

エージェントモデルによる 都市鉄道の遅延対策評価

小林 渉¹・岩倉 成志²

¹学生会員 芝浦工業大学大学院地域環境システム専攻 (〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5)

E-mail: na17103@shibaura-it.ac.jp

²正会員 芝浦工業大学教授 工学部土木工学科 (〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5)

E-mail: iwakura@sic.shibaura-it.ac.jp

朝ラッシュ時間帯の慢性的な混雑・遅延問題の解決は急務である。まず遅延対策の取組みを整理するため、東京圏の大手鉄道11事業者を対象に列車遅延対策に関するインタビュー調査を実施した。次に朝ラッシュ時間帯の列車1本1本の駅間走行と、旅客1人1人の乗降行動を再現するマルチエージェントシミュレーションシステムを構築し、様々な列車遅延対策を複合的に行った場合の遅延対策評価を行った。遅延対策案として移動閉そくシステム、分単位での発車時刻調整、列車の加速性能向上の3案を検討し、各案を単独で実施した場合には渋谷駅断面で最大38%の遅延減少、3案同時に実施した場合の遅延は49%減少、発車時刻調整と加速性能向上により、溝の口駅断面で85%減少する推計結果となった。

Key Words :train delay, Agent simulation, High frequency operation, Interview

1. はじめに

(1) 研究の目的

東京圏の都市鉄道は、複数の路線で混雑率が非常に高い状況にある。混雑緩和に向けた輸送力増強のために、鉄道会社は相互直通運転や高頻度運転などを行ってきた。これらは利用者に対しサービス水準の向上をもたらした一方で、運転間隔を狭めたことで後続列車へ遅延が伝播しやすくなり、列車遅延が慢性的に発生している。

この混雑・遅延問題改善は 2016 年 4 月の交通政策審議会答申において、重要項目の一つとされている。東京都心部の人口は 2030 年頃まで増加の予測がされ、利用者減少による混雑・遅延問題の解決は考えにくく有効な対策が求められる。

そこで、鉄道事業者が過去に実施した混雑・遅延対策を精査し、事業者間で共有することは重要なことであるが、鉄道事業者横断的に遅延対策を整理した例はない。加えて様々な対策案を事前に評価する手法が求められるが、その技術は確立していない。

本研究は、東京圏の慢性的な遅延現象解消にむけて、複数の対策の効果を定量的に把握することを目的とする。具体的には、鉄道会社へ遅延対策に関するイ

ンタビュー調査の実施、朝ラッシュ時間帯の実路線の列車走行と旅客乗降行動をエージェントモデルで再現する列車運行シミュレーションシステムを開発し、遅延対策案を実施した際のその効果を推計する。

(2) 対象路線と遅延実態

本研究の対象路線は、東急田園都市線の中央林間駅から渋谷駅および、東京メトロ半蔵門線の渋谷駅から押上駅間の48.3kmとする。この路線は上記2路線に加え東武スカイツリーラインの3路線で相互直通運転を実施している。対象路線の最混雑時間帯の混雑率は、田園都市線が池尻大橋→渋谷駅間で184%、半蔵門線が渋谷→表参道間で171%(いずれも2015年調査)であり、東京圏でも混雑が激しい路線である。平日朝ラッシュ時間帯の田園都市線の平均最大遅延時間は4.76分(2013年4月～11月並びに2014年4月～11月の平均)である。

朝ラッシュ時間帯の遅延が発生・拡大する原因を整理する。図-1は2014年10月のある平日の東京メトロ半蔵門線清澄白河駅到着時のダイヤからの遅れである。この日は車内急病人やドア引き込まれ等の突発的な運行トラブルの発生していない日である。横軸に列車を1本1本とり、縦軸の左に到着遅延量をとっている。図から7:30過ぎに渋谷駅に到着する列車から列車遅延が

発生、8:30過ぎまで拡大し、以後減少している様子が見える。なお、7:30前後で到着遅延が負値となっている列車があるが、これはダイヤよりも早く到着断面である清澄白河駅に到着したものである。

到着遅延は、駅停車時間の延びに起因する停車遅延と、駅間走行時間の延びに起因する走行遅延、更に始発駅(長津田・中央林間)での折返し列車遅れなどの出発遅れに区別できる。7:30過ぎから停車遅延が大きくなるのがわかる。つまり同時間帯は駅での停車時間がダイヤを超過している。一方で走行遅延はマイナスの値をとっており、所定のダイヤよりも早く走行できていることを示している。元々走行時間には数秒の余裕分が含まれ、停車時間が超過した場合にはその遅延を回復する余力があるため、到着遅延を抑制する方に働いている。

8:30を過ぎると到着遅延の発生原因の多くが走行遅延に変化する。走行遅延が増加する原因には、朝ラッシュ時間帯の列車の運行間隔が強く影響している。

図-1の破線が渋谷駅の運転間隔である。列車遅延は列車間隔が最小(130秒間隔)の時間帯で発生し拡大している。この時間帯は走行時間の余裕分が他の時間帯と比較して少なく、停車遅延を吸収しにくく後続列車へ遅延が波及しやすい時間帯である。結果として8:00過ぎより走行遅延のマイナス分が減少し、8:30を過ぎるころにはプラスへ転じ列車遅延の直接的な原因になる。

最後に運転間隔をこの程度まで狭める理由として特定時間帯に集中する旅客の存在がある。利用者数(混雑)の指標として渋谷駅での降車旅客数(2013年調査)を図-1の実線で示す。図からピーク時間帯に向けて増加する需要に対応するために列車間隔を狭めているが、列車間隔が最小の7:30から8:30においても利用者数は増加しており、同時間帯に過度に集中する利用者の乗降時間の延びが停車遅延となって表れている。

朝ラッシュ時の慢性的な遅延は以下の3点が連鎖的に発生している。

- ・特定の時間帯に利用者が集中し停車遅延が発生する。
- ・運転間隔を狭めると走行時間の余裕分が減少し後続列車へ遅延が波及しやすい状態を招く。
- ・需要のピークが過ぎ停車遅延が減少しても、先行列車が停車時間超過で遅延しているため駅に進入できず走行遅延が増加する。

このような列車遅延の傾向は突発的な運行トラブルが発生した日も同様に示している。図-2は突発的な運行トラブルの発生している2014年10月のある平日の列車1本ごとの清澄白河駅到着遅延である。突発的な運行トラブルの前後で到着遅延が大きく増加している。ラッシュ時間帯全体でみると、到着遅延の発生要因が

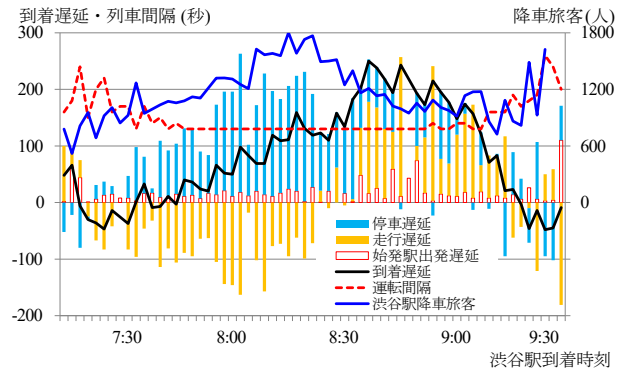


図-1 突発的なトラブルのない日の列車遅延

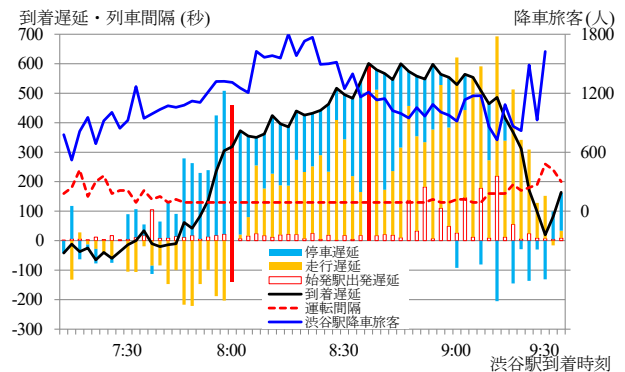


図-2 突発的なトラブルが生じた日の列車遅延

停車遅延から走行遅延へ移行していく様子が図-1と似ている。

2. 既存研究の整理

列車遅延対策に関する既存研究として、山村¹⁾は東京地下鉄東西線で実際に行った、信号設備や駅設備、車両設備のハード的対策と、ダイヤや駅オペレーションの見直しによるソフト的対策による遅延短縮を時系列比較により定量的に評価している。仮屋崎ら²⁾は、東急電鉄で実施された遅延対策や田園都市線渋谷駅での在線状況表示器の設置や発車合図の見直しにより遅延削減効果があったことを示している。これらの研究では鉄道事業者が実際に取組んだ遅延対策について整理されているが、鉄道事業者遅延対策の取組みを横断的に整理した例はない。

列車運行シミュレーションに関する研究として、國松ら³⁾は列車走行・旅客流動シミュレータを開発している。このシミュレータでは各列車の乗降量をもたせることができるが、実路線を対象に現況再現性の確認は取っていない。仮屋崎ら⁴⁾は東京圏の都市鉄道を対象に遅延の実態分析を行った上で、セルオートマトン法による列車運行シミュレーションシステムを構築している。システムは列車運行を精度よく再現し、遅延対策に関する検討も行われているが、停車時間を

推計するモデルが、旅客1人1人の行動を再現し推計したものではない。列車遅延現象が、停車遅延により発生していることを鑑みると、旅客乗降行動が列車遅延へ影響していると考えられ、これらを再現するシミュレーションシステムが望まれる。

旅客1人1人の行動を再現するために、旅客の乗車位置選択行動をモデル化して、扉ごとの乗降人数を推計する手法がある。既存研究として、筆者ら⁹⁾、美谷ら⁹⁾、青木ら^{7,8)}、大佛ら⁹⁾、Liu et al.¹⁰⁾の研究がある。しかし、これらの研究結果を運行シミュレーションに反映し幅広い遅延対策の検討を行った例はない。

以上の研究から、遅延対策の取組みを整理し研究へ反映することと、遅延対策を鉄道事業者間で共有することが重要であり、鉄道事業者横断的にこれまでの取組内容を整理する必要がある。また、列車シミュレーションの研究、乗車位置選択行動に関する研究、列車遅延対策に関する研究はそれぞれ散見されるが、それらを統合した研究は見られない。

そこで本研究では、鉄道事業者へのインタビュー調査により遅延対策のメニューを整理し、旅客の乗車位置選択行動を考慮した列車遅延連鎖予測シミュレーションシステムの開発を行い、そのシステムを用いて遅延対策の検討を行う。

3. 鉄道事業者11社の遅延対策比較

列車遅延対策は鉄道会社により取組み内容が様々であり、鉄道会社横断的に整理することは遅延対策の検討をする上で重要である。本章では、大手鉄道11事業者に対して実施したインタビュー調査の概要と結果を整理する。

(1) インタビュー方法

インタビュー調査は、東京圏の大手鉄道11事業者を対象に行った。筆者を含めた調査員2名が鉄道事業者の担当者1~8名に対し、予め送付した質問内容に沿ってインタビューを行った。質問内容は、1.列車遅延の発生実態、2.駅間走行遅延対策、3.駅停車遅延対策、4.情報収集・発信、5.今後実施したい遅延対策である。質問内容の送付の段階では具体的な遅延対策を提示せず、幅広い遅延対策の取組みを聞き取るようにした。

(2) 各社の遅延対策

インタビューで明らかになった遅延対策を表-1に示す。事業者によって取組み内容が様々であることがわかる。遅延対策は大きく乗降時間増加対策、走行時間

増加対策、ダイヤ設計の工夫、需要の分散に分けられた。

乗降時間増加対策は、旅客の乗降を円滑化させるための取組みと考えることができる。駅改良はホーム上の旅客の歩行可能な空間を広げる取組みであり、車両改良では長編成化による利用者の分散やワイドドア車両による乗降空間の拡大を図る取組みである。またソフト的な対策として整理員の配置や、車両運用を工夫することで遅延の拡大を抑制する取組みも明らかになった。

走行時間増加対策は、列車の走行時間を短縮するための取組みである。主に路線の大規模な改良工事や信号設備の更新などを事業者ごとに取組んでいる。また車両の加速性能の向上は、低速域と高速域の向上を別々に取組んでおり、路線の特性に取組む内容が異なることがわかった。

ダイヤ設計の工夫は、遅れにくいダイヤとするための取組みである。途中駅止まりの列車を減らすことで折返し設備へ列車進入の分岐操作や全旅客の降車確認に要する駅停車時間のロスを減らす取組みや、混雑が激しい列車への緩急接続パターンを変更させ乗降時間の短縮を狙った取組みを行っている。

最後に需要の分散は、利用者に対するオフピーク通勤の呼びかけによりピーク時間帯の混雑と遅延を減らす取組みである。オフピーク通勤の呼びかけや、オフピーク時間帯に速達列車を増発している事業者がある。

4. 列車遅延連鎖予測シミュレーションの構築

本研究では、列車遅延対策検討ツールとして、列車遅延連鎖予測シミュレーションシステムを構築した。本研究では、(株)構造計画研究所のマルチエージェントシミュレータ *artisoc Ver3.5* を使用してプログラミングを行う。本研究では、エージェントを列車、ATC信号、勾配、駅、旅客などとし、その相互作用によって朝ラッシュ時間帯の列車運行を再現する。

システムは5つのサブモデルから成っている。走行時間推計サブモデルは列車の駅間走行を再現したモデルであり、乗降時間推計サブモデルは列車の最混雑扉の旅客の乗降行動を再現したモデルである。確認時間推計サブモデルはドア閉めから発車までの確認作業を再現したモデルである。運転間隔調整サブモデルは、突発的なトラブルにより長時間の停車が発生した場合に、周辺列車に対して運転整理を行うモデルである。乗車位置選択サブモデルは、乗降時間推計モデルで生成する旅客エージェント数を決定するため、乗車旅客

表-1 遅延対策の鉄道事業者インタビュー結果（現在精査中）

				A社	B社	C社	D社	E社	F社	G社	H社	I社	J社	K社	
乗降時間増加対策	ハード的対策	駅改良	ホーム上屋設置					○	○						
			ホーム拡幅					○	○						
			柱の化粧取り外し					○							
			階段増設		○						○	○		○	
			ホーム増設(2面3線化等)				○			○	○			○	
			コンコース増設								○				
			ベンチの移設	○											
	車両	多扉車両						○							○
		ワイドドア車両									○				
		広幅車両		○											○
		戸ばさみ検知機能	○					○							
		長編成化								○		○	○		
		発車合図の工夫							○						
		ホーム整理員増員							○		○				
ソフト的対策	季節で整理員増員		○						○						
	列車停止位置変更			○				○	○	○					
	車両運用の工夫		○					○	○	○	○				
	旅客整列方法の工夫		○	○	○	○	○								
	発車合図の工夫							○							
	ホーム整理員増員							○		○					
	季節で整理員増員								○						
走行時間増加対策	ハード的対策	路線	複々線化					○			○				
			部分複々線化	○						○					
			連続立体交差		○		○							○	
			安全側線	○							○				
			平面交差解消		○						○				
			曲線改良		○										
		分岐	分岐器改良	○	○				○					○	○
			ATSから改良	○			○						○	○	
			終端部改良						○		○				
			設置場所見直し										○		
		信号	定位置停止装置(TASC)										○		
			閉そく割の分割								○	○			
			駅間最高速度の見直し												○
	ATO化													○	
	車両	高速域	○						○						
		低速域		○											
		先頭M台車									○				
		踏切	○					○							
	ソフト的対策	降下タイミング変更						○							
		運転方法の工夫							○	○	○				
技術の向上						○		○							
ダイヤ工夫設計			途中駅どまりの列車削減								○				
			優等列車の格下げ												
			ダイヤを寝かす	○							○				
			待避パターンの変更	○							○				
			ヒゲ切り								○			○	
			通過待ち列車に余裕時間を付与	○											
			最混雑時間帯の列車本数削減						○						
停車時間を短めにしたダイヤ設計															
需要の分散			オフピーク利用の推進					○	○	○	○				
			オフピーク時に優等列車増発					○		○					
			系列バス会社との連携						○						

の乗車扉選択行動を駅構造等からモデル化したものであり、階段増設等のホーム構造の変化に伴う乗降位置の分散効果を評価するためのものである。

シミュレータ上では時間単位をstepと呼んでいる。本研究では、走行・乗降両シミュレーションで1stepを0.2秒とし、個々のエージェントの速度や加速度等を変換して用いている。空間の大きさについては、走行シミュレーションは列車の編成長や線形情報の観点から1マスをも100mとし、乗降シミュレーションは旅客1人のサイズに合わせるため1マスを現実の40cmとしている。

(1) データ概要

本研究では東京急行電鉄株式会社および東京地下鉄株式会社よりデータを提供いただいている。そのデ

ータと現地調査により取得したデータを表-2に示す。

(2) 走行時間推計モデル

このモデルでは、路線の線形情報(ATC信号、分岐情報)と車両性能、発着時刻表を入力し、各駅の列車発着時刻を出力する。シミュレーション実行時の様子を図-3に示す。モデルでは列車や駅、勾配、ATC信号エージェントを路線上に配置する。ATC信号エージェントは、周辺の列車エージェントの位置を把握し制限速度を決定する。列車エージェントは、ATC信号エージェントの制限速度から、減速の有無を判断する。減速が不要の場合には列車エージェントの速度とATC信号エージェントの制限速度を比較し、勾配の影響を受け加速もしくは惰行する。速度超過している場合や停

表-2 使用データ一覧

区分	データ名称	内容	期間
路線	信号コード表	閉そくの最高速度，先行列車の在線位置ごとの制限速度，閉そく長，勾配情報が記載	2014年7月～11月時点のもの
	列車停止位置情報	列車の停止座標が記載	2014年7月～11月時点のもの
	運転曲線図	先行列車の制約が無い状態における列車の各地点における速度と所要時間をグラフ化したもの	2014年7月～11月時点のもの
	エアセクション位置	き電区間の境界を示し，基本的には停止禁止位置の座標が記載	2015年12月
車両	車両性能表	東急5000系と8500系，東京メトロ08系の加減速度，車両寸法が記載	-
	引張力曲線	東急8500系の引張力が記載	-
駅	駅ホーム上図面	各駅のホームの長さや幅が記載	2014年7月～11月時点のもの
	階段・エスカレータ位置情報	各駅の階段・エスカレータ位置が記載	2015年度
	乗降客の位置座標	ビデオ映像から得られた1秒ピッチの位置座標	2010年11月～12月
運行	運行実績データ	期間内の全列車の発着時刻が記載．軌道回路通過時刻のため誤差を含む	2014年7月～11月のうち平日25日
	運行実績データ補正值	運行実績データの軌道回路通過時刻と発着時刻の補正值が記載	2014年10月調査
	発着時刻表	運行計画上の各駅の発着時刻が記載	2014年7月～11月時点のもの
	遅延実績データ	朝ラッシュ時間帯に発生した遅延のうち，その要因明らかなものについて記載	2013年4月～11月 2014年4月～11月計16か月
	乗降量カウント調査結果	列車ごとの扉別あるいは階段別の乗降人数が記載	2013年度調査
	確認時間調査結果	閉扉後発車までの時間が記載	2014年10月調査
	応荷重データ	各駅発車時の車両ごとの混雑率が記載	2010年11月～12月 2013年2月～3月
需要	第11回大都市交通センサス	各駅各時間帯の鉄道利用者の乗降駅，利用種別，利用目的が記載	2010年度

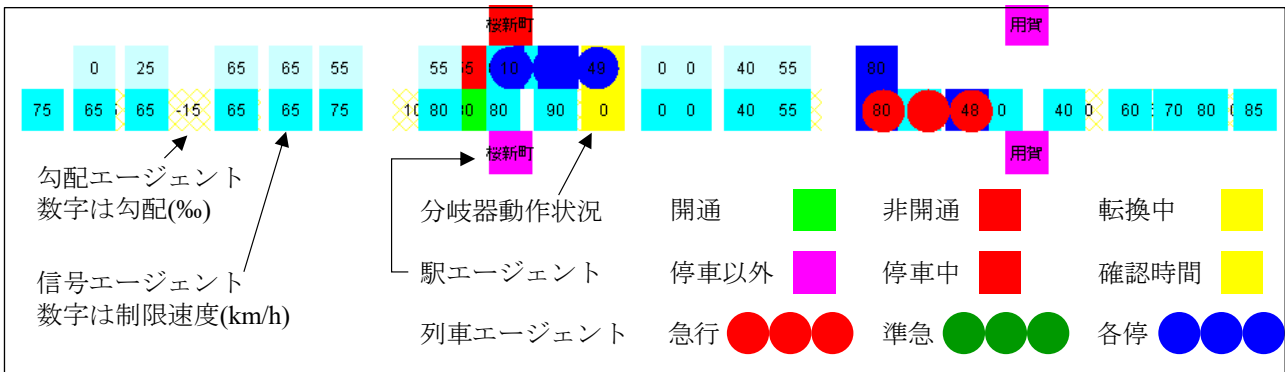


図-3 走行時間推計モデルの様子

車駅が近づくと減速を開始し，最終的に列車停止位置に合わせて停車する。

駅間で列車が停車(機外停車)した場合の再加速には，運転士の確認作業や，車掌のアナウンス等に要する時間として5秒与えている。

この走行時間推計モデルを用いて，駅間走行時間の再現を行うと，実績値と比較した場合に過少推計する傾向がある。これは，乗り心地を考慮した運転士の緩やかな加減速操作や，制限速度を認知してから加減

速を行うまでの時間が考慮できていないことが要因として挙げられる。本研究では，これら部分について，走行調整時間として列車エージェントが駅を発車する際に，田園都市線は10秒，半蔵門線は5秒を与え精度確保を行っている。

(3) 乗降時間推計モデル

このモデルでは，乗降人数，混雑率を入力し，列車の乗降時間，乗降完了時刻を出力する。乗降時間を

支配するのは、最も乗降人数が多く混雑している1扉であると仮定し、エージェントシミュレーションによる乗降行動の再現範囲は1両の1/4の空間とした。

シミュレーション実行時の様子を図-4に示す。列車が駅に到着すると、乗降行動を再現する扉の乗降人数と混雑率に応じて、乗車旅客エージェントをホーム上に発生させ、降車旅客エージェントと通過旅客エージェントを車内に発生させる。発生させるエージェント数は、後述する乗車位置選択モデルで決定する。

降車旅客エージェントは、自身の前方180度を30度ずつ分割した範囲でエージェント数を探索し、最もエージェント数の少ない方向を向き、回避行動をしながらホーム上を目指し前進させる。

通過旅客エージェントは周囲に存在するエージェント数が少なくなるように、周囲の状況を把握し車内を移動する。通過旅客エージェントのうち、降車旅客エージェントに押されてホーム上に出たものは、再乗車エージェントとなる。

乗車旅客エージェントと再乗車エージェントは、全降車旅客エージェントの降車を確認すると乗車行動を開始する。乗車時には車内奥を目指して乗車行動を行う。扉付近が混雑している場合には押し込み乗車を再現するために歩行速度を落とし乗車行動を行う。乗車旅客エージェントと再乗車エージェントの乗車を確認すると、乗降完了の合図を送り確認時間推計モデルを起動する。

非常に混雑している車両では稀にエージェント同士が車内で互いに重なり合い、身動きが取れない事象が発生する。そのため、降車開始から40秒を経過しても車内に旅客がいた場合、その時点でエージェントを消失させている。

(4) 確認時間推計モデル

駅停車時の閉扉から列車の発車までの時間を推計するモデルである。対象路線全駅で現地調査を実施し確認時間を計測した結果、路線や混雑率により違いが見られた。路線により差が生じた理由は、車掌から運転士へ発車合図を送る際の、乗務員室のドア状態と車掌の立ち方に違いが生じたためである。混雑率による違いは、高混雑率ほど閉扉時に押し込みが生じ、車掌へ合図を送るまでの時間が長くなるためである。これら結果を踏まえて、シミュレーションでは、表-3の平均と標準偏差を正規分布に当てはめて算出している。

ただし、早朝時間帯は混雑率に関わらず確認時間が短い傾向がみられた。ホーム上で合図を送る駅員がおらず、車掌の安全確認のみで発車できるためと考えられる。今後詳細な検討は必要であるが、本稿では当

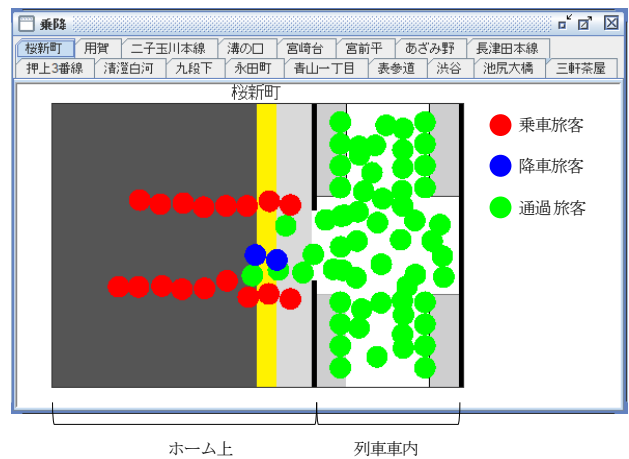


図4 乗降時間推計モデルの様子

表-3 確認時間の設定値

混雑率	田園都市線		半蔵門線	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
~49%	8.7	1.8	15.1	4.3
~99%	10.0	5.0	16.5	2.9
~149%	11.4	3.1	16.3	2.8
~199%	14.3	6.2	17.6	2.5
200%~	17.4	6.1	20.5	2.0

該時間帯の列車の確認時間は最も混雑率の低い水準の平均と標準偏差の正規分布で乱数を発生させる。

(5) 運転間隔調整モデル

突発的なトラブル発生以後の運転間隔整理についてパターン化を行う。突発的な停車が発生すると列車間隔は非常に不均等になる。前方との列車間隔が開いた列車には多くの旅客が乗車しやすくなり、停車遅延が発生しやすい状況にある。運転指令は、前後の列車に対して運転間隔の均等化のために意図的に長時間停車をさせることがある。この運転整理を行う範囲についてルール化を行い、その結果をシミュレーションに反映させた。

図-5は突発的な停車発生直後に周辺列車で、所定の停車時間+60秒以上の停車が発生している列車をプロットしたものである。図中の黒丸が突発的な停車が発生した当該列車であり、白丸が運転整理とみられる停車である。突発的な停車が中央林間に近い駅で発生すると、先行列車に対して運転整理を行い、渋谷方の駅では後続列車への運転整理が散見される。

(6) 乗車位置選択モデル

列車到着時に全扉の乗降人数と混雑率を旅客のODデータと乗降駅の駅構造から推計するモデルである。筆者ら⁹⁾の研究では、乗車駅から乗車する旅客が列車

cの扉kに乗車する確率 P_{ick} は、降車駅までの利用者割合を考慮して式(1)~(4)で表している。

$$P_{ick} = \sum_j P_{ijck} \times \frac{OD_{ij}}{OD_i} \quad (1)$$

$$P_{ijck} = \sum_t (p_{ijckt} \times q_t) \quad (2)$$

$$P_{ijckt} = \frac{e^{V_{ijck} \times WA_{ickt}}}{\sum_k (e^{V_{ijck} \times WA_{ickt}})} \quad (3)$$

$$V_{ijck} = \alpha D_r + \beta ES_{rup} + \gamma ES_{rdn} + \kappa B_r + \theta N_r + \eta S_r + \mu D_d + \nu ES_{dup} + \delta ES_{ddn} + \lambda S_d \quad (4)$$

OD_r :乗車駅iでの発生交通量

OD_d :駅間ijの分布交通量

q_t :列車到着までの時間tに発生する利用者の割合(時刻を15秒ごとに20分割し2分30秒前を最大とする正規分布を仮定)

r:乗車駅を示す添え字

d:降車駅を示す添え字

up:上りエスカレータを示す添え字

dn:下りエスカレータを示す添え字

t:列車番号を示す添え字

D:階段から乗車扉までの距離(m)

ES:エスカレータ有無ダミー

B:階段の裏側ダミー

N:ホーム狭幅員ダミー

S:階段利用率

$\alpha, \beta, \gamma, \kappa, \theta, \eta, \mu, \nu, \delta, \lambda$:パラメータ

パラメータ推定結果を表-4に示す。モデルを用いて乗降人数の実績値と推計値を比較した結果、概ね各扉の乗降人数を再現できている。

(7) 統合モデルの再現精度

(2)から(6)までのモデルを統合し、その時の列車運行の現況再現性を確認する。現況再現性には2014年7月22日から11月14日の期間内で、突発的なトラブルによる列車順序の変更のない平日20日間の運行をシミュレーションした。結果を図-6に示す。

図中の実績値は対象20日間の清澄白河駅到着時の遅延量の平均と標準偏差、推計値は各日10回のシミュレーションを平均し、最も平均に近い1回の結果を当該日の代表とする、20日間の平均値と標準偏差とする。7:30頃に発生する列車遅延の発生と遅延が拡大していく様子は再現できている。ただし、遅延のピークから減少期となる8:30過ぎの遅延は高精度に再現できているとは言えない。清澄白河駅到着遅延量に関する残差RMSは80秒であった。図-7に渋谷駅の到着時の現況再現性を示す。到着遅延の残差RMSは89秒であった。渋谷

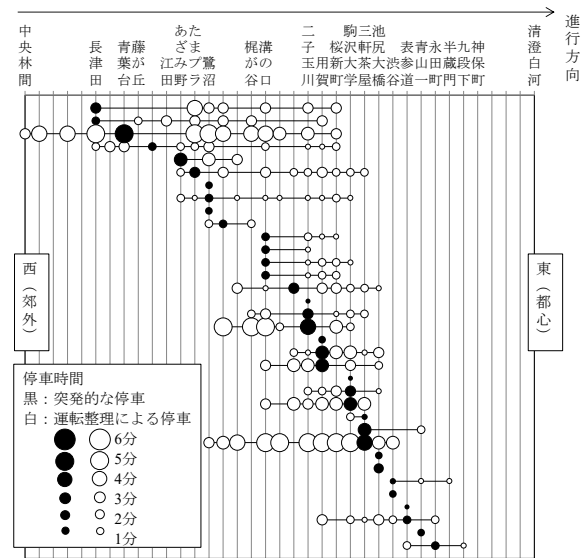


図-5 突発的な停車と運転整理範囲

表-4 パラメータの推定結果

説明変数	パラメータ	t値	判定
RD 距離(m)	-0.013	-75.94	*
RS 階段利用率	0.652	21.99	*
RUPES 上りES	0.328	41.78	*
RDNES 下りES	0.222	23.47	*
RB 裏側	-0.133	-16.62	*
RN 狭い	-0.089	-9.13	*
DD 距離(m)	-0.0013	-12.68	*
DS 階段利用率	1.172	20.08	*
DUPES 上りES	-0.097	-4.70	*
DDNES 下りES	-0.148	-6.96	*
乗車駅重相関係数	0.849		
降車駅重相関係数	0.888		
サンプル数	301		

*1%有意

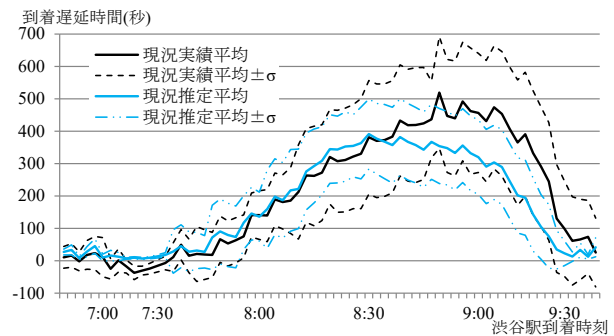


図-6 統合モデルの現況再現性(清澄白河駅到着時)

谷駅では遅延の発生・拡大・収束の時間帯がやや早く推計されている。

遅延対策の検討では20日間のデータから8日間を抽出して行う。抽出した8日間と20日間の清澄白河駅到着時の平均遅延量を図-8に示す。20日間データと大きく変わらない遅延の拡大、収束の様子を、実績値、推計値共に示している。

5. 列車遅延対策の効果分析

本章では、3章のインタビュー結果に基づいて、複数の遅延対策について4章で構築したシミュレーションを用い検討を行う。遅延対策について本稿で取り扱う遅延対策は表-5に示す通りである。個々の遅延対策に加えてこれらの遅延対策を複合的に組み込んだ案の検討を行った。

(1) 移動閉そくシステムの導入

現在対象路線で用いられている信号保安システムである固定閉そく方式に替えて、日本国内でも導入が検討されている移動閉そく方式導入による遅延対策の遅延減少効果を推計する。このシステムは、先行列車との距離を無線により連続的に取得し続けることで、安全を担保するシステムである。2017年4月時点でJR仙石線の一部区間で採用されており、2017年秋を目標にJR埼京線での導入が決まっている¹¹⁾。

このシステムをシミュレーションで再現するため、列車エージェント内の速度決定部分を改良した。前方の列車エージェント・エアセクション・分岐の位置から決まる停止点と、勾配と空走距離を考慮した列車の停止に必要な制動距離との比較を行いながら、列車エージェントの最高速度を決定させる。本研究では空走距離を4秒分とり、余裕距離は東日本旅客鉄道の開発するATACSを参考に100mとしてシミュレーションを行った¹²⁾。

遅延推定結果を図-9に示す。清澄白河駅到着遅延の最大値で121秒の減少、総遅延時間で51%の減少の結果となった。列車間隔を詰めることで走行遅延が短縮され、8:30前後から遅延が減少する結果となった。

(2) 分単位での発車時刻調整

鉄道事業者の作成する運行ダイヤは秒単位であるが、利用者が見る時刻表は分単位であることに着目した遅延対策案である。列車遅延が発生していない時間帯において、発車時刻前に旅客乗降が完了した場合に、利用者への不満が少ない条件に限り駅に発車合図を出すケースについて推計する。下記に示す3点を満たした場合に、確認作業を行い発車できるとした。

- ・駅での乗降が完了している。
- ・ダイヤの発車時刻と分単位で同一である。
- ・ダイヤの発車時刻との差が30秒以内である。

この条件のもとでシミュレーションを行った結果、清澄白河駅到着時の総遅延時間で2%の削減となった。遅延の削減量は他の遅延対策と比較し劣るが、極力コストを掛けずに遅延削減が可能であることを示した。

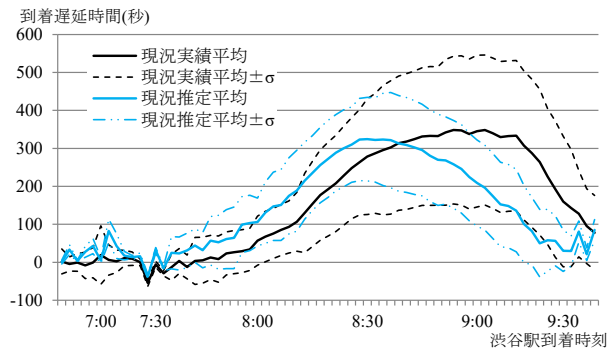


図-7 統合モデルの現況再現性(渋谷駅到着時)

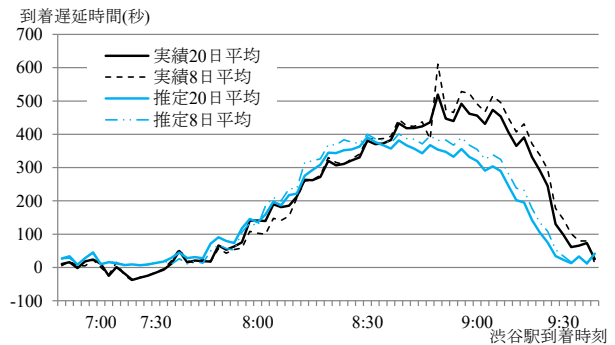


図-8 抽出8日間の清澄白河駅到着時の平均遅延量

表-5 検討した遅延対策案

単一の遅延対策	複合的な対策
移動閉そくシステム	移動閉そく+発車時刻調整
分単位での発車時刻調整	移動閉そく+加速性能向上
加速性能向上	発車時刻調整+加速性能向上
	移動閉そく+発車時刻調整+加速性能向上

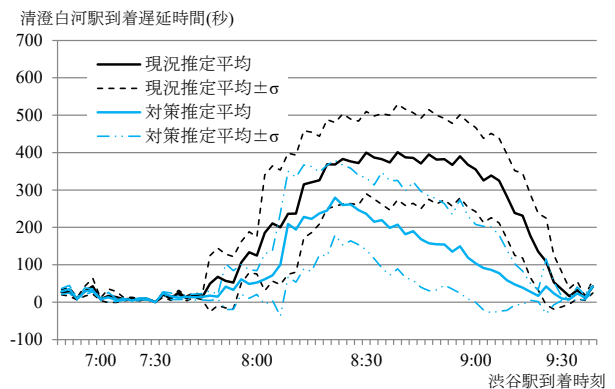


図-9 移動閉そくによる遅延減少効果

(3) 列車の加速性能向上

対象路線の加速性能を向上させた場合について検討する。対象路線ダイヤや本シミュレーションの走行性能は最も劣る東急8500系を用いて作成されている。実際には加速性能の良い5000系なども多く運用に含まれており、性能の良い車両は走行時間で回復できる遅延量が多いと考える。本検討においては車両性能を東急8500系の性能から東急5000系相当に向上させた場合についてシミュレーションを行った結果、総遅延量が10%の減少となった。

(4) 複合的な遅延対策

本研究で検討した遅延対策案を溝の口，二子玉川，渋谷，清澄白河の各駅到着駅の到着遅延の合計での遅延減少量を表-6に示す。遅延対策ごとに駅により効果が異なることが分かる。減少量が100%を超えている遅延対策は，対象とした駅の列車到着が時刻表よりも早かったためである。図-10は移動閉そく，発車時刻調整，加速性能向上の3つを同時に行った際の遅延減少量である。

6. おわりに

本研究では，都市鉄道の慢性的な混雑・遅延問題解決に向け，鉄道事業者へ遅延対策のインタビュー調査の実施，東急田園都市線と東京メトロ半蔵門線を対象に，列車運行を再現する列車遅延連鎖予測シミュレーションシステムを構築し，複数の遅延対策効果の分析を行った。

3章では列車遅延対策に関する鉄道事業者インタビューを行った。その結果，乗降時間増加対策や走行時間増加対策について，各社で遅延対策の実施内容が大きく異なっていることが明らかとなった。このような遅延対策について鉄道事業者横断的にインタビューを行った事例はなく，この結果は価値があるといえる。

4章では列車遅延連鎖予測シミュレーションの構築を行った。まずマルチエージェントシミュレーションシステムを用いた本研究の概要を説明したうえで構成しているモデルの説明を行った。走行時間推計モデルでは，路線を再現した空間上に駅，信号，分岐，勾配エージェントを配置し列車を走行させるモデルの構築を行った。

乗降時間推計モデルは，乗車旅客，降車旅客，通過旅客に分けそれぞれのルールを示した。それぞれの旅客エージェントが相互作用によって歩行速度と進行方向を決定するモデルを構築した。通過旅客は降車旅客に押されてホーム上に出る再乗車行動も再現している。

確認時間推計モデルは，筆者の現地調査により明らかになった路線での確認時間の違いを，シミュレーションシステム内に組み込んだ。運転間隔調整モデルは突発的な停車以後の運転整理について，突発的な停車の発生駅と運転整理範囲について運行実績データを用いてパターン化した。乗車位置選択モデルは乗降駅の駅構造と旅客OD情報からパラメータ推定を行った。

最後にサブモデルを統合しシミュレーションの現況再現性の確認を行った。シミュレーションの現況再

表-6 各駅到着時の到着遅延減少量

遅延対策	溝の口	二子玉川	渋谷	清澄白河
移動閉そく	-69%	-34%	-38%	-51%
発車時刻調整	-59%	-17%	-3%	-2%
加速性能向上	-10%	-9%	-8%	-10%
移動閉そく+発車時刻調整	-81%	-38%	-41%	-52%
移動閉そく+加速性能向上	-128%	-41%	-32%	-43%
発車時刻調整+加速性能向上	-85%	-31%	-12%	-12%
移動閉そく+発車時刻調整+加速性能向上	-138%	-59%	-49%	-58%

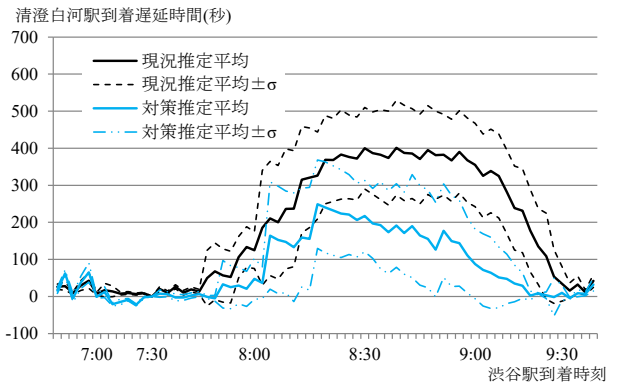


図-10 3遅延対策を同時検討した際の到着遅延減少量

現性は，遅延の発生，拡大する様子を高精度に再現が出来た。

5章では列車遅延対策の検討を行った。大規模な改良工事を伴わない複数の遅延対策案について，4章で開発したシミュレーションシステムを用い複数案検討した結果，すべての遅延対策案について遅延減少の推計結果を得た。発車時刻調整と加速性能向上で溝の口駅断面で85%の遅延削減，二子玉川駅断面で31%の遅延削減の可能性はある。

謝辞：データのご提供並びに研究に対する数多くのご意見を頂いた，東京急行電鉄株式会社および東京地下鉄株式会社の方々に心より感謝申し上げます。またインタビューのご協力を頂きました，小田急電鉄株式会社，京王電鉄株式会社，京成電鉄株式会社，京浜急行電鉄株式会社，相模鉄道株式会社，西武鉄道株式会社，東京都交通局，東武鉄道株式会社，東日本旅客鉄道株式会社の方々にも感謝申し上げます。

なお，本研究は科学研究費基盤B（課題番号 21360242，代表：森地茂政策研究大学院大学特別教授），科学研究費基盤B（課題番号 70334539，代表：福田大輔東京工大准教授）の助成を受けて実施している。ここに謝意を表する。

参考文献

1) 山村明義：列車運行実績データを活用した稠密運転路線における遅延改善アプローチとその効果，土木学会論文集D3, Vol.70, No.1 pp.44-54, 2014.

- 2) 仮屋崎圭司, 小野尚, 森地茂: 都市鉄道の列車遅延の拡大メカニズムに関する研究 (第 98 回運輸政策コロキウム), 運輸政策研究, Vol.13, No.1, pp.57-64, 2010.
- 3) 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, pp.459-467, 2010.
- 4) 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, No.5, 1001-1010, 2011.
- 5) 小林涉, 岩倉成志: 駅構造を組み込んだ列車遅延シミュレーションの開発, 土木学会論文集D3(土木計画学), Vol.72, No.5, 1067-1074, 2016.
- 6) 美谷邦章, 家田仁, 畠中秀人: 乗車位置選択行動モデルを用いた混雑費用の定量的評価法, 土木計画学研究・論文誌, No. 5, pp.139-146, 1987.
- 7) 青木俊幸, 大戸弘道, 都築知人, 河合邦治, 不破徹, 古賀和博: 鉄道駅における旅客流動に関する研究 その 10 降車分布, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.849-850, 1999.
- 8) 青木俊幸, 大戸弘道, 山根清香, 河合邦治, 都築知人, 古賀和博: 鉄道駅における旅客流動に関する研究 その 11, 乗車分布の推計, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1081-1082, 2000.
- 9) 大佛俊泰, 宮下瞳: 鉄道利用客の車両選択行動について, 日本建築学会計画系論文誌, Vol. 79, No. 700, pp.1315-1320, 2014.
- 10) Zongjie Liu, Dewei Li, Xiaoquan Wang, Passenger Distribution and Waiting Position Selection Model on Metro Station Platform. 2016 International Conference on Civil, Structure, Environmental Engineering
- 11) 東日本旅客鉄道株式会社: 埼京線への無線式列車制御システム(ATACS)の導入について, 2013年10月8日プレスリリース.
- 12) 東日本旅客鉄道株式会社: 無線による列車制御システム(ATACS), JR EAST Technical Review, No.5, pp.31-38, Autumn 2003.