

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～

○ [土] 川村 孝太郎 (芝浦工業大学大学院) 神田 大輔 (鉄道・運輸機構)

[土] 岩倉 成志 (芝浦工業大学)

Impact analysis of improvement programs on the train knock-on delay using multi agent simulation

～A case of Tokyu Den-en-toshi line and Tokyo Metro Hanzomon line～

○ Kotaro Kawamura, (Shibaura Institute of Technology) Daisuke Kanda, (JR TT)
Seiji Iwakura, (Shibaura Institute of Technology)

On the urban railway network system in the Tokyo metropolitan area, through service and high frequency operation cause the problem that expand train's delay. In order to solve these problems, the authors promoted the development of simulation system for estimating knock-on delay of urban rail which operate through service. We examined various strategies for reduction of train delay using the multi agent simulation model.

キーワード : 列車遅延, 遅延対策, マルチエージェントシミュレーション, 高頻度運行

Key Words : train delay, strategy that reduce train delay, multi agent simulation, high frequency operation

1. はじめに

東京圏の都市鉄道は、朝ピーク時間帯の列車内および駅構内の混雑を解消するため、高頻度運行化や相互直通運転を実施し鉄道サービスの向上を図ってきた。これらの施策は混雑の解消に大きな効果をもたらした。一方で、高頻度運行化によるダイヤ上の余裕時間が減少したことにより、駅での小規模な停車遅延等がすぐさま後続列車へ伝播している。さらに、相互直通運転により広範囲に遅延が拡大するといった課題が生じている。2014年4月に示された交通政策審議会（東京圏における今後の都市鉄道のあり方）の諮問においても列車遅延への対応が急務とされている。

現在、高頻度運行でかつ複数の緩急行が混在して運行されるわが国のような都市鉄道の遅延対策の効果を、事前に定量的に評価する技術は確立されていない。

本研究の目的は、上記のような運行を行う都市鉄道を対象に、従来から筆者らが開発してきたシミュレーションモデルの精度改善および移動閉そく効果を評価する為のプロ

グラムを施した上で、ハードおよびソフトの幅広い遅延対策案を実施した際の遅延減少効果を定量的に把握する。

2. 遅延対策に関する既存研究の整理

車両、信号、駅施設等の工事を伴うハード的対策の研究として、岩倉ら¹⁾は東急田園都市線を対象に、駅の2面3線化や新線整備といった対策を、シミュレーションを構築して評価しているが、再現精度に課題が残されていた。佐久間²⁾は東京地下鉄線内にて、折り返し設備の新設、2面3線化による交互発着、ホーム幅の拡大や乗換ルートの新設などの駅内混雑防止等の駅施設の改善による施策を実施している。Fu³⁾らは北京の地下鉄循環線を対象に、移動閉そく方式の適用を念頭においたシミュレーションシステムの開発を行い、再現性の確認を行っている。山村ら⁴⁾は東京地下鉄東西線を対象に、ホーム旅客流動の改善、ワイドドアの導入を実施し、遅延減少効果を可視化したダイヤ図を用いて評価している。

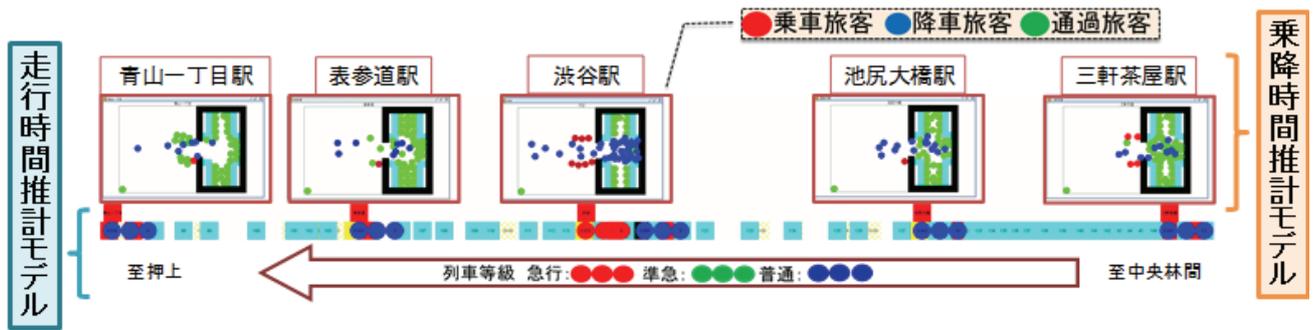


図-1 本シミュレーションモデルの様子

工事を伴わないソフト的対策の研究として、山村ら⁴⁾は、同路線を対象に、快速列車の停車駅変更，駅員増員，接近コードの設定を実施し，同様の方法を用いて評価を行っている。仮屋崎ら⁵⁾は東急田園都市線を対象に，区間速度制限の意図的な低下や駅での列車出発時間の意図的な遅発によって機外停車による運転時間のロスを生じさせない対策や，JR山手線を対象に意図的な早発を実施した際の対策など，オペレーションの変更による遅延対策についてシミュレーションを構築して評価している。また，東急田園都市線では運転士数名の調査研究の成果として，トンネルの壁面に前方列車の状況がわかる機器を設置し，最も効率の良い追い込みができるような運転を行っている⁹⁾。

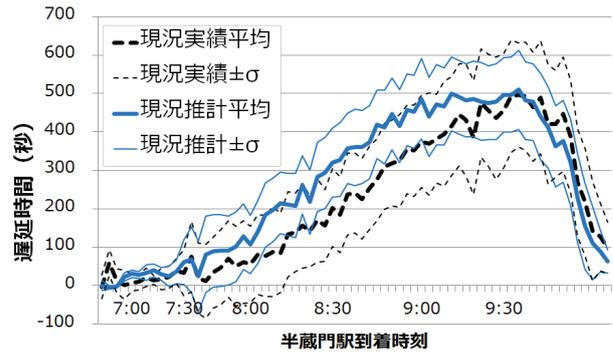


図-2 長津田駅～半蔵門駅間の遅延の再現性

3. モデルの概要と対策案の適用可能性

3.1 シミュレーションモデルの概要と再現性

研究の対象路線は東急田園都市線中央林間駅から東京地下鉄半蔵門線押上駅までの区間とする。対象路線長は48.3kmである。シミュレーションモデルの構築には，走行時の列車の相互作用および乗降時の列車の相互作用を包括してシミュレーションするために，マルチエージェントシミュレーションを用いる。

モデルの構築には，鉄道事業者の協力を得て信号コード表，車両性能表・寸法，発着時刻表，応荷重データ，駅ビデオ映像を用い，実際の運行管理ルール of データを入力した。なお，再現精度の確認と向上のために，2010年11月15日～2010年12月17日の21日間分の運行実績データを用い，実遅延時間との比較を行う。

図-1のように乗降時間の推計と走行時間の推計を異なるモデルで推計し，それらを組み合わせたモデルで列車1本ごとの運行時間を推計している。

図-2に再現精度を示す。図-2は長津田～半蔵門駅間を走行する列車の時刻表上の所要時間からの超過時間を示している。実績値は平日21日間の平均値と標準偏差(±1σ)，推計値は各日10回のシミュレーションを行った結果の中から，標準偏差の半分(±1/2σ)に最も存在する1回を代表値として抽出した21日間の平均値と標準偏差である。

推定した遅延時間は，平日21日間の実績値の標準偏差内に収まることや，発生と収束のタイミングが同等であることから，実績の遅延状況をおおむね再現できていると言える。しかし，7:30～9:30頃まで20%程度の過大推計が発生

表-1 主要な対策案評価の適応範囲

		対策案	評価可能性
ハード	信号設備	閉そく区間の分割	◎
		移動閉そくの導入	◎
	車両設備	多扉車の導入	○
		ワイドドアの導入	○
		車両の長編成化	○
	駅設備	ホーム幅の拡大	○
出入口の改良・増設		△	
2面3線化		◎	
大規模改修		複々線化	◎
ソフト	運行計画	列車の増発	○
		優等列車の未設定	△
	駅OP	発車間隔の調整	○
		軽微な列車早発	○
		ホーム整理員の配置	△
		停車位置の分散化	△
		オフピーク通勤推奨	△
	駅間OP	信号コードの変更	◎
		低い走行速度での運転	◎

凡例 ◎評価実績あり ○評価可能
△外生的にデータを与える必要あり

していること，標準偏差がやや小さく算出されていることに留意する必要がある。

3.2 遅延対策案の適応範囲

本モデルにて評価可能な対策案を表-1に示す。ハード面からソフト面まで幅広い遅延対策について評価可能である。また，乗降量の需要の予測や，停車時間ないし発着時間の外生値を挿入することにより評価可能となる対策案も

多い。一方で、現状のモデルでは下り線や他路線の列車が影響した遅延や、プラットフォーム上からコンコースにかけての旅客流動は評価ができないため、シミュレーションの拡張が必要となる。

4. 遅延対策案の評価

4.1 ハード面の対策

(1) 信号設備-移動閉そくの導入

移動閉そく方式の列車制御システムが高頻度運行路線に導入された際の遅延減少効果を推計する。構築には、東日本旅客鉄道の開発するATACS¹⁰⁾を参考とし、図-4のフローチャートに従うルールとする。なお、停止限界の地点から先行列車の最後尾までの余裕距離を変更可能なモデルとし、本分析では事業者へのヒアリングをもとに余裕距離の設定を20m,100m,150m,200mに変動させて推定をおこなう。本稿では既往研究¹¹⁾を参考に100mに設定した際の報告を行う。

21日間の実績平均遅延時間と21日間の推定平均遅延時間との比較を図-5に示す。現況再現との比較を行うと、8:30を過ぎたあたりから遅延時間の拡大が抑えられ、最大遅延時間は256秒の減少、全遅延時間の合計は48.4%の減少となった。

(2) 信号設備-閉そく区間の分割

閉そくの区間を分割した際の遅延減少効果を推計する。閉そく区間は軌道回路の変更区間は走行時間の拡大がみられる渋谷-永田町駅間とする。該当区間の閉そくのうち、ATCコードの変更により線路容量の拡大が見込める閉そく区間を対象に、区間長が長い上位11ヶ所を分割した。なお、閉そくの分割は、対象とする閉そく区間を等距離で2分割している。

21日間の実績平均遅延時間と21日間の推定平均遅延時間との比較を図-6に示す。現況推計に比べ、閉そく区間の分割は遅延時間の最大値が100秒程度減少し、長津田-半蔵門駅間の全遅延時間の合計が21%の減少となった。区間別の遅延減少量は、二子玉川-渋谷駅間の遅延時間が4%の減少であるのに対し、渋谷-半蔵門駅間は43%であった。

(3) 駅設備-2面3線化

東急田園都市線は渋谷駅がボトルネック駅であり、他の駅よりも長い設定の停車時間がより増加してしまうことで、後続列車に遅延が波及しやすい。渋谷駅を2面3線化し交互発着をした際の遅延減少効果を推計する。2010年12月1日の遅延時間で比較を行うと最大遅延時間は200秒程度減少し、遅延時間は概ね300秒程度であった。また、長津田-半蔵門駅間の全遅延時間の合計は38%の減少となった。渋谷駅を起点とする遅延は大幅に減少したものの、ボトルネック箇所が表参道駅に移動した形になり、渋谷-表参道駅間にて遅延が増大した。

(4) 大規模改修-複々線化

二子玉川駅発車後の地下区間から表参道駅出発までの区間を複々線にした際の遅延時間を推計する。複々線の条件

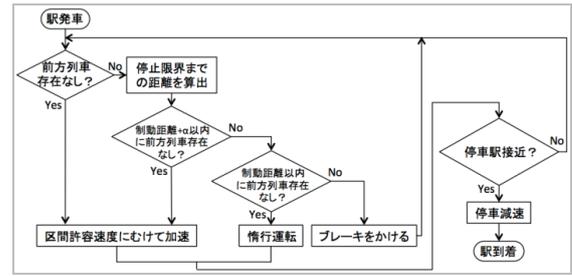


図-4 移動閉そくモデルのフローチャート

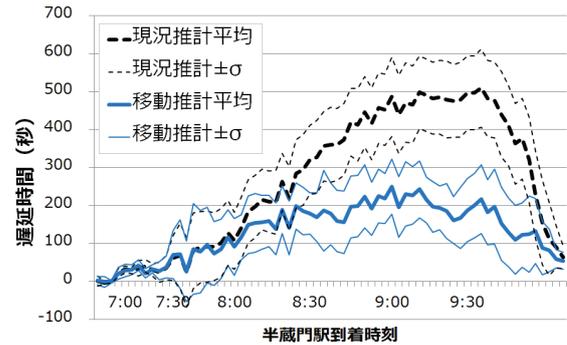


図-5 移動閉そく導入による遅延減少効果

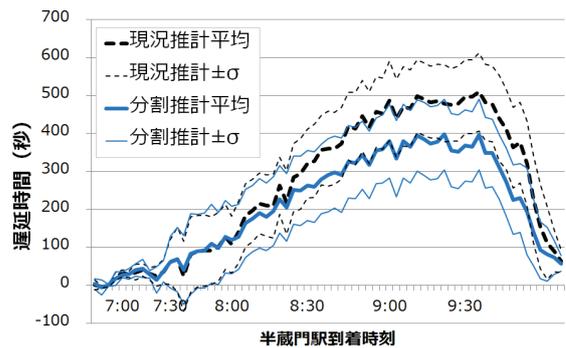


図-6 閉そく区間分割による遅延減少効果

表-2 複々線化による時間減少効果

種別	時間 (前後比)	標準偏差 (前後比)
急行	45.2分 (-1.9分)	3.94分 (-1.50分)
準急	48.2分 (-6.8分)	0.70分 (-0.89分)
各停	61.5分 (-0.4分)	5.28分 (-1.19分)

として以下の4点を与えた。1. 発着本数の現行とし、2. 準急列車の急行列車化する(但し、旅客の需要の変化は考慮しない)、3. 本線を急行列車、副本線を普通列車とする、4. ダイアグラムを急行対応に変更する。

準急列車を急行列車に変更したため、一概には比較することができないが、遅延時間は60秒~120秒程度で推移している。なお、長時間停車が発生した際に、該当列車は240秒程度の遅延時間となったが、後続列車への影響は数本にとどまり、4本後を走行する列車の遅延時間は60秒以下となった。また、所要時間の減少効果を表-2に示す。朝ピー

ク時間帯の優等列車の時間短縮効果は6.8分であり、所要時間の標準偏差も1分弱の減少が見られた。また、9:00までに渋谷駅に到着する列車の本数は複々線化実施前の69本に対し、複々線化実施後は72本であった。

4.2 ソフト面の対策

(1) 駅OP-意図的な停車時間の増加

仮屋崎⁸⁾は、遅延時に乗降が完了し次第、列車を出発させる運転方法が遅延を拡大させる可能性を指摘している。そのため、前駅でできるだけ長く停車し、先行列車との距離を開けて走行時間を短くする運行を検討し、7秒の出発調整を行うことで次駅に早く到着する結果を推計している。

この提案を本シミュレーションを用いて検証する。なお、この分析では機外停車をした場合に信号現示が上がってから列車が動き出すまでの確認および車内放送等のロスの時間を3秒と設定した。加えて、池尻大橋-渋谷駅間の在線状況表示器の設定は考慮していない。

機外停車が発生した列車を基準とし、出発を2秒ごとに増加させ列車走行の挙動を確認した。図-7にシミュレーションを用いて算出した池尻大橋-渋谷駅間の距離-時間曲線を示す。渋谷駅に最も早く到着した列車は、出発調整を6秒行った電車であり、基準の列車よりも約3秒早く到着する結果となった。仮屋崎の研究結果と同様の結果であった。

(2) 駅間OP-意図的な走行速度の低下

池尻大橋-渋谷駅間には前方の列車の状況を把握するための在線状況表示器の設置がされている⁹⁾。駅間の各地点で最適な速度に調整しながら運転を行うことで、追い込み時間の3秒の短縮が図れているという結果となっている。同様の運行ルールでの運行および適用しなかった場合の運行挙動を本シミュレーションで推計する。

推計した運転曲線図を図-8に示す。駅間にて在線状況表示器に従い運転を行った列車は機外停車することなく渋谷駅に到着することが可能となり、結果的に3秒程度早く駅に到着する結果となり、実際の運行時間での短縮時間と同様の結果が得られた。

5. おわりに

本研究は、筆者らの開発した遅延連鎖予測シミュレーションモデルを用いて、高頻度運行路線におけるハード面からソフト面までの様々な遅延対策案を定量的に評価した。その結果、移動閉そく導入、閉そく区間分割、渋谷駅2面3線化、複々線化による列車1本ごとの遅延減少効果を定量化した。また、既存研究および東急田園都市線で行われている施策の推計を行い、その効果を確認した。発表時には、後続列車ないし路線全体への遅延の波及状況も報告する。

謝辞：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は、データのご提供および研究に対する数多くのご意見をいただいた。本研究は科学研究費（課題番号:21360242, 25289160）の助成を得て行ったものである。ここに記して深謝の意を表する。

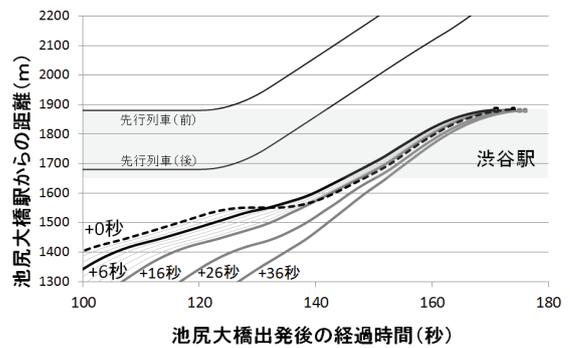


図-7 池尻大橋-渋谷駅間の距離-時間曲線

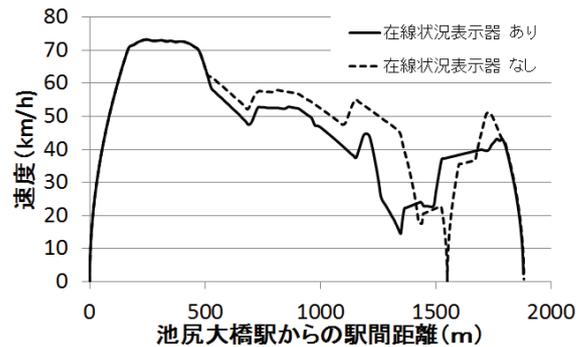


図-8 池尻大橋-渋谷駅間の運転曲線図

参考文献

- 1) 岩倉成志, 高橋郁人, 森地茂: 都市鉄道の遅延連鎖予測のためのエージェントシミュレーション, 運輸政策研究, vol.15, No.4, pp.31-40, 2013 Winter
- 2) 佐久間穰: 「遅延防止対策」への取り組み, 日本地下鉄協会報, 第201号, pp.21-25, 2014
- 3) Fu Y., Gao Z., Li K.: Modeling Study for Tracking Operation of Subway Trains Based on Cellular Automata, Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, Vol.8(4), pp.89-95, 2008
- 4) 山村明義, 牛田貢平, 足立茂章, 富井規雄: 首都圏稠密運転路線における遅延改善策の検証, 第19回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, No.12-79, 2012
- 5) 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, pp.1001-1010, 2011
- 6) 仮屋崎圭司, 日比野直彦, 森地茂: 高頻度運行に伴う列車遅延の回復方策に向けたシミュレーション, 土木計画学研究・講演集, vol.45, CD-ROM, 2012
- 7) 仮屋崎圭司, 日比野直彦, 森地茂: 高頻度運行における列車運行遅延の回復方策の検討, 土木計画学研究・講演集, vol.47, CD-ROM, 2013
- 8) 仮屋崎圭司, 日比野直彦, 森地茂: 輸送力を保持した遅延発生時の運転再開手法の検討, 土木計画学研究・講演集, vol.49, CD-ROM, 2014
- 9) 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.
- 10) 東日本旅客鉄道株式会社: 無線を用いた新しい列車制御システム ATACS の安全確保の考え方について
- 11) 馬場裕一, 立石幸也, 森健司, 青柳繁晴, 武子淳, 齋藤信哉, 鈴木康明, 渡邊貴志: 無線による列車制御システム(ATACS); JR EAST Technical Review No.5 Autumn, pp.31-38, 2008