

# 1113 エージェントモデルを用いた都市鉄道の遅延対策効果の予測

学 [土] ○小林 渉 (芝浦工業大学大学院) 正 [土] 川村 孝太朗 (前芝浦工業大学大学院)

正 [土] 岩倉 成志 (芝浦工業大学)

## Impacts of several measures for improving the knock-on urban train delay: An agent-based simulation

Wataru Kobayashi, Shibaura Institute of Technology . 3-7-5, Koto-ku, Tokyo

Kotaro Kawamura, Shibaura Institute of Technology

Seiji Iwakura, Shibaura Institute of Technology

On the urban railway network system in the Tokyo metropolitan area, high frequency operation and mutual direct operation cause the problem that expands train delay. In order 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. This research quantitatively analyzes the effects of several anti-delay measures such as a moving block system and a decreasing method of the stoppage time at the station.

*Keywords* : train delay, anti-delay measures, multi agent simulation, high frequency operation

### 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た、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、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課題が発生している。この列車遅延問題の解決は急務とされている。

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。しかし列車種別が複数存在する路線に対して、効率の良い遅延対策を事前に評価する技術は確立されていない。

本研究の目的は、筆者らがこれまで開発してきた<sup>1) 2)</sup>列車遅延連鎖シミュレーションシステムのさらなる精度向上を行った上で、様々な遅延対策についてその効果を定量的に把握することである。

### 2. 対象路線とシミュレーションシステム構造

本研究の対象路線は、東急田園都市線及び東京メトロ半蔵門線の中央林間駅→渋谷駅→押上駅の計 40 駅、48.3km とする。この路線は相互直通運転を行っている。最混雑時間帯の混雑率は池尻大橋→渋谷駅間で 183%、列車は 2 分 10 秒間隔で運行している。

シミュレーションには列車の走行や旅客の乗降における相互作用を再現するため、マルチエージェントシミュレーションを用いる。システムの構築には発着時刻表、運行実績データ、応荷重データ、信号コード表、車両性能表、現地調査結果などを用いる。このうち運行実績データは取得時刻に誤差を含むため、対象日に現地調査を行い補正したものを用いる。

本研究における用語の定義を以下に示す (図 1 参照)。

- 乗降時間: 列車の扉が開いている時間を指す。旅客の乗降並びに時刻表発車時刻までの時間調整を行う。
- 確認時間: 列車の扉を閉めてから発車までの時間を指す。

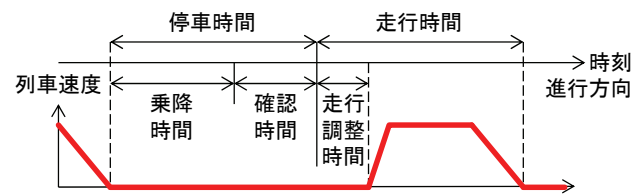


図 1 本研究での用語の取り扱い

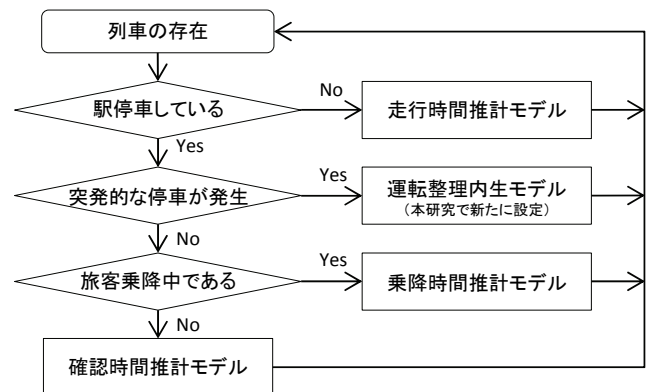


図 2 システム全体のフローチャート

- 停車時間: 乗降時間と確認時間を合わせた時間を指す。
- 走行時間: 確認時間終了後から次駅停車までの時間を指す。
- 走行調整時間: 実際の走行での運転士の認知・確認に要する時間や、緩やかな加減速などシミュレーションと実際の走行のずれを補正するための時間を指し、停車時間の直後に駅で与えている。この時間を過ぎると列車は発車する。

システム全体のフローチャートを図 2 に示す。シミュレーションシステムは乗降時間、確認時間と走行時間を異なるモデルで推計、3 つのモデルを統合して列車 1 本ごとの運行時間としている。シミュレーションの様子を図 3 に示す。

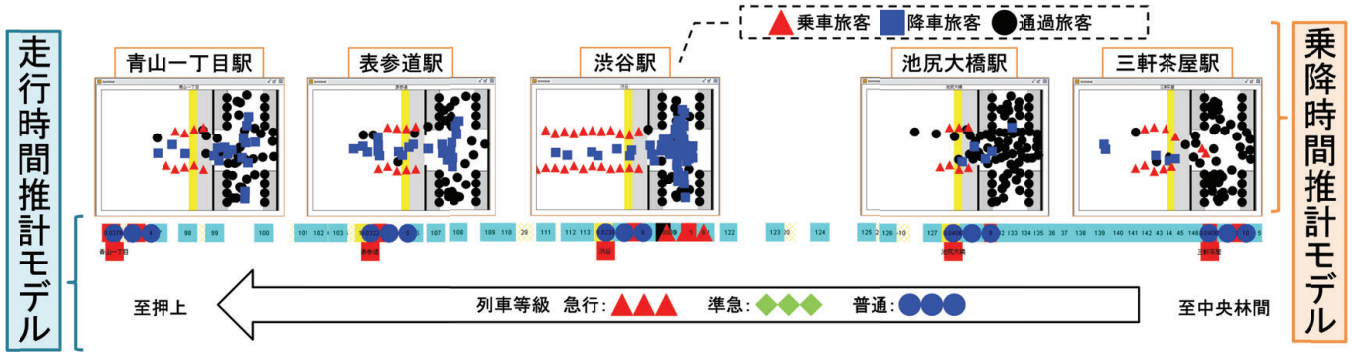


図3 シミュレーションの様子

す。シミュレーションは5:57から10:30まで対象路線を走行する全列車の走行および駅での乗降を再現する。

### 3. シミュレーションシステムの改良

遅延対策案の評価をするにあたり、再現精度の向上のため従来のシミュレーションシステム（以下従来システムとする）を一部改良したシステムの構築を行った（以下改良後システムとする）。以下に改良事項を示す。

#### 3.1 運転整理内生モデルを追加

従来システムでは、ドア挟みや急病人といった突発的な停車（本研究では10分以下のトラブルを取り扱い、人身事故のような長時間停車は対象外とする）や、それに伴う運転整理による停車など所定の停車時間+60秒以上の停車については、発生事由に関わらず直接停車時間を与えている。これは現況再現性を向上させる一方で、遅延対策導入時の予測値の感度を低下させる問題がある。

本研究では遅延要因データからその発生駅を特定し、直後に周辺駅で発生した所定より長い停車を、遅延要因による運転整理とみなし、突発的な停車が発生すると周辺駅で運転整理を行う運転整理内生モデルを改良後システムに追加した。運転整理する際の停車時間やその範囲は、運行実績データを参考としている。遅延要因データに記載のある停車のみを外生的に与えたことにより、シミュレーションに予め与える長時間停車の数は、表1のように98%削減した。

#### 3.2 路線別に確認時間を設定

対象路線全駅で取得した確認時間とそのときの最混雑車両の混雑率の関係を図4に示す。混雑率50%ごとに区切ったときの、確認時間の平均と標準偏差を表2に示す。取得した確認時間とシミュレーションで与えていた確認時間推定モデルを比較すると、半蔵門線の確認時間に統計的な有意差が生じた。これは従来の確認時間推定モデルが、田園都市線の調査結果に基づいて構築していたためである。本研究では列車の確認時間を精緻に推計するため、現地調査から得た表2に示す値を路線ごとに設定する。

#### 3.3 走行調整時間の設定

高頻度で運行していない早朝時間帯を対象に、シミュレーションと実際の走行時間を各駅間で比較した結果、シミュレーションでは半蔵門線で5秒程度、田園都市線で10秒程度過小に推計されることが分かった。実際の運行では運転士の加減速指示を認知するまでの時間ロスがあることや、旅客に負荷をかけない緩やかな加減速、機外停車（駅間での停車）を避ける走行など、運転士の細かな速度調整を行っているためである。結果から半蔵門線は5秒間、田園都市線は10秒間を、走行調整時間として与える。

#### 3.4 車内混雑状況に関する対応

列車の乗降時間は乗降人数と車内混雑状況によって大きく変化する。従来の乗降時間推計モデルでは乗車人数は前

表1 与件とする停車回数

	全停車回数	77640 停車/20日
従来システムで外生的に与えた停車回数		1263 停車/20日
	全停車に対する割合	1.6 %
改良後システムで与える停車回数		27 停車/20日
	全停車に対する割合	0.035 %

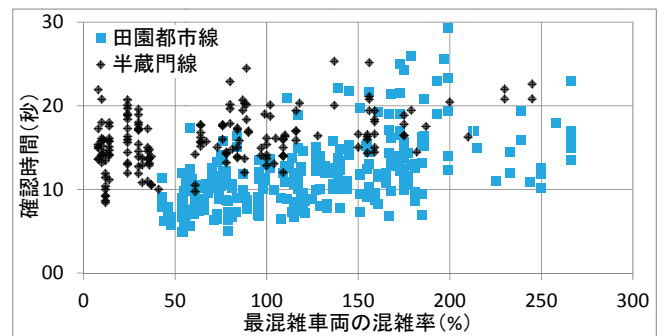


図4 混雑率と確認時間の関係

表2 路線別確認時間の平均と標準偏差

確認時間 (秒)	従来の確認 時間推計モデル		田園都市線 現地調査		半蔵門線 現地調査	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
~49%	7	2	7.9	1.6	15.1	4.3
~99%	9	2	10.0	5.0	16.5	2.9
~149%	11	4	11.4	3.1	16.3	2.8
~199%	14	4	14.3	6.2	17.6	2.5
200%~	15	5	17.4	6.1	20.5	2.0

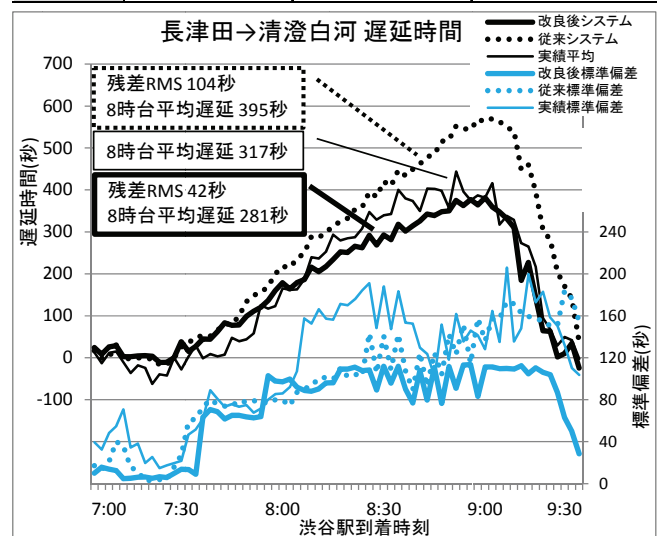


図5 シミュレーションの再現性

方列車が発車してからの時間に応じ乗車人数が変化するのに対し、降車人数及び車内混雑状況は時間帯別で与件としている。これは遅延発生後の車内混雑を再現できないだけでなく、駅改良による旅客流動の変化に対応できない問題がある。この問題に関して、現在降車人数と混雑状況を乗車人数に応じて変化するモデルの改良を行っている。

### 3.5 シミュレーションの現況再現性

3.1~3.3 の部分を改良した改良後システムの現況再現性を検証する。検証は、2014年7月から11月のうち20日間の運行を再現し、運行実績データとの比較を行う。改良後及び従来システムのシミュレーション実行結果と、実績データの平均遅延時間と標準偏差を図5に示す。図の実績値は20日間の平均値と標準偏差、推計値は各日10回のシミュレーションを平均し、一番平均に近い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である。遅延時間は指定区間、ここでは長津田ー清澄白河間の所定の運行時間との差である。遅延時間が負の値となるケースとして、長津田駅を遅発したものの清澄白河駅には定時到着した場合などがある。

結果から、改良後システムは最大遅延時間や遅延収束部の再現に一定の成果が見られる。残差RMSからも同様の結果が得られ、遅延の拡大と収束を精度よく再現できたものとみられる。

次に標準偏差に着目すると、渋谷駅に8:00以降に到着する列車でばらつきが小さく推計された。遅延要因データに記載のある突発的な停車と運転整理は概ね再現したものの、遅延要因データに記載のない長時間停車の存在が、日別の遅延変動を十分再現できなかった要因であるとみられる。この点について検討の余地はあるものの、全体として現況を再現できているといえ、改良したシミュレーションシステムを用い遅延対策効果の予測を行う。

## 4. 遅延対策効果の予測

遅延対策案の評価に当たっては列車の走行遅延を減らす取り組みとして移動閉そくシステムの導入、停車遅延を減らす取り組みとして確認時間の短縮を行った。また、ホームドア設置とこれらの案を複合した際の遅延変化についても検討する。

### 4.1 移動閉そくの導入

対象路線に従来の固定閉そくの信号制御システムに替えて、移動閉そくシステムを導入した際の遅延減少効果の検討を行う。システム構築には東日本旅客鉄道の開発するATACS<sup>3)</sup>を参考とし、図6にルールフローチャートを示す。停止限界から先行列車までの余裕距離を100mとしたときの遅延変化を図7に示す。遅延時間は最大100秒程度となり、全遅延時間の合計では80%の減少となった。遅延の発生する時刻に変わりはないが、渋谷駅に9:00頃到着する列車で、ほぼ遅延は解消している。8時台の渋谷駅到着列車を対象に区間別に遅延時間を見ると、二子玉川ー渋谷間で99%の減少、渋谷ー半蔵門間で81%減少となった(表3参照)。二子玉川ー渋谷間で遅延減少率が大きくなった要因として、現況再現時には半蔵門線で発生した遅延が田園都市線へ波及・拡大していたが、移動閉そくシステムでは拡大しなかったためと考えられる。

### 4.2 確認時間の短縮

半蔵門線の確認時間が田園都市線と同程度になった場合の遅延減少量の推計を行う。半蔵門線の確認時間推計モデルに田園都市線の平均値と標準偏差を入力し、シミュレーションを行った結果が図8である。最大遅延時間が180秒程度となり、遅延時間の合計と比較すると61%の減少と

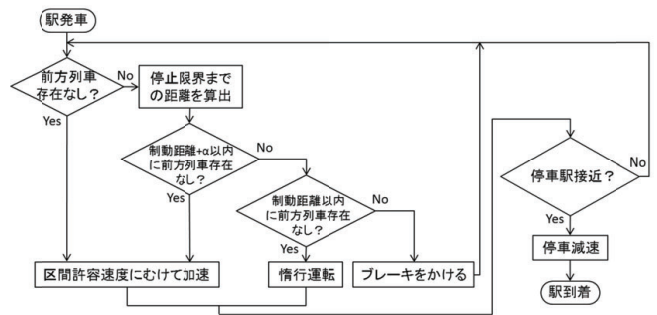


図6 移動閉そくシステムのフローチャート

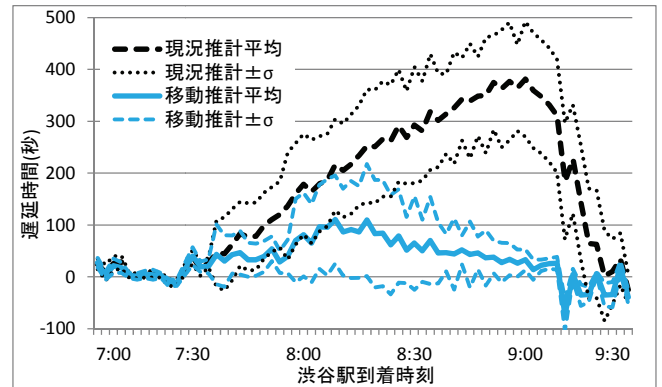


図7 移動閉そくによる遅延減少予測(長津田ー清澄白河)

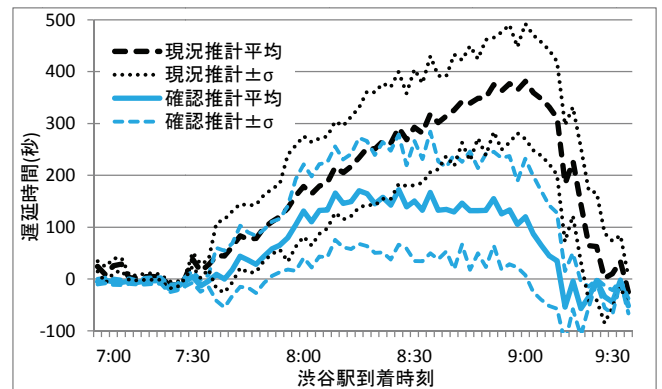


図8 確認時間短縮による遅延減少予測(長津田ー清澄白河)

表3 8時台渋谷駅到着列車を対象にした遅延対策効果

区間	二子玉川ー渋谷		渋谷ー半蔵門	
	変化率	所要時間変化(秒)	変化率	所要時間変化(秒)
移動閉そく	-99%	-86.3	-81%	-31.6
確認時間短縮	-18%	-16.1	-37%	-14.5
移動閉そく+確認時間短縮	-102%	-88.9	-95%	-37.2
確認時間短縮+ホームドア設置	44%	39	84%	33
移動閉そく+確認時間短縮+ホームドア設置	-61%	-53.2	-72%	-28.2
(参考)ホームドア設置	179%	67	180%	70

なった。また、遅延の発生が遅れる結果となった。表3に示す通り、8時台に渋谷駅に到着する列車で区間別に比較すると、渋谷ー半蔵門間で37%、二子玉川ー渋谷間では18%の遅延減少となった。半蔵門線の確認時間の短縮により列車が早く駅を離れることができ、後続列車への遅延拡大を抑制できたものとみられる。

### 4.3 複合案の検討

移動閉そくシステムと確認時間の短縮を同時に行った際の遅延減少効果の予測を行う。シミュレーション結果を図9に示す。最大遅延が60秒程度となり、遅延時間の合計は98%の減少となった。区間別では、二子玉川ー渋谷間で遅

延変化率が102%の減少となった。100%を下回る理由は、現在の基準が指定した区間の対策前の遅延時間を列車1本ずつ積み上げた値のためである。遅延時間が全体で0になれば遅延変化率は-100%となる。シミュレーション結果を確認すると、二子玉川駅では遅延していたものの渋谷駅に定時到着していた。この場合遅延時間は負の値となり、積み上げた遅延時間も負の値となったため-100%を超える遅延変化率となっている。

続いて、各地で設置が進められているホームドアと、本研究で示した遅延対策案を組み合わせた場合の遅延予測を行う。ホームドアを設置した場合、人身事故などの大規模遅延防止となる反面、可動柵の稼働時間が新たに加わり停車時間は増加する傾向にある。本研究では多くの駅で設置が進められている可動式ホーム柵を設置対象とし、対象路線のうち九段下、神保町両駅を除く対象路線全駅に設置した場合の遅延予測を行う。この両駅を設置対象外としたのは、両駅間の駅間距離が短いためホームドア稼働時間の影響を他駅よりも受けやすく、遅延を大きく拡大させる要因となったためである。この2駅を含めた場合で検討した結果、8時台渋谷駅到着列車での渋谷～半蔵門間の遅延変化率は470%であり、検討で用いた同区間の180%(表3参照)を大きく上回る結果となった。ホームドアの稼働時間は鈴木<sup>4)</sup>の研究を参考に6.3秒とした。

遅延予測は以下の2ケースについて行った。

- ・半蔵門線確認時間短縮+ホームドア設置
- ・移動閉そくシステム+半蔵門線確認時間短縮+ホームドア設置

それぞれシミュレーションを行った結果が図9および表3である。ホームドア設置については確認時間短縮のみでは、現況推計値と比較し路線全体で50%の遅延増の結果となり、遅延時間の増加分は最大で130秒程度であった。また、移動閉そくシステムの導入まで含めると遅延は減少に転じ、遅延時間は路線全体で62%減少の結果となった。

## 5. おわりに

本研究では、運転整理ルールや路線別の確認時間の設定などの改良を施した、列車遅延連鎖シミュレーションシステムを用い、遅延対策効果の予測を行った。設備工事の伴

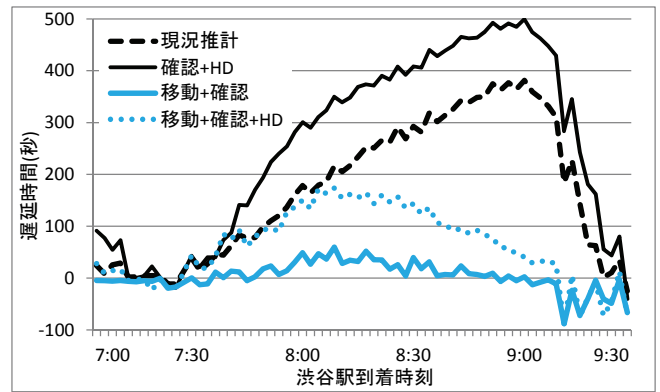


図9 複数案内導入時の平均遅延予測(長津田→清澄白河)

う移動閉そくシステムでは大幅な遅延減少効果が見られた。また、駅における発車時の確認作業を短縮することで、遅延が減少する可能性を示した。そして、停車時間の増加が見込まれるホームドア設置案についても、他の遅延対策と同時に行うことで遅延拡大の抑制につながることも示した。

**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。

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 小林渉, 川村孝太郎, 岩倉成志 : 列車遅延連鎖のシミュレーションの構築と遅延対策案の評価, 第51回土木計画学研究発表会・講演集, CD-ROM, 2015
- 3) 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
- 4) 鈴木僚, 日比野直彦, 森地茂, 家田仁 : 鉄道における各種ホームドアの比較研究, 第50回土木計画学研究発表会・講演集, CD-ROM, 2014