

エージェントシミュレーションを用いた列車遅延対策の効果比較

小林 渉* (芝浦工業大学大学院)

岩倉 成志 (芝浦工業大学)

Comparative evaluation of train anti-delay measures using multi agent simulation

Wataru Kobayashi* Seiji Iwakura (Shibaura Institute of Technology)

On the urban railway system in morning period in the Tokyo metropolitan area, high frequency operation and mutual direct operation cause the problem that expands train delay. To solve this problem, the authors promoted the development of a multi-agent simulation system for reproducing knock-on delay taking into account the interaction between the trains. The aim of the study is to estimate several anti-delay measures such as a changing station structure or a moving block system.

キーワード : 列車遅延, エージェントシミュレーション, 遅延対策, 駅改良
(train delay, multi agent simulation, anti-delay measures, station layout)

1. はじめに

東京圏の都市鉄道は車内やホーム上の混雑緩和を目的として、朝ラッシュ時の高頻度運行や他路線への相互直通運転を行ってきた。これらは利用者に対しサービス向上をもたらした一方で、列車間の余裕時間の減少が列車遅延の原因となり、また一度遅延が発生すると遅延が広範囲に伝播し収束しにくい問題が慢性的に発生している。この列車遅延問題の解決は2016年4月の交通政策審議会答申でも重要項目の1つとされ、解決は急務とされている。将来の我が国の人口は減少する見込みであるが、東京圏の人口に限っては今後数十年横ばいと推計されている。これは自然減による列車遅延問題の解決は困難であることを示しており、何らかの対策を行うことが求められる。

遅延解消には様々な手法が考えられており、ハード的改良からソフト的な改良まで多岐にわたる。しかし列車種別が混在する路線に対して、複数の遅延対策案の効果を事前に比較する技術は確立されていない。

また今日東京圏で盛んに行われている、駅改良工事による遅延対策の効果検討には、駅構造の変化による利用者の乗車位置の変化を考慮する必要があり、乗車人数に応じて各駅で変化する車内の混雑状況や降車人数を考慮して遅延対策の検討を行った事例は少ない。

本研究の目的は、筆者らが開発した列車遅延連鎖を高精度に再現するエージェントシミュレーションを用いて、種々の列車遅延対策に関し検討を行いその効果を比較することである。

2. 既往研究の整理

列車遅延対策に関する既往研究として、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。

シミュレーションを用いた研究として、川村⁽²⁾は移動閉そくシステムや複数線化、2面3線化などの対策案についてその効果を定量的に把握している。仮屋崎⁽³⁾は駅間走行速度を下げた場合や、駅での意図的な遅発や早発などのオペレーションを行った場合、列車遅延に与える影響を分析している。これらの研究では現況再現が確認されており遅延対策に関してもいくつか取り組まれているが、車内混雑や降車人数を与件としており遅延対策による乗降時間への影響が反映されにくい。

利用者の乗降位置に関する研究として、筆者ら⁽⁴⁾、美谷ら⁽⁵⁾、青木ら⁽⁶⁾⁽⁷⁾、大佛ら⁽⁸⁾、國松ら⁽⁹⁾の研究がある。しかし、これらの研究結果を用いて幅広い遅延対策の検討に用いられた例はない。

従って本研究の位置づけは、乗車位置選択による各扉の乗降人数と車内混雑状況を考慮したシミュレーションを用いて、駅改良など乗車位置選択の変化を伴うものを含めた複数の遅延対策案の効果を比較することである。

3. シミュレーションの概要

研究対象路線は東急田園都市線および東京地下鉄半蔵門

線の中央林間駅から押上駅までの 48.3km 区間とする。使用データは信号コード表、運転時刻表、車両性能表、乗降量カウント調査結果、応荷重データ、現地調査結果などである。

本研究はマルチエージェントシミュレーションを用いた分析を行う。旅客や列車が周囲の状況に応じて自律的に判断し行動できる点がこのシミュレーションの強みである。シミュレーションシステムは 4 つのサブモデルで構成している (図 1 参照)。乗降時間推計モデルと走行時間推計モデルではそして乗降時間推計モデル内に乗車位置選択モデルを配置している。

乗車位置選択モデルは先行列車が発車してからの時間や時間帯に応じ発生した乗車旅客を、降車駅を含めた駅構造や OD 交通量から乗車位置選択を行うものである。筆者らの研究⁽⁴⁾では乗車駅 i での扉 k の選択確率 P_k を降車駅 j までの利用者数の割合を考慮し式(1)~(4)で表し、集計ロジックモデルにてパラメータ推定を行っている。

$$P_{ik} = \sum_j P_{ijk} \times \frac{OD_{ij}}{OD_i} \dots\dots\dots (1)$$

$$P_{ijk} = \sum_t (p_{ijkt} \times q_t) \dots\dots\dots (2)$$

$$p_{ijkt} = \frac{e^{V_{ijk}} \times WA_{ikt}}{\sum_k (e^{V_{ijk}} \times WA_{ikt})} \dots\dots\dots (3)$$

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

OD_i : 乗車駅 i での発生交通量 OD_{ij} : 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)

WA_{ikt} : 乗車駅 i で列車到着までの時間 t にホーム上に現れた利用者の扉 k の選択肢集合(時間 t を使ってホーム上を移動する)

- 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
- D : 階段から乗車扉までの距離(m)
- ES : エスカレータ設置有無ダミー
- 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(各扉の利用者は最寄りの階段のみを利用すると仮定したとき、全体の乗降者数に対する最寄り階段の利用者数の割合)
- $\alpha, \beta, \gamma, \kappa, \theta, \eta, \mu, \nu, \delta, \lambda$: パラメータ

パラメータを推定し乗降人数の実績値と比較した結果、各扉の乗降人数を概ね再現できている (表 1 参照)。乗車位置選択モデルを乗降時間推計モデルに組み込んだシミュレーションシステムの現況再現性確認のため、2014 年 10 月の平日 8 日間の 5:57 から 10:30 までの運行を再現してい

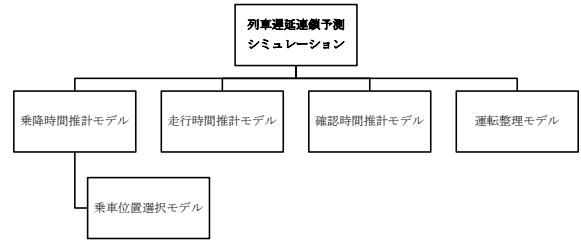


図 1 シミュレーションの構成

表 1 パラメータ推定結果

説明変数	パラメータ	t値	判定
乗車駅	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 *
降車駅	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

表 2 遅延対策案一覧

	対策案	評価可能性		対策案	評価可能性		
ハード	路線	閉そく区間の分割	◎	計画	列車の増発	○	
		移動閉そくの導入	◎		途中駅折返し削減	◎	
		高速分岐器の設置	○		列車間隔調整	○	
		複々線化	○		確認時間短縮	◎	
	車両	多扉車の導入	○		ソフト	意図的な列車早発	○
		ワイドドアの導入	○			ホーム整理員配置	△
		高加速車両導入	○	停車位置の分散化		△	
		駅	昇降設備の増設	○		オフピーク通勤推奨	△
	ES運用の変更		◎	駅間OP		○	
	出入口の増設		○	信号コード変更		○	
	終着駅終端の延伸		○				
		2面3線化	○				

凡例: ◎ 本論文にて検討
 ○ 検討可能な対策案
 △ 外生的なデータの追加が必要

る。その結果、長津田―清澄白河間の遅延時間(ダイヤ上の所要時間と実績値あるいはシミュレーションでの所要時間差を指す)の残差 RMS が約 73 秒となり、再現性は確保されていることがわかった。本研究はこのシミュレーションシステムを用いて遅延対策の検討を行う。

4. 遅延対策案の効果比較

〈4.1〉 遅延対策案の適応可能性

本研究で取り扱い可能な遅延対策は多岐に渡る (表 2 参照)。乗車位置選択モデルを組み込んだことによって、乗車位置の変更を伴う遅延対策に関しても検討できるようになった。その他の遅延対策についても扉ごとに各駅での降車人数や車内混雑が変化することで、遅延対策による乗降時間への影響が反映されやすくなった。従って本研究では乗車位置変化を伴う駅施設の改良の検討と、信号システム改良や駅オペレーションの見直しなどの遅延対策の検討を行いそれぞれの効果を比較する。

4.2 駅改良の実施

本研究で取り扱う駅改良とは、駅エスカレータの増設並びに運用の変更を指す。これらの改良による利用者の分散が列車遅延へ与える効果について検討する。ここでは現在エスカレータの設置されていない駅を中心に、田園都市線の 6 駅にて新たにエスカレータの設置もしくは、エスカレータの運転方向を変更した。シミュレーションした結果、対象路線全体でみると遅延減少には至らなかったが、田園都市線の長津田—二子玉川間の総遅延時間の合計が 18%の減少となった。

4.3 閉そく分割

本研究で用いるシミュレーションは、2014 年の信号コード表や運転ダイヤを入力して行っている。2014 年から 2016 年の間に半蔵門線では閉そく分割を行っている。改良箇所をプログラムしシミュレーションした結果、8 時台に渋谷駅に到着する列車で渋谷—清澄白河間の総遅延時間の合計が 18%の減少となった (図 2 参照)。

4.4 移動閉そく方式の導入

現在対象路線で用いられている固定閉そく方式に替わり、日本国内でも導入が検討されている移動閉そく方式による遅延減少効果の検討を行う。このシステムでは路線上に区切りを設けず、無線により列車の停止限界を算出するため、常に列車間隔を最適に保つことが可能である。現在の固定閉そく方式の区切りは、非常に短いものの余分な車間距離が生じている。本研究では東日本旅客鉄道の開発する ATACS を参考に列車運行のルールを設定した。余裕距離を 100m としシミュレーションした結果、8 時台に渋谷駅に到着する列車で見ると、長津田—清澄白河間の遅延時間の最大値が 250 秒の減少となり、総遅延時間の合計でみると 43%の減少となった (図 3 参照)。特に遅延が拡大する渋谷駅 8 時着以降の列車で遅延拡大が抑えられ、9 時過ぎには遅延が解消している。

4.5 確認時間の短縮

半蔵門線の確認時間 (閉扉から発車までの時間) を田園都市線と同程度にした場合の検討を行う。現地調査で収集した半蔵門線と田園都市線の確認時間を比較すると、各混雑率帯で差が見られる (表 3 参照)。駅での停車時間を短縮し後続列車の進入をスムーズにするために、半蔵門線の確認時間の平均と標準偏差を田園都市線のものに置き換えシミュレーションした結果、渋谷駅に 8 時台に到着する列車の長津田—清澄白河間の総遅延時間の合計が 30%の減少となった (図 4 参照)。確認時間の短縮により停車時間が短縮されたことでラッシュ時間帯の遅延が減少した。

4.6 途中駅止まりの列車の行先変更

ラッシュ時間帯に運用されていた途中駅止まりの列車を終着駅まで走行させた場合の検討を行う。ラッシュ時間帯の対象路線の列車の行先は、押上、清澄白河、相互直通運転先の東武スカイツリーラインの駅である。清澄白河駅の到着遅延を清澄白河行きに着目してみると、当該列車の後

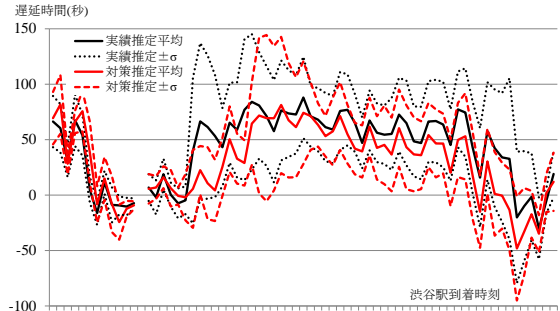


図 2 閉そく分割時の遅延時間(渋谷—清澄白河)

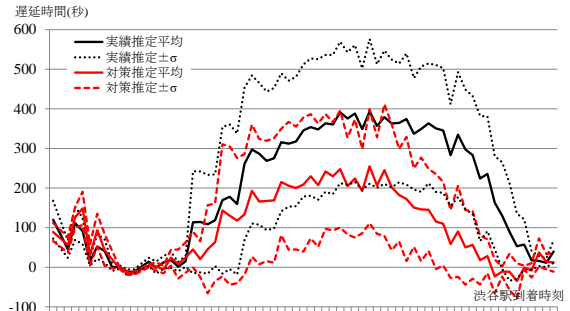


図 3 移動閉そく方式の遅延時間(長津田—清澄白河)

表 3 確認時間の比較

確認時間 (秒)	田園都市線		半蔵門線	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
~49%	7.9	1.6	15.1	4.3
混雑率 ~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

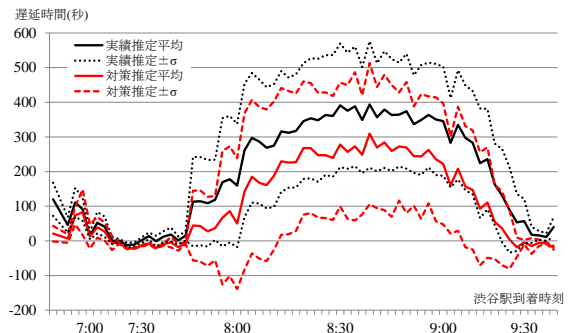


図 4 確認時間短縮時の遅延時間(長津田—清澄白河)

表 4 8 時台渋谷駅到着列車での遅延時間減少率比較

区間	長津田— 清澄白河	長津田— 二子玉川	長津田— 渋谷	渋谷— 清澄白河
	駅改良	4%	-18%	3%
閉そく分割	-2%	-21%	0%	-18%
移動閉そく	-43%	-67%	-42%	-60%
確認時間短縮	-30%	3%	-10%	-110%
行先変更	1%	6%	7%	-28%

続で遅れが拡大する様子が見られる。これは、旅客の降車確認や留置線への入線に伴う分岐器の切り替えが影響して後続列車の進入が遅れるためである。そのため清澄白河行きの全ての列車を押上行きにしてシミュレーションを行った結果、渋谷駅に 8 時台に到着する列車の渋谷—清澄白河

間の総遅延時間の合計が 28%の減少となった。特に清澄白河止まりの後続列車で発生していた遅延が削減されていることを確認した。

〈4・7〉 遅延対策の効果比較

最後に本研究で検討した遅延対策案の効果を比較する(表4参照)。移動閉そくは路線全体の遅延減少を示している。確認時間の短縮は半蔵門線で大きな効果が表れており、表中で-100%を超えるものについては、この指標が遅延時間で比較しているためであり、その区間で回復運転を行っている。また駅改良や閉そく分割、駅延伸については遅延対策の効果は限定的であるものの特定の区間で効果は表れている。

5. おわりに

本研究では、遅延連鎖シミュレーションを用いて様々な遅延対策の効果比較を行った。駅構造を変化させることで一部区間での遅延減少がみられ、乗車位置の変化により乗降時間や路線の遅延が減少したことを示した。また信号システムの変更や確認時間の短縮のような列車遅延対策についても遅延減少を確認できた。

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。

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) 川村孝太郎，神田大輔，岩倉成志：複数の列車遅延対策案の効果分析～東急田園都市線と東京メトロ半蔵門線を対象に～，第21回鉄道技術・政策連合シンポジウム，S9-1，(2014)
- (3) Kariyazaki, K., Hibino, N. and Morichi, S. : Simulation Analysis of Train Operation to Recover Knock-on Delay under High-Frequency Intervals, Case Studies on Transport Policy, Vol.3, Issue1, pp.92-98, (2015)
- (4) 小林渉，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, Vol.72, No.5 (2016)
- (5) 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・論文集，No.5, pp.139-146, (1987)
- (6) 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)
- (7) 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)
- (8) 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集，Vol.79, No.700, pp.1315-1320, (2014)
- (9) 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)