

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

—田園都市線および半蔵門線を対象に—

相互直通運転が行われ、遅延が発生しやすい路線環境にある東急田園都市線と東京地下鉄半蔵門線を対象に、遅延の連鎖のメカニズムを分析し、列車ごとの遅延時間をマルチエージェントモデルで再現し、遅延対策効果を予測する技術を開発した。中核となる駅間走行時間推計モデルと乗降時間推計モデルの2つのサブモデルの現況再現性は良好な結果を得ることができた。サブモデルを統合したモデルの再現精度は、再乗車旅客の行動の再現に未だ課題があるものの一定の精度は得られたものとする。またいくつか遅延対策の効果を予測した結果、示唆的な情報を得ることができた。

キーワード | 都市鉄道, 遅延連鎖, マルチエージェントシミュレーション, 遅延対策

岩倉成志

IWAKURA, Seiji

博(工) 芝浦工業大学工学部土木工学科教授

高橋郁人

TAKAHASHI, Ikuto

修(工) 茅ヶ崎市役所建設部道路管理課主事

森地 茂

MORICHI, Shigeru

工博 政策研究大学院大学政策研究センター所長, 特別教授

1—はじめに

東京圏の都市鉄道の混雑緩和を図るために、複々線化や新線整備による輸送力の増強が進められてきた。こうした対策は、長期の整備期間を要するため、信号システムの改良による運行本数の増加や相互直通運転によるターミナル駅の混雑緩和対策も併せて進められた。しかし、大量の乗降者数に伴う停車時間の増加と、相互直通運転される路線間の線路容量制約の違いからボトルネックで列車の渋滞が起り、長大化した相互直通路線で遅延が伝搬、拡大していく現象が発生している。

この問題は、2000年に策定された運輸政策審議会18号答申ですでに指摘されていたが、計画策定時に、遅延対策の多様なメニューを検討するためのデータや定量的な分析ツールは十分ではなかった。

本研究の目的は、高頻度運行で相互直通運転される都市鉄道を対象として遅延対策の効果を定量的に分析できるシミュレーションモデルを構築することにある。なお、本研究でとり扱う遅延とは、ダイヤ上の着時刻と実績の着時刻との差分をさす。

このため、研究対象を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48.3km区間とする。この路線は10両編成の列車が約2分間隔で運行されているが、ピーク時混雑率は池尻大橋から渋谷で180%を超えている。

以下、2章では当該路線の遅延状況とその要因を考察し、3章では既存研究のレビューを行い、マルチエージェ

ントシミュレーションを適用した本研究の優位性を述べる。4章ではシミュレーションモデルの構造と使用したデータおよびその再現精度を述べる。5章では、4章で構築したシミュレーションモデルを用いて、渋谷駅の2面3線化や新線整備による需要分散策が遅延を軽減させる効果を試算し、モデルの挙動を把握する。6章で本研究の成果と課題をまとめる。

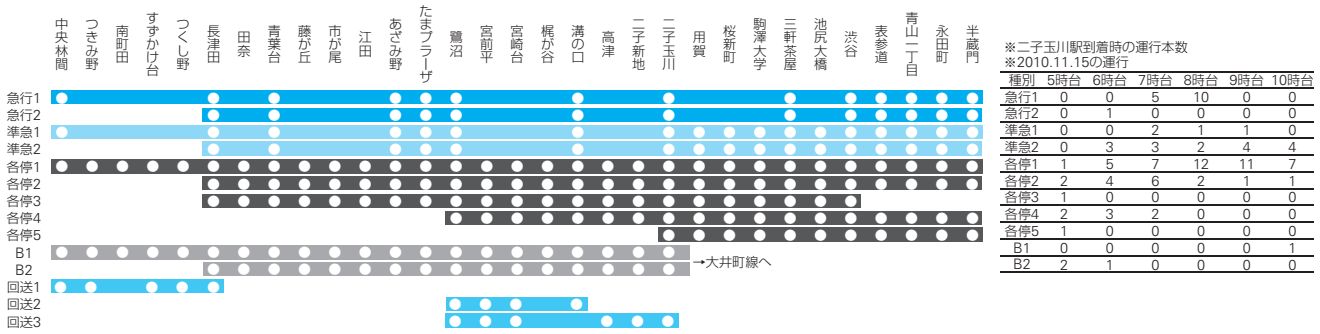
2—対象路線の遅延状況と発生要因

田園都市線長津田駅から半蔵門線半蔵門駅までの遅延の実態を分析するために、2010年11月15日～12月17日の平日24日間の午前6時から11時までの各駅の到着時刻、停車時間、発車時刻を自動列車運行制御装置より得られた秒単位の運行実績データと事業者の秒単位の発着時刻表とを使用する。

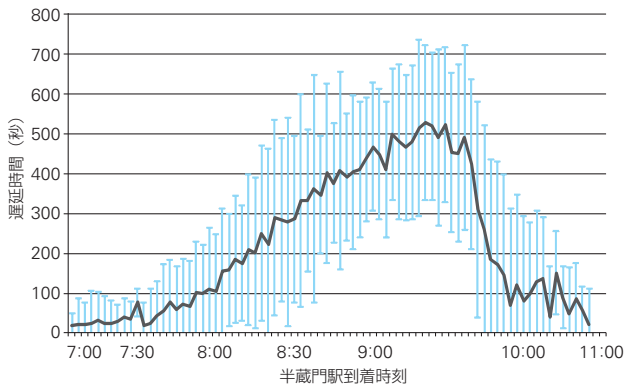
対象路線の運行パターンを図—1に示す。複数の種別で起終点の異なる列車が混合して運行されていることがわかる。

半蔵門駅に到着する列車の遅延時間の平均値と標準偏差($\pm 1\sigma$)を示したものが図—2である。半蔵門駅7:30頃着(長津田駅を6:45頃発)から遅延が始まり、9:30頃まで遅延が増加していき、その後30分程度で遅延が収まっていく様子がみとれる。平均値でみて9:30頃に8分強の最大遅延が発生している。

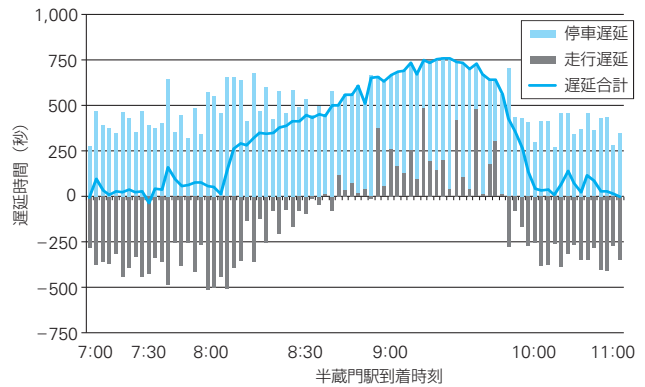
次に典型的な遅延の発生状況を示す11月15日のデータを例に停車遅延と駅間走行遅延に分解して遅延の発



■図—1 列車種別別の運行パターン



■図—2 半蔵門駅での遅延(24日間平均と標準偏差)



■図—3 長津田→半蔵門の停車遅延と走行遅延

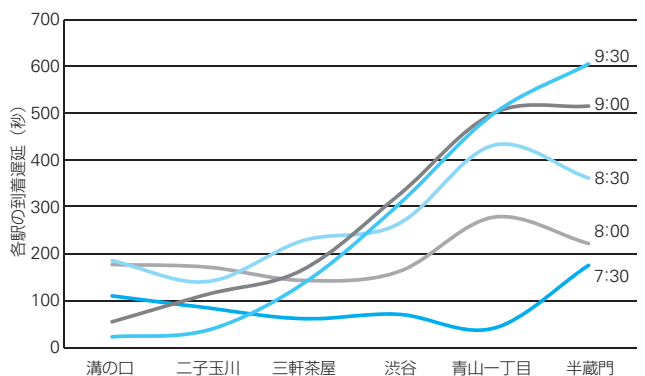
生要因を述べる。図—3に、ダイヤ上の停車時間と実績の停車時間との差を長津田駅から半蔵門駅の各駅で集計した「停車遅延」、ダイヤ上の駅間の走行時間(着駅時刻と発駅時刻との差)と実績の駅間走行時間との差を長津田駅から半蔵門駅間で集計した「走行遅延」、両者を合算した「遅延合計」を示す。全時刻にわたって停車遅延が発生しているが、8:00頃までは走行遅延がマイナスの値となる回復運転によって遅延合計は抑制されていることがわかる。しかし、停車遅延のさらなる増加によって回復運転で吸収しきれずに急激に遅延合計が増加していく様子がみとれる。遅延が顕在化すると、線路上での列車の渋滞が始まるため、回復運転も困難になり、9:00付近から駅間走行時間もダイヤの設定に収まらなくなるため、遅延合計の増加に拍車がかかり始める。その後、10:00に向けて需要の低下と運転間隔の余裕によって回復運転がなされて、遅延合計が縮小している。

停車遅延を回復運転で補うことができている間は、遅延の顕在化は抑制できるものの、図—3のように8:00過ぎに発生した合計600秒以上の停車遅延が連続した場合には回復が困難となる傾向が他の日でも認められる。この3列車の急激な停車遅延は、最初に普通列車が、池尻大橋駅で138秒の停車遅延を起こし、後続の準急列車が同じく池尻大橋駅で97秒、駒沢大学駅で158秒の停車遅延を起こし、さらに後続の普通列車が江田駅での57秒の停車遅延を起こしたことが主たる要因となっている。90秒

から200秒強の停車時間が発生する田園都市線の駅を11月16日、18日、12月6日の3日分で抽出したところ、渋谷駅、池尻大橋駅、三軒茶屋駅、二子玉川駅など、最混雑区間およびその付近の駅が抽出された。

遅延の連鎖状況を確認するために、遅延程度の異なる3日分のデータを平均して図—4に示す。7:30の段階で半蔵門駅から遅延が発生し、青山一丁目駅に遅延が連鎖するとともに、8:30頃まで田園都市線区間の後続列車にも遅延が拡大していく、その後、三軒茶屋駅から遅延の縮小がみられるものの、田園都市線での遅延が、半蔵門線に波及して、半蔵門線区間で、さらに遅延が拡大していく様子がみとれる。

以上から、田園都市線と半蔵門線では、日常的な遅延がみられ、半蔵門駅では9:00過ぎに平均500秒程度の到着遅延が発生している。初期の遅延は都心部で発生し、



■図—4 遅延の連鎖状況

高い混雑率と多量の乗車客数に伴う停車時間の増大により回復運転で補えなくなった段階で遅延が拡大していく。それが都心部の区間で発生した遅延が後続列車に伝播し、後続列車の遅延が吸収されないまま都心部で遅延がさらに拡大していることがわかる。

3——遅延モデルの先行研究

列車の遅延時間を取り扱ったモデルは、解析的モデルとシミュレーションモデルに大別される。

1966年にFrank¹⁾が初期の解析的モデルとして、単線の線路容量から遅延を評価する数理モデルを開発し、所要時間と最大運行本数の算出方法を提示している。その後、緩急接続や複線への拡張が複数の研究者によってなされ、Carey and Kwiecinski²⁾が運行計画上の運行間隔と遅延連鎖の関係を確率的に表現する非線形回帰モデルを構築した。岩倉³⁾は列車の追従走行による走行速度の低下と運行間隔の変動による乗降者数の変動が停車時間に与える影響とを動学モデルで表現したが、初期に発生する推計誤差が後続列車に伝播し、その誤差が拡大するため精度は極めて不十分であった。Higgins and Kozan⁴⁾はピーク時の都市鉄道の遅延現象を確率的に扱う連立方程式を提案し、157列車を対象に遅延を推計した結果、大規模シミュレーションモデルと比較して誤差8%程度の精度を確保している。岩倉⁵⁾はBPR関数を応用して、ピーク時の列車速度の低下を4路線でモデル化している。急行列車の駅間の走行速度の精度は相関係数0.9を超えて高いものの、急行待避等で時間調整が行われる各停列車や駅での乗降時間の再現精度はほとんど確保できていなかった。また、集中管理される列車運行をBPR関数で表現することの不適切さも課題であった。Huisman and Boucherie⁶⁾は幹線鉄道と都市鉄道とが混合する線路での列車の遅延時間と遅延の確率を導出するためにマルコフ連鎖によるモデルを構築し、オランダの67km区間に適用し数値解析を行っている。

シミュレーションモデルは、1982年のPetersen and Taylor⁷⁾が初期の研究成果の一つである。閉塞区間を考慮した走行時間関数を構築し、運行頻度が比較的高いカナダ鉄道への適用を行い、一定の精度を確保している。その後、Lu⁸⁾が都市鉄道と幹線鉄道、貨物鉄道が混合するロサンゼルス鉄道路線を対象に遅延時間をシミュレーションするアルゴリズムを開発している。短距離区間ごとに最高制限速度を設定し、加減速ルールがモデル化されている。また、Li^{9), 10)}はセルオートマトンを利用して移動閉塞方式への適用も念頭においたシミュレーションシステムの開発を行い、北京の地下鉄環状線を対象に

再現性の確認を行っている。

岩倉¹¹⁾は、種別の異なる複数の列車の走行速度を精度良く推計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て小田急小田原線を対象にモデル化し、運転曲線図と時刻表上の走行速度を精度高く推計できる可能性を示した。この研究では、駅停車時間の推計は回帰モデルから得られた関数によっていたため、その精度は十分ではなかったが、分析対象路線を東急田園都市線に変更して、乗降行動もエージェントモデルで表現することで改善を試みている¹²⁾。

仮屋崎¹³⁾は、東急田園都市線を対象にセルオートマトンによって駅間の走行状態並びに遅延時間を推計し、走行時間について重相関係数0.92の再現性を得た後、ATCコード変更による遅延時間の改善効果を分析している。

上述の岩倉¹²⁾が構築した乗降モデルは、一編成の列車の最も乗降時間のかかる1つのドアを対象としているが、稲木¹⁴⁾は混雑する駅ホーム上の旅客行動も含めた乗降行動をエージェントモデルで表現している。乗降時間の再現性を検証した特定の駅での再現精度は確保されているが、混雑率80%~140%程度を再現範囲としており、混雑率が高く遅延が慢性化している路線への適用が難しい。

既存研究の課題を総括すると、東京圏にみられる2分間隔で高頻度運行し、かつ列車種別の異なる列車が複雑に混合する路線を取り扱った研究が少ない。また、極めて高い混雑率や大量の乗降客が想定されていないため、停車時間の増進を明示的に取り扱っていない。停車時間と走行時間とが相互に連動するシミュレーションシステムの開発が行われていない。遅延時間の実績値に対する再現精度の検証例が極めて少ないなどの課題があげられる。

本研究では、以上の課題に対応できる列車の遅延連鎖シミュレーションシステムをエージェントモデルによって開発する。鉄道事業者の協力を得て、長期間の秒単位の遅延実績データを確保することでモデルの実証性を高めるとともに、コンピュータ上で実際の運行管理ルールを反映することで実務的にも理解が容易で、他路線へも拡張が容易なシステムを作成することをねらいとした。

4——シミュレーションモデルの構築

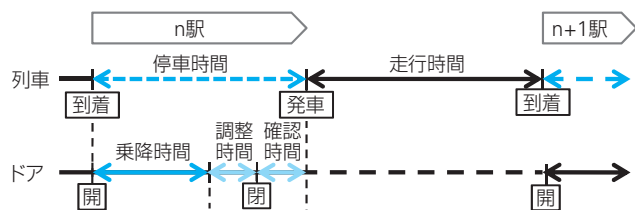
4.1 シミュレーションモデルの概略

本研究のねらいに対応するためには、線路上での列車間の接近時の相互作用や、駅停車時での乗降客間の相互作用を表現する必要がある。特に利用者の乗降行動

に依存する停車時間を表現するためには、利用者が自律的に判断して行動するメカニズムを取り入れる必要がある。走行時間と停車時間とを包括してシミュレーションするためには、マルチエージェントシミュレーションの親和性が高いと考えた。

モデル作成に利用したプログラミングソフトは(株)構造計画研究所のartisoc academic 3.0である。

モデルは、図—5に示す時間の定義に従い、駅間走行時間を推計するサブモデルと乗降時間を推計するサブモデルおよび確認時間と調整時間を推計するサブモデルを統合して、ピーク時間帯における対象区間を全ての列車が走行し、全ての駅での乗降行動を表現する構成となっている。



■図—5 停車および走行時間等の定義

なお、駅間走行時間とは列車がある駅を出発し、次駅に到着するまでに要する時間を、乗降時間とは旅客の乗降に要する時間をいう。また、調整時間とは旅客乗降の完了時点から列車の扉が閉まるまでの時間、確認時間は列車の扉が閉まった時点から列車が動き出した時間までの差分を指す。

以下で各サブモデルと統合モデルの構造と使用データ、再現精度について述べる。

4.2 駅間走行時間推計モデル

4.2.1 モデルのルール設定

モデルは0.2秒ピッチで、与件の実際のATC信号コードに従い、実際の運行方法とほぼ同様に以下のルールで動作する。

Rule1:ダイヤ上の発時刻を過ぎ、かつ前方閉塞区間内に先行列車が存在しない場合、起動加速度3.3km/h/sで力行する。

Rule2:前方の16閉塞区間内の先行列車の最後尾位置を検知し、前方列車位置から信号コードに対応した区間許容速度で走行する。なお、区間許容速度は先行列車との位置関係により、信号展開図のパターンに従って、田園都市線は最大15段階、半蔵門線は最大9段階と定める。

Rule3:前方16の閉塞前まで先行列車が存在しない場合は、区間許容速度の-10km/hで運転する。

Rule4:減速の場合は $a = -3.5\text{km/h/s}$ 、 x を列車位置から

停止線までの距離として $V = \sqrt{2ax}$ で走行。

Rule5:加減速度は、次式の線路勾配 $i(\%)$ の影響を受け、 $a((\text{km/h})/\text{s}) = 3.3 - 0.035i$ で決定される。例えば、勾配が20%で加減速度が約23%低下する感度となっている。

Rule6:停車駅が接近した場合、Rule4の減速ルールに従って走行し、列車停車位置で停止する。

4.2.2 モデル構築に用いたデータ

(1)信号コード表:ATC信号コードから、閉塞区間、速度信号、勾配、配線や駅位置等設備データをシステム空間上の路線に反映する。

(2)駅ホーム図面:各駅の列車停車位置設定に用いる。

(3)車両性能表:東急田園都市線の代表的な車両である5000系の編成長200m、最高速度110km/h、加速度3.3km/h/s、減速度3.5km/h/sを設定する。

(4)発着時刻表:モデルでの発車指令のためにダイヤ上の10秒単位の発車時刻と停車時間を使用する。なお、後述の統合モデルでは、停車時間はモデルから推計するため外生する必要はない。

以上に加えて、再現精度の確認と向上のために、

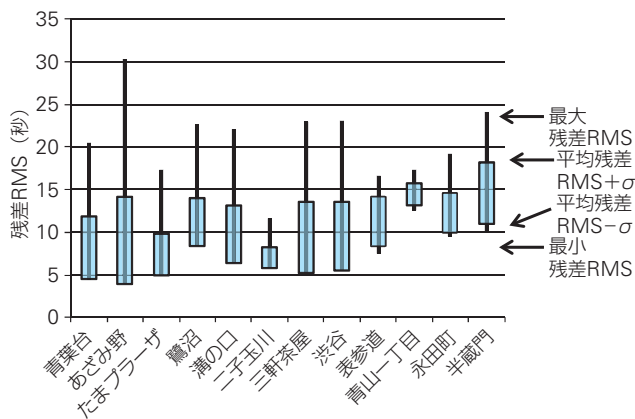
(5)運行実績データ:実際の遅延状況を把握するため、2010年11月15日から12月17日までの平日24日間の午前6時から11時までの自動列車運行制御装置より得られた秒単位の各駅の到着時刻、停車時間、発車時刻を収集した。自動列車運行制御装置は、駅に停止した際に在線する軌道回路の進入と進出の短絡時間に補正をかけて算出されており、実際の発着時刻とは10秒程度の誤差がある。

4.2.3 モデルの再現性

実際の停車時間を外生して、平日24日間の長津田駅から半蔵門駅までのシミュレーション結果の再現性を以下に述べる。全列車の到着時刻の推計値と実績値との残差RMSを青葉台駅から半蔵門駅までの急行が停車する12駅において算出した結果、全列車平均で10.3秒程度となった。図—6に到着時刻の残差の平均値と標準偏差 σ および残差の最大値と最小値を示す。残差平均 $+1\sigma$ でも20秒以内に収まっていることがわかる。また、長津田駅から半蔵門駅までの駅間走行時間の推計値と駅停車時間の実績値を合算した所要時間の推計値と実績値との相関係数は0.99以上を得ることができた。

以下では列車種別別に到着時刻の推計値の残差と所要時間の推計値(上記と同様に駅間走行時間の推計値と駅停車時間の実績値との合計値)と実績値との相関係数を述べる。

急行列車の青葉台駅から半蔵門駅までの停車駅12駅での到着時刻の平均残差は11.4秒、所要時間の相関係



■図—6 駅間走行時間モデルの到着時刻の再現性

数は0.98以上である。

準急列車の停車駅16駅での到着時刻の平均残差は10.0秒、所要時間の相関係数は日によって0.87~0.97とややばらつきがある。池尻大橋駅のみが概ね40秒程度の残差である。池尻大橋駅で発生する比較的大きい残差は、三軒茶屋駅から池尻大橋駅間の所要時間の過小推計によるもので、渋谷駅手前の線路上で車両が長時間停車することを防ぐためにATC信号以外に導入されている渋谷在線表示器を、モデルルールに設定していないためと考えられる。

普通列車の田奈駅から半蔵門駅までの停車駅25駅での到着時刻の平均残差は13.0秒、所要時間の相関係数は0.99である。ただし、池尻大橋駅では50秒程度の残差が発生している。この理由は、上述の渋谷在線表示器を考慮していないため、実際には池尻大橋で待機している列車を、モデル上はRule2の信号コードに従い出発させているため、後続列車の構内進入が早まっていることが原因と考えられる。

4.3 乗降時間推計モデル

4.3.1 モデルのルール設定

停車時間は、混雑車両において最も乗降量が多いドアによって決まることが一般である。モデル化にあたっては、もっとも乗降時間のかかるドアを特定して、乗降行動データの取得とルールの設定をおこなう。モデルは0.2秒ピッチで作動する。

システム上の空間は、ドアを中央にもつ1/4車両である。乗降客の個体の直径を40cmと設定し、旅客エージェントを降車客、再乗車客、乗車客の3つに区分し、その属性を性別および携帯電話を見ながら乗車する付随的行動別に分類する。なお、各駅各列車の乗車客数は、ビデオ観測および大都市交通センサから得られた実績値から設定する。また、以下のRule2からRule5の歩行速度の設定値は、ビデオ映像から2次元動画計測ソフトMOVE-tr/2D

を用いて位置座標を与えて計測した乗車速度の計測値をもとにしている。なお、ビデオ映像の取得中に加速度センサによって正確な乗車速度データを4回取得して、位置座標からの乗車速度の精度を分析した結果±20%程度の誤差があることを確認している。

このように、実際の乗降行動を分析した上で、以下のルールを設定した。

Rule1: 駅到着時には、当該駅で降車する降車客エージェントと、ドア付近に立っている通過旅客が一旦ホームに出た後、再度乗り込む再乗車客エージェントとが作動する。降車客エージェントは、車内からホームへ向かって、前方180度を等間隔に45度ずつ5方向に対して20cm先の他の乗降車客エージェント数をカウントして、もっともエージェント数の少ない方向へ回避しながら移動する。

Rule2: 歩行速度の初期値は、乗車中の0cm/sから0.2秒ごとに5cm/s~30cm/sの間を一樣乱数で速度を増加させ、上限の速度を130cm/sとする。旅客属性別の歩行速度設定は、ビデオ画像の実測の結果から男女比を7:3とし、初速度は男性を1倍とすると女性は0.9倍とした。携帯電話等の付随的行動をする旅客エージェント数は、実測結果から乗車客数の5%で設定し、歩行速度は前方旅客の0.68倍で移動する。

Rule3: 再乗車客エージェントとなるのは、降車ドアに接する160cm×60cmの空間内に立ち、降車の妨げになって、一旦ホームに降りる通過旅客エージェントである。一旦降車した後は、ホーム上のドア付近に滞留する。

Rule4: 降車客の処理が完了後、乗車客と再乗車客がホーム上から車内へ乗り込む。乗車客と再乗車客エージェントはRule1と同様に、前方180度を等間隔に45度ずつ5方向に対して20cm先の他の降車客と再乗車客エージェント数をカウントし、もっとも旅客エージェントの少ない方向へ移動する。

Rule5: 乗車速度の初期値は、整列乗車で待機している状態の0cm/sから0.2秒ごとに5cm/s~30cm/sの間を一樣乱数で速度を増加させ、上限の速度を130cm/sとする。なお、車内の混雑状況によってパーソナルスペースを確保しながら速度調整を行う。

Rule6: パーソナルスペースの初期値を、各旅客エージェント中心の半径40cmの円とし、各エージェントは0.2秒ごとに旅客エージェントの半径40cmから半径20cm(エージェント個体の大きさ)までの範囲に他の旅客エージェントが存在する場合は、パーソナルスペースの半径が0.2秒ごとに1.6cm縮小する。

Rule7: 乗車客エージェントは、進行方向の±135度の範囲の他の旅客が存在しない空間へ0.2秒ごとに歩行速度8cm/sで加速し、進行方向の正面80cm先に他の旅客

エージェントが存在する場合は0.2秒ごとに8cm/sで減速するように加減速を繰り返しながら車内に乗り込む。

Rule8: 車内に乗り込んだ後の立席位置の選好順序は、乗車したドア付近が1番、左右に分かれ車内奥が2番、ドアから直進した反対側ドア付近を3番とし、半径80cm内の他の旅客エージェントの少ない位置を探索する。結果的に、乗車後の旅客エージェントの車内配置は、ドア付近を極力避けつつ、旅客エージェント同士の距離が一定になるように調整されていく。

Rule9: 旅客同士の押し込みがある場合は0.2秒ごとに歩行速度4cm/sで減速し、旅客同士の押し込みが起きていない場合は、直進の歩行速度は0.2秒ごとに8cm/sで加速し、左右へ回避する場合は4cm/sで加速して進む。押し込み行動は、1/4車内中心の1.6m四方範囲に13人以上(混雑率180%相当)の旅客が存在する場合に発生する。

4.3.2 モデル構築に用いたデータ

(1) 乗降速度: 準急停車駅のホーム上部から最混雑ドアを2010年11月16日から12月10日までの平日18日間7:00-10:00のビデオ撮影した乗客個々の1秒ごとの位置座標をMove-tr/2D ver.7.0を用いて作成し、ドア通過速度を294列車について算出した。旅客属性(性別や付随的行動)を付与した。降車速度は乗車行動と同一のルールとしたため計測していない。

(2) 乗降客数: 2010年11月16日と18日、12月6日の列車ごとの準急停車駅の最混雑ドアの乗降客数をビデオ画像からカウントした。各駅停車駅と半蔵門線停車駅は平成17年大都市交通センサスを用いて15分ごとの乗降客数を与えた。

(3) 車両寸法: 東急5000系の1/4車内を復元するために車両諸元表を利用した。

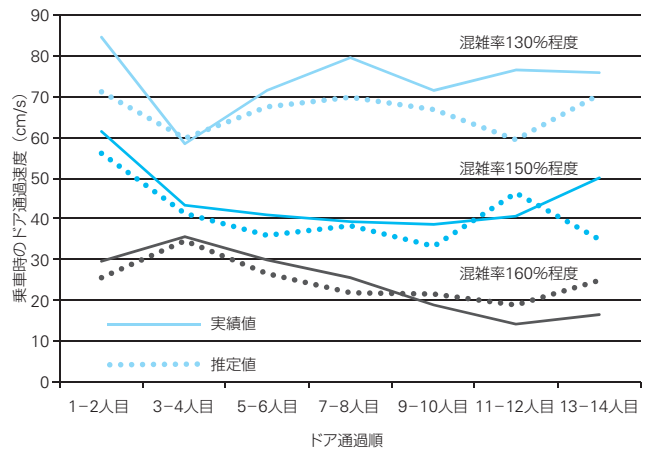
(4) 応荷重データ: 車内混雑が乗降速度に与える影響を反映するため、最混雑ドアの車両の乗車人数(混雑率)の取得した。応荷重装置を搭載した東急5000系のみ2010年11月15日から12月10日の平日19日間7:00-9:00のデータである。

(5) 駅ホーム図面: 各駅のホーム幅員を与えた。

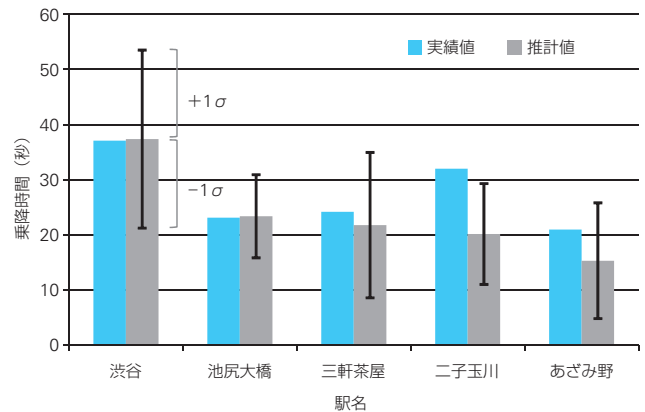
4.3.3 モデルの再現性

車内混雑率別の乗車速度の再現性を図-7に示す。横軸は乗車順ごとの乗車客個々のドア通過速度を推定値と実績値で示したものである。混雑率が高くなると乗車速度が低下する様子が再現できている。また、乗車順序ごとのドア通過速度の追従性も高いと考える。

乗降量のタイプのことなる駅ごとに乗降時間計の再現



■図-7 乗降時間推計モデルの歩行速度の再現性



■図-8 乗降時間推計モデルの乗降時間計の再現性

精度を図-8に示す。図上の推定値は100回のシミュレーション結果の平均値を棒グラフで、標準偏差($\pm 1\sigma$)を実線で示した。一部の列車の乗降時間ではあるものの高い精度で再現できている。

ただし、再乗車人数の推定値をビデオ画像で再乗車客を特定可能な三軒茶屋駅と池尻大橋駅とで確認したところ1.5倍過大推計(標準偏差0.41倍)されていることがわかっており、後述する統合モデルにおいて停車時間が過大に推計される要因となっている。過大推計の原因は、車内奥の降車客エージェントが降車ドアへ移動することで、一部の通過旅客エージェントが降車ドアに押し出されて、実績以上に再乗車客数が増加しているためである。これに抵抗して車内に留まるルールを設定することが必要と考える。

4.4 調整時間・確認時間推計モデル

Rule1: 調整時間は、乗降終了後にドアが閉まるまでの時間を指す。本モデルでは、ダイヤ上の発時刻前に乗降が完了している場合は、発時刻までドアを開いた状態に設定する。なお、遅延時には運転間隔調整によって、駅停車時間を調整することがあるが、本モデルには反映できていない。

Rule2: 確認時間は、ドアを閉めてから、発車するまでの時間を指し、荷挟まりなどによって増加する。確認時間には混雑率、乗車人数、乗車時間などが直接、間接に影響すると考え、3つの要因の単相関をとった結果、混雑率が相関係数0.6で最も高かったため、混雑率50%刻みで、確認時間の平均値 m と標準偏差 σ を算出し、これを正規乱数として発生させる設定を行った。混雑率50%以下は $m=7$ 秒、 $\sigma=2$ 秒、100%以下は $m=9$ 秒、 $\sigma=2$ 秒、150%以下は $m=11$ 秒、 $\sigma=4$ 秒、200%以下は $m=14$ 秒、 $\sigma=4$ 秒、201%以上は $m=15$ 秒、 $\sigma=5$ 秒である。

4.5 モデルの統合

以上のサブモデルを用いて、遅延連鎖をシミュレーションする統合モデルを構築する。統合されたモデルのシミュレーション画面の一部が図9である。画面の線路上で各列車が走行し、各駅で乗降状況が表示される。画面中の線路上には、走行列車の等級、閉塞区間長(図中配色された区間が閉塞を表す)、勾配が表示され、前方列車との距離に応じて線路の色が変化する。駅停車時には、降車客、乗車客、通過客および旅客属性が表示され、また、乗降中、確認・調整中、発車合図、非停車状態によって駅の色が変化する。

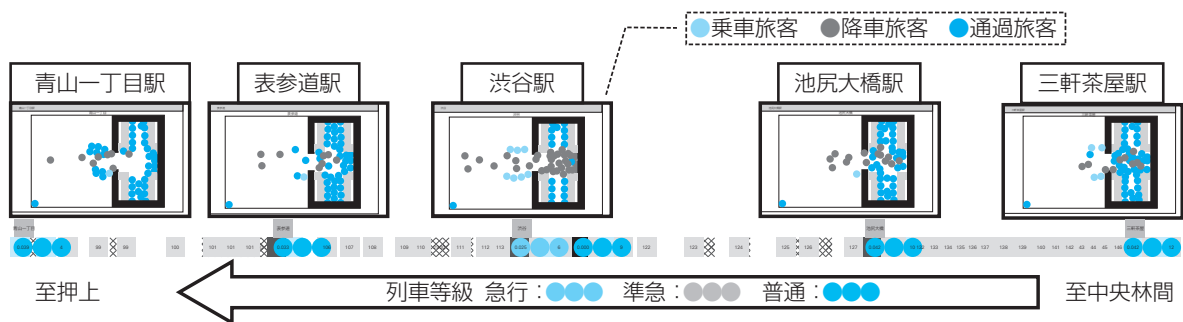
統合モデルでは、列車の運行間隔の変化によって乗車客数が変化するため、初期値として遅延が少なかった11月18日の時刻別の乗客数を設定した後、シミュレーションでの列車遅延状況によって刻々と列車ごとの乗客数が変

動する設定としている。

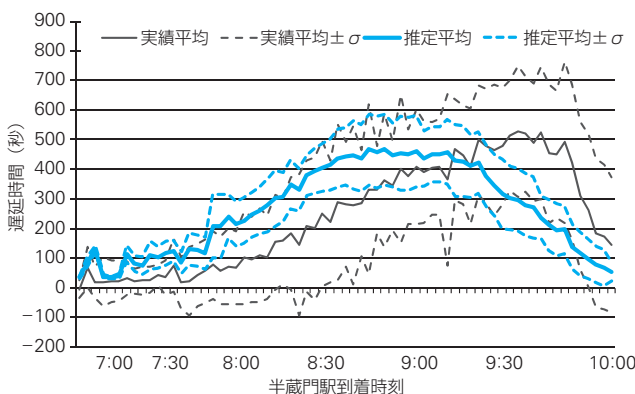
乗客数の変化によって、車内混雑率や降車客数も変化するのが実際ではあるが、時刻別の利用者のOD情報の組み込みが必要なため、当システムでは未だ反映できていない。また、4.3.3節で前述したように、乗降時間サブモデルでの再乗車客数が実際より過大に推計されるため、本稿では、乗客数を7割に調整して推計した。加えて、強制発車を行う設定をしており、緩急接続駅以外の駅の停車時間は2分、渋谷駅では3分とした。強制発車は、ホーム整理員エージェントを設定していないため、乗車が完了しない状況が発生するために組み込んだ。強制発車の停車時間は、停車時間の最も長い実績値を参考にして設定した。以上の設定は、停車時間を過小に推計する課題を有している。

統合モデルの再現精度を図10と表1に示す。図10は半蔵門駅での到着時刻の遅延を示したものである。実績値は平日24日間の平均値と標準偏差($\pm 1\sigma$)、推計値は10回のシミュレーションの平均値と標準偏差($\pm 1\sigma$)である。統合モデルの再現性は、平日24日間の平均的な挙動が再現できているかを確認するもので、様々な要因で遅延の大きさや遅延発生、収束のタイミングが異なる日々の遅延のトレースを意図していないことに留意されたい。

平日24日間の標準偏差内には収まり、ピークタイムに向けて遅延が拡大しており、実績と類似の挙動を示していることが見てとれる。しかし遅延が始まるタイミングが早く、9:15頃まで過大推計で9:30以降は過小推計となってい



■図9 遅延連鎖モデル(統合モデル)のシミュレーション画面の一部



■図10 半蔵門駅での遅延の再現性

■表1 区間別遅延時間の再現性

半蔵門駅 到着時刻	長津田→ 半蔵門		鷺沼→ 二子玉川		二子玉川→ 渋谷		渋谷→ 半蔵門	
	RMS	R	RMS	R	RMS	R	RMS	R
Total	151	0.63	35	0.22	167	0.60	75	0.59
-7:30	62	0.41	29	0.50	39	0.38	99	0.75
7:30-8:00	116	0.67	29	-0.13	83	-0.11	68	0.25
8:00-8:30	163	0.95	24	0.71	173	0.78	31	0.66
8:30-9:00	130	0.78	30	0.49	279	0.68	37	0.86
9:00-9:30	82	-0.64	58	0.67	198	-0.94	79	0.13
9:30-10:00	220	0.93	34	0.44	66	0.95	104	0.18

※RMSは秒単位

る。このような誤差が発生する原因を表—1で説明する。表は、区間別時間帯別にみた残差RMSと相関係数を表す。長津田→半蔵門の残差は図—10と対応しており、7:30以前では60秒程度の精度であるが、7:30—9:00にかけて100秒から160秒程度の過大推計となり、9:30—10:00で220秒程度の過小推計となっている。9:00—9:30で相関係数がマイナスを示しているが、これは実績の遅延が増加している時間帯で、推計値の遅延が収束し始めているためである。

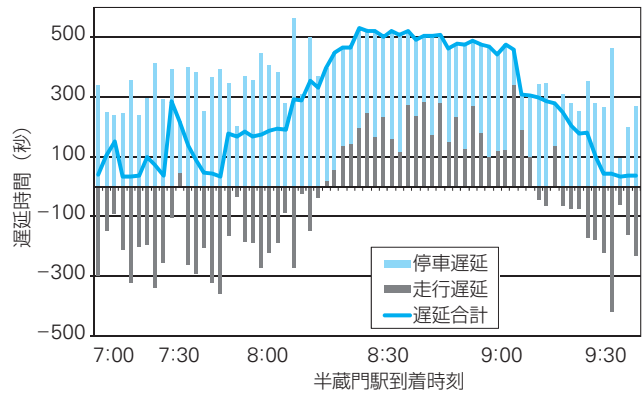
長津田→半蔵門を3つの区間、すなわち鷺沼→二子玉川、二子玉川→渋谷、渋谷→半蔵門に分解して残差をみると、二子玉川駅までは精度良く推計できているが、二子玉川→渋谷で大きな残差が発生している。この理由として、大都市交通センサスと応荷重データを参考にこの区間を8:00—8:30に通過する列車の混雑率を250%前後で与えており、三軒茶屋駅および池尻大橋駅での乗降時間の推計値が過大となり、それが後続列車の渋滞を引き起こし9:00過ぎまで継続していることがあげられる。

渋谷→半蔵門での残差は7:00—8:00までが過大推計、8:00—10:00が過小推計で発生したものである。この結果、二子玉川→渋谷で8:00—10:00に発生した過大推計がいくぶん解消されつつも、半蔵門駅まで保存されて半蔵門駅での到着遅延時間の過大推計する結果となっている。

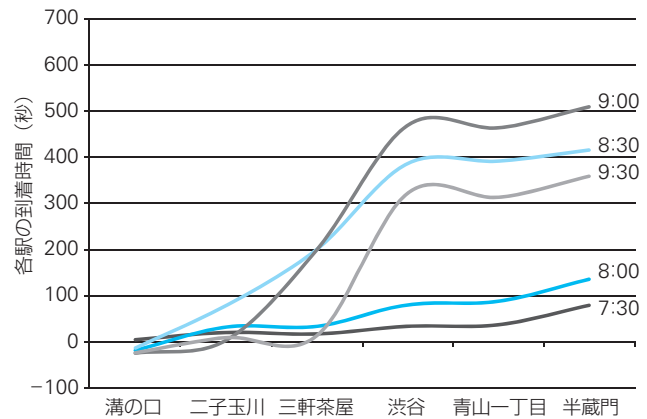
2章の対象路線の実際の遅延状況と発生要因で説明した図—3で、半蔵門駅8:00到着の列車までは、増加した停車時間を回復運転によって抑制できるが、それ以降は、回復運転で吸収しきれずに、急激に遅延合計が増加することを説明した。図—11に示すように本シミュレーションでは同じ状況を再現できていることがわかる。また、図—12は、遅延の連鎖状況を、図—3と同一駅で示したシミュレーション結果である。挙動には幾分相違はあるものの、都心部の区間で発生した遅延が後続列車に伝播し、後続列車の遅延が吸収できないまま、都心部で遅延が拡大する様子が表現できている。

5—遅延対策の効果分析

供給側の主要な遅延対策メニューとしては、列車間隔の工夫、ホーム整理員の増員、ワイドドア車両の導入、信号システムの改良、ホーム階段の増設による乗降量の分散、線路容量の増加などがある。本シミュレーションシステムは、乗降時間推計モデルの再現精度の改善が必要な段階であることや、ホーム整理員をエージェントとして組み込んでいないこと、最も乗降時間を要する特定のドアのみを対象としている。このため、現段階で効果を精度



■図—11 停車遅延と走行遅延の再現



■図—12 遅延連鎖の再現

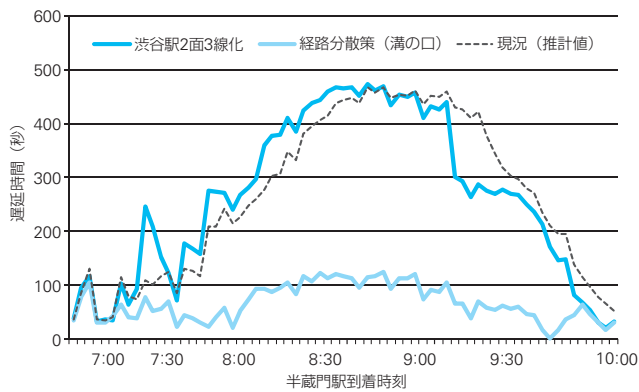
良く分析できる対策は、列車間隔の工夫や信号システムの改良、線路容量の増加と考えている。

以下でこの統合モデルを利用して、輸送力の増強による遅延対策効果の計測を試みる。しかし、上述のように、未だいくらかの誤差をかかえたシミュレーションシステムであることから、対策による遅延時間の変動の妥当性や、シミュレーションから得られる情報の有用性について論じる。

対策メニューは、渋谷駅の2面3線化、溝の口駅から都心部への新線整備の2種類である。これらは、対策後に運転計画の変更を伴う施策であるが、ここでは、現行のダイヤを変更せずに適用する前提条件をおく。

渋谷駅2面3線化は、上り2線での交互発着と中線入線時にドアの両側開扉によって乗降時間の短縮を図るものである。図—13に対策前後での半蔵門駅での遅延時間を示す。結果は分布が早い時間にシフトするとどまり効果がないように見える。渋谷駅の処理容量を増加できたが、シミュレーション結果からは8:00までに半蔵門線内へ進入できる車両が増えたことで、半蔵門線内がボトルネックとなり、8:00以降で二子玉川→渋谷で急激に遅延が伝搬したことがわかっている。

実際には、2面3線化実施時は運行計画の見直しが必要とされ、渋谷駅での折り返し車両の増発によって遅延対策効果が期待できるが、併せて、半蔵門線内の閉塞区間の



■図—13 遅延対策のシミュレーション結果(現行ダイヤを前提とした結果)

見直しや追い越し施設の整備などの線路容量の増加をセットで図ることでより効果の大きくなる可能性を示唆する結果となっている。

溝の口駅から都心部への新線整備によって、田園都市線および半蔵門線の溝の口以東の乗降人数および混雑率が15%減少するという仮定をおいて試算した。この結果、遅延が大幅に減少する結果となった。都心部駅で発生した停車時間の増進が当該路線の遅延に大きな影響を与えていることを示唆する結果となっている。

6—おわりに

相互直通運転を行っている東急田園都市線と東京地下鉄半蔵門線を対象に、遅延の連鎖を予測可能なマルチエージェントモデルの開発を行った。駅間走行時間推計モデルと乗降時間推計モデルのサブモデルの再現精度は良好な結果を得ることができた。統合モデルの再現精度は、再乗車旅客の行動の再現に未だ課題があるものの一定の精度は得られたものとする。またいくつか遅延対策の効果を予測した結果、理解可能な挙動を示すことがわかった。

今後の課題としては、第1に上述した乗降時間推計モデルの再乗車行動の行動ルールの検討があげられる。車内での再乗車旅客の挙動を表現するための観測データを得ることは簡単ではないが、行動ルートを複数検討し、乗降時間の推計精度を検証する方法が考えられる。第2に列車の遅延によって各列車の乗降客数と混雑率が変化するが、本研究では列車間隔によって各列車の乗車客数、乗車時間、停車時間が変動するシステムにとどまっている。乗車客数の変動に伴う各列車の混雑率、各列車各駅の降車客数が停車時間の誤差に影響すると考えられ、時刻別の駅間OD交通量の情報を組み込む必要がある。第3に、適正なシミュレーション回数を検討するに至っておらず、シミュレーション結果の安定性と計算

コストの検討を行いたい。第4に、どういった範囲の遅延対策メニューを精度高く分析することが可能かの検討ができていない。少なくとも、本稿で構築した乗降時間推計モデルは、乗降時間のかかる1つのドアのみを対象として構築しており、階段位置の変更によって、乗降客が車両で分散する影響を分析できないシステム設計となっている。

謝辞:データの提供および数多くの研究上のアドバイスをいただいた東京急行電鉄(株)および東京地下鉄(株)の方々にご心より感謝申し上げます。

本研究は2007年からスタートしており、当時研究室に所属していた上松苑氏(鉄道・運輸機構)、大木徹憲氏(鉄建建設(株))、辻井隆伸氏(足立区)、武井千亜生氏(さいたま市)、稲見隆史氏(JR東海)の尽力によるところが極めて大きい。

本研究は、2009年～2011年度の科学研究費基盤研究B(課題番号:21360242)の一環で行われた研究であり、共同研究者の政策研究院大学院大学日比野直彦准教授と鉄道・運輸機構の仮屋崎圭司氏に深く感謝申したい。また、大都市交通センサスの乗降データの加工は(株)ライテックの土居厚司氏に協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Frank, O.[1966], "Two-way traffic in a single line of railway", *Operations Research*, Vol. 14, pp. 801-811.
- 2) Carey, M., Kwicinski, A.[1994], "Stochastic approximation to the effects of headways on knock-on delays of trains", *Transportation Research Part B*, Vol. 28, No. 4, pp. 251-267.
- 3) 岩倉成志・森地茂・伊東誠[1996], "都市鉄道輸送改善シミュレータの試案", 「土木計画学研究・講演集」, No. 19(2), pp. 717-720.
- 4) Higgins A. and Kozan E.[1998], "Modeling train delays in urban networks", *Transpn Science*, Vol. 32, No. 4, pp. 346-357.
- 5) 岩倉成志・渡辺将一郎・土居厚司[2000], "都市鉄道の時刻別需要予測のためのリンクコスト関数の開発—小田急小田原線を対象に—", 「土木計画学研究・論文集」, No. 17, pp. 709-714.
- 6) Huisman T., Boucherie R.J.[2001], "Running times on railway sections with heterogeneous train traffic", *Transpn Res Part B*, Vol. 35, pp. 271-292.
- 7) Petersen, E.R., Taylor, A.J.[1982], "A structured model for rail line simulation and optimization", *Transportation Science*, Vol. 16, pp. 192-206.
- 8) Lu Q., Dessouky M.M., Leachman R.C.[2004], "Modeling train movements through complex rail networks", *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, Vol. 14, pp. 48-75.
- 9) Li K., Gao Z., Ning B.[2005], "Cellular automaton model for railway traffic", *Journal of Computational Physics*, Vol. 209, pp. 179-192.
- 10) Fu Y., Gao Z., Li K.[2008], "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.
- 11) 宮崎信介・藤代隆正・岩倉成志[2007], "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", 「土木計画学研究・講演集」, Vol. 36, CD-ROM.
- 12) 岩倉成志・上松苑・高橋郁人・辻井隆伸[2011], "高頻度運行下での都市鉄道を対象とした遅延連鎖シミュレーションシステムの開発", 「土木学会論文集 D3 (土木計画学)」, Vol. 67, No. 5, pp. 879-886.

13) 仮屋崎圭司・日比野直彦・森地茂[2011], “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.

14) 稲木達哉・富井規雄[2011], “駅ホーム上のマルチエージェントによる乗降時間の推定”, 「電気学会交通・電気鉄道研究会資料」, TER11号, pp. 23-30.

(原稿受付 2012年6月1日)

A Multi Agent Simulation Model for Estimating Knock-on Train Delays under High-Frequency Urban Rail Operation

By Seiji IWAKURA, Ikuto TAKAHASHI and Shigeru MORICHI

The decreasing travel time reliability of urban railway services in the Tokyo Metropolitan Area is the result of the train delays in daily morning hour period. The proposed multi agent simulation model is developed to analyze train knock-on delay in a 48.3 km track length from Ngatsuda station of the Denentoshi line to Oshiage station of the Hanzomon line. The simulation part consists of a train traffic simulator and a passenger flow simulator with that works in parallel. The errors in the delay estimation of individual trains by the proposed simulator are within the allowable limits in comparison to the actual train delay. Some forecasting results of investment strategies designed to reduce delay can be assessed.

Key Words : **knock-on train delay, multi agent simulation, urban rail, high frequency operation**
