

稠密運行路線における  
運転士の運転方法に着目した  
列車ダイヤの作成と  
その頑健性向上に関する研究

Study on a procedure to make robust  
timetables for railways with dense traffic  
considering drivers' operation

令和 3年 3月

落合 康文

## Abstract

There exist an extremely big demands in urban railways in Japan. During morning peak hours, congestion rates of almost all trains exceed 150% in many railway lines in Tokyo, although the population of Japan is decreasing. Thus, social responsibility of railway transportation must be still very important. In order to make full use of transportation capacities, railway companies have made an immense investment and as a result, trains are running very densely using their facilities effectively. In addition, the network of railway lines has become larger and many trains are running directly through several lines in order to reduce the congestion of terminal stations and to improve direct accessibility from suburban area to metropolitan area.

A serious problem, however, is occurring in urban railways in Japan. That is, small delays often happen during rush hours. Because trains are running very densely, even a small delay propagates to succeeding trains and the delay tends to expand. As the network of railway lines are becoming larger, the influence of delays has become much larger than the past both from the viewpoints of time and space.

In order to make timetables more robust, railway companies are making various kinds of efforts such as deploying more staff on a platform, improving signaling systems, enhancing station facilities and so on. Drivers' operation, however, has not been attracting much attention until now although this is a crucial factor to increase robustness.

The objective of this study is to make robust timetables of railways with dense traffic considering Drivers' Operation.

In Chapter 1, the background of the delays and the related works are explained and in Chapter 2, conventional ways to make timetables of dense traffic railway lines together with their problems are explained.

In Chapter 3, a microscopic simulator developed by the authors in which drivers' behavior is considered is introduced. The algorithm of the simulator is explained in detail. Then the results when the simulator is applied to a real case, in which a track relocation work took place. It is shown that the simulator was very useful to precisely evaluate the robustness of timetables.

In Chapter 4, a timetabling procedure in which not only arrival and departure times but running speeds of trains are specified is introduced. The procedure is useful for railway lines where skip and stop operation is realized. In the procedure, the simulator introduced in Chapter 3 is

repeatedly used to evaluate robustness of the produced timetables. The procedure was applied in a real case when it was requested to increase frequency of trains and it was confirmed that the proposed timetabling procedure has succeeded to enhance robustness of the timetable.

In Chapter 5, an algorithm to find the difference between “good” driving and “poor” driving is introduced. This algorithm is based on the decision tree, one of the machine learning algorithms. The proposed algorithm is applied to actual data and the algorithm succeeded to distinguish the driving behavior of good drivers and poor drivers.

In Chapter 6, conclusions of this study are shown and the topics left for future studies are discussed. They are: to develop a procedure to find an optimum train performance curve real-time in which locations and delays of both current, preceding and succeeding trains are simultaneously considered and to develop ATO (automatic train operation) in which driving skills of excellent drivers are implemented.

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	本論文の背景	1
1.2	列車ダイヤの頑健性	2
1.3	列車ダイヤの頑健性と頑健性向上に関する先行研究	3
1.4	運転士の運転方法への着目	6
1.5	本論文の目的・本論文の構成	7
<b>第2章</b>	<b>稠密に列車を運行する路線が抱えている課題とその対応</b>	<b>9</b>
2.1	稠密に列車を運行する路線で顕在化している課題	9
2.2	これまでの混雑緩和対策と遅延対策	9
2.3	稠密に列車を運行する路線における列車ダイヤの特徴と課題	11
2.3.1	列車ダイヤとは	11
2.3.2	急行と各駅停車が混在したダイヤ	11
2.3.3	列車ダイヤの基準となる時間の算出と列車ダイヤ作成の一般的手法	15
2.3.4	稠密に列車を運行する路線における列車ダイヤの課題	17
<b>第3章</b>	<b>運転士の取扱を考慮したマイクロシミュレーションによるラッシュ時の列車運行の分析</b>	<b>20</b>
3.1	はじめに	20
3.2	マイクロシミュレーションによる頑健性向上策の検討	22
3.2.1	鉄道信号の基本と運転士の役割	22
3.2.2	マイクロシミュレーションとは	23
3.2.3	運転士の運転操作方法の考慮	25
3.3	運転士の取扱を考慮したマイクロシミュレータ	26
3.3.1	全体構成	26
3.3.2	各クラスの役割	27
3.3.3	列車の走行に関する計算処理手順	33
3.3.4	運転士の運転操作方法を再現するアルゴリズム	38
3.3.5	シミュレーション結果の評価	44
3.4	運転士の取扱を考慮したマイクロシミュレーションを用いた分析の適用例	47

3.4.1	分析に適用したダイヤ	47
3.4.2	適用路線の定時性に対する目標	49
3.4.3	地下化切替工事の概要	49
3.4.4	地下化切替に伴う朝方ラッシュ輸送への影響予測	53
3.4.5	定時性向上に向けた施策の検討	55
3.4.6	シミュレーション結果に基づく施策の決定	55
3.4.7	地下化切替後の運転状況	61
3.4.8	考察	63
3.5	本章のまとめ	63
<b>第4章</b>	<b>稠密運行路線を対象とする駅間走行速度を考慮した列車ダイヤ作成手法とその評価</b>	<b>65</b>
4.1	はじめに	65
4.2	稠密に列車を運行する路線を対象とした列車ダイヤ作成手法	66
4.2.1	基本的考え方と解決すべき課題	66
4.2.2	抑速速度の設定によるダイヤ作成	67
4.2.3	マイクロシミュレータによる走行方法の検討	68
4.3	適用例とその評価	71
4.3.1	対象とした区間とダイヤ	71
4.3.2	抑速制限速度の決定	71
4.3.3	導入したダイヤの妥当性の検証	79
4.3.4	ダイヤ改正結果の検証	80
4.4	本章のまとめ	85
<b>第5章</b>	<b>決定木を用いた運転士の遅延回復運転の分析</b>	<b>87</b>
5.1	はじめに	87
5.2	先行研究	88
5.3	列車運転の現状と本研究の目的	88
5.3.1	列車運転の規則	88
5.3.2	運転士の運転方法の差異	89
5.3.3	本研究の目的	90
5.4	軌道回路通過データ	90
5.5	決定木	92
5.6	決定木による「よい運転」と「悪い運転」の差異の分析－ 実施例	94
5.6.1	入力データ	94
5.6.2	決定木の生成	94
5.6.3	結果の分析	96
5.6.4	提案手法の結果を受けて実施した対策とその効果	96

5.6.5 ディスカッション . . . . .	101
5.7 本章のまとめ . . . . .	101
<b>第6章 結論</b>	<b>102</b>
6.1 研究成果の要約 . . . . .	102
6.2 今後の課題 . . . . .	103
<b>付録A 本研究の適用例として用いた路線の特徴とこれまでの取り組み</b>	<b>105</b>
A.1 本研究の適用例として用いた路線の特徴 . . . . .	105
A.2 クロマティックダイヤ図描画関連システムの導入 . . . . .	106
A.3 下北沢駅周辺区間の地下化と定時性向上を主眼としたダイヤ改正 . . . . .	108
A.4 複線化工事完成に伴う白紙ダイヤ改正 . . . . .	111
A.4.1 複々線区間の概要 . . . . .	111
A.4.2 新しい朝ラッシュ輸送の概要 . . . . .	112
A.4.3 新しいダイヤの定時性 . . . . .	116
<b>謝辞</b>	<b>117</b>
<b>参考文献</b>	<b>118</b>

# 目 次

1.1	本論文の構成	8
2.1	遅延が伝播・拡大した日の運行実績ダイヤの例	10
2.2	列車ダイヤを構成する3要素	11
2.3	緩急接続ダイヤの例	13
2.4	混雑の平準化を図ったダイヤの例	13
2.5	千鳥停車の例	13
2.6	各駅停車のみのダイヤと優等列車を混在させたダイヤ	14
2.7	運転曲線図の例	15
2.8	同一番線を使用する場合の時隔曲線の例	17
2.9	優等列車を含む列車ダイヤの作成例	18
2.10	優等列車の時間帯による所要時間の違い	19
3.1	信号現示の基本	24
3.2	シミュレータを構成する要素	27
3.3	シミュレータのクラス構成	28
3.4	シミュレータの主な処理フロー	29
3.5	現示系統図の例	32
3.6	速度・引張特性曲線の例	34
3.7	運転士の運転操作モデル	40
3.8	シミュレーション結果の違い	45
3.9	シミュレーション結果の比較	48
3.10	分析に適用したダイヤ	50
3.11	朝ラッシュダイヤの基本パターン	51
3.12	地下化工事区間の概要	51
3.13	東北沢駅(駅H)の信号取扱い	52
3.14	下北沢駅(駅S)前後の取扱い	54
3.15	下北沢駅の停車時分と新宿駅最大遅延の関係	56
3.16	急行の機外停止後の運転の違い	57
3.17	東北沢駅付近における地下化切替前後でのシミュレーション結果の違い	59
3.18	東北沢駅, 世田谷代田駅と新宿駅到着最大遅延の関係	60

3.19	定時性目標達成日数の推移 . . . . .	61
3.20	新宿駅到着遅延が2分以上に発散した日の運行実績 . . . . .	62
4.1	優等列車の駅間の走行の様子 . . . . .	66
4.2	ダイヤ作成の手順 . . . . .	69
4.3	ブロックと抑速速度決定までの流れ . . . . .	70
4.4	ブロック設定の例 . . . . .	70
4.5	対象とした区間と前後区間の列車ダイヤ概要 . . . . .	72
4.6	シミュレーション結果と微修正後のダイヤ . . . . .	73
4.7	新百合ヶ丘駅(7:20:00~8:20:00)を全列車定時に発車した 場合 . . . . .	76
4.8	新百合ヶ丘駅発遅延の分布 . . . . .	77
4.9	向ヶ丘遊園駅での最大遅延(新百合ヶ丘駅7:20:00~8:20:00 発の優等列車に初期遅延を与えた場合) . . . . .	78
4.10	優等列車に初期遅延を与えた場合のシミュレーション結果 (7:30:00~8:00:00) . . . . .	78
4.11	シミュレーション結果(時隔曲線) . . . . .	81
4.12	新百合ヶ丘駅~向ヶ丘遊園駅間の軌道回路占有実績図(7:20 ~8:00) . . . . .	82
4.13	遅延が発生した際の運行の様子 . . . . .	83
4.14	新百合ヶ丘発遅延と向ヶ丘遊園着・通過遅延の分布 . . . . .	84
4.15	遅延回復状況の分布 . . . . .	85
5.1	連続して運転する2列車の例 . . . . .	90
5.2	出発駅における時隔と到着駅における時隔の分布 . . . . .	91
5.3	軌道回路占有図の例 . . . . .	92
5.4	決定木の例 . . . . .	94
5.5	生成された決定木 . . . . .	95
5.6	A駅付近の配線略図 . . . . .	97
5.7	「よい運転(左)」と「悪い運転(右)」の例 . . . . .	97
5.8	軌道回路8T走行中の運転士からA駅への視点 . . . . .	98
5.9	B駅からA駅までの運転運転時分実績の分布 . . . . .	99
5.10	出発駅における時隔と到着駅における時隔の分布の違い . . . . .	100
A.1	小田急電鉄の路線略図 . . . . .	105
A.2	WebTID装置画面 . . . . .	107
A.3	遅延伝播の様子(2013年ダイヤ) . . . . .	109
A.4	遅延対策の実施(2014年ダイヤ) . . . . .	109
A.5	ダイヤ改正前後の遅延発生状況 . . . . .	110



A.6	複々線完成前後の配線略図 . . . . .	111
A.7	新旧ダイヤの比較 . . . . .	113
A.8	朝ラッシュの運行形態の比較 . . . . .	114
A.9	新旧ダイヤ各駅～新宿間，朝方ラッシュ時間帯所要時間の 比較 . . . . .	115
A.10	朝ラッシュの遅延の様子 . . . . .	116

# 表 目 次

2.1	時隔の種類 . . . . .	16
3.1	信号現示と速度制限の例 . . . . .	24
3.2	各クラスの役割 . . . . .	28
3.3	走行抵抗算出に用いた係数 . . . . .	35
3.4	シミュレーションに用いた標準設定値 . . . . .	38
3.5	余裕時分・余裕速度の設定値 . . . . .	44
4.1	シミュレーション結果による比較 . . . . .	80
5.1	信号現示による速度制限の例 . . . . .	89
A.1	WebTID データ . . . . .	107

# 第1章 序論

## 1.1 本論文の背景

日本の都市圏での鉄道に対する需要はまだまだ旺盛である。特に朝方の通勤輸送は少子高齢化が叫ばれる現在においても、多くの路線で混雑が発生しており、鉄道利用旅客は関東運輸局内だけでも1日平均延べ45百万人にのぼる<sup>[1]</sup>。こういった社会的背景のなか、鉄道各社は旺盛な輸送需要に対応するため、設備を最大限に活用し、稠密な列車運行を行っている。一方、稠密に運転をしているが故、初期のわずかな遅れが後続列車に次々と伝播、拡大しやすいという課題がある。

こうした課題があるなか、近年、乗換案内サービスの普及やインターネットの発展により、誰もが簡単に情報を発信・収集できるようになったことで、僅かな遅延や遅延に伴う混雑について、注目が集まりやすくなったとともに、定時性に対する旅客のニーズが高まってきた。

鉄道会社としても、遅延に強い、すなわち頑健性の高い列車ダイヤを作成することは近年の最重要課題となっている。例えば、ある列車に遅延が発生すると、先行列車との間隔が空いてしまうことから、当該箇所の輸送力の低下につながり、その列車の混雑率が上昇する。混雑率が上昇することで、旅客の乗降にさらなる時間がかかることにより、遅延がさらに拡大するという現象が発生する。そのため、鉄道会社は、頑健性の高い列車ダイヤを作成し、このような現象を防止したいと考えている。

頑健性の高い列車ダイヤを作成するためには、実際の運行に関する特徴を仔細に分析し、対策を講じる必要がある。しかし、列車が稠密に運行される路線では、設備、ダイヤ、オペレーションの3つの要素が密接に関連し、それぞれが相互に影響し合いながら運行がなされている<sup>[2]</sup>。

稠密運行路線において列車ダイヤの頑健性を高めるためには、これらの3要素を個別に検討するだけでなく、総合的に分析する必要がある。例えば、先行する列車の運転方法の違いは、後続列車に対する信号の現示の内容やタイミングに影響し、その信号の現示により後続列車の運転できる許容速度に影響が及ぶ。これにより、後続列車の運転速度が低くなると、後続列車の遅延につながり、一層の混雑による遅延の拡大や、さらなる後続の列車に遅延が伝播し、列車ダイヤ全体にまで影響を及ぼすといった具

合である。

従来、個別に設備面や列車ダイヤの作成手法から頑健性を高めるための研究は多くされてきたが、それらは理論的で最適なオペレーションがなされることを前提としている。しかし、現実の列車運行においては、地下鉄など比較的運行形態が複雑でない、ATO（自動列車運転装置）導入線区を除き、運転士が手動で運転を行っている線区が大多数であり、運転士の運転方法による影響を無視することは出来ない。

このような事情から、稠密運行路線における運転士の運転方法に着目し、列車ダイヤ、設備、オペレーション面から総合的に分析し、頑健性を向上させる手法が求められている。

さらに、現在の ATO はいくつかの運転モードを備えている装置も開発されつつあるが、原則として事前にプログラムされた理想的な運転パターンを基に自動で運転する装置が中心である。このため、多様な種別により構成された複雑な列車ダイヤのもと、列車一本一本で運転の方法が異なるような稠密に運行されている路線での導入事例は少ない<sup>[3]</sup>。今後、これらの路線にも対応し、前後列車の運転状況や列車ダイヤを考慮しながら自動的に制御できる高機能な ATO システムを開発するために、現在運転士が行っているような駅間での運転方法に関し、十分に研究が行われ、頑健性の向上に貢献することがますます重要になると考えられる。

## 1.2 列車ダイヤの頑健性

列車ダイヤの遅延は直接の遅延原因である一次遅延と、一次遅延の影響により遅延が伝播拡大することによる遅延の二次遅延に分類される。一次遅延の原因はさまざまであり、大規模な輸送障害の他に、混雑による駅での乗降時間の伸びや、旅客の荷物が挟まるなどで発生する扉点検、急病人救護等が挙げられ、これらを原因とした数分の遅延が日常的に発生している。二次遅延が発生する原因としては、稠密に列車を運行している路線では列車間隔が縮まることにより、後続列車の遅れに波及する場合や、遅延した列車からのお乗り換えの旅客を待ち発車するといった接続による遅延、折り返し駅等で同一の進路を使用する場合の競合による遅延などが挙げられる。

これらに対し、列車ダイヤの工夫により、二次遅延による影響範囲を最小限にとどめ、いかに安定的な輸送を確保するかに近年注目が集まっており、一般に遅延に強く、耐性のある列車ダイヤのことを、頑健性の高い列車ダイヤと呼んでいる。

### 1.3 列車ダイヤの頑健性と頑健性向上に関する先行研究

列車ダイヤの頑健性に影響を与える要因は多岐にわたることから、これまで様々な研究が行われてきている。

#### (1) 運行実績の可視化に関する研究

列車の頑健性を高めるためには、現在の列車ダイヤにおいて、遅延がどのように発生しているか、どのように伝播しているかを把握する必要がある。そこで行われてきたのが、各列車、各駅毎の着発時刻が記録された運行実績データを用いた、実績ダイヤでの遅延の可視化や分析手法に関する研究である。

稲川ら<sup>[4]</sup>は遅延の大きさにより列車ダイヤ図の線色を青から赤に変化させ、色の違いにより遅延の大小が把握できるとともに、遅延伝播の様子を視覚的にとらえることが出来るクロマティックダイヤ図を提案している。牛田<sup>[5]</sup>は東京地下鉄において、運行管理装置から取得できる運行実績データを用いて、落合ら<sup>[6]</sup>は小田急電鉄において、運行管理装置より軌道回路毎に取得が可能な列車通過時刻データを用いて、それぞれクロマティックダイヤ図として可視化に取り組んでいる。これらの研究では、日々の運行実績の把握に加え、ある一定期間の平均値や中央値等を用いることで、全体的な傾向を把握することが容易であり、列車運行を支える係員と遅延の傾向を共有したり、必要な対策を検討することに非常に有用であることを示している。

また、同じく可視化手法に関して、河野ら<sup>[7]</sup>、落合ら<sup>[8]</sup>は相関ルールを用いた遅延の伝播ルート of 可視化を試みている。相関ルールを用いることにより、問題とする閾値を変更したり、発生頻度により絞り込むことが容易であり、より影響の大きい遅延を可視化する手法が提案されている。河野ら<sup>[9]</sup>は可視化に加え、抽出されたルールを基に、遅延の長さや影響範囲の大きさを数値化し、ダイヤ改正前後での頑健性の高さに関して定量的な評価が試みられている。Boris<sup>[10]</sup>は、データマイニング技術の一つである「エピソードマイニング」技術を適用して、頻繁に発生する一連のイベントを見つけることに主眼をおいた研究を行っている。

#### (2) 停車時分に関する研究

列車の頑健性を左右する要素として、停車時分の超過が挙げられる。Palmqvistら<sup>[11]</sup>はスウェーデンと東京それぞれの路線において、停車時分が頑健性に与える影響について分析を行っている。國松ら<sup>[12]</sup>、Adachiら<sup>[13]</sup>は駅における乗降旅客数から必要な停車時分を推定し、列車の混雑と遅延拡大の関連に関して分析を行っている。

しかし、これらはいずれも駅の着・発・通過事象に注目したものであり、駅間の列車の挙動については言及がない。

### (3) 時隔に関する研究

列車の頑健性を左右するもう一つの要素として列車間の間隔（時隔）が挙げられる。列車の運転は、通常、駅間で定められた最高速度や、曲線、勾配による制限速度といった、許容される制限速度まで速度を上昇させて運転することが出来る「進行信号」に従い運転することを前提としている。先行列車の位置関係や駅構内の特定の番線に進入・進出させるための分岐器の状態によって、適切に列車を停止、または減速させるための信号システムも同様に、「進行信号」に従い運転すること前提に設計・配置されている。

これに対して、熊澤ら<sup>[14][15]</sup>は、先行列車により接近し、「進行信号」ではない、低い速度制限のかかる信号現示を見ながら運転することで、「進行信号」を見ながら運転するよりも時隔を縮められることを示している。また、複数の運転方法の違いにより、運転時分と時隔がどのように変化するかに関し、比較評価手法を提案している。Yabukiら<sup>[16]</sup>は、同様に、通常時の運転よりも低速で駅に進入することにより、先行列車との時隔を短縮しつつ、後続の列車に影響が最小限となる運転方法を見出すアルゴリズムを提案している。ただし、これらの研究では、いずれも運転操作に個人差がなく、かつ先行列車が定刻に運行されたうえで、理想的な運転がなされることを前提としている。

また、平栗ら<sup>[17]</sup>は予測制御に関する研究で、先行列車に遅延が発生した場合、先行列車が発車したのち、後続の列車が最短の時隔で進入できる接近点に向け、機外停止を行わないような制御を行うことで、従来よりも遅延回復力を高める研究を行っている。

仮屋崎ら<sup>[18]</sup>、西山ら<sup>[19]</sup>は列車遅延が発生した際の運転方法として、可能な限り先行列車に接近して運転するのではなく、敢えて速度を落として運転することにより時隔が縮まり、回復力が向上することを示している。

これらの研究では、列車ダイヤが予め定められている中で、主に先行列車の遅延状況を予測し、後続列車の運転速度を制御することによる時隔の短縮効果に着目している。

### (4) 列車群の運行シミュレーションに関する研究

列車ダイヤの頑健性を評価するために、特定の列車だけでなく、列車の運行全般をシミュレーションし、分析することが有効である。シミュレーションモデルとして、macroscopic シミュレーションと microscopic シミュレーションに大別され<sup>[20]</sup>、様々な手法が提案されている。

macroscopic シミュレーションとは、駅や、運転上拠点となる地点にお

ける着・発・通過といった事象を基にシミュレーションを行うものであり、佐藤ら<sup>[21]</sup>は、列車の到着と発車をイベントとして、その次に生起可能なイベントと生起時刻を順番に決定し、シミュレーションを行うイベントドリブンによる手法を、安部ら<sup>[22]</sup>は、列車の到着と発車のイベントをノードおよび、ノード間に必要な時間をアークとする有向グラフで列車ダイヤを表現し、各ノードへの最長経路の重みを計算することにより列車運行を予測する、最長経路法を用いた列車運行シミュレーションモデルを提案している。

microscopic シミュレーションとは、列車の動きを力学的な運動として定義し、逐次位置や速度を算出し、列車位置に応じて変化する信号システムやその他の事象を連続的にシミュレーションするモデルであり、OpenTrack<sup>[23][24]</sup>やRailSys<sup>[25][26]</sup>、Luks<sup>[27]</sup>、HERMES<sup>[28]</sup>などが挙げられる。Capekら<sup>[29]</sup>、Ercolaniら<sup>[30]</sup>は列車ダイヤを作成するうえでの有用性について示している。

これらシミュレーションでは各列車は理想的な運転がなされることを前提としており、稠密に列車を運行している路線において、運転士による駅間の運転方法について陽に考慮されたものは見当たらない。

岩倉ら<sup>[31]</sup>は東急田園都市線をモデルとし、朝方ラッシュ時における列車の遅延連鎖シミュレーション手法を構築している。駅間運転時分や、列車運行の挙動に関する再現性に関しては、特定の条件下で作成された、標準の運転曲線との比較にとどまっている。

#### (5) 列車ダイヤの頑健性の定義と推定に関する研究

列車ダイヤの頑健性の定義に関して、Takeuchiら<sup>[32]</sup>、Devildeら<sup>[33]</sup>により議論が行われており、Besinovicら<sup>[34]</sup>、Cerreto<sup>[35]</sup>は与えられた列車ダイヤに対する頑健性に関する分析を行っているほか、Carey<sup>[36]</sup>やAnderssonら<sup>[37]</sup>は、列車ダイヤの性質から頑健性を推定する手法を提案している。

#### (6) 列車ダイヤの頑健性向上・および頑健性の高い列車ダイヤ作成手法に関する研究

Anderssonら<sup>[38]</sup>、Salidoら<sup>[39]</sup>は、計画された列車ダイヤの中に含まれる様々な余裕時分の付与の仕方による頑健性の違いについて研究しているほか、Vromansら<sup>[40]</sup>は、列車種別毎の停車駅を工夫し、各種別ともなるべく同じ表定速度で運行することにより、頑健性を高める手法を考案している。

Kroonら<sup>[41]</sup>、芳田ら<sup>[42]</sup>は、頑健な列車ダイヤを作成するアルゴリズムを提案している。しかし、対象としている列車ダイヤは、本研究で対象とするものよりもはるかに疎な列車ダイヤである。坂口ら<sup>[43]</sup>は遅延リス

クに基づき列車ダイヤを修正することにより、頑健性を向上する手法を提案しているが、優等列車については今後の課題とされている。

#### (7) 駅間の列車の挙動に関する研究

列車の駅間の挙動に関する研究という観点では、DAS(Driver Advisory System)に関する研究、ATOに関する研究等が挙げられる。

Panouら<sup>[44]</sup>、Scheepmakerら<sup>[45]</sup>によると、DASに関する研究において、あらかじめ決められた、余裕時分を含む列車ダイヤを基に、通常の最高速度まで上げた運転ではなく、最高速度を下げ、より省エネルギーな運転方法を運転士に提案したり、各列車に遅延が生じた場合に、各方面から列車が集中するボトルネックとなる箇所での機外停止を避けるための運転方法について運転士に提案する機能に関する研究・開発が行われている。

また、Graffagninoら<sup>[46]</sup>は、スイス連邦鉄道において、日々の確定した列車ダイヤ（欧州の鉄道では、国際貨物列車の運行が不定期で頻繁にあるため、日々列車毎の運転時刻が変わることが一般的にある）に基づき、多方面からの列車が集中するボトルネック箇所での機外停止を避けるとともに、省エネルギーな運転方法を当日の早朝に計算し、駅間（拠点間）毎に目安となる運転速度を表示することで、省エネルギーと定時性の向上確保につなげることに成功している。

ATOに関する研究としては、大島ら<sup>[47]</sup>は列車の停止位置に対し自動的に停止させるための予見ファジー制御を提案し、数々の路線において実用化されてきた。村田ら<sup>[48]</sup>は高密度運転に対応するためのA-ATO方式を提案している。また、大矢ら<sup>[49]</sup>は予め定められた目標の速度に対し、機械的な遅延を考慮した制御手法に関して研究がなされているほか、文献<sup>[50]</sup>では、予め定められた標準的な運転時分を超えない範囲で、惰行を有効に活用することによる省エネルギー運転パターンを作成し、制御する事例が紹介されている。

## 1.4 運転士の運転方法への着目

列車の頑健性を高めるためには、一次遅延の原因を掴み対策をとるとともに、列車ダイヤ、設備、オペレーションの全ての面から遅延の拡大を防止し、二次遅延による影響を最小限に抑えることができる対策をとる必要がある。

特に、稠密に列車を運行している路線では、駅間での列車の位置関係により、列車間の間隔を確保する装置をとおして当該列車だけでなく、後続の列車の定時性に違いが表れる。駅間において、どのような運転を行うかは運転士に委ねられており、運転士の駅間の運転方法によって頑健性が左右されるといえる。



しかしながら、これまでの頑健性向上に関する研究においては、駅の着発・通過時刻を基準とした運行に関する分析が中心であり、駅間における列車の状態、とりわけ、運転士の駅間の運転方法に注目し、頑健性に与える影響や、それらを考慮した列車ダイヤ作成手法について研究された事例は報告されていない。

## 1.5 本論文の目的・本論文の構成

本論文では ATO が導入されていない路線を対象とし、稠密に列車を運行している路線における運転士の運転方法に着目する。運転士の運転方法が列車ダイヤに与える影響を分析するとともに、それらを考慮したなかで頑健性を向上させる手法を考案することが本論文の目的である。

図 1.1 に論文の構成と各章の相関について示す。第 2 章では稠密に列車を運行する路線が抱える列車ダイヤの課題と対応について述べる。第 3 章では、標準的な運転士の運転方法を考慮できるマイクロシミュレータの開発、ならびに同シミュレータを用いたラッシュ時の列車運行の分析の有用性について述べる。第 4 章では第 3 章で開発したマイクロシミュレータを活用し、稠密運行線区の頑健性を高めるための、駅間走行速度を考慮した新しい列車ダイヤ作成手法とその有用性について述べる。第 5 章では実際の運転士の運転方法について、過去の運行実績データから、機械学習の一つである決定木を用いて、「よい運転」と「悪い運転」を決定づける運転方法の差異を見いだす手法を構築し、対策が必要な箇所の抽出を試みる。第 6 章では、本論文の成果とその意義を要約し、今後の課題について述べる。

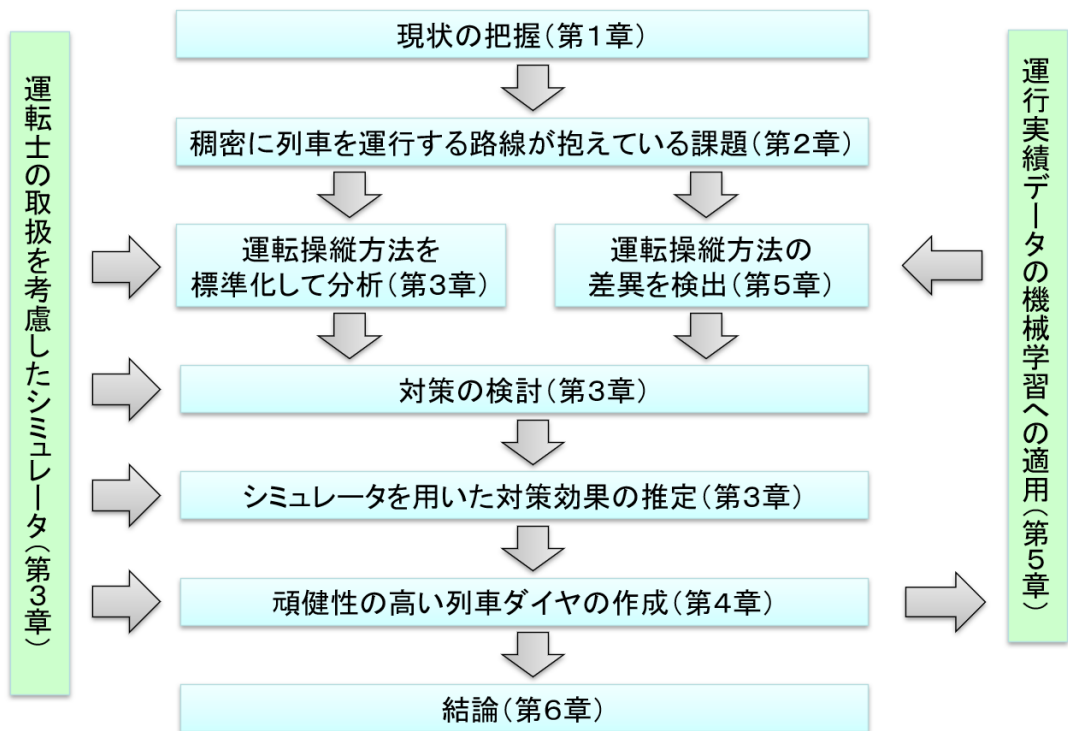


図 1.1 本論文の構成

## 第2章 稠密に列車を運行する路線が抱えている課題とその対応

### 2.1 稠密に列車を運行する路線で顕在化している課題

稠密に列車を運行している大都市方面への通勤路線では、朝方ラッシュピーク時間帯、郊外の住宅地から都心方面へ多くの通勤、通学旅客の利用による混雑が発生している。これまで、各鉄道会社による長年にわたる輸送力の増強施策実施の結果、東京圏の鉄道における混雑の度合いは昭和50年の221%と比較すると、大きく改善されてきている<sup>[51]</sup>ものの、混雑が原因による慢性的な遅延が発生している<sup>[52]</sup>。

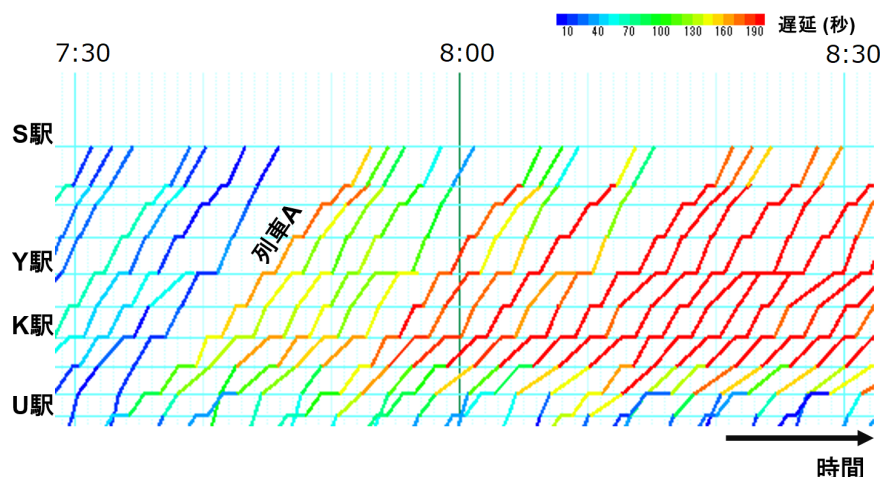
また、混雑緩和を図るため、各路線では線路容量を極限まで使用し、輸送力増強を図った結果、ひとたび遅延が発生すると、その遅延が後続の列車に伝播しやすく、拡大しやすくなっている(図2.1)。加えて、路線をまたいだ相互直通運転網の充実により、遅延による影響が他路線へ広範囲に拡がり、長時間にわたり影響が及ぶという課題がある<sup>[53]</sup>。

さらに、近年の情報技術の進展により、計画された時刻表を基にした経路検索案内や、各駅で運行情報ディスプレイによる広域にわたる遅延情報の表示、各社ホームページでの遅延証明証の発行に加え、個別の列車の遅延情報をアプリ等で簡単に把握できるようになったことから、社会的にも定時性に対する要望が高まってきており、混雑を緩和し、定時性を向上していくことが各鉄道会社共通の課題となっている。

### 2.2 これまでの混雑緩和対策と遅延対策

これまで鉄道各社では、遅延の発生を防止するために、さまざまな混雑緩和策をとることが重要と考えられてきた。列車に混雑が生じると遅延の発生要因となり、列車に遅延が発生すると、当該の列車に混雑が発生し、さらなる遅延が発生するという悪循環が生じることから、混雑緩和対策と遅延対策は表裏一体の関係にあるためである。

混雑を緩和するためには、単位時間当たりの輸送力を増加させることが必要である。そこで、輸送力を増強するために、列車本数の増加、編成両数の増強、車両容積の大型化による一両あたりの乗車定員の増加などが行



各列車の線色は遅延の大きさを表している。この例では、列車 A に U 駅付近より僅かな遅延が発生し、S 駅手前まで遅延が拡大している様子が確認できる (S 駅手前に余裕時分が付してあることから、S 駅の到着は若干回復している)。加えて、列車 A の遅延が K 駅では後続の列車に伝播し、後続列車の遅延が拡大している様子をとらえることができる。

図 2.1 遅延が伝播・拡大した日の運行実績ダイヤの例

われてきた。また、車両の増備だけでなく、信号保安設備の改良や、車両の加減速性能を向上することにより、時隔の短縮を図るなど、設備面での改良が長期にわたり重ねられ、列車本数の増加に寄与してきた。

単位時間当たりの輸送力を最大限確保するためには、駅における停車時分を短く保つ必要もある。そこで、車両の扉幅を広くし、一度に乗降できる旅客数を増加させたり、駅ホーム上の係員を増員したり、混雑列車、混雑箇所を明示することで、特定の列車・扉への旅客集中を避けるよう誘導を行うこと等により、駅での停車時分を短縮するための工夫が行われている [54][55]。

同一方向に 2 以上番線がある駅では、交互の番線に着発させるダイヤを設定することで、停車時分を最大限確保するとともに、駅における僅かな発車の遅れが後続の列車に伝播しにくくするような工夫も行われている [56]。

また、郊外と都心を結ぶ民鉄と地下鉄との相互直通運転や、都心部を起終点とした線区別の折り返し運転を縮小し、路線・線区をまたいだ直通運転が積極的に行われている。これは、旅客の直通利便性向上だけでなく、他路線との乗換駅において、乗換旅客による駅ホームの混雑を防止できるという効果もあるためである。

なお、都市圏で稠密に列車を運行している路線において、設備面での改良は既に限界に近く、さらなる抜本的な輸送力増強には、複線を複々線化するといった大規模な改良工事が必要となる。これらを実施するには多額の費用と膨大な時間を要する。このため、設備面だけでなく、ソフト面での対策が求められており、利用客に向けた、ラッシュピーク時間帯を避け

た時差通勤へのご協力の呼びかけに加え、次節以降で述べる列車ダイヤ面での工夫や、オペレーション面での工夫による混雑緩和策と遅延対策の重要性が高まっている。

## 2.3 稠密に列車を運行する路線における列車ダイヤの特徴と課題

### 2.3.1 列車ダイヤとは

列車ダイヤとは、各列車に対して、列車種別、各駅の着発時刻・通過時刻、使用番線、運転線路を定めた輸送計画を指す。列車ダイヤは、輸送需要（OD - Origin Destination データ）を基に、列車の本数や列車種別の構成、列車種別ごとの停車駅・通過駅を定め、その後、運転線路、着・発・通過時刻と番線を決定していくという手順で作成される。

各列車の各駅における着・発・通過時刻は、図 2.2 に示すとおり、各駅間を走行するのにかかる時間（以下「運転時分」という）と、停車時分、時隔の 3 要素から構成される。これらの時刻は、設備や停車駅の異なる複数の列車を適切に組み合わせることにより、5 秒から 15 秒単位の精度で策定されている [2][56]。

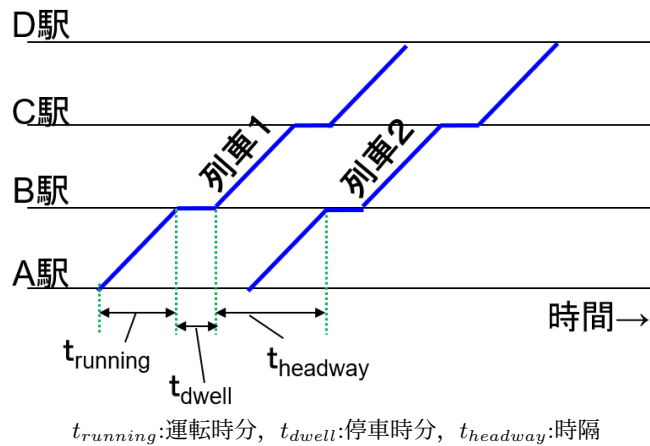


図 2.2 列車ダイヤを構成する 3 要素

### 2.3.2 急行と各駅停車が混在したダイヤ

沿線の各駅と都心部との間の移動需要が非常に大きい都市圏の路線の列車ダイヤの特徴の一つとして、各駅停車のみではなく、快速や急行といっ

た停車駅が異なり、途中駅を通過する速達タイプの列車（以下これらをまとめて「優等列車」という）を各駅停車と同一線路上で混在して運行する形態が挙げられる。このような運行形態がとられている理由はさまざまであるが、大きく三つの側面を持っている。

### (1) 速達性の向上

駅間距離が非常に短い路線において、遠方から都心に向かう旅客に対し、途中駅を通過することにより速達性を向上させることが出来る。この場合、途中通過駅からの利便性を損なうことがないように、主要駅では各駅停車から優等列車へ同一ホームでの乗り換えを可能にする接続形態がとられることも多く、緩急接続ダイヤと呼ばれている(図 2.3)。

### (2) 混雑の平準化

列車ダイヤに優等列車を組み込むことにより、混雑を平準化できるという側面がある。例えば各駅停車と急行列車で運行されている路線において、急行列車については都心に近い駅をすべて通過するダイヤ設定とすると、各駅停車の都心部での混雑を緩和することが出来る。旅客の動向として、目的地まで最早で到着できる列車を選択する嗜好が強いことが知られており<sup>[12]</sup>、図 2.3 の例では、A,B,C 駅から E 駅に向かう旅客が急行に集中することが見込まれる。そこで、図 2.4 のように、急行の停車駅を A 駅,B 駅とし、C 駅では各駅停車と接続しないダイヤに変更すると、A,B 駅から E 駅に向かう旅客は急行に、C,D 駅から E 駅に向かう旅客は各駅停車に乗車することとなり、混雑を平準化することが出来る。(もちろん、現実の路線では、各駅の利用旅客数や動向を踏まえて慎重に停車駅を設定する必要がある。)

最も混雑する区間で乗車率が均一になるように列車本数を調整することで、停車駅の多い各駅停車の近郊区間での停車時分を最小限に抑えることが出来ることから、列車本数の確保に加え、全体の所要時間短縮にも寄与できる。その他にも、図 2.5 のように、優等列車の停車駅を分散化（千鳥停車と呼ばれる）させ、各列車の混雑率を均一に保ちつつ速達性向上に寄与する手法も用いられている。

### (3) 輸送力の増強

優等列車を活用することで、輸送力を高めることが出来る。例を挙げると、複線で方向別に1つのホームしかない駅において、先行列車が出発してから、後続の列車がスムーズに到着するまで1分30秒の信号設備を有し、停車する列車の停車時分を1分と仮定する。全てが各駅停車の場合、図 2.6(a) に示すとおり2分30秒間隔で運行することになり、列車本数は、1時間あたり24本が上限となる。一方で、24本のうち、各駅に停車する

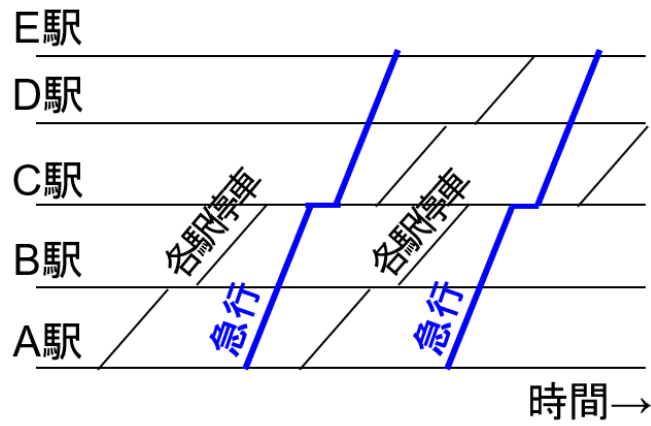


図 2.3 緩急接続ダイヤの例

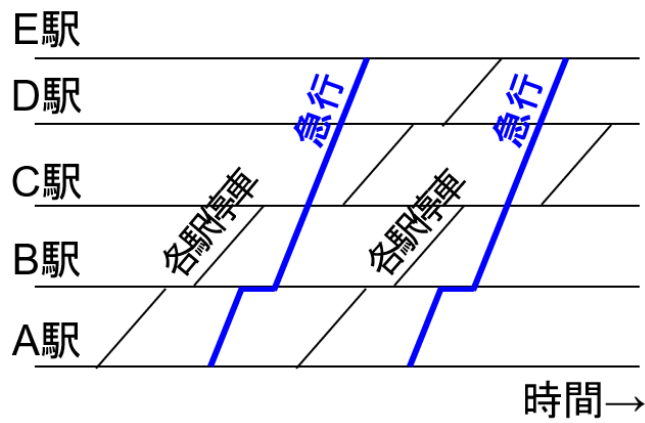


図 2.4 混雑の平準化を図ったダイヤの例

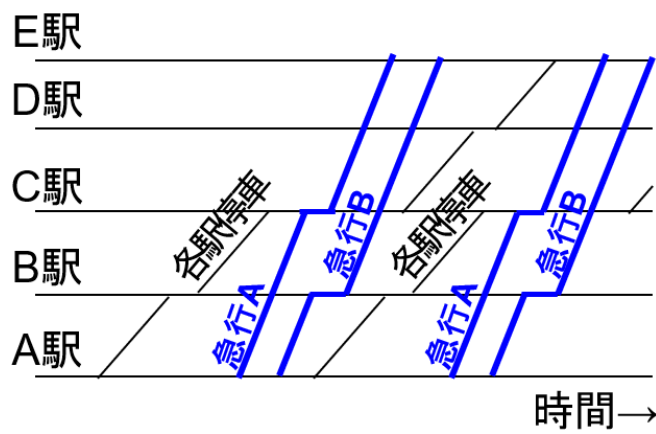
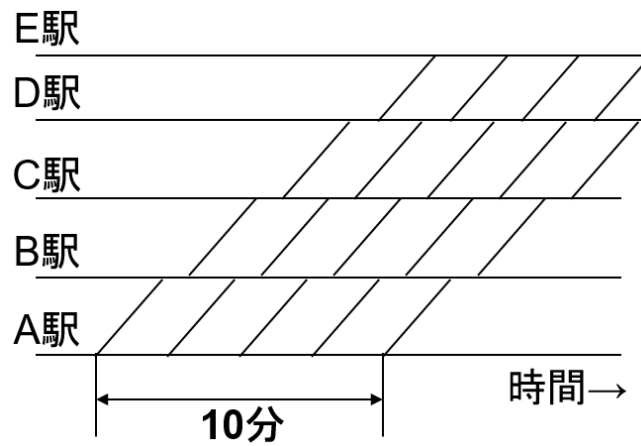
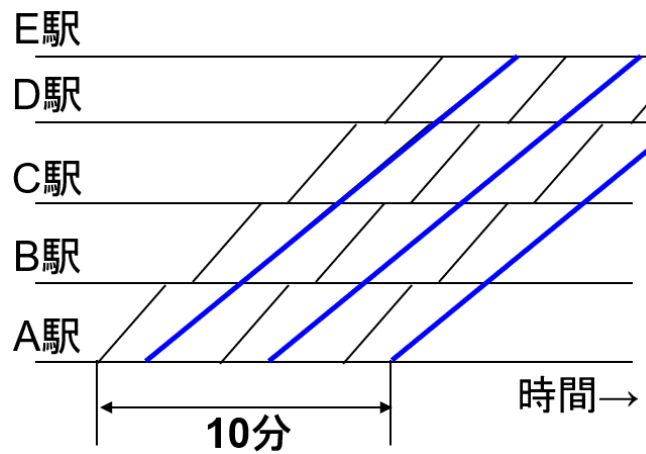


図 2.5 千鳥停車の例

列車を15本に限定し、残りの列車は通過させるとすると、停車時分が減少した分の9分を他の列車の増発分に割り当てることが出来る。すると、図2.6(b)に示すように、多額の費用と時間をかけて信号設備を改良しなくても1時間あたり30本まで列車を運転できることとなる。



(a) 各駅停車のみのダイヤ



(b) 優等列車を混在させたダイヤ

図 2.6 各駅停車のみのダイヤと優等列車を混在させたダイヤ



### 2.3.3 列車ダイヤの基準となる時間の算出と列車ダイヤ作成の一般的手法

列車ダイヤを作成するうえで、基準となる運転時分、時隔の一般的な算出方法、ならびに列車ダイヤの作成手法について述べる。

#### (1) 運転時分の査定

列車ダイヤを構成する列車種別が決定すると、列車種別ごとに、各駅間の運転時分を査定する。運転時分の査定については、当該駅間の最高速度・制限速度、線路の勾配や曲線のほか、車両の性能などを基に運動方程式を用いて計算される。計算結果は図2.7のような、横軸に基準地点からの距離、縦軸に出発駅からの経過時間と速度を示した運転曲線図により表し、どの位置で加速をするか、時速何kmで加速をやめ惰行するか、どの位置でブレーキをかけるか等、細かく条件を確認しながら、駅間を走行するのに必要な時間を査定する。この際、列車ダイヤを作成するうえで、最低限必要な運転時分（すなわち、最速で到達できる時分）を査定し、基準の時間とする必要があることから、先行列車による影響は一切受けないことを前提とし、場所ごとに許容される最高速度で、理想的な運転が行われた場合の運転時分を査定する。（運転する日によって性能の異なる車両を用いる場合は、使用する車両形式ごとに運転曲線を作図し運転時分を査定する方法や、車両性能が最も低い形式を適用し、運転時分を査定する方法、あるいは、標準的な車両を用いて運転時分を査定する方法などがある。）

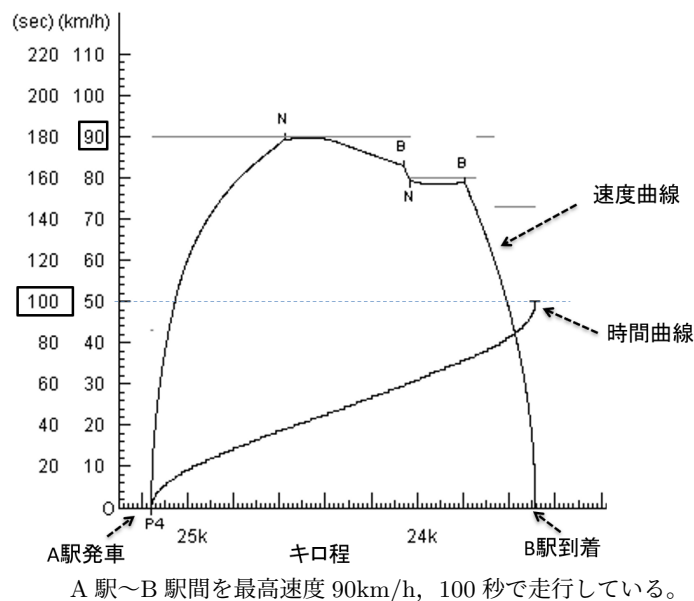


図 2.7 運転曲線図の例

## (2) 時隔の査定

(1) で作図した運転曲線とおりに列車を運転するために必要な先行列車との時隔の査定を行う。時隔の組み合わせは表 2.1 の通り多岐にわたるうえ、厳密には先行列車と後続列車の車両性能や編成両数によっても異なることから、その組み合わせは膨大である。このため、多くの場合代表的な組み合わせを設定し、運転曲線図と信号現示系統図を用いて時隔曲線図を作図したのち、必要な時隔を査定し、列車ダイヤに用いるのが一般的である [57]。

査定にあたっては、図 2.8 に示すように、横軸に先行列車の最初の駅を基準とした経過時間、縦軸に距離をとり、先行列車の位置・速度と信号現示を記すとともに、後続列車の位置・速度を描くことで、列車と列車の間に確保すべき必要な時間を算出することができる。

表 2.1 時隔の種類

番線	先行列車	後続列車
同一番線	出発	到着
同一番線	通過	到着
同一番線	出発	通過
同一番線	通過	通過
異なる番線	到着	到着
異なる番線	到着	通過
異なる番線	出発	出発
異なる番線	出発	通過
異なる番線	通過	出発
異なる番線	通過	到着
異なる番線	通過	通過

## (3) 停車時分の設定

停車駅における停車時分については、扉の開閉操作にかかる時間や旅客の乗降に要する時間に加え、前後列車の運転時隔を勘案し、過去の実績等を参考にしながら必要十分な時間を設定する。

## (4) 列車ダイヤの作成

(1)(2) により査定した列車種別ごとの運転時分および各駅の時隔と、(3) 述べた列車毎に必要な停車時分を組み合わせ、列車ダイヤを策定する。この際、各列車の駅間の運転時分と、各駅での列車と列車の時隔が、査定した時間を下回ることが無いように設定していくことで、全体の列車ダイヤ

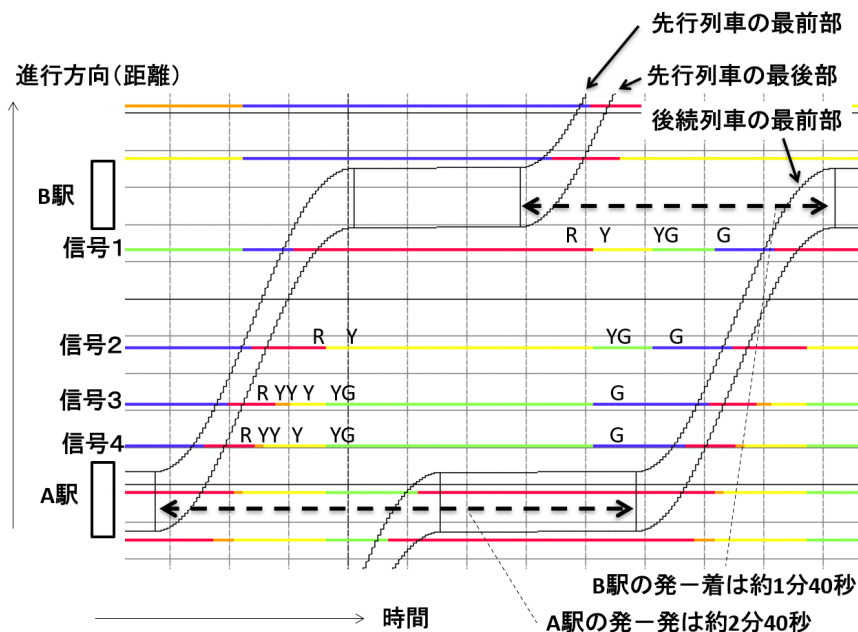


図 2.8 同一番線を使用する場合の時隔曲線の例

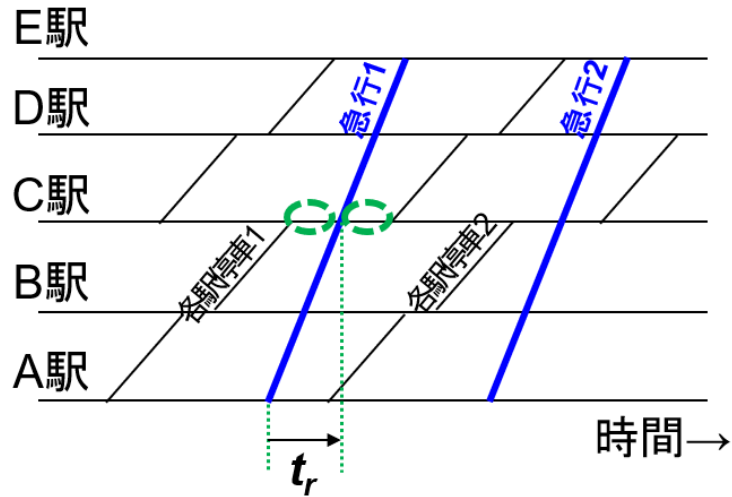
を作成する。

図 2.9(a) は速達性を優先した優等列車を含む列車ダイヤの例である。この場合、急行 1 の AC 駅間の運転時分は (1) で述べた手法により査定した最速の運転時分に、若干の余裕時分を付加した時間を設定する。C 駅における、各駅停車と急行の運転間隔は、(2) で査定した時隔以上の値を用いて策定するのが一般的である。

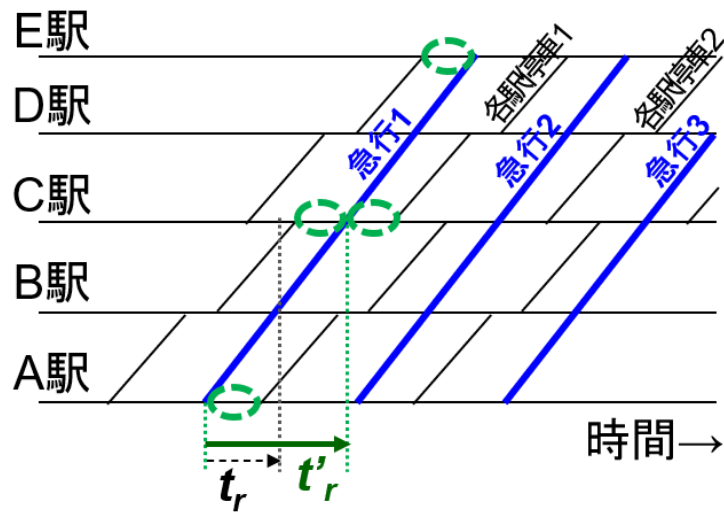
図 2.9(b) はラッシュ時間帯の列車ダイヤの例である。列車本数を可能な限り増加させ、稠密に列車を運行する必要がある場合、優等列車の運転時分をあえて増大させる（実際に首都圏各路線で走行している優等列車のラッシュ時間帯とオフピーク時間帯での所要時間の違いを図 2.10 に示す）。この場合の優等列車の時刻の定め方については、主要駅における前後列車との時隔を基準にして、各駅の着・発・通過時刻を決定することが一般的である。

### 2.3.4 稠密に列車を運行する路線における列車ダイヤの課題

2.3.2 節で述べた通り、稠密に列車を運行する路線において、優等列車の運転は有用であるが、列車ダイヤの頑健性を向上させるためにはいくつかの課題がある。



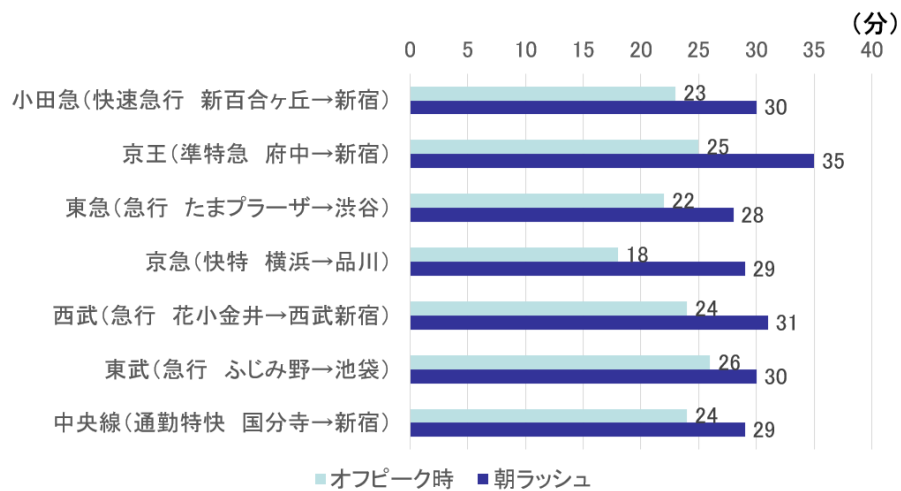
(a) オフピーク時間帯の例



この例の場合、「急行1」のA駅発時刻は、「各駅停車2」のA駅発車時刻から必要な時隔を引いた時刻に設定する。また、C駅通過時刻は、「各駅停車1」のC駅到着時刻から必要な時隔を加えた時刻に設定することで、「急行1」のAC駅間の運転時分  $t'_r$  が定まる。

(b) ラッシュ時間帯の例

図 2.9 優等列車を含む列車ダイヤの作成例



(2020年7月時点の各社時刻表により作成)

図 2.10 優等列車の時間帯による所要時間の違い

(1) 優等列車の運転時分が増大することによる課題

ラッシュ時間帯の列車運行は輸送力を最大限に確保する必要があることから、図 2.9(b) のように、優等列車の運転時分は増大し、各駅停車と各駅停車の合間を縫うように走行せざるを得ない。このような列車ダイヤでは、優等列車が必要以上に先行列車に追いついてしまうケースや、先行列車に追いつくことを嫌い、先行列車との間隔が開いてしまうケースが発生する。前者のケースにおいては、駅間での機外停止により当該列車に遅延が生じるほか、後者のケースにおいては、列車ダイヤで定められた時刻(計画時刻)どおりに運転することが出来ずに遅延が生じ、さらに、その遅延が後続の列車に伝播するという課題がある。

(2) 優等列車の運転方法が明確でないことによる課題

優等列車を担当する運転士に与えられる情報は、駅の着・発・通過時刻である。しかし、このときの駅間の運転方法は運転士の判断に任されており、列車ダイヤには何ら規定がない。このため、先行列車に接近して運転する場合の運転方法については、運転士による個人差が生じるという課題がある。

(3) 列車ダイヤを作成するうえでの課題

これまでの列車ダイヤ作成手法では、駅における着・発・通過時刻のみに着目しており、駅間における列車の挙動による前後列車の影響を十分に考慮できていないという課題がある。

# 第3章 運転士の取扱を考慮したマイクロシミュレーションによるラッシュ時の列車運行の分析

## 3.1 はじめに

稠密に列車を運行している路線において、列車ダイヤの頑健性を高める施策を検討するためには、列車の運行に係わるさまざまな要素がどのように関連し、列車ダイヤの頑健性に影響しているかを詳細に分析する必要がある。このような列車運行全般を仔細にシミュレーションし、分析を行うのに適している手法として、マイクロシミュレーション<sup>[20]</sup>が挙げられる。マイクロシミュレーションでは、式3.1や式3.2のように、列車の動きを力学的な運動としてモデル化することで、設定したシミュレーション周期毎に逐次各列車の速度や位置を算出する。各列車の速度や位置を算出するにあたっては、ある時刻時点の各列車の車両の状態や、線路条件等から列車の加減速度を算出し、駅間における列車の走行の仕方をシミュレーションするとともに、信号システムの挙動をモデル化し、列車位置を基準に再現する等、運行に係わるさまざまな要素を詳細にシミュレーションし、分析することが出来る。

$$V_{i,t} = \sum_{k=0}^{t-1} \alpha_{i,k} \Delta t \quad (3.1)$$

$V_{i,t}$  : 列車  $i$  のある時刻  $t$  の速度 (km/h)  
 $\alpha_{i,k}$  : 列車  $i$  のある時刻  $k$  の加減速度 (km/h/s)  
 $\Delta t$  : シミュレーション周期 (sec)

$$S_{i,t} = \sum_{k=0}^{t-1} \frac{V_{i,k} + V_{i,k+1}}{7.2} \Delta t \quad (3.2)$$

$S_{i,t}$  : 列車  $i$  のある時刻  $t$  の在線位置 (m)  
 $V_{i,k}$  : 列車  $i$  のある時刻  $k$  の速度 (km/h)  
 $\Delta t$  : シミュレーション周期 (sec)

ここで、同モデルによるラッシュ運行の再現性を高めるためには、式 3.1 における列車  $i$  のある時刻  $k$  の加減速度  $\alpha_{i,k}$  が重要な役割を果たすことは明らかであるが、この加減速度の制御は、現実世界においては各列車に乗務する運転士の手動操作により行われている。

従って、ラッシュ時の運行の再現性を高めるためには、実際の運転士の心理や取扱いをモデル化し、十分に考慮する必要がある。運転士は、先行列車の影響を受けず、ダイヤどおりに運転できる場合には、標準的な運転を行えるよう訓練が徹底されている。また、遅延が発生した場合や、ラッシュ時のように、先行列車に接近して運転せざるを得ず、信号現示が頻繁に変化する状況で運転する場合には、制限速度の許すなかで可能な限り高速で走行し、遅延の回復に努めるなど、状況に応じて、臨機応変な対応が求められる。しかし、手動による運転操作であると同時に、制限速度を超えると自動的にブレーキがかかるといった保安装置も備わっていることから、制限速度と完全に一致した速度で運転することは難しい。特に下り坂では勾配による加速により速度超過が発生しやすいため、制限速度よりもやや低い速度で走行しているという実態がある。従って、2.3.3(1) で述べたような理想的な状況を想定した運転方法では、現実を再現するうえでは限界がある。

また、既存のアルゴリズムでは、運転操作を再現する際、最高速度や制限速度等の制約に違反した場合、時間的に遡り、運転操作を途中からやり直し、制約の違反を解消するという手法も用いられる。しかし、より現実に近いラッシュ運行を再現するためには、複数の列車運行を同時に再現し、時間的に遡ることなく、各種運転上の制約を違反せずに運転がなされる必要がある。そこで、本章では、ラッシュ時の運行の再現性を高めるために、運転士の取扱いを明示的に考慮した、時間的に遡ることのないマイクロシミュレータの構築を試みる。なお、現実の世界では運転士毎に運転操作に個人差があるが、本章では標準的な運転操作を再現したうえでラッシュ運行のシミュレーションが行えるようにするとともに、様々な要素を変化させたとき、頑健性がどのように変化するか、詳細に分析出来るようにすることを目的とする。

以下、3.2 節では、鉄道信号の基本と運転士の役割とともに、シミュレーションにおいて、明示的に考慮する必要のある要素について述べる。3.3 節では、オブジェクト指向モデルにより構築した運転士の取扱いを考慮したシミュレータについて述べる。3.4 節では、同シミュレータを用いた分析の適用例として、駅の地下化に伴う設備変更、およびそれに伴う運転方法の変更が頑健性に与える影響について、同シミュレーションを用いて行った分析内容を示すとともに、地下化工事施行後の実際の運行状況について検証し、分析が有効であったことを示す。

## 3.2 マイクロシミュレーションによる頑健性向上策の検討

### 3.2.1 鉄道信号の基本と運転士の役割

鉄道信号には、列車と列車の間隔を確保し、安全を確保する方法として、主にスピードシグナル式とルートシグナル式の2種類がある。

スピードシグナル式の信号方式が導入されている線区においては、勾配や曲線、進入・進出する駅構内の番線によるポイントの速度制限などを加味したうえで信号現示がなされるため、運転士の役割は、原則として信号が示す速度に従って運転するだけで列車運行の安全が確保される。この方式は、駅構内が大規模で複雑なヨーロッパ各国において一般的に採用されているほか、日本国内では新幹線やJR山手線、地下鉄各路線等、ATC(自動列車制御装置)を導入している路線で採用されている。

一方で、日本の多くの路線で一般的に採用されているのはルートシグナル方式である。この信号方式が導入されている線区においては、分岐器により複数の進路がある場合に、進路毎に1つの信号機が建植されている。運転士はどの信号機に進行を指示する信号(赤信号以外の信号)が現示されているかを確認することで、この先開通している進路に関する情報と、先行列車との接近状況に応じた制限速度が分かる仕組みになっている。

曲線や勾配といった線路条件による速度制限は、特殊な現示を行う場所を除き信号現示に加味されていない。このため、進むべき進路上に存在する曲線、勾配、分岐器等による速度制限を全て運転士は記憶している必要がある。スピードシグナル方式では、信号機設置個所からこの先の線路条件に応じて速度制限がかかるが、ルートシグナル方式では、当該の線路条件に応じた速度制限がかかる場所までに、運転士が適切に減速させることで運転がなされる。(近年では、停止信号の手前に停止させ、列車衝突を防止するためのATS(自動列車停止装置)の付加機能として、曲線や分岐器の制限に関しても、速度を超過し重大事故につながる恐れのある箇所には自動的にブレーキがかかる仕組みが導入されており、運転士の記憶に加え、機械的に安全が担保されている<sup>[58]</sup>。)

続いて、図3.1に閉そくと信号機の基本的な概念を示す。閉そくとは線路をいくつかの区間に区切り(閉そく区間という)、列車の分割や併合といった例外を除き、1閉そく区間には1列車のみ在線出来る状態を保つことで、列車同士の衝突を防止し安全を確保している方式である。CBTCのような次世代の列車制御システムを除き、ATS,ATC,地上に信号機を配置し現示を運転士に表示する方式,車上の運転台で信号を現示する方式の全ての方式に共通した仕組みである<sup>[59]</sup>。

地上に信号を配置する方式について概説すると、当該閉そく区間に先行



列車が在線している場合は、閉そく区間の入り口にある信号機に赤信号（R 現示）が現示され、信号機より先に（「信号機内方」という。）進入できないことを示す。その一つ手前の区間では黄色信号（Y 現示）、さらにもう一つ手前の区間では青信号（G 現示）が現示される仕組みとなっている（閉そく区間の長さや、その他条件により、G 現示から R 現示に至るまでの間で YGF 現示、YG 現示や YY 現示といった現示がされる場合もあるほか、特別許可されている列車に対し、より高速での運転を許可する GG 現示も存在する）。後続の列車は信号現示の種類毎に定められた制限速度以下で運転し、必ず赤信号の手前で停止することで、先行列車に追突することの無いよう、安全を確保する仕組みである。

それぞれの現示に対する制限速度は、各社により異なるが、一例をあげると表 3.1 に示すとおりである。運転士は信号機を超えて運転する際には、その現示による制限速度以下になるよう信号機手前で減速し進入する。その制限速度を超えて進入しようとした場合、停止信号の手前で停止できるような制御だけでなく、当該の制限速度以下になるよう、ATS により強制的にブレーキがかかる仕組みを備えている線区もある。

車上信号による方式では、先行列車の手前の閉そく区間毎に各区间ごとの制限速度に関する情報を地上装置から車上装置に直接送信する方式や、この先進入可能な閉そく区間までの情報を車上装置に送信し、車上装置側で距離や線路条件等に応じた制限速度を計算し、運転台の速度計付近に現在走行可能な制限速度を表示する方式などがある。この場合運転士は運転台に表示される制限速度以下となるよう運転操作を行う。先行列車に接近し、制限速度が下がる場合には、はじめに ATC によるブレーキにより自動的に制限速度以下に速度が調整されたのちに、新しい制限速度以下の範囲内で運転士が操作を行うという点で、地上に信号機を置く場合と運転士の役割に若干の相違がある。

本研究で用いるシミュレータは、地上配置型の鉄道信号と、保安装置については、制限速度毎に自動的にブレーキが作用する ATS によるシステムを前提に運転士の役割を再現できるものとして構築する。なお、保安装置の機能を再現するモジュールを変更することで、ATC や CBTC の線区を再現することも容易に可能な仕様として構築することとする。

### 3.2.2 マイクロシミュレーションとは

列車の運行を再現するシミュレーション方式として、主に macroscopic シミュレーションと microscopic シミュレーションに大別される<sup>[20]</sup>。

macroscopic simulation モデルは、駅の着と発の事象のみを対象とし離

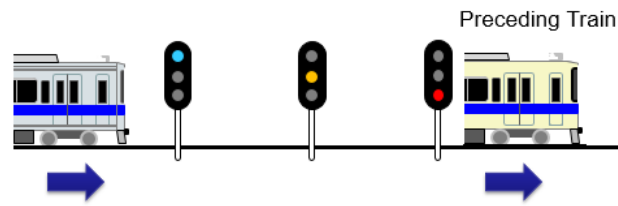


図 3.1 信号現示の基本

表 3.1 信号現示と速度制限の例

現示	現示色	制限速度
停止	Red	0km/h
警戒	Yellow + Yellow	25km/h
注意	Yellow	45km/h
減速	Yellow + Green	75km/h
進行	Green	制限なし

散的にシミュレーションする方式である [21][22]。この方式では、列車の駅間の詳細な挙動はシミュレーション対象とされず、信号システムから受ける先行列車の遅延の影響も直接には考慮されない。このため、大規模な路線ネットワークにおいて、短時間に今後の列車ダイヤを大域的に予測するといった用途には適しているが、列車が稠密に走行する路線において、先行列車の影響を考慮する用途のためには十分でない。

一方で、microscopic simulation モデルは、3.1 節で述べたとおり、運動方程式にもとづいて列車の動きを連続的にシミュレーションする方式である。この方式では、列車の駅間での挙動を忠実に再現するために、勾配や曲線といった線路条件や、車両性能に基づき計算をするほか、式 3.1, 式 3.2 に示した通り、列車の速度と位置は 100ms~1 秒程度の周期で繰り返し計算を行うことで、詳細な挙動を再現することができる。この際、線路条件と車両性能の 2 要素だけでなく、3.2.1 節で述べた先行列車の位置関係による信号機の挙動や、列車ダイヤ、運転士の思考、列車が駅に接近してきた際の転てつ器の操作といった、現実の世界で行われている複数の要素をモデル化し、同時にシミュレーションを行うことができるという特徴がある。したがって、稠密に列車を運行する際、前後列車の運転速度、位置関係による信号現示からの影響もシミュレーション結果に反映され、詳細な分析を行うことが出来る。加えて、対象とする路線の設備や条件に合わせて、入力内容や動作内容を容易に変更し、適用することができることから、特定の路線や特定の条件による制約はなく、一般的に詳細な分析が

可能である。以上のことから、ラッシュ時間帯の頑健性向上の施策を検討するためにはこの方式が適している。

macroscopic simulation 方式と比較すると microscopic simulation 方式は計算量が多いため、シミュレーション速度は速くないものの、近年のコンピュータハードウェアの高性能化とともに今日では列車ダイヤの頑健性に関する分析<sup>[34][35]</sup>や運転整理アルゴリズムに関する分析<sup>[60][61][62]</sup>、列車ダイヤによる省エネルギー化に関する分析<sup>[63][64]</sup>等、様々な分析に用いられている。

なお、上記のように microscopic シミュレーションについては、これまで多くの研究事例が報告されているが、運転士の運転方法を陽に考慮した研究は報告されていない。そこで、本章では、設備全般に加え、現実的な運転士の運転方法をモデル化し、シミュレーション要素に加えることで、標準的な運行をラッシュ時間帯全般にわたり再現できるシミュレータを構築する。

### 3.2.3 運転士の運転操作方法の考慮

ラッシュ時間帯の運行は種別の異なる列車が特に緻密に運行されているため、運転士は線路条件に加え、先行列車の動きにより刻々と変化する信号現示に応じて、的確に列車を運転する必要がある。また、1つのミスが重大事故につながりかねないため、1つの確認を行うにも、必要十分な時間をかけて行う必要がある他、混雑した車内にいる旅客に対する乗り心地の配慮も当然必要である。そこで、本研究において運転士の運転方法をモデル化するうえで考慮した主要な要素を以下に示す。

#### (1) 惰行確保秒数

列車を運転する際、力行（「りっこう」とよみ、加速のことをいう）から制動、あるいは制動から力行へと変化する場合、車両の挙動の遅れに加え、乗り心地の面から、一定時間の惰行をその間に挟む必要がある。具体的な数値としては、筆者の運転士としての経験から、力行から制動に変化する場合には5秒程度、制動から力行に変化する場合には10秒程度惰行を確保する。

#### (2) 停止信号による停止後、運転を再開するまでの時間

ラッシュ時間帯は高密度に列車が運転されているため、停止信号により信号機の手前（機外）で停車する場合がある。運転士は、この信号機の現示が進行を指示する現示に変化した場合、現示の変化を認めたのち、当該信号機を指差し、声に出して現示を確認後（指差喚呼）、制動を緩め、力行位置にハンドルを操作することで、車両のモータに電流が流れ、列車が

起動する。現実的なシミュレーション結果を得るためには、このときにかかる時間（具体的には、8秒程度）を考慮する必要がある。

### (3) 下り坂運転時のブレーキ操作

駅間の運転時分を査定するための一般的な運転曲線では、下り坂については等速で作図している。しかし、現実的には乗車旅客数やこう配、架線電圧等により完全な等速で運転することは難しく、制動と惰行を繰り返しながら走行していくケースが多い。従って、現実と合致した結果を得るためには、等速運転ではなく、制動と惰行を繰り返す運転（具体的には、制動操作時は0.5km/h/sでの速度低下、5秒程度の惰行により、制限速度付近への速度上昇の後再び制動操作を繰り返す）とする必要がある。

### (4) 乗り心地の考慮

運転士は、自らの運転操作が車内の乗客の乗り心地に与える影響を考慮して運転操作を行う。具体的には、信号現示が頻繁に変化し、制限速度が短時間に变化する場合にも、力行と制動を短時間に繰り返すことなく、なるべく加減速が滑らかになるような運転を行なう。駅間の列車運行を忠実に模擬するためには、この点を考慮する必要がある。

### (5) 速度低下時の再加速

運転士は、速度がある値以上低下してきた場合には再度加速を行なう。シミュレーションにおいても、この操作を反映できる必要がある。

## 3.3 運転士の取扱を考慮したマイクロシミュレータ

### 3.3.1 全体構成

今回製作するマイクロシミュレータにおいて、運転士の取り扱いを考慮するための要素および、シミュレータへの入力項目と出力項目について図3.2に示す。本シミュレータでは、対象とする路線の信号機の位置や間隔等を定数として入力し、シミュレーションを行う。なお、これらに変更になった場合もしくは、変更した場合に列車の運行がどのように変化するかについては、シミュレータへの入力内容を変更することで詳細なシミュレーションを行うことができる。

なお、本マイクロシミュレータは、複雑なソフトウェアを開発する際に今日一般的に用いられているオブジェクト指向言語<sup>[65]</sup>であるJAVA言語を用いて製作を行った。主なクラス構成を図3.3に、それらクラスの役割を表3.2に示す。

各設備一つ一つをクラス部品とし、それぞれの機能を再現する構成としており、MainControllerクラスからの一定周期で実施される更新通知に

より数値計算を行う形式としている。なお、最小シミュレーション単位を、車両の挙動に関するものは 100ms 周期、その他各軌道回路（各閉そく区間内に列車が存在するか否かを検知する装置）・信号現示・運行表示盤スタイルでの表示は 1 秒周期とすることで、精度を確保しつつ、高速でシミュレーションが行われる構成とした。

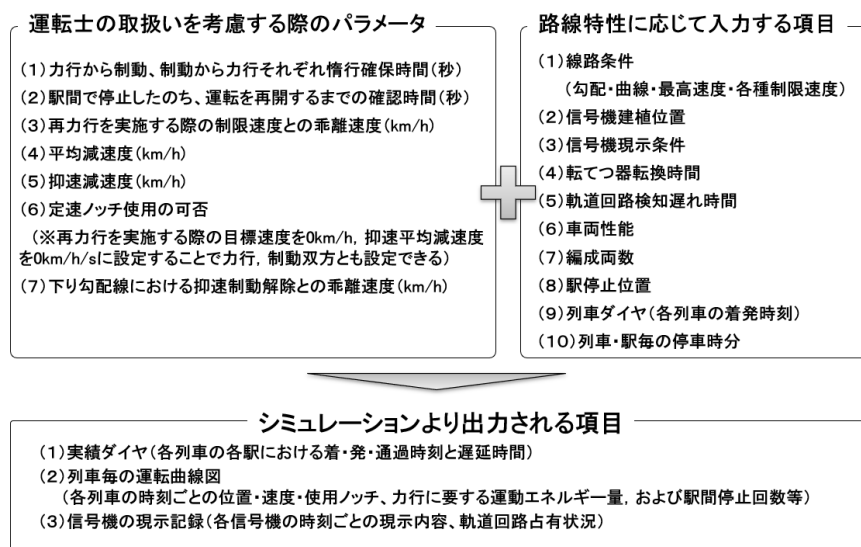


図 3.2 シミュレータを構成する要素

シミュレーションの主な処理を図 3.4 に示す。TrainCarController クラスのサブクラスとして MotorMan クラスを用意し、このクラスに運転士の運転操作を再現する機能を実装した。詳細は次節以降で述べる。

### 3.3.2 各クラスの役割

#### MainController

MainController クラスは、シミュレーションの全体をコントロールする役割を担っている。この MainController クラスより、シミュレーションに関する全ての要素のうち、TrainCarController クラスへは 100ms 周期で、それ以外の各種 Controller クラスに 1 秒周期で最新の状況に数値計算を行うように指示する。

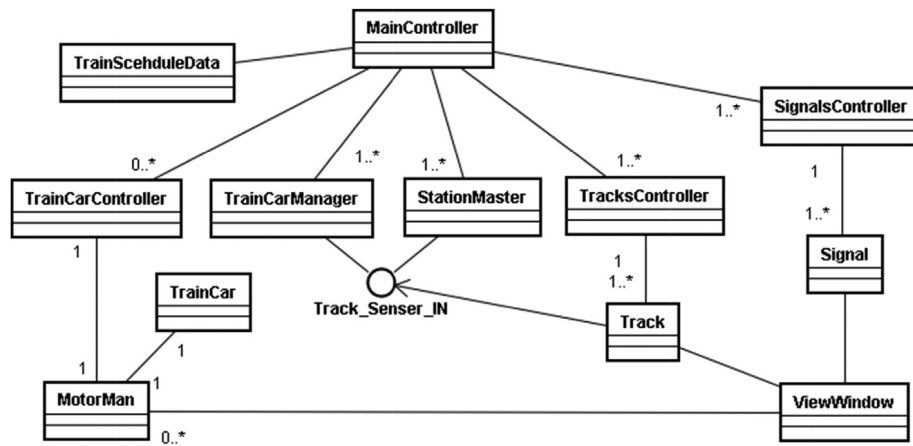


図 3.3 シミュレータのクラス構成

表 3.2 各クラスの役割

Class	Role
MainController	Supervise simulation process
TrainScheduleData	Train schedule data
TrainCarController	Controls a train
TrainCar	Controls a movement of a train
TrainCarManager	Manages trains
Track_Sensor	Sensor for a track
StationMaster	Controls routes in a station
TracksController	Manages situations of tracks
Track	Corresponds to each track
SignalsController	Controls signals
Signal	Corresponds to a track
ViewWindow	Manages GUI

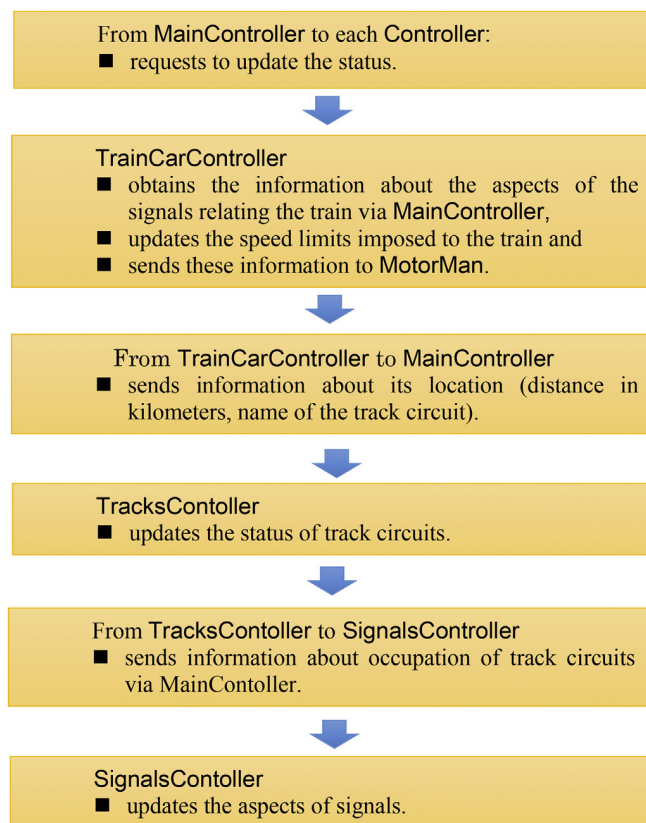


図 3.4 シミュレータの主な処理フロー

シミュレーションに関連する要素として、各閉そく区間毎に1つまたは複数設置され、それぞれの区間毎に列車の在線有無を検知する軌道回路に関する情報を一括管理する TracksController クラス、駅名や駅の停止位置の他、列車ダイヤを参照しながら、列車接近時の分岐器・信号機操作を再現する機能を持った StationMaster クラス、軌道回路の条件、および駅構内における条件等から現示すべき信号を算出する SignalsController クラス、列車ダイヤに基づき、各列車をシミュレーション対象区間に生成、削除の管理を行う TrainCarManger クラス、運転士の役割を再現する MotorMan クラス、および各車両の性能、現在の走行状況、次に停車する駅の情報、及び走行する区間の線路条件や制限速度等を保持する TrainCar クラスを内包している TrainCarController クラス、および、列車ダイヤに関する情報が含まれる TrainScheduleData クラスをそれぞれ管理し、各要素の最新の状況、及びデータの参照先を保持している。

## TracksController

TracksController クラスは内部に各軌道回路を表現する Track クラスを保持しており、軌道回路に関する情報として、該当軌道回路が所属する路線判別コード（上下線別・急行線・緩行線等）、基準駅からの開始キロ程 (m)、終了キロ程 (m)、および在線列車の有無、在線列車番号を管理する。

MainController クラスから更新要求が来た際に、TrainCarManager クラスより走行中の全列車 (TrainCarController クラス) のリストを取得する。その後、各列車の在線位置 (キロ程、走行中の路線判別コード等) を取得し、軌道回路毎に列車在線の有無を判定し、各軌道回路の状態を保持するとともに、当該の軌道回路に列車が在線している場合は在線列車の列車番号を管理する。

## StationMaster

StationMaster クラスは各駅毎に用意され、それぞれ属性として駅名や構内にある番線、車形・編成両数毎の停止位置を保持する。

また、構内に分岐器があり、列車の進入・進出を駅長が主体的に制御を行う必要のある「停車場」（そうでない駅は、一般に「停留場」と呼ぶ）では、駅構内に設置されている分岐器、関連する軌道回路、信号機、およびそれらの現示に関する情報を保持しており、駅に進入するための信号機（場内信号機）から、駅を進出するための信号機（出発信号機）の間に関連する設備を守備範囲としている。

処理内容は以下のとおりである。はじめに、駅・進入進路毎に設定されている制御開始点と呼ばれる軌道回路に列車が進入すると、Track\_Sensor\_IN



インタフェースクラスを通じて StationMaster クラスが列車の進入を検知する。同軌道回路の進入により列車の接近を検知すると、当該軌道回路 (Track クラス) に保持されている列車番号を参照・取得し、列車ダイヤと照合することで、自駅に停車するか、通過するか、どの番線に進入するかを判定する。

列車が自駅に停車する場合、関連する進路上の軌道回路上に列車が存在しないかを確認したのち、分岐器の開通方向を確認、異なる方向に開通している場合は、正しい方向に転てつ機を転換する。全ての条件が整ったのちに、場内信号機に進行を指示する信号を現示できる条件にセットすることで、後述する SignalsController クラスにより当該信号機の現示が進行を指示する信号現示に変更される。これにより列車は信号現示に従って運転し、駅構内の所定番線に進入できる状態になる。

当該駅に到着すると、後述する TrainCarController クラスより到着通知を受ける。到着通知を受け取ったのち、列車ダイヤを参照し、計画された出発時刻の約 30 秒前 (厳密には駅毎に前方の踏切の有無等による条件により適切な時間を設定する必要がある)、もしくは、遅延が発生している場合には計画された列車順序に従って出発信号機に進行を指示する信号現示を表示できるよう条件をセットする。

その後、

- 到着時刻から、当該列車・駅に設定された最小停車時分以上経過している
- 現在時刻が計画出発時刻を過ぎている
- 出発信号に進行を指示する現示後、扉を閉め、安全確認に必要な時間が経過している

の条件を全て満たした場合に、TrainController クラスに出発許可の通知を出すことで、列車は自駅を出発する。

当該駅を通過する列車の場合は、原則として、出発信号機に進行を指示する信号を現示できる条件が整い、出発信号機に進行を指示する信号を現示したあと、場内信号機に進行を指示する信号を現示することで、当該の駅に停車することがないような制御を行う。

なお、当該の駅が停留場である場合は、列車が到着した際の通知を受けたのち、上記出発する条件が整っているかを判定のみ行う。

## SignalsController

SignalsController クラスは、各信号機が現示する信号の種類 (3 現示の場合は R・Y・G, 5 現示の場合は R・YY・Y・YG・G 等という) と各現示に

よる速度制限、および、図 3.5 に示すような、各信号機に関連する軌道回路と列車在線状況に応じた現示パターンデータを保持する。MainController より更新通知を受け取ると、信号機毎に、関係する全ての軌道回路の列車在線有無を参照し、各軌道回路における列車の在線状況から表示すべき現示の条件を判定し、現示すべき信号を算出する機能を持つ。

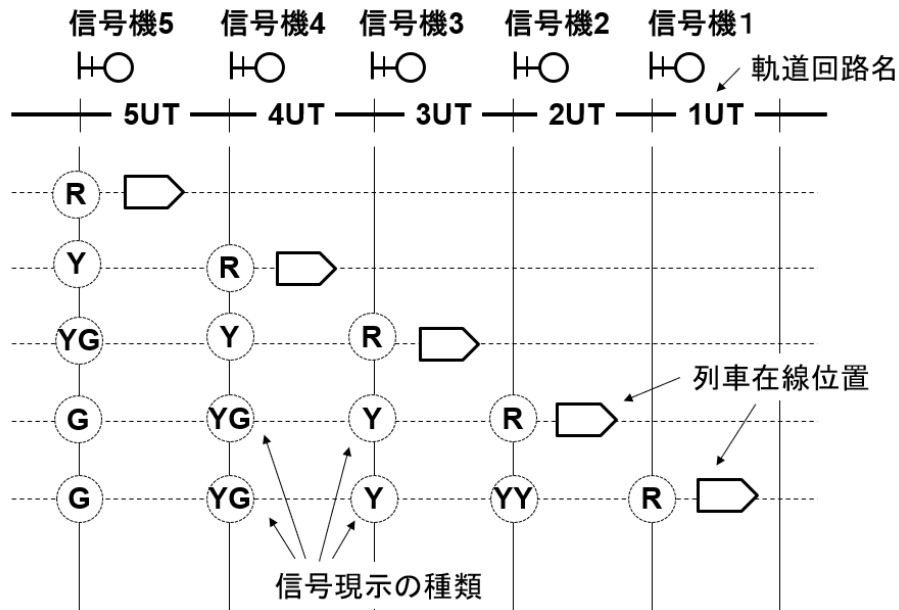


図 3.5 現示系統図の例

### TrainCarManger

TrainCarManager クラスは、MainController から得られる時刻と列車ダイヤに基づき、TrainCarController クラスをシミュレーション対象区間内に生成するほか、TrainCarController クラスがシミュレーション対象外の区間に進入した際に削除したり、終着駅に到着した際に、次の列車に当該の車両を割り当てる機能を有する。

### TrainCarController

TrainCarController クラスは個々の列車の動きを再現するクラスで、列車に紐づく車両編成に対応するインスタンスがある。各列車毎に充当されている車両の性能、現在の走行速度、次に停車する駅の情報、ならびに走行している区間の曲線や勾配といった線路条件、ならびに制限速度等を保

持する TrainCar クラスと、それら条件に応じて列車に次の動作を指示する運転士の役割を再現する MotorMan クラスを内包している。

TrainCar クラスに登録する車両の性能曲線に関しては、近年主流のVVVF インバータ制御車両については、ノッチ段（加速のステップのことをさす）ごとに図 3.6 に示す速度-引張力曲線を近似曲線によって表現し、カム軸を用いた抵抗制御車両については、進段中の引張力については平均引張力を直線で入力するとともに、最終ステップ以降の引張力については近似曲線により入力することとした。

### TrainScheduleData

TrainScheduleData クラスは各列車、各駅毎の着・発・通過時刻、および入換を行う場合は入換時刻、使用する番線、走行線路に関する情報と、充当する車両の形式に関する情報を保持している。

#### 3.3.3 列車の走行に関する計算処理手順

各列車の走行を連続的に再現するために、各周期（標準で 100ms）毎に、各列車（TrainCar クラス）毎に行う計算手順は下記のとおりである。

1. TrainCar クラスから現在の速度  $V_0$ (km/h)、走行位置  $S_0$ (m)、編成総重量  $W(t)$  を取得する。
2. 列車抵抗成分  $R$ (N) を算出する。

列車抵抗は走行抵抗、勾配抵抗、曲線抵抗およびトンネル抵抗の和で構成される<sup>[57]</sup>。本シミュレータでは、在来線で考慮すべき走行抵抗、勾配抵抗、曲線抵抗を算出対象とする。これらの値は編成全体を 1 つの剛体として、速度を変数として算出するものと、列車の速度および編成の重量和を変数として算出するものがある。このため、列車の加速度を算出する前段として、初めに編成全体にかかる列車抵抗値を算出する。各成分の算出方法は以下のとおりである。

##### (a) 走行抵抗

走行抵抗は、主に、車軸と軸受間の摩擦抵抗、車輪踏面とレール間の摩擦抵抗、車両の動揺による抵抗、空気抵抗からなる。因子が複雑であり、お互いに相関係していることから、実験的に求めた数値から、一般に編成総重量に比例する項、編成質量と速度に比定する項、および速度の 2 乗に比例する項の和として、式 3.3 に示す 2 次式で表される。

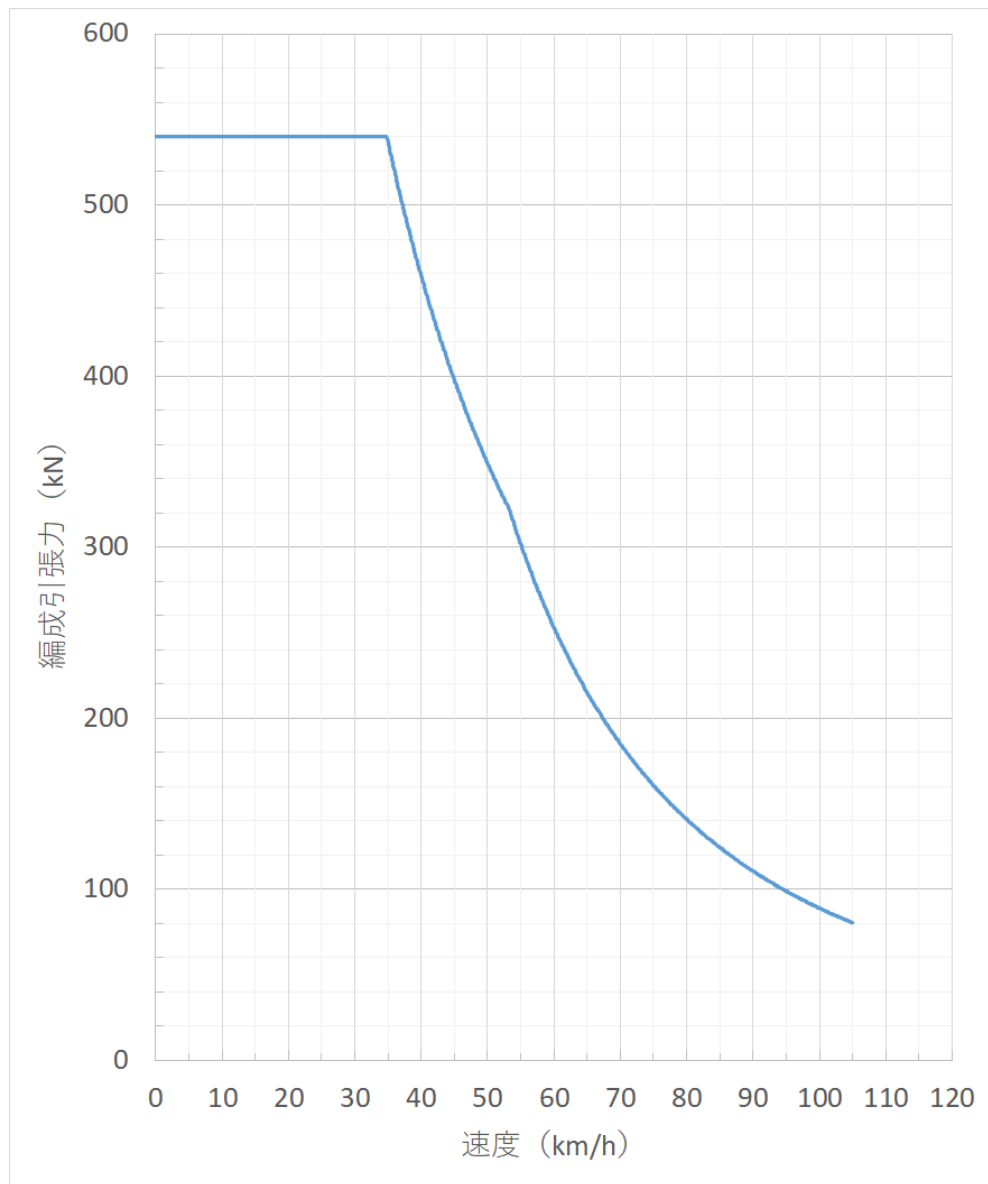


図 3.6 速度・引張力特性曲線の例

$$R_r = (a + bV_0)W + cV_0^2 \quad (3.3)$$

$R_r$  : 走行抵抗 (N)  
 $V_0$  : 現在速度 (km/h)  
 $W$  : 編成総重量 (t)  
 $a, b, c$  : 定数

本シミュレータでは、電車（高速対応）に用いる式<sup>[57]</sup>により、表3.3に示す値を適用し、編成全体にかかる走行抵抗値を算出する。

なお、出発抵抗による影響が働く速度域については、式3.4により、0(km/h)から $V_s$ (km/h)まで直線的に走行抵抗値が減少するものとして、編成全体にかかる走行抵抗を算出する。本シミュレータでは、出発抵抗を30(N/t)、 $V_s=3$ (km/h)を出発抵抗の影響が働く速度域として設定している。

$$R_r = \{R_{rs} - r_s W\} \frac{V_0}{V_s} + r_s W \quad (3.4)$$

...  $V_0 < V_s$ (km/h) のとき

$R_r$  : 走行抵抗 (N)  
 $R_{rs}$  : 速度  $V_s$ (km/h) の際の走行抵抗 (N)  
 $r_s$  : 出発抵抗 (N/t)  
 $V_0$  : 現在速度 (km/h)  
 $V_s$  : 出発抵抗の影響を考慮すべき上限速度 (km/h)  
 $W$  : 編成総重量 (t)

表 3.3 走行抵抗算出に用いた係数

係数	値
$a$	7.0
$b$	0.1654
$c$	0.4825

(b) 勾配抵抗

現在の走行位置と編成長から、等価勾配を取得のうえ、勾配と編成重量に比例して発生する、編成全体の勾配抵抗を算出する。

$$\begin{aligned}
 R_g &= 9.8 \times 1000W \times \frac{i}{1000} \\
 &= 9.8Wi
 \end{aligned} \quad (3.5)$$

- $R_g$  : 勾配抵抗 (N)
- $W$  : 編成総重量 (t)
- $i$  : 等価勾配 (%)

(c) 曲線抵抗

現在の走行位置と編成長から、等価曲線半径を取得のうえ、試験実績より求めた係数を用いて、曲線半径に反比例し、編成重量に比例して発生する編成全体の曲線抵抗を算出する。

$$R_c = \begin{cases} 0 & r = 0 \text{ のとき} \\ \frac{800}{r} 9.8W & r \neq 0 \text{ のとき} \end{cases} \quad (3.6)$$

- $R_c$  : 曲線抵抗 (N)
- $W$  : 編成総重量 (t)
- $r$  : 等価曲線半径 (m)

3. TrainCar クラスのノッチ選択状態が「加速中」の場合、選択したノッチ段数と速度  $V_0$ (km/h) に応じた編成全体の主電動機による引張力の和  $T$ (N) を求める。

4. 加速度  $\alpha$ (km/h/s) を求める。

(a) 加速中の場合

運動の第2法則  $F$ (N) =  $m$ (kg) $\alpha$ (m/s<sup>2</sup>) を変形し、編成全体の主電動機による引張力  $T$ (N)、列車総重量  $W$ (t)、加速度  $\alpha$ (km/h/s) に単位をそろえると、

$$T = \frac{1000W\alpha}{3.6} \doteq 278W\alpha \quad (3.7)$$

慣性係数を  $i_x$  とすると、

$$T = 278 \frac{1+i_x}{100} W\alpha \quad (3.8)$$

である。編成全体に係る加速力は編成全体の主電動機による引張力から列車抵抗を減算した値であることから、式 3.8 を変形し、列車の加速度を求める。

$$\alpha = \frac{T - R}{\left(278 \frac{1+i_x}{100} W\right)} \quad (3.9)$$

ただし,  $R = R_r + R_g + R_c$

$\alpha$  : 列車の加速度 (km/h/s)

$T$  : 編成全体の主電動機による引張力 (N)

$R$  : 列車抵抗 (N)

$R_r$  : 走行抵抗 (N)

$R_g$  : 勾配抵抗 (N)

$R_c$  : 曲線抵抗 (N)

$i_x$  : 慣性係数 (%)

$W$  : 編成総重量 (t)

(b) 惰行中の場合

列車抵抗成分のみで加速度が決定することから, 式 3.9 に  $T=0$  を代入し, 加速度を求める。

$$\alpha = -\frac{R}{(278\frac{1+i_x}{100}W)} \quad (3.10)$$

(c) 減速中の場合

列車抵抗による減速成分に係わらず, 運転士が車両を制御し, 一定の減速度を保つと仮定し, TrainCar クラスに設定してある一律の減速度  $\beta$ (km/h/s) を用いる。

$$\alpha = \beta \quad (\beta < 0) \quad (3.11)$$

(d) 抑速制動中の場合

列車抵抗による減速成分に係わらず, 運転士が車両を制御し, 一定の減速度を保つと仮定し, TrainCar クラスに設定してある一律の減速度  $\gamma$ (km/h/s) を用いる。

$$\alpha = \gamma \quad (\gamma < 0) \quad (3.12)$$

(e) 定速走行モードの場合

定速走行中の場合は加減速がないことから, 加速度は 0(km/h/s) に設定する。

$$\alpha = 0 \quad (3.13)$$

5. 式 3.9~3.13 により算出した加速度  $\alpha$ (km/h/s) を基に, シミュレーションにおける 1 周期分経過後の速度と列車位置に更新する。

$$V = V_0 + \alpha\Delta t \quad (3.14)$$

$$S = \begin{cases} S_0 + \frac{V_0 + V}{7.2}\Delta t & \dots \text{進行方向が終点方向のとき} \\ S_0 - \frac{V_0 + V}{7.2}\Delta t & \dots \text{進行方向が起点方向のとき} \end{cases} \quad (3.15)$$

- $V$  : 更新後の列車速度 (km/h)
- $S$  : 更新後の列車位置 (m)
- $V_0$  : 現在の列車速度 (km/h)
- $S_0$  : 現在の列車位置 (m)
- $\alpha$  : 列車の加速度 (km/h/s)
- $\Delta t$  : シミュレーション周期 (秒)

本シミュレータにおいて、標準のパラメータとして、文献<sup>[57]</sup>を参考に設定した値は表3.4のとおりである。基準とする減速度については、鉄道各社毎に保有する車両性能等の違いにより、それぞれの値が設定されている。文献<sup>[57]</sup>によるとJRで一般に使用される標準減速度は2.5km/h/sとされているが、今回モデルとした路線において、運転時分の基準となる運転曲線の作図、および運転士の訓練に用いられている基準値として、常用最大の7割程度である2.8km/h/sとされていることから、本シミュレータについても同様の値を設定した。

表 3.4 シミュレーションに用いた標準設定値

変数名	内容	設定値
$i_x$	慣性係数	8.0(%)
$\beta$	標準減速度	-2.8(km/h/s)
$\gamma$	抑速減速度	-0.5(km/h/s)
$\Delta t$	シミュレーション周期	0.1(秒)

### 3.3.4 運転士の運転操作方法を再現するアルゴリズム

実際の運転士は様々な状況を予期しながら運転しているものの、時間を遡って操作をやり直すことは不可能である。従って、現実合致したシミュレーションを実施するためには、ある状況におかれた時の運転士の思考のプロセスを再現し、より現実に近い運転操作を再現できることが望ましい。そこで、本研究では、シミュレーションの進行によって時々刻々と変化する信号現示に従い、現実世界と同様、時間的に遡ることなく、運転士の運転操作を再現するためのアルゴリズムを構築する。

図3.7に運転士による運転操作モデルとして、本シミュレータで構築する状態遷移図を示す。本モデルは、駅に停車している状態を示す「EB」、惰行状態を示す「N」、力行状態の「P」、制動状態を示す「B」のほか、下り坂運転時のブレーキ操作を再現するのに必要な、抑速制動状態を示す



「L」と、制動をオフにしてから、一定時間惰行を確保するための状態を示す「NC」を加えた6つの状態から構成される。

第3.2.3節で述べた運転士の運転操作方法を考慮するにあたり、各列車の6つ状態を、以下に示す1～5.の処理手順により、シミュレーション周期毎に適切な状態に変化させながら計算を進めることで、運転士の心理を踏まえた列車の動きを再現する。

以下本節では、終点方向に列車が進行している場合を前提とした判定式を記載する。(逆方向に列車が進行している場合は、基準となる列車位置(m)を算出するうえでの符号を逆にして算出・判定する必要がある。)

### 1. 準備

列車の現在位置・速度から、次停車駅までの間に存在する、現在速度以下の制限速度(信号現示によるものも含む)と制限速度開始位置を取得する(1～X箇所あるとする)。各制限速度開始地点までに制限速度以下に、予め設定した減速度で減速するために必要な距離を算出し、次に制動をかけなければならない地点を算出する。

$$sb_{next} = \min \left\{ sl_k - \frac{vl_k^2 - v^2}{7.2\beta}, k = 1, 2, \dots, X \right\} \quad (3.16)$$

$sb_{next}$  : 次に減速を開始する必要がある地点 (m)  
 $sl_k$  :  $k$  番目の制限速度開始地点 (m)  
 $vl_k$  :  $k$  番目の制限速度 (km/h)  
 $v$  : 列車の現在速度 (km/h)  
 $\beta$  : 標準減速度 (km/h/s)

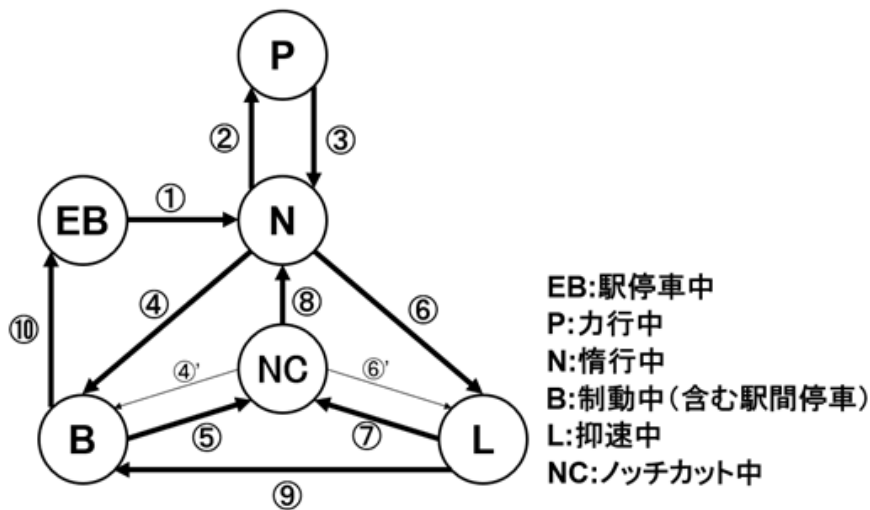
下りこう配区間を走行中の場合は、指定時間惰行した場合、勾配による重力成分により加速する速度を計算する。

$$v_{it} = \begin{cases} 0 & \dots i \geq 0 \text{ のとき} \\ 0.032 \times i \times t_{margin} & \dots i < 0 \text{ のとき} \end{cases} \quad (3.17)$$

$v_{it}$  : 惰行により加速する速度 (km/h)  
 $i$  : 現在地点の勾配 (‰)  
 $t_{margin}$  : 惰行確保時間 (秒)

### 2. 力行中 (P) の場合

以下の(a),(b)のいずれかの条件を満たす場合は、力行を止め、惰行に移行する。ここで、(a)の制限速度に近づいた場合、式3.17で算出した速度を制限速度から控除することにより、3.2.3節(1)で述



- ① 駅を発車する際、EB から N に遷移する。
- ② 制限速度と現在速度の差が、再力行実施速度以上の場合、かつ、制動開始地点がある場合、惰行時間が確保できる場合に N から P に遷移する。
- ③ 制限速度に到達した、または惰行に移行が必要な地点に達した場合に P から N に遷移する。
- ④ 制動開始地点となった場合に N から B に遷移する。
- ⑤ 目標速度以下、かつ惰行確保秒数惰行しても目標速度を超えない速度まで減速した場合に B から NC に遷移する。
- ⑥ 下り勾配において、制限速度に近づいた場合に N から L に遷移する。
- ⑦ 惰行確保秒数惰行しても制限速度を超えない速度まで減速した場合に L から NC に遷移する。
- ⑧ 制動、抑速制動をオフにしてから、指定秒数経過後に NC から N に遷移する。
- ⑨ 減速制動開始地点になった場合に L から B に遷移する。
- ⑩ 速度 0km/h かつ停車駅の停止位置と判定した場合に B から EB に遷移する。

図 3.7 運転士の運転操作モデル

べた、力行から制動に移行するまでに必要な惰行時間を確保することが可能になる。

また、(b)の列車の現在位置が次に制動をかけなければならない地点に近づいた場合、制動を開始する必要のある地点から、惰行確保秒数走行する距離を控除した地点を算出し、惰行に移行することで、同様に惰行を確保することが可能になる。

なお、(a),(b)をいずれも満たさない場合は、目標速度に応じて、必要により最適なノッチ段(加速力パターン)を再設定し、力行を継続する。

(a) 現在速度が制限速度に近づいた場合：

$$v > v_l - v_{margin1} - v_{it} \quad (3.18)$$

$v$  : 現在の列車速度 (km/h)  
 $v_l$  : 現在の制限速度 (km/h)  
 $v_{margin1}$  : 制限速度に対する余裕速度 (km/h)  
 $v_{it}$  : 惰行時、下り勾配により加速する速度 (km/h)

(b) 列車の現在位置が次に制動をかけなければならない地点に近づいた場合：

$$s \geq sb_{next} - \frac{v}{3.6} \times t_{margin} \quad (3.19)$$

$s$  : 現在の列車位置 (m)  
 $sb_{next}$  : 次の制限速度以下に減速を開始する地点 (m)  
 $v$  : 現在の列車速度 (km/h)  
 $t_{margin}$  : 惰行確保時間 (秒)

### 3. 惰行中 (N および NC) の場合

(a) 現在地点が、次に制動をかけなければならない地点を超えた場合は次の制限速度を目標速度として、制動に移行する。

$$s \geq sb_{next} \quad (3.20)$$

$s$  : 現在の列車位置 (m)  
 $sb_{next}$  : 次の制限速度以下に減速を開始する地点 (m)

(b) 現在速度が制限速度に近づいた場合は、抑速制動に移行する  
 これにより、3.2.3節(3)で述べた下り坂運転時のブレーキ操作を再現する。

$$v \geq v_l - v_{margin2} \quad (3.21)$$

- $v$  : 現在の速度 (km/h)
- $v_l$  : 現在の制限速度 (km/h)
- $v_{margin2}$  : 下り坂における制限速度に対する余裕速度 (km/h)

(c) その他以下の i.~iii. の全てを満たす場合に限り力行に移行する。

この際、惰行時下り勾配により加速する速度  $v_{it}$ 、および、惰行確保秒数の間に進行する距離を考慮することで、3.2.3 節 (1) の惰行確保を図る。また、iii. により「NC」の状態を再現することで、3.2.3 節 (4) で述べた乗り心地の考慮が可能になる。

i. 現在速度が十分低い場合：

$$v < v_l - v_{margin1} - v_{margin3} - v_{it} \quad (3.22)$$

- $v$  : 現在の速度 (km/h)
- $v_l$  : 現在の制限速度 (km/h)
- $v_{margin1}$  : 制限速度に対する余裕速度 (km/h)
- $v_{margin3}$  : 再度加速するための制限速度からの乖離速度 (km/h)
- $v_{it}$  : 惰行時、下り勾配により加速する速度 (km/h)

ii. 列車の現在位置が次に制動をかける地点よりも十分手前である場合：

$$s \leq sb_{next} - \frac{v}{3.6} \times t_{margin} \quad (3.23)$$

- $s$  : 現在の列車位置 (m)
- $v$  : 現在の速度 (km/h)
- $sb_{next}$  : 次の制限速度以下に減速を開始する地点 (m)
- $t_{margin}$  : 惰行確保時間 (秒)

iii. 前回制動から惰行に移行してから指定秒数以上経過し、加速が出来ない状態 (NC) から、再力行が可能な状態 (N) になっている場合

#### 4. 制動中 (B) の場合

(a) 現在の速度が減速目標速度以下になった場合、惰行に移行する。ただし、下り勾配区間の場合には、惰行後、指定秒数以上走行しても制限速度を上回らない速度まで落ちていることを条件に惰行に移行する。これにより、必要な惰行を確保することができる。

$$v \leq v_{target} - v_{it} \quad (3.24)$$

$v$  : 現在の速度 (km/h)  
 $v_{target}$  : 制限目標速度 (km/h)  
 $v_{it}$  : 惰行時, 下り勾配により加速する速度 (km/h)

(b) 速度  $v$ (km/h) が 0(km/h) まで低下, すなわち停車した場合には, 停止位置を確認する。駅間で停止信号による停車である場合は, 信号現示が変化したのち, 指定秒数 (標準で 8 秒) 経過後に惰行へ移行させる。

これにより 3.2.3 節 (2) で述べた停止信号による停止後, 運転再開するまでの確認時間を確保する。

そのほか, 駅に到着した場合は, 到着時の処理へ移行する。

#### 5. 抑速制動中 (L) の場合

3.2.3 節 (3) で述べた下り坂運転時のブレーキ操作を再現する状態であり, 現在位置が, 制動開始地点  $sb_{next}$ (m) を超えた場合は, 制動に移行する。

その他, 以下の (a)(b) 双方を満たす場合に惰行に移行する。

(a) 速度が十分に低下している場合 :

$$v < v_l - v_{margin1} - wv_{it} \quad (3.25)$$

$v$  : 現在の速度 (km/h)  
 $v_l$  : 現在の制限速度 (km/h)  
 $v_{margin1}$  : 惰行時, 下り勾配により加速する速度 (km/h)  
 $v_{it}$  : 惰行時, 下り勾配により加速する速度 (km/h)  
 $w$  : 補正係数

(b) 制動開始地点まで十分に距離がある場合 :

$$s \leq sb_{next} - \frac{v}{3.6} \times t_{margin} \quad (3.26)$$

$s$  : 現在の位置 (m)  
 $sb_{next}$  : 次の制限速度以下に減速を開始する地点 (m)  
 $v$  : 現在速度 (km/h)  
 $t_{margin}$  : 惰行確保時間 (秒)

表 3.5 に標準で設定しているパラメータを示す。これらの値は運転士の標準的な操作を観察することで設定した。

表 3.5 余裕時分・余裕速度の設定値

変数名	内容	設定値
$t_{margin}$	惰行確保秒数	5 秒
$v_{margin1}$	制限速度に対する余裕速度	0.5km/h
$v_{margin2}$	下り勾配における制限速度に対する余裕速度	0.2km/h
$v_{margin3}$	再度加速をするための制限速度からの乖離速度	5km/h
$w$	抑速制動時に用いる補正係数	3.0

### 3.3.5 シミュレーション結果の評価

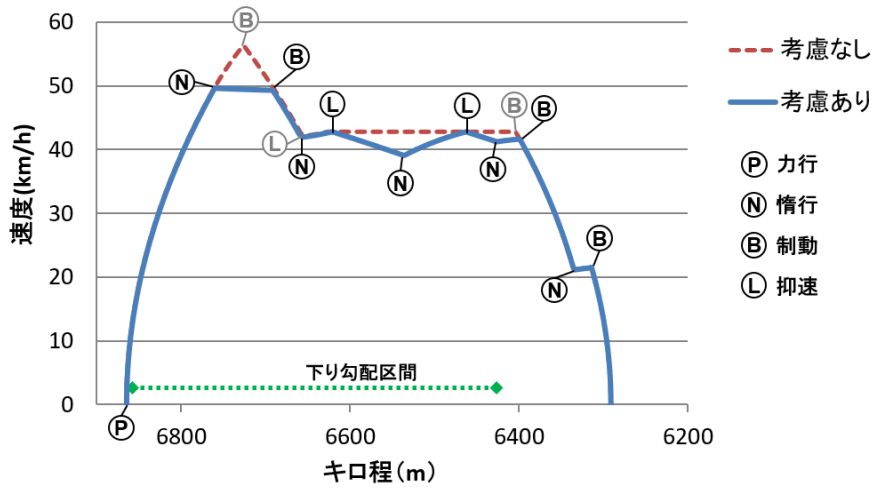
はじめに、3.3.4 節のアルゴリズムを適用した場合、運転士の現実的な運転操作が再現できていることを、図 3.8 を用いて評価する。

図 3.8 の青線が 3.3.4 節のアルゴリズムを適用した場合の運転曲線を示す。赤線は、運転士の運転操作方法を考慮しないシミュレーションを再現するため、取えて表 3.5 の  $t_{margin}, v_{margin1}, v_{margin2}$  をそれぞれ 0 に設定し、シミュレーションを行った結果を示す。

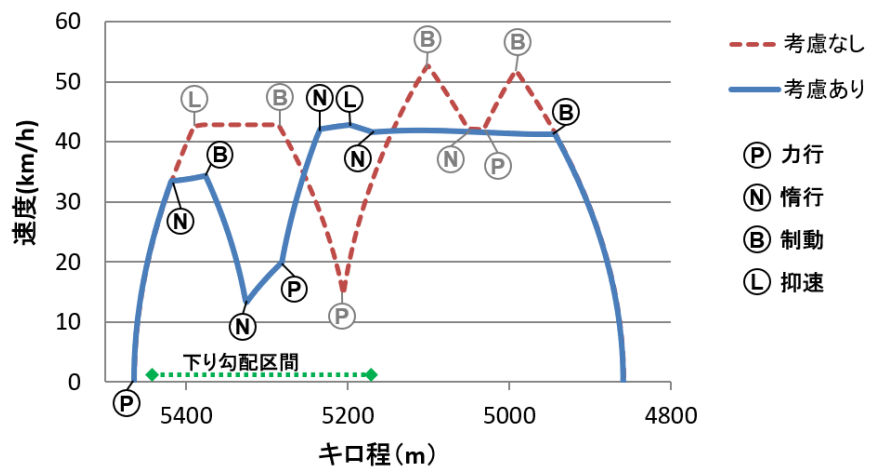
図 3.8(a) は下り勾配を含む区間の例である。運転士の運転操作方法を考慮しない場合、駅を発車後、56km/h 付近まで力行したのち、直ちに制動に移行している。一方、運転士の運転操作方法を考慮した場合は制動に移行する前に、50km/h 付近で力行を終え、惰行を確保できていることがわかる。また、その後の下り勾配においても、運転士の運転操作方法を考慮していない場合は、等速で走行しているが、運転士の運転操作方法を考慮している場合には抑速制動と惰行を繰り返していることを確認できる。

図 3.8(b) は先行列車に接近して運転しており、信号現示による制限速度が頻繁に変わる状況で運転する区間の例である。運転士の運転操作方法を考慮していない場合、キロ程 5200m 付近で、信号現示が変わり制限速度が緩和された際、制動から力行に直ちに移行している。また、その後も、次の制限速度開始地点に接近し、直ちに制動に移行し、再びキロ程 5000m で信号現示が変わったことで、力行し、すぐに制動へと移行している。一方、運転士の運転操作方法を考慮した場合は、キロ程 5350m 付近で信号現示が変わり速度制限が緩和されているが、一定時間の惰行を確保したうえで力行に移行していることを確認できる。その後、信号現示が頻繁に変化し、制限速度が短時間に变化する場合にも、力行と制動を短時間に繰り返すことなく、より実際の運転士の運転操作に近い滑らかな運転を再現できていることが確認できる。

続いて、運転士の運転操作方法の考慮の有無により、稠密に運行する路線における複数列車のシミュレーション結果にどのような違いが表れるか



(a) 下り勾配を含む区間



(b) 先行列車に接近して走行している区間

図 3.8 シミュレーション結果の違い

評価する。実際の運行実績と再現性の違いを評価するため、小田急電鉄の成城学園前駅～新宿駅間の設備と朝方ラッシュ時間帯のダイヤを用いてシミュレーションを行った。

シミュレーション結果と実際の運行実績（2012年12月～2013年2月のうちの5日間を平均した運行実績）をクロマティックダイヤ図として図3.9に示す（クロマティックダイヤ図とは、遅延量の大きさを色の違いにより可視化したダイヤ図のことで、定時運行に近いと青色、遅延量が増大してくると徐々に赤色へと変化して表示され、遅延の発生や拡大していく様子が分かる仕組みになっている<sup>[6]</sup>）。

図3.9(a)～(c)の全てに共通して、8時頃～8時30分頃にかけて、先行列車の停車時分増大による遅延が後続列車に影響を及ぼしだし、遅延が拡大し、その後収束している様子が色の移り変わりから見てとれる。

しかし、遅延の伝播範囲、および収束の仕方については、運転士の運転操作方法を考慮する場合としない場合で大きな違いが出ている。図3.9(a)の運転士の運転操作方法を考慮しない場合、世田谷代田駅着（通過）までは遅延が発生しておらず、世田谷代田駅～下北沢駅間より遅延が発生している。また、新宿駅一つ手前の南新宿駅までに全列車、おおむね遅延が収束しているほか、遅延が収束する時間帯についても、8時45分頃には遅延が解消されるシミュレーション結果となり、図3.9(c)に示す実際の運行実績を再現できていない。

一方で、図3.9(b)の運転士の運転操作方法を考慮した場合は、梅ヶ丘駅～世田谷代田駅間より遅延が発生しており、実際の運行実績と同一の区間で遅延が伝播していることを再現できている。また、一部の列車が新宿駅到着まで遅延を収束できない点、ならびに9時頃まで遅延が伝播している点についても、再現できていることが確認できる。

そのほか、図3.9(a)の運転士の運転操作方法を考慮しない場合、途中駅での最大遅延は1分56秒、新宿駅到着遅延は31秒に収まるという結果であった。また、全列車が停車するため、定時性に最も大きな影響が出る下北沢駅の発着時隔については、現地での実測で最短1分05秒程度であるのに対し、シミュレーション結果では1分02秒と実測値よりも短い数値となった。これは、下北沢駅手前で停止信号によって停止した後、信号現示が変化した場合に運転を再開するまでの時間が考慮されていないため、現実的な運転を再現できていないことを示している。前述のとおり稠密に列車を運行する線区において、列車ダイヤは5秒単位で作成されており、列車間の余裕時分は可能な限り削られているため、3秒ではあるものの、この違いが列車運行全体に影響する。

一方、図3.9(b)の運転士の運転操作方法を考慮した場合は、途中駅での最大遅延3分05秒、新宿駅到着遅延1分38秒であり、途中駅最大遅延



が2分45秒、新宿駅到着遅延は1分45秒であった現実の運行実績に近いシミュレーション結果となった。また、下北沢駅の発着時隔についても最短1分07秒と現地での実測値（最短1分05秒）により近い値となった。これは、停止信号により停止した後に、運転を再開するまでの時素設定（8秒）が適切に作用したと考えられる。なお、時素設定の8秒と図3.9(a)と図3.9(b)での時隔の差は8秒ではなく5秒になった違いの要因は、運転士の運転操作方法を考慮し、起動に時間をかけた結果、先行列車との運転間隔が開いたことで、再起動後の信号現示による制限速度の影響が軽減され、スムーズに運行がなされたことによる。

以上の結果から、本研究で提案するシミュレーション方式は、遅延の拡大状況、遅延量の大きさ、収束状況の傾向が概ね一致しており、運転士の運転方法を考慮しない従来の方式と比較して、より現実的な列車運行を再現できていると判断できる。

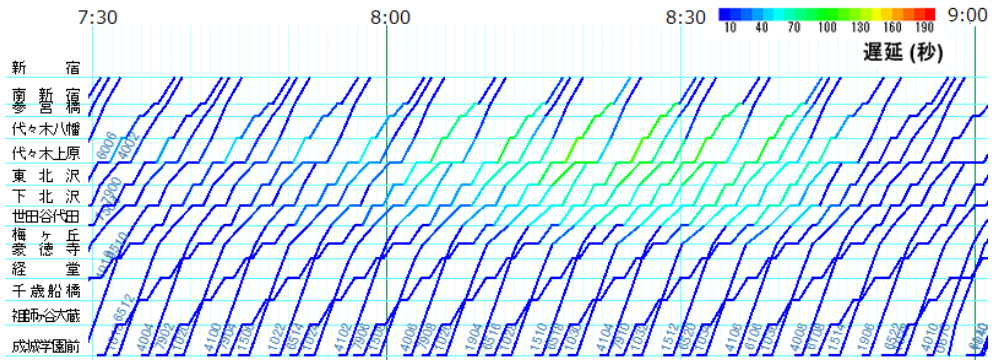
### 3.4 運転士の取扱を考慮したマイクロシミュレーションを用いた分析の適用例

本節では、運転士の取扱を考慮したマイクロシミュレーションを用いた頑健性の分析例として、小田急電鉄下北沢駅前後区間における地下化切替工事実施前に行った分析について紹介する。

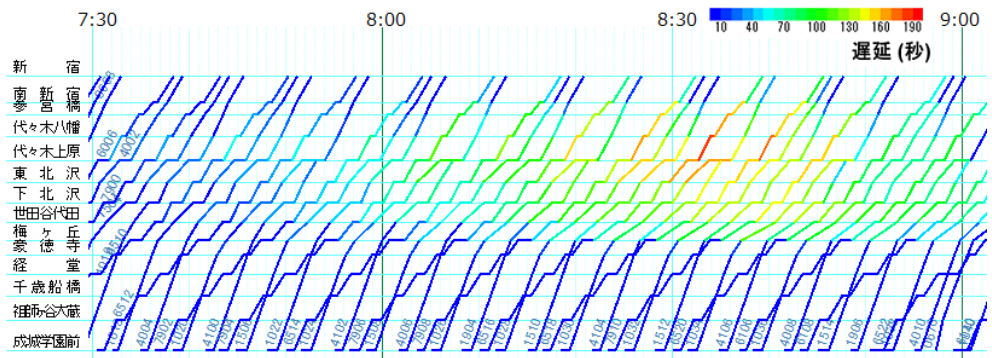
#### 3.4.1 分析に適用したダイヤ

小田急電鉄において複々線化工事が完成する以前、最混雑区間である下北沢駅付近の線路は踏切も存在する地上の複線であり、乗降が多く、全列車が停車する同駅前後区間が朝ラッシュ運行上のボトルネック区間となっていた。当時用いていた7時30分頃から9時00分頃にかけてのダイヤ（本章で分析に適用したダイヤ）を図3.10に示す。同区間では、朝ラッシュ時間帯、複線設備容量を最大限に用い、1時間当たり27本の運転を行っていた。図3.11に下北沢駅前後の基本的な運行パターンを示す。以下図中では、梅ヶ丘駅～東北沢駅間をそれぞれ、梅ヶ丘駅を駅U、世田谷代田駅を駅D、下北沢駅を駅S、東北沢駅を駅Hとして表す。同区間では、全ての列車の混雑率を平準化するため、各駅停車1本に対し、下北沢駅の前後を通過する急行（または準急）2本を1セットとし、6分40秒サイクルで運行を行っていた。

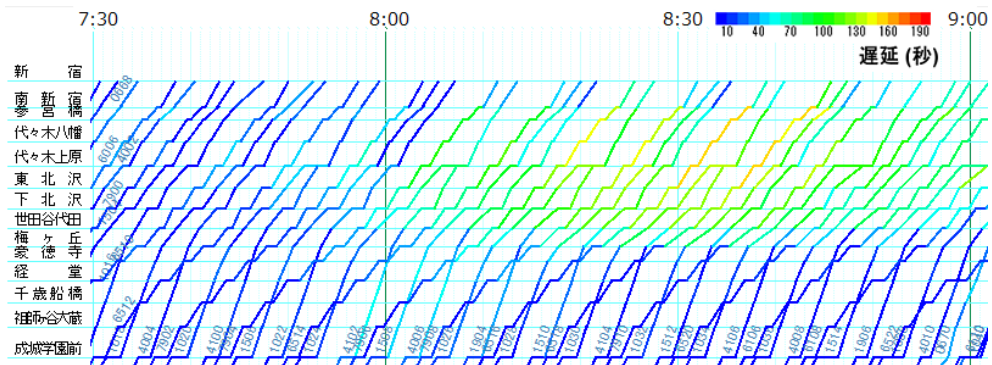
前述のとおり下北沢駅は複線であり、上り方向は1線しかない通常の停留場であったものの、他社線との乗換駅でもあることから全列車を停車さ



(a) 運転士の運転操作方法を考慮しない場合



(b) 運転士の運転操作方法を考慮した場合



(c) 実際の運行実績

図 3.9 シミュレーション結果の比較

せる必要があり、旅客の乗降が非常に多く、停車時分が増大し、遅延が拡大する傾向にあった。

### 3.4.2 適用路線の定時性に対する目標

分析に適用した小田急電鉄では、2012年当時、朝方ラッシュ輸送の定時性管理指標として、朝ラッシュ時間帯に新宿駅に到着する上り列車すべての着遅延が1分台以下に収まったか否かを一つの基準として、原因と対策を検討していた。2011年度は年間245日中160日(約65%)、2012年度は3月15日現在、120日(約51%)であり、定時性の向上が大きな課題となっていた。

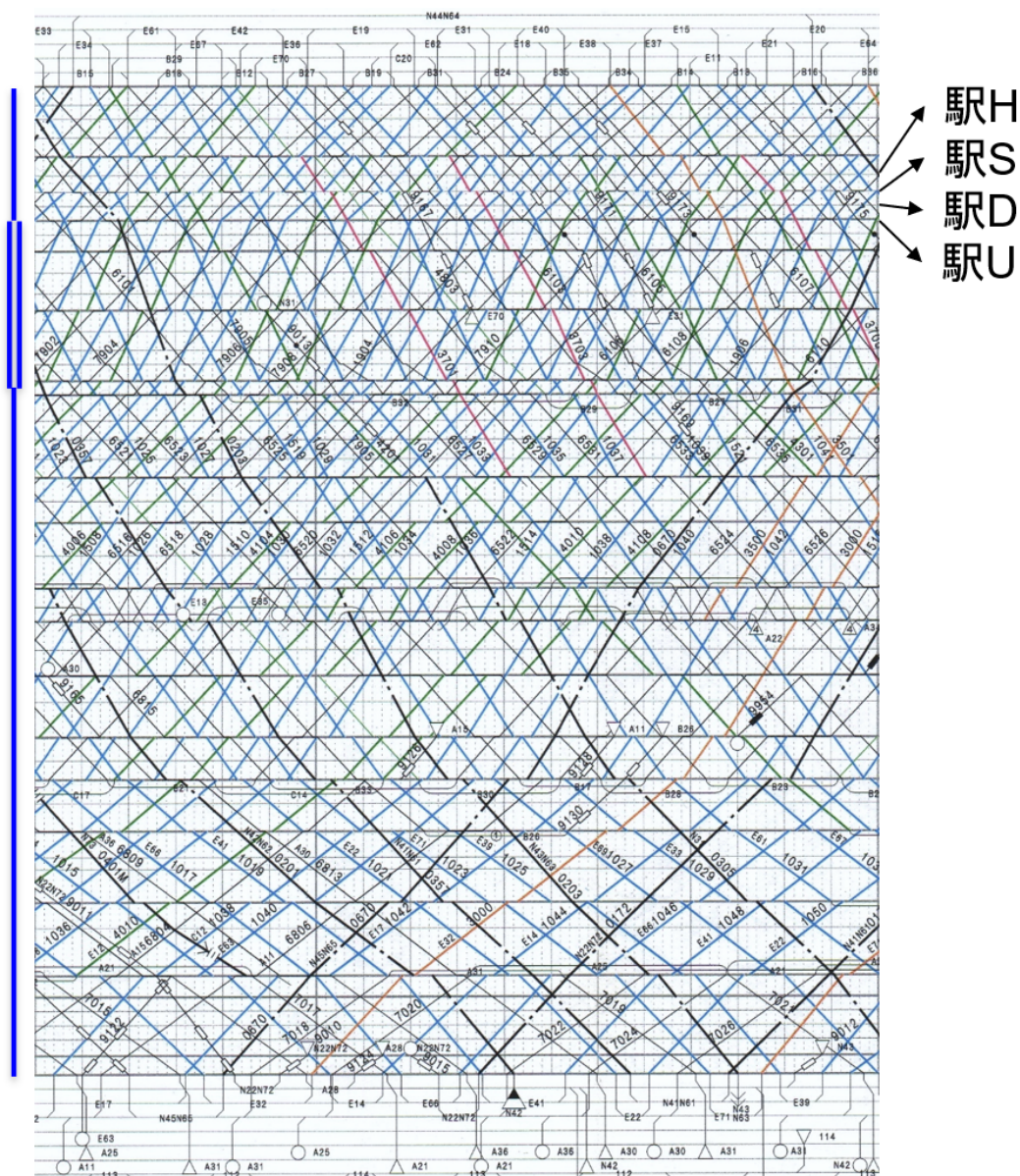
### 3.4.3 地下化切替工事の概要

2013年3月23日、代々木上原駅～梅ヶ丘駅間の下北沢駅前後区間の約2.2kmが地下化された。地下化後、同区間では複々線化完成に向けた新たな2線(完成時の緩行線)の建設工事が行われることとなり、この段階では複線のままであった。地下化に伴う主な変更点は以下のとおりである(図3.12)。

#### (1) 東北沢駅を「停車場」から「停留場」に変更

鉄道における駅は、分岐器が存在し、運転取扱い上、列車の着発する線路を何らかの方法で制御する必要のある停車場と、ただ単に駅間の途中に止まると変わらない停留場に分類される。東北沢駅については、複々線化工事の進捗により、以前より分岐器の設備は廃止されていたが、これまで「停車場」のままであった。地下化工事を機に、線路形態に即した「停留場」に変更することとなった。小田急電鉄の停車場は、停車列車に対して出発信号機に停止信号を現示したまま進入させ、出発する直前に出発信号機に進行を指示する信号(Y Y 現示以上)を現示するという扱いを行なっている(いわゆる「停止定位」)。また通過列車については、出発信号機に進行を指示する信号を現示した後に場内信号機の信号に進行を指示する信号を現示するという扱いを行なっている。このため、これまで、通過列車については、先行列車の最後部が出発信号機の防護区間を通過し終わり出発信号機に進行を指示する信号が現示されるまで場内信号機に進行を指示する信号が現示されないため、東北沢駅を通過することができなかった。しかし、停留場にすることによって、この取扱いがなくなり、先行列車が閉そく区間を抜けると、直ちに進行を指示する信号を現示出来るようになることから、1閉そく区間分、先に進むことができるようになった(図3.13)。

7:30                      8:00                      8:30                      9:00



— 複線区間      == 複々線区間

図 3.10 分析に適用したダイヤ

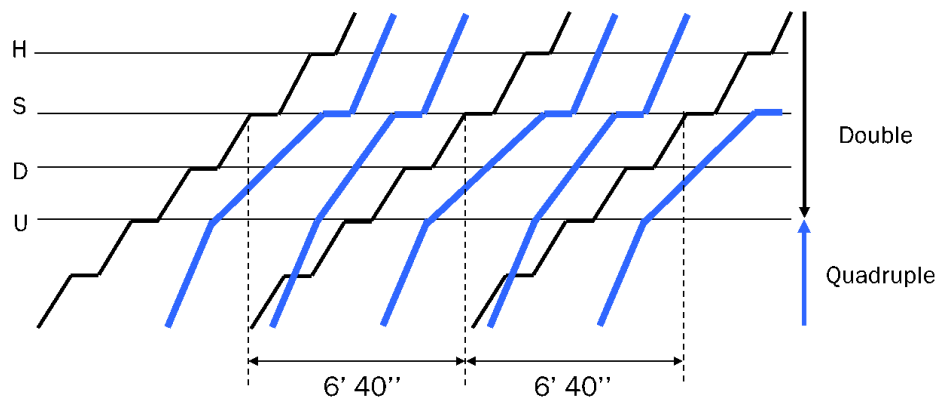


図 3.11 朝ラッシュダイヤの基本パターン

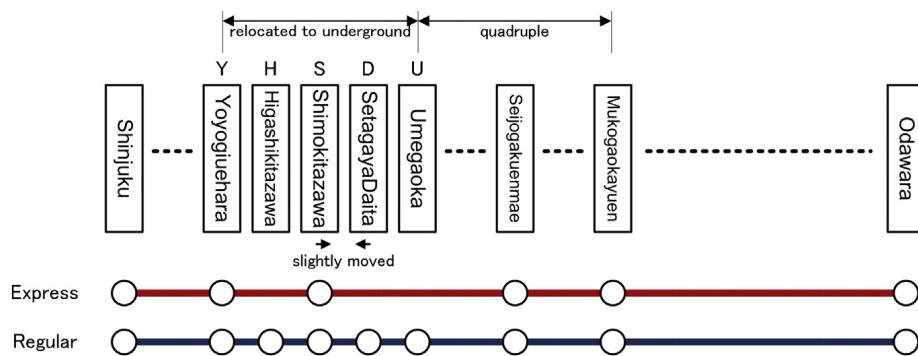
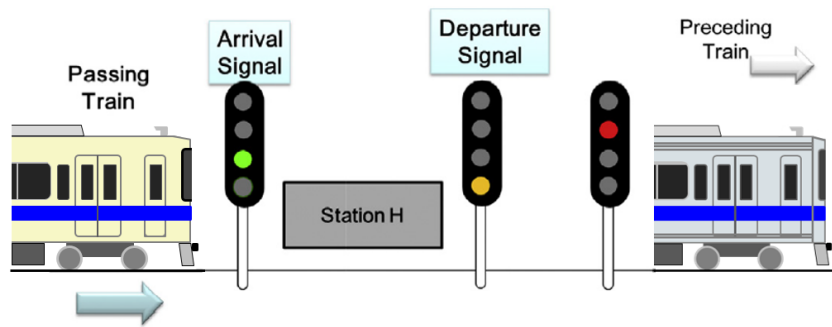
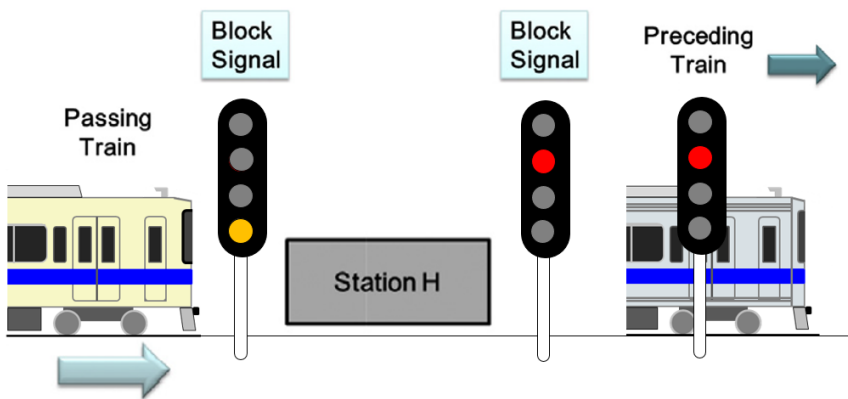


図 3.12 地下化工事区間の概要



(a) 地下化切替前（停車場）



(b) 地下化切替後（停留場）

図 3.13 東北沢駅（駅 H）の信号取扱い

## (2) 下北沢駅、世田谷代田駅の移設

駅設備建設上の制約から、下北沢駅を小田原方へ約 80m、世田谷代田駅を新宿方へ約 20m、それぞれ移設することを余儀なくされ、両駅の駅間距離が大きく短縮されることとなった。

## (3) 信号現示系統の変更

地下化に伴い、下北沢駅が最深部に位置することとなったため、上り線については、梅ヶ丘駅より下北沢駅にかけて急な下り勾配が続く。また、同区間はラッシュ時間帯の高密度運転に対応するため 1 閉そく区間が短い。加えて、地下化の完成によって工事徐行が無くなり制限速度が上がったことと、下り勾配により、必要な制動距離が増大したことにより、地下化前と比べて、1 閉そく区間分から最大で 4 閉そく区間分手前の信号機より、これまでに比べて下位である減速 (YG)、もしくは注意 (Y) を現示することとなった。

## (4) 列車ダイヤの修正

地下化に伴い、梅ヶ丘駅～代々木上原駅間の各駅について、時刻修正を行った。これまでの工事徐行が無くなり、同区間における標準の運転時分は優等列車で 50 秒程度短縮された。また、東京メトロの列車との輻輳を防止するため、一部列車について、代々木上原駅での着時刻を変更している。なお、この修正では同区間の時刻以外は変更していない。

### 3.4.4 地下化切替に伴う朝方ラッシュ輸送への影響予測

前述のとおり地下化切替工事が行われる区間は朝方ラッシュ時の最混雑区間であり、最も稠密に運行されている区間である。このため、地下化切替に伴い、定時性低下につながる要素が朝方ラッシュ輸送にどの程度影響するか懸念が生じた。一方で、東北沢停留場化による定時性向上効果も期待されることから、朝ラッシュ輸送の特性がどのように変化するか、切替が行われる前にマイクロシミュレーションによる詳細な分析を行い、必要な対策を講じることとした。

#### (1) 定時性低下が懸念される要素

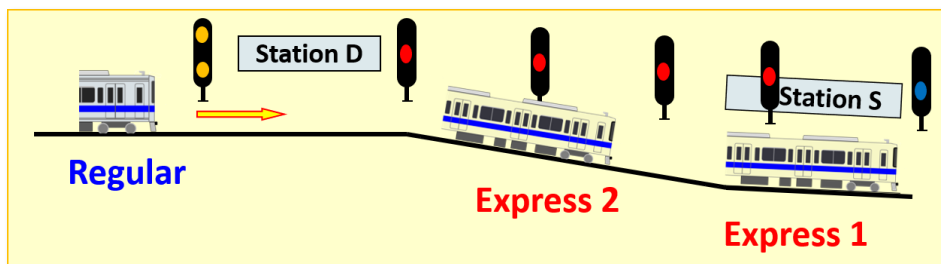
##### ① 下北沢駅手前まで続く下り急勾配

3.4.3 節で示したように、地下化に伴い、下北沢駅まで下り急こう配が続く線路条件に変更になる。これにより、ブレーキ距離がこれまで以上に必要となり、速度超過を引き起こしやすいため、運転士はこれまでよりも制限速度より十分に低い速度で運転することが予想された。また、信号現示がこれまでより手前の区間から下位の現示に変更されることから、遅延

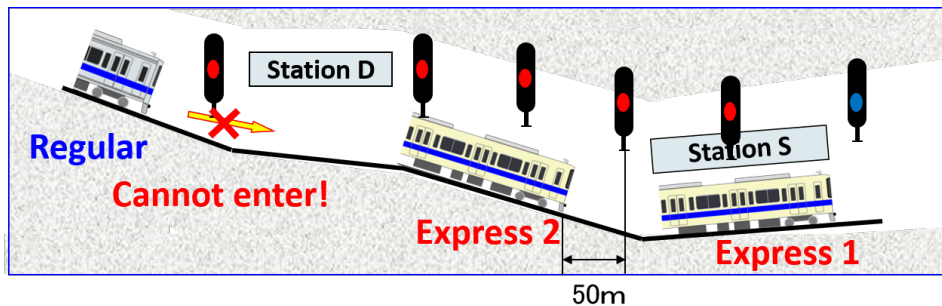
回復力が低下することが懸念された。

② 世田谷代田駅と下北沢駅の駅間距離の短縮

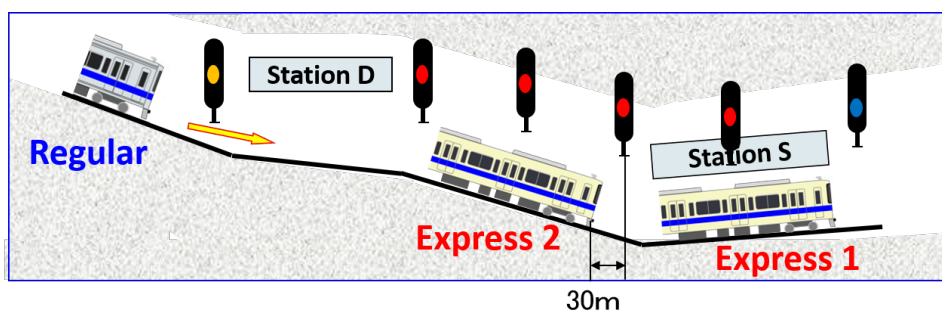
これまで、図 3.14(a) に示すように、下北沢駅に先行の急行列車 (Express A) が停車し、さらに後続の列車 (Express B) が機外停車をしている状況の際、後続の各駅停車 (Regular) は世田谷代田駅に進入することが出来たが、地下化後は世田谷代田駅と下北沢駅の駅間距離が短縮するため、世田谷代田駅に進入することが出来ないこととなり、列車間隔の拡大が懸念された (図 3.14(b))。



(a) 地下化切替前



(b) 地下化切替後 (A 案)



(c) 地下化切替後 (B 案)

図 3.14 下北沢駅 (駅 S) 前後の取扱い



## (2) 定時性向上が期待される要素

3.4.3(1) で述べたように、東北沢駅の停留場化により、先行列車に続く後続の急行列車は信号現示のタイミングが変わることにより1閉そく分接近できるようになった(図3.13)。

地下化切替前は、各駅停車の東北沢駅での停車時間が伸びた場合、各駅停車に続く急行は下北沢駅発車後、東北沢駅手前で詰まりが発生するため、その後続く急行(または準急)の下北沢駅の発着時隔は、通常1分07秒~1分12秒程度であるのに対し、1分20秒から最大で1分30秒程度まで拡大する場合があった。しかし地下化後の停留場化により、通過列車に対する現示の時機が変更となったことで、全ての列車の発着時隔が1分05秒程度になり、各駅停車の東北沢駅での停車時間の伸びによる影響が減少し、定時性が向上すると考えられた。

### 3.4.5 定時性向上に向けた施策の検討

前節で述べたように、下北沢駅の手前での運転方法が定時性に与える影響が非常に大きいことが懸念された。特に通常の取扱いでは、図3.14(b)に示すように、急行列車が下北沢駅手前で機外待ちをする際、停止信号の50m手前に停止することが同社の規定上定められており、さらに後続の各駅停車が世田谷代田駅に進入できない(A案とする)状況が発生する。このため、同箇所のみ例外的な取扱いとして、図3.14(c)に示すように信号機の30m手前まで進入させ、後続の各駅停車を世田谷代田駅に進入させる(B案とする)ことが定時性の向上に繋がるのではないかと考え、両案をシミュレーションを用いて詳細な検討を行うこととした。

### 3.4.6 シミュレーション結果に基づく施策の決定

#### (1) 下北沢駅外方で停止信号により停車する際の停止位置

前述の通り、ラッシュ輸送において、複線で全列車が停車する下北沢駅の運転時隔が最も条件が厳しいことが明らかであるため、下北沢駅外方で停止信号により停止した場合の機外待ちの位置の検討をシミュレーションにより行った。ここでの検討方法としては、7時30分~8時40分の間各列車の下北沢駅の停車時間は同一と仮定し、その停車時間を変化させた場合に、新宿駅への最大到着遅延がどの程度に拡大するかという観点でシミュレーションを行った。シミュレーションの結果を図3.15に示す。

この結果から、当初予想していたものとは異なり、下北沢駅の停車時分が60秒程度まではA案とB案では大きな差がないものの、65秒を超えると差が現れ、B案は現行よりも悪化することが判明した。

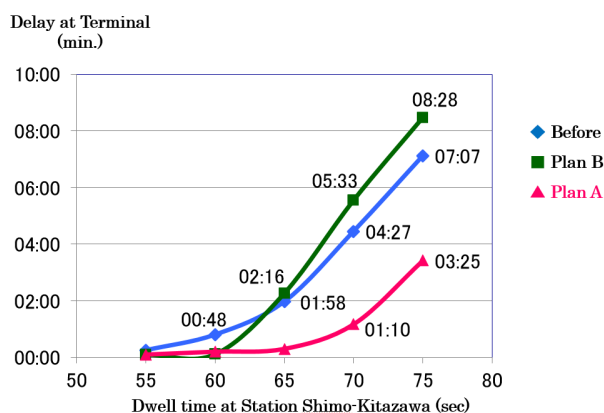
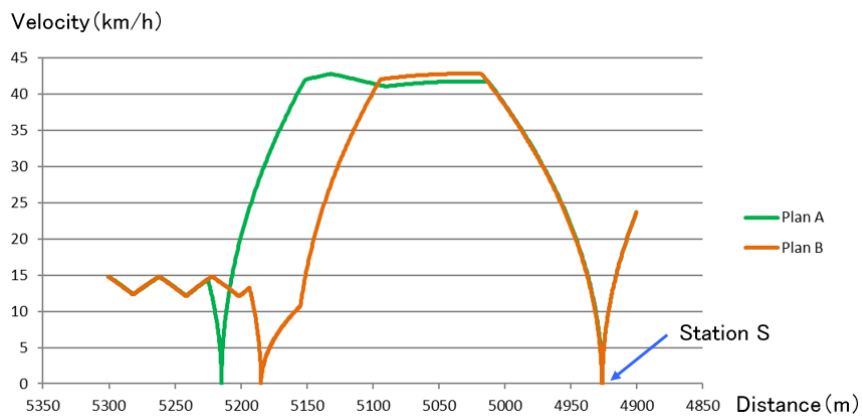


図 3.15 下北沢駅の停車時分と新宿駅最大遅延の関係

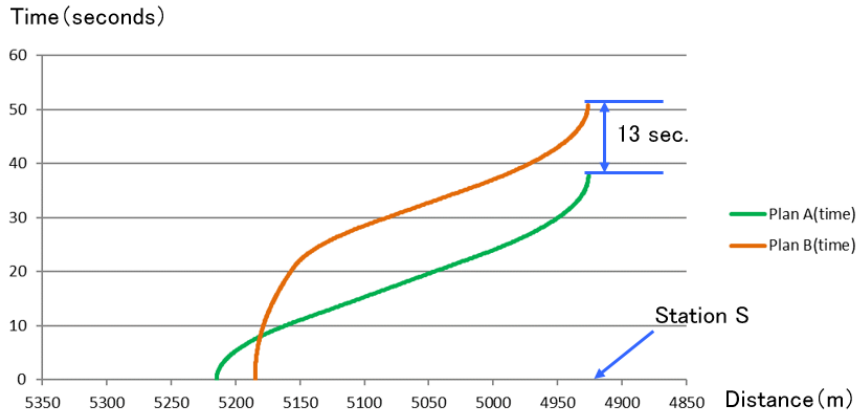
この理由を図 3.16 に示すシミュレーション結果を用いて分析をする。図 3.16(a) は機外停止をした後の急行 (Express2) の運転再開後から下北沢駅停止位置までの速度を、図 3.16(b) は同急行 (Express2) の運転再開後、下北沢駅停止位置までの運転時分を示す。

切替当時、当該箇所の ATS は地上子と車上子により構成され、ある地点で地上子より情報を受信した場合、その情報は車上に記録され、信号現示が上位側に変化した場合でも次の地上子を通り、車上の情報が更新されるまで制限速度が維持される。下北沢駅ホーム始端にある場内閉そく信号機用の地上子は、信号機直下と約 50m 手前に設置されていた。A 案の場合、機外待ち後に運転を再開する際、この約 50m 手前に設置されている地上子により、直ぐに車上の情報が更新されるため、ノッチアップが容易である。ところが、B 案の場合、場内相当閉そく信号機の手前 30m まで接近させるため、同信号機が停止信号の場合、手前約 50m の地点で 15km/h の制限速度情報を受け、速度超過した場合には直ちに非常制動が動作する状態になっていた。また、先行列車が発車し、運転を再開する場合に、車上の情報が更新されるのは次の地上子、すなわち信号機の直下まで進行したときである。この区間については、地下最深部である下北沢駅に急こう配で下っている区間であり、満員の列車で速度超過し非常制動が動作するリスクを考慮すると、運転士に運転を再開するときにノッチの使用をするよう指示することも難しく、信号機直下までの約 30m を惰行により進行せざるを得ないと考えられた。

その結果、機外停止からの運転再開後、下北沢駅停止位置までの運転時分に A 案と B 案では 13 秒の差が生ることとなった。A 案の方が運転再開後、下北沢駅にスムーズに到着できることで、先行列車との下北沢駅での時隔を短縮できることから、後続の各駅停車は世田谷代田駅に進入するこ



(a) A 案と B 案での速度曲線の比較



(b) A 案と B 案での時間曲線の比較

図 3.16 急行の機外停止後の運転の違い

とができないものの、その後の遅延の発生を抑える点で有効であることが判明した。

以上のシミュレーション結果より、下北沢駅手前での機外待ち停止位置は A 案を採用することとした。

※なお、D-ATS-P が整備後は、レールを用いた伝送方式になるため、地点に係らず即座に車上の情報が更新されることから、B 案を採用することが可能になる。実際に D-ATS-P 整備後、後続の各駅停車も世田谷代田駅に進入できるよう B 案の停止位置に変更し、安定性を高めることができている。

## (2) 東北沢駅停留場化による効果

図 3.17 に東北沢駅前後のシミュレーション結果を時隔曲線図を用いて示す。

地下化切替前の特徴について、図 3.17(a) より、以下のことがわかる。

1. 各駅停車の東北沢駅発車が遅れる
2. 信号現示により後続の急行 (Express1) に速度制限がかかり、下北沢駅発車後低速で走行する。
3. その後続の急行 (Express2) の下北沢駅への進入が低速になり、Express1 と Express2 の時隔が拡大してしまう。

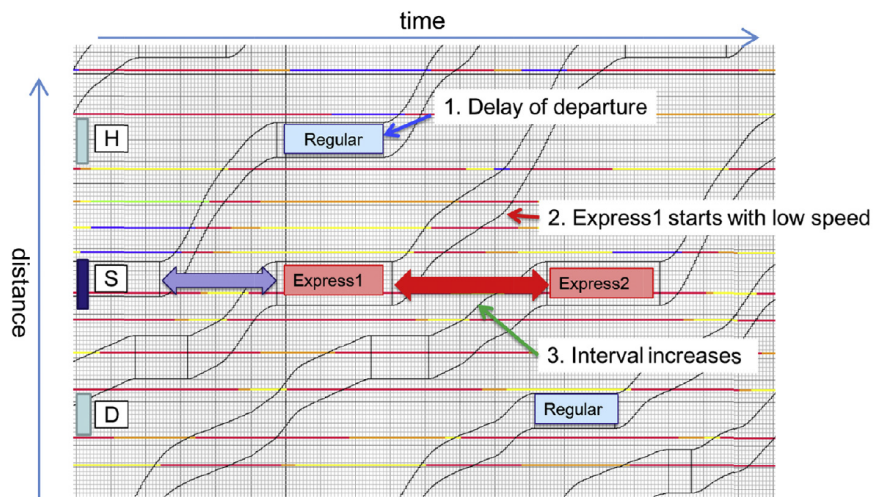
一方で、地下化切替後の特徴について、図 3.17(b) より、以下のことがわかる。

1. 各駅停車の東北沢駅発車が遅れる
2. 東北沢駅の信号現示が変わったため、後続の急行 (Express1) には速度制限がかかることなく、下北沢駅発車後通常速度で走行することができる。
3. その後続の急行 (Express2) の下北沢駅への進入についても通常運転になり、Express1 と Express2 の時隔が拡大することなくスムーズに運行される。

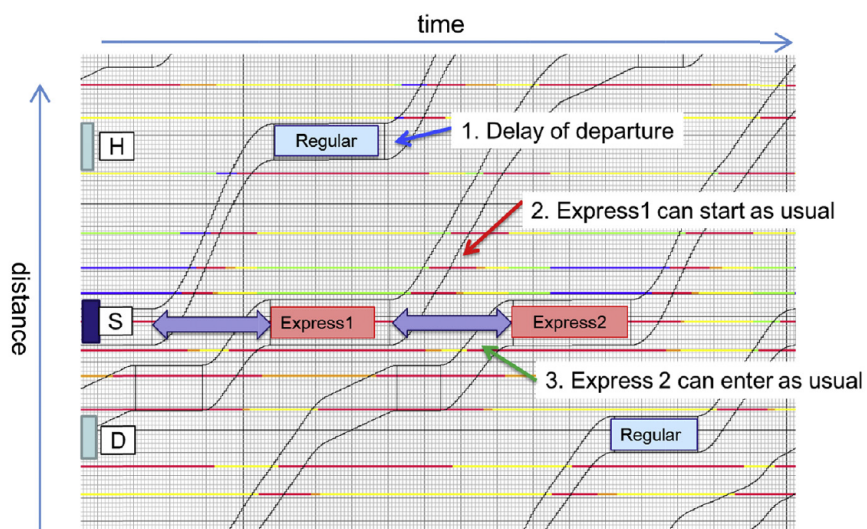
以上の結果から、下北沢駅、東北沢駅付近の時隔が改善され、定時性が向上するものと推定した。

## (3) 東北沢駅と世田谷代田駅の停車時分に関する分析

東北沢駅の停留場化ならびに、A 案を採用した際、東北沢駅のみでなく、世田谷代田駅の停車時分の伸び・縮みがラッシュ輸送に与える影響の変化を検討するために、下北沢駅の停車時分を 65 秒に固定し、東北沢駅・世田谷代田駅の停車時分を変化させシミュレーションを実施した。シミュレーション結果を図 3.18 に示す。



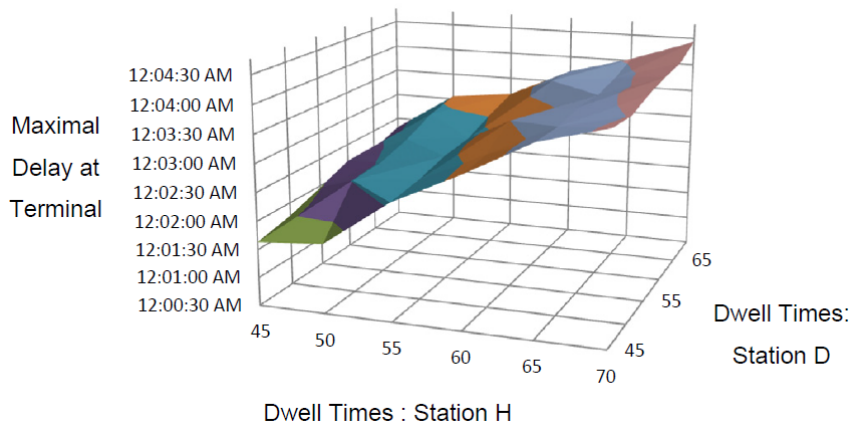
(a) 地下化切替前



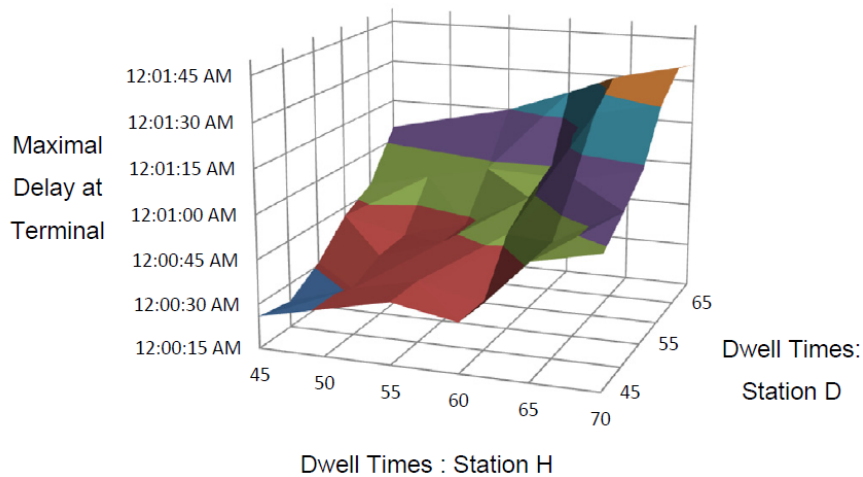
(b) 地下化切替後

図 3.17 東北沢駅付近における地下化切替前後でのシミュレーション結果の違い

シミュレーション結果から、地上設備時は世田谷代田駅よりも、東北沢駅の停車時分の増加に伴う新宿駅到着最大遅延の伸びが大きいのに対し、地下化後は東北沢駅よりも世田谷代田駅の停車時分の増加による影響が大きくなっていることが傾きからわかる。地上設備時は、駅係員を東北沢駅に確保し、停車時分を50秒以内に抑えるよう努めていたが、地下化後については60秒程度まで停車時分が伸びても大きな影響が発生しないことが分かった。代わりに、世田谷代田駅での停車時分の伸びに対する最大遅延の伸びの方が大きくなることから、これまでの東北沢駅よりも世田谷代田駅に要員を厚くし、停車時分の短縮に努め、定時性を向上させることとした。



(a) 地下化切替前



(b) 地下化切替後

図 3.18 東北沢駅，世田谷代田駅と新宿駅到着最大遅延の関係

### 3.4.7 地下化切替後の運転状況

小田急電鉄がラッシュ時間帯で特に注目しているのは、下北沢駅を7時40分～8時42分間に発着するピーク29本の列車である。そこで、これら列車（千代田線直通列車を除く）の新宿駅到着遅延が1分台で収束した日と、小田急電鉄として特に改善の必要があると考える2分以上に発散した日に分け、それぞれについて、地下化前と地下化後の平均遅延を比較・分析した。

#### (1) 新宿駅到着遅延が1分台で収束した日

図3.19に地下化切替前の2012年度と地下化切替後の2013年度に対して、ラッシュ時間帯、全列車新宿駅到着1分台を達成した日数の変化を比較する。地下化後の2013年度は1月、2月が寒さの厳しい日が多かったことにより2012年度よりも達成日数が低くなっているが、概ね年間を通して2012年度よりも達成率が上がり、2012年度の年間127日に対し、2013年度は年間144日と達成率が約7.2%上昇した。地下化した区間以外のダイヤについては変更しなかったことから、これは、純粋に地下化時に行なった対策による頑健性向上効果と考えられる。

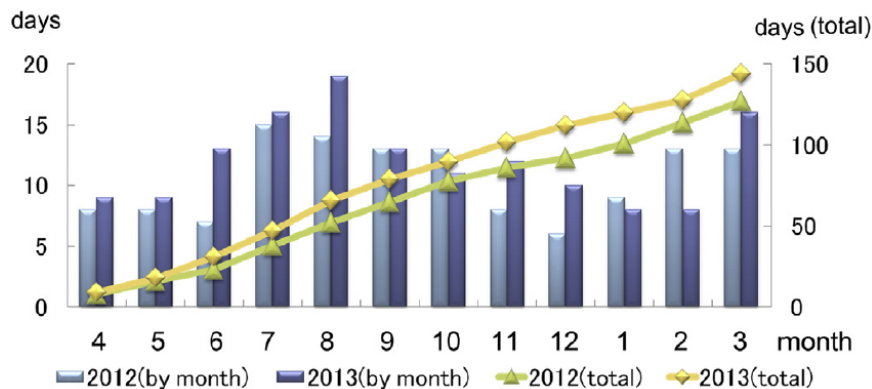
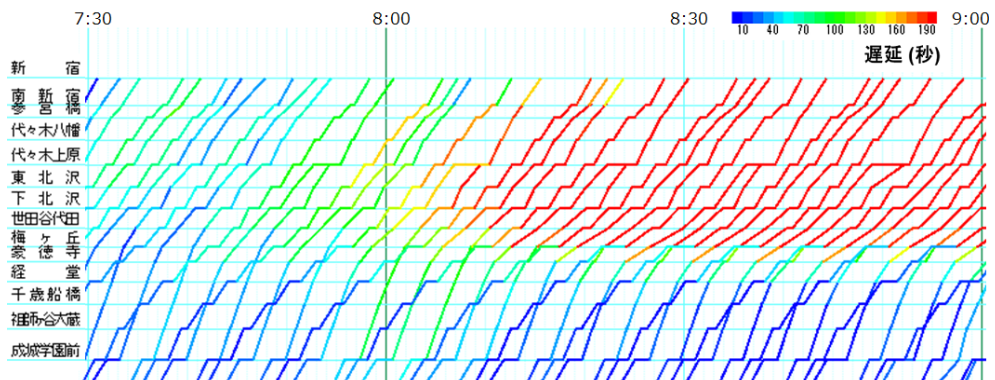


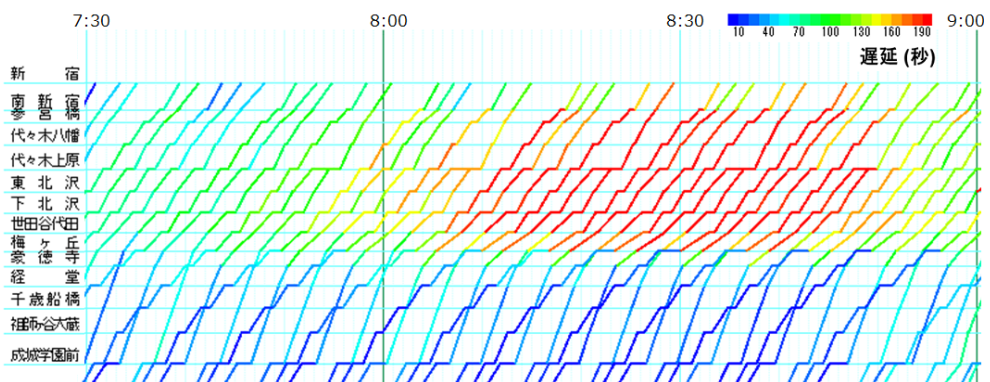
図 3.19 定時性目標達成日数の推移

#### (2) 新宿駅到着遅延が2分以上に発散した日

新宿駅到着遅延が2分以上となった日の運転状況の違いについても、地下化前後で大きな違いが出た。それぞれに対するクロマティックダイヤ図を図3.20に示す。図3.20(a)からわかるように、地下化前は下北沢駅の7時30分頃の遅延が1分程度であっても9時台後半まで影響を及ぼし、新宿駅到着の最大遅延は4分37秒まで拡大している。一方、地下化後は、下北沢駅の7時30分頃の遅延が2分台まで拡大してしまった状況であっても、新宿駅到着の最大遅延は2分53秒で収まり、8時台後半で遅延が



(a) 地下化切替前 (2012年12月~2013年3月の平均)



(b) 地下化切替後 (2013年4月~2013年6月の平均)

図 3.20 新宿駅到着遅延が2分以上に発散した日の運行実績



収束に向かっている（図 3.20(b)）。また、ピーク時間帯 29 本の列車のうち、1 本目の列車が下北沢駅に到着してから、最後の 29 本目の列車が到着するまでにかかる時間が、地下化前は 1 時間 06 分 15 秒であったのに対し、地下化後は 1 時間 03 分 39 秒と、地下化前に比べ 2 分 36 秒も改善されており、地下化による施策の効果が現れたものと考えられる。

### 3.4.8 考察

これまで示したように、代々木上原駅～梅ヶ丘駅間地下化の際、運転士の取扱を考慮したシミュレーションによる分析が有効に機能したことを示すことが出来た。

シミュレーションによる検討開始時、B 案の方が、先行列車により接近した位置まで運転を行い、先行列車が下北沢駅の手前で機外停止している際、後続の列車が世田谷代田駅に進入できるため、遅延の伝播防止の観点から優れていると想定された。しかし、結果は想定と異なり、3.4.6 節で示した下北沢駅接近時の運転士の心理状況や取扱いを考慮しシミュレーションを行うと、後続の列車は世田谷代田駅に進入できないにもかかわらず、A 案が優れているというものであった。

以上のことから、運転士の心理状況や取扱いを十分に考慮し、分析することの重要性が示唆されたといえる。

## 3.5 本章のまとめ

本章では、ラッシュ時間帯の列車運行を詳細に分析し、頑健性を高めるために、運転士の操縦に関する要素を考慮することの重要性を述べ、マイクロシミュレーションにおいて現実的な運転士の取扱を考慮する手法を考案した。同シミュレータを現実路線のラッシュ時間帯の列車運行に適用したところ、現実のラッシュ時間帯の終着駅到着遅延が 1 分 45 秒であったのに対し、運転士の取扱を考慮せずにシミュレーションを行った場合、同遅延が 31 秒と、遅延の伝播を再現できなかったものが、同アルゴリズムを適用することで、1 分 38 秒という結果となり、遅延の伝播を高精度で再現することに成功した。

また、このマイクロシミュレータを用いることにより、線路切替による設備変更に伴うラッシュ運行の特性の変化を分析し、適切なオペレーション施策を検討、実施したことにより、頑健性が向上したことを明らかにすることができた。

以上のことから、設備が変更になった際の分析にも同シミュレータによる分析が有効であることが示されているほか、シミュレータの入力内容を

分析対象とする路線の線路条件や信号動作等に変更することで、わずかな遅れが後続の列車に遅延が波及する、稠密に運行されている路線において一般的に適用し、運転士の取扱いを十分に考慮した適切なオペレーション施策を検討、実施することができる。

今後の課題として、本シミュレータを用いて列車ダイヤ作成時の頑健性向上施策へ応用が求められているほか、運行実績や軌道回路単位での実績データとマイクロシミュレータを組み合わせて、遅延発生要因を詳細に分析、対策の検討に活用することが挙げられる。

これら今後の課題に取り組む一歩として、第4章では本章で作成したマイクロシミュレーションを活用した稠密線区における新しい列車ダイヤ作成手法について述べるとともに、第5章では、軌道回路占有実績データに基づいた運転士の運転方法のばらつき、ならびに頑健性の向上につながる運転と頑健性を低下させている運転の差を抽出する方法について述べる。

## 第4章 稠密運行路線を対象とする駅 間走行速度を考慮した列車ダ イヤ作成手法とその評価

### 4.1 はじめに

2.3節で述べた通り、稠密に運行する路線において、優等列車の運転は有用であり、多くの路線でラッシュ時間帯に各駅停車と優等列車が混在して走行している。一般に、複線区間において、速達性の高い優等列車の運転を行なうためには、表定速度（ある駅間の距離を途中駅の停車時間を含んだ時間で割った平均速度）の低い各駅停車の運行本数を減らし、優等列車の前と後の運転間隔を十分に開ける必要があるため、単位時間当たりの列車本数を増加させることとは相容れない。にもかかわらず、朝ラッシュ時間帯においては、輸送力の確保が求められるため、優等列車を運転しつつ、列車を稠密に運転することが求められる。その結果、朝ラッシュ時間帯においては、優等列車は、各駅停車の合間を縫って走る状態となり、区間によっては各駅停車とほぼ変わらない運転時分で運転することとなる。

このような稠密に列車を運行している区間においては、優等列車は適切な速度により、前後の列車と適切な間隔を確保し、先行列車の影響を受けず、また後続列車に影響を与えずに運転する必要がある。

図4.1に優等列車の駅間の運転の様子を示す。優等列車が必要以上に先行列車に追いついてしまうと、駅間での機外停止による当該列車の遅延発生に加え、減速と加速を繰り返すことによる乗り心地の低下や消費エネルギーロスが生じる。さらに、途中駅近傍に踏切がある場合、長時間にわたり遮断してしまうという問題も発生する。また、先行列車に追いつくことを嫌い、間隔を開けすぎてしまうと、列車ダイヤで定められた時刻（計画時刻）どおりに運転することが出来ずに遅延が生じ、さらに、その遅延が後続の多数の列車に伝播するという問題が生じる。

しかし、2.3.4節で述べた通り、余裕時分が余りある優等列車が全列車適切な速度で運行することは、現実的には難しいという課題がある。何故ならば、現状の列車ダイヤにおいては、駅の到着時刻と発車時刻が定められているのみで、駅間の運転方法については、なんら規定されていない。

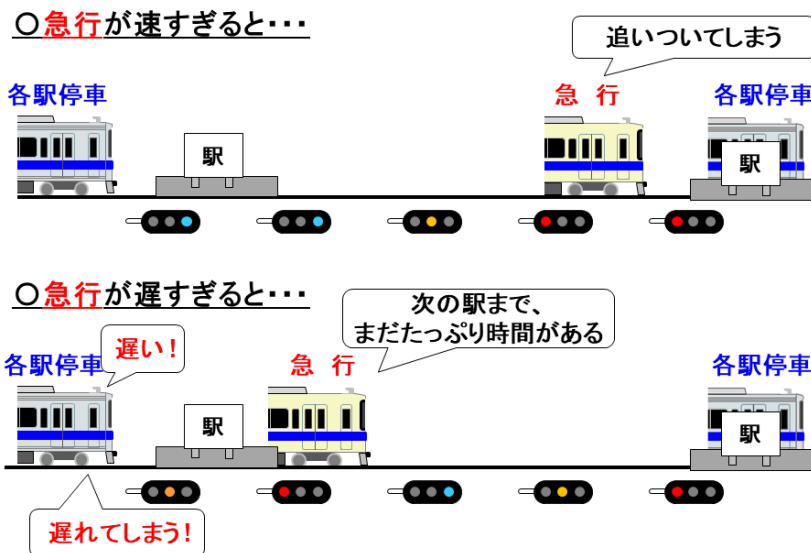


図 4.1 優等列車の駅間の走行の様子

このため、どのような運転をするかは運転士の判断に委ねられており、前章で例示したとおり、個人差が少なからず生じるためである。

そこで、本章では、列車ダイヤにおいて駅間の運転速度をも規定するという考え方を導入し、稠密に列車を運行している区間において、優等列車が個人差なく適切な運転が可能であり、頑健性を高めることのできる列車ダイヤ作成手法の構築を目的とする。

以下、4.2節では、駅間の運転速度を規定した列車ダイヤ作成手法について述べる。4.3節においては、その適用例として、各駅停車と優等列車が混在し、稠密に列車を運行する区間において、ダイヤ改正時に同手法を適用した例を紹介する。

## 4.2 稠密に列車を運行する路線を対象とした列車ダイヤ作成手法

### 4.2.1 基本的考え方と解決すべき課題

稠密に列車を運行する路線において列車ダイヤを作成する際には、前後列車による影響を十分に考慮し、正確に推定した運転時分を用いることが重要である。しかし、各駅停車の合間を走行する優等列車の運転時分を

正確に推定することは、極めて困難である。そこで、従来の手法とは異なり、前後の列車への影響が考慮された優等列車の駅間での「走り方」をあらかじめ指定した上で、優等列車がそのとおりに走行したと仮定した場合の運転時分を算出し、それをういて列車ダイヤを作成するというアプローチを提案する。

稠密に列車を運転することが求められる区間においては、優等列車が先行列車と後続列車との間隔を適切に保ちながら運転できなければ、第3章で示したとおり、信号システムを通じて直ちに後続列車に遅延が伝播する。しかし、ここで提案するアプローチにより、優等列車を含む各列車は、ダイヤ作成時に想定したとおりの速度、ならびに前後列車との適切な間隔を保ちながら走行することが出来れば、後続列車に遅延が伝播する状況が発生しにくくなる。その結果、従来の手法により作成した列車ダイヤと比較し、頑健性が向上することが期待できる。

なお、このアプローチを採用する際には、次の課題を解決する必要がある。

1. 「走り方」の具体的指定方法：列車を運転するのは、運転士であるため、運転士が実行可能な指定方法である必要がある。
2. 効果的な「走り方」を決定する手法：優等列車が各駅停車の間を走行することには変わりはない。このこと、及び、1.を前提に、どのような「走り方」が有効であるかを見出す手法が必要となる。

#### 4.2.2 抑速速度の設定によるダイヤ作成

稠密に列車の運転をすることが求められる区間において、各駅停車の間隔を走行する優等列車が、先行列車と後続列車との間隔を適切に保ち運転するためには、一般に3つの要素が求められる。

1. 後続の各駅停車に影響を与えないように、“逃げる”必要がある
2. 先行する各駅停車に追いつきすぎないために、“流して”走行する必要がある
3. 先行の各駅停車を追い越す駅で、列車間隔を縮めるために“追い込んで”走行する必要がある

そこで、4.2.1節の課題1.については、主要駅（より正確には、「停車場」）間をいくつかのブロック（抑速区間とする）に分割し、「列車ならびにブロック毎に新たな制限速度（抑速速度とする）を設ける」こととする。列車、抑速区間、速度の3点をあらかじめ担当運転士に教育・指示を行えば、

制限速度の種類が1つ増えるだけであるため、運転士の取扱いも煩雑にはならない。また、列車遅延発生時には運輸司令所長の指示により抑速速度による制限を取りやめ、通常速度に復することにより遅延を回復させることも容易であるなど、柔軟な対応も可能である。

4.2.1 節の課題 2. については、第 3 章にて開発したマイクロシミュレータを用いて、前後列車を一体としてシミュレーションし、その結果から各列車の運転時分と各駅の着・発時刻を決定する手法を考案した。このシミュレータには、勾配・曲線等の線路条件、信号機設置位置、列車の位置関係と信号現示の関係を示す信号現示系統、および車両の性能全般を再現する機能がある。また、運動方程式にもとづいて算出することから、加速に必要なエネルギーを簡易計算することもできる。

#### 4.2.3 マイクロシミュレータによる走行方法の検討

図 4.2 にダイヤ作成の主な手順を示す。はじめに、これまでと同様のダイヤ作成手法により、各駅停車の主要駅着発時刻の合間に優等列車の着発（通過）時刻を設定する。続いて抑速制御対象の区間について、マイクロシミュレータにより前後列車を一括してシミュレーションを行う。シミュレーション結果から、遅延発生箇所がないか確認し、遅延が発生している場合には必要により各列車の着発（通過）時刻の修正を行う。

続いてシミュレーションにより得られた時隔曲線を参照し、対象区間を 3 つのブロックに分割する。ブロックの位置決定と抑速制限速度決定までの流れを図 4.3 に、分割後のダイヤイメージを図 4.4 に示す。

第 4.2.2 節で述べたように、稠密区間を運行する優等列車は先行列車と後続列車のそれぞれから適切な距離を保ち運行する必要がある。そこで、後続列車の運転に影響がない地点まで高い速度で走行する（いわゆる「逃げ運転」を行なう）ブロック（A ブロック：「逃げ区間」とする）、先行列車に追いつき、機外停止が発生しないように速度を抑えて走行するべきブロック（B ブロック：「流し区間」とする）、そして先行列車を追い越す駅において、先行列車との時隔が最短になるような運転を行うべきブロック（C ブロック：「追込区間」とする）の 3 つに分割する。この際、ブロックに分割する箇所は、運転士に容易に判別が出来る場所であることに留意する必要がある。

初めに、初期的に設定した A ブロック、B ブロック、C ブロックについて、それぞれ抑速速度を指定したうえで、シミュレーションを繰り返す。

抑速速度を変化させ、良好な結果を得られない場合には、ブロックの位置を修正する。B ブロックでの抑速速度での運行により後続の各駅停車に遅延が発生する場合には、B ブロックの開始地点を遅らせる（図 4.4 で

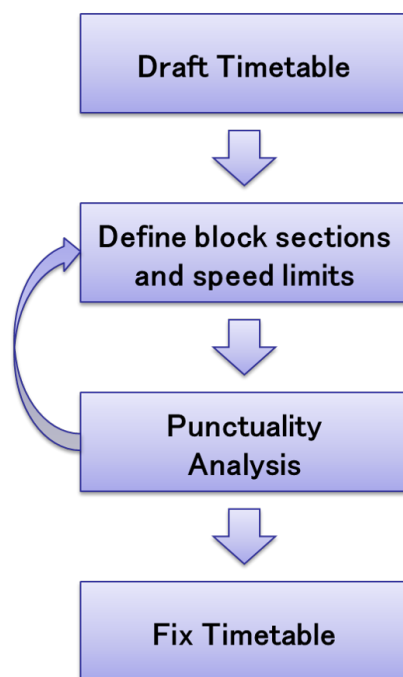


図 4.2 ダイヤ作成の手順

あれば Sta.5 側にずらす)。B ブロックの開始地点を遅らせたことで、先行列車に追いつくことを避けるため、B ブロックの抑速速度が低下し、抑速走行中に後続の各駅停車に追いつかれる場合には、B ブロック内をさらに分割し、後続列車からの逃げ運転を行う A' ブロックおよび再び先行列車に追いつかないように走行する B' ブロックを追加で設定のうえ、対象区間を A-B-A' -B' -C の 5 ブロックに分割したのち、同様にシミュレーションを繰り返す。

シミュレーションにより各列車に遅延が発生しない満足のいく結果が得られない場合には、列車ダイヤをシミュレーション結果の時刻に修正するか、列車間隔を確保し直し（すなわち単位時間当たりの列車本数を減少させて）、再度シミュレーションを行う。

各列車に遅延が発生しないこと、および機外停止の発生回数が許容される回数を下回るまで、ブロックの位置や抑速速度を変化させシミュレーションを繰り返し、満足のいく結果が得られたのち、定時性の検証を行う。

優等列車の発車が僅かに遅れ、後続の各駅停車が時刻どおりに発車した場合等で、列車の間隔が縮まった場合に、優等列車が A ブロックおよび B ブロックで抑速速度で走行すると、後続列車に影響を与える恐れがある。また、可能であれば次駅到着時にある程度遅延を吸収できることが望ましい。そこで、日常的に発生する微小な遅延を想定し、列車間隔が通常より

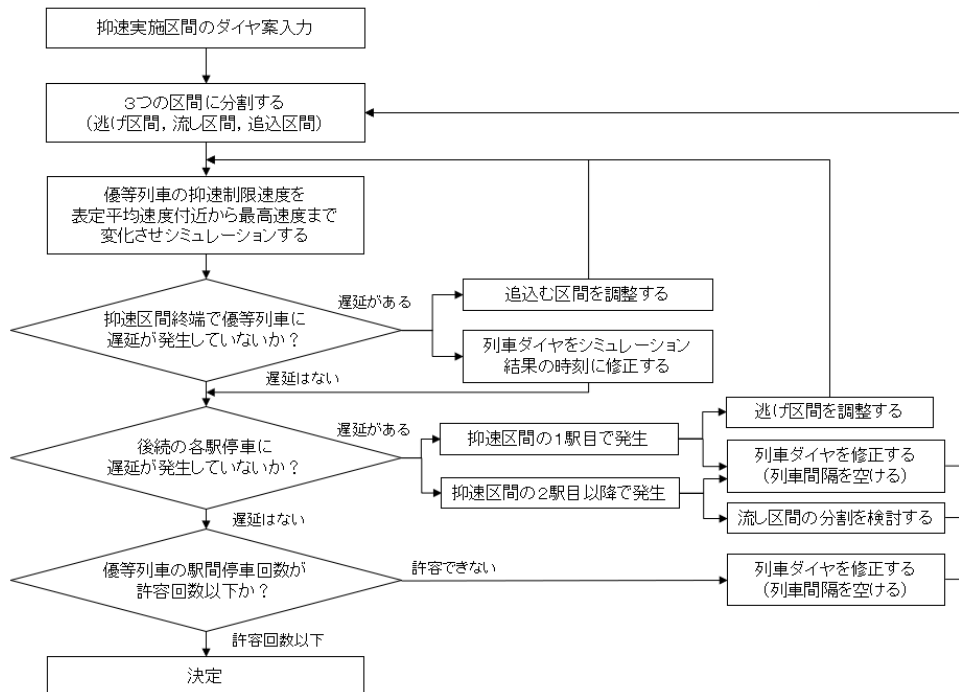


図 4.3 ブロックと抑速速度決定までの流れ

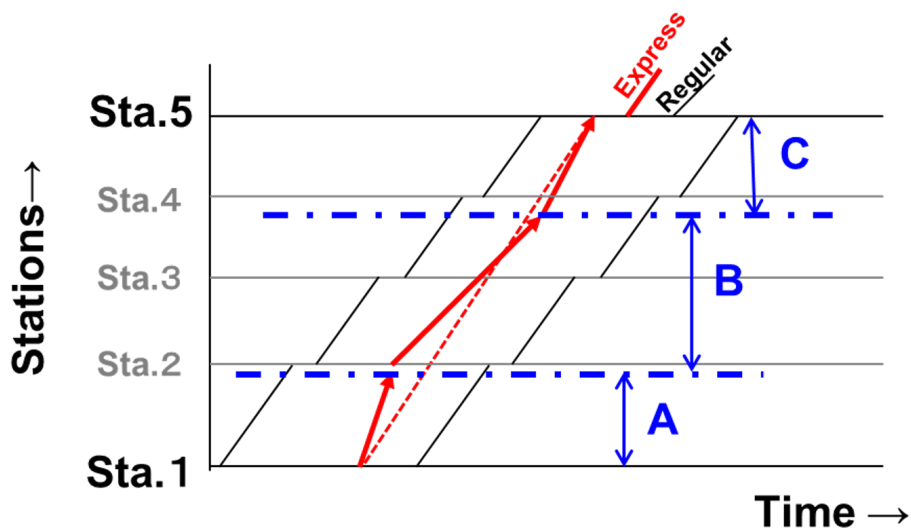


図 4.4 ブロック設定の例



も縮まった場合の検証を行う。

なお、稠密に列車が運行される区間においては、大規模な遅延が発生した際は原則としてダイヤ構成上の最小時隔で順次列車を運行することになる。このため、ここでの検証では、初期遅延として大規模な値を設定するのではなく、ダイヤ設定上想定される最小時隔となるよう設定し、抑速運転を行うことにより後続の列車に影響を与えないかという視点で、シミュレーションによる検証を行う。シミュレーション結果から、優等列車の駅間での機外待ち回数、当該列車の着駅での遅延、後続列車の遅延の3点に鑑み、最もよい結果を得られる抑速速度に決定する。

最終的に、決定した抑速速度で走行した運転時分を用いて列車ダイヤを作成する。

## 4.3 適用例とその評価

### 4.3.1 対象とした区間とダイヤ

小田急電鉄では、2018年3月、複々線化工事完成に伴い、朝方ラッシュ時間帯を含む全時間にわたり、全面的なダイヤ改正を行った<sup>[72]</sup>。この新しいダイヤのうち、複線のまま1時間あたり27本から30本に列車の増発を行なう、23.新百合ヶ丘駅～19.向ヶ丘遊園駅間(6.3km)に、提案手法の適用を試みた。同区間には途中3箇所の停留場(分岐器のない、各方向の番線が1本のみ棒線状の駅)と8箇所の踏切がある。

23.新百合ヶ丘駅については小田原線と多摩線の合流駅であり、新宿駅方面への列車については5番線と6番線の2本の番線を使用している。また、19.向ヶ丘遊園駅については、3番線と4番線を使用しており、同区間より先(新宿駅方向)の区間では、上り2本の線路が存在するほか、引上線から始発列車の設定もできる。

同区間、および複々線区間を含む新宿駅までのダイヤイメージを図4.5に示す。同区間の途中停車駅すべてに停車する通勤準急と各駅停車を各1本、途中駅ならびに19.向ヶ丘遊園駅を通過する快速急行を2本、多摩線から直通し、19.向ヶ丘遊園駅に停車する通勤急行1本の計5本を10分サイクルで運行するほか、19.向ヶ丘遊園駅始発の列車を10分ヘッドで1本設定する。

### 4.3.2 抑速制限速度の決定

前節で述べた手順に従って、各列車の時刻と抑速制限速度を決定する。

#### (1) 素案ダイヤのシミュレーション

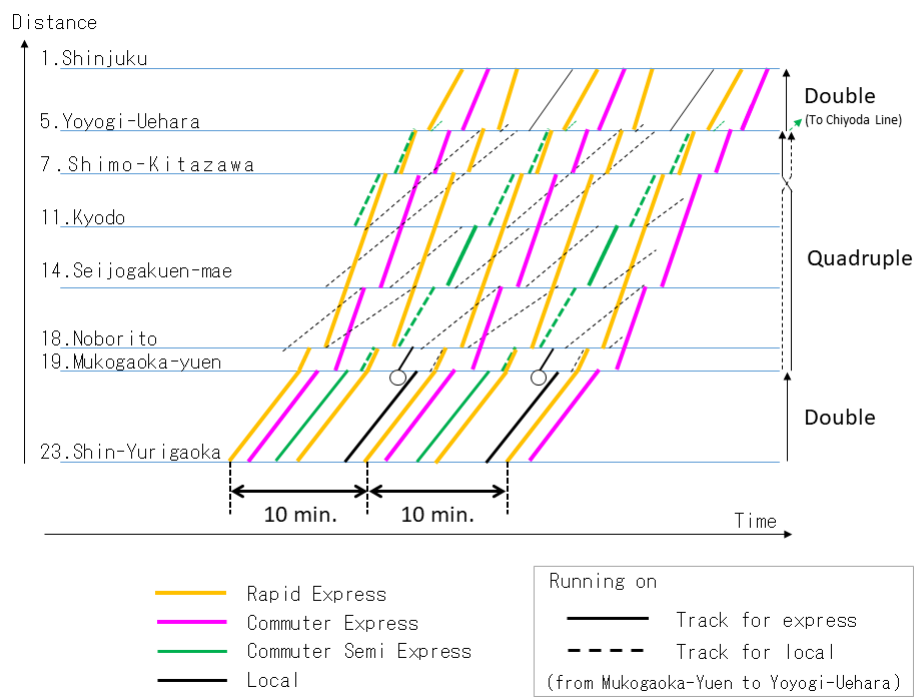


図 4.5 対象とした区間と前後区間の列車ダイヤ概要

図 4.6 に従来のダイヤ手法により作成した計画ダイヤ（図中の灰色線）を基に、全列車、理想的な前詰め運転を行なうと想定してシミュレーションを行なった結果を示す（青線）。シミュレーション結果より、理想的な前詰め運転が行われた場合には、全列車遅延は発生しないことが示されている。さらに、19. 向ヶ丘遊園駅において、なお若干の早着、早通（より正確には、10 秒～最大 50 秒程度）が可能であることがわかる。

19. 向ヶ丘遊園駅始発の各駅停車については、直前の快速急行が同駅 3 番線を通過後、引上線より 3 番線へ入換運転を行ったのち、旅客が乗車を終えると出発する。そこで、19. 向ヶ丘遊園駅始発の各駅停車の入換開始時刻から 19. 向ヶ丘遊園駅出発時刻までの時間を可能な限り確保するため、直前に通過する快速急行と、さらにその前を走行する通勤準急の時刻について、計画ダイヤ時刻を微修正（図 4.6 のピンク色の線）した。

なお、各駅停車、快速急行、通勤急行と続く箇所については、19. 向ヶ丘遊園駅到着時の遅延のバッファとなるよう余裕時分として残すこととした。

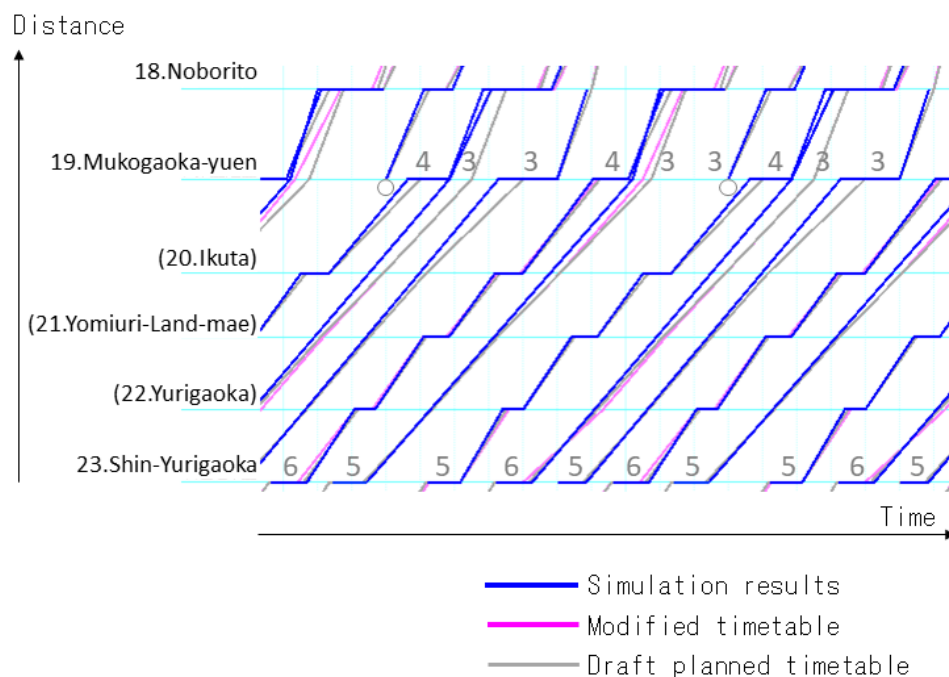


図 4.6 シミュレーション結果と微修正後のダイヤ

## (2) 抑速制限ブロックの設定

同区間のダイヤの特徴を考慮して適切な抑速制限ブロックを検討する。はじめに、23. 新百合ヶ丘駅については図 4.6 に示す通り、快速急行に各駅停車が続く際、5 番線発・着が続くことから、後続の列車に影響を与えないよう 23. 新百合ヶ丘駅発車後、十分に進出しきるまで高速で運転する必要がある。そこで、22. 百合ヶ丘駅手前までを A ブロックとし、ここでは距離が比較的短いことから速度制限を設けないこととした。

続いて、各駅停車（および通勤準急）の後続を走行する優等列車（快速急行と通勤急行）は 20. 生田駅の手前で列車の詰まりを起し、停止信号による停止と起動を繰り返すことから、前詰め運転を行わなかった際、遅延の拡大が懸念される。また、20. 生田駅付近の踏切の長時間遮断が発生することも併せて懸念される。

次に、各駅停車（および通勤準急）と、それに後続する快速急行は、19. 向ヶ丘遊園駅で必ず使用番線が異なり、各駅停車が 19. 向ヶ丘遊園駅に到着次第、直ちに進路が構成され、快速急行が通過できる状況になる。また、快速急行は 19. 向ヶ丘遊園駅を通過するため、その後続の通勤急行は同一番線であるが、19. 向ヶ丘遊園駅での列車の詰まりは発生しにくいという特徴がある。

そこで、22. 百合ヶ丘駅（手前）～20. 生田駅までを B ブロック（後続の列車に影響を与えず、かつ先行の各駅停車・通勤準急に追いつかない抑速速度  $V_b$  で走行する区間）、20. 生田駅～19. 向ヶ丘遊園駅間を C ブロック（19. 向ヶ丘遊園駅にスムーズに到着できる抑速速度  $V_c$  で走行する区間）に分割し、それぞれ定時で運行でき、先行列車に追いつきすぎず、かつ後続列車の運転に影響を与えない適切な速度を検討し設定することとした。

## (3) 抑速速度の設定

(1) で設定した時刻、ならびに (2) で設定したブロックを基に、全列車、23. 新百合ヶ丘駅を時刻とおりに発車させた場合、23. 新百合ヶ丘駅～19. 向ヶ丘遊園駅間がどのような運転になるか、途中駅を通過する優等列車（快速急行、通勤急行）に適用する抑速速度 ( $V_b, V_c$ ) を変化させ、シミュレーションを繰り返すことで検証を行なった。なお、同区間 (6.3km)、同時間帯の優等列車の運転時分は約 8 分 30 秒であり、平均速度が 44.5km/h であることから、 $V_b=38\text{km/h}$ 、 $V_c=43\text{km/h}$  からそれぞれ 88km/h までの間、5km/h 刻みで変化させて検証を行なった。

図 4.7 に各速度におけるシミュレーション結果を示す。図 4.7(a) は 19. 向ヶ丘遊園駅に到着した列車の最大遅延を示している。

$V_b=38\text{km/h}$  とした場合、 $V_c=68\text{km/h}$  以上とすると、19. 向ヶ丘遊園駅での着遅延は発生しないことがわかる。また、図 4.7(b) は各列車の途中駅における遅延時間 (秒) をすべて積算した値を示しており、抑速運転

を実施したことで、後続の各駅停車（通勤準急）が追いつき、通常運転ができず、途中駅で遅延が発生していないかどうかを判断できる。

$V_b=38\text{km/h}$ とした場合、 $V_c=58\text{km/h}$ 以下では、後続の各駅停車（通勤準急）の運行に影響し、遅延が発生することが示されている。一方、 $V_c=63\text{km/h}$ 以上ではこの値が0秒であることから、抑速運転が後続の各駅停車（通勤準急）に影響することなく、遅延は発生しないことがわかる。図4.7(c)は、途中駅間において停止信号による機外停止の発生回数を示している。 $V_b=38\text{km/h}$ とすると機外停止がほぼ発生しないことがわかる。

以上の結果から、 $V_b=38\text{km/h}$ 、 $V_c=68\text{km/h}$ とすると、優等列車が駅間で機外停止となることなくスムーズに運行でき、全列車計画ダイヤどおりに運行できることが示された。

#### (4) 頑健性の検証

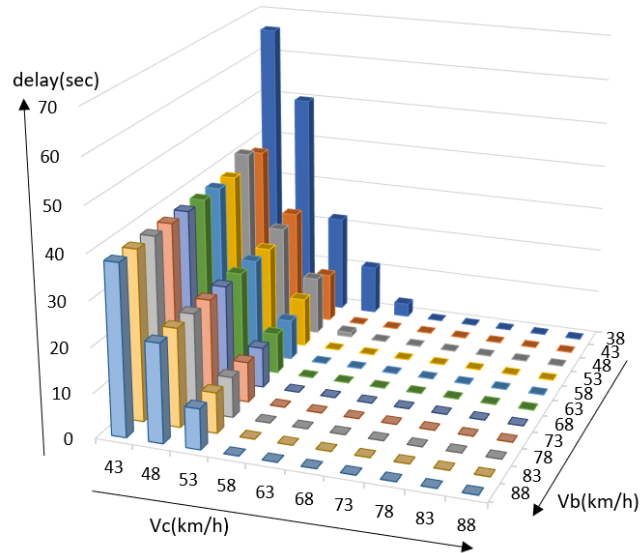
(3)では、全列車が計画ダイヤ通りに運転されることを想定してシミュレーションを行った。抑速制御を導入するにあたり、最も避けたい状況は、優等列車が微小に遅れた際、抑速制限速度で運転することにより、後続列車に遅延を伝播させることである。大きな遅延が発生した場合は、抑速制御の中止を運輸司令所で判断・決定し、影響を避けることが可能であるが、秒単位の微小な遅延発生時に抑速制御を中止することは現在の運用上では困難である。このため、後続の列車が想定通りに運行できず、遅延が伝播することが懸念される。

ここで、図4.8に2017年4月1日～12月29日（平日）7時20分～8時20分にかけての23.新百合ヶ丘駅発遅延実績の分布を示す。5秒未満の遅れで発車出来ている列車が約30%あるものの、微小な遅延が発生しており、閾値を30秒未満にすると約80%を超える列車が収まることが示される。

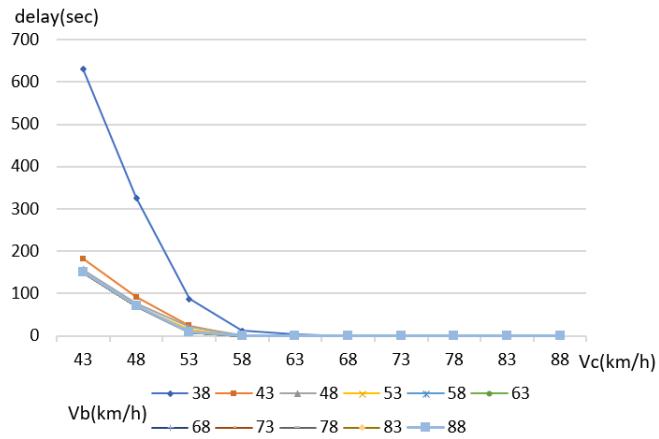
過去の実績から、23.新百合ヶ丘駅の優等列車の発車が30秒遅れても後続の各駅停車に影響を与えることなく、さらに優等列車については19.向ヶ丘遊園駅まで遅延を吸収できるダイヤにしたい。

そこで23.新百合ヶ丘を発車するすべての優等列車に初期遅延30秒を与え、各駅停車・通勤準急は時刻通りに発車すべく初期遅延は与えずに、優等列車と後続列車の運転間隔が縮まる状況を想定し、 $V_b$ を38～48km/hまで、 $V_c$ を68～88km/hまで5km/hステップでそれぞれ変化させ、シミュレーションを行なった。

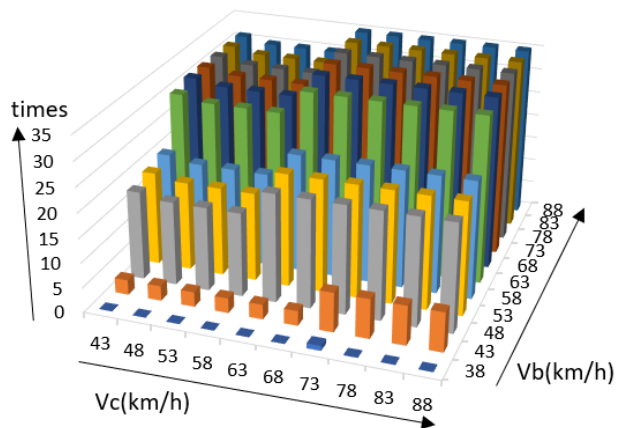
各速度でシミュレーションした場合の19.向ヶ丘遊園駅到着最大遅延の違いを図4.9に示す。 $V_b=38\text{km/h}$ 、 $V_c=68\text{km/h}$ の場合、最大17秒遅延が発生し、23.新百合ヶ丘駅の発遅延を19.向ヶ丘遊園駅到着までに吸収できないことが分かる。一方で、 $V_b=43\text{km/h}$ とした場合には、19.向ヶ丘遊園駅の遅延は0秒となり、遅延を吸収できることが分かった。図4.10



(a) 19. 向ヶ丘遊園駅における最大遅延



(b) 22. 百合ヶ丘駅～19. 向ヶ丘遊園駅間における遅延の総和



(c) 駅間における機外停止発生回数

図 4.7 新百合ヶ丘駅 (7:20:00～8:20:00) を全列車定時に発車した場合

は  $V_b=38\text{km/h}$ ,  $43\text{km/h}$ ,  $48\text{km/h}$  (いずれも  $V_c=68\text{km/h}$ ) としてシミュレーションした場合の運行実績結果をダイヤ図として出力したものである。各駅の着遅延状況が一目で認識できるよう、各駅の着遅延秒数により、前駅～当該駅までのスジを着色した。5秒未満であれば黒色、5秒以上10秒未満であれば青色、50秒以上遅延すると赤色に着色して表示する。

シミュレーション結果から、通勤準急については、先行の優等列車が23.新百合ヶ丘駅を30秒遅延し発車した場合、同駅への到着が約20秒遅れ、発車も遅れていることが示されている。その後、図4.10(a)に示すとおり、 $V_b=38\text{km/h}$ とした場合には、優等列車の遅延が後続の通勤準急に伝播し、19.向ヶ丘遊園駅到着時に吸収することが出来ていない。一方、図4.10(b)と図4.10(c)で示すとおり、 $V_b=43\text{km/h}$ ,  $48\text{km/h}$ とした場合、通勤準急の運行に違いはなく、19.向ヶ丘遊園駅までに遅延を吸収できている。また、各駅停車、通勤準急とも、各駅間の運転時分について定時で運行した場合と比較したところ、同一であり、先行する優等列車の影響を受けていないことも合わせて確認できた。

そこで、図4.7(c)で示されるとおり、全列車定刻で運行がされた場合、駅間での機外停止が3回発生するものの、優等列車が23.新百合ヶ丘駅を30秒遅延し発車した場合でも19.向ヶ丘遊園駅までで回復でき、後続の各駅停車(または通勤準急)についても影響を最小限に留めることが出来る。 $V_b=43\text{km/h}$ とすることが適切であると判断した。

以上の検討結果から、 $V_b=43\text{km/h}$ ,  $V_c=68\text{km/h}$ として、列車の走行時分を算出し、それに基づいて着発時刻を決定した。

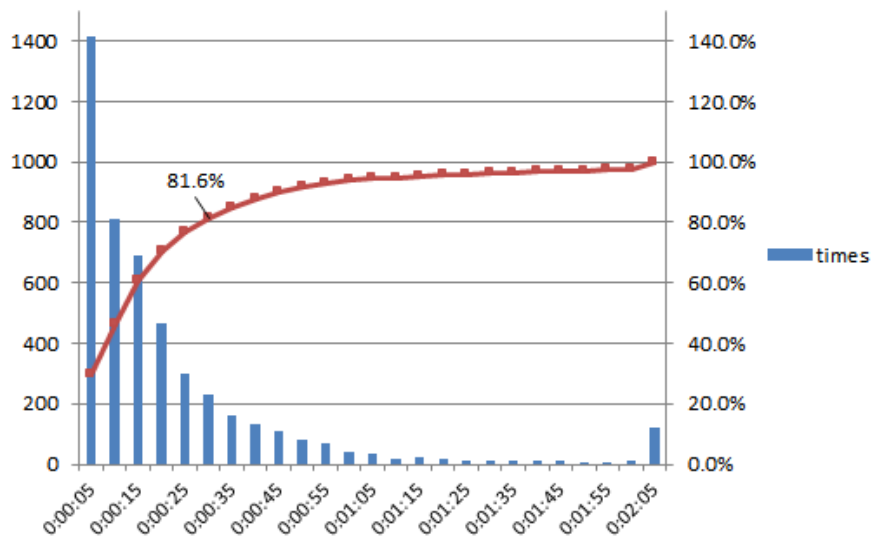


図 4.8 新百合ヶ丘駅発遅延の分布

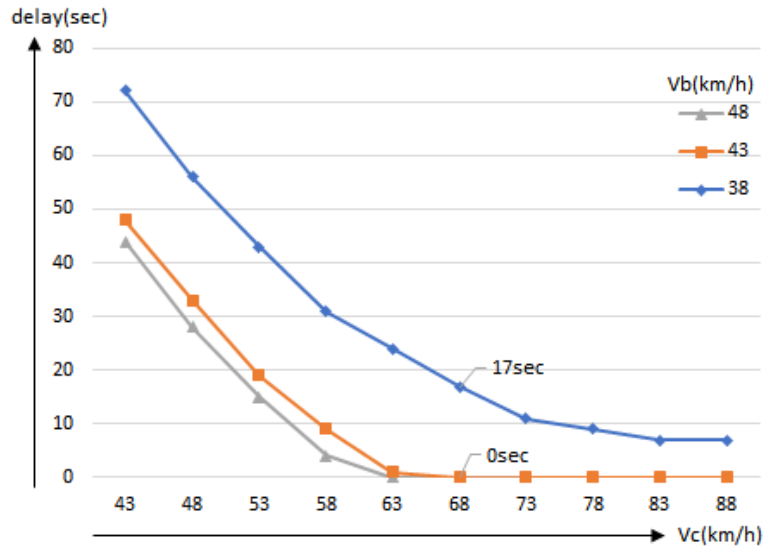
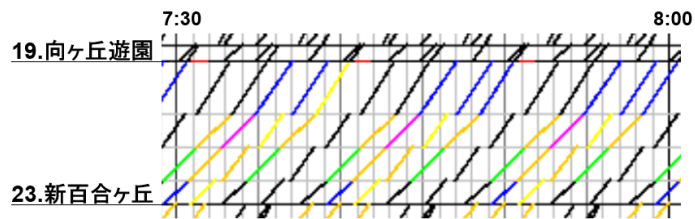
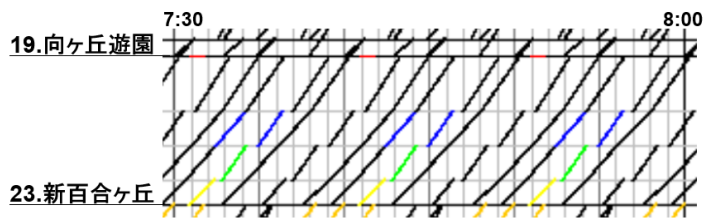


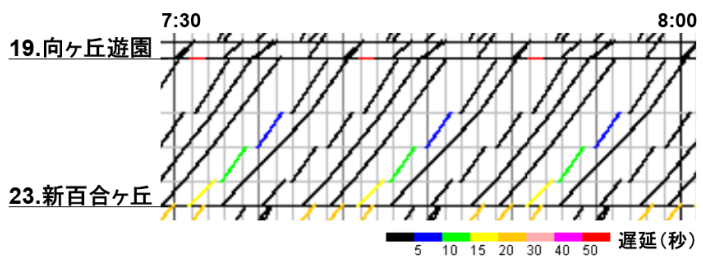
図 4.9 向ヶ丘遊園駅での最大遅延  
(新百合ヶ丘駅 7:20:00~8:20:00 発の優等列車に初期遅延を与えた場合)



(a) Vb=38km/h, Vc=68km/h の場合



(b) Vb=43km/h, Vc=68km/h の場合



(c) Vb=48km/h, Vc=68km/h の場合

図 4.10 優等列車に初期遅延を与えた場合のシミュレーション結果  
(7:30:00~8:00:00)



### 4.3.3 導入したダイヤの妥当性の検証

導入したダイヤの妥当性について、遅延要因となる機外停止の発生回数、消費エネルギー、踏切遮断時間（軌道回路占有時間）の観点から、2017年3月ダイヤ、2018年ダイヤ（抑速なし）、2018年ダイヤ（抑速あり）の7時20分～8時20分の上り方向について、全列車が定時で運行した場合を想定し、シミュレータを用いて比較検証する（表4.1）。

#### (1) 機外停止発生回数

2017年ダイヤでは駅間にて優等列車が16回、積算すると6分23秒停車しているのに対し、新しいダイヤで抑速制限を導入しなかった場合は35回、積算時間11分29秒であるが、抑速制限を設けることにより、3回、積算時間は24秒に減少させることが出来た。稠密に列車が運転されている路線では、機外停止が発生すると、後続列車に遅延が伝播し、頑健性が低下する。従って、提案手法は、頑健性の向上に大きく寄与したと言える。

#### (2) 消費エネルギー

加速に必要な電力量を、シミュレータにて必要な運動エネルギーより概算した結果、2017年ダイヤでは4,817kWhであるのに対し、新しいダイヤの抑速制限を導入しない場合5,182kWhであったが、抑速制限を導入することで、4,158kWhに減少させることが可能であることが分かった。この数値は回生制動による削減効果を含んでいないものの、先行列車との適切な間隔を保つことにより、無駄な加速と減速を抑えることが出来た効果であると考えられる。

#### (3) 踏切遮断時間（軌道回路占有時間）

途中、20.生田駅近傍に交通量の多い踏切が存在しているため、生田上り2Tの軌道回路占有時間を比較することで、上り方向の列車運行に起因する長時間遮断が発生しないかどうか検証を行った。2017年ダイヤでは18分58秒であるところ、抑速制限を行わない場合、列車の詰まりが発生することから24分10秒と27.4%増加してしまうという結果が出ているが、抑速制御を実施することで19分34秒となり、27本から30本へと11.1%列車本数を増加させたものの、軌道回路占有時間の増加量は3.2%に抑えることが出来ることが分かる。

#### (4) まとめ

図4.11に抑速制限を導入した場合と導入しなかった場合の、21.読売ランド前駅、20.生田駅付近の時隔曲線図を示す。図中の赤丸は優等列車に機外停止が発生していることを示している。図4.11で示されているとおり、(1)～(3)の結果から、遅延拡大につながる要素としての機外停止発生

回数を減少させること、加速に必要な消費エネルギー量を減少させること、および踏切遮断時間悪化幅を減少させることが出来ていることから、提案手法により作成した駅間走行速度を考慮したダイヤが有効であると判断できる。

表 4.1 シミュレーション結果による比較

revision	2017	2018 (without limits)	2018 (with limits)
Times of stop (sum up time)	16(6'23'')	35(11'29'')	3(0'24'')
Energy consumption	4,817kWh	5,182kWh (+7.6%)	4,158kWh (-14.7%)
Occupation Time (Ikuta2T)	18'58''	24'10'' (+27.4%)	19'34'' (+3.2%)

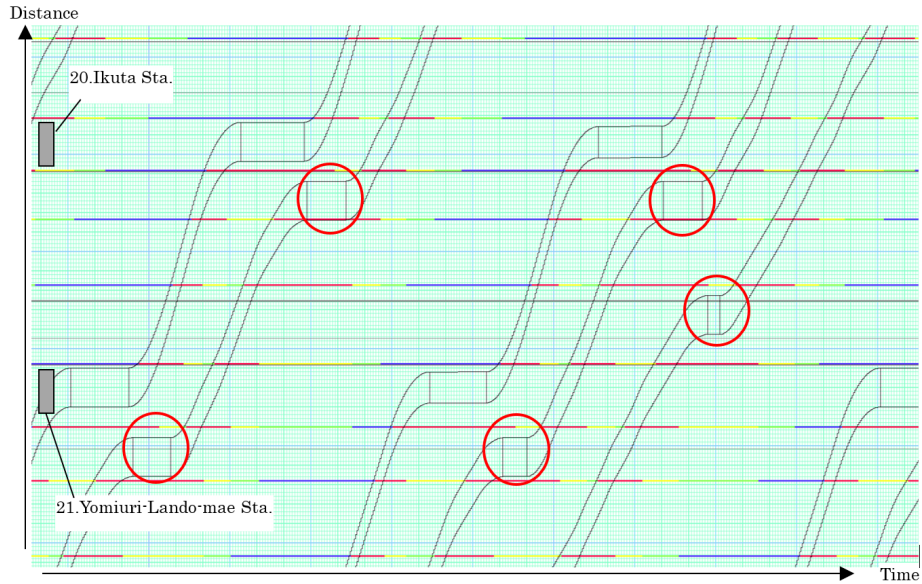
#### 4.3.4 ダイヤ改正結果の検証

2018年3月19日(月)に、本手法によって作成したダイヤによるダイヤ改正(平日)を行なった。以下にダイヤ改正前後での変化を示す。

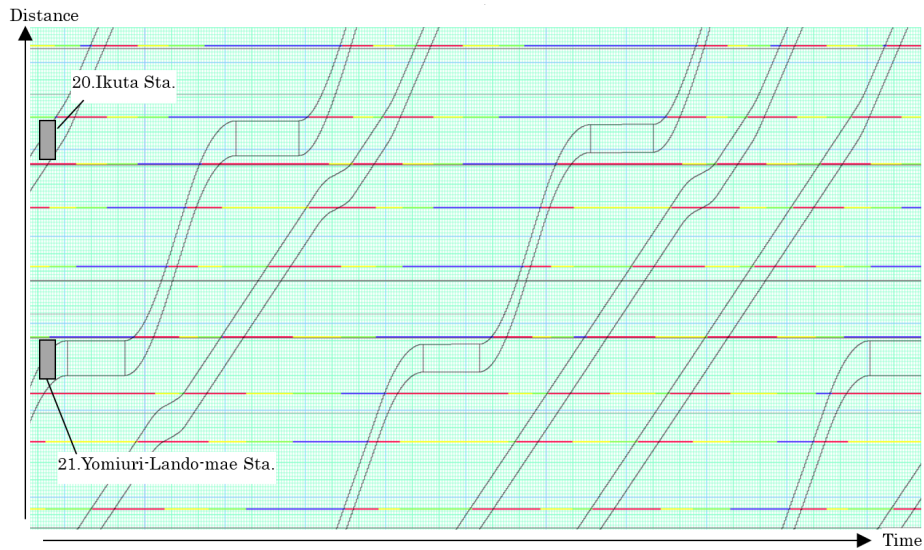
##### (1) 通常運行時における列車運行の結果

図 4.12 にダイヤ改正前後での 23. 新百合ヶ丘駅～19. 向ヶ丘遊園駅間の軌道回路占有状況を示す。ダイヤ改正前(2017年3月21日の実績)は優等列車が先行の各駅停車に追いつき、減速と加速を繰り返している(赤丸箇所)が、ダイヤ改正後(2018年3月27日の実績)は、列車本数が増加したにもかかわらず、遅延の発生要因となる機外停止等、列車の詰まりは発生せず、各駅停車の合間を走行する優等列車について、ほぼ想定とおりの速度で等間隔に運転できていることがわかる。また、各駅停車・通勤準急についても問題なく運行されていることが確認できる。踏切の存在する生田上り 2T の占有時間について、3月19日(月)～31日(金)の平日9日間の実績を調査したところ、平均19分00秒であった。全列車定時を前提としてシミュレーションした表 4.1 の結果よりもやや短く、概ね想定通りの結果となり、良好な結果であった。

##### (2) ダイヤ乱れ時の結果

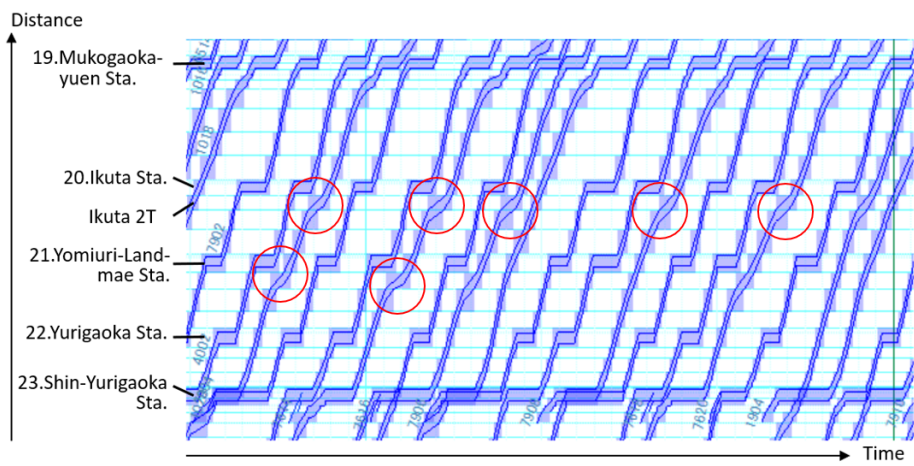


(a) ダイヤ改正後（抑速制限を行わない場合）

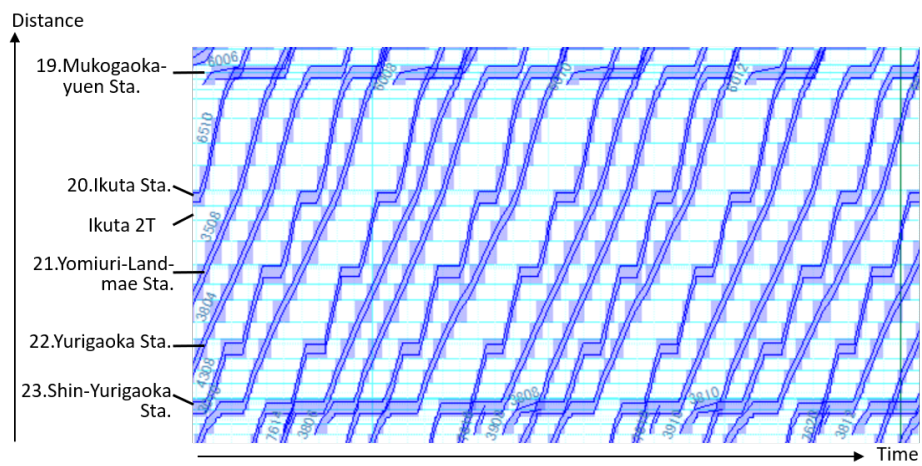


(b) ダイヤ改正後（抑速制限を行った場合： $V_b=43\text{km/h}$ ,  $V_c=68\text{km/h}$ ）

図 4.11 シミュレーション結果（時隔曲線）



(a) ダイヤ改正前 (2017.3.21 の実績)



(b) ダイヤ改正後 (2018.3.27 の実績)

図 4.12 新百合ヶ丘駅～向ヶ丘遊園駅間の軌道回路占有実績図 (7:20～8:00)

図 4.13 はダイヤ乱れが発生した日の 23. 新百合ヶ丘駅～19. 向ヶ丘遊園駅間の軌道回路占有状況図である。遅れが発生した先頭の 2 列車については、運輸指令所長の指示により抑速運転が中止され、19. 向ヶ丘遊園駅までの間で回復運転が行われている。一方、その後の各駅停車に続く優等列車は抑速速度での運転を継続することで、各駅停車の合間をスムーズに運行できていることが確認できる。

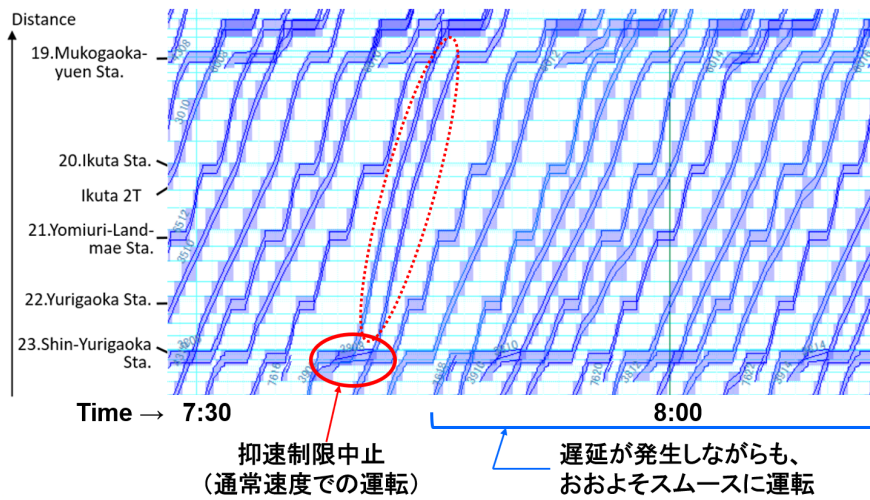


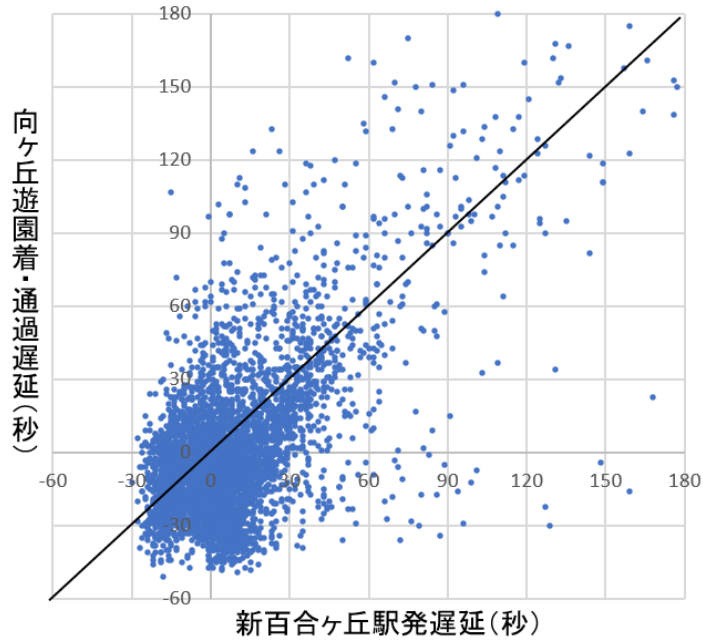
図 4.13 遅延が発生した際の運行の様子

### (3) 頑健性の向上結果

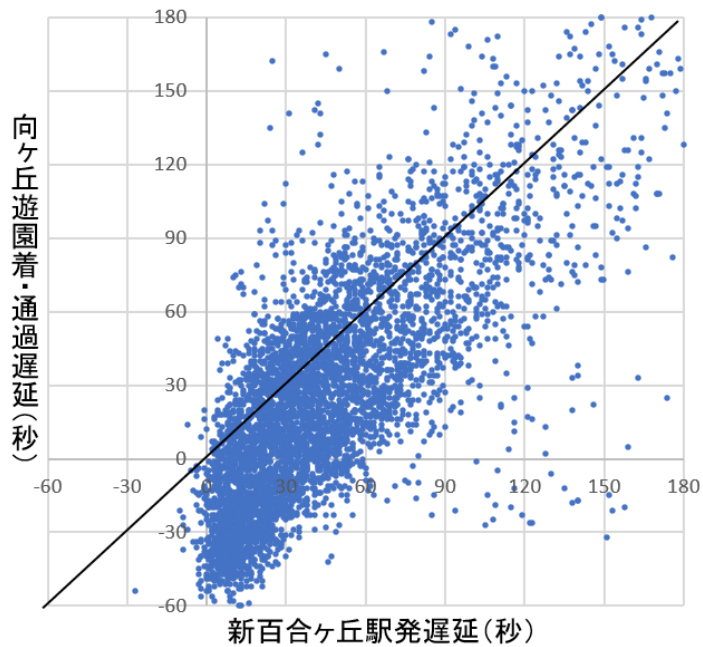
図 4.14 は 2017 年と 2018 年の、それぞれ 4 月から 12 月、全平日における 23. 新百合ヶ丘駅 7 時 15 分発～8 時 14 分発の全列車の、23. 新百合ヶ丘駅発遅延と 19. 向ヶ丘遊園駅着・通過遅延実績を示したものである。23. 新百合ヶ丘駅の発遅延はダイヤ改正前後で比較すると、列車本数の増加した影響によりダイヤ改正後の方が増大傾向にあるものの、ダイヤ改正後の方が 19. 向ヶ丘遊園駅までの間で遅延を回復できていることが確認できる。

図 4.15 は遅延回復状況の分布を示したものである。遅延を回復できている列車の割合は、ダイヤ改正前の 2017 年は 64.5%であったのに対し、ダイヤ改正後の 2018 年は列車増発を行ったにもかかわらず 73.8%となり、良好な結果を得ることができた。

以上の結果から、考案したダイヤ作成手法により、稠密運行路線における駅間走行速度を考慮することで、頑健性の高い計画ダイヤの作成が可能であること判断できる。加えて、エネルギー消費や踏切長時間遮断防止の観点からも同手法によるダイヤ作成が非常に有効であったと言える。



(a)2017年(ダイヤ改正前)



(b)2018年(ダイヤ改正後)

図 4.14 新百合ヶ丘発遅延と向ヶ丘遊園着・通過遅延の分布

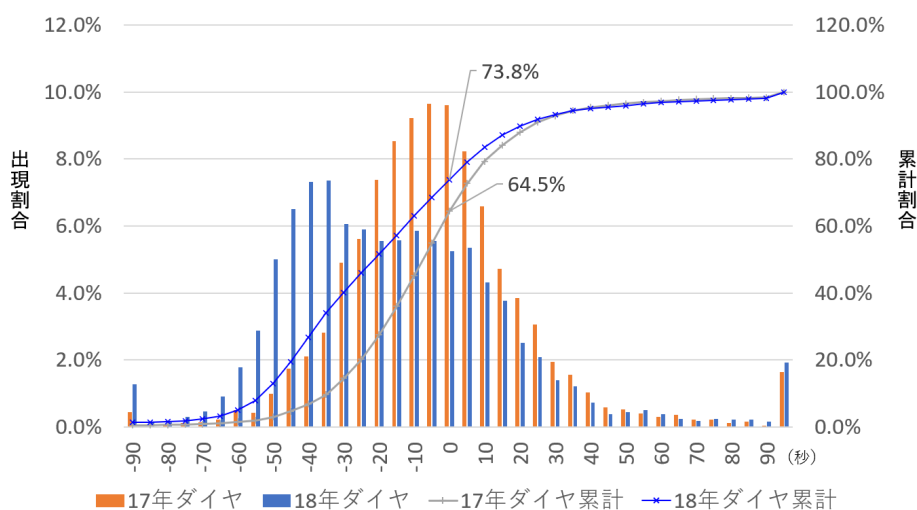


図 4.15 遅延回復状況の分布

#### 4.4 本章のまとめ

本章では、稠密に列車を運行する路線を対象とした、駅間走行速度を考慮した列車ダイヤ作成手法を提案した。

本手法は、ラッシュ時間帯において、各駅停車と優等列車が同一線路上で運行されており、かつ、優等列車が日中時間帯より所要時間がかかるような、稠密に運行がなされている路線において、特定の設備や線路条件にかかわらず、“分割すべき場所”と“分割した区間ごとの適切な速度”をシミュレーションにより評価し、適切に設定することで、一般的に適用が可能である。

提案手法の特徴として、これまでのダイヤ作成手法では十分に考慮出来ていなかった駅間での走行速度を提案手法により適切に設定することで、運転士の運転操作方法に個人差が生じにくく、優等列車が前後の列車と適切な距離で運転できるという特徴がある。

これにより、遅延の発生要因となる機外停止を最小限に抑え、各列車時刻とおりに運転が可能になるとともに、無駄な加速や減速をなくすことによるエネルギー消費量の削減や踏切の長時間遮断防止も可能になる。

適用例として、小田急電鉄複々線化完成に伴う全面的なダイヤ改正実施に際し、実際に適用した。シミュレーション分析結果によると、対象の区間を走行する列車本数が27本から30本に約11%増加したものの、同手法を用いることで、加速に必要な消費電力を14.7%の削減につなげることができた他、踏切を長時間遮断することにつながる生田2Tの軌道回路占有時間を36秒(+3.2%)の増加にとどめることができた。

また、ダイヤ改正後の実績から、73.8%の列車が当該区間での遅延回復に成功しており、提案手法が非常に有効であり、頑健性の向上につながったことを併せて示すことが出来た。

なお、列車に微小な遅延が発生した際、抑速制限区間と抑速制限速度を柔軟かつ動的に変更することにより、更なる定時性向上が図れることが期待される。これについては、将来の列車制御技術の発展を見込み、今後の研究課題として研究を継続していく所存である。



## 第5章 決定木を用いた運転士の遅延 回復運転の分析

### 5.1 はじめに

これまで述べたように、都市圏の鉄道においては、利用者の需要に応えるため、列車が稠密に運転されており、小規模の遅延が慢性的に発生することが問題となっている。そのため鉄道会社には、小規模のダイヤ乱れの発生を抑え、遅延の拡大・波及を防ぎたいという考えがあり、列車ダイヤの改善、設備（信号・軌道・車両等）の改善、駅ホームの要員配置の増強などを行ってきた<sup>[54]</sup>。

一方、列車の運行に直接関連する運転士の操縦方法と遅延との関連については、これまで、ほとんど分析がなされていない。第4章では、優等列車の運転士の個人差が出にくい列車ダイヤ作成手法を提案し、頑健性の向上に有用であることを示したが、実際の運転士の運転方法については、個人々人によって差異があること、及び、遅延の回復・増大と関係があるであろうことが経験的に知られている。特に、稠密に列車が運転されている路線では、1本でも列車の遅延が増大すれば、その影響は後続の多数の列車に及ぶため、すべての列車が遅延を増大させないような運転をすることは、遅延の増大を防ぐ上で極めて重要である。

本章では、遅延の回復につながる運転を「よい運転」、遅延を増大させる運転を「悪い運転」と呼ぶこととし、「よい運転」と「悪い運転」の相違を特定することを試みる。この相違が明らかになれば、運転士に対して、「悪い運転」をしないように指導する、あるいは、信号等の設備を改修することによって「悪い運転」をすることのないようにするなどの方策をとることができる。その結果、路線全体の遅延の増大を防止することが可能である。

本研究では、日々の列車の運行実績データから、各軌道回路に列車が進入した時刻と列車が完全に進出した時刻を取得し（このデータを、本章では、「軌道回路通過データ」と呼ぶ。詳細は、次章で解説する）、それらのデータを、「よい運転」、すなわち遅延を増大させないような運転が行なわれたケースと、「悪い運転」、すなわち遅延を増大させる運転が行なわれたケースをそれぞれ多数選定し、教師あり学習の手法の一つである決定木を

適用することによって、それぞれのケースの分類に寄与した因子の特定を行なう。これにより、「よい運転」「悪い運転」を決定づける運転方法の差異を見いだすことを試みる。

本章は以下のように構成されている。5.2節では、先行研究について触れる。5.3節では、列車の運転の規則について述べる。5.4節では、入力データである軌道回路通過データを解説する。5.5節では、決定木について述べ、5.6節では、提案手法とその実施例、ならびに、実施例の結果を受けて実施した対策の効果を説明する。

## 5.2 先行研究

列車ダイヤの頑健性は、近年、広く注目を集めている。Carey<sup>[36]</sup>やAndersson<sup>[37]</sup>は、列車ダイヤの性質から頑健性を推定する手法を提案している。Takeuchi<sup>[32]</sup>、Deville<sup>[33]</sup>は、頑健性の定義に関する議論を行なっている。また、Kroonは、頑健な列車ダイヤを作成するアルゴリズムを導入している<sup>[41]</sup>。さらに、Labermeierは、軌道回路の占有情報と信号の現示データを用いて、一次遅延(primary delay)と二次遅延(secondary delay)を識別するための手法を導入している<sup>[66]</sup>。しかし、これらの研究のいずれにおいても、運転士の運転方法については言及されていない。

Yabukiは、列車間の余裕時分を拡大するために、現行よりも低速で駅に進入することで先行列車との時隔を短縮できるような運転方法を見出だすアルゴリズムを提案している<sup>[16]</sup>。しかし、運転士による運転方法の差異や、それと遅延との関連については言及されていない。筆者らは、運転士の運転方法を加味した、より現実的な運転方法を再現するシミュレータを開発し、それを用いて列車ダイヤの頑健性の評価を行なった<sup>[67]</sup>。しかし、個々の運転士の運転方法の差異については、考慮されていない。

データマイニングの手法を列車ダイヤの頑健性に適用した研究としては、Borisの研究<sup>[10]</sup>がある。Borisは、データマイニング技術の一つである「エピソードマイニング」技術を適用して、列車ダイヤの頑健性に関する研究に取り組んでいる。しかし、Borisらの研究では、頻繁に発生する一連のイベントを見つけることに主眼が置かれており、個々の運転士の列車の運転方法は対象とされていない。

## 5.3 列車運転の現状と本研究の目的

### 5.3.1 列車運転の規則

列車ダイヤでは、列車の駅(および運転取扱い上の拠点となる場所)の到着時刻と出発時刻が指定されている。運転士は、後述する各種の規定速

度を守ることを前提条件としたなかで、到着時刻と出発時刻を守っている限り、駅間においては、自由に運転することが認められている。

列車の走行速度に関する各種の規定には、曲線、下り勾配、分岐器などによる速度制限や、第4章で導入した抑速制限速度などが挙げられる。加えて信号の現示（信号機に表示される色のことを「現示」と呼ぶ）によっても走行速度が制限される。表5.1に、信号の現示に対応する速度制限の例を示す。

なお、本章では、点制御型のATSが採用されている線区での分析を対象とした。点制御型のATSでは、列車（正確には、ATS車上装置）は、線路上に設置した地上子と呼ばれる装置から情報を受け取る。その際、列車の走行速度が制限速度を超えている場合には、自動的にブレーキがかかる仕組みになっている。また、信号機を、信号現示に従って、ある制限速度で通過した後は、次の信号機（より正確には、その信号機に対応する地上子）までは、その制限速度以下で走行しなければならない（速度を超過するとブレーキがかかる）。

表 5.1 信号現示による速度制限の例

現示	現示色	制限速度
停止	Red	0 km/h
警戒	Yellow + Yellow	25km/h
注意	Yellow	45km/h
減速	Yellow + Green	75km/h
進行	Green	制限なし

### 5.3.2 運転士の運転方法の差異

運転士は、それぞれが最良と考える運転方法に基づいて列車を運転する。ただし、運転士は、単独で列車を運転するため、他の運転士の運転方法を具体的に知る機会は多くない。また、自らの運転方法の良否を知る機会も多いとは言えない。そのため、運転士の運転方法には、一定程度の差異が存在していると考えられる。

予備的な分析として、運転士による駅間運転時分の差異の程度を調査した。ここで着目しているのは、図5.1の列車Yの運転方法である。赤点線のような運転であれば、駅A到着時には、駅B発車時よりも遅延が拡大していることになる。一方、列車Yが黒実線のように運転されていれば、遅延は拡大していない。

そこで、連続して運転される2本の列車XとYについて、駅Aに到着したときの列車Xと列車Yとの間隔と、その手前の駅である駅Bから出発したときの列車XとYの間隔の差異を分析した。その結果を図5.2に示す。なお、このデータは、5.4節で後述する手法によって取得したものである。

図5.2において、x軸は駅Bでの2列車の発車時の間隔、y軸は駅Aでの到着時の間隔である。図5.2から、後続列車(図5.1の列車Y)については、A駅到着時の先行列車との間隔がB駅発車時よりも拡大している運転、間隔の短縮に成功している運転など、その運転の結果には様々な差異が存在していることがわかる。特に、B駅発車時点での先行列車との間隔がおおむね120秒から150秒程度のケースにおいては、A駅到着時点での先行列車との間隔が最大で50秒程度異なっていることがある。このことは、同様の状況であっても、先行列車よりも遅延を増大させている運転とそうでない運転が存在している可能性があることを意味する。

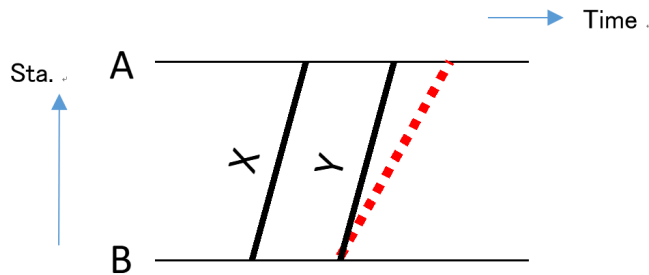


図 5.1 連続して運転する2列車の例

### 5.3.3 本研究の目的

前節での予備的な分析から、先行列車との間隔が拡大している場合とそうでない場合が存在していることがわかった。そこで、本研究では、先行列車との間隔を増大させないことによって遅延を増大させない運転を「よい運転」、先行列車との間隔が開くことによって遅延を増大させる運転を「悪い運転」と呼ぶこととし、「よい運転」と「悪い運転」の差異を見出す手法を確立することを目的とする。

## 5.4 軌道回路通過データ

本研究では、入力データとして、軌道回路通過データを使用する。ここで、軌道回路通過データとは、軌道回路に列車が進入した時刻(落下時刻)

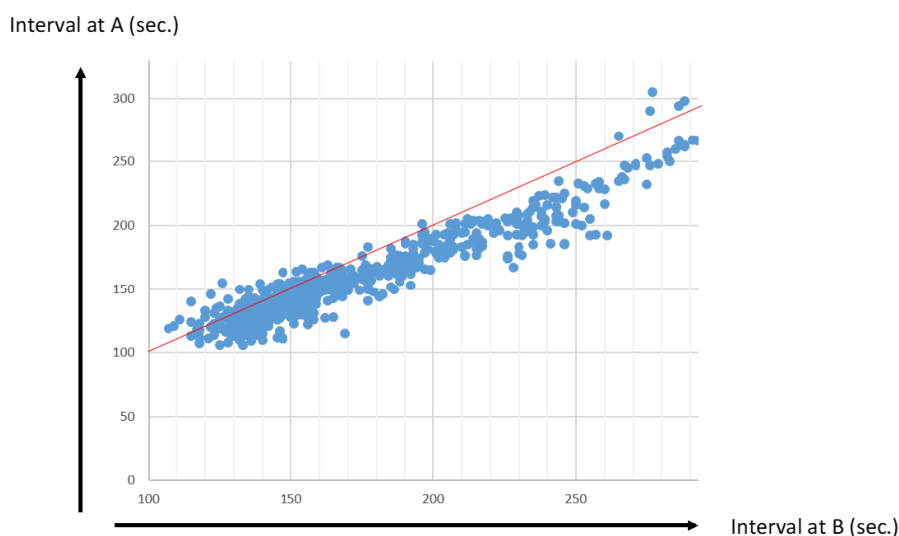


図 5.2 出発駅における時隔と到着駅における時隔の分布

と列車が完全に進出した時刻（こう上時刻）を各軌道回路・各列車に対して収集したデータである。なお、軌道回路通過データは、リレーによって検知した軌道回路の落下・こう上から電氣的に取得されるものであるため、特にばらつきはなく、本章での分析に用いるための十分な精度を有している。

軌道回路通過データは、具体的には、次のデータを含んでいる。

- 列車番号
- 軌道回路名称
- 軌道回路の落下時刻
- 軌道回路のこう上時刻

軌道回路通過データを図示したものを図 5.3 に示す。図 5.3 においては、横軸が時間、縦軸が軌道回路の位置（キロ程）を表す。長方形の横幅が、その軌道回路内に列車が存在している時間に対応する（長方形に付された記号は、軌道回路の名称である）。軌道回路通過データから、列車の運転方法の概略を知ることができる。例えば、長方形の幅が大きければ、その軌道回路を通過するのに時間を要した、言い換えれば、平均走行速度が低かった、などを知ることができる。

軌道回路通過データは、信号システムから得られる軌道回路落下・こう上時刻のデータに列車番号を関連づける処理を行なうことによって得る [68]。

なお、列車の運行実績をより詳細に把握するためのデータとして、いくつかの候補がありうる。その一つは、GPS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[69]。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することが義務付けられることとなった装置である[58]。列車の位置や操縦記録などが時事刻々と記録され（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、本章では、比較的容易に取得可能である軌道回路通過データを使用することとした。

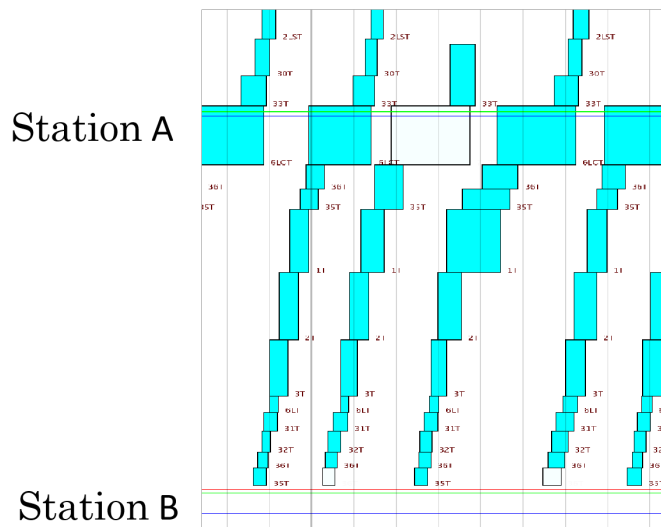


図 5.3 軌道回路占有図の例

## 5.5 決定木

決定木とは、教師あり学習の一つで、データマイニングにおいて広く使用されている手法である[70]。決定木では、与えられたデータをツリー構

造の形で表現する。ツリーの各ノードは、データの属性に対する条件である。決定木は、与えられたデータがどのグループに属するかを決定するために使用される。すなわち、与えられたデータの属性に対する条件に基づいてツリーをトレースすることによって、そのデータをどのグループに分類すべきかを知ることができる。さらに、ノードに付された条件から、グループの分類に寄与した条件を知ることができる。その際、ツリーのルートに近いノードの条件が、より影響力があると考えられる。

決定木の利点は次のとおりである [70]。

- 木構造で可視化されるので、理解・解釈するのが容易である。
- 多くのデータを準備する必要はない。
- 数値データとカテゴリデータの両方を扱うことが可能である。

図 5.4 に決定木の例を挙げる。合計 110 のデータがあるとする。また、各データには、 $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  という 3 つの属性があるとする。今、そのうち、50 のデータが「Good」であり、60 のデータが「Bad」であるとする。これらのデータから、決定木を構築した結果、図 5.4 に示す決定木が得られたとする。

この決定木は、次のことを意味している。

- 50 個の Good のデータのうち、45 個のデータが  $X_1 \leq 45$  を満たし、5 個のデータが  $X_1 \leq 45$  を満たさない。
- 60 個の Bad のデータのうち、5 個のデータが  $X_1 \leq 45$  を満たし、55 個のデータが  $X_1 \leq 45$  を満たさない。
- $X_1 \leq 45$  を満たす 45 個の Good のデータのうち、45 個のデータが  $X_3 \leq 30$  を満たす。
- $X_1 \leq 45$  を満たす 45 個の Good のデータのうち、0 個のデータが  $X_3 \leq 30$  を満たさない。
- $X_1 \leq 45$  を満たす 5 個の Bad のデータのうち、0 個のデータが  $X_3 \leq 30$  を満たす。
- $X_1 \leq 45$  を満たす 5 個の Bad のデータのうち、5 個のデータが  $X_3 \leq 30$  を満たさない。
- $X_1 \leq 45$  を満たさない 5 個の Good のデータのうち、5 個のデータが  $X_2 < 25$  を満たす。
- $X_1 \leq 45$  を満たさない 5 個の Good のデータのうち、0 個のデータが  $X_2 < 25$  を満たさない。
- $X_1 \leq 45$  を満たさない 55 個の Bad のデータのうち、0 個のデータが  $X_2 < 25$  を満たす。

- $X1 \leq 45$  を満たさない 55 個の Bad のデータのうち、55 個のデータが  $X2 < 25$  を満たさない。

例えば、 $(X1, X2, X3) = (40, 30, 20)$  という値を持つデータが与えられた時、この決定木を用いて、このデータは、Good に属すべきデータであると判定できる。また、Good と Bad の分類には、 $X1 \leq 45$ ,  $X3 \leq 30$ ,  $X2 < 25$  などの条件が寄与していることを知ることもできる。

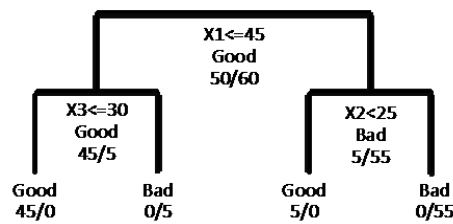


図 5.4 決定木の例

## 5.6 決定木による「よい運転」と「悪い運転」の差異の分析 - 実施例

### 5.6.1 入力データ

本節では、決定木分析を実データに適用した結果を示す。首都圏近郊のある路線において、列車到着時の遅延の回復状況に相違があることが経験的に知られているある駅（以下、A 駅）を対象とした。手前の駅（B 駅とする）から A 駅までの距離は、約 1.5km で、両駅の間には 10 個の軌道回路が存在する。入力としては、図 5.2 に示すデータのうち、B 駅での発車時点での先行列車との間隔が 120 秒から 150 秒のケースを対象とした。その理由は、これらのケースにおいては、B 駅での先行列車との間隔が同様であっても、A 駅到着時点での先行列車との間隔に大きな差異があるためである。対象としたケースの数は、272 個で、そのうち、126 個が「よい運転」、146 個が「悪い運転」であった。各ケースに対応する入力データは、続行する 2 本の列車に対する各軌道回路の落下時刻と、こう上時刻である。

### 5.6.2 決定木の生成

入力データから決定木を生成した。その結果を図 5.5 に示す。なお、決定木は、R<sup>[71]</sup> を用いて CART アルゴリズムにより作成した。



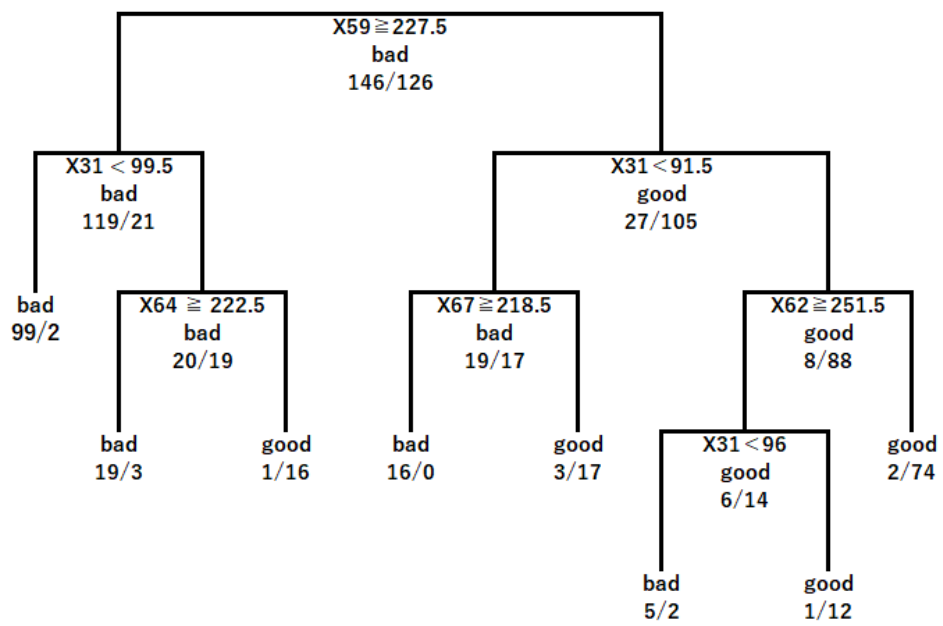


図 5.5 生成された決定木

### 5.6.3 結果の分析

得られた図 5.5 の決定木から、「よい運転」と「悪い運転」を識別する最も支配的な条件は、 $X59 \geq 227.5$  であることが判明した（実際、この条件は 146 例の「悪い運転」のうち、119 例のケースで成立している一方で、126 例の「よい運転」のケースのうちでは、21 例のケースでしか成立していない）。

さらに、この条件の意味するところを分析した。変数 X59 は、図 5.6 に示す配線略図のうち、軌道回路 8T のこう上時刻（より正確には、先行列車が B 駅発車後の経過時間）を示す変数である。 $X59 \geq 227.5$  は、先行列車が B 駅を発車後、227.5 秒以上経過した時刻に後続の列車が A 駅の手前の軌道回路 8T を進出完了していることを示している。すなわち、後続列車は軌道回路 8T 付近から先の区間を通常よりも低速で走行していることを意味する。

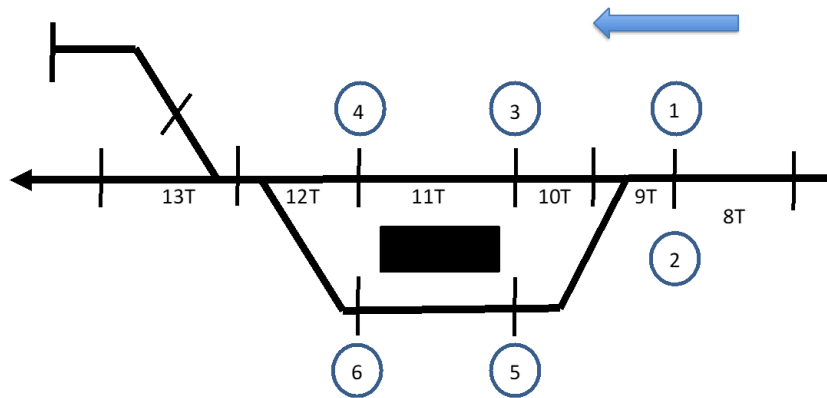
図 5.7 に、「よい運転」のケース、「悪い運転」のケースをそれぞれ一つずつ示す。赤い丸で囲んだ部分が軌道回路 8T の占有状況である。「悪い運転」の方がこの軌道回路の占有時間が長いこと、すなわち、列車は、この軌道回路をより低速で走行していることがわかる。

ここで、「悪い運転」で軌道回路 8T の占有時間が長くなっていることについて、関連する信号現示と合わせて考察する。図 5.8 は軌道回路 8T から駅 B に向かった運転士の視線からの写真である。図 5.6 に示す信号機③（または信号機⑤）は先行列車が駅 A を発車し、軌道回路 13T を進出し切るまで警戒信号を現示しており、先行列車が駅 A を発車し軌道回路 13T を抜けきったあとは注意信号が現示される。表 5.1 で示したとおり、警戒信号の 25km/h 制限と注意信号の 45km/h 制限では制限速度が 2 倍近く異なるため、運転時分も大きく異なる。そこで、運転士は、より高速進入が出来る注意現示で信号機③（または⑤）の内方に進入するべく、駅 A の手前の区間で速度調整を行っていると推察される。しかしながら、手前の区間で低速で運転することによる時間ロスの方が大きいため、結果として駅 A での列車間隔は縮めることが出来なかったケースであると推定される。

### 5.6.4 提案手法の結果を受けて実施した対策とその効果

#### (1) 実施した対策

前節の分析結果から、B 駅～A 駅間において、「良い運転」と「悪い運転」の差異を決定づける要素として、図 5.6 に示す軌道回路 8T の占有時間が抽出された。このため、定時性を向上させるためには、軌道回路 8T



図中の①～⑥は信号機設置個所における信号機の番号を、  
区間ごとの○Tは軌道回路名称を、青矢印は列車の進行方向を示す。

図 5.6 A 駅付近の配線略図

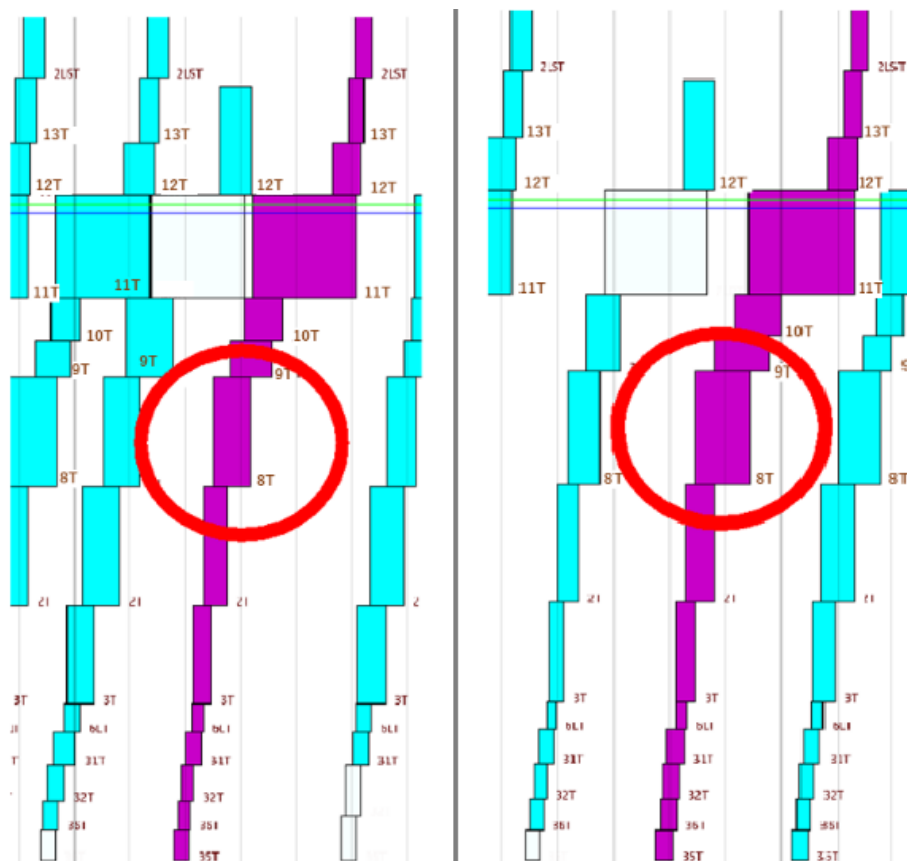


図 5.7 「よい運転(左)」と「悪い運転(右)」の例

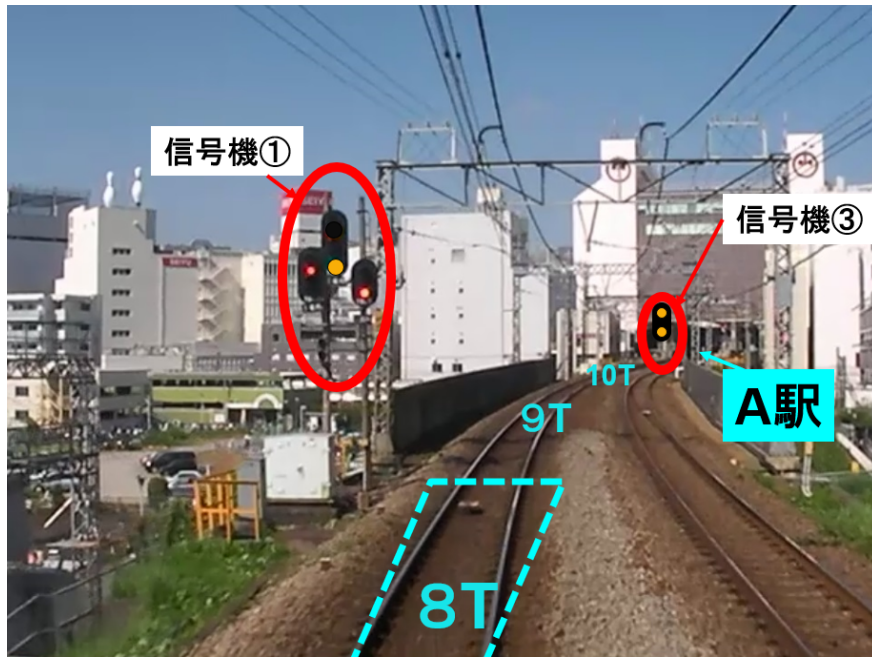


図 5.8 軌道回路 8T 走行中の運転士から A 駅への視点

の占有時間に差異が生じないように、何らかの対策を実施することが望ましい。

これまでの分析から軌道回路 8T の占有時間が長くなる要因として、信号機③、⑤の警戒信号現示による影響が挙げられていたが、保安装置の機能向上により、これまで警戒信号現示をせざるを得ない条件の場合でも、安全性を担保し注意信号現示に変更することが出来るようになった。そこで、信号機③、⑤について、これまで警戒信号が現示されていた条件の場合でも、注意信号現示がされるよう改良し、軌道回路 8T の占有時間に差異が生じないようにすることで、定時性向上を図ることとした。

## (2) 対策の効果

- B 駅～A 駅間運転時分の変化

対策実施前後での B～A 駅間運転時分の分布を図 5.9 に示す。なお、データとしては、対策実施前は、2015 年 4 月～16 年 2 月の延べ 1297 列車、対策実施後は、2016 年 4 月～17 年 2 月の延べ 1287 列車の運転時分を用いた。対策実施前は、2 分 00 秒をピークに、運転時分のバラツキが大きい（平均 1 分 55 秒、標準偏差 13 秒）。一方、対策実施後は、全体の 40% 程度の列車が 1 分 30 秒で到着ができていいるほか、バラツキが少なくなっている（平均 1 分 33 秒、標準偏差 8 秒）ことが確認できる。

- B 駅発時隔と A 駅着時隔の変化

対策実施前後での B 駅での発時隔と A 駅での着時隔の分布を図 5.10 に示す。B 駅での発時隔が 100 秒～150 秒程度するとき、対策実施前は A 駅の到着時隔が 70 秒程度から 250 秒前後と大きくばらついていたものが、対策実施後は、多くの列車について、70 秒程度から 150 秒程度に収まるようになっていたことが確認できる。この結果から、対策実施後は、多くの列車が遅延回復に成功していると判断できる。

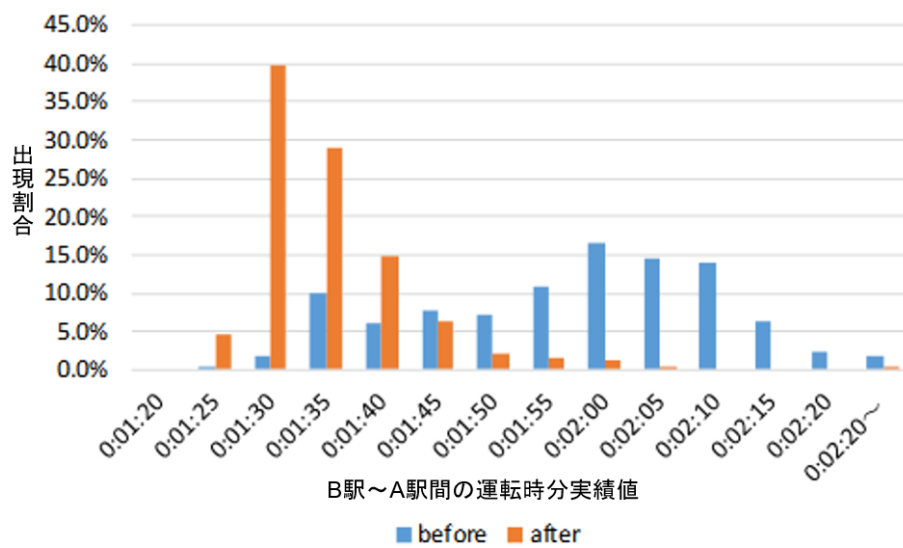
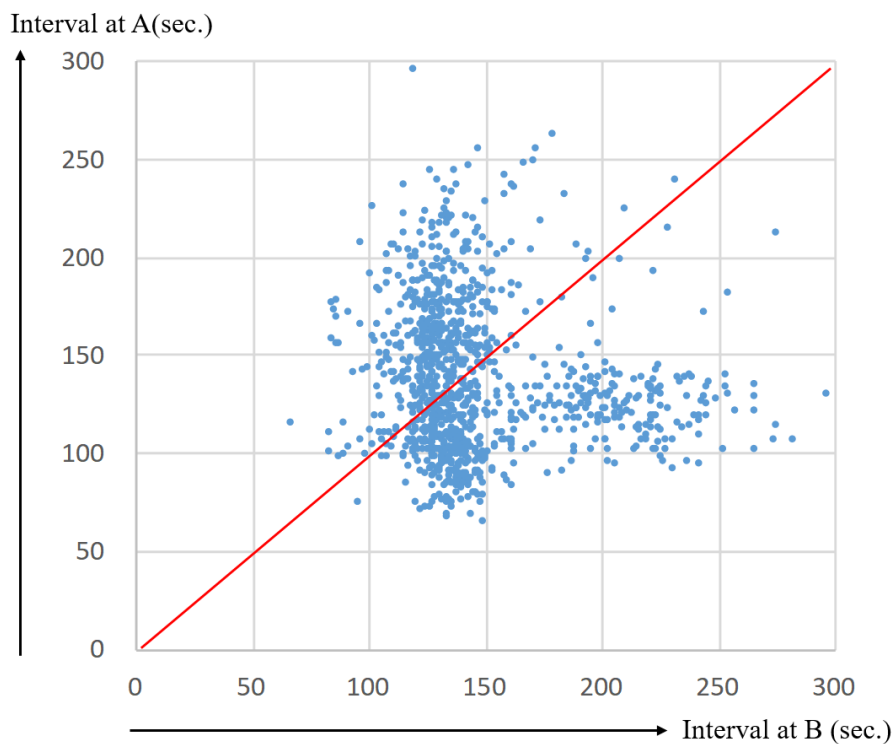


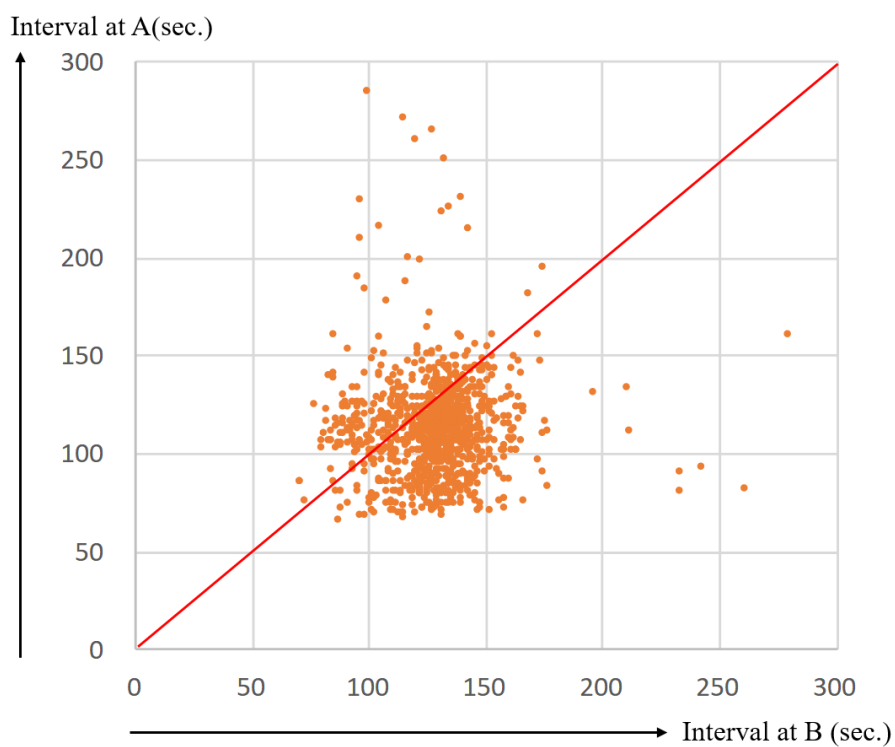
図 5.9 B 駅から A 駅までの運転運転時分実績の分布

### (3) 考察

対策実施後は、運転時分のバラツキが少なくなり、また、A 駅到着時に列車間隔が拡大する（すなわち、遅延が増大する）現象の発生も少なくなった。これは、本研究の成果に基づいて A 駅の信号設備の改良を行なった結果、運転士は、（同区間では結果的に外れてしまうことの多かった）先読みによる運転をする必要がなくなり、皆が同様の運転を行なえるようにした効果であると考えられる。



(a) 対策実施前



(b) 対策実施後

図 5.10 出発駅における時隔と到着駅における時隔の分布の違い

### 5.6.5 ディスカッション

前節の分析結果から、提案手法は、軌道回路通過データから、「悪い運転」と「よい運転」を識別する支配的要因となる運転士の運転方法の差異を見つけることができたと言える。

従来は、遅れを回復するためには、先行列車との時隔を最小化するため、信号機の現示の変化を予測した運転を行なうなど、「凝った」運転をすることが必要であると考えられていた。しかし、軌道回路通過データを用いて提案手法を適用した結果、A 駅進入時については、「凝った」運転ではなく、信号の現示に従って、その時点で最も速く運転できる方法で運転することが、結果的に遅延の回復に効果的であることが判明した。

今回の結果は、あくまでも、(この当時の信号設備等の状況における) A 駅に対するものであり、他の駅についても同じ結果になるとは限らない。すなわち、それぞれのケースに対する実態の分析が必要であり、このような分析が容易に行なえる提案手法が有用であると考えられる。なお、提案手法は、軌道回路通過データに基づくものであるため、先行列車と後続列車の番線が同じである場合であっても手順に変わりはなく、同様に適用可能である。

## 5.7 本章のまとめ

本章では、遅延回復と運転士の運転方法との関連に着目し、先行列車との間隔を増大させないことによって遅延を増大させない「よい運転」と、先行列車との間隔が開くことによって遅延を増大させる「悪い運転」の違いを特徴付ける要因を特定する手法を提案した。この手法は、「よい運転」「悪い運転」の事例がそれぞれ相当数存在する場合、軌道回路通過データから、データマイニングで用いられる手法である決定木を構成することによって運転方法の差異を見出す。

提案手法は、列車の在線を検知するのに一般的である軌道回路の通過データを用いており、軌道回路通過記録データと、各記録に対し、「よい運転」と「悪い運転」をあらかじめ定義さえすれば、先行列車と後続列車の番線が同じである場合でも、異なる場合であっても、両者を特徴づける運転方法の差が発生している軌道回路を特定することが可能である。

同手法を、272 件の実績データに対し、126 件の「よい運転」と、146 件の「悪い運転」とに定義し、適用した結果、両者を特徴づける運転方法の差異の検出に成功したことを示した。

## 第6章 結論

### 6.1 研究成果の要約

本論文では、運転士の運転操作方法について着目し、稠密に列車を運行する路線における駅間での列車の操縦方法を十分に踏まえた、列車ダイヤの頑健性向上手法の構築を目的に、運転士の思考を陽に考慮したマイクロシミュレーション手法を構築し、ラッシュ時間帯の列車運行について分析するとともに、稠密に列車を運行する路線における新しい列車ダイヤ作成手法について提案した。また、軌道回路毎の運行実績データを活用することで運転士の取扱の違いや頑健性に与える影響について分析し、対策を打つべき箇所を把握する手法について提案した。

これら研究成果について、小田急電鉄のダイヤ改正施策や設備改良の際に実際に適用することで、効果の確認を行い、運転士の運転操作方法について着目した手法の有用性について明らかにすることが出来た。

第3章では、運転士の取扱を十分に考慮したシミュレーション手法について、考慮しない場合のシミュレーション結果との違いを明確にし、運転士の取扱を十分に考慮する必要性について述べたほか、小田急電鉄地下化の際の設備変更に伴う、運転操作の違いが頑健性に与える影響について分析を行い、分析結果に基づく取扱いを実施することで、頑健性の向上につながることを明らかにした。

第4章では、第3章で作成したマイクロシミュレーション手法を用い、稠密に列車を運行する路線における駅間での複数列車の走行について、運転士の取扱による前後列車との位置関係を十分に考慮することによる、新しい列車ダイヤの作成手法について提案を行った。同手法について、小田急電鉄の複々線化完成に伴うダイヤ改正実施の際、複線区間で30本の列車を運転する区間に適用し、実際に極めて効果的に作用することを明らかにした。

第5章では機械学習で用いられる手法の一つである決定木を用いて、軌道回路毎に通過時刻が記録された実際の運行実績データから、遅延が拡大している運転と、遅延を回復できている運転について、違いを検出することが出来ることを明らかにするとともに、頑健性に影響がある箇所について抽出し改良を行うべき箇所を検討することに有用であることを明らかにした。



以上を踏まえ、列車ダイヤの頑健性を高めるための様々な手法が提案されているが、設備、ダイヤ、オペレーションの3つの要素のうち、運転士の運転操作方法について着目し、運行全般に関して定性的な分析を行うことの重要性を明らかにした。加えて、これまで、複数の種別により構成され、稠密に運行されるがゆえ、正確で詳細な計画が難しかったラッシュ時間帯の列車ダイヤについて、本論文で提案した手法を用いることで、頑健性の高い列車ダイヤを作成できることを明らかにした。

本研究による成果は、特に優等列車が各駅停車の合間を縫うように走行している路線のいずれにおいても適用が可能であり、対象となる路線の線路条件や車両条件、信号現示条件等を入力し、シミュレーションによる分析を行うことで一般的に適用することが可能である。

## 6.2 今後の課題

本研究では、計画ダイヤについて、運転士の運転操作方法に注目し、稠密に列車を運行する線区において頑健性を高める手法について議論した。一方、日々の運行では、各列車に運転士が乗務し、列車毎の混雑度合や遅れの状況が刻々と変化するなか、運転士をはじめとする現業の係員の技術と勘、ならびに旅客の協力により定時性を保っているのが現状である。このように時々刻々と前後の列車の運転状況が変化の中で、駅での着発時刻に注目するだけでなく、駅間において各列車がどのような運転操作を行うことが適切であるかに注目し、運行している全ての列車が協調して頑健性向上を図ることができるようになることが課題である。

また、少子、高齢化が叫ばれる中、これまでのような有能な運転士を養成し、技術を伝承し続けることが難しくなっているという現状がある。このため、現在実用化されている地下鉄のような均一に運転がなされる線区でのATOだけでなく、複雑なダイヤで運行されている東京圏の通勤路線にも導入すべき時期が迫っている。近年ではJR九州が踏切のあるATS路線においてATOの導入試験が行われたり、海外では、長距離を走行する高速列車への導入が検討されているが、今後、複雑なダイヤで稠密に列車を運行する路線に導入するにあたっては、自列車のみならず、前後の列車を考慮した運転をする必要があることは自明である。本論文で示したとおり、これまで運転士が行ってきた業務を仔細に分析するとともに、IoTを活用し、前後の列車の運転状況に応じて、動的に運転曲線を作成し、よりよい運転を自動で行えるようにすることが今後の課題となると考えられる。

2020年に発生した新型コロナウイルス感染症の流行に伴い、鉄道の通勤時間帯における混雑の緩和はますます求められることから、鉄道会社はこれまで

以上に稠密な運行による混雑の緩和と定時性の確保の両立が求められる。

鉄道にとって困難ともいえる状況ではあるが、列車ダイヤの策定から、日々の各列車単位での最適な運転方法の追求に加え、全ての列車に対する運行管理に応用し、遅延に強く安定的に稼働する、よりよい輸送サービスの構築に貢献することで、社会の重要なインフラを担えるよう、研究を続けていく所存である。

# 付録A 本研究の適用例として用いた路線の特徴とこれまでの取り組み

## A.1 本研究の適用例として用いた路線の特徴

本研究において、適用例として用いたのは筆者の所属する小田急電鉄のダイヤである。小田急電鉄は、図 A.1 に示すとおり、副都心である新宿駅を起点に、箱根の玄関口である小田原駅までを結ぶ「小田原線」、湘南エリアに至る「江ノ島線」、多摩ニュータウンに至る「多摩線」の3路線、計120.5km（全70駅）からなり、通勤、通学や観光路線として、1日約210万人に利用されている。また利便性向上を図るため、東京メトロ千代田線、箱根登山鉄道やJR 東海御殿場線の3路線への乗り入れを行っている。



図 A.1 小田急電鉄の路線略図

小田急電鉄では、抜本的な輸送改善を図るため、2018年3月、登戸駅～代々木上原駅間（上り線は向ヶ丘遊園駅～代々木上原駅間）の複々線化工事が完成し、2020年3月現在、朝方ラッシュピーク時間帯、1時間に36本の列車ダイヤにより運行している。

複々線の完成により列車増発が実現するまで、朝方ラッシュピーク時間帯、最も混雑する世田谷代田駅～下北沢駅間については複線であったため、長年にわたりピーク時間帯、1時間あたり27本の列車により運行がなされていた。同時帯に同区間を約71,000人～75,000人の旅客の利用があったことから、平均混雑率は186%～194%と非常に高く、優等列車（急行・準急）だけでなく、各駅停車も含め全列車非常に混雑していた。このため、小田急電鉄についても例外ではなく、他の鉄道会社と同様に慢性的な遅延の発生と、列車毎の僅かな混雑の違いや、オペレーションの違いにより遅延が大きく拡大する日がしばしば発生し、定時性の向上が大きな課題であった。

## A.2 クロマティックダイヤ図描画関連システムの導入

混雑と遅延対策を打つためには、列車運行実績データの可視化による分析が必要である。しかし、クロマティックダイヤ図描画関連システム導入前、運行管理装置は転てつ機設備のある駐車場の10秒単位での記録を紙ベースで出力する機能しか備わっていなかったことから、注目する駅の各列車の着発時刻について、係員の目視による調査を行う以外に手法はなく、複数日を全駅、全時間帯に渡る運転状況を仔細に分析することは難しいのが現状であった。

そこで注目したのが、WebTID再現情報データ（以下WebTIDデータと呼ぶ）である。WebTID装置とは、運輸指令所にある運行表示盤をネットワーク越しにPC上でブラウザできる装置であり、各軌道回路の短絡状況の他、各停車場構内、停車場間に存在している列車の列車番号等の情報が表示される（図A.2）。WebTIDデータには、これら運行表示盤の表示内容が変化した時刻、すなわち各軌道回路の落下、扛上時刻（Table A.1(a)）、および列車番号の遷移時刻（Table A.1(b)）が記録されている。一方でこの2種類のデータはそれぞれの時刻を記録しているものの、相互に関連性はなく、軌道回路の落下、扛上時刻がどの列車によるものかまでは記録されていない。そこで、これらに関連付ける手法を別途考案するとともに、駅付近の特定の軌道回路の情報を取り出し、クロマティックダイヤ図として可視化する方法を考案し、導入に至った。

クロマティックダイヤ図描画関連システム導入以降は、現地での目視調査に加え、全列車、各駅、毎日の実績データを分析することが出来るよう

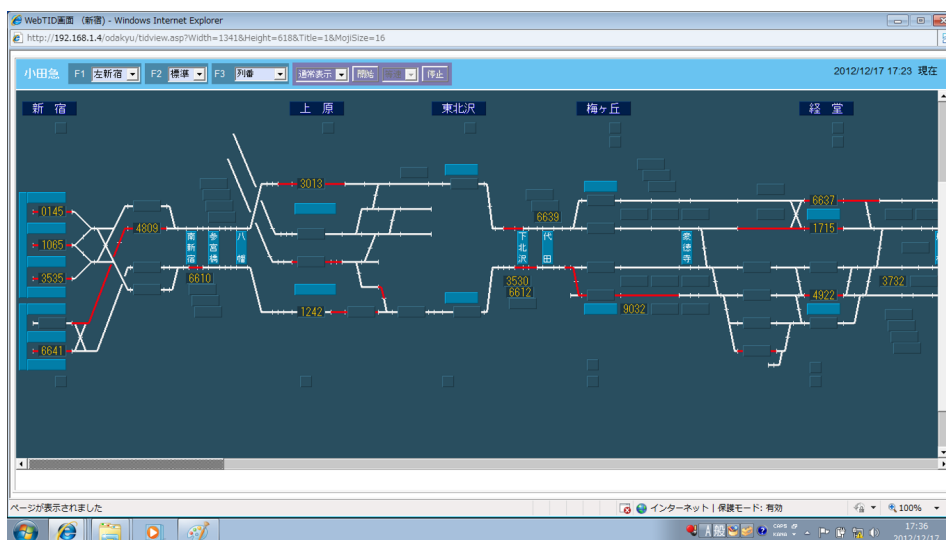


図 A.2 WebTID 装置画面

表 A.1 WebTID データ

(a) 軌道情報

フォーマット	hh:mm:ss,n,BBB,bb,####,aaaa,t
	hh:mm:ss : 時刻, n : 連動情報番号 BBB : byte, bb : bit, #### : 修飾文字 aaaa : 軌道名称, t : 点灯 (1:点灯, 0:消灯)

(b) 窓情報

フォーマット	hh:mm:ss,wwww,aaa,rrrr,sss,ooo,t
	hh:mm:ss : 時刻, wwwww : 窓番号 aaa : 窓名称, rrrr : 列番, sss : 運用記号, ooo : 運用記号, t : 点灯 (1:点灯, 0:消灯)

になったことに加え、5章において、この駅間すべての軌道回路記録データを用いた、運転士の操縦方法の違いの検出にも活用するに至っている。

### A.3 下北沢駅周辺区間の地下化と定時性向上を主眼としたダイヤ改正

3章述べた通り、複々線化工事の進捗に伴い、2013年3月に下北沢駅前（梅ヶ丘駅～東北沢駅間）が地下化された。この際、勾配や曲線といった線路条件の大幅な変更、ならびに駅ホームの移設が行われるなど、大きな変更が発生した。それまで約3kmにわたり、工事に伴う仮設線路を走行するため、速度制限（徐行）が実施されていたが、地下化による線路（複々線完成時の急行線）の本使用開始により徐行が解除されることとなった。

翌2014年のダイヤ改正では、工事に伴う徐行の全面解除により生じた余裕時分の付与の仕方を全線で見直しを図ることで、定時性の向上を図ることとした。

クロマティックダイヤ図導入による分析により、上り（新宿方面）方向の遅延伝播の代表的なパターンとして、

- ・優等列車の小田原駅～本厚木駅までの僅かな遅れ
- ・本厚木駅始発の各駅停車が相模大野駅・町田駅付近で増延し、新百合ヶ丘駅到着時点での遅れ
- ・新百合ヶ丘駅待避の各駅停車の遅れによる優等列車への遅延の伝播の3点が浮かび上がった。図A.3に遅延伝播の様子を示す。

そこで、優等列車の余裕時分を見直すとともに、図A.4に示すとおり、遅れが発生しやすい本厚木始発の各駅停車の待避駅を変更、新百合ヶ丘での待避では、後続の急行列車との時隔を十分に確保することで改善を図った。

以上の対策を施したことによるダイヤ改正前後の結果の違いを図A.5に示す。図中の色は、各列車、各駅毎の到着遅延が60秒未満であった確率により着色した。2014年ダイヤでは、各列車、各駅の到着遅延が60秒未満である確率が増え、定時性が大幅に向上していることがわかる。

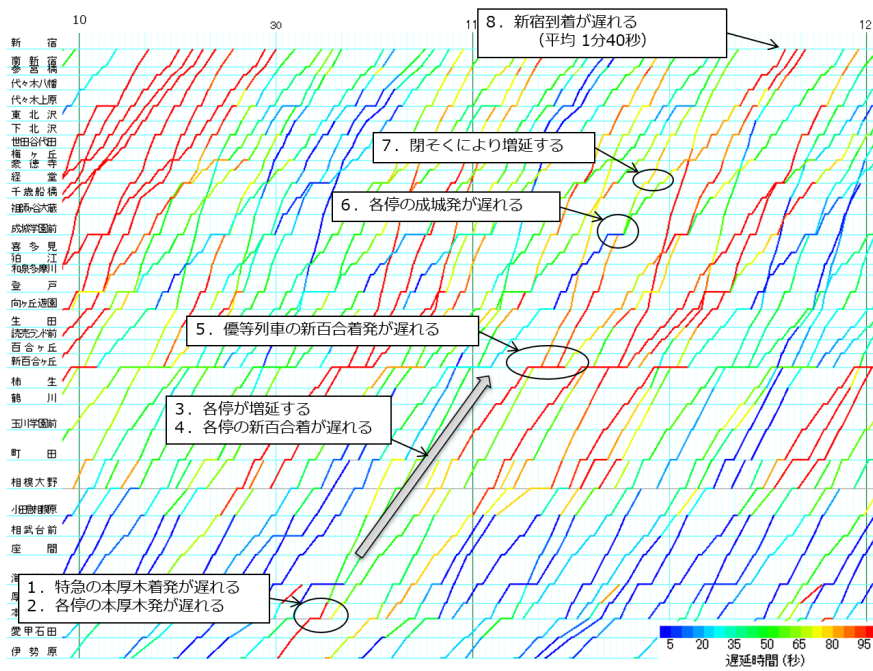


図 A.3 遅延伝播の様子 (2013年ダイヤ)

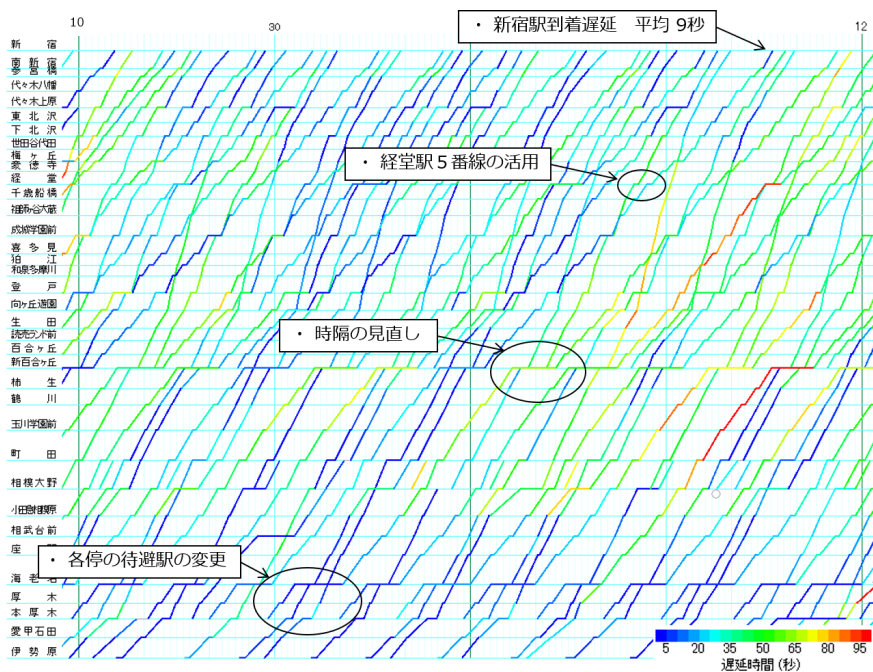
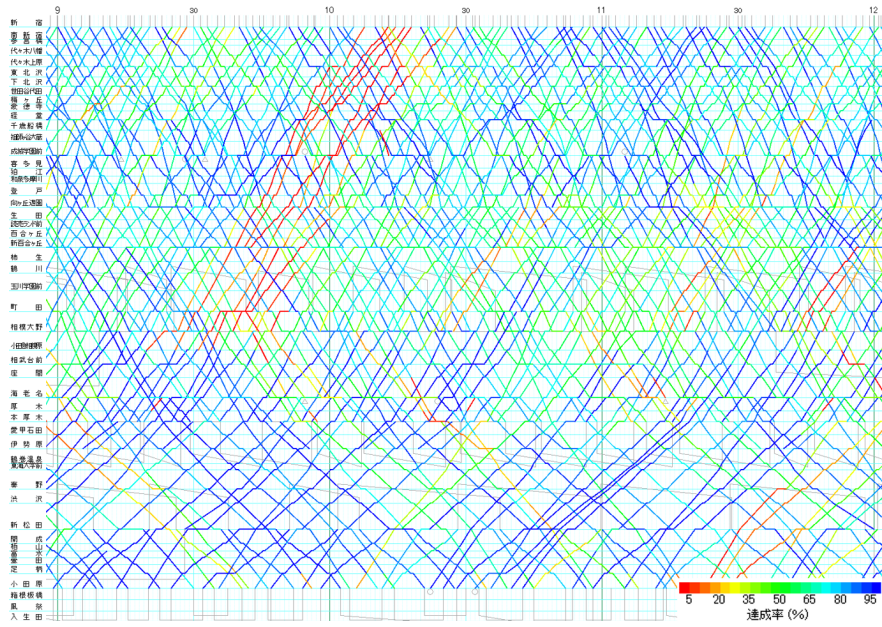
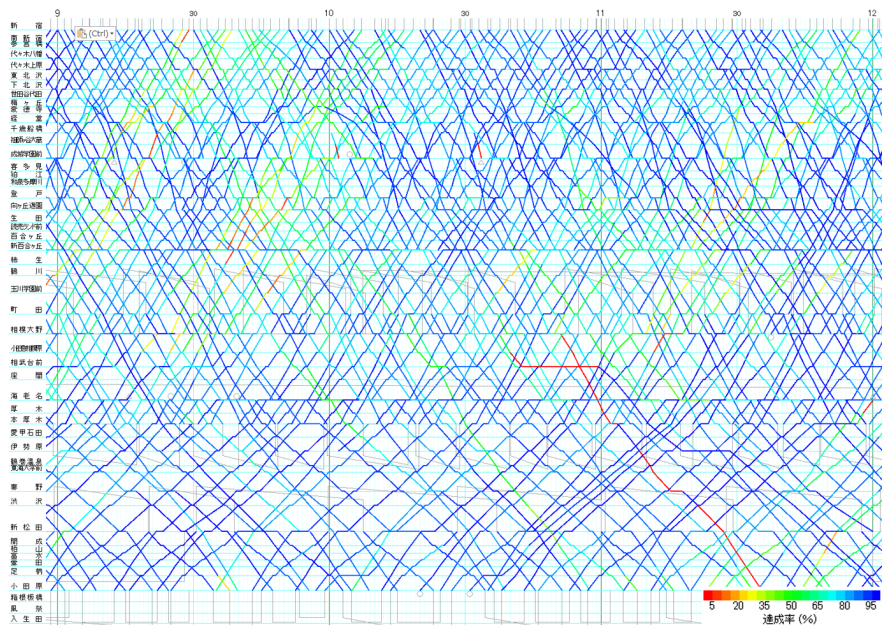


図 A.4 遅延対策の実施 (2014年ダイヤ)



(a)2013年4月～10月（全土休日）の到着遅延60秒未満で到着した確率



(b)2014年4月～10月（全土休日）の到着遅延60秒未満で到着した確率

図 A.5 ダイヤ改正前後の遅延発生状況



## A.4 複線化工事完成に伴う白紙ダイヤ改正

A.1節で述べた通り、混雑が激しく輸送需要の非常に大きい登戸駅（上り線は向ヶ丘遊園駅）～代々木上原駅間 11.7km（上り線は 12.3km）で複々線化工事を段階的に行なってきた。それまで、工事中の一部に複線区間が存在したため、列車増発を行うことが困難であったが、2018年3月に上記全区間で工事が完了し、列車の増発を図ることが出来ることとなった。

### A.4.1 複々線区間の概要

図 A.6 に、2018年3月の複々線化工事完成時に実施した切替工事前後の配線略図を示す。図 A.6 の上段の図は、切替工事前の配線である。内側の線路が、原則として優等列車が走行する急行線、外側の線路が、原則として各駅停車が走行する緩行線となっている。切替後は、下北沢駅付近では、急行線と緩行線が2層構造となり、地下1階が緩行線、地下2階が急行線となる（図 A.6 下段）。その他の変更点として、登戸駅の1番線が使用開始となり、これまで下り線については登戸駅手前まで複々線だったものが、登戸駅構内まで複々線になった。新百合ヶ丘駅～千歳船橋駅間について、その他の変更はないため、図 A.6 上段への記載は省略する。

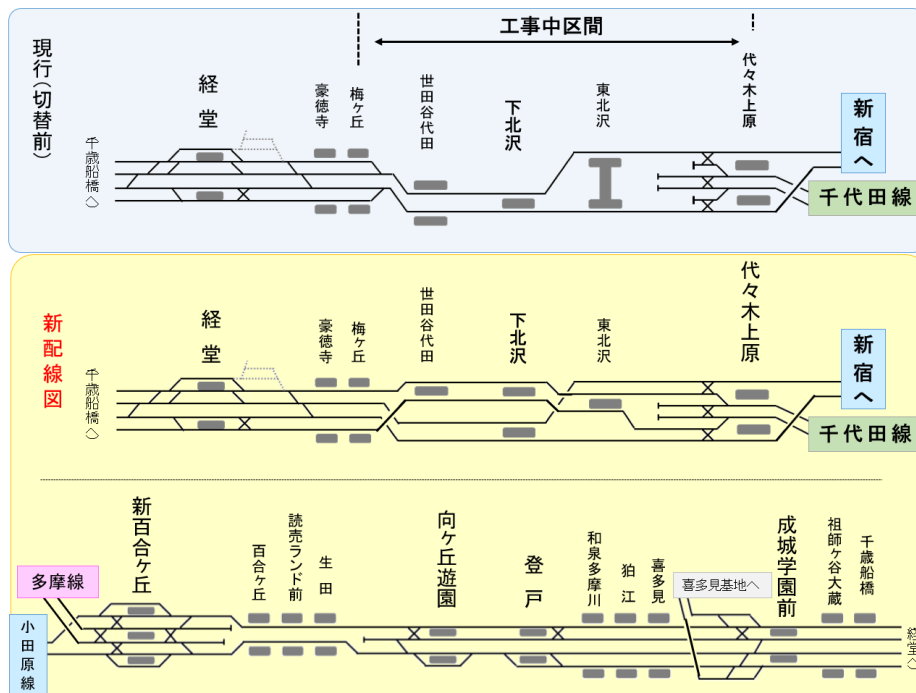


図 A.6 複々線完成前後の配線略図

#### A.4.2 新しい朝ラッシュ輸送の概要

複々線化工事が完成により、列車の増発を行なうことが可能になったことから、「混雑の緩和、速達性の向上、各方面から都心方面への直通列車の増加、ならびにダイヤの頑健性の向上」を図るべく、全時間帯にわたって運行計画を一から作り直す（いわゆる白紙ダイヤ改正）こととなった<sup>[72]</sup>。

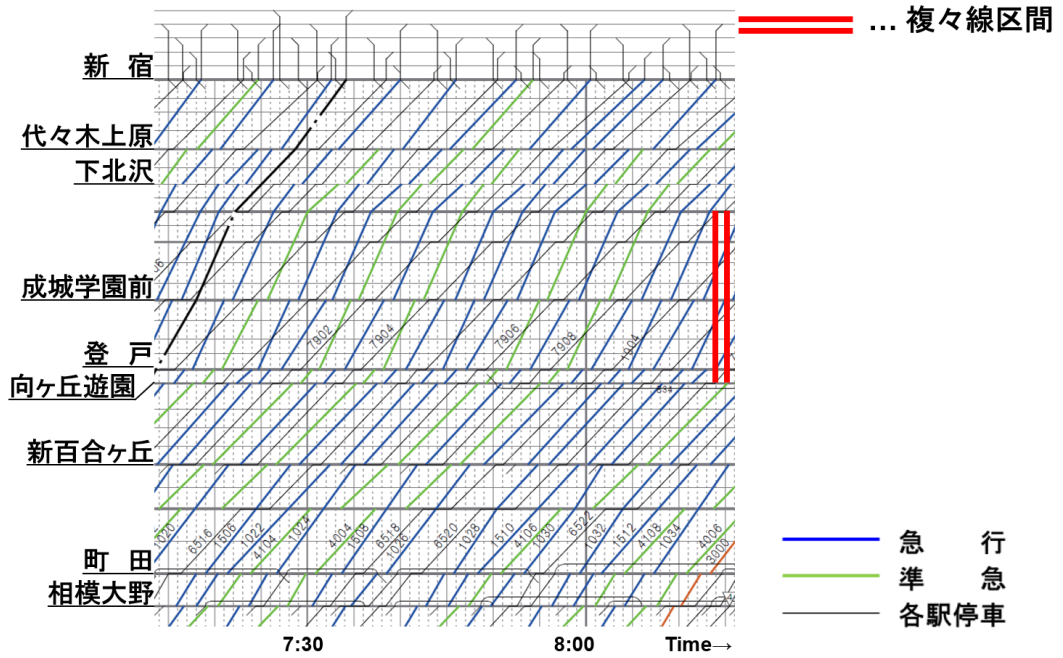
列車本数を見直すにあたり、乗車率、車両設備、乗務要員等を勘案し設定する必要がある。平成28年度の東京主要31区間における混雑率の平均値は160%であったことから、小田急電鉄でも同値以下とすることを念頭において、1時間当たりこれまでの27本から9本の列車を増発して、36本の列車を運行することとした。新旧のダイヤ図を図A.7に示す。

複々線完成前は、最混雑区間である下北沢駅到着時に、各列車の混雑率を平準化するため、各駅停車1本と、急行（または複々線内停車駅が同一の準急）2本の3本を1セットとし、これを約6分40秒間隔で繰り返すことによって、1時間あたり27本の列車を運行してきた。しかし、複線区間での優等列車は各駅停車の合間を走行することになるため、町田駅～新宿駅間（30.8km）の所要時間は45～49分程度を要するうえ、全列車が停車する下北沢駅では停車時分超過とそれに伴う列車の詰まりにより、しばしば遅延が拡大するという状況が発生していた。

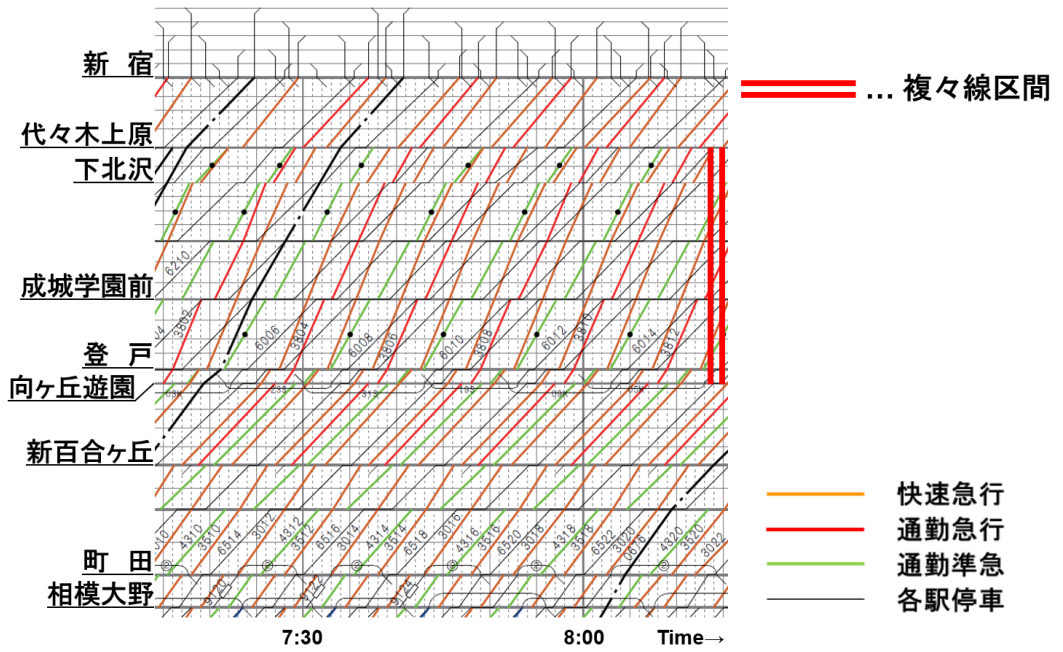
新しいダイヤでは、複々線完成による速達性効果をより高めるため、1時間あたり36本の列車の列車種別と停車駅を一新し、これまでの急行中心のダイヤから、快速急行2本、通勤急行・通勤準急各1本、各駅停車2本の6本を1セットとし、これを10分間隔で繰り返す快速急行中心のダイヤへと変更した。図A.8に示すとおり、新設した多摩線から新宿駅に直通する通勤急行は、向ヶ丘遊園駅に停車したあと、登戸駅は通過する。快速急行の停車駅を敢えて通過することで、通勤急行自体の速達性向上だけでなく、混雑の分散化、ならびに後続を走行する快速急行の速達性に影響することなく、列車増発を可能にしている。

千代田線直通列車については、1時間あたり通勤準急6本と各駅停車6本の計12本に増発することとして（改正前は5本）、直通利便向上を図った。

ラッシュピーク時間帯の町田駅～新宿駅間の所要時間は、ダイヤ改正後は37～38分となり、改正前と比較すると8～12分の短縮となった（図A.9）。

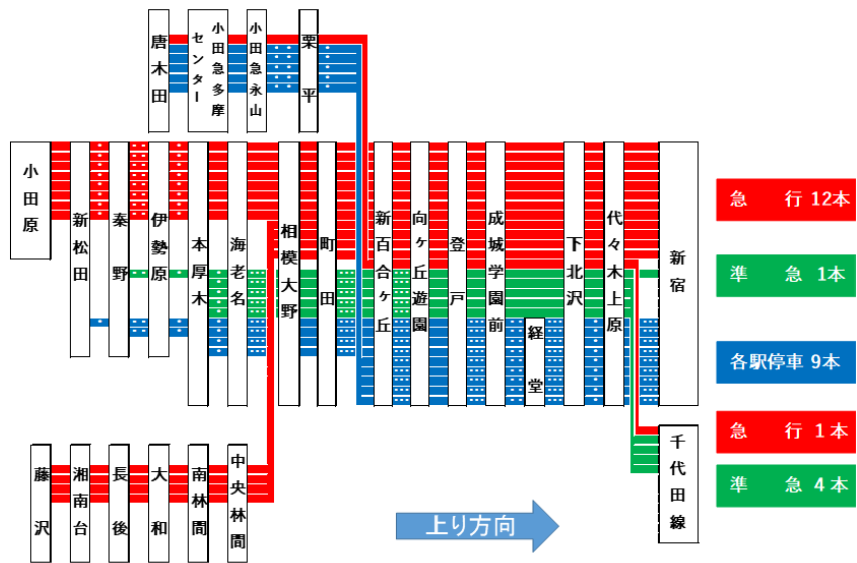


(a) 複々線完成前のダイヤ



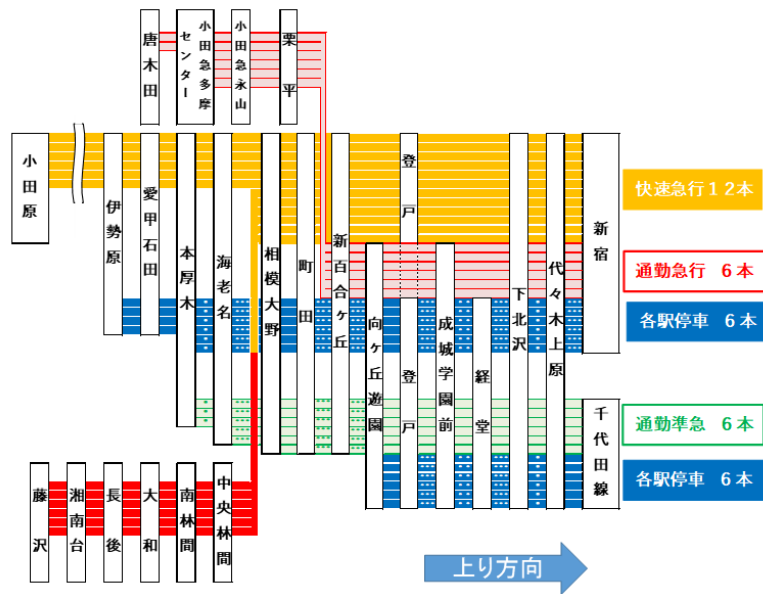
(b) 複々線完成後のダイヤ

図 A.7 新旧ダイヤの比較



※上記の他、「各駅停車」を多摩線内3本、江ノ島線内8本、小田原～新松田間5本運転している

(a) 複々線完成前



※上記の他、江ノ島線からの「快速急行」に接続する小田原方面から相模大野行き「急行」を5本、「各駅停車」を多摩線内6本・江ノ島線内6本・小田原～新松田間5本運転している。

(b) 複々線完成後

図 A.8 朝ラッシュの運行形態の比較

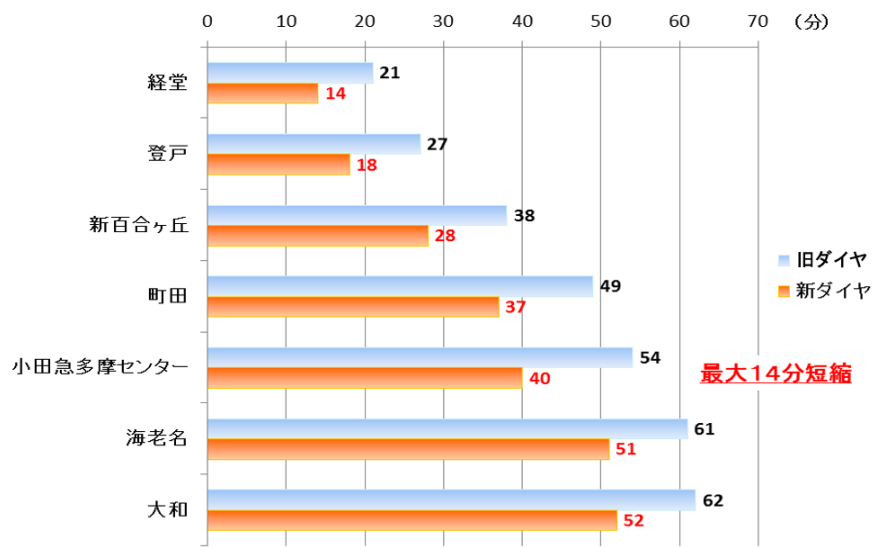
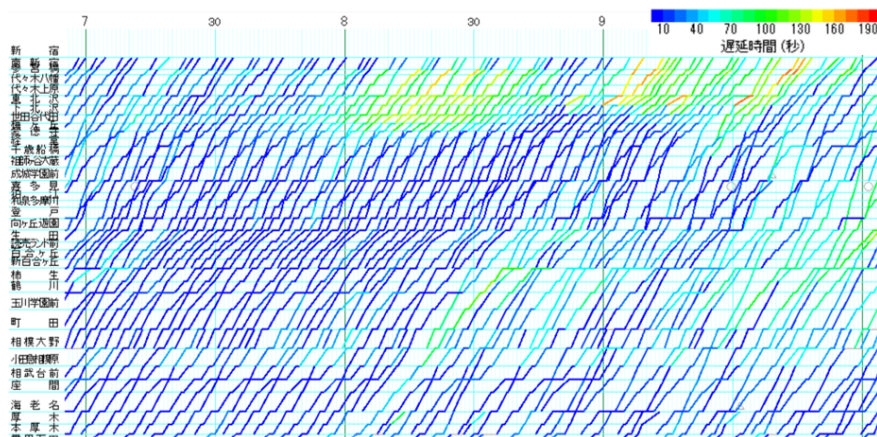


図 A.9 新旧ダイヤ各駅～新宿間，朝方ラッシュ時間帯所要時間の比較

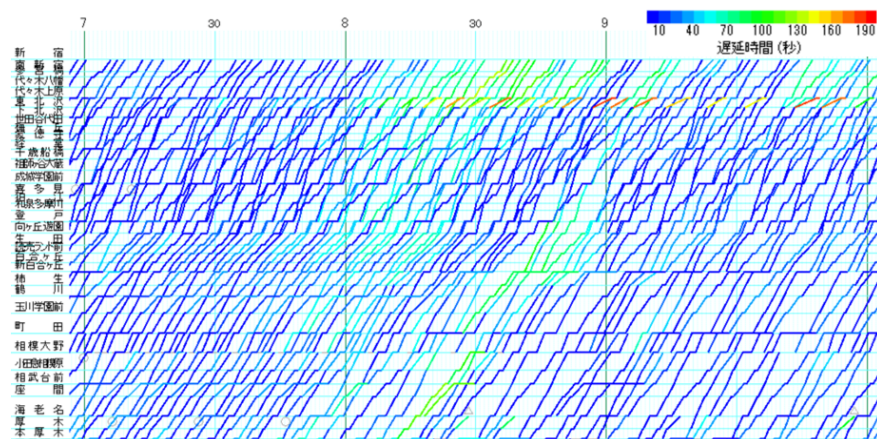
### A.4.3 新しいダイヤの定時性

図A.10に複々線完成前後での朝方ラッシュの運転状況を、クロマティックダイヤ図を用いて示す。

下北沢駅付近での列車の詰まりが解消されたため、大幅に改善しているほか、複々線完成前は9時台まで遅延が波及していたが、複々線化完成後は解消していることが確認できる。また、複線区間においても列車の増発を行ったが、遅延の伝播・拡大は発生していない。4章で提案した新しい列車ダイヤ作成手法を、新百合ヶ丘駅～向ヶ丘遊園駅間に適用したことに加え、新宿駅～相模大野駅間においては、3章で作成したシミュレータにより、事前に終日の列車ダイヤを入念にシミュレーションし、細かい調整を図った効果が発揮したものと考えられる。



(a) 複々線完成前 (2017年4～7月全平日, 着遅延の中央値)



(b) 複々線完成後 (2018年4～7月全平日, 着遅延の中央値)

図 A.10 朝ラッシュの遅延の様子

## 謝辞

本研究を遂行し、学位論文としてまとめるにあたり、非常に多くの方々のご支援、ご協力をいただきました。ここに感謝の意を表したいと思えます。

はじめに、日本大学生産工学部機械工学科教授の綱島均先生に指導教官としてご指導、ご鞭撻を賜りました。本研究の学術的な観点から多くのご指導を賜り、学術論文としての価値を高めることが出来たと考えており、深く感謝申し上げます。日本大学鉄道工学リサーチセンター副センター長の富井規雄先生には、2012年に私が小田急電鉄株式会社運転車両部技術員として輸送計画業務を担当して以降、本学位論文の研究内容に対し長年にわたりご指導いただきました。また、数多くの国際会議への参加機会や、世界各国の鉄道会社担当者との意見交換の機会、数多くの研究者との交流の機会といった様々な機会を設けていただき、一民鉄の輸送計画担当を遂行するだけでは得られない、非常に貴重な経験を積ませていただきました。私自身の至らない点で、先生には多くのご迷惑をおかけするなか、常に温かいご指導、ご支援をいただき、今日を迎えることが出来ましたこと、深く感謝申し上げます。本博士論文をまとめるうえで、貴重なご意見、ご助言を賜りました日本大学生産工学部環境安全工学科教授の秋濱一弘先生、機械工学科教授の安藤努先生に深謝いたします。

本研究を遂行するにあたり、共同で研究を行ってくださった増間義樹さんをはじめ、千葉工業大学富井研究室のみなさまには、大変お世話になりましたこと深謝いたします。私の勤める小田急電鉄の皆様には、駅係員・車掌・運転士時代から本場で業務を遂行するに至る現在まで、ときに厳しいご指導と、いつも温かいご支援をいただくとともに、研究活動に対し、多くの理解をいただきましたこと深謝いたします。また鉄道会社としての社会的使命を果たすべく、職種や役割を超え、様々な取り組みを一丸となって真摯に行う伝統があるがこそ、本研究の遂行につながったと考えております。今後はお世話になった皆様方に恩返しをし、社会に貢献できるよう、一歩ずつ何事も真摯に取り組んで参りたいと考えております。

最後に、私の業務や学位取得にあたり、全面的に支援していただいた妻の詩織と両親に心から感謝の意を表します。

令和3年3月

## 参考文献

- [1] 国土交通省: “鉄道輸送統計年報”, No.32, 平成 30 年度分.
- [2] 富井規雄: “列車ダイヤのひみつ”, オーム社, 2005.
- [3] 水間 毅: “鉄道における自動運転の歴史と今後”, 計測と制御 第 56 巻第 2 号, 2017.
- [4] 稲川真範, 富井規雄, 牛田貢平: “列車運行実績データの可視化”, J-Rail2009, 第 16 回鉄道技術連合シンポジウム論文集, 2009.
- [5] 牛田貢平: “列車運行実績データの可視化手法によるダイヤ検討への応用”, 運転協会誌, Vol.52, No.8, 2010.
- [6] Y. Ochiai, J. Nishimura, N. Tomii: “Punctuality analysis by microscopic simulation and visualization of web-based train information system data”, In: COMPRAIL2014, Rome, Italy, 2014.
- [7] A. Kono, N. Tomii: “Identifying the Cause and the Propagation Route of Delays of Trains using Association Rules”, IRSA2017-International Railway Symposium Aachen, Aachen, Germany, 2017.
- [8] Y. Ochiai, Y. Shibata, N. Tomii: “An algorithm to identify delay propagation routes based on visualization of association rules”, IRSA2019-International Railway Symposium Aachen, Aachen, Germany, 2019.
- [9] A. Kono, N. Tomii: “Ex-Post heuristic measures of timetable robustness”, EASTS Conference 2017 – The 12th International Conference of Eastern Asia Society for Transportation Studies, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2017.
- [10] Cule Boris: “Mining Train Delays”, Advances in Intelligent Data Analysis X, Lecture Notes in Computer Science, Volume 7014, 2011.



- [11] Carl-William Palmqvist, Norio Tomii, Yasufumi Ochiai:  
“Explaining dwell time delays with passenger counts for some commuter trains in Stockholm and Tokyo” , Journal of Rail Transport Planning and Management, 100189, 2020.
- [12] 國松武俊, 平井力, 富井規雄: “マイクロシミュレーションを用いた利用者の視点による列車ダイヤ評価手法” , 電気学会論文誌 D, Vol.130, No.4, 2010.
- [13] Shigeaki Adachi, Masahito Koresawa, Giancarlos Troncoso Parady, Kiyoshi Takami and Noboru Harata: “A STUDY ON TRAIN TRAVEL TIME SIMULATION FOCUSED ON DETAILED DWELL TIME STRUCTURE AND ON-SITE INSPECTIONS” , RailNorrköping- The 8th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis, Norrköping, Sweden, June, 2019.
- [14] 熊澤一将: “自動閉そく区間における運転時分と運転時隔の変動に関する検討” , J-RAIL2016, pp.595-598, 2016.
- [15] 熊澤一将, 武内陽子: “複数の観点による運転方法の比較評価方法の構築” , 鉄道総研報告, Vol. 31, No. 10, pp. 52-48, 2017.
- [16] Hideyuki Yabuki et al.: “Increasing robustness of timetables by deliberate operation of trains” , International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis – RailLille2017, Lille France, 2017.
- [17] 平栗滋人, 兎束哲夫: “線区条件に応じた列車群予測制御方式” , 鉄道総研報告, vol. 24, No. 3, pp. 29-34, 2010.
- [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.1001-1010, 2011.
- [19] 西山正紀, 富井規雄: “運転士の操縦方法を加味した列車群運行シミュレーション” , 電気学会東京支部連合研究会, TER - 13 - 049, 2013.
- [20] Hansen I. A., Pachl J. eds: “Railway Timetabling & Operations Analysis - Modelling – Optimization – Simulation – Performance Evaluation” , 2nd Edition, DVV Media Group / Eurailpress, 2014.

- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] D. Hürlimann, A. Nash: “Railway simulation using Opentrack”, In: COMPRAIL2004, Dresden, Germany, 2004.
- [24] OpenTrack <http://www.opentrack.ch> (accessed 01.09.15).
- [25] A. Radtke, D. Hauptmann: “Automated planning of timetables in large railway networks using a microscopic data basis and railway simulation techniques”, In: COMPRAIL 2004, Dresden, Germany, 2004.
- [26] RailSys <http://www.rmcon.de> (accessed 01.09.15).
- [27] D. Janecek, F. Weymann: “LUKS analysis of lines and junctions”, In: Proc. 12th World Conference on Transport Research, Lisbon, 2010.
- [28] HERMES <http://graffica.co.uk/rail-traffic-management/simulation/> (accessed 01.09.15).
- [29] K. Capek, M. Helela, J. Pitkanen: “Methods to support timetabling and capacity usage on the railway network in Finland.”, RailCopenhagen2012 - International Seminar on Railway Operations Research, Copenhagen, Denmark, 2012.
- [30] M. Ercolani, A. Placido, L. D’Acerno, B. Montella: “The use of microsimulation models for the planning and management of metro systems.”, In: COMPRAIL2014, Rome, Italy, 2014.
- [31] 岩倉成志, 上松苑, 高橋郁人, 辻井隆伸: “高頻度運行下での都市鉄道を対象とした遅延連鎖シミュレーションシステムの開発”, 土木学会論文集 D3, 土木計画学, Vol. 67, No. 5, pp. 879-886, 2011.
- [32] Y. Takeuchi, N. Tomii, C. Hirai: “Evaluation method of robustness for train schedules”, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, Vol. 48, No.4, pp 197-201, 2007.
- [33] Thijs Dewilde et al: “Defining Robustness of a Railway Timetable”, Proceedings of 4th International Seminar on

Railway Operations Modelling and Analysis - RailRome2011, Rome, Italy, 2011.

- [34] N. Besinovic, R. Roberti, E. Quaglietta, V. Cacchiani, P. Toth, R.M.P. Goverde: “Micro-macro approach to robust timetabling.” , 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis e RailTokyo2015, Narashino, Japan, 2015.
- [35] F. Cerreto: “Micro-simulation based analysis of railway lines robustness.” , In: 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis - RailTokyo2015, Narashino, Japan, 2015.
- [36] Malachy Carey: “Ex ante heuristic measures of schedule reliability” , Transportation Research Part B: Methodological, Volume 33, Issue 7, September 1999.
- [37] Emma V. Andersson et al: “Quantifying railway timetable robustness in critical points” , Journal of Rail Transport Planning & Management, Volume 3, Issue 3, Pages 95–110, August, 2013.
- [38] Emma V. Andersson, Anders Peterson, Johanna Törnquist Krasemann: “Quantifying railway timetable robustness in critical points” ,Journal of Rail Transport Planning & Management, 2014.
- [39] Miguel A. Salido, Federico Barber, Laura Ingolotti: “Robustness in Railway Transportation Scheduling” ,Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 25 - 27, Chongqing, China, 2008.
- [40] Michiel J.C.M. Vromans, Rommert Dekker, Leo G. Kroon: “Reliability and heterogeneity of railway services” ,European Journal of Operational Research 172, 2006.
- [41] L. Kroon, G. Maróti, M. Helmrich, M. Vromans, R. Dekker: “Stochastic improvement of cyclic railway timetables.” , Transportation Research Part B: Methodological, vol. 42, issue 6, pp. 553-570, 2008.

- [42] 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, No. 4, pp. 218-228, 2012.
- [43] 坂口隆, 中村達也, 石原裕介: “遅延リスク推定に基づく列車ダイヤ改善手法”, 鉄道総研報告, Vol.28, No.4, 2014.
- [44] Konstantinos Panou, Panos Tzieropoulos, Daniel Emery: “Railway driver advice systems: Evaluation of methods, tools and systems”, Journal of Rail Transport Planning & Management, vol.3, Issue4, 2013.
- [45] Gerben M. Scheepmaker, Rob M. P. Goverde, Leo G. Kroon: “Review of energy-efficient train control and timetabling”, European Journal of Operational Research, vol. 257, pp. 355-376, 2017.
- [46] Thomas Graffagnino, Roland Schäfer, Matthias Tuchschnid and Marco Weibel: “Energy savings with enhanced static timetable information for train driver”, RailNorrköping- The 8th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis, Norrköping, Sweden, June, 2019.
- [47] 大島弘安, 関野真一, 安信誠二: “予見ファジー制御方式による自動列車運転装置の実現”, 電気学会論文誌 C, Vol.109, No.5, 1989.
- [48] 村田悟, 田代維史, 川端敦, 内村年秀, 三浦修一, 今井隆: “高密度運転対応列車群制御方式”, 鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, Vol.30, 1993.
- [49] 大矢純子, 高木康夫, 飯野穰, 西村致知: “自動列車運転システムのためのモデル予測型パターン追従制御アルゴリズム”, 電気学会論文誌 D, Vol.115, No.1, 1995.
- [50] 大矢純子, 的場智, 中澤弘二: “地下鉄向け自動列車運転システム”, 東芝レビュー, Vol.63, No.12, 2008.
- [51] 国土交通省: “鉄道関係情報・データ「13. 混雑率」”, <https://www.mlit.go.jp/common/001299668.pdf>(2020年7月18日閲覧) .
- [52] 国土交通省: “東京圏の鉄道路線の遅延「見える化」(平成30年度)”, <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001328948.pdf>(2020年7月18日閲覧) .

- [53] 国土交通省: “交通政策審議会陸上交通分科会鉄道部会 東京圏における都市鉄道の現状と課題について (補足資料)” , <https://www.mlit.go.jp/common/001039141.pdf>, 2014(2020年7月18日閲覧) .
- [54] A. Yamamura, M. Koresawa, S. Adachi, N. Tomii: “How we have succeeded in regaining Punctuality in Tokyo Metropolitan Railway Network.” , In: WCCR2013-World Congress on Railway Research, Sydney, Australia, 2013.
- [55] A. Yamamura, M. Koresawa, S. Adachi, N. Tomii: “Taking effective delay reduction measures using delay elements of indices on the Tokyo metropolitan railways.” , In: COMPRAIL2014, Rome, Italy, 2014.
- [56] 列車ダイヤ研究会: “列車ダイヤと運行管理” , 成山堂書店, 2008.
- [57] 運転理論研究会: “運転理論 (再改訂版) —基礎知識と応用実務—” , 一般社団法人日本鉄道運転協会, 2010.
- [58] 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年1月20日閲覧).
- [59] 中村英夫編著: “鉄道信号・保安システムがわかる本” , オーム社, 2013.
- [60] E. Quaglietta, F. Corman, R.M.P. Goverde: “Stability analysis of railway dispatching plans in a stochastic and dynamic environment.” , J. Rail Transp. Plan. Manag. 3 (4), 2013.
- [61] D. Kirkwood, G. Nicholson, L. Chen, C. Roberts, F. Schmid: “Evaluation and testing of railway traffic management algorithms using microscopic simulation.” , In: 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis - RailTokyo2015, Narashino, Japan, 2015.
- [62] T. Albrecht, B. Jaekel, P. Reiher: “Evaluation of real-time traffic state monitoring in a railway simulation system.” , In: CASPT2015 e Conference on Advanced System in Public Transport, Rotterdam, the Netherlands, 2015.

- [63] V. de Martinis, U. Weidmann, M. Gallo: “Towards a simulation-based framework for evaluating energy-efficient solutions in train operation.” , In: COMPRAIL2014, Rome, Italy, 2014.
- [64] S. Umiliacchi, G. Nicholson, D. Kirkwood, N. Zhao, F. Schmid, C. Roberts: “An integrated methodology using micro- and macro- simulation, performance evaluation and optimisation to design energy-efficient timetables” , In: 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis - RailTokyo2015, Narashino, Japan, 2015.
- [65] M.R. Blaha, J.R. Rumbaugh: “Object-Oriented Modelling and Design with UML” , second ed. Pearson, 2004.
- [66] Helga Labermeier: “On the Dynamic of Primary and Secondary Delay” , International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis – RailCopenhagen2013, Copenhagen, Denmark, 2013.
- [67] 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, Issue 3, 2015.
- [68] 増間義樹, 富井規雄, 落合康文: “軌道回路占有情報の可視化による詳細な列車運行状況の把握” , 平成 26 年電気学会全国大会, 2014.
- [69] 錢谷孝平, 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.
- [70] M.J. Berry, G. Linhoff: “Data Mining Techniques – For Marketing, Sales and Customer Support” , John Wiley & Sons, Inc. 1997.
- [71] <https://www.r-project.org/>
- [72] 屋 昌宏: “小田急線複々線完成による新ダイヤ” , 鉄道ピクトリアル, No.946, 2018.

# 研究業績

## 学術誌原著論文

- [1] Yasufumi Ochiai, Norio Tomii: “Punctuality analysis using a microscopic simulation in which drivers’ behavior is considered” , Journal of Rail Transport, Planning and Management, Vol.5, Issue 3(2015). (第3章関連)
- [2] 落合康文, 増間義樹, 富井規雄: “決定木を用いた運転士の遅延回復運転の分析” , 電気学会論文誌 D, Vol. 138, No. 11(2018). (第4章関連)
- [3] Yasufumi Ochiai, Yoshiki Masuma, Norio Tomii: “Improvement of timetable robustness by analysis of drivers’ operation based on decision trees” , Journal of Rail Transport, Planning and Management, Vol.9(2019). (第4章関連)
- [4] Carl-William Palmqvist, Norio Tomii, Yasufumi Ochiai: “Explaining dwell time delays with passenger counts for some commuter trains in Stockholm and Tokyo” , Journal of Rail Transport Planning and Management, 100189(2020).

## 国際会議論文

- [1] Yasufumi Ochiai, Junya Nishimura, Norio Tomii: “Punctuality analysis by the microscopic simulation and visualization of web-based train information system data” , COMPRAIL2014- The 14th International Conference on Railway Engineering Design and Optimization, Rome, Italy, June (2014)
- [2] Yasufumi Ochiai, Norio Tomii: “Punctuality analysis using a microscopic simulation in which drivers’ behavior is considered” , RailTokyo2015- The 6th International Seminar on Railway Operations Modeling and Analysis, Tokyo, Japan, March (2015), **Young railway operations research award**

- [3] Yutaro Watanabe, Yasufumi Ochiai, Norio Tomii: “A Mesoscopic Train Traffic Simulation Algorithm considering Running times of Block Sections,” The International Symposium on Speed-up and Sustainable Technology 2015 (STECH 2015), Chiba, November (2015)
- [4] Yasufumi Ochiai, Yoshiki Masuma, Norio Tomii: “Improvement of Timetable Robustness by Analysis of Drivers’ Operation based on Data Mining Technique” , RailLille2017- The 7th International Seminar on Railway Operations Modeling and Analysis, Lille, France, April (2017)
- [5] Yasufumi Ochiai, Norio Tomii: “A new timetabling procedure which considers running speed of trains and its application to actual cases” , RailNorrköping- The 8th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis, Norrköping, Sweden, June(2019), **2nd Best Professional Paper Research award**
- [6] Carl-William Palmqvist, Norio Tomii, Yasufumi Ochiai: “Dwell Time Delays for Commuter Trains in Stockholm and Tokyo” , RailNorrköping- The 8th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis, Norrköping, Sweden, June(2019)
- [7] Yasufumi Ochiai, Shibata Yuta, Norio Tomii: “An algorithm to identify delay propagation routes based on visualization of association rules” , IRSA International Railway Symposium, Aachen, Germany, November (2019)

#### 国内学会・研究会・シンポジウム・その他口頭発表（主要なもの）

- [1] 落合康文, 西村潤也, 富井規雄: “WebTID データの可視化による小田急線地下化前・後の運行状況の比較とその検証” , 第 20 回鉄道技術・政策連合シンポジウム J-RAIL2013 (2013)
- [2] 浅野純一, 小林宏泰, 齋藤達仁, 近藤圭一郎, 渡辺翔, 落合康文, 山口秀, 遠藤孝夫, 鈴木剛志: “軽負荷回生制御パターン変更による省エネルギー効果の検討” , 第 20 回鉄道技術・政策連合シンポジウム J-RAIL2013 (2013)



- [3] 浅野純一, 齋藤達仁, 近藤圭一郎, 渡辺翔, 山口秀, 落合康文: “軽負荷回生制御による省エネルギー効果”, 第 50 回鉄道サイバネ・シンポジウム (2013)
- [4] 渡辺裕太郎, 増間義樹, 富井規雄, 落合康文: “軌道回路ごとの走行時分を考慮した確率的列車運行シミュレーション”, 電気学会交通・電気鉄道／フィジカルセンサ合同研究会 (2014)
- [5] 増間義樹, 富井規雄, 落合康文: “軌道回路占有情報の可視化による詳細な列車運行状況の把握”, 電気学会全国大会 (2014)
- [6] 渡辺裕太郎, 富井規雄, 落合康文: “軌道回路ごとの走行時分を考慮した列車運行シミュレーションアルゴリズム”, 電気学会産業応用部門大会 (2014)
- [7] 落合康文, 富井規雄: “運転士の取扱を考慮したマイクロシミュレーションによるラッシュ時の列車運行の分析”, 電気学会産業応用部門 交通・電気鉄道研究会 (2014)
- [8] 増間義樹, 落合康文, 富井規雄: “決定木をもちいた列車遅延原因の分析”, 電気学会産業応用部門大会 (2015)

#### 著書・その他刊行物（主要なもの）

- [1] 落合康文, 佐々木征明, 新井友章: “小田急電鉄 運転操作の工夫による CO2 削減への取り組み”, 運転協会誌, Vol.52, No.3(2010)
- [2] 落合康文: “小田急電鉄 我が社の輸送の現状と課題”, 運転協会誌, Vol.55, No.5(2013)
- [3] 落合康文: “運転士が挑む省エネへの取り組み”, 日本機械学会誌, Vol.117, No.1150(2014)
- [4] 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, No.10(2015)
- [5] 落合康文: “小田急電鉄 複々線化完成に伴う新ダイヤの要旨”, 運転協会誌, Vol.60, No.1(2018)