

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：12703

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009年度～2011年度

課題番号：21360242

研究課題名（和文） 都市鉄道の高頻度化運行に伴う列車遅延と波及に関する研究

研究課題名（英文） Study on Train Knock-on Delay under High Frequency Operation

研究代表者

森地 茂（MORICHI SIGERU）

政策研究大学院大学・政策研究科・特別教授

研究者番号：40016473

研究成果の概要（和文）：

本研究は、遅延の発生・波及の要因について、列車運行の実績値データを用いた分析を行うとともに、相互直通運転を実施する首都圏の実路線を対象に、旅客流動および列車運行挙動をマルチエージェントモデルで再現し、列車毎の遅延時間および遅延対策効果を予測する技術を開発した。また、このモデルを用いて、遅延拡大の抑制方法や早期回復方法について、具体的な対策の効果を予測した結果、今後の都市鉄道整備の方向性について示唆的な情報を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：

This study presents knock-on train delay estimation method using multi-agent model. The proposed models reflect the constraints of ATC signaling system, train operation rules and passenger behavior rules. Using this simulation model, this study attempted to grasp an actual situation of train operation under the knock-on delay. In this process, the study describes the acquired knowledge that could be useful to the examination of measures to decreasing train delay.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2010年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2011年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 土木計画学・交通工学

キーワード：交通計画

1. 研究開始当初の背景

首都圏の鉄道は、高密度な鉄道網整備、列車の長編成化、高頻度運行、相互直通運転の実施、ホームドアの設置等により、広域かつ巨大な通勤需要を正確かつ安全に輸送可能とした世界に誇れるシステムである。特に車両内の混雑問題に関しては、その解消を最大の政策課題としてきた結果、大きな成果を挙げてきたと言える。それゆえに、首都圏の鉄道網は「概成された」と言われることがある。

しかしながら、特にこの高頻度運行、相互直通運転といった日本の最も特徴的な鉄道政策が大きな成果を挙げた反面、その副作用として、(i) 通勤時間帯の慢性的な遅延、(ii) 人身事故、車両故障等により発生した遅延の広域的な連鎖、(iii) 一度発生した遅延の回復に数時間も要してしまうといった回復困難性の問題が起り、ある種のパラドクスとなっている。これらの問題に対して、折り返し運転施設の設置等

の対策は行なっているものの抜本的な解決には至っていない。これは「概成」どころか「日本の鉄道神話が崩れた」とも言うべき状況であり、その対策は急務である。日本の鉄道にとっての再チャレンジとも言える。

2. 研究の目的

本研究は、都市鉄道が直面する新たな課題について実態の把握と原因の分析・究明を行なうとともに、技術的、制度的対策の可能性について検討を行なう。具体的には、遅延の発生と波及を定式化し、現象を再現するモデルを構築することにより、遅延の発生と波及のメカニズムを明らかにする。さらにその結果を踏まえ、制度的、技術的な面から検討を行なったうえで、具体的な解決方法を提案する。この研究により、鉄道の信頼性を取り戻すとともに、従来の車内混雑緩和等を中心とした政策から進展し、利用者への新たなサービス向上につながる鉄道計画に資することとする。

3. 研究の方法

本研究は、首都圏鉄道網を対象として高頻度運行状況下における(1)遅延の発生・波及の定量的分析、(2)旅客流動モデル、乗降時分推定モデルおよび列車走行時分推定モデルの構築によるシミュレーション分析、(3)技術的・制度的課題の検討の3つに大別され、以下の順で分析を進める。

(1) 遅延の発生・波及の定量的分析

列車遅延の発生は、乗降時分増加等に伴う駅停車時分の増加が主な要因と考えられる。乗降時分は、①駅構内・ホーム上の滞留、乗車待ち行列等の駅構内の旅客流動、②車内混雑と乗降速度等に依存する。そして、その遅延は、③列車の団子運転による速度低下等により伝播し波及すると考えられる。そこで、これらの現象を詳細に分析するとともに、相互に連動する一体的な分析を行い、遅延の発生・波及のメカニズムを究明する。そこで、以下の3段階に構成する。

① 駅構内における旅客の発生・流動の定量的分析

大規模ターミナル駅において旅客の追跡調査を行い、降車する列車扉から改札や乗継路線までの旅客の歩行行動に及ぼす影響について分析する。駅構内の旅客の歩行速度、経路選択、乗降位置選択に影響を及ぼす要因を探り、また、過去に開発した位置座標、走行軌道の自動取得システムを活用し、効率的なデータ分析を行なう。

② 列車内混雑と乗降人数に着目した列車乗降速度の定量的分析

研究分担者の既往研究から、駅乗降時分と乗降人員とに比例関係があることを確認しており、遅延状態のときには、駅停車時分が駅乗降

時分に大きく影響を及ぼすことが分かっている。そこで、乗降人員が列車扉を通過する時間を計測し、乗降人員と単位数あたりの通過時間を計測する。これを都心駅と郊外駅など特性の異なる駅で比較分析し車内混雑との影響や、それらが乗車時分と降車時分に与える影響を定量的に把握する。

③ 駅停車時分の変化に着目した列車運行挙動の時系列分析

事前調査から、駅員の配置位置や人数、ホームドア等の有無、都心駅と郊外駅の違いによって駅停車時分の内訳が異なり、遅延の発生要因が多様であることが分かっている。そこで、駅停車時分は、列車乗降に要する旅客流動の時分と、事業者が運行上の安全確認に要する時分とを区別して把握するため、列車ドア開時を旅客乗降時分としてデータを計測する。また、列車が駅を出発し、後続列車が到着するまでの時分も合わせて計測し、列車運行間隔と駅停車時分との関係を把握する。これらの計測項目の実績値を運行ダイヤと比較分析することで、遅れの実態を把握する。

(2) 旅客流動モデル、乗降時分推定モデル、列車走行時分推定モデルの構築によるシミュレーション分析

前項の分析を進展させ、現象再現を試みるためモデルの構築を行なう。①駅構内における旅客の発生・流動のシミュレーションモデルの構築、②車内混雑と乗降人数に着目した列車乗降速度推定モデルの構築、③駅停車時分の変化に着目した列車走行速度推定モデルの構築の3段階から構成される。

① 駅構内における旅客の発生・流動のシミュレーションモデルの構築

駅構内の旅客の歩行行動を2つのレベルで再現するモデルを構築する。1つは、駅構内における歩行経路選択行動を再現する歩行経路選択モデルである。列車内のどの扉から乗降するか、どの階段・エスカレータ・改札を利用するかを選択行動により決定される。もう1つは、1歩1歩の歩行挙動を再現する歩行者挙動モデルである。前方の歩行者を追い抜く、対向者を回避する等の行動により決定される。

② 車内混雑と乗降人数に着目した列車乗降速度推定モデルの構築

列車乗降時分は、個々の旅客行動の組み合わせによって成立する。そこで、エージェントという個体にシンプルなルールを与え、複数のエージェントから成る人工社会での様子の変化やその状態を表現することが可能なマルチエージェントシミュレーションを用いた推定モデルを構築する。

③ 駅停車時分の変化に着目した列車走行速度推定モデルの構築

列車種別の異なる列車間の相互作用によって動的に変化する複雑な現象を再現する必要があることから、また運行遅延の波及・伝播の影響を駅停車時分に反映し、さらにその逆の影響も考慮するため、列車乗降時分推定モデルと同様のマルチエージェントシミュレーションモデルを構築する。

(3) 技術的・制度的課題の検討

これまでの分析結果を踏まえて、高頻度運行・相互直通運転区間の遅延の発生と波及の現象を再現できることで、例えば、「どの時間帯のどこの駅で発生した遅延が、どの範囲にどのように増大し波及するか」や、「遅れが波及している状態から、どのようにダイヤの遅れが回復するか」等の分析が可能となる。これにより、遅れの発生の抑制、遅れが波及しにくい列車運行方式、遅れの早期回復等の検討が可能となり、列車運行の信頼性という従来の混雑緩和や乗り継ぎ抵抗の緩和という視点と組み合わせた新たな鉄道サービスの評価指標の提案を行なう。さらに、本研究から得られた知見および列車遅延に対するより効率的な施策の検討から、技術的、制度的な課題を確認し、交通計画策定への足掛かり築くための検討を行なう。

4. 研究成果

(1) 遅延の発生・波及の定量的分析

東急田園都市線および東京メトロ半蔵門線の2009年1月、2010年11月～12月の午前6時から11時までの各駅の到着時刻、停車時刻、発車時刻データをもとに遅延の実態を分析した。

① 遅延時間の構成

図-1に、ダイヤ上の停車時間と実績の停車時間との差を溝の口駅から渋谷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溝の口駅から渋谷駅で集計した「走行遅延」、両者を合算した「遅延合計」を示す。停車遅延は、ほぼ全ての列車において発生している。しかし、ラッシュ時間帯の前後（ダイヤ上の渋谷駅到着時刻7:30以前、10:00以降）では、駅間走行時間が負の値となっており、回復運転によって停車遅延が補われており、渋谷駅での到着遅延は生じていないことが読み取れる。また、運行間隔が短くなるラッシュ時間帯では、走行時間の増加量が負から正へと推移しており、これによって、ダイヤ上で7:40頃の列車から徐々に遅延が発生している。8:10頃の列車で停車時間の増加はピークを迎え、8:20以降の列車から走行時間は増加に転じている。走行時間の増加量がピークとなる時間帯に渋谷駅での到着遅延も最大となり、その後、ダイヤ上で設定された列車の運行間隔が広がると、直ちに走行時間の増加が解消されるとともに、遅延時間も回復している。

この様に遅延時間の構成は、利用者混雑に起因する駅停車時間の増加と、線路上の列車混雑に起因する駅間走行時間の増加という異なる要因で構成され、遅延発生の初期段階は、駅停車時間の増加が主な遅延要因であるが、その後の時間帯は走行時間の増加の占める割合が大きくなることが分かる。また、ダイヤに対する走行時間の変化量は停車時間のそれより大きいこと、列車の運行間隔が遅延回復に与える影響が大きいことから、遅延時間の拡大抑制および早期回復において、駅間走行時間への対策の有効性が示唆される。

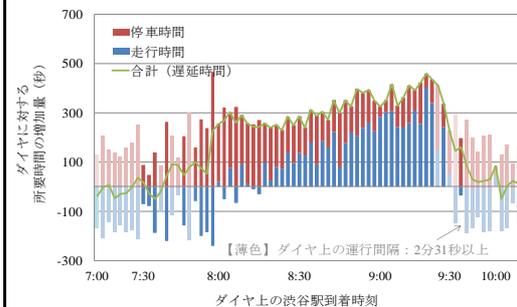


図-1 列車毎のダイヤに対する遅延時間の構成 (溝の口駅～渋谷駅)

② 遅延の連鎖

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-2に示す。7:30の段階で半蔵門駅から遅延が発生し、その後、青山一丁目駅で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、半蔵門区間で、さらに遅延が拡大していく様子がみてとれる。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駅での高い混雑率に伴う停車時間の増大によって引き起こされ、回復運転で補えなくなった段階で遅延が拡大していく。また都心部の区間で発生した遅延が後続列車に連鎖し、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。

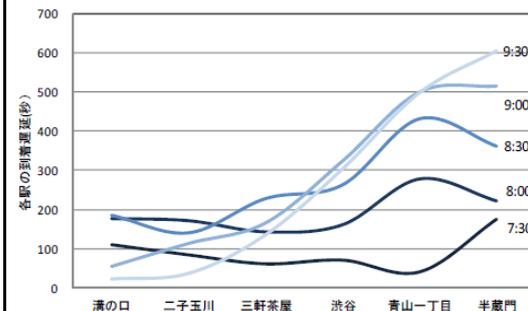


図-2 遅延の連鎖状況

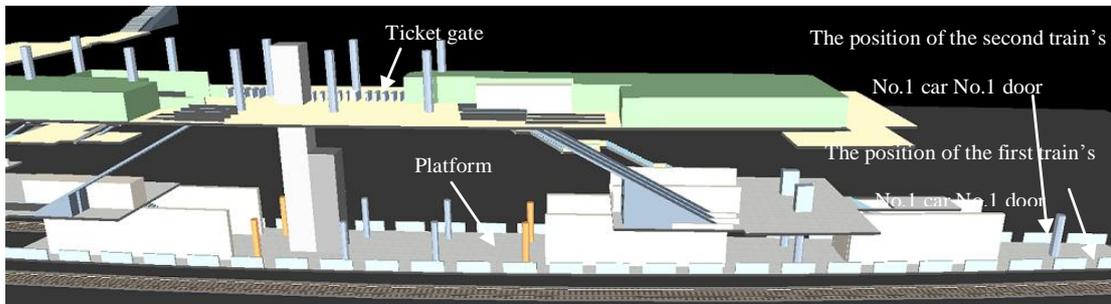


図-3 旅客流動モデルの駅構内図

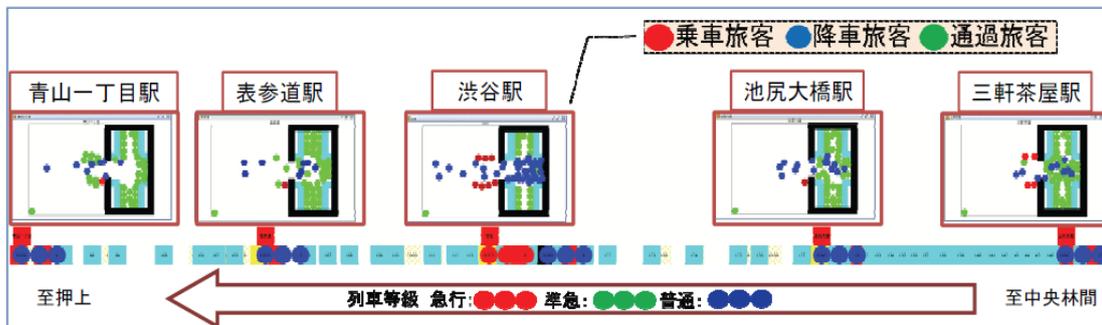


図-4 遅延連鎖シミュレーションシステムの実行画面

(2) 旅客流動モデル，乗降時分推定モデル，列車走行時分推定モデルの構築によるシミュレーション分析

① 駅構内における旅客の発生・流動のシミュレーションモデルの構築

鉄道駅構内における旅客の歩行経路選択モデルとして既存のモデルを活用する。このモデルは、運輸政策研究機構が構築したもので、東京圏の大規模ターミナル駅において旅客の追跡調査を行い、得られた利用経路データをもとに非集計ロジット型として推定されたものである。このモデルを用いて、経路ごとの歩行者数の算出を行う。ここでいう経路とは、どの扉から降車し、どのエスカレータを利用し、どの改札から出場するかというものである。

また、鉄道駅構内の歩行者のミクロな挙動（回避、追い越し等）の再現にあつて、市販のシミュレーションソフト（VISSIM）を活用する。VISSIMはミクロな歩行者挙動をSocial Force Modelで表現するものである。ただし、各歩行者がどのような経路で移動するかについてはあらかじめ分析者が設定する必要があるため、この部分については、上記の歩行経路選択モデルで算出された結果をインプットすることとした。モデルの駅構内図を図-3に示す。

シミュレーションでは繰り返し計算を行ない、収束した際の各扉からの旅客割合について推計値と実測値を比較し、概ねの再現性を確認した。また、ホーム上の旅客捌け時間、エスカレータ・改札機の1分あたり処理旅客数の推計値と実績値を比較し、これについても再現性が確認できた。

② 列車乗降速度推定モデル，列車走行速度推定モデルによる分析の構築

駅停車時間推定モデルと列車走行時間推定モデルをサブモデルとして、遅延連鎖をシミュレーションする統合モデルを構築した。統合されたモデルのシミュレーション画面の一部が図-4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。画面上の線路には、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する。実際には、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、当システムでは反映できていない。また、強制発車を行う設定をしており、緩急接続駅以外の駅では2分で、渋谷駅では3分とした。

なお、個々のサブモデルについて、列車乗降速度推定モデルは、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おり、乗車順序毎のドア通過速度の追従性も高いことを確認した。また、列車走行速度推定モデルは、実際の停車時間を外生した場合、各駅において平均算さ20秒以内に収まっている。

(3) 遅延対策の効果分析

①列車運行方式による対策

列車走行速度推定モデルを用いて分析を行った。ここでは駅間走行時において、あえて列車間隔を広げて、遅延の早期回復を図る運転手法について報告する。駅間の走行速度を意図的に低下し、先行列車との列車間隔を保持するための手法を検討した。先行列車との相互作用による速度制限を低下する場合は、閉そく区間毎に複数の速度設定が必要となり、システム上も運転上も複雑となるため実現性が低い。そこで、本稿では、路線の物理的な制約から決まる区間制限速度を通常パターンと、遅延発生時パターンと2種用意し、各々の運行状況の違いを分析する。

対象区間は三軒茶屋駅～池尻大橋駅とし、平成21年1月19日の実績値において当該区間で走行時間が約1分増加した列車（ダイヤ上の渋谷駅到着8:11）に適用した。遅延発生時のATCコードは、駅出発から400m付近までは、後続列車の駅進入速度に影響がないよう減速を行っていない。400m付近から設計車両性能の最大減速度で減速し、駅の手前300mから最大加速度で駅に進入するように設定した。

図-5は0m～1400mの三軒茶屋駅～池尻大橋駅間の運転曲線図を示す。左図に通常の区間制限速度による運転曲線図を、右図に遅延発生時の区間制限速度による運転曲線図を示す。運転曲線図には、その区間を走行する列車の速度・距離運転曲線と時間・距離曲線が示されている。遅延発生時用の区間制限速度による運転（図-5、右図）は、速度低下により先行列車との間隔が保持され、一時停車を回避したことで通常の運転パターンと比べて走行時間が5秒短縮した。後続の列車にも同様に遅延発生時用の区間制限速度を適用したところ、走行時間が15秒短縮する結果となった。これは先行列車の走行時間の短縮が、後続列車との列車間隔の保持において相乗的な効果を発揮するためであり、この様な速度低下の運転を繰り返すことで、この区間の遅延時間（走行時間の増加量）が連鎖して回復することを示している。

これらの結果は列車の運転において、必ずしも前へ前へと詰めるだけではなく、遅れが生じている場合は、あえて速度を低下させ、適度な間隔を保つことが遅延の早期解消につながることを示唆するものである。

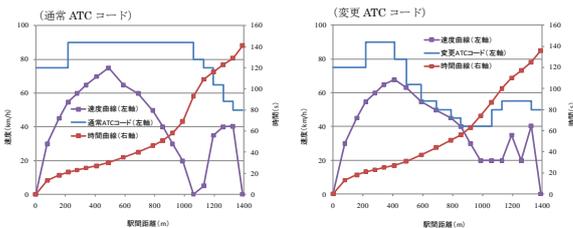


図-5 区間制限速度(ATCコード)と運行挙動

②施設改良による対策

統合モデルを利用して遅延対策効果の計測を試みる。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、ワイドドア車の導入の3種類である。特に前者は、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-6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にとどまり効果がないようにみえる。渋谷駅の処理容量を増加できたが、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する様子がシミュレーションできている。

実際には、2面3線化実施時は運行計画の見直しが必要で、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。都心部駅での停車時間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。

180cm幅のワイドドア車を全車両に導入した場合は、遅延が大幅に拡大してしまう結果となった。これは溝の口駅と二子玉川駅のように多くの降車客、乗車客が存在し、かつ高い混雑率で通過客が乗車している場合に、ワイドドアのため再乗車客が増加し、それがドア付近に滞留して、却って乗降に時間がとられしまった結果を反映している。本シミュレーションシステムの再乗車客挙動の再現性が十分ではないものの、このような問題が発生する可能性は想像しうるものである。

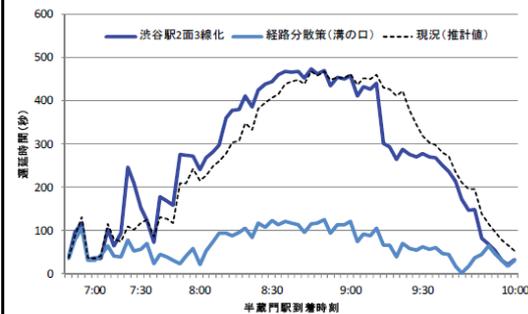


図-6 対策による遅延時間の変化

(4) 今後の課題

第1に上述した乗降時間推定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ルを複数検討し、乗降時間の推定精度を検証する方法が考えられる。第2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3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定モデルは、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。また、恒常的な短時間の遅延だけでなく、大規模な長時間の遅延のメカニズムおよび早期回復方策の提案は、都市鉄道の信頼性回復に向けて不可欠であることから、新たな研究対象として取り組みを進めているところである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計24件)

- ① Naohiko HIBINO, Keiji KARIYAZAKI, Yoshihisa YAMASHITA and Shigeru MORICHI, Simulation Analysis for Estimating Train Knock-on Delay under High-Frequency Intervals, Proceedings of the 12th Conference on Advanced Systems for Public Transport (登載決定), 査読無, 2012, 17pages
- ② Keiji KARIYAZAKI, Naohiko HIBINO and Shigeru MORICHI, Simulation Model for Estimating Train Operation to Recover Knock-on Delay Earlier, Asian Transport Studies (登載決定), 査読有, 2012, 13pages
- ③ 岩倉成志, 上松苑, 高橋郁人, 辻井隆伸, 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), 査読有, 67巻, 2011, I_879-I_886
- 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), 査読有, 67巻, 2011, I_1001-I_1010
- ⑤ 仮屋崎 圭司, 日比野 直彦, モスクワ地下鉄の高頻度運行管理—我が国首都圏鉄道における列車遅延対策への示唆—, 運輸政策研究, 査読有, 14巻, 2011, pp. 34-41
- ⑥ 仮屋崎 圭司, 日比野 直彦, 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, 土木計画学研究・論文集, 査読有, 27巻, 2010, pp. 871-879

- ⑦ Naohiko HIBINO, Yoshihisa YAMASHITA, Keiji KARIYAZAKI and Shigeru MORICHI, A Study on Passenger's Flow at Railway Station for Reduction in Train Delay, Proceedings of the 12th World Conference on Transport Research, 査読無, 2010, 12pages

[学会発表] (計15件)

- ① Naohiko HIBINO, Keiji KARIYAZAKI, Yoshihisa YAMASHITA and Shigeru MORICHI, Simulation Analysis for Estimating Train Knock-on Delay under High-Frequency Intervals, The 12th Conference on Advanced Systems for Public Transport (発表決定), 2012, Santiago, Chile
- ② 高橋郁人, 大木徹憲, 岩倉成志, 高頻度運行下での都市鉄道の遅延連鎖シミュレーションシステムの開発と遅延対策案の分析, 第18回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2011), 2011, 東京
- ③ Keiji KARIYAZAKI, Naohiko HIBINO and Shigeru MORICHI, Simulation Model for Estimating Train Operation to Recover Knock-on Delay Earlier, The 9th Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2011, ICC Jeju, Korea
- ④ Naohiko HIBINO, Yoshihisa YAMASHITA, Keiji KARIYAZAKI and Shigeru MORICHI, A Study on Passenger's Flow at Railway Station for Reduction in Train Delay, 12th World Conference on Transport Research, 2010, Lisboa Congress Center, Lisbon

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
森地 茂 (MORICHI SHIGERU)
政策研究大学院大学・政策研究科・教授
研究者番号: 40016473
 - (2) 研究分担者
日比野 直彦 (HIBINO NAOHIKO)
政策研究大学院大学・政策研究科・准教授
研究者番号: 10318206
 - (3) 研究分担者
岩倉 成志 (IWAKURA SEIJI)
芝浦工業大学・工学部・教授
研究者番号: 20223373
- 仮屋崎 圭司 (KARIYAZAKI KEIJI)
(財)運輸政策研究機構運輸政策研究所・研究員
研究者番号: 80516021