

1. はじめに

東京圏におけるピーク時間帯の通勤混雑は、極めて厳しい状況にあり社会問題となっている。また、都市鉄道のピーク時の速度低下も顕著であり、サービス水準の指標とされる速達性や快適性に課題を残している。鉄道事業者は、ピーク時間帯の混雑率緩和を図る為、運行本数の増発や列車の長編成化に取り組んできたが、ダイヤが飽和状態となり、列車速度の低下を招いている。また根本的な対策として、新線建設や既設路線の複々線化が挙げられるが、高コストなこと、沿線住民の少子高齢化による鉄道事業者の投資意欲の減退など障害も多く、ハード面での整備には限界がある。

前述したように、鉄道事業者は混雑率緩和を図る為、時刻により異なる需要に対応した運行本数を設定している。そこで、運行本数の増減や運行パターンの変更などの各種対策により変化する速達性を予測するには、列車速度の推定手法の構築が必要であり、今まで、岩倉・原田¹⁾、田口ら²⁾により、リンクコスト関数を用いた研究が行われている。しかし、複雑な列車種別が設定される路線においては、先行列車が種別の異なる後続列車に与える影響などを考慮した推定は難しく、積み残した課題も多い。

本研究では、線路内の混雑に着目した列車運行シミュレーションの構築を目的とし、運行本数の増減に伴う列車速度の変化を推定する。また、列車種別の異なる列車間の相互作用によって動的に変化する複雑な現象を再現する必要があることから、マルチエージェントシミュレーションシステムを用いることとした。

2. 分析対象と使用データ

分析対象は、小田急小田原線の新百合ヶ丘～新宿間とする。小田急電鉄は、神奈川近郊の都市と都心を結ぶ東京圏を走る通勤路線としての性質を持っており、新百合ヶ丘～新宿間は小田急線内でも運行本数が最も多い区間となっている。時間帯は、4時49分に経堂を出発する始発列車から10時56分に新宿に到着する列車までの間とする。現在、和泉多摩川～梅ヶ丘間で複々線化が進められたが、時刻表上でも新百合ヶ丘～新宿間の急行列車の所要時間はオフピーク時で25分であるのに対し、ピーク時で36分と列車速度に差が見られる。

シミュレーションの構築にあたり、小田急電鉄株式会社の協力を得て、運転曲線等の実際の列車運行に使用されるデータを利用する。また、駅停車時分データは、2007年12月に当研究室が調査し取得している。各駅の乗降者数データは、平成17年大都市交通センサスによる上下方向別15分ピッチのデータを利用する。

3. シミュレーションの構成

列車の運行は、走行と停車の繰り返しであることから、所要時分は駅間走行時分と駅停車時分に分けて考えられる。そこで、駅停車時分を重回帰モデルによって推定し、シミュレーションより算出される駅間走行時分との合計を所要時分とする。シミュレーションの構成としては、新百合ヶ丘～新宿間の上り線をシミュレーション空間と定義し、その区間に存在する列車・駅・信号機をエージェントと見なす。

3.1 シミュレーション空間の設定

縮尺は1/50に設定し、線路という空間上に列車・信号機・駅といったエージェントを配置した。各エージェントは、与えられたルールに従ってステップ毎に自身の行動を決定する。また、1ステップ=1秒と設定した。

3.2 エージェントルールの設定

上記のデータを基に、各エージェントの行動をルール化した。例として、実際に運転士が取る運転行動パターンをアルゴリズム化した「列車エージェント」の行動ルールを示す(図1)。まず、前方に位置する信号機の現示色を確認し、列車の

加減速を決定する。さらに、前方に停車駅を確認した場合には、停止目標に合わせて減速する。この処理を繰り返すことにより、列車の挙動が再現される。また、全列車の挙動を同時に再現することにより、列車が相互に与える影響を動的に考慮したシミュレーションが可能となる。

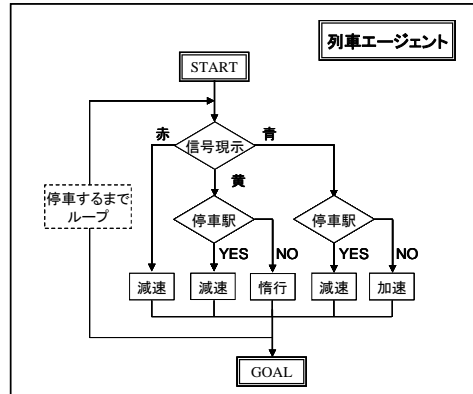


図1. 運転アルゴリズム

3.3 駅停車時分の分析

列車の運行には、通常、基本駅停車時分が使用される。基本駅停車時分とは、鉄道会社がダイヤ作成をする際に参照される数値であり、概ね20~40秒程度である。この数値を目安に各列車は出発の判断を行うが、混雑時には乗降客の流動に時間を要して、基本駅停車時分を超えてしまう列車が多数存在している。そこで、乗降人員及び混雑率によって変動する駅停車時分モデルを検討する。

a) 駅停車時分モデル

大戸³⁾による駅停車時分モデル(式1)を用いて、駅停車時分の分析を行う。駅停車時分の定義として、ドアが開いてから列車が動き出すまでの時間とした。分析対象は、7時00分~10時30分に小田急線新百合ヶ丘～新宿間の主要7駅に発着する列車、計612本とする。

b) 分析結果

算出したパラメータから、駅停車時分の実測値と推計値の比較を行った結果、乗降人員の影響による駅停車時分の変化を再現することが出来た(表1)。例として、登戸駅における駅停車時分の実測値と推計値の比較結果を図2に示す。使用した大都市交通センサスデータから、時間帯の乗降人員の変動による駅停車時分が増減が再現できた。しかし、乗降人員と混雑率に依存した駅停車時分の説明をしている為、乗降人数、混雑率ともに少ないオフピーク時には、推計値が極端に小さくなるという課題を残した。なお、今回のシミュレーションにおいては、推計値が基本駅停車時分を下回った場合、推定駅停車時分に基本駅停車時分を適用している。

$$t_s = \gamma x^2 + \eta x + \omega y \quad (1)$$

- t_s : 駅停車時分
- x : 乗降者数
- y : 混雑率
- γ, η, ω : パラメータ

パラメータ	t値
γ	-0.072 -9.745
η	3.147 11.872
ω	14.700 11.330
残差 RMS	18.615 (秒)
重相関 R	0.924
サンプル数	388

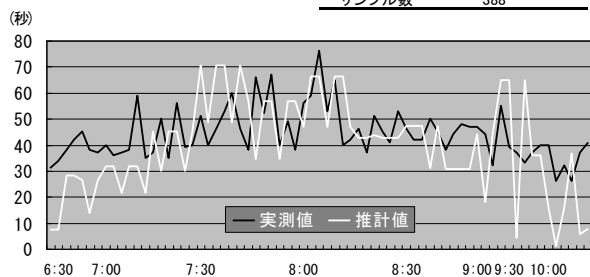


図2. 駅停車時分の比較 (登戸駅)

4. シミュレーション結果

シミュレーションモデルより出力されるデータを分析し、考察及び、現行・新ダイヤにおける列車速度の比較を行う。但し、途中駅で列車は、到着時刻に関わらず駅停車時分モデルによって算出された推定駅停車時分だけ停車する為、時間調整することなく出発する。また、列車には駅に到着する順序を守るようにルールを与えている。つまり、列車は前後に走行する列車にのみ影響され速度を決定している。

4.1 シミュレーションの再現性

新百合ヶ丘～新宿間における各列車のシミュレーション結果を図3、図4に示す。横軸に新百合ヶ丘～新宿間の所要時分の実測値、縦軸にシミュレーションによる所要時分の推計値となるようプロットしたものである。どの列車も残差±5分以内に収まっており、また、残差平均が118秒、相関係数が0.998と良好な結果が得られた。但し、ここで使用する実測値とは、調査により取得した発着時刻データであり、ほぼダイヤ通りの運行であったことを確認している。

a) 時間帯別に見る傾向

図3は、横軸は新百合ヶ丘～新宿間の所要時分の実測値、縦軸はシミュレーションによる所要時分の推計値となるようプロットし、時間帯別に分類したものである。傾向としては、ピーク時間帯である8時台に、所要時分の推計値が実測値を上回る列車が多く見受けられたのに対し、ラッシュが終わる9時台になると、所要時分の推計値が実測値よりも短く走行する列車が多く見受けられる。また、表2は時間帯別に相関係数及び残差平均を求めたものであり、ここから8時台の列車に残差が大きいことが確認される。オフピーク時の駅停車時分の推計値が過小となり、その積み重ねが大きな残差の原因になっていると考えられる。

b) 列車種別ごとに見る傾向

図4は、横軸は新百合ヶ丘～新宿間の所要時分の実測値、縦軸はシミュレーションによる所要時分の推計値となるようプロットし、列車種別ごとに分類したものである。傾向としては、各駅停車などの緩行列車で、推計値が実測値を上回る列車が大半であるのに対して、急行などの優等列車は、実測値を下回る列車が多くなる結果となった。表3は、列車種別ごとに相関係数及び残差平均を求めたものであり、快速急行の残差平均が大きいことが分かる。また、同じ列車種別内でも、比較的短い所要時分で走行する列車は、推計値が実測値よりも短くなるのに対し、所要時分の実測値が長くなる列車ほど、推計値も長くなる傾向にあることが分かる。考えられる理由として、所要時分が短い列車(=オフピーク時)と所要時分が長い列車(=ピーク時)の間に、同じ列車種別内でも時間帯別に傾向が分かれているものと考えられる。

4.2 新ダイヤによる運行シミュレーション

列車速度の低下が顕著に現れる、下北沢～代々木上原間の線路内混雑を緩和し、速達性を向上することを目的に、新百合ヶ丘～新宿間を走行する現行ダイヤの優等列車の到着順序を一部変更したものを、新ダイヤとして運行パターンに用いる。横軸に現行ダイヤでの推計値、縦軸に新ダイヤでの推計値をとり、列車速度を比較した結果を図5に示す。緩行列車と一部優等列車に速度低下が見られるが、新ダイヤにより順序変更となった列車は、大幅に速度が向上していることが分かる。向ヶ丘遊園～新宿間を走る緩行列車の平均速度は25.5km/hのまま変化はなかったが、急行など優等列車の平均速度は39.2km/hから40.1km/hに向上した。また、全列車の平均速度も33.2km/hから33.7km/hに若干向上している。

5. まとめ

本研究では、シミュレーションモデルを用いる事により、列車間の相互作用を考慮した列車速度の推定が可能であることを示した。今後は、駅での長時間停車が後続列車の速度低下を招いていることから、その要因となる駆け込み乗車や障害物の挟まり等を考慮した駅停車時分の推定手法の構築が必要である。また、緩急接続駅等での乗換客、駅ホーム内での乗客分布の偏り、列車が遅れることによる乗降客の集中を考慮することが、課題として挙げられる。

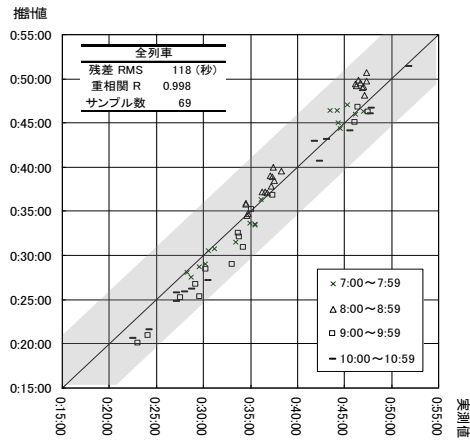


図3. 新百合ヶ丘～新宿間の所要時分(時間帯別)

表2. 精度評価

	7:00~7:59	8:00~8:59	9:00~9:59	10:00~10:59
残差 RMS	83	118	149	118 (秒)
重相関 R	0.999	0.999	0.999	0.999
サンプル数	18	22	15	14

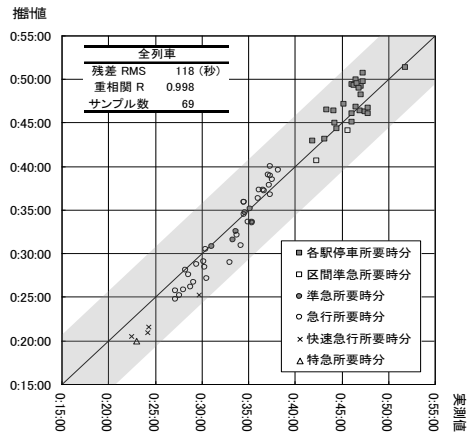


図4. 新百合ヶ丘～新宿間の所要時分(列車種別)

表3. 精度評価

	各駅停車	区間準急	準急	急行	快速急行
残差 RMS	118	111	73	111	192 (秒)
重相関 R	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
サンプル数	24	2	6	32	4

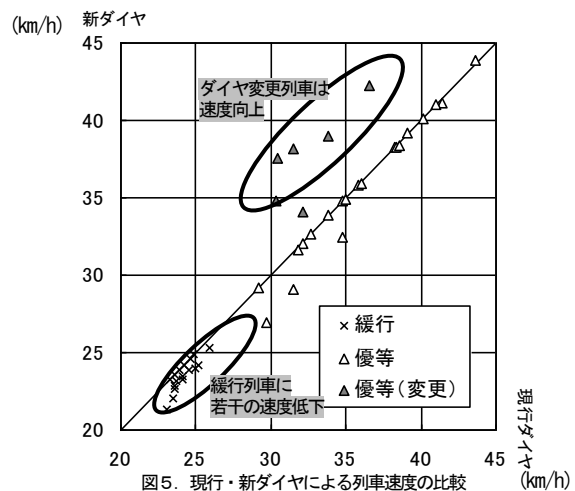


図5. 現行・新ダイヤによる列車速度の比較

参考文献

- 1) 岩倉・原田ほか:「都市鉄道のピーク需要分散策を念頭においた時刻刻需要予測モデルの研究」
- 2) 山口ほか:「首都圏の実時間鉄道利用者流動推計システムの構築」
- 3) 大戸ほか:「鉄道駅における旅客流動に関する研究 その8乗降速度に関する実験」

謝辞: 小田急電鉄株式会社にはデータの提供など、多大なご協力を頂きました。ここに感謝の意を記します。