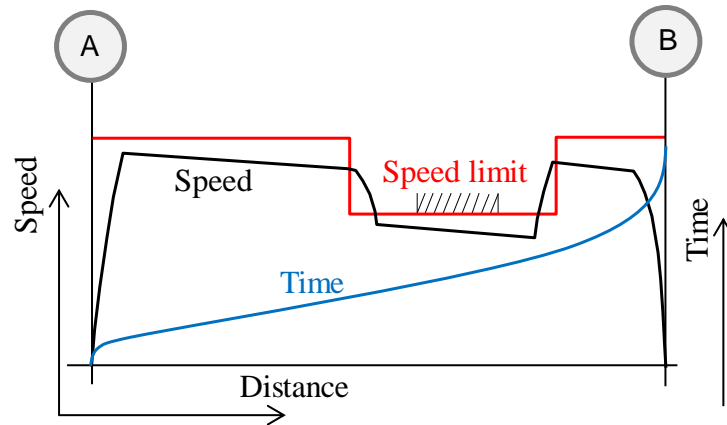


図 6.1 運転曲線

(2) 駅停車時間 ダイヤを作成する際には、それぞれの駅での駅停車時間を決定する必要がある。駅停車時間は、実態調査等に基づき、旅客の乗降に必要な時間を勘案して決定する。朝ラッシュや日中、タラッシュなど、それぞれの時間帯で乗降人数が異なるため、それぞれの時間帯に応じて駅停車時間を設定する。特に朝ラッシュ時間帯は、利用者数が最も多くなることがほとんどであることから、その他の時間帯よりも長く設定し、30 秒～60 秒程度とすることが多い。

(3) 追い込み時間 ある駅において、2 本の列車が同じ番線を連続して使用する際には、保安上の理由により、先行列車の発時刻と後続時刻の着時刻の間に一定の時間を確保する必要がある。この時間を「追い込み時間」あるいは「追い込み」と呼ぶ（会社によって呼び方が異なる。これは、東京メトロでの呼び方である）。

追い込み時間の値は、信号設計によって決定される。その概念を図 6.2 に示す。この図は横軸が時間、縦軸が距離（駅間）を表し、曲線は、運転曲線で作成された時間曲線を 90 度回転させたものである（ただし、追い込み時間の算定にあたっては、列車の長さの関係するため、列車の先頭と最後尾に相当する 2 本の曲線を描く）。先行列車による速度制限を受けることなく、後続列車が先行列車になるべく近づくような運転をした時の先行列車の発から後続列車の着までの間隔（赤矢印）が追い込み時間となる。

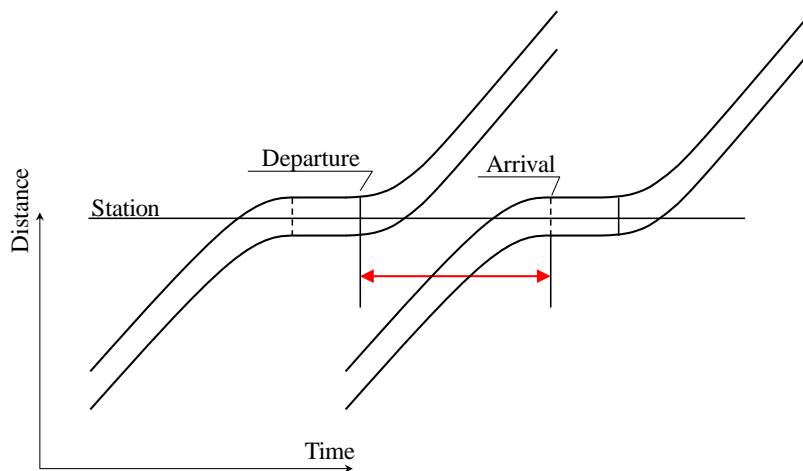


図 6.2 追い込み時間の概念図

### 6.2.3 頑健性の向上

列車間隔に余裕があれば、小規模の外乱を吸収することができ、後続の列車に遅延を伝播させないようにできる。駅停車時間を今以上に短縮することは難しいため、列車間隔の余裕を大きくするためには、追い込み時間を短縮することになる。

追い込み時間を短縮する方策としては、次の 2 つがあり得る。

- (1) 信号設備を改良する。
- (2) 駅間の運転方法を変える。

信号設備については、ほとんどの駅で、すでに追い込み時間の短縮を考慮した設計となっており、さらなる短縮のための改良は、経費や工期の点もさることながら、技術的にも非常に困難である。

一方、駅間の運転方法の変更、特に、駅進入時の速度を低くすることによって追い込み時間を短縮することができることが知られている<sup>39</sup>（この概念を図6.3に示す。ピンクの線が低速進入によって追い込み時間を短縮した運転曲線、青矢印が通常の追い込み時間、赤矢印が短縮した追い込み時間を示す）。ただし、駅進入時の速度を低くすればするほど追い込み時間が短くなるわけではなく、低くすれば運転時間が延び、逆に高くすれば追い込み時間短縮の効果が小さくなるため、ある最適値が存在する<sup>39</sup>。さらに、注意すべき点として、低速で運転することになるため、現行よりも所要時間（目的駅までの時間）が増大することが挙げられる。現時点では、到達時分をなるべく短くすることが最大のサービスであると考えられているため、所要時間をなるべく短くするような運転方法が採用されている。しかし、昨今のように、列車の遅延に対する改善の要望が多く、頑健な列車ダイヤの実現が求められる状況においては、運転時間の若干の増加と引き換えに、列車ダイヤの頑健性を増大させることが必要であると考えられる。そこで、本研究では、現行よりも低速で駅に進入することによって追い込み時間を短縮し、それによって列車間隔の余裕を産み出すというアプローチを採用することとした<sup>45</sup>。

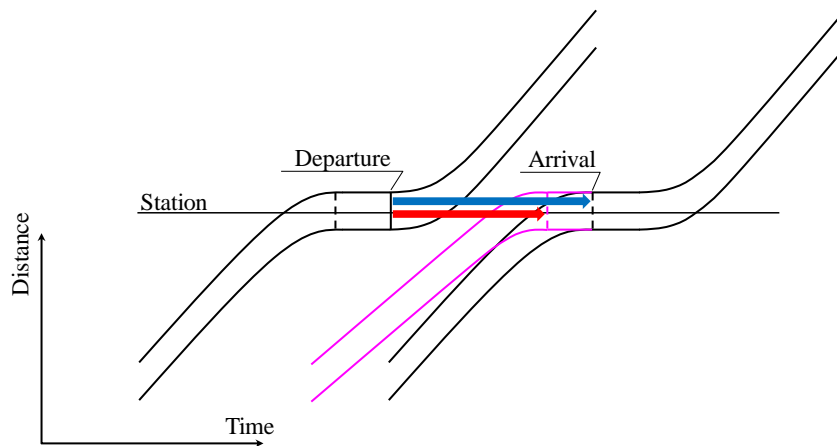


図 6.3 追い込み時間短縮の概念図

## 6.3 駅間運転方法の変更による追い込み時間の短縮

### 6.3.1 目的

本項では、乗り心地や運転のしやすさなどを考慮した上で追い込み時間を短縮できる運転曲線を作成するアルゴリズムを構築することを目的とする。その際、追い込み時間

の短縮度合いと運転時間の増加との trade offなどを考慮して、追い込み時間をなるべく短縮しつつも現実に適用可能な運転曲線を作成する。

### 6.3.2 考慮すべき条件

実用的に適用可能な運転曲線を作成するにあたっては、次の 3 つの条件を考慮する必要がある。

**条件 1: 運転曲線の実用性** 列車は運転士によって運転され、かつ、車内には多数の乗客が乗車している。そのため、運転曲線を作成するにあたっては、運転操作が著しく困難でないことや、乗客の乗り心地等を加味する必要がある。例えば、加速直後にブレーキを動作させるような運転は、乗り心地の点から実用的であるとは言えない。また、前方に速度制限が存在する場合、その手前で列車を加速させる運転も、乗り心地、エネルギー消費の点から実用的であるとは言えない。さらに、加速と減速を頻繁に繰り返す運転も、操作の困難さおよび乗り心地の点から実用的ではない。

**条件 2: 運転曲線の統一性** 同一駅間・同一列車種別の列車に対しては、運転曲線は同一である必要がある。言い換えれば、列車ごとに異なった運転曲線を採用することは現実的ではない。列車の運転は多くの運転士によって行なわれる。全ての列車が常に同じ運転時間で運転されるようにするためには、運転士に対して具体的な運転方法を指示する必要がある。もし、列車によって運転曲線が異なるようであれば、運転士は、列車ごとの運転方法を記憶する必要があることになり、これは運転士に多大な負担を強いることとなって、現実的ではない。

**条件 3: 後方駅間の運転曲線への影響** 現行の信号設備は、列車が他の列車の影響を受けずに運転曲線通りに走行できるように設計されている。しかし、本研究においては、現行の運転曲線を修正するが、信号設備は現行のままと仮定しているため、他の列車の影響を考慮しなければならない場面が生じる。特に、駅に到着しようとする列車の許容運転速度は、その駅から発車した先行列車の影響を受ける可能性がある。すなわち、追い込み時間を短縮する運転曲線を検討する際には、後続列車の動きを考慮する必要がある。

前述のように、従来は、他の列車の影響を受けずに走行できる運転曲線を作成する前提であったため、他列車からの影響を考慮する必要はなかった。しかし、本研究で目標とする運転曲線を作成する際には、条件2から、当該駅間を走行している後続列車との関係、すなわち、当該列車と後続列車が同じ運転曲線で走行できること、および、条件3から、前方駅を発車した先行列車からの影響を考慮する必要がある。これらは、従来の運転曲線作成システムでは、考慮されていなかった条件である。

### 6.3.3 インタラクティブシステム

前節の条件1~3を満たした運転曲線を自動的に作成するアルゴリズムは、非常に複雑なものになると予想される。また、条件1については、その評価尺度を定量化することは困難であると考えられる。そのため、本研究では、コンピュータの支援を受けつつも人が主体となって運転曲線を作成するインタラクティブシステムを提案する。その全体構成は、以下の通りである。

- (1) コンピュータが追い込み時間最小となる運転曲線を求める。これは、運転曲線の作成を繰り返すことによって実現される。
- (2) 使用者が実用性等の観点を検討し、必要に応じて、(1)で得た運転曲線を手動で修正する。内容は、6.3.5項で述べるが、例えば、小刻みな速度変化がある場合には、それを避けるような運転方法とする。
- (3) (2)で修正した運転曲線を用いて、コンピュータが運転曲線の再作成を行なう。
- (4) 同駅間を走行する後続列車も同一の運転曲線で走行可能かどうか、コンピュータによってチェックを行なう。
- (5) (4)で作成した運転曲線が、後方駅間の運転曲線に影響を与えるかどうかをコンピュータでチェックし、影響を与える場合には、手動で修正を行なう。これについても、6.3.5項で詳述するが、例えば、現行運転曲線との乖離の程度、運転時間の増加度合い、乗り心地、運転のしやすさなどを考慮して、修正を行なう。
- (6) 必要に応じて、(1)-(5)を繰り返し、複数の運転曲線を得たのち、比較検討を行なって、採用すべき運転曲線を決定する。

(1)-(6)を、繰り返し他の駅間にも順に適用することによって、他の駅間についても追い込み時間の短縮を行ない、その路線全体の頑健性を高めることができる。

### 6.3.4 列車走行シミュレーション

運転曲線は、ある種のシミュレーションによって、列車の走行を模擬することによって求める。シミュレーションは、列車の重量や性能等のパラメータを入力とし、次に示す Newton の運動方程式にもとづいて、列車の位置、速度等を時間の進行とともに逐次決定していく方法で行なう<sup>46</sup>。

$$\frac{1000W}{3.6}(1+k)\frac{dv}{dt} = F(v) - R_s(v) - R_r(v) - R_c(S) \pm R_g(S) - B(S)$$

.....(6.1)

ここで、 $W$  : 列車質量[t],  $k$  : 回転部分の慣性係数,  $v$  : 列車速度[km/h],  $F(v)$  : 引張力[N],  $R_s(v)$  : 出発抵抗[N],  $R_r(v)$  : 走行抵抗[N],  $R_c(S)$  : 曲線抵抗(N),  $R_g(S)$  : 勾配抵抗[N],  $B(S)$  : ブレーキ力[N],  $S$  : 運転開始地点からの走行距離[m] である。

### 6.3.5 使用手順の詳細

具体例に沿って、本システムの使用手順の詳細を示す。列車がA駅からB駅を経由してC駅へと運転する3駅2駅間において、C駅の追い込み時間を短縮する運転曲線を見出す場合の手順を説明する。

(1) B～C 駅間の最小追い込み運転曲線の作成 C 駅の追い込み時間が最小となる運転曲線（以下、最小追い込み運転曲線）を見つける。最小追い込み運転曲線は、現行の運転曲線（運転時間が最小であるはず）と、C 駅に停車中の列車の影響によって C 駅の手前で列車が駅間停止してしまう運転曲線の間のどこかに存在している（この概念を図 6.4 に示す。灰色線は現行、赤線は駅間停止となる場合、黄色線は最小追い込み時間で走行する場合である）。最小追い込み運転曲線を見出すためには、C 駅に先行列車が停止しているとして、その列車の駅停車時間を 1 秒単位で延長しながら、B～C

駅間の運転曲線をそれぞれのケースに対して作成し、追い込み時間を確認していく。  
この中で、最も追い込み時間が小さい運転曲線を最小追い込み運転曲線として採用する。

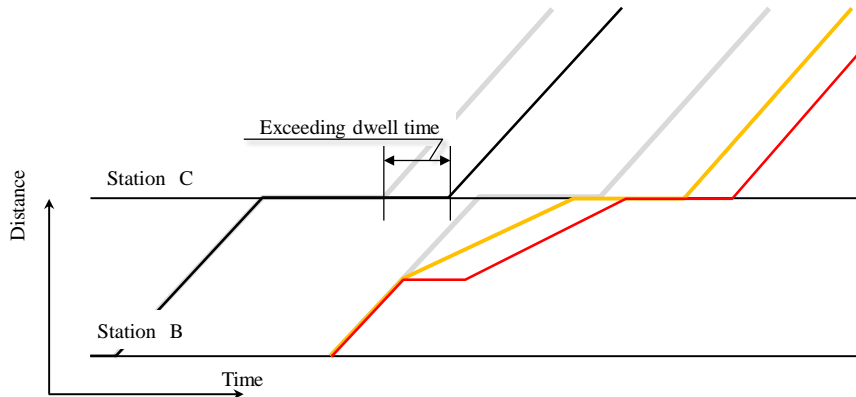


図 6.4 最小追い込み運転曲線の概念

(2) 運転曲線の修正 (1)で得られた運転曲線は実用性の観点からは、問題を含む場合がある (6.3.2 の条件 1)。そこで、(1)で得られた運転曲線の実用性を高めるために修正を加える。例を図 6.5 に示す (左：修正前、右：修正後)。図 6.5 は、小刻みな速度変化を避けることを目的とした修正の例である。

次に、コンピュータは、同一駅間を走行する後続列車が同一の運転曲線で走行可能かどうかを確認し、その確認結果を出力する (6.3.2 の条件 2)。もし、同一運転曲線での走行が不可能という結果が出力された場合には、それが可能になるように、手動で運転曲線の修正を行なう。

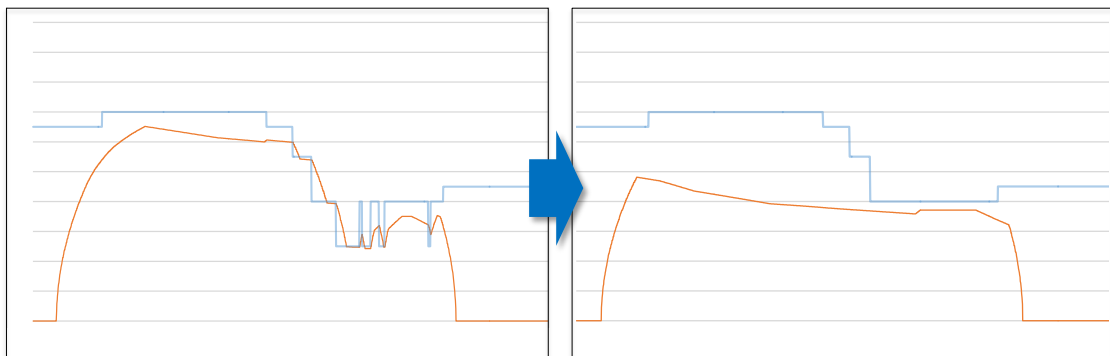


図 6.5 運転曲線の修正例

- (3) 追い込み時間の再算出 (2)で修正した運転曲線では、C 駅の追い込み時間は、(1)で算出した最小追い込み時間とは異なった値になっている可能性がある。そのため、(2)で得られた運転曲線に対して C 駅の追い込み時間を再計算する。
- (4) 後方駅間の運転曲線への影響確認 (3)で作成した B 駅～C 駅間の運転曲線を用いた時に、A 駅～B 駅間で、現行の運転曲線のままで列車が走行可能かどうかの確認を行なう (6.3.2 の条件 3)。現行の運転曲線のままで運転できない場合には、シミュレーション結果を基にして、手動で修正を行なう。
- (5) 最終結果の出力 (1)から(4)のプロセスを、考え方を覚えて何回か実行し、複数の運転曲線を得る。具体的には、現行運転曲線との乖離の程度、運転のしやすさや乗り心地等の視点を考慮しつつ、追い込み時間の短縮、運転時間の増加について、B 駅～C 駅間の運転曲線に重点を置いたもの、A 駅～B 駅間の運転曲線に重点を置いたもの、両方の中庸をとったものなどを作成する。これらの運転曲線を比較し、メリット、デメリットを比較検討の上、適切なものを選択する。なお、以下では、これらのステップを経て得られた運転曲線を、改良運転曲線と呼ぶ。

## 6.4 適用例とその評価

### 6.4.1 使用手順の詳細

東京メトロ日比谷線の実際の路線データに対し、本研究で用いたアルゴリズムを適用した結果を述べる。


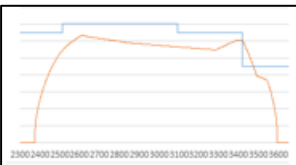
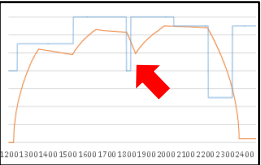
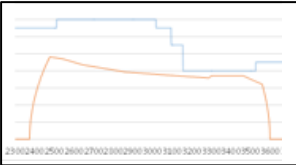
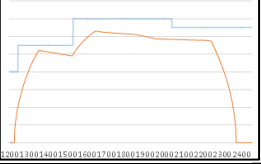
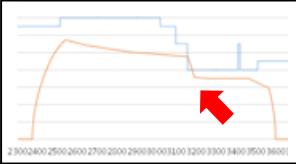
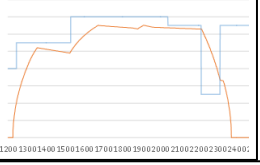
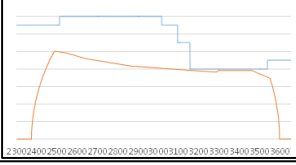
乗降客が多く、駅停車時間が増大しがちな上野駅について、列車間隔の余裕を増やすために、同駅の追い込み時間の短縮を目的とした。運転曲線の作成対象駅間は、入谷駅～上野駅間となる。また、後方駅間は、三ノ輪駅～入谷駅間となる（先の例で示せば、上野駅、入谷駅、三ノ輪駅がそれぞれ、C 駅、B 駅、A 駅となる）。

表 6.1 に現状の運転曲線と、1～3 の 3 つの作成結果を示す。Running Time は、三ノ輪駅～入谷駅、入谷駅～上野駅の運転時間を示す。カッコの中は、現行の運転時間との差異を示す。Improvement は、上野駅の追い込み時間の改善度合い (秒) を示す。さらに、三ノ輪駅～入谷駅、入谷駅～上野駅の運転曲線を示す。運転曲線においては、図 6.1 の



説明の通り、横軸が距離、縦軸が時間に対応している。また、青い線は、その場所での速度制限を示している。なお、三ノ輪駅～入谷駅，入谷駅～上野駅の現行の運転曲線による走行時間は、それぞれ、90 秒，95 秒である。

表 6.1 変更運転曲線とその影響

	Running time[sec.]		Improvement	Performance curve	
	Minowa →Iriya	Iriya →Ueno		Minowa→Iriya	Iriya→Ueno
Current	90	95	-		
1	89 (-1)	125 (+30)	-10		
2	90 (0)	114 (+19)	-8		
3	88 (-2)	119 (+24)	-12		

結果 1 は、上野駅の追い込み時間を極力小さくすることを目標として作成した結果である。三ノ輪駅～入谷駅の運転曲線に影響を与えるため、この区間の運転曲線にも修正の必要が生じた。作成結果においては、駅中間で ATC の下位現示の信号を受け（矢印で示す）、運転速度を低下させる必要があり、乗り心地、操縦のしやすさ等に影響を与える可能性があることが懸念事項となる。また、入谷駅～上野駅間の運転時間が現行よりも 30 秒延びることも懸念事項となる。

三ノ輪駅～入谷駅間の運転曲線で、下位現示を受けることを避けるために、三ノ輪駅～入谷駅間は現行と同じ運転曲線とすることを念頭に置き、入谷駅～上野駅間の運転曲線をさらに修正した結果が結果 2 である。結果 1 と比較すると、結果 2 では、入谷駅発

車後、比較的高速域まで加速を継続するため、三ノ輪駅～入谷駅の運転曲線には影響をあたえない。また、入谷駅～上野駅の運転時間の現行からの伸びも結果 1 より少なく済む。ただし、上野駅での追い込み時間の改善は、結果 1の方が大きい。さらに、結果 2 の運転曲線では、入谷駅～上野駅の間で、ATC によってやや急なブレーキが必要になる（矢印で示す）ことが懸念事項となる。

結果 1 と結果 2 の中間的な結果が結果 3 である。結果 1 における三ノ輪駅～入谷駅間の不規則な信号制限を排除するように運転曲線の修正を行なった。この結果では、入谷駅～上野駅間では速度制限ぎりぎりの走行が必要となるため、弱めのブレーキ操作を行ない、速度を一定に保つ運転が必要になることが懸念事項となる。また、結果 3 では、入谷駅～上野駅の運転時間が現行とくらべて 24 秒延びることも懸念事項となる。ただし、上野駅の追い込み時間の改善度合いは、もっとも大きい。

これら 3 つの結果について、運転方法、駅間の運転時間の伸び、上野駅での追い込み時間短縮度合い等を総合的に考えたうえで、もっとも合理的と思われるものを採用する。この例の場合には、結果 2 を採用することが望ましいと言える。

以上のように、複数の具体的な選択肢を得ることによって、それぞれのメリット・デメリットを具体的に比較してもっとも合理的と判断できるものを採用できることが、本手法を用いる上での効果である。

#### 6.4.2 想定以上の遅延に対する評価

本章で提案するアルゴリズムによって追い込み時間を短縮することによって、列車間隔の余裕を大きくすることができる。その結果、なんらかのトラブルが発生しても、その余裕で吸収でき、後続の列車には波及しないことが期待できる。一方、より深刻なトラブルに対しては、列車間隔の余裕では吸収できない。その場合、後続列車に遅延が波及する。本節では、トラブルがより深刻で、駅停車時間が運転間隔の余裕以上に増大したときの遅延の傾向を分析する。

図 6.6 は、先行列車の上野駅の駅停車時間が増大した場合の後続列車の上野駅到着時の遅延の変化を、現行の運転曲線と表 1 の結果 2 の運転曲線について示したグラフであ

る。なお、上野駅の駅停車時間は、現行は 55 秒である。図 6.6 から、先行列車の駅停車時間の実績値が 85 秒になると、現行ダイヤよりも本アルゴリズムの結果に基づいて作成した計画ダイヤの方が、遅延の影響が大きくなることがわかる。つまり、ある一定の値までは、本アルゴリズムの結果に基づいて作成した計画ダイヤの方が先行列車の遅延の影響が少ないことが分かるが、それ以上の遅延となった場合には、効果が同等もしくは逆転する場面も見受けられる。

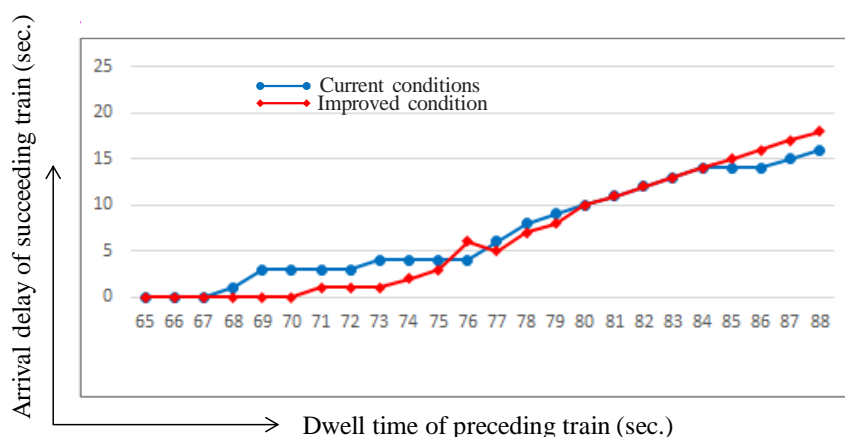


図 6.6 先行列車の駅停車時間延長に対する後続列車遅延への影響

このことは、図 6.7 に示すように、改良運転曲線による（緑線）方が、より先行列車に接近して走行していることに起因している。これにより、改良運転曲線による場合には、停止信号を受け駅間停止するが（図 6.7 の赤線に到達した時に停止信号を受ける）、現行運転曲線による場合（青線）には、当該列車がこの地点に到達するまでには先行列車がすでに発車していて、そのために、当該列車が駅間停止とはならないケースがある。駅間停止が発生すれば、加減速分の時間ロスが発生し、その分、到着時刻が遅延する。このような事象によって図 6.6 に見られるような遅延時間の逆転現象が発生する。

以上のことから、本研究結果を適用する場合、列車間隔の余裕以上の遅延が頻発すると想定される駅への適用については、遅延の発生頻度や大きさなどを分析し、有効範囲を的確に見極めてから適用する必要があると言える。例えば、上野駅の場合、駅停車時間は、通常大きくても 75 秒程度であるため、逆転する場面には至らないと考えられる。

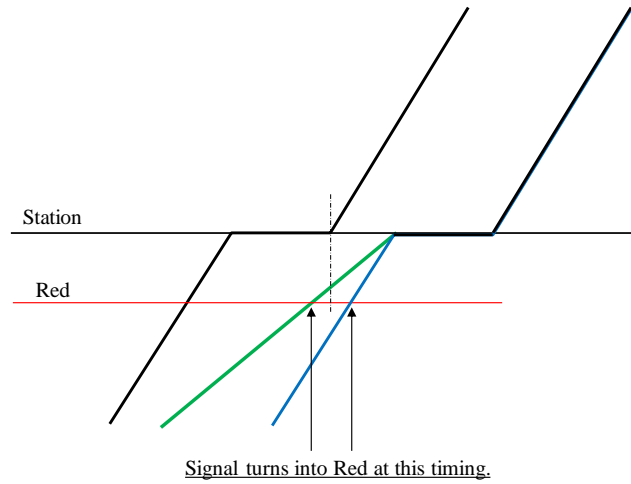


図 6.7 低速運転の効果

## 6.5. 信号設備改良への応用

### 6.5.1 信号機の移設

信号設備の改良には多額の費用を要するため、前節までは、信号設備改良を行なわないことを前提条件としていた。しかし、信号設備は、現行の運転曲線を基に設計が行なわれているため、本アルゴリズムに基づいて運転曲線の変更を行なう場合、その運転曲線に合致するように信号設備を改良できれば、より効果的であると考えられる。そこで、改良ほどの費用を要しない、信号機の移設のみ（信号機の増設はしない）を行なって、追い込み時間をさらに短縮できるかどうかの検討を行なった。

信号機移設のイメージを図 6.8 に示す。改良運転曲線では、走行速度が現行運転曲線よりも低くなるため、現行運転曲線と比べて、停止までに必要なブレーキ距離が短くなる。換言すれば、前の列車に、より接近することができる。このことから、追い込み時間のネックとなっている信号機を前方に移設できれば、追い込み時間をさらに短縮できる可能性がある。

一方、改良運転曲線は、ラッシュ時に使用することを想定しているものであり、走行時分の伸びを考慮すると、昼間には、現行運転曲線で運転する方が望ましいとも考えら

れる。このように、改良運転曲線と現行運転曲線の両方を使用する可能性がある場合には、信号機の移設が現行運転曲線に与える影響についても考慮しておく必要がある。

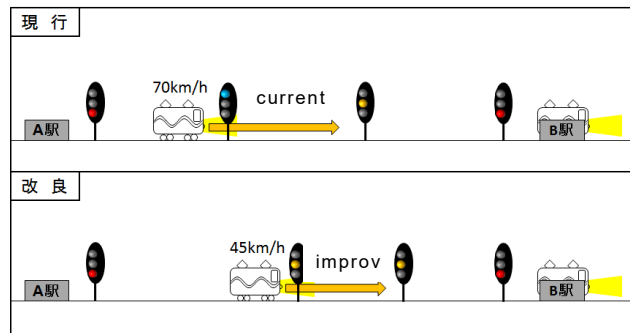


図 6.8 信号機移設の概念図

### 6.5.2 信号機移設の効果の検討例

入谷駅～上野駅間及び三ノ輪駅～入谷駅の2駅間について、表 6.1 の結果 2 の運転曲線を使用して検討を行なった。

上野駅での追い込み時間は、表 1 の結果 2 の改良運転曲線では、現行運転曲線より 8 秒の短縮であるが、さらにこの運転曲線を基に、信号機の移設によって追い込み時間の短縮が可能かどうかを検討したところ、図 6.9(2)に示すように更に 2 秒の短縮が可能になることがわかった。上野駅は、乗降客の多い駅であり、入谷駅～上野駅間の信号設備については、すでに限界に近い設計がなされていることから、改善の期待効果は軽微な値にとどまったものと考えられる。なお、この 2 秒の短縮による運転曲線は表 6.1 とほぼ同一のため省略する。

三ノ輪駅～入谷駅間について、表 6.1 の結果 2 と、信号機を移設した場合とを比較した。図 6.10(1)が結果 2 で示した運転曲線、図 6.10(2)が信号機移設に伴う運転曲線である。図 6.10(1)の運転曲線と比較して、入谷駅の追い込み時間を 8 秒短縮できることが確認できた(図 6.11)。一方で、信号機を移設した場合に現行運転曲線で走行しようとする、追い込み時間は、17 秒増加する結果となった。したがって、この駅間については、現行運転曲線で走行する可能性と、追い込み時間の増加がダイヤに与える影響を勘案した上で、信号機の移設を行なうかどうかを決定する必要があると考えられる。

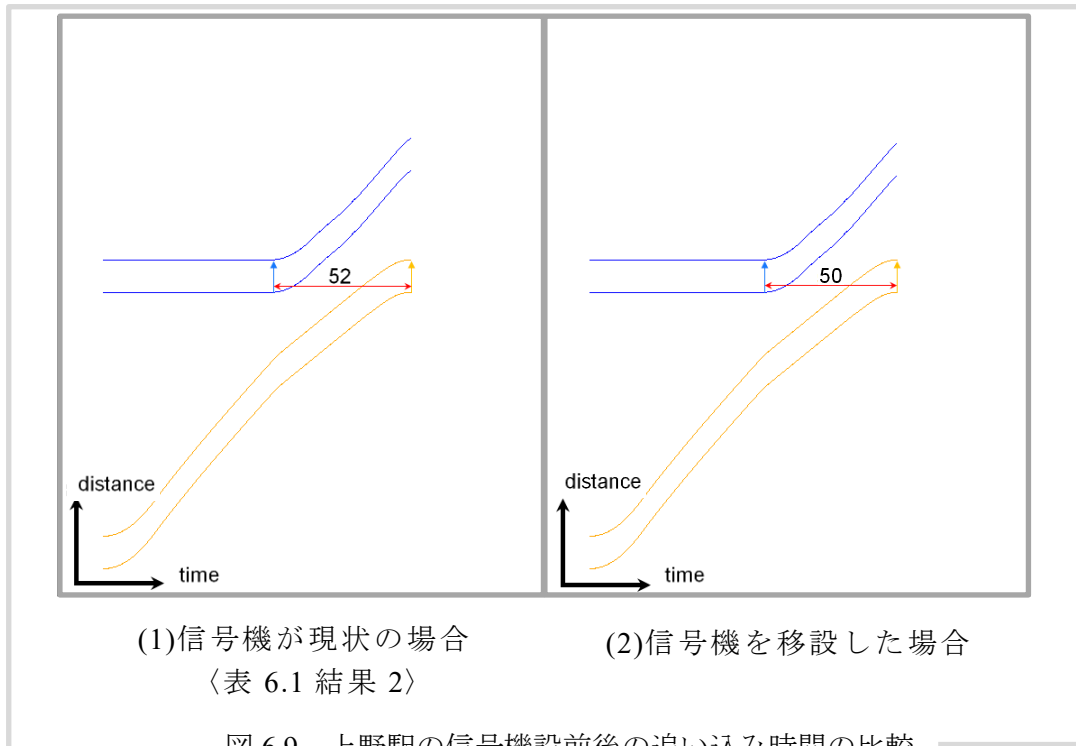


図 6.9 上野駅の信号機設前後の追い込み時間の比較

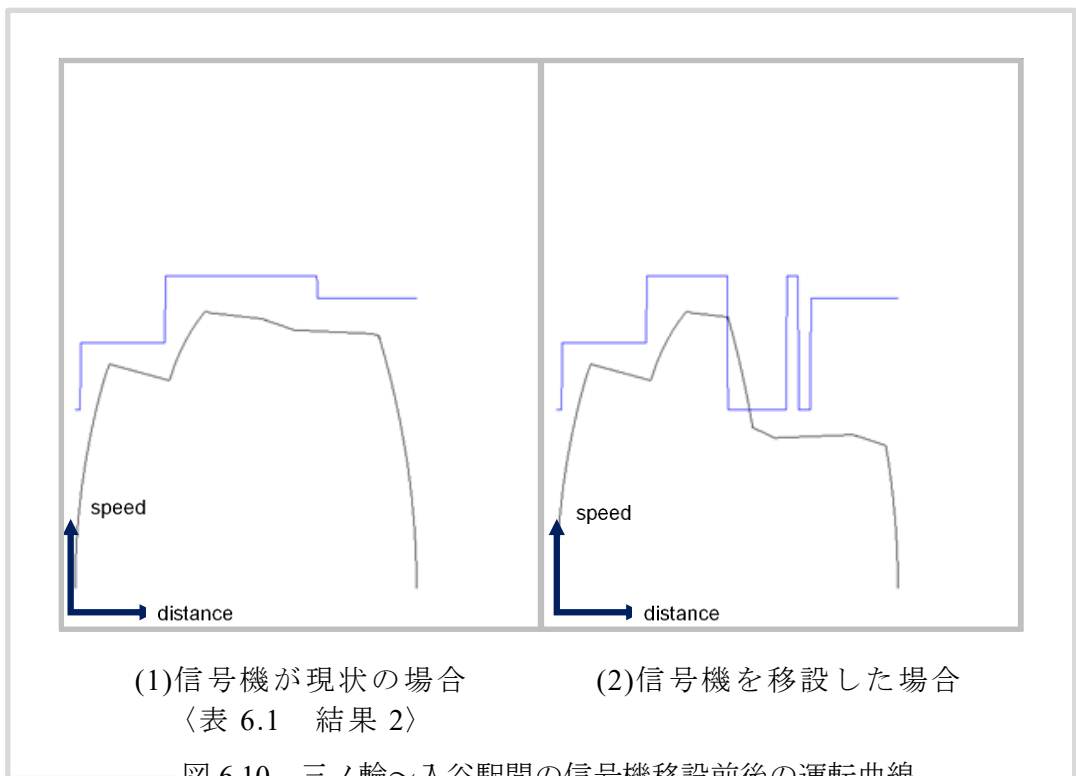
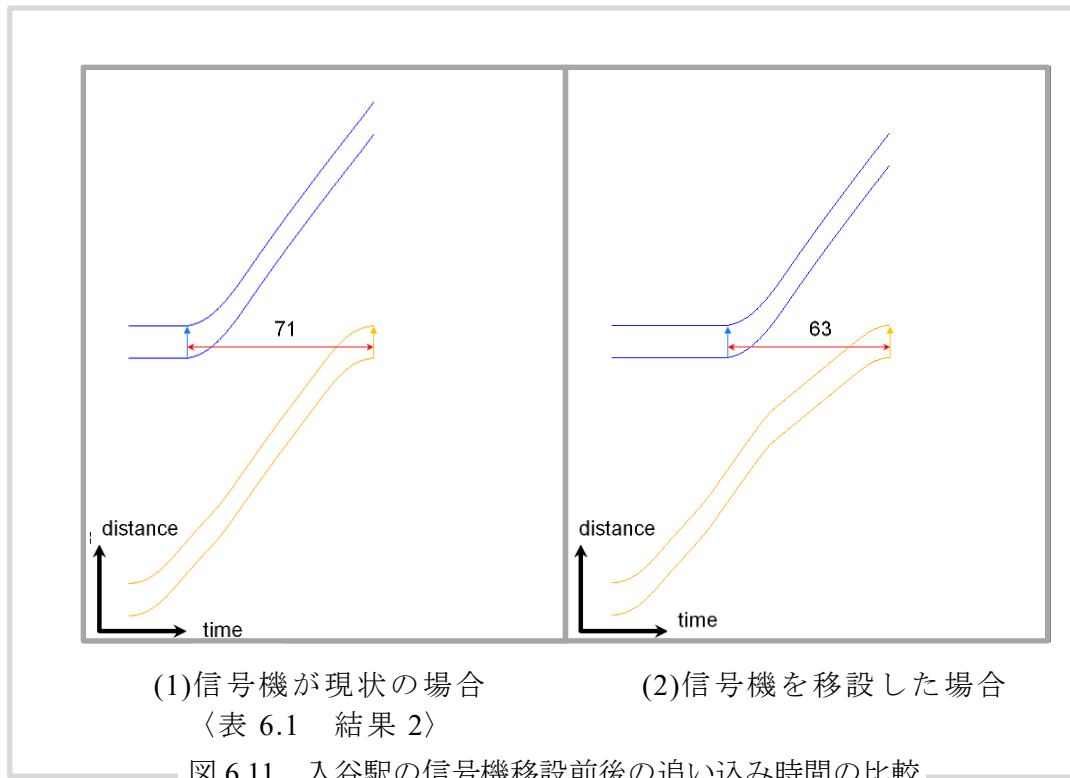


図 6.10 三ノ輪～入谷駅間の信号機移設前後の運転曲線



以上のことから、本章で提案する改良運転曲線を採用し、かつ、その速度に応じて信号機の移設を行なうことにより、信号設備の増設をすることなしに、追い込み時間の改善が可能になる場合があることが分かる。ただし、その場合、現行運転曲線で走行しようとした場合には、追い込み時間が増加してしまう場合があることに注意が必要である。

本章で提案するシステムを用いることにより、このように、信号機の移設の効果の検討、その場合に現行運転曲線で走行した場合の結果についての検討なども可能であると言える。

## 第7章 結論

### 7.1 本研究により得られた成果

鉄道を利用する旅客の定時運行へのニーズは極めて高く、列車遅延を解消することは鉄道事業者にとって重要な課題のひとつである。しかし、混雑率が高く、かつ2分～2分30秒間隔で運行する列車の遅延対策は容易ではない。また、信号設備やホームなどの設備改良を伴う遅延対策の意思決定は、大規模な投資と工期が長期間に渡るため高度な経営判断となることが多い。

東京メトロでは、旅客の定時運行ニーズに応えるべく、列車の運行状況を定量的に分析するため、全列車の全駅における到着時刻と発車時刻を記録した列車運行実績データを蓄積している。この列車運行実績データは、日々の運行状況を分析する上で多くの有益な情報が含まれており、膨大なデータから有益な情報を引き出し、対策に結び付けていくことが有意義であることは言うまでもない。本研究は、列車運行実績データの分析に基づく総合的な遅延対策について論じてきた。

本章では、本研究により得られた成果をまとめる。

#### (1) 遅延状況の可視化

第3章において運行状況の可視化について、遅延が発起し、拡大する状況を視覚的に把握できるようになったことを述べた。これにより、詳細な列車運行実績データの分析結果を「見える化」し、遅延状況を把握することが可能となり、遅延対策の必要性が議論できるようになった。

#### (2) 遅延対策指標を用いた遅延対策箇所選定手法の評価

第4章において駅停車時間と運転時間の増大量に着目した遅延対策指標について述べた。ここでは、遅延対策を優先的に実施すべき箇所の決定とその効



果の推定を行なうための遅延対策指標（ED 値，ER 値，ED 回復変化点），およびその指標を用いた分析手法（ED/ER 分析）を提案した。また，提案した遅延対策指標と指標を用いた分析を実路線に適用した結果を示した。それにより，提案手法によって投資判断時の対策優先順位を定量的に判断できるようになり，対策効果を検証しながら段階的に対策を講じていくことが可能になったことを示した。同一種別の列車が稠密に運転されており，かつ，利用者が多く駅停車時間の超過が主たる遅延要因となっている路線・区間では，遅延の発生・伝播は，第4章 図4.4の遅延拡大モデルに従って発生していると考えられる。そのような路線・区間に対しては，東京メトロだけにとどまらず，第4章で提案した手法を有効に活用できると考えられる。冒頭でも述べたように，近年，鉄道の定時性を高めることが社会から強く望まれている。第4章で提案した手法は，遅延対策実施時の効果を定量的に求めることに適用可能である。その結果，大規模な設備投資にあたっての効果的な判断を客観的に行なうことができ，今後，同様の状況を有する各社の遅延解消に向けた判断に貢献できるものと考えている。

### (3) 運転時間特性を用いた高速かつ高精度な列車運行シミュレーションの評価

第5章では，5分から10分程度の比較的小規模の遅延を対象として，駅停車時間に着目した遅延対策の評価について述べた。特に，遅延発生の主要因である駅の駅停車時間の増大を防止する対策をとった時の効果を推定するための列車運行シミュレーションアルゴリズムを提案した。その中では，到着時刻の予測方法として，従来用いられていた時隔による方法ではなく，運転時間による方法を導入した。また，後方駅での先行列車との出発時間差と運転時間との関係性に着目した運転時間の推定方法を導入し，その関係性を過去の列車運行実績データから求める手法を提案した。

提案アルゴリズムは，簡便でありながら，精度の高いシミュレーションが可

能であるという特徴を持つ。このことを確認するために、実際の列車運行実績データとシミュレーション結果を比較し、実用的な精度でシミュレーションが可能であることを確認した。あわせて、提案アルゴリズムの適用方法を示した。

提案アルゴリズムは、列車運行実績データから規則を見出すこととしているため、今後は、より長期間のデータを用いることを検討する必要がある。

高混雑率、稠密運行の首都圏鉄道路線の遅延対策は、ある一つの対策が劇的な効果を生むということは難しい。対策の実施には多くの時間とコストが必要となるため、対策の選定にあたっては、実験的な検証を繰り返し、効果を見極めることが重要である。提案アルゴリズムを用いることにより、様々な遅延対策の有効性を様々な角度から確認することが可能になる。提案アルゴリズムによって、今後の遅延対策の検証に貢献することができ、それによって、遅延対策の推進に寄与できればと考えている。

#### (4) 列車ダイヤの頑健性を高めるインタラクティブシステムの評価

第6章では、列車ダイヤの頑健性に着目して遅延対策を評価した。輸送力を減少させることなく、列車間隔の余裕を増大することによって列車ダイヤの頑健性を向上させることを目的として、追い込み時間を小さくする運転曲線を作成するシステムを提案した。運転曲線の決定にあたっては、高度な判断が必要になることから、このシステムは、インタラクティブシステムとして実現されている。

この章では、提案システムを現実の路線に適用し、本システムの有効性を示した。また、想定以上の遅延が発生した場合の状況についての分析を行なった。さらに、信号機を移設した場合の効果についての分析を行ない、信号機移設によりさらに追い込み時間を小さくできる場合があること、ただし、その際に現行運転曲線で走行しようとする、かえって追い込み時間が大きくなる場合もあることを示した。

なお、本システムは、インタラクティブシステムとして実現されているために、得られる結果は使用者の判断に依存する。属人的な判断とならないようにするために、今後とも、頑健性の向上の視点から、営業線の実態を見極め、運転曲線に反映できる使用者

の能力の向上に努めていく必要がある。

### (5) 遅延対策 PDCA サイクルの推進

遅延対策の推進には、「Plan-Do-Check-Act」のサイクル（以下、PDCA サイクルという）を廻していくことが重要である。特に、「Plan」を論理的に構築することは、対策の意思決定に寄与するだけでなく、定量的に目標を設定し、効果を評価できるという意味において Do 機能、Check 機能、Act 機能をより有益に働かせることができ、より効果的な対策の展開へとつなげることができる。

本論文の第3章～第5章で論じた遅延状況の可視化、遅延対策指標を用いた遅延対策箇所を選定手法、運転時間特性を用いた列車運行シミュレーションによる効果推定手法は、図7.1の示す通り、いずれも遅延対策計画時「Plan」の論理性を高める役割を担い、PDCA サイクル全体に寄与するものである。また、第6章で論じた頑健性を向上させる運転方法は、駅停車時間の短縮が困難である場合の次なるステップでの改善手法「Act」となりうるものである。これらは、列車運行実績データの分析に基づいた遅延拡大モデル、遅延推定関数、運転時間特性などを基礎として構築したものである。東京メトロにおいて、列車運行実績データの分析は、総合的な遅延対策のPDCA サイクルを廻していくための基本と考えており、他鉄道会社路線の展開も可能と考えている。

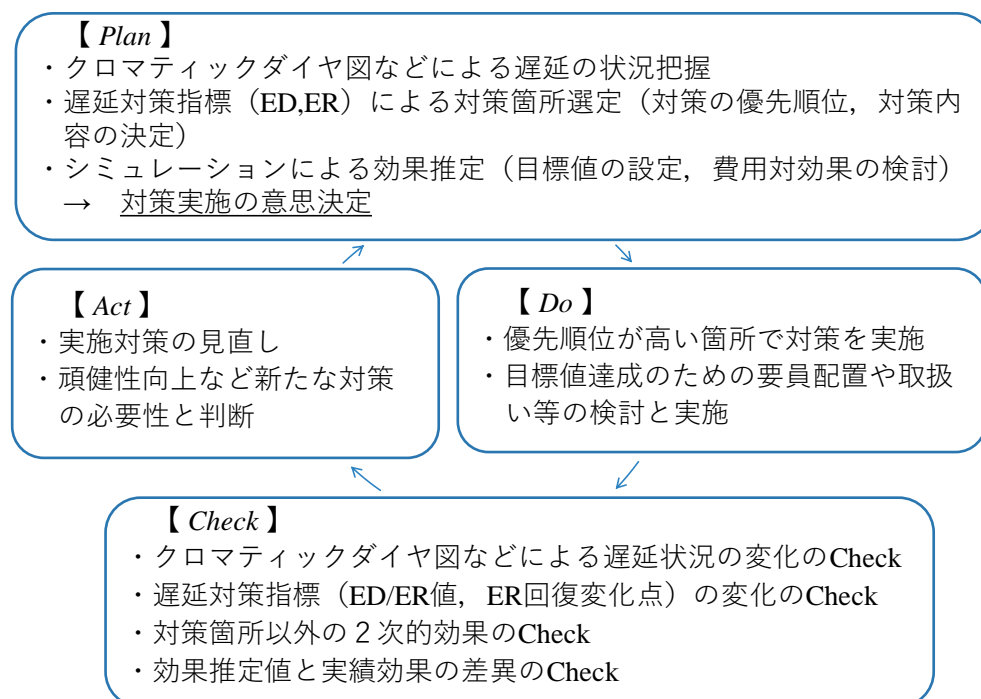


図 7.1 遅延対策の PDCA サイクル

## (6) 関係社員間の遅延対策の目的と効果の共有

遅延対策には多くの社員が係わるため、取り組みの目的と効果に対する関係社員ひとりひとりの理解は不可欠となる。例えば、乗降促進要員を配置した永田町駅（第4章）において、「駅停車時間（ED 値）が7秒短縮したことで、運転時間（ER 値）は34秒短縮した。その結果、永田町駅での到着遅延は69秒縮小した」ことを図4.7、図4.8等を用いて説明したところ、「取り組み意義や定量的な効果をよく理解できた」などの意見が出された。

関係社員が遅延対策指標の理解を深めることは、個々の対策の目的と効果を共有し、遅延対策を推進・継続する基礎となる。

参考として紹介するが、現在は、現場社員独自の取り組みの推進を目的に、図7.2及び図7.3で示しているような日々の運行状況を翌日には把握できる仕組みを構築している。図7.2は路線全体の30分ごとの遅延状況、図7.3は駅毎の各列車の駅停車時間と遅延量（赤線）で、駅停車時間については計画駅停車時間（青棒）、増大時間（黄棒）で示している。

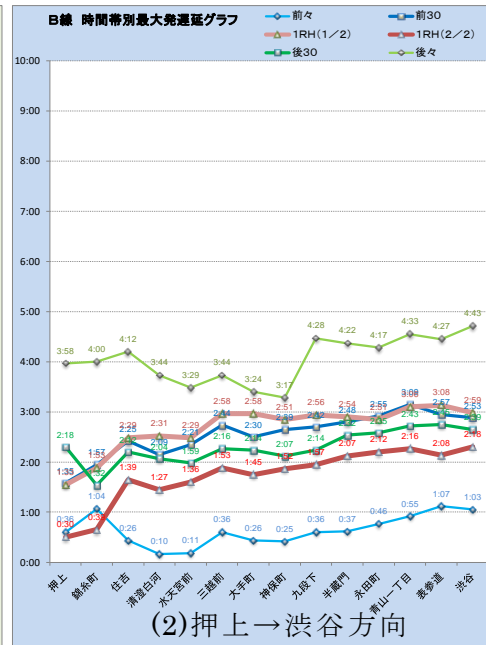
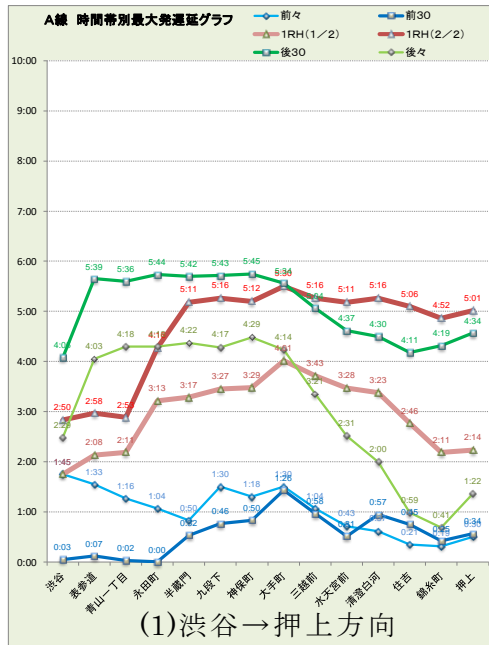
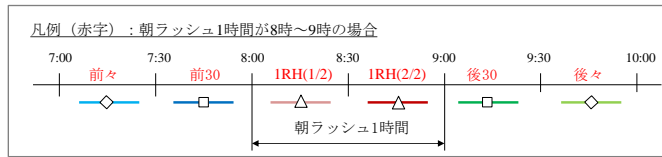


図 7.2 半蔵門線の朝ラッシュ 3 時間帯の遅延量 (2018.9.21 社員共有データ)

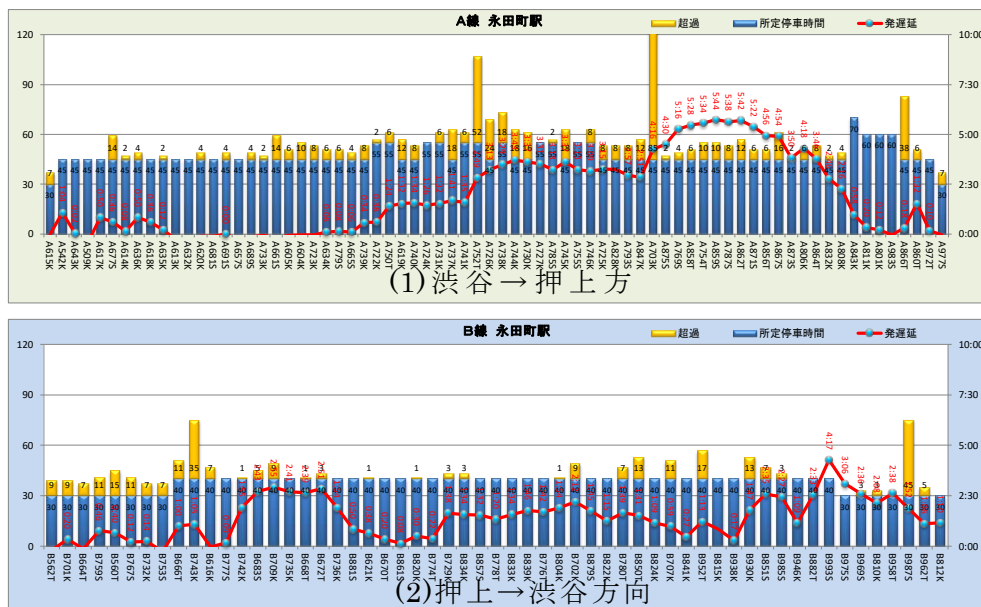


図 7.3 永田町駅の朝ラッシュ 3 時間帯の各列車の駅停車時間 (2018.9.21 社員共有データ)

## 7.2 今後の課題

今後の課題として、以下3項目が挙げられる。

### (1) 遅延対策効果の実績事例の蓄積

第2章では、これまでに実施した遅延対策の実績とその効果について述べた。多額の費用と工期が長期間に渡る遅延対策を意思決定していくためには、今後も実績事例を蓄積していく必要がある。今後も、対策前の効果推定と対策後の実績を検証するPDCAサイクルを繰り返すことで、遅延対策ノウハウを蓄積し、より高いレベルの判断できよう研究に取り組んでいく。

### (2) 列車運行シミュレーションの対象範囲の拡大

第5章で提案した列車運行シミュレーションの対象範囲は、列車運行実績データで運転時間特性が分析できる場合に限っており、新たな信号設備（移動閉そく式など）の導入効果など運転時間特性が判明していない場合の適用は難しい。列車運行シミュレーションの対象範囲拡大のため、microscopic modelなどで運転時間特性を求めるなどの研究を進めている。なお、移動閉そく式については、既に丸ノ内線への導入に向けて実車による実験を開始している。これらの取り組みを通して、移動閉そくに対する効果の理解を深め、他路線への導入の可否や、より効果的な機能の検討を行う必要がある。

### (3) 遅延に対する頑健性の向上

東京メトロでは、混雑率の高い路線での輸送力増強（運行本数を増やすため駅停車時間を短縮する必要が伴う）や、安全性向上を目的としたホームドアの設置（ホームドア稼働時間分の駅停車時間を延長する必要が伴う）の検討を行っている。例えば、混雑率が首都圏で最も高い東西線（199%）では、中野方向の運行本数を27本から30本に増やし、同時にホームドアを導入する計画である。第1章1.1.4.2項で述べた東西線における改良中の施策は、これらを推進するための対策である。更に、各駅における列車到着から出発までの取り扱いの見直し等による駅停車時間の短縮の検討や、第6章で論じた運転方法の変更について具体的な検討に取り組んでいる。

## 謝辞

東京メトロの遅延対策は、担当部署が粛々と取り組んでいたものの、会社全体の取り組みとなったのは2008年～2010年に実施した東西線の遅延対策からと言えます。当時、鉄道統括部長の職にあり、とにかく東西線の遅延を何とか縮小せねばという思いで取り組みを開始しました。そこから始まった本研究が、今日、博士論文としてまとめることができたのは多くの関係社員の遅延縮小への努力と、また、ご指導頂いた教授の方々のご助言があつてのことと深く感謝いたします。

10年に渡り遅延に関する研究を続けてきましたが、その間、当時東京大学におられた家田仁教授（現 政策研究大学院大学教授）に4年間、その後、千葉工業大学 富井規雄教授に3年間ご指導を賜りました。家田教授が東京大学を退官の際には、私としては研究をまとめるに至らず申し訳ない気持ちでおりましたが、それまでの内容を評価頂き、研究を継続するよう励ましのお言葉を頂き今日に至りました。富井教授には、その後の研究の継続のご理解とご指導を賜ることとなり、研究そのものに加えて、本論文の構成の詳細までご指導頂きました。遅延対策としての総合的な理解を深める事ができ、論理的な遅延対策としてまとめる事ができたのもご指導のお蔭とっております。長年に渡る心温まるご指導に、深く感謝いたします。誠にありがとうございました。

2019年2月8日

## 参考文献

---

- 1 東京地下鉄（株）, *TokyoMetroHandbook2018*, pp.56-61, 2018.7
- 2 富井規雄, 列車ダイヤの作り方, pp.87-194, 2012.3
- 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, TER-12, pp.7-11, 2012.10
- 4 Akiyoshi YAMAMURA, Masahito KORESAWA, Shigeaki ADACHI, Norio TOMII, How we have succeeded in regaining Punctuality in Tokyo Metropolitan Railway Network, *WCRR2013-World Congress on Railway Research*, 2013.11
- 5 足立茂章, 列車の遅延とその対策・対策-これまでとこれから, 運輸と経済, 10月号, 2017.10
- 6 国土交通省, Press Release 遅延の「見える化」を開始!, <http://www.mlit.go.jp/common/001215328.pdf>, 2017.12
- 7 東京圏における今後の都市鉄道のありかたについて, 交通審議会答申, 2016.4
- 8 Malachy Carey, Ex ante heuristic measures of schedule reliability, *Transportation Research Part B*, Vol.33, pp.473-494, 1999.9
- 9 Yoko TAKEUCHI, Norio TOMII, Chikara HIRAI, Evaluation Method of Robustness for Train Schedules, *Quarterly Report of RTRI*, Vol.48, pp.197-201, 2007
- 10 Leo Kroon, Gabor Maróti, Mathijn Retel Helmrich, Michiel Vromans, Rommert Dekker, Stochastic improvement of cyclic railway timetables, *Transportation Research Part B*, Vol.42, pp.553-570, 2008.7
- 11 芳田翔一郎, 脇坂賢, 増山繁, 余裕時分再配分方式を用いた遅延に対して頑健な列車計画の生成, オペレーションズ・リサーチ, Vol.57, pp.218-228, 2012.4
- 12 Helga Labermeier, On the Dynamic of Primary and Secondary Delay, 5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis - RailCopenhagen, pp.1-11, 2013.5
- 13 武内陽子, 富井規雄, 鉄道の計画ダイヤの頑健性評価, *J-Rail2003*, 第10回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.415-418, 2003.12
- 14 銭谷孝平, 尾崎尚, 山下孝信, 大槻博丈, GPSトレインナビの開発経緯とその変遷, *JREA*, Vol.57, No. 4, 2014.4
- 15 梅原淳, 定時運行を支える技術, 秀和システム, pp.14~17, 2016.9



- 
- 16 山村明義, 富井規雄, 稠密運行路線における列車の運行実績データの分析に基づく遅延対策指標の提案とその評価, 電気学会論文誌, Vol.138, pp.605-614, 2018.7
  - 17 梅原淳, 定時運行を支える技術, 秀和システム, pp.40~42, 2016.9
  - 18 仮屋崎圭司, 日比野直彦, 森地茂, 列車間隔に着目した運行遅延に関するシミュレーション分析, 土木学会論文集 D3, 土木計画学, Vol.67, pp.I\_1001~I\_1010, 2011.5
  - 19 国土交通省, 鉄道に関する技術上の基準を定める省令等の一部を改正する省令(平成18年国土交通省令第13号)の公布について, [http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/08/080324\\_.html](http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/08/080324_.html), 2018.1
  - 20 富井規雄, 「遅延の見える化」から見えてきたもの(特集 首都圏鉄道の今後), 運輸と経済, Vol.76, pp.65-73, 2016.8
  - 21 Cesar Palomo, Zhan Guo, Cláudio T. Silva, Juliana Freire, Visually Exploring Transportation Schedules, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol. 22, 2016.12
  - 22 Eric Mai, Mark Backman, Rob Hranac, Visualizing Bus Schedule Adherence and Passenger Load Through Marey Graphs, *18th World Congress on Intelligent Transport Systems*, 2011.10
  - 23 Y.J.Byon et al., Transit performance monitoring and analysis with massive gps bus probes of transantiago in Santiago, chile, Emphasis on development of indices for bunching and schedule adherence. *In Transportation Research Board 90th Annual Meeting*. Transportation Research Board, 2011.1
  - 24 稲川真範, 富井規雄, 牛田貢平, 運行実績データの可視化, 第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.745-748, 2009.12
  - 25 交通政策審議会, 東京圏における今後の都市鉄道のあり方について, [http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/tetsudo01\\_sg\\_000261.html](http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/tetsudo01_sg_000261.html), 2017.10
  - 26 山村明義, 運行実績データを活用した稠密運転路線における遅延改善アプローチとその効果, 土木学会論文集 D3, 土木計画学, Vol.70, pp.44-55, 2014.1
  - 27 A. Kono, N. Tomii, Ex-Post heuristic measures of timetable robustness, *Proc. 12th EASTS International Conference of Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 2017.9
  - 28 K. Ushida, S. Makino, N. Tomii, Increasing Robustness of Dense Timetables by Visualization of Train Traffic Record Data and Monte Carlo Simulation, *World Congress on Railway Research*, 2011.5

- 
- 29 落合康文, 列車運行シミュレーションによる定時性向上施策の検討, オペレーションズ・リサーチ, Vol.60, pp.614-621, 2015
  - 30 岩倉成志他, 都市鉄道の列車遅延対策の定量的評価, 土木計画学研究・講演集, Vol.50, No.62, 2014.11
  - 31 Hansen I. A., Pachl J. eds, *Railway Timetabling & Operations: Analysis - Modelling - Optimization - Simulation - Performance Evaluation*, 2nd Edition, DVV Media Group / Eurailpress, 2014.9
  - 32 Hürlimann D., Nash A., Railway simulation using Opentrack, *COMPRAIL2004*, 2004.3
  - 33 RailSys, <http://www.rmcon.de>, accessed 2018.6
  - 34 Janecek D., Weymann F., LUKS - Analysis of lines and junctions, In: *Proc. 12th World Conference on Transport Research*, 2010.7
  - 35 電子情報通信学会知識ベース, 5群 (通信・放送) 1編 6章シミュレーション, [http://www.ieice-hbkb.org/files/05/05gun\\_01hen\\_06.pdf](http://www.ieice-hbkb.org/files/05/05gun_01hen_06.pdf), 2010.6
  - 36 佐藤章, 池田宏, 小野耕司, 新幹線列車トラフィックシミュレーションシステム, 計測と制御, Vol.19, pp.671-675, 1980.7
  - 37 安部恵介, 荒屋真二, 最長径路法を用いた列車運行シミュレーション, 情報処理学会論文誌, Vol.27, pp.103-111, 1986.1
  - 38 鉄道電気ハンドブック, コロナ社, 2007.1
  - 39 鶴飼正人, 植木俊彦, 高浪薫, 藤森聡二, 移動閉そくによる最小時隔運転方式の検討, 鉄道技術研究所速報, No.A-87-145, 1987
  - 40 Jungnickel D., *Graphs, Networks and Algorithms*, Springer, 1999
  - 41 山下修, 運転曲線図と運転曲線作成システム(SPEEDY), 運転協会誌, 48, pp.1-4, 2006.3
  - 42 OpenTrack, <http://www.opentrack.ch>
  - 43 Yasufumi Ochiai, Norio Tomii, Punctuality analysis using a microscopic simulation in which drivers' behaviour is considered, *Journal of Rail Transport, Planning and Management*, Vol.5, pp.128-145, 2015.11
  - 44 Goodman C, Overview of electric railway systems and the calculation of train performance, *The 9th Institution of Engineering and Technology - Professional Development Course on Electric Traction Systems*, 2006.11
  - 45 Yamamura A., Yabuki H., Takatori Y., Koresawa M., Tomii N., Increasing robustness of timetables by deliberate operation of trains to shorten headways, *RailLille2017-7th International Conference on Railway Operation Modeling and Analysis*, 2017.4

---

46 運輸理論研究会, 運輸理論 (再改訂版), 日本鉄道運輸協会, 2010.8

## 研究業績

### 学術誌原著論文

- [1] 山村明義, 富井規雄, 運行実績データに基づく列車運行シミュレーションアルゴリズムによる遅延対策効果の推定, 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), Vol.139 No.2, P.206-P.214, 2019.2
  
- [2] 山村明義, 矢吹英之, 富井規雄, 駅間運転方法の変更による追い込み時間の短縮に基づく列車ダイヤの頑健性の向上, 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), Vol.139 No.1, P.60-P.68, 2019.1
  
- [3] 山村明義, 富井規雄, 列車運行実績データの可視化手法とその評価, 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), Vol.138 No.9, P.756-P.757, 2018.9
  
- [4] 山村明義, 富井規雄, 稠密運行路線における列車の運行実績データの分析に基づく遅延対策指標の提案とその評価, 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), Vol.138 No.7, P.605-P.614, 2018.7
  
- [5] 山村明義, 列車運行実績データを活用した稠密運転路線における遅延改善アプローチとその効果, 土木学会論文集D3 (土木計画学), 70(1), P.44-P.55, 2014

### 国際会議論文

- [1] Akiyoshi Yamamura, Hideyuki Yabuki, Yoshinobu Takatori, Masahito Koresawa, Norio Tomii, Increasing robustness of timetables by deliberate operation of trains to shorten headways, *RailLille2017*, 2017.4

- [2] A. Yamamura, M. Koresawa, S. Adachi & N. Tomii, Taking effective delay reduction measures and using delay elements as indices for Tokyo's metropolitan railways, [www.witpress.com](http://www.witpress.com), *Computer in Railways XIV*, WIT Transactions on The Built Environment, Vol 135, 2014
- [3] A. Yamamura, M. Koresawa, S. Adachi, N. Tomii, How we have succeeded in regaining Punctuality in Tokyo Metropolitan Railway Network, *WCRR-World Congress on Railway Research*, Sydney, Australia, 2013.
- [4] A. Yamamura, M. Koresawa, S. Adachi & N. Tomii, Identification of causes of delays in urban railway, [www.witpress.com](http://www.witpress.com), *Computer in Railways XIII*, WIT Transactions on The Built Environment, Vol 127, 2012

## 国内学会・研究会・シンポジウム・その他口頭発表

- [1] 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の検証, *J-RAIL2012*, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, P.381-P.384, 2012.12
- [2] 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—東京地下鉄東西線での実施例とその検証結果, 電気学会研究会資料, 産業応用部門 交通・電気鉄道研究会, P.7-P.11, 2012.10
- [3] 山村明義, 組織再社会化促進施策が民営化企業の従業員の組織適応に与える影響, 経営行動科学学会年次大会, 発表論文集, P.23-P.25, 2007
- [4] 山村明義, 石坂利一, 山崎隆司, 地下鉄シールド駅の改修とホームデザイン, 第6回 地下空間シンポジウム, 地下空間シンポジウム論文・報告集 6, P.133-P.139, 2001.01
- [5] 藤原康政, 粕谷太郎, 山村明義 [他], 地下構造物の現状と保生技術, 第5回 地下空間シンポジウム, 地下空間シンポジウム論文・報告集 (5), P.217-P.222, 2000.01  
講演 ; パネルディスカッション

## 解説記事等

- [1] 森地茂, 内藤廣, 矢島隆, 山内弘隆, 水嶋智, 森本雄司, 今村俊夫, 山村明義, 飯田則昭, 星野晃司, 都築豊, 超長期的視点に立った鉄道活性化とまちづくり, 運輸政策研究, *Transport policy studies' review* 20(76), P.193-P.199, 2018
- [2] 森本雄司, 今村俊夫, 山村明義, 飯田則昭, 星野晃司, 都築豊, 各鉄道事業者の中長期事業戦略・プロジェクト (シンポジウム 少子高齢社会における持続可能な都市鉄道のあり方), 運輸政策研究, *Transport policy studies' review* 20(76), P.189-P.193, 2018
- [3] 山村明義, 短答直入五輪に向けて設備投資を加速 事故防止のために訓練も強化, *Diamond weekly* 106(8), P.18, 2018.2
- [4] 山村明義, 都営との統合は経営課題(鉄道サバイバル 2018), *Weekly toyo keizai* (6775), P.54-P.55, 2018.2
- [5] 山村明義, 東京メトロ「安心の提供」と「成長への挑戦」, *Subway* (215), P.3-P.10, 2017.11
- [6] 斎藤峻彦, 山村明義, 家田仁, 鼎談 ニッポン地下鉄 その始まりとこれからを語る!, 運輸と経済, 77(10), P.30-P.37, 2017.10
- [7] 山村明義, この人に聞く 都営との統合は経営課題 上場の準備も怠らない, *Weekly toyo keizai* (6745), P.11, 2017.9
- [8] 山村明義, 今城光英, 対談 東京地下鉄の事業を語る(特集 東京地下鉄), *The railway pictorial* 66(12), P.18-P.25, 2016.12
- [9] Akiyoshi Yamamura, Latest developments in the FTA/EPA, *EU-JAPAN INDUSTRIAL DIALOGUE ON RAILWAY*, Brussels, 2015.5
- [10] 山村明義, 5社相直における副都心線・有楽町線の取り組み, 運輸と経済, 74(1), P.57-P.61, 2014
- [11] 山村明義, 変化への対応, *JREA* 57(1), P.38266-P.38268, 2014.1

- [12] 山村明義 , 安全 安心は人材育成から-東京地下鉄(株)の人材育成の取り組み  
(特集 交通事業における人材育成), 運輸と経済, 73(3), 10-15, 2013.3
- [13] 山村明義, 山岡芳行, 越智 繁雄[他], 首都直下地震に備える ハード・ソフトの  
両面から (特集 首都直下地震に備える), 運輸と経済, 72(9), P.4-P.14, 2012.9
- [14] 山村明義, 地下鉄トンネルの補修・改良, 土木学会誌 85(2), P.27-P.30, 2000.2
- [15] 山村明義, 営団地下鉄における構造物保守の概要, JREA 41(7), P.25525-P.25527,  
1998.7
- [16] 山村明義, カルカッタ地下鉄の施設保守現況, JREA 40(7), P.24755-P.24757, 1997.7