

# マルチエージェントシミュレーションを用いた都市鉄道の列車速度の推定手法\*

A methodology for estimating speed of urban railway using multi agent simulation \*

宮崎信介\*\*・藤代隆正\*\*\*・岩倉成志\*\*\*\*

By Shinsuke MIYAZAKI \*\*・Takamasa FUJISHIRO \*\*\*・Seiji IWAKURA \*\*\*\*

## 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る。運輸政策審議会は、都市鉄道の整備水準として「三大都市圏の鉄道においては、すべての区間の混雑率を150%（但し、東京圏は当面180%以内）とすることを旨とする」としている。鉄道事業者は、混雑率180%を目標として、運行本数の増発や列車の長編成化により対応してきたが、ダイヤが飽和状態となり、列車速度の低下や慢性的な遅延が発生する状態に陥っている。

今までの列車速度の推定手法として、岩倉・原田<sup>1)</sup>、田口ら<sup>2)</sup>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ている路線においては、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、シミュレーションを用いた列車速度の推定方法の構築を目的とする。そこで、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、本研究では、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、東京圏の通勤路線としての性質を持った小田急小田原線の新百合ヶ丘～新宿間とする。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、2000年11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12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

シミュレーションの構成として、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。

### (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い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。

### (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。

#### a) 列車エージェント

列車エージェントの行動ルールを示す(図1)。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。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。更に、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で、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で、列車が相互に与える影響をリアルタイムに考慮したシミュレーションが可能となる。

#### b) 駅エージェント

駅エージェントの行動ルールを示す(図2)。まず、最も近い距離にある接近列車を確認し、列車が停車・通過するかを判断する。駅に停車すると判断した場合、決められた駅停車時分を経過するまで、列車を駅に停車させる。また、通過待ち等を行う駅では、「後続列車が追い抜くまで駅で停車する」といったルールを追加している。

\*Key Words：鉄道計画，交通流，

マルチエージェントシミュレーション

\*\*正会員，荒川区役所

(東京都荒川区荒川2-2-3, TEL03-3802-3111)

\*\*\*非会員，九州旅客鉄道株式会社

\*\*\*\*正会員，工博，芝浦工業大学

(東京都江東区豊洲3-7-5, TEL03-5859-8354)

### c) 信号機エージェント

信号機エージェントの行動ルールを示す(図3)。まず、信号機を通過した最寄りの列車位置を取得する。その列車位置に応じて信号機の現示色を決定し、後続の列車に対して掲示する。この処理を繰り返すことにより、信号機を通して列車が相互に与える影響の考慮が可能となる。

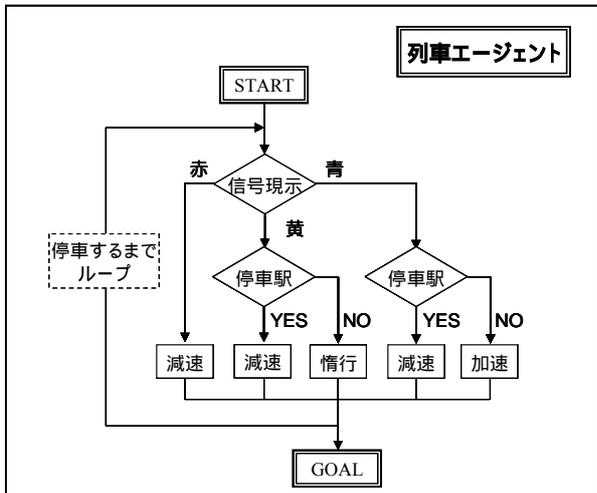


図1. 運転アルゴリズム

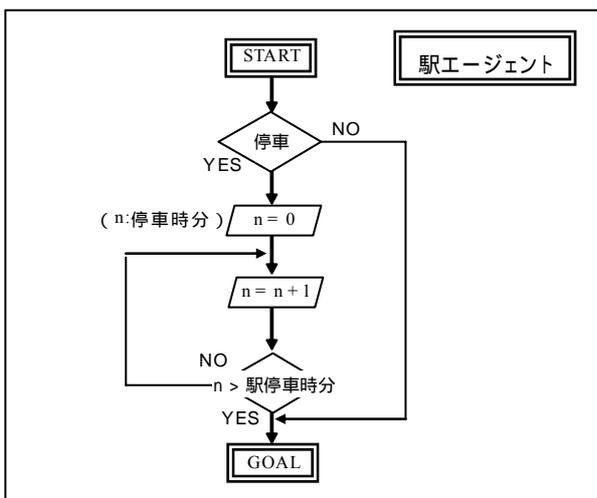


図2. 駅アルゴリズム

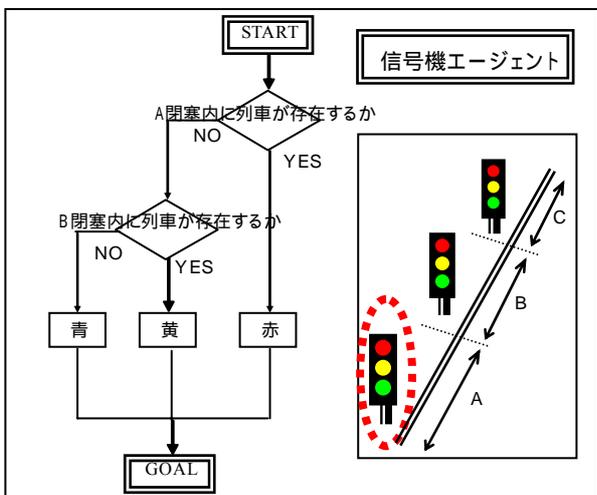


図3. 信号機アルゴリズム

### 4. シミュレーション結果

シミュレーションより出力されるデータを分析し、シミュレーションの再現性を考察する。

#### (1) シミュレーションの再現性

図4, 図5に、シミュレーションより出力された急行と各駅停車の速度変化を示す。横軸に距離、縦軸に速度をとって、列車速度の変化をグラフ化したもので、一般的に運転曲線(前方の列車の影響を受けない自由走行状態で、車両性能や線路条件から算出される理論上の速度変化グラフ)と呼ばれる。シミュレーションで得た数値と小田急電鉄が作成している運転曲線を比較した結果、極めて近似的な結果が得られ、シミュレーションの再現性を確認できた。

#### (2) 駅間走行時分に関する考察

時間帯による駅間走行時分の変化を表1に示す。ここでは、新百合ヶ丘~向ヶ丘遊園間と成城学園前~下北沢間を走行する急行列車の駅間走行時分を取り上げた。ダイヤ駅間走行時分と推定駅間走行時分、いずれの平均値も、早朝からピーク時までほぼ増加する傾向にあり、以後は減少に転じる。これは、列車本数の増加に伴い線路内が混雑し、列車速度の低下が発生している事を再現している。また、全体的に駅間走行時分は短く推定される傾向にある事が分かった。

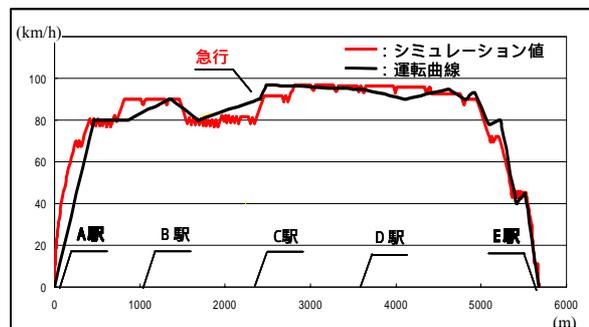


図4. 速度変化(急行)

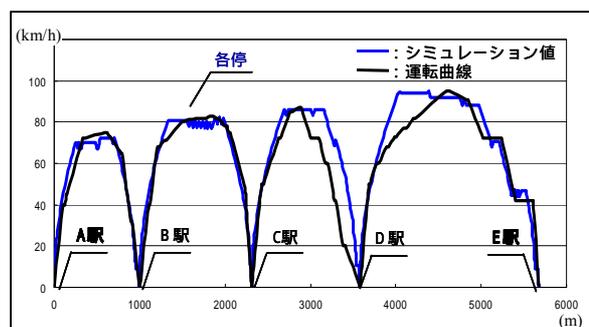


図5. 速度変化(各駅停車)

表 1. 駅間走行時分

新百合ヶ丘～向ヶ丘遊園間の結果(急行)				成城学園前～下北沢間の結果(急行)					
時間帯	駅間走行時分			差分	時間帯	駅間走行時分			
	ダイヤ	推定値				ダイヤ	推定値		
6時台	A	0:05:00	0:05:15	(+) 0:00:15	6時台	A	0:06:00	0:06:25	(+) 0:00:25
	B	0:05:00	0:05:15	(+) 0:00:15		B	0:06:00	0:06:25	(+) 0:00:25
	C	0:05:00	0:05:15	(+) 0:00:15		C	0:06:00	0:06:25	(+) 0:00:25
	D	0:05:00	0:05:15	(+) 0:00:15		D	0:06:00	0:06:25	(+) 0:00:25
平均値		0:05:00	0:05:15		平均値		0:06:00	0:06:25	
7時台	E	0:08:00	0:07:12	(-) 0:00:48	7時台	E	0:07:00	0:06:24	(-) 0:00:36
	F	0:09:00	0:07:27	(-) 0:01:33		F	0:08:00	0:08:57	(+) 0:00:57
	G	0:09:00	0:07:20	(-) 0:01:40		G	0:08:00	0:09:05	(+) 0:01:05
	H	0:08:00	0:07:12	(-) 0:00:48		H	0:07:00	0:06:40	(-) 0:00:20
平均値		0:08:30	0:07:18		平均値		0:07:30	0:07:46	
8時台	I	0:09:00	0:08:09	(-) 0:00:51	8時台	I	0:07:00	0:06:25	(-) 0:00:35
	J	0:09:00	0:07:27	(-) 0:01:33		J	0:08:00	0:09:00	(+) 0:01:00
	K	0:09:00	0:08:09	(-) 0:00:51		K	0:07:00	0:06:35	(-) 0:00:25
	L	0:07:00	0:06:12	(-) 0:00:48		L	0:07:00	0:06:27	(-) 0:00:33
平均値		0:08:30	0:07:29		平均値		0:07:15	0:07:07	
9時台	M	0:05:00	0:05:15	(+) 0:00:15	9時台	M	0:08:00	0:06:25	(-) 0:01:35
	N	0:06:00	0:05:15	(-) 0:00:45		N	0:08:00	0:06:25	(-) 0:01:35
	O	0:05:00	0:05:15	(+) 0:00:15		O	0:09:00	0:07:24	(-) 0:01:36
	P	0:06:00	0:05:15	(-) 0:00:45		P	0:08:00	0:07:24	(-) 0:00:36
平均値		0:05:30	0:05:15		平均値		0:08:15	0:06:55	

(3) 線路内混雑に関する考察

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6、図7に示す。但し、途中駅での列車においては、到着時刻に関わらず基本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。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にされる数値であり、概ね30秒程度である。また、列車には駅に到着する順序を守るように運行するルールを与えている。つまり、列車は前後に存在する列車にのみ影響されて走行する。

a) 時間帯別に見る傾向

図6は、新百合ヶ丘～新宿間におけるダイヤ上の所要時分と、シミュレーションによる推定所要時分を時間帯別にプロットして比較したグラフである。運行される列車の時間帯によって傾向が分かれており、始発～6:59、7:00～7:59の列車は、実際のダイヤと推定値がほぼ整合しているが、8:00～8:59、9:00～9:59の列車は、ダイヤに対して早着していることが分かる。ピーク時のダイヤには、運行に支障をきたさないように予め余裕を持たせてあるが、駅停車時分が変化しないという設定でシミュレーションを行った為、ダイヤに対して誤差が生じる結果となった。一方で、オフピーク時間帯は、列車がスムーズに運行されることを前提としてダイヤを組んでいる為、大きな誤差は生じなかった。

b) 列車種別ごとに見る傾向

図7は、新百合ヶ丘～新宿間におけるダイヤ上の所要時分と、シミュレーションによる推定所要時分を列車種別ごとにプロットして比較したグラフである。列車種別による傾向として、各駅停車の所要時分の推定値がダイヤより長くなる列車が見られた。本来なら、微少な所要時分増は駅停車時分の短縮により解消されるが、シミュレーションでは、最低でも基本駅停車時分だけ停車させた為、推定所要時分が増加した。一方で、急行列車をはじめとする優等列車は、推定所要時分が短くなる傾向が見られた。これは、各駅停車に比べて混雑が予想されるラッシュ時の優等列車のダイヤには、予め余裕を持たせてあるが、乗降者数に関わらず駅停車時分が変化しないという設定でシミュレーションを行った為、誤差が生じる結果となった。

c) まとめ

どの時間帯、列車種別においても、一定の相関が得られる結果となった。今後は、ダイヤに設定されている余裕時分を考慮した列車エージェントの運転アルゴリズムの確立や、列車間が相互に与えている影響として、乗換駅における後続列車の接続待ち(代々木上原駅における先に到着した新宿行き列車と、後から到着する千代田線直通列車の待ち合わせ)や緩急の接続待ちを考慮した駅エージェントの構築が必要である。

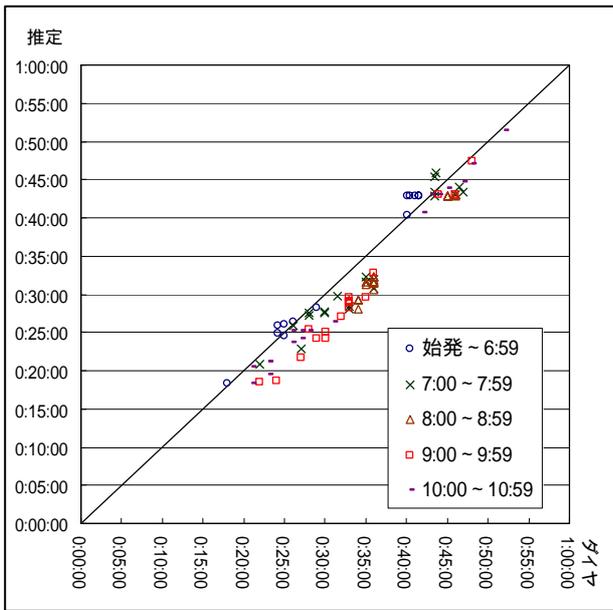


図6.新百合ヶ丘～新宿の所要時分(時間帯別)

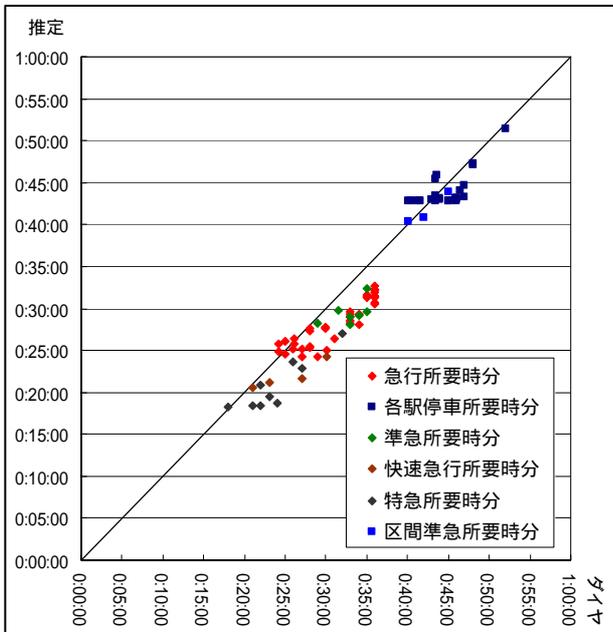


図7.新百合ヶ丘～新宿の所要時分(列車種別)

## 5. 駅停車時分の分析

前章までの駅停車時分は、基本駅停車時分として乗降者数に関わらず一定の値を与えていたが、ここでは乗降者数によって変動する駅停車時分モデルを検討する。

### (1) 駅停車時分モデル

大戸<sup>3)</sup>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。駅停車時分を $t_s$ 、1ドアあたりの乗降者数を $x$ 、車内人数を $y$ とする。 $\gamma, \eta, \omega$ はパラメータである。分析対象は、小田急小田原線新百合ヶ丘～代々木上原(上り方面)の急行停車駅とする。

### (2) 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定値の比較を行った結果、乗降者数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2)。例として、下北沢における駅停車時分の実測値と推定値の比較を図8に示すが、残差が大きい列車もあり、更なる精度向上の検討が必要である。

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

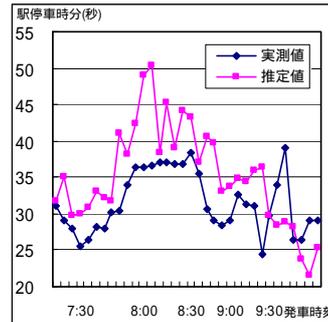


図8.駅停車時分の比較(下北沢)

表2.推定結果

	パラメータ	t値
	$\gamma$	-0.031 -2.899
	$\eta$	1.919 4.548
	$\omega$	0.049 3.522
	重相関係数	0.918
	サンプル数	170

## 6. 結論

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。駅間走行時分、駅停車時分の推定において良好な結果を得られた。今後は、各列車の駅停車時分の設定を基本駅停車時分とするのではなく、5章で示した駅停車時分モデルを導入し、シミュレーションに組み込んだものを構築し、講演時に発表したいと考えている。

### 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 おいた時刻別需要予測モデルの研究」, 運輸政策研究 Vol.8 No.3 2005 Autumn, page004-015, 2005.
- 2) 田口ほか:「首都圏の実時間鉄道利用者流動計システム の構築」, 運輸政策研究 Vol.8 No.1 2005 Spring, page031-035, 2005.
- 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」, 日本建築学会学術講演梗概集, page845-846, 2006.
- 4) 國松ほか:「列車運行・旅客行動シミュレータの構築」, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 Vol.13th, page347-350, 2006.

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いただいた。また、大都市交通センサデータの加工は、(株)ライテックの土居厚司氏にご協力いただいた。ここに感謝の意を記します。