

# 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

落合 康文

列車が高頻度に運行されている東京都市圏の朝ラッシュ輸送は、ある列車の小規模な遅延がほかの列車へ次々と伝播し、大きな遅延に拡大しやすい。本稿では、運転士による列車の運転操縦を含めることによる現実的な朝ラッシュ輸送を再現できるマイクロシミュレータの開発、および、同シミュレータを用いて明らかになったラッシュ輸送の列車遅延に関する特徴と、小田急線下北沢地区在来線地下化時に実施した分析による定時性向上施策の実施例について紹介する。

キーワード：列車ダイヤ、マイクロシミュレーション、頑健性、遅延

## 1. はじめに

一般に「日本の鉄道は正確である」と言われる。しかし、列車が高頻度に運行されている首都圏における朝ラッシュ輸送に限定してみれば、ある列車の各駅の到着・出発に、さまざまな要因により発生する小さな遅延が、後続の列車へ次々と伝播し、遅延発生区間や各列車の遅延量が拡大するという現象がしばしば発生しているのが実情である。

当社は、副都心新宿を起点に、箱根の玄関口である小田原までを結ぶ「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120.5 km（全70駅）からなる。小田原線の東北沢駅～和泉多摩川駅間（10.4 km）は、輸送力を増強するため、線路を増加させる複々線化に取り組んでいるが、現在工事中の区間に含まれる世田谷代田駅～下北沢駅間を例にとると、朝ラッシュ時間帯には、1時間当たり約29本の列車を運行しており、特に遅延が伝播、拡大しやすい状況となっている。複々線化により解決が期待されるが、それを待たずに、ある列車の遅延が後続に伝播しにくい列車ダイヤ、すなわち頑健性の高い列車ダイヤを計画し、列車が各駅を計画した時刻どおりに到着・出発することを表す定時性を向上させることも、重要な課題となっている。本稿では、これまで列車ダイヤ作成に用いられてきたシミュレーションソフトの活用と課題を述べた後、課題を解決するために開発した、朝ラッシュ輸送の特徴を仔細に再現できる

マイクロシミュレータを解説する。そして、同シミュレータを用いた分析により、定時性向上施策を実施した事例を紹介する。

## 2. 一般的な列車ダイヤの作成手法

### 2.1 シミュレーションによる時間の算出

担当者が列車ダイヤを作成する際、以下の2点において、シミュレーションによる計算結果を用いる手法が確立されている [1]。

#### (1) 各駅間の基準運転時分の算出

列車が駅間を何分何秒で走行できるかは、当該駅間の最高速度・制限速度、線路のこう配のほか、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1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

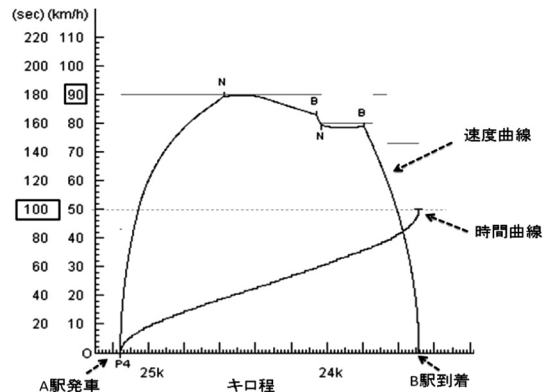


図1 運転曲線図の例  
A 駅～B 駅間を最高速度 90 km/h、100 秒で走行している。

おちあい やすふみ  
小田急電鉄株式会社交通サービス事業本部運転車両部  
〒160-8309 東京都新宿区西新宿 1-8-3

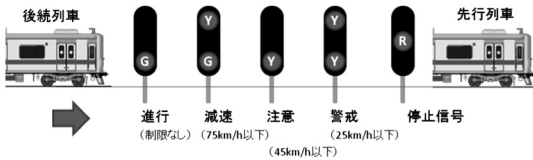


図2 信号による速度制限 (G: 緑, Y: 黄, R: 赤)

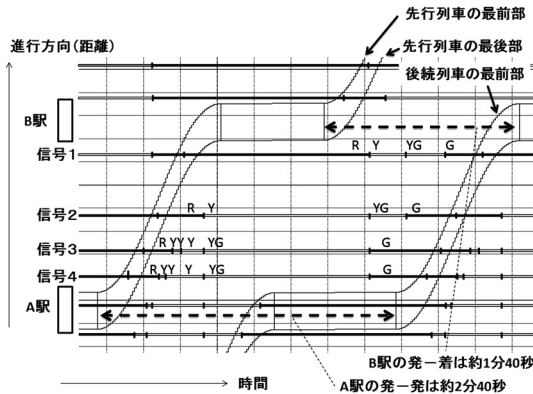


図3 時隔曲線図の例

表され、列車ダイヤを作成する基礎の数値になる。これにより求められた駅間の走行時間を基準運転時分と呼ぶ。

### (2) 列車と列車の間に必要な時間の算出

1本のレール上を複数の列車が衝突することなく安全に走行するために、駅および駅間では信号装置が複数台、設置されている。当社では図2のように後続列車が先行列車に近づくと、「進行」→「減速」→「注意」→「警戒」→「停止」と段階的に速度が制限されることで、列車間の安全を確保している。列車が駅間を(1)で求めた時間で走行するためには、列車の前方の信号現示(信号が表示している内容)が常に「進行」である必要がある。そこで図3のように、横軸に先行列車の最初の駅の出発を基準にした経過時間、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。この時間を時隔と呼び、図3を時隔曲線図と呼ぶ。

### 2.2 列車ダイヤの作成

横軸に時刻、縦軸に駅の並びをとった列車ダイヤ図上で、列車の各駅の到着・出発の推移を表す線をことをスジと呼ぶ。各駅停車のみ走行している路線では、2.1節で求めた基準運転時分および列車同士の時隔に駅の停車時間を加えた3要素を組み合わせ、一本一本

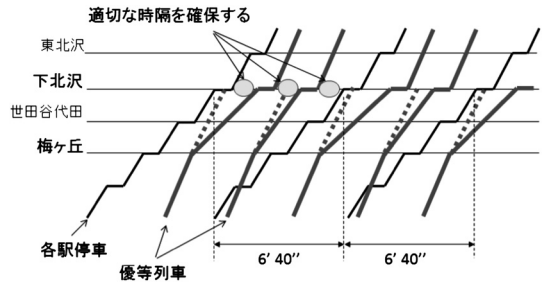


図4 当社の列車ダイヤ(朝ラッシュ上り)

の列車についてスジを描き、列車ダイヤを作成していく。当社の場合は、各駅停車から特急列車までさまざまな列車種別で運行している。そのため、図4のように各駅停車のスジをはじめに作成し、次に特急などの優等列車のスジを、列車の追抜きが可能な駅で各駅停車を適度に追い抜きながら作成していくことで、全体の列車ダイヤを作成する。

### 2.3 従来の手法による課題

これまでに述べた駅間の所要時間、および列車間の時隔は、理想的な状況を計算によって求めたものであり、列車の駅での停車時間が計画通りであれば遅延は発生しない。しかし実際には、駆け込み乗車、車内混雑による乗降車のしづらさ、その他さまざまな理由により、停車時間は計画よりも伸びてしまうことがある。ある列車の停車時間がわずかに延びることにより、計画したよりも後続列車が先行列車に追いつきすぎると、速度制限の厳しい信号が現示されて想定を超えたノロノロ運転となったり、停止信号により停止したりする。さらに、運転士が運転している列車が先行列車と接近した際の細かな運転操縦の違いも存在する。このような状況で、列車の駅間の所要時間がどの程度延びるかについては、従来の計算手法では考慮することが難しい。特に、高頻度で運転している朝ラッシュ輸送時において、その影響がさらなる後続列車にどの程度まで伝播していくかを想定しながら列車ダイヤを計画するのは、非常に難しいという課題がある。

## 3. マイクロシミュレーションによる朝ラッシュ輸送の再現

### 3.1 マイクロシミュレーションとは

そこで、列車ダイヤの案を作成し、それを入力として列車運行のシミュレーションを行い、遅延の発生・伝搬を観測するという手順で、列車ダイヤを分析し、改善させていくことが有効と考える。そのためには、列車運行を高精度で再現・予測可能なシミュレータが必

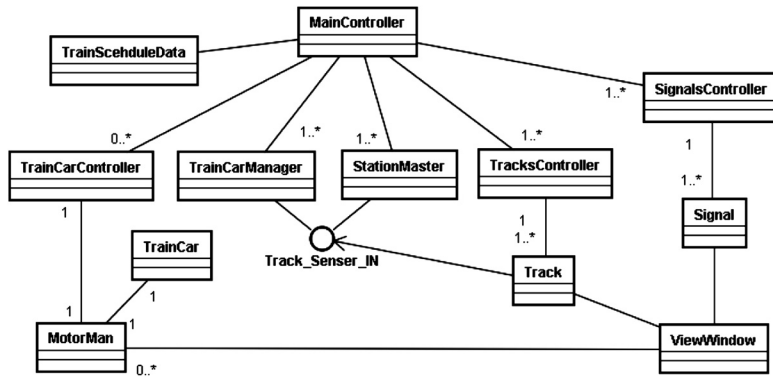


図 5 主なクラス構成図

要となる。

複数列車の運行をシミュレーションする方式としては、列車の駅の到着と発車をイベント発生点として離散的にシミュレーションする方式（macroscopic simulation と呼ぶ、文献 [2] など）と、運動方程式に基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（microscopic simulation と呼ぶ）がある。前者の方式では、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、信号設備からの影響も直接には考慮されない。そのため、ある列車の小規模な遅延が後続列車に影響を与える朝ラッシュ輸送を詳細に分析するには、後者のマイクロシミュレーションによる方式が適している。2.1 節 (1) で述べた駅間の基準運転時分の算出時にもマイクロシミュレーション方式が用いられているが、先行列車の影響を受けての減速は発生しないことを前提とし、理想的な運転を時間的に順方向（列車進行方向）で作図したり、さかのぼって逆方向で作図したりしたものを組み合わせて計算する。それに対して本稿のシミュレーションでは、現実世界と同様に、時間的に順方向のみで現実的な列車運行を再現していく必要がある。

### 3.2 列車運行シミュレータの構成

3.1 節で述べたような要件を満たすべく、列車運行を模擬するマイクロシミュレータを開発した。その主なクラス構成を図 5 に、役割を表 1 に示す。各設備をクラス部品として構成し、MainController クラスより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た。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 100 ms 周期、そのほか軌道回路<sup>1</sup>・信号現示・運行表示盤<sup>2</sup>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のシミュレーションを可能としている。出力形式としては、シミュレー

表 1 主なクラスの役割

クラス名	役割
MainController	シミュレーション全体の進行・時間管理を行う
TrainScheduleData	列車ダイヤを格納する
TrainCarManager	列車のシミュレーション区間への出現・消滅を管理する
TrainCarController	1 個列車の挙動全般を管理する
MotorMan	運転士の役割を再現する
TrainCar	車両の動作を再現する
StationMaster	駅長・信号扱者の動作を再現する
TracksController	軌道回路を再現する
SignalsController	信号現示を再現する
ViewWindow	各種表示機能を担う

ション結果として得られる各列車の各駅の到着・発車時刻をプロットした実績列車ダイヤ図、各列車の運転曲線図、時隔曲線図のほか、運行管理表示盤スタイルにより視覚的に列車の動きを捉えられる機能を設けた。これにより、リアルタイムにシミュレーションが進み、列車の間隔が徐々に詰まっていく様子を、誰もが運転司令所（列車運行を管理する中央施設）内で監視している感覚で捉えられる。この機能は、実際に現場の運転士への教育にも活用している。

### 3.3 運転士による運転操縦の再現

2.3 節でも述べたが、駅間における列車の挙動を再現するのに必要かつ重要な要素として、列車を加速（力行、りっこう）させるための力行操作、減速させるためのブレーキ操作、車両を惰性で進ませる惰性操作といった運転士による運転操縦がある。自動列車運転装置が導入されている路線を除いて、当社を含む一般的な鉄道では、先行列車の動きにより刻々と変化する状況に合わせ、運転士が的確に列車を操縦する必要がある。

<sup>1</sup> レールを電気回路の一部として利用し、列車が駅や駅間のどこにいるかを検知したりなどする装置。

<sup>2</sup> 路線全体で各列車がおのおのどこにいるかなど、運行状況を表示する装置。

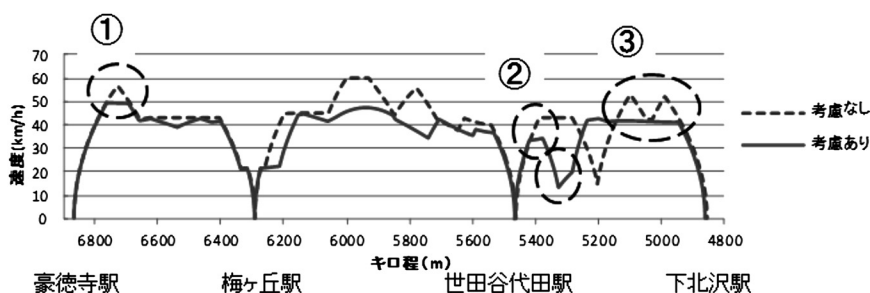


図6 運転士の操縦方法を考慮した場合としない場合の後続列車の運転曲線図

る。また、一つのミスが重大事故につながりかねないため、一つ何かの確認を行うのにも、必要十分な時間をかけて行う必要がある。また、混雑した車内にいる旅客に対する乗り心地面での配慮も必要である。本稿のシミュレータでは、以下に示す5項目を中心とした、運転士の運転操縦を再現する機能を盛り込んだ[3]。

(1) 力行⇔ブレーキに切り替わる際の惰行確保秒数  
鉄道車両は自動車と異なり、ハンドル操作から実際に車両が応答するまでには相応な時間を必要とする。また、乗車中の旅客が転倒してしまう恐れがあるため、乗り心地を考慮し一定の惰行時間を確保する必要がある。具体的な数値としては、筆者の運転経験から、力行からブレーキに移行する場合には5秒程度、ブレーキから力行に移行する場合には10秒程度を設定した。

(2) 停止信号による停止後、運転を再開するまでの時間

停止信号が現示され運転士が列車を停止させた後、信号現示が変化した状況を考える。このような状況で運転士は、信号現示の変化を認知して、指差確認称呼(確認や操作を行う対象への指差しと内容の発声)、ブレーキを解除する操作、力行操作を行う。これらにかかる時間と、実際に車両が動くまでの時間を、シミュレータに反映させた。

(3) 下り坂運転時のブレーキ操作

駅間の基準運転時分を計算するにあたり、当社の運転曲線作成では、線路が下りこう配となっている区間については、列車は同じ速度を維持したまま進むとして作図をしている。しかし、現実的には乗車旅客数やこう配の度合いなどによりブレーキ時の減速の具合は変化するため、制限速度付近を同じ速度を維持して走行することは難しい。具体的には、ブレーキと惰行(下り坂なので速度は上昇する)を繰り返しながら走行するケースが多い。この操作をシミュレータに反映させた。

(4) 乗り心地の考慮

先行列車の動きに応じて後続列車の信号現示が頻繁

に変化し、それにより後続列車の進行方向先の制限速度が短時間に変化する状況を想定する。このような状況で後続列車の運転士は、力行とブレーキを短時間に繰り返すことなく、乗り心地を考慮してなるべく加減速度が滑らかなような運転を行う。そのような運転操縦をシミュレータに反映させた。

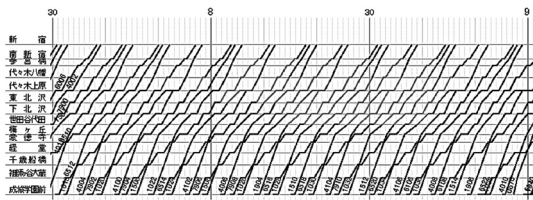
(5) 速度低下時の再加速の仕方

運転士は、速度がある値以上低下してきた場合には再度力行操作を行うため、シミュレータでもそのような運転操縦を行うものとした。

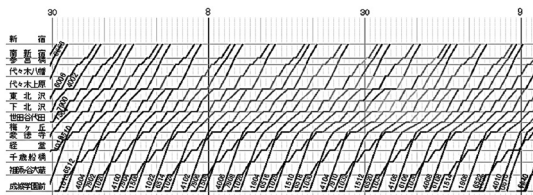
### 3.4 シミュレーション結果の検証

図6に、運転士の操縦方法を考慮せずにシミュレーションを実施した際の運転曲線と、運転士の操縦方法を考慮してシミュレーションを実施した際の運転曲線の違いを、豪徳寺駅～下北沢駅間(地下化工事前)を例に示す。これらは、先行列車に接近して運転している各駅停車の運転曲線である。運転士の操縦方法を考慮した場合、図6の①に示すように、力行からブレーキに移行する際、惰行を確保できている。シミュレーションを実施したところ、世田谷代田駅出発後において、先行列車と後続列車の間隔が近くなったのだが、運転士の操縦方法を考慮したシミュレーションでは、図6の②において、先行列車の影響で信号現示が変化し制限速度が変わったことによる、後続列車のブレーキおよび力行操作と、その間の惰行が正しく模擬できている。また、図6の③で示すように、信号現示が頻繁に変化し、制限速度が短時間に変化する場合にも、力行とブレーキを短時間に繰り返すことなく、より実際の運転士の操縦に近い滑らかな運転を再現できている。

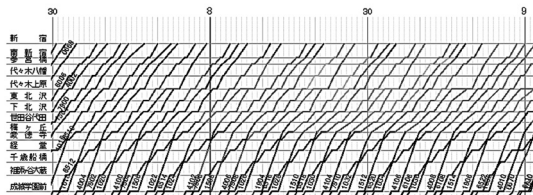
さらに多くの列車に対するシミュレーション結果の例を図7に示す。これは、成城学園前駅～新宿駅間のラッシュ輸送全時間帯の列車ダイヤであり、下北沢駅7時30分～8時40分間の各列車の停車時間を65秒に設定してシミュレーションを実施したもの(図7(a), (b))、ならびに、2012年12月～2013年2月のうち、実際



(a) 運転士による操縦を一切考慮しない場合



(b) 運転士による操縦を考慮した場合



(c) 実際の運行実績データより  
(2012年12月～2013年2月中の5日間平均)

図7 運転士による操縦の考慮による結果の差異

に下北沢駅7時30分～8時40分の各列車停車時間の平均が65秒前後であった5日間を平均した運行実績(図7(c))を、それぞれクロマティックダイヤ図で表したものである。クロマティックダイヤ図とは、各列車の各駅の到着・出発が計画よりどれくらい遅延しているかを、色の違いにより可視化した列車ダイヤ図のことで、定時運行に近いと濃い青色、遅延量が増大してくると徐々に薄い青色から黄色、赤色へと変化して表示される[4]。これにより、遅延が発生し拡大していく様子がわかる仕組みになっている(本稿では白黒となるため、色の濃淡でご覧いただきたい)。

図7(a)～(c)のすべてに共通して、8時頃～8時30分頃にかけて、先行列車の停車時間増大による遅延が後続列車に影響を及ぼし出し、遅延が拡大し、その後収束している様子が、色の濃淡から見てとれる。

図7(a)の運転士の操縦に関する要素を考慮しない場合、途中駅での最大遅延は1分56秒、新宿駅での到着遅延は31秒に収まるという結果が出た。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での、先行列車の発車と後続列車の到着の間の時隔については、現地での実測で最短でも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、実測値よりも小さい値となった。これは、下北沢駅手前で停止信号によって停止した状態で、3.3節(2)で議論したような、再び信号現示が変化してから運転を再開するまでにかかる時間が考慮されていないためであると考えられる。一方、図7(b)の運転士の操縦に関する要素を考慮した場合には、途中駅での最大遅延は3分05秒、新宿駅到着遅延は1分58秒、下北沢駅の時隔についても最短1分07秒と、現地での実測値の平均的な実態に近い値となった。これは、3.3節(2)の実装が適切に作用したためであると考えられる。また、下北沢駅7時30分～8時40分の各列車の停車時間の平均が約63.9秒、新宿駅到着の遅延は1分45秒であった運行実績データ図7(c)と、開発したシミュレータの結果である図7(b)を比較すると、遅延の拡大状況、遅延の量の大きさ、遅延の収束状況の傾向がおおむね一致しており、実際のラッシュ輸送を高精度で再現できていると考えられる。

#### 4. マイクロシミュレータによる朝ラッシュ輸送の分析

当社の朝ラッシュ時間帯の列車ダイヤは、最も列車内が混雑する世田谷代田駅～下北沢駅間で、列車により乗車率に偏りが生じないように、図4で示したように、各駅停車と急行(一部は準急)を1:2の割合で、およそ6分40秒サイクルで運行している。当社ではピーク時間帯に設定した全列車が新宿駅に1分台(1分0秒～1分59秒)以下の遅延で到着できるかどうかを一つの基準としており、開発したマイクロシミュレータを用いて同目標を達成するための必要条件について分析を行った。

##### 4.1 各列車の下北沢駅の停車時間を10秒延ばした場合

全列車が停車する下北沢駅とその前後区間で、列車をいかにスムーズに通過させるかが重要と考え、下北沢駅の7時30分～8時40分にかけて停車時間を65秒に設定した場合と75秒に設定した場合での、シミュレーション上での列車の詰まり方の違いを観測した。図8に、8時32分時点での各列車の位置を運行表示盤スタイルで表したものを示す。豪徳寺駅よりも手前の区間(図中の右側)では列車の在線位置が変わらないが、下北沢駅の停車時間を75秒とした場合は、下北沢駅～梅ヶ丘駅間に列車が集中している。停車時間の差はわずか10秒であるが、大きな詰まりに発展していることがわかる。

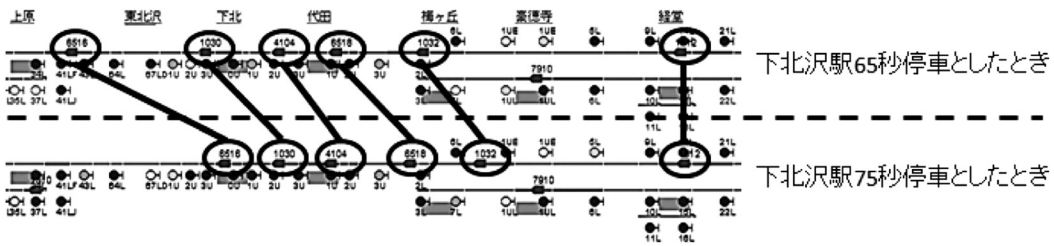


図8 運行表示盤スタイルで表示した、8時32分ごろの列車の詰まり方の違い  
(太線で結んだものが同じ列車を表す.)

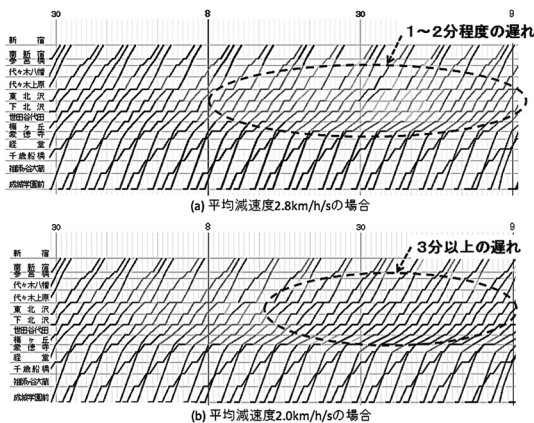


図9 運転士の操縦方法の違いによる遅延の差

## 4.2 運転士のブレーキ操作を変化させた場合

運転士による列車の運転操縦の中で、最も差が出るのはブレーキ操作であることが、経験的にわかっている。これは、担当車両の乗客数などによりブレーキの効き具合はいつも微妙に異なるうえ、先行列車の運転状況により後続列車の進行方向先の信号機に現示される制限速度が日々異なるなどが要因になっている。当社ではブレーキ操作時の標準的な列車の減速度を平均2.8km/h/s以上(列車が1秒間進むにあたり、速度が時速2.8km以上減少する)としており、シミュレーションでもこの値を用いている。もし仮にこれが、経験の浅い運転士を想定して、平均2.0km/h/sに低下(すなわち、列車の減速が鈍くなる)すると仮定した場合、どのような影響が出るかを分析した。結果を図9に示す。2.8km/h/sの場合、図中の点線の円で囲った区間・時間帯は1~2分程度の遅延に留まっているが、2.0km/h/sに設定すると、遅延が3分以上に増大してしまっている。この結果から、運転士のブレーキ操作も遅延の大きな要素であることがわかる。朝ラッシュ時間帯の経験が浅い新人運転士などへは、指導職による添乗教育などにより、適切な運転操作技術を習得・

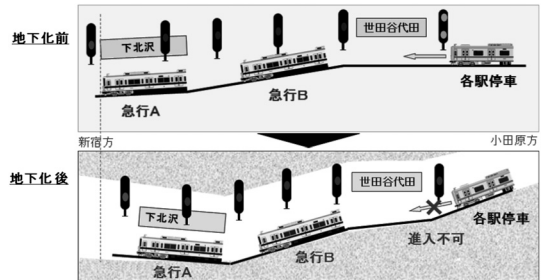


図10 在来線地下化後の主な変更点(イメージ)

向上させることの重要性が示された。

## 4.3 設備変更に伴う変化

複々線化工事の進捗に伴い、2013年3月23日に東北沢駅~梅ヶ丘駅間が地下化された(地下化後の現在も継続して工事中であり、同区間は複線のままである)。この際、急な下りこう配の発生に加え、駅の設置位置や信号設備に大きな変更があった。これによる朝ラッシュ輸送の変化について、詳細な分析を行った。具体的には、図10に示すように、下北沢駅手前で先行列車に追いつくため手前で停止する場合の停止位置を変えた場合、および、地下化される下北沢駅の前後2駅(東北沢駅・世田谷代田駅)の停車時間を変化させた場合の、新宿駅到着時点での最大遅延時分の違いを分析した。

### 4.3.1 下北沢駅手前で後続列車が先行列車に追いついた場合の停止位置の影響

2.3節で述べたように、列車ダイヤ作成の時点では、先行列車の遅延により後続列車が駅の手前で停止してしまうことは十分に想定していないが、実際には停止信号により停止することがしばしば発生する。地下化により駅・信号機の設置位置が変更となったため、後続列車が駅の手前で停止する頻度が増え、新宿駅での定時性が大きく損なわれるという懸念が生じた。具体的には、図10に示すように、1本目の急行Aが下北沢駅停車中、2本目の急行Bが下北沢駅の手前で停止

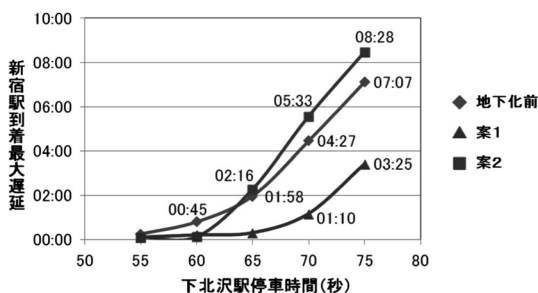
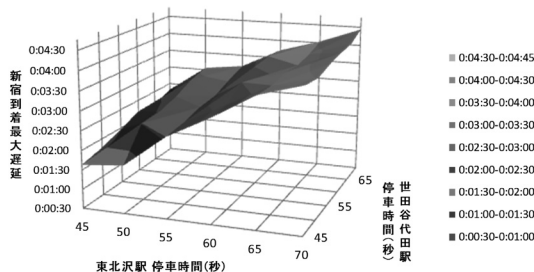
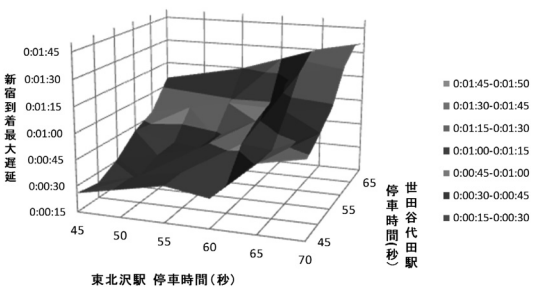


図 11 新宿駅到着最大遅延の予測



(a) 地下化前



(b) 地下化後

図 12 東北沢駅・世田谷代田駅の停車時間と新宿駅での最大到着遅延への影響の変化

信号により、所定の停止位置（信号機の約 50m 手前）に停車すると、これまで後続の各駅停車は世田谷代田駅に進入できていたものが、進入できなくなる事態が生じることになる。そこで、以下の案 1 と案 2 について、どちらが優れているかを詳細に分析した。

案 1：後続の各駅停車は世田谷代田駅に進入できないものの、急行 B は所定の停止位置（信号機の手前約 50m）とする。

案 2：急行 B を信号機の手前約 30m まで接近させ、後続の各駅停車を世田谷代田駅に進入できるようにする。

シミュレーションの結果、図 11 に示すように、案 1 のほうが下北沢駅の停車時間が伸びた場合でも新宿駅到着時点での最大遅延が少ないことから、案 1 を採用

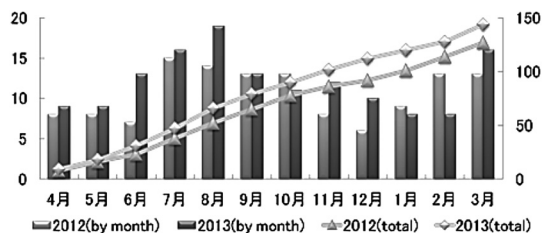


図 13 新宿駅到着 1 分台達成実績日数

することとした。このような結果になる背景には、当社での、ATS と呼ばれる列車自動停止装置に対する運転士の運転操縦方法が密接に関わっている。案 2 の場合、信号機手前約 30m まで進入するのに伴い実施される現実的な ATS の取り扱いを再現すると、運転再開後から下北沢駅に到着するまでの時間が長くなるという結果が出たのである（なお、2015 年度中に現在の ATS から新型の ATS への更新が予定されており、更新後は信号機の手前約 30m まで進入させ、さらなる定時性の向上を図ることができる予定である）。

#### 4.3.2 駅での停車時間の伸び縮みによる影響

図 11 の案 1 で示されているように、地下化前と比較すると、地下化後は下北沢駅の停車時間が 55 秒から 60 秒に増えても、新宿駅到着時点で遅延がわずかに発生するにとどまる見込みが得られた。次に、下北沢駅の前後 2 駅である東北沢駅と世田谷代田駅の停車時間を変化させた場合の、新宿駅到着時点の遅延をシミュレーションした。結果を図 12 のグラフに示す。このグラフから、地下化前では東北沢駅の停車時間の増大がラッシュ時間帯全体の遅延に大きく影響していたものが、地下化後は世田谷代田駅の停車時間の増大のほうが大きく影響することが判明した。そこで実際に、地下化後は東北沢駅ではなく、世田谷代田駅において人員を配置して、停車時間が増大しないようにすることとした。

#### 4.4 在来線地下化前と地下化後の運転状況

図 13 に地下化切り替え前の 2012 年度と地下化切り替え後の 2013 年度に対して、ラッシュピーク時間帯（新宿駅 7 時 52 分着～8 時 54 分着）の、全列車の新宿駅到着遅延の実績が 1 分台を達成した日数の変化を比較したものを示す。地下化後の 2013 年度の 1 月と 2 月は、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少なくなっているが、おおむね年間を通して 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列車

ダイヤについては変更しなかったことから、これは純粹に、地下化時に行った分析と対策による列車ダイヤの頑健性向上の効果と考えている。

## 5. おわりに

本稿では、運転士の運転操作も考慮した列車運行のマイクロシミュレータを開発し、活用した事例を紹介した。これにより、現実の朝ラッシュ輸送に近い状況を再現することができた。また、朝ラッシュ輸送の特徴を分析したほか、線路切り替えに伴う特性の変化を詳細に分析し、適切なオペレーション施策を実施することで遅延を抑制することができた事例を紹介した。

本稿で紹介したシミュレータと照合した列車運行実績データは、列車の各駅の到着・出発の時点でのデータである。今後は、駅間のいくつかの地点ごとの運行実

績データや、そのほかの運行実績に関わる情報と、マイクロシミュレータを組み合わせることで、より一層の遅延防止対策検討手法を研究していく所存である。

## 参考文献

- [1] 運転理論研究会, 『運転理論 (再改定版)』, 日本鉄道運転協会, 2010.
- [2] 安部恵介, 荒屋真二, “最長経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, **27**, pp. 103–111, 1986.
- [3] Y. Ochiai and N. Tomii, “Punctuality analysis using a microscopic simulation in which drivers’ behavior is considered,” In *Proceedings of the 6th International Conference on Railway Operations Modeling and Analysis (RailTokyo2015)*, Paper ID: 153, 2015.
- [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,” 第16回鉄道技術連合シンポジウム (J-Rail2009) 論文集, pp. 745–748, 2009.