

移動閉そく導入時の 遅延減少による時間信頼性改善便益

角田 隆太¹・川村 孝太郎²・岩倉 成志³・神田 大輔⁴・富田 拓未⁵

¹学生会員 芝浦工業大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5)
E-mail:me13055@shibaura-it.ac.jp

²学生会員 芝浦工業大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5)
E-mail:me13024@shibaura-it.ac.jp

³正会員 芝浦工業大学教授 工学部土木工学科 (〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5)
E-mail:iwakura@shibaura-it.ac.jp

⁴非会員 (独) 鉄道・運輸機構 九州新幹線建設局 (〒812-8622 福岡県福岡市博多区祇園町2-1)
E-mail:h10024@shibaura-it.ac.jp

⁵学生会員 芝浦工業大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5)
E-mail:me14048@shibaura-it.ac.jp

東京圏の都市鉄道は、朝ピーク時の混雑問題に加えて、遅延の伝播や拡大が大きな問題となっており、利用者は不便を強いられている。しかし、鉄道の所要時間信頼性をあつかった研究は道路交通に比べ多くはない。そこで本研究では、時間帯毎に異なる実績の混雑率と所要時間のデータを用いて、スケジューリングモデルを構築し、利用者の都市鉄道に対する所要時間信頼性の評価を行う。また、筆者らが開発した遅延連鎖シミュレーションモデルに、今後導入が見込まれる移動閉そくを反映させ遅延減少効果を分析する。そして、移動閉そく導入時の遅延減少が鉄道利用者の出発時刻選択行動に与える影響を把握し、対象路線を通勤で利用する者すべての時間信頼性改善便益を推計する。

Key Words : *knock-on train delay, reliability of travel time, departure time decision, multi agent simulation, moving block system*

1. はじめに

東京圏の都市鉄道は、朝ピーク時の混雑率が非常に高い。また、2-3分間隔で運行するため、線路内の列車混雑に伴う遅延の伝播や拡大が発生しており、ピーク時のサービス低下が著しい。そのため鉄道利用者は、混雑や所要時間の増大を見込んだ上で、勤務先の始業時刻に遅刻せずに出発しなければならず、不便を強いられている。しかしながら、わが国の都市鉄道の所要時間信頼性を扱う研究は限られている¹⁾²⁾。加えて、遅延対策を評価するためには、その対策による所要時間変動を予測する必要がある。

そこで本研究は、第一に2010年の大都市交通センサスで初めて取り入れられた利用者の始業時刻データと、東急田園都市線および東京メトロ半蔵門線の列車毎の遅延実績および応荷重による混雑率データを用いてスケジューリングモデルを構築する。その結果から鉄道利用者の都市鉄道に対する所要時間信頼性の評価を明らかにする。

第二に、筆者ら³⁾が開発している遅延連鎖シミュレーションモデルを用いて、今後新たな列車運行システムとして検討されている移動閉そくを導入した際の遅延減少効果を検証する。そして対象路線を通勤利用者すべての移動閉そく導入による利用者の出発時刻の変動と、便益を算出する。

以下、2.では、スケジューリングモデルについて述べる。3.では、遅延連鎖シミュレーションシステムを用いた移動閉そくの遅延減少効果について述べる。4.では、移動閉そく導入による利用者の乗車時刻の変動と、主要区間の利用者の便益を計測した結果を述べる。5.では、本研究における成果と今後の展望について述べる。

2. スケジューリングモデルの推定

(1) 分析対象区間とデータの概要

a) 大都市交通センサス

利用者の乗車時刻と始業時刻等を把握するために、2010年に行われた第11回大都市交通センサスを用いる。通勤目的の鉄道利用者を抽出し、乗車時刻・勤務先始業時刻・乗車駅と目的地までの所要時間を用いる。

6:00～9:59分までの東急田園都市線・東京メトロ半蔵門線の中央林間駅～押上駅を発着駅とし、アクセスおよびイグレスの交通手段を、バス等端末交通の所要時間変動の影響を受けにくい徒歩または自転車とした521サンプルを大都市交通センサスから抽出した。

b) 運行実績データと応荷重データ

東京急行電鉄株式会社と東京地下鉄株式会社に提供頂いた、運行実績データと応荷重データを用いる。期間は2010年11月15日～12月17日までの平日21日間である。

運行実績データは、中央林間から押上までの各駅の秒単位の出発時刻と到着時刻が1列車毎に分かるものである。応荷重データは特定列車の応荷重装置から算出された各駅間の混雑率である。図-1にそれらのデータから算出した時間帯ごとの所要時間とその標準偏差、および混雑率の一例をあげる。所要時間は8時台前半に長津田駅を出発する列車で増大している。また図中の赤点線で示されるように、7時台後半から9時にかけてばらつきが大きくなっていることが見て取れる。また混雑率は、池尻大橋駅～渋谷駅間の混雑率は8時20分ごろにかけて高くなり、ピーク時は200%を超える。このように朝ピーク時間帯は、混雑及び所要時間の増大というサービス低下が著しい。

(3) スケジューリングモデルの構築

a) 効用関数

乗車時刻6:00～9:59までを15分毎に区切った、式(1)に示す16肢選択の非集計ロジットモデルを構築する。なお、希望到着時刻は始業時刻と仮定する。なお、乗車時刻の選択肢集合が不明なため、選択可能な時間帯を実出発±15分と、全時間帯選択可能として設定し推定を行う。

なお効用関数は、Nolandら⁴⁾が提案したものを参考に、ダイヤを持つ都市鉄道の特性を考慮して式(2)のように設定した。

$$P_{in} = \frac{e^{V_{in}}}{\sum_{j \in S_n} e^{V_{jn}}} \quad (1)$$

$$V(t_h) = \alpha E(TT) + \beta E(SDE) + \gamma E(SDL) + \theta P_L + \delta CRI + \mu E(DD) + \kappa E(AD) \quad (2)$$

TT : 実所要時間[分] SDE : 早着時間[分]

SDL : 遅着時間[分] P_L : 遅刻確率[%]

CRI : 混雑率指標[分・%/100]

DD : 出発遅延時間[分] (実績出発時刻と時刻表との乖離)

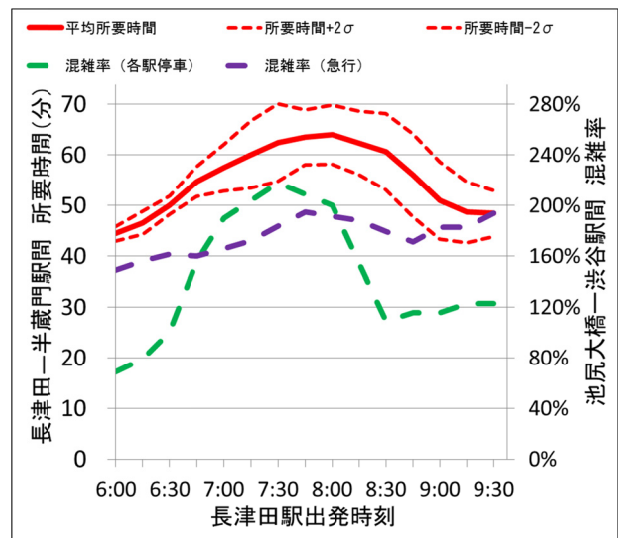


図-1 対象路線の所要時間と混雑率の一例

AD : 到着遅延時間[分] (実績到着時刻と時刻表との乖離)

$\alpha, \beta, \gamma, \theta, \delta, \mu, \kappa, \eta$: パラメータ

実所要時間 TT は、利用者の列車乗車時から勤務先へ到着するまでの時間である。早着時間 SDE と遅着時間 SDL は、利用者の勤務先到着時刻と会社始業時刻の差である。遅刻確率 P_L は、サンプルが選択した時間帯の全列車の運行実績データのうち、始業時刻に間に合わない列車数を算出することで設定する。混雑率指標 CRI は、混雑率と駅間所要時間の積を乗車区間で加算したものである。出発遅延時間 DD は乗車する列車が、時刻表よりも遅れて発車することに対する不効用を示すものである。到着遅延時間 AD は乗車している列車が時刻表よりも遅れて到着することに対する不効用を示している。なお、 TT , SDE , SDL , DD , AD は各時間帯15分間の、21日間の期待値を与えている。

b) パラメータ推定結果

パラメータの推定結果を表-1に示す。選択肢集合および変数のパターン別に3タイプのモデルを推定した。model1は選択肢集合をサンプルの実出発時刻とその前後15分とし、式(2)の全ての変数を組込んだ。model2は選択肢集合をmodel1と同様とし、式(2)から出発遅延時間および到着遅延時間を除いた。model3は全時間帯を選択可能とし、model2と同一の変数とした。

選択肢集合をサンプルの実出発時刻±前後15分とし、全て変数を組込んだmodel1の結果について述べる。早着時間、遅着時間、遅刻確率のパラメータの符号が整合的であり、かつ値も有意であった。出発遅延時間のパラメータは正となり、時刻表からの遅れに対する利用者の不効用を表すことが出来ていない。また、時間信頼性係

表-1 パラメータ推定結果

変数	model1 実出発時刻±15分を選択可能		model2 実出発時刻±15分を選択可能		model3 全時間帯を選択可能	
	パラメータ	t値	パラメータ	t値	パラメータ	t値
早着時間(分)	-0.0227	-4.15 **	-0.0256	-4.78 **	-0.0357	-16.03 **
遅着時間(分)	-0.0507	-2.17 *	-0.0465	-1.98 *	-0.0794	-6.33 **
所要時間(分)	-0.162	-2.98 **	-0.095	-2.23 *	-0.0865	-3.59 **
遅刻確率(%)	-0.0142	-4.26 **	-0.0135	-4.08 **	-0.0180	-6.70 **
混雑率指標(%・分/100)	0.00337	0.12	0.00464	0.19	-0.0109	-0.81
出発遅延時間(分)	0.231	2.70 **	-	-	-	-
到着遅延時間(分)	-0.0789	-0.54	-	-	-	-
サンプル数		521		521		521
自由度調整済み尤度比		0.596		0.595		0.280

(*5%有意 **1%有意)

値を算定すると、早着時間が1分増加することは、所要時間が0.14分増加することと等価であることがわかった。遅着時間が1分増加することは、所要時間が0.31分増加することと等価であるという結果となった。遅刻確率が1%増加することは、約0.09分所要時間が増加することと等価である結果となった。また、時間価値を40(円/分)と仮定すると、早着時間が10分になることは56円と等価、遅着時間が10分になることは125円と等価、遅刻確率が100%になることは350円と等価という結果となった。

model1から出発遅延時間と到着遅延時間を除いたmodel2は、混雑率指標以外のパラメータの符号が整合的であり、t値も有意であった。早着時間のパラメータに比べ遅着時間のパラメータが大きいことから、早着よりも遅刻することに抵抗を持ち乗車時刻を選択していることが見て取れる。

全時間帯を選択可能として推定したmodel3は、混雑率指標を除いたすべてのパラメータが有意となった。model2と比較すると、model3は所要時間のパラメータが小さくなり、所要時間の増大に対する抵抗がmodel2に比べ小さいことがわかる。

また、model1とmodel3、model2とmodel3でパラメータ間のt検定を行うと、model1とmodel3の早着時間のパラメータのみ有意な差があるという結果となった。その他のパラメータには有意な差は見られず、本分析では選択肢集合がパラメータの推定結果に及ぼす影響は大きくはないと考えられる。

3. 移動閉そく導入時の遅延時間の推定

(1) 移動閉そく方式の概略

移動閉そく方式は無線を用いた列車間隔の制御システムである。図-2に示す概略図のように、前方列車の位置に応じて停止限界を算出するため、前方列車との車間距離を常に最短に保つことが可能である。このため、1つの閉そくに1の列車しか進入できない固定閉そく方式に

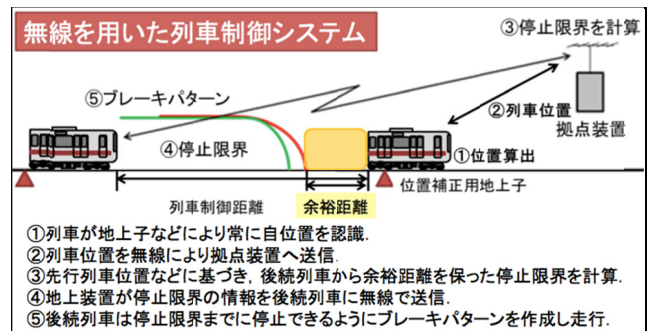


図-2 移動閉そくの概略図

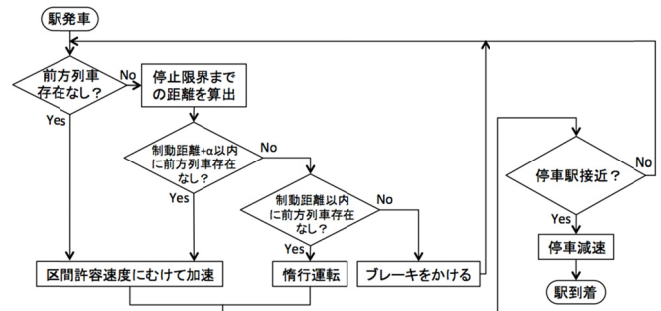


図-3 構築した移動閉そくのフローチャート

比べ、閉そく上の余分な車間距離が発生せず、遅延の減少効果が期待されている。

現在、世界では100線区で導入されているが、東京圏にみられる高頻度運行する路線への導入はされておらず、遅延減少効果は明らかにされていない。

(2) 移動閉そくモデルの構築

本研究では、筆者らによって開発されたマルチエージェントシミュレーションを使用した遅延連鎖予測シミュレーションモデルを用いる。このモデルの列車間隔の制御を行うアルゴリズムを従来の固定閉そく方式から移動閉そく方式へ変更する。

移動閉そくモデルは、東日本旅客鉄道の開発するATACS⁹⁾を参考とする。図-2に示した概略図のアルゴリズムを参考に図-3のフローチャートを作成し、移動閉そく

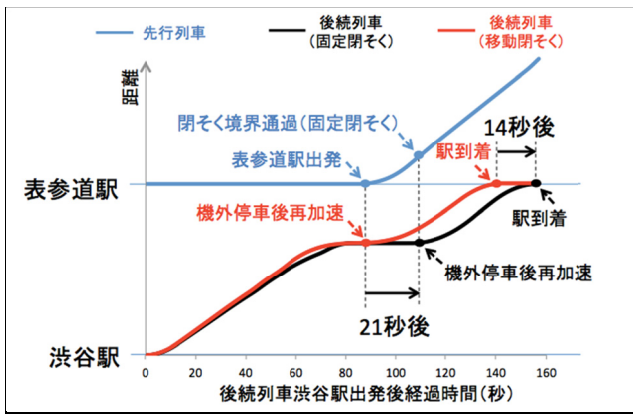


図4 固定閉そくと移動閉そくの列車挙動

くモデルの構築を行った。移動閉そくは、先行列車位置によってブレーキパターンを作成する特性上、制動距離を高精度に求める必要がある。そのため、実務で用いられる制動距離の計算式を東京地下鉄から提供いただき、構築を行った。実際の制動距離と推定した制動距離を比較すると誤差は50cm未満であり、一定の再現性を得られた。また、停止限界の地点から先行列車の最後尾までの余裕距離は変動させることが可能なモデルとした。

なお、既存のモデルは駆け込み乗車や急病人対応といった長時間にわたり駅停車する事象を再現できない。そのため、平日24日間分の運行実績データの、各日各駅の時刻表で設定されている停車時間から60秒を超えた停車を抽出し、モデルに外生的に与えている。

(3) シミュレーションの結果

a) 移動閉塞方式別の運転曲線の比較

機外停車（駅間での停止）による遅延の波及が発生する状況下にて固定閉そくと移動閉そくの運転曲線の比較を行う。固定閉そく時に機外停車する列車を抽出し、駅出発時刻と機外停車位置を同条件に設定した上で、移動閉そく時の列車挙動を算出した。結果を図-4に示す。

固定閉そくでは、先行列車が表参道駅発車後に閉そくの境界を通過した時点で後続列車の再加速が始まる。一方、移動閉そくでは、先行列車が表参道駅を発車してすぐに再加速する挙動が確認できた。

結果として、移動閉そくの方が14秒早く次駅に到着している。このことから、固定閉そくで問題視されている余分な車間距離の発生が抑えられたことをシミュレーション上で確認することができた。

b) 余裕距離別の遅延時間の比較

東京地下鉄へのヒアリングより、余裕距離の値は未定であるとの回答を得た。このことから、本分析では余裕距離の設定を20m,100m,150m,200mに変動させ、各距離での遅延減少効果を把握する。遅延時間の評価は、午前

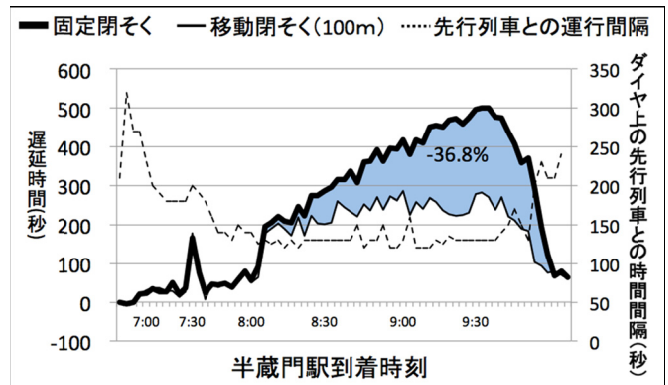


図-5 閉そく方式別の推定遅延時間（12月1日）

表-2 各余裕距離の遅延時間変化率（12月1日）

	余裕距離			
	20m	100m	150m	200m
固定閉そくを基準とした遅延時間の変化率	-46.6%	-36.8%	-27.2%	2.9%

6時から午前10時の間に長津田駅を発車し半蔵門駅に到着する列車で比較を行う。

平日24日間の平均遅延時間に近い12月1日を対象に余裕距離ごとにシミュレーションを10回行い、平均値を算出した。ここで固定閉そくの推定遅延時間と移動閉そく（余裕距離100m）の場合の推定遅延時間を図-5に示す。全列車の遅延時間の合計値を算出すると、固定閉そくに比べ36.8%の遅延時間の削減となった。特に、8時半過ぎから遅延の減少に大きな効果があった。これは運行密度の高い時間帯に余分な車間距離が減少することで、遅延が抑えられたと考えられる。その他の余裕距離の結果を表-2に表す。

余裕距離が20m,150mの場合では、余裕距離が短いほど遅延時間が減少することが確認できた。一方、余裕距離が200mの場合では、固定閉そくよりも遅延時間が2.9%増加していた。東京地下鉄へのヒアリングによると、固定閉そくの余分な車間距離よりも余裕距離200mの間隔が広いとされているため、遅延が増加した結果は一定の再現性があると言える。

c) 余裕距離別の遅延の波及状況の比較

安全距離100mと200mで遅延の波及の分析をする。各駅間での遅延の増加量を比較した結果、池尻大橋—渋谷駅間で遅延の増加量に差異が発生していた。クロマティックダイヤ⁹⁾を参考に図-6、図7に当該区間の推定した距離—時間曲線を示す。

8:32時点では、AやDの列車のように両距離ともに機外停車が発生していない（青線）。しかし、当該列車が渋谷駅で120秒程度の停車をすると、BやEの列車に遅延が波及し、機外停車が1回（緑線）発生した。その後、余裕距離100mの場合は1回の機外停車で推移するが、

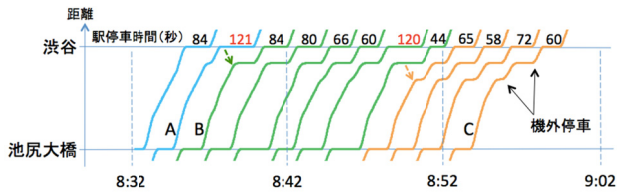


図-6 余裕距離100mの距離-時間曲線

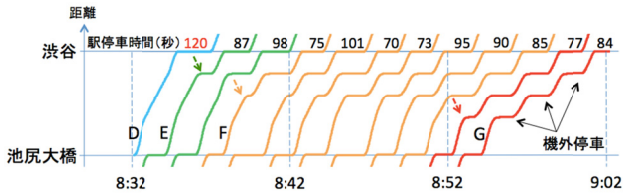


図-7 余裕距離200mの距離-時間曲線

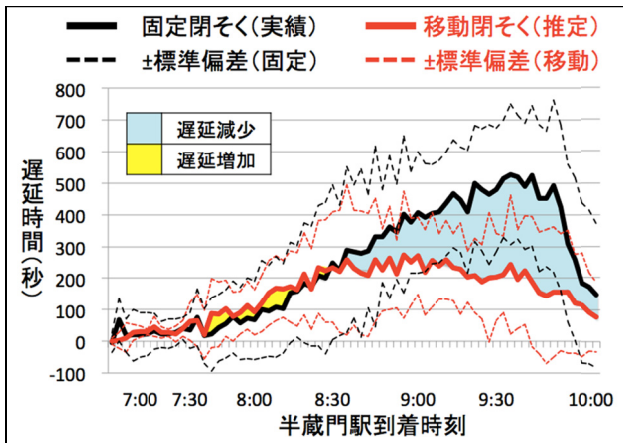


図-8 移動閉そく方式別の平日24日間の遅延時間

200mの場合はFの列車のように機外停車が2回（黄線）に増加している。これは、余裕距離増加分の線路容量が減少することに加え、余裕距離が増加するほど後続列車の到着が遅くなるため、駅での列車待ちの旅客の増加により停車時間が拡大し、後続列車に遅延が波及すると考えられる。

その結果、余裕距離200mは機外停車が3回（赤線）まで波及し、CとGの列車の駅間所要時間の差は154秒となった。このことから、余裕距離の値が遅延の波及に大きく関係していると考えられる。

(4) 平日24日間の遅延時間の推定

本分析では東日本旅客鉄道の既存研究を参考に、余裕距離を100mに設定し、平日24日間分の遅延時間を推定する。なお、各日10回のシミュレーションを行った結果の中から推定値が標準偏差の半分 ($\pm 1/2\sigma$) の範囲内に最も存在する1回を代表値として抽出する。24日間の実績平均遅延時間と24日間の推定平均遅延時間との比較を図-8に示す。遅延時間は6:00～8:30の間に一部50～60秒程度の過大推定があるものの、概ね同様の傾向で推移している。一方8:30を過ぎると移動閉そくの遅延時間の拡大が抑えられ、最大遅延時間は335秒の減少、全遅延時間

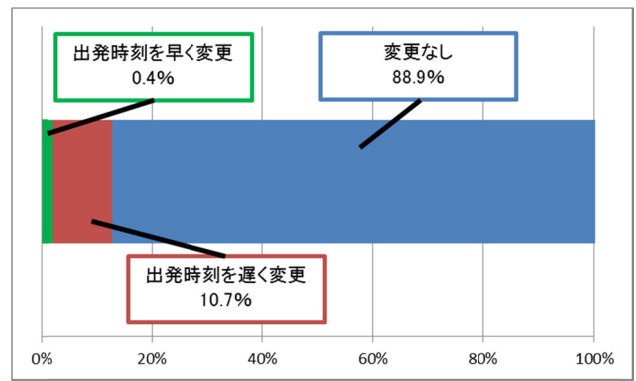


図-9 移動閉そく導入後の乗車時刻の変動（実績-推定の比較）

表-3 便益算出の結果

with (改善有)	without (改善無し)	供用期間30年間 の便益(億円)
推定	実績	329.8
推定	推定	431.8

の合計は35.9%の減少となった。

また標準偏差は8:40付近で同程度であるが、全体を通して見ると移動閉そくの標準偏差は平均44秒小さく推計されており、遅延のばらつきが抑えられる結果となった。

4. 移動閉そく導入時の遅延減少による便益

第11回大都市交通センサスから、通勤目的、定期券利用で東急田園都市線及び東京メトロ半蔵門線を通りを含めて利用するサンプル全てを抽出し、2で算出されたmodel3のパラメータを用いて便益を算出する。なお、1回目の鉄道利用で、始業時間が6:00～12:00のサンプルを抽出した。そして抽出された5,499サンプルを拡大した237,611人の便益を算出する。最混雑断面において、今回抽出したサンプルを拡大した利用者数を都市交通年報⁷⁾と比較すると、利用者数は20%程度過少となっていることから、本分析結果の安定性については検証する必要がある。

(1) 乗車時刻の変動

2で算出されたmodel3のパラメータを用いて、3の移動閉そくの効果による鉄道利用者の乗車時刻選択行動の変化を見る。図-9に改善前を実績とし、移動閉そく導入後の乗車時刻の変化を示す。今回分析したサンプルのうち、11.1%が移動閉そく導入による遅延削減によって乗車時刻を変化させることが推測された。乗車時刻を早めたサンプルの割合は、全体の内の約0.4%、15分遅めるのは約10.7%という結果である。この結果から、現在の東

京圏の都市鉄道では、遅延を見込んで必要以上に早く出発せざるを得ない利用者が少なからず存在することが示唆された。

(3) 移動閉そく導入による利用者の便益

田園都市線及び半蔵門線利用者の通勤目的全利用者の便益の算出結果を表-3に示す。改善前を実績と、シミュレーション上で実績の所要時間を算出した実績推定の二つのケースで便益を算出した。なお、供用期間は30年、遅刻確率が100%となった時間帯は含めずに便益を算出している。算出の結果、改善前を実績とした場合は約329億円、改善前を実績推定とした場合約430億円となった。これらの結果から、1kmあたりの移動閉そくの整備費用が7億円程度であれば、費用便益比が1.0を超える結果となった。

5. おわりに

本研究では、東急田園都市線及び東京メトロ半蔵門線の利用者を対象に、スケジューリングモデルの推定を行った。その結果、鉄道利用者は所要時間や始業時刻に対する早着、遅刻を考慮して乗車時刻を決定していることが示唆された。また、日本の都市鉄道にも導入が検討されている移動閉そくの効果をシミュレーションモデルを

用いて検証し、移動閉そくの遅延減少効果を把握した。加えて、スケジューリングモデルで推定されたパラメータと、シミュレーションモデルで推定された遅延減少効果を組み合わせ、便益を計測した。

謝辞：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東京地下鉄株式会社および東京急行電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) 高田 和幸, 鈴木 孝典, 藤生 慎: 鉄道の遅延時間を考慮した出発時刻決定行動に関するモデル分析, 土木学会論文集 D3 (土木計画学) Vol.68, No.5, pp. 1071-1077, 2012
- 2) Kato, H. , Kaneko, Y. , Soyama, Y. : Departure time choice of urban rail passenger under unreliable service: Evidence from Tokyo, Proceedings of the International Conference on Advanced Systems for Public Transport 2012 (CASPT 12), 2012
- 3) 角田 隆太, 川村 孝太郎, 岩倉 成志: 都市鉄道の遅延連鎖予測シミュレーションシステムの再現性度の向上と対策効果の分析, J-RAIL 2013 講演論文集, pp. 289-292, 2013
- 4) Noland, Small, Koskenoja and Chu Simulation travel reliability, Regional Science and Urban Economics 28, pp. 535-564, 1998
- 5) 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
- 6) 稲川 真範, 富井 規雄, 牛田 貢平: 列車運行実績データの可視化, J-RAIL 2009 講演論文集, pp. 745-748, 2009
- 7) (一財) 運輸政策研究機構: 平成 23 年版都市交通年報