

都市鉄道の列車遅延対策の定量的評価

岩倉 成志¹・日比野 直彦²・仮屋崎 圭司³・福田 大輔⁴・森地 茂⁵
川村 孝太郎⁶・角田 隆太⁶・富田 拓未⁶

¹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

²正会員 政策研究大学院大学准教授 大学院政策研究科 (〒106-8677 東京都港区六本木7-22-1)
E-mail:hibino@grips.ac.jp

³正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)
E-mail:kei.kariyazaki@jrtr.go.jp

⁴正会員 東京工業大学大学院准教授 理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)
E-mail:fukuda@plan.cv.titech.ac.jp

⁵正会員 政策研究大学院大学教授 大学院政策研究科 (〒106-8677 東京都港区六本木7-22-1)
E-mail:s.morichi.pl@grips.ac.jp

⁶学生会員 芝浦工業大学大学院 理工学研究科 (〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5)

東京圏の都市鉄道計画は、混雑緩和策として大きな改善をもたらしてきた一方で、輸送障害の発生リスクが高まり、今日では日常的に列車遅延が発生している。高頻度で多種別の運行サービスが実施される東京圏の都市鉄道において、遅延対策の効果を事前に定量評価する技術は未だ確立されておらず、平均遅延時間ならびに旅行時間信頼性を計測する手法の研究や事例も極めて限定的である。

本論文は、筆者らが進めてきた都市鉄道の遅延対策の定量評価に関する先端技術を包括的に示すことを目的とし、まず遅延現象を予測するシミュレーションモデルを用いて、ソフトとハードの両面から遅延の改善可能性を示す。次に、都市鉄道の時間信頼性の経済評価手法を提案し、シミュレーションモデルにより推計した遅延対策の効果について、経済便益推計を行った結果を示す。

Key Words : *urban railway, knock-on train delay, high frequency operation, licreliability of travel time, departure time decision, multi agent simulation, time-varying marginal utility of time*

1. はじめに

東京圏の都市鉄道計画は、列車内の混雑緩和のための輸送力増強計画と乗継ぎによる駅内混雑緩和のための相互直通計画を押し進めてきた。混雑緩和策として大きな改善をもたらしてきたが、一方で、線路内で列車の渋滞がおき、相互直通化に伴う路線の長大化により輸送障害の発生リスクが高まった。この結果、日常的に列車遅延がおきている。2014年4月に示された交通政策審議会への諮問（東京圏における今後の都市鉄道のあり方）においても列車遅延への対応が急務とされている。

高頻度に運行され、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、事前に定量評価する技術は未だ確立されていない。さらに、鉄道を対象とした遅延対策による平均遅延時間の削減な

らびに旅行時間信頼性向上の効果を計測する手法の研究や事例は極めて限定的であった。

本論文は、筆者らが進めてきた都市鉄道の遅延対策の定量評価に関する先端技術を包括的に示すことを目的とする。まず、政策研究大学院大学（GRIPS）および芝浦工業大学（SIT）が取り組んできた列車遅延のシミュレーションモデルの精度と特性を示した上で、ソフトおよびハードの遅延対策の意義や遅延の改善可能性を述べる。次に、東京工業大学による都市鉄道の時間信頼性の経済評価手法の提案に続いて、上述のシミュレーションモデルを用いて推計した遅延対策の遅延削減量から東京工業大学と芝浦工業大学が共同して遅延対策の経済便益推計を行った結果を述べる。

2. 既往研究の整理

(1) 都市鉄道整備等に関する調査

運輸政策審議会の答申で示された政策課題に対応し、国土交通省では継続的に実務調査を行ってきた。18号答申以降の実務調査を概観すると、列車内混雑の解消、既存鉄道ネットワークの有効活用、鉄道駅における乗換え利便性の改善、シームレス化、事業スキームの検討等を調査目的とした内容が多く取り上げられている（例えば¹⁾²⁾³⁾）。平成20年頃からは、輸送トラブルや日常的な列車遅延への対応を目的とした調査（例えば⁴⁾⁵⁾）が実施されており、高頻度運行や相互直通運転等に代表される鉄道サービスの高度化に伴う負の効果として、列車遅延の顕在化が指摘されている。

また、本年4月の交通政策審議会への諮問（東京圏における今後の都市鉄道のあり方）に対し、時期答申に向けた審議が開始されている。国際競争力強化、オリンピック・パラリンピック大会に向けたあり方、新線・新駅等のあり方、防災対策など、東京圏における今後の都市鉄道のあり方について審議が進められることとなっており、その中で、遅延対策のあるべき水準・方策についても、審議事項の柱として掲げられている。

(2) 遅延現象の予測手法に関する既往研究

鉄道の運行遅延とその波及・伝播に関する最近の研究は、de Kort et al.⁶⁾やGoverde⁷⁾が、Max-Plus代数を活用した遅延の伝播アルゴリズムにより、時刻表の安定性やインフラ容量の決定手法を提案している。これらの研究は、遅延が鉄道輸送・需要に及ぼす影響の分析に主眼を置いている。また、対象となる遅延時間は、利用者混雑に起因する駅停車時間の変化であり、列車の運行間隔に起因する駅間走行時間の変化については扱っていない。

列車運行に関する遅延の研究は、Fu et al.⁸⁾やXun et al.⁹⁾により、マルチェージェントモデルと一部で同じアルゴリズムを有するセルオートマトンモデルを列車運行シミュレーションに適用した研究が行われている。同様の理論に基づき、仮屋崎ら¹⁰⁾¹¹⁾は、列車運行の実績データを用いて列車運行と駅停車時間とを連動した遅延現象の再現シミュレーションモデルを構築している。

また、岩倉ら¹²⁾¹³⁾は駅での利用者行動と駅間の列車運行挙動をマルチェージェントモデルを用いて一体的に推定し、遅延の発生および波及の現象を再現するシミュレーションの構築を提案している。

(3) 遅延対策に関する研究

遅延対策に関する研究の実務への応用としては、鳥海ら¹⁴⁾が通勤時間帯の駅停車時間の増加による遅延を、ネットワーク構造の変化として扱った利用者均衡配分を行

っており、この結果を受けて、東急田園都市線では、列車毎の混雑平準化による遅延の抑制策として、2007年より準急運転を導入している。また、同路線は、現業の運転士らによる調査研究の成果として、前方の列車状況に関する情報を運転士に与える表示灯を線路横に設置し、駅の追込み時隔の拡大抑制を図っている¹⁵⁾。山村ら¹⁶⁾¹⁷⁾は、東京メトロ東西線を対象に、路線の遅延状況をダイヤグラム図に投影して可視化し、遅延の実態把握から事業者が実施した各種の遅延対策と効果を定量的に検証している。

しかしながら、高頻度運行かつ複数種別の列車が混在する東京圏のような都市鉄道において、遅延現象およびその対策効果を事前に定量評価する技術は未だ確立されておらず、列車遅延への対応は喫緊の課題となっている。

3. 列車遅延の現象分析

(1) GRIPSモデル

a) 分析方法と分析データ

列車の運行は、線路を一定区間に区切って1区間を1編成の列車のみの運行に占有させ、完全に通過し終わるまでは続行列車をその区間に進入させない運行方式をとっている。これを閉そく方式という。つまり、線路を閉そく区間に分割し、空間を離散化しているといえる。また、閉そく区間を通過する走行速度も信号システムにより離散値として与えられる。このため、列車毎の運行状態を再現する手法として、離散型シミュレーションモデルであるセルオートマトン法およびマルチェージェントシミュレーションが適用可能であり、現実の列車閉そく区間と同様にセルを分割することによって、列車運行状態が再現可能であるといえる。駅における列車の停車時間は、列車の発着間隔、車内混雑率、ホーム上の旅客滞留などにより値が変動するため、列車の駅間運行挙動と利用者行動による駅停車時間の推定とを一体的に再現するシミュレーションモデルが必要である。

そこで、GRIPSモデルは、セルオートマトン法を適用し、これを用いて高頻度運行を実施する路線の運行状況を再現する。より列車運行に着目した分析を行うため、列車の発着時間の増加に対する停車時間の変化率は、実績値を基に設定した。

モデルの構築にあたり、鉄道事業者の協力を得て信号コード表、車両性能表、発着時刻表を用い、実際の運行管理ルールを入力した。なお、分析対象路線は、東急田園都市線および東京メトロ半蔵門線とする。後述するSITモデルも同様とする。またGRIPSモデルは、都心部環状路線など信号方式、運行頻度等の異なる路線についても分析対象を拡張している¹⁹⁾。

b) 列車遅延シミュレーション

i) 列車運行モデル

列車運行時間を再現するモデルは Rule1~Rule3のルールに従う。

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: 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: 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 $V = \sqrt{2ax}$ してで走行。

ii) 旅客乗降モデル

旅客乗降時間を再現するモデルは駅別・列車別の実績値を基に発着時間の増加に対する停車時間の変化率を、時間帯別に20分単位で設定し、列車運行挙動の変化に伴う停車時間の変化を内生化する。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日の運行実績データを用い、実遅延時間との比較を行う。

c) 分析結果

駅間走行時間の実績値とシミュレーションモデルによる計算値の比較では、最大で約50秒の残差が発生しており、十分な再現性が確保されるに至らず、更なる精度向上が必要である(サンプル数330:10駅間×列車33本、重相関係数0.92)。列車運行シミュレーションモデルに、列車運行挙動の変化に伴う停車時間の変化を内生化し、通勤・通学時間帯における遅延発生から回復までの一連の変化を本シミュレーションモデルで再現した。駅停車時間の設定において使用した平日9日間の列車運行実績値とシミュレーションによる再現値との比較を図-1に示す。推定結果は、駅別、列車別の平均停車時間の設定において、駆け込み乗車等の特異値の影響を緩和するため、上位10%のサンプルを削除しているため、実績値の下辺を沿うような結果となっている。

(2) SITモデル

本節ではGRIPSモデルとの相違点のみ記述する。

a) 分析方法と分析データ

SITモデルは、マルチエージェントシステムを用いて運行状況を再現する。線路上での列車間の接近時の相互作用に加え、自律的な判断をする利用者の相互作用を表現し、乗降時間の推定も行う。

構築に用いるデータは、列車走行モデルはGRIPSモデルと同一のものを使用する。旅客乗降モデルでは、車

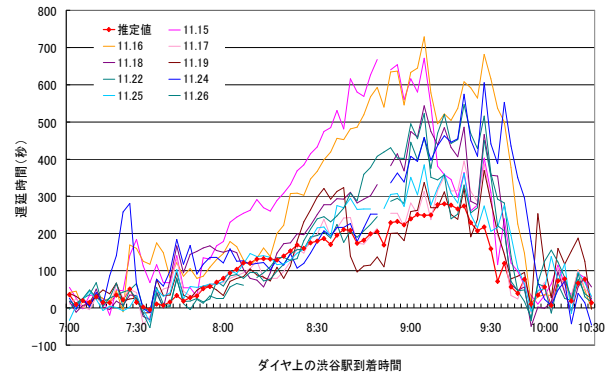


図-1 遅延状況の再現(駒沢大学駅~半蔵門駅)

両寸法、応荷重データ、駅ホーム上部から撮影したビデオ映像より乗降速度および乗降客数を計測した値を使用している。

b) 列車遅延シミュレーション

i) 列車運行モデル

GRIPSモデルで用いた Rule1~Rule3に加え、Rule4を考慮する。

Rule4: 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。

ii) 旅客乗降モデル

最も乗降量が多いドアを対象に、ドアを中央に持つ1/4車両の空間で、旅客エージェントを下記のルールに従い行動させ、乗降時間を推定する。

Rule1: 旅客の歩行速度は、性別および携帯電話を注視しながらの歩行をビデオ映像から2次元動画計測ソフトを用いて位置座標を与え、計測した乗車速度を与える。

Rule2: 車内の旅客は前方向に長いパーソナルスペース(以下、PS)を持ち、他の旅客との距離に応じてPSを変化させる。

Rule3: 車内の旅客は、PSを最も大きく保てるよう、PS内の前方180度を等間隔に30度ずつ分割した7方向に対して、他の旅客エージェントの少ない方向に移動する。

なお、駆け込み乗車等の特異値の影響を考慮するため、実績値から所定の停車時間よりも60秒超過した停車を抽出し、該当列車に外生的に与える。

c) 分析結果

再現精度を図-2に示す。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した時間を示すものである。実績値は、平日21日間の平均値と標準偏差($\pm 1\sigma$)、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、推計値が標準偏差の半分($\pm 1/2\sigma$)に最も存在する1回を代表値として抽出した21

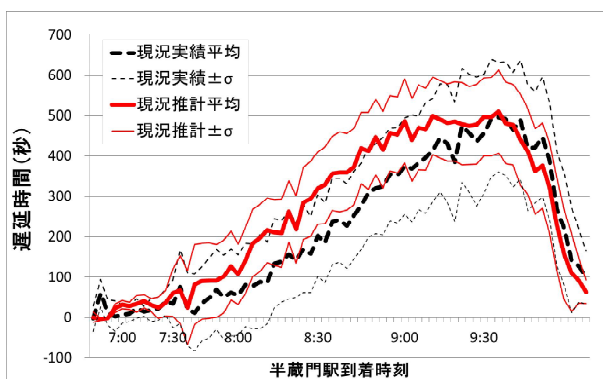


図-2 長津田—半蔵門駅での遅延の再現性

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ため、実績と類似した挙動を再現できているといえる。しかし、7:30～9:30頃まで20%程度の過大推計が発生していること、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) 両モデルの特徴と適応範囲

両モデルは列車毎の運行挙動から路線全体の運行状態を再現するため、微小な誤差でもそれが蓄積すると後続列車の運行挙動に影響する。このことから、複数の列車を連続して運行させる場合や、複数の駅間で運行状態を再現する場合には、得られる結果に対して留意が必要である。しかしながら、分析対象路線における遅延の発生および回復のタイミングの傾向は概ね再現されており、駅間の列車運行挙動についても同様な傾向を示している。したがって、本モデルは数秒単位の走行時間の変化については参考値となるが、遅延の発生、波及および回復の要因となる列車の抽出、および、その運行挙動の変化の把握については適用が可能であるといえる。

両モデルの特徴を表-1に整理する。対策案評価の適応範囲を表-2に示す。

4. 対策検討と効果計測

(1) ソフト面の対策

高頻度運行を実施している路線においては、遅延発生時に遅延要因列車の後続で、列車毎の間隔は通常以上に狭まるため、列車は駅間で加速・減速を繰り返し、時には停車を強いられる。これは遅延時間の拡大および、遅延の早期回復の妨げとなっており、結果的に輸送力を低下させていると考えられる。そこで、列車間隔を変化させ、当該列車および後続列車の運行状況が、遅延の回復

表-1 両モデルの特徴

	GRIPSモデル	SITモデル
対象区間	二子玉川 - 半蔵門	中央林間 - 押上
推計時間	7:30～10:30	5:57～11:30
使用モデル	CA	MAS
計算ピッチ	1秒	0.2秒
停車時間	内生的に推計	内生的に推計
特異な停車	外生的に与える	外生的に与える
線路勾配	—	考慮

表-2 対策案評価の適応範囲

		対策案	GRIPSモデル	SITモデル
ソフト	駅間	信号コードの変更	◎	○
		列車の増発	○	○
	駅内	列車間隔の調整	◎	○
		軽微な列車早発	◎	○
		ホーム整理員の配置	△	△
		優等列車の未設定		△
		停車位置の分散化	△	△
オフピーク通勤推奨	△	△		
ハード	駅間	閉そく区間の分割	○	◎
		移動閉そくの導入	○	◎
		複雑々線化	○	◎
	駅内	多扉車の導入	△	○
		ワイドドアの導入	△	○
		車両の長編成化	△	△
		ホーム幅の拡大	△	△
		出入口の改良・増設	△	△
2面3線化	△	◎		

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

時間に与える影響を分析する。

a) 駅部における対策

図-2は池尻大橋駅～渋谷駅間の走行時間が約25秒増加している場合において、池尻大橋駅での停車時間を変化させた際の、運行挙動の違いを示している。意図的な停車時間の増加（出発時間の調整）を実施しない際の池尻大橋駅出発時刻を横軸0秒とした。

渋谷駅の出発においては、先行列車が渋谷駅を出発する時に、後続列車は池尻大橋駅から約1455m～約1485 mの位置に在線している場合に、池尻大橋駅での出発調整を実施しない場合と比べて、渋谷駅へより早く到着する結果となった。池尻大橋駅での出発調整時間においては、7秒間の時間幅である。この結果から、遅延の回復における出発時間調整の効果と、効果が期待できる範囲に幅があることが示唆される。

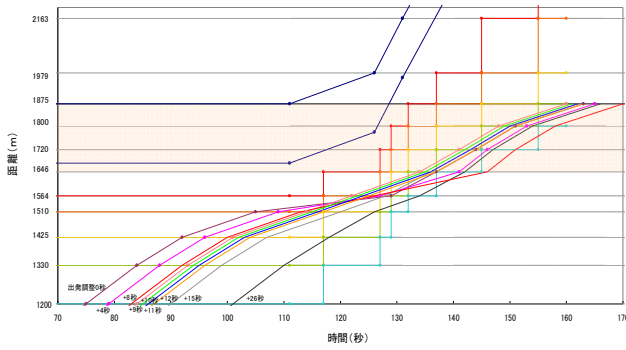


図-3 後続列車の追込み時隔 (池尻大橋川駅～渋谷駅)

b) 駅間における対策

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8：30）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。遅延発生時用の区間制限速度による運転は、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4秒短縮した（図-4）。後続の列車にも同様に速度低下した区間制限速度を適用したところ、約30分後に走行時間が40秒短縮する結果となった（表-3）。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、このよう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。

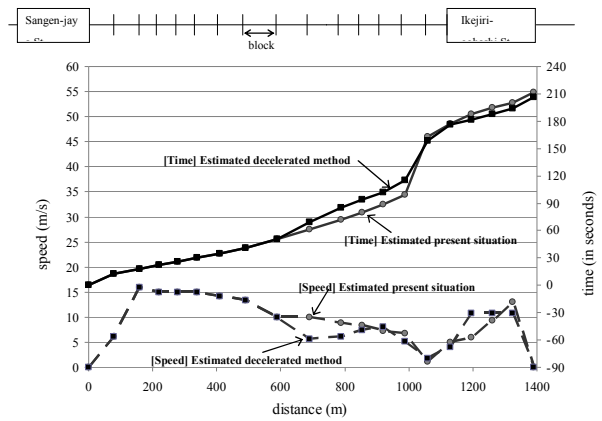


図-4 時間曲線と運転曲線の比較

表-3 駅間走行時間の比較

train No. (arrival time of schedule at Shibuya St.)	8:30	8:32	8:34	8:37	8:39	8:41	8:43	8:45	8:47	8:50	8:52	8:54	8:56	8:58	9:00
estimated present situation	214	212	222	208	214	246	253	227	172	181	196	197	195	205	239
estimated deceleration method	210	206	211	193	193	221	223	192	134	141	155	156	151	170	199
difference (in seconds)	-4	-6	-11	-15	-21	-25	-30	-35	-38	-40	-41	-41	-44	-35	-40

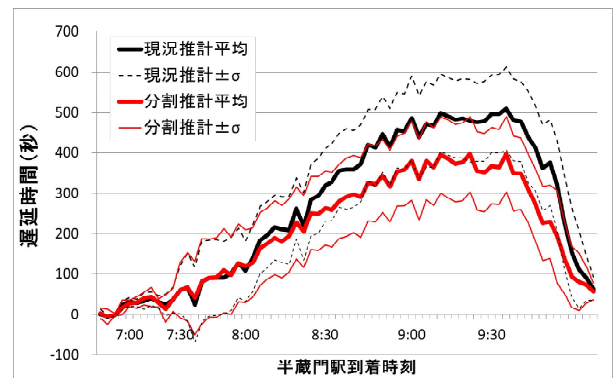


図-5 閉そく区間分割による遅延減少効果

(2) ハード面の対策

a) 駅間における対策

i) 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。推計にはSITモデルを用いる。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。

図-5に推定した結果を示す。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、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。また、21日間の標準偏差は、現況再現の80秒に対し、閉そく区

間の分割は79秒であり、同程度の標準偏差となった。

ii) 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。推計にはSITモデルを用いる。構築には、東日本旅客鉄道の開発するATACS²⁰⁾を参考とし、図-6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。本稿では東日本旅客鉄道の既往研究²¹⁾をもとに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-7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

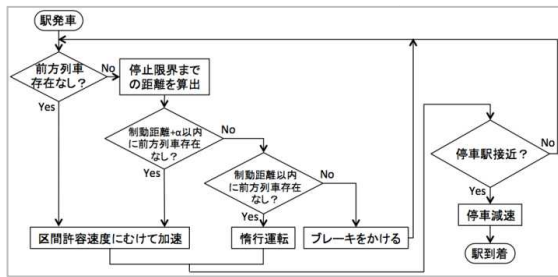


図-6 移動閉そくモデルのフローチャート

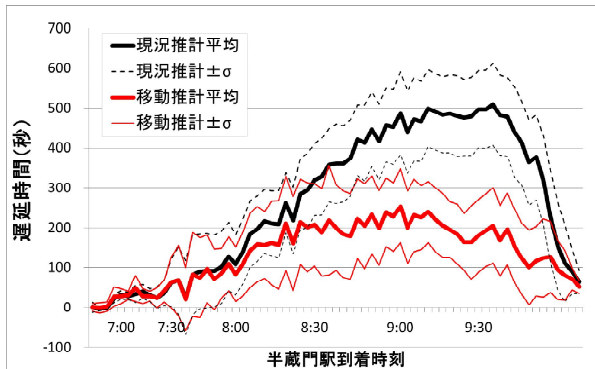


図-7 移動閉そく導入による遅延減少効果

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。

また、21日間の標準偏差は、現況再現の80秒に対し、移動閉そく時は78秒であり、同程度の標準偏差となった。

5. 列車遅延に起因する旅行時間変動の経済評価

都市鉄道における列車の遅延は、Day-to-day の旅行時間変動の増大をもたらし、ひいては、利用者の移動コストの増加につながる。遅延防止策は、遅延の平均的な程度を改善するのみならず、旅行時間の変動を少なくして定時性を向上させる効果をもたらすと期待される（図-8）。このような時間信頼性向上の便益は、利用者便益の数割程度を占める可能性があることが示されている²²⁾。

以下では、旅行時間変動の経済評価に必要な原単位である時間信頼性価値（Value of travel time variability）の推計方法に関する基本的考え方を概説し、都市鉄道の遅延の経済評価への適用可能性を示す。旅行時間信頼性の経済評価に関しては、主に道路交通の分野において研究が進展しており、そのレビューについてはBates et al.²³⁾ や福田²⁴⁾ に詳しい。都市鉄道の列車遅延に起因する Day-to-day の旅行時間変動の経済評価に関しても、これらの既存研究の知見を活用できると考える。

(1) 平均-分散アプローチ

時間信頼性価値の計測方法論の中でも、実務で適用例が多いのが平均-分散アプローチである。これは、旅行時間の平均と標準偏差が旅行者の効用関数 U に直接引数として含まれる状況を表したものであり、一般に以下のように表される。

$$U = -\delta C - \zeta E[T] - \rho \sigma_T$$

ここで、 C : 移動費用、 $E[T]$: 期待旅行時間（通常は平均旅行時間で代替）、 σ_T : 旅行時間の標準偏差、 δ , ζ , ρ : それぞれの限界効用 (>0) である。この定式化のもとでは、旅行時間の限界効用の比 ρ/δ が時間信頼性価値を与える²⁵⁾。

このように、平均-分散アプローチの定式化は明快かつ簡潔で実務への適用も容易であるが、効用の引数に旅行時間の平均や標準偏差を含み、機関選択や経路選択に基いて時間信頼性価値を推定することのマイクロ経済理論的な根拠は明白ではない。

(2) スケジューリングアプローチ

これに対し、旅行時間の変動に伴う最も直接的な利用者行動変化である出発時刻選択に着目したモデル化がスケジューリングアプローチ^{26), 27)}である。希望到着時刻と実際の到着時刻との乖離によるスケジュールコストを明示的に考慮し、さらに旅行時間の変動を考慮した期待効用最大化原理に従う行動モデルの開発が進展した。

スケジューリングアプローチでは、与えられた希望到着時刻 ($PAT = 0$ に基準化) に対して、下記に示すような出発時刻 t_D ならびに到着時刻 a に対する利用者選好 ($\alpha - \beta - \gamma$ 選好) を仮定する。

$$U = -\delta C - \alpha(a - t_D) + \beta \min(0, a) - \gamma \max(0, a) \quad (1)$$

ここで、 α : 旅行時間 ($T \equiv a - t_D$) の限界効用、 β : 早着時間 (Schedule Delay Early: SDE) の限界効用、 γ : 遅着時間 (Schedule Delay Late: SDL) の限界効用である。状況に応じて式(1)には項 “ $-\theta D_L$ ” が加わる場合もある (D_L : 遅刻ダミー、 θ : その不効用値)。

上記のスケジューリングモデルに対して、旅行時間が確定的でなく、ある確率変数に従うと仮定して期待効用最大化アプローチを適用すると、以下の関係式が導かれる (例えば Norland et al.²⁸⁾)。

$$EU^* = -\delta C - \alpha E[T] - \beta E[SDE] - \gamma E[SDL] - \theta P_L \quad (2)$$

ここでは遅着ペナルティも考慮しており、 P_L は最適到着確率と呼ばれる。旅行時間変動に関する情報と利用者選好に関する情報が同時に得られている場合には、式(2)の期待効用関数を離散選択モデル等で推計することにより、時間信頼性価値 β/δ 、 γ/δ を求めることができるし、あるいは、離散選択モデルのログサム変数より消費者余剰変化を求め、便益を直接計算することもできる。

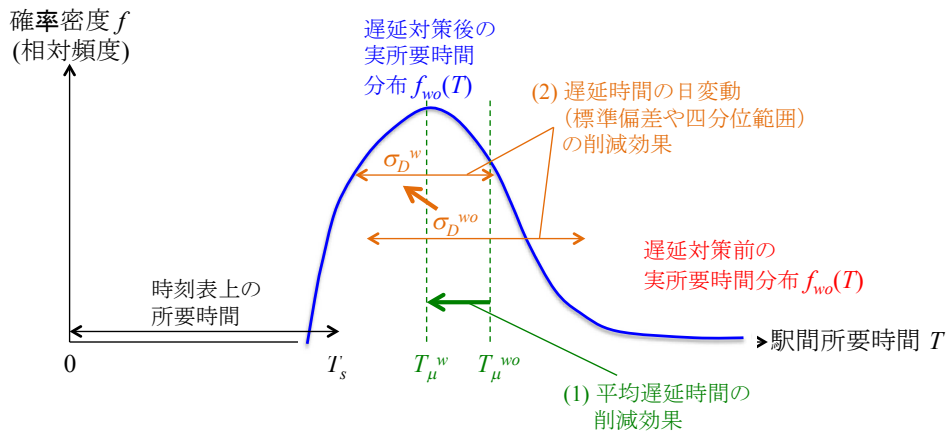


図-8 遅延防止対策による旅行時間信頼性向上効果

(3) 統合アプローチ

そのような中、Noland and Small²⁹⁾は極めて限定的な状況下で、上記の両アプローチのモデルが等価になることを示した。具体的には、旅行時間の変動が、「出発時刻に依存せず、一様分布もしくは指数分布に従う」場合に、間接効用関数の式(2)に対応する間接効用関数が平均-分散モデルになることを示したものである。

さらに Fosgerau and Karlström³⁰⁾は、より一般的な状況下において両者の等価性を証明した。旅行時間の確率の変動を $T = \mu + \sigma X$ と表す。ここで μ は平均旅行時間、 σ は旅行時間の標準偏差である。また X は基準化旅行時間と呼ばれ、その密度関数を φ 、分布関数を Φ と表す。このとき、式(1)に対する期待効用最大化の結果として得られる間接効用関数は式(3)のようになる。

$$EU^* = -\delta C - \alpha \mu - \left\{ (\beta + \gamma) H \left(\Phi, \frac{\beta}{\beta + \gamma} \right) \right\} \sigma \quad (3)$$

ここで関数 $H(\cdot)$ は Mean Lateness Factor と呼ばれ、次式で定義される。

$$H \left(\Phi, \frac{\beta}{\beta + \gamma} \right) \equiv \int_{1 - \frac{\beta}{\beta + \gamma}}^1 \Phi^{-1}(v) dv \quad (4)$$

なお、積分の下限を規定する定数 $\beta / \beta + \gamma$ は、最適遅着確率と呼ばれる。Mean Lateness Factor は、基準化旅行時間分布とスケジューリング選好が与えられれば定数となる。このとき、時間信頼性価値は $(\beta + \gamma) H(\cdot) / \delta$ で与えられる。

このように、非常に緩い仮定の下で平均-分散アプローチとスケジューリングアプローチが整合することから、これを統合アプローチと称する。Fosgerau and Fukuda³¹⁾は、統合アプローチの前提条件が妥当であることを実際の旅行時間データを用いて検証している。また福田²²⁾は、統合アプローチにより旅行時間変動に伴うコストの試算を行い、総移動コストの 2~3 割になる可能性を示してい

る。しかし、統合アプローチを用いて時間信頼性価値を推計するためには、旅行者のスケジューリング選好に加えて旅行時間分布の情報が必要となる³²⁾。

(4) 一般モデル

近年、Fosgerau and Engelson³³⁾ならびに Engelson³⁴⁾は、より一般的なスケジューリング選好を仮定した時間信頼性価値に関するモデルを提案した。これは、Vickrey³⁵⁾によって提案された、「旅行者が、自宅に滞在し続けることから得られる効用と、目的地に滞在し続ける効用の総和に基づいて自己のスケジューリング（出発時刻選択）を決める」状況を表現したモデルである。この考え方に立脚すると、先述の統合アプローチは、自宅滞在に対する限界効用ならびに目的地滞在に対する限界効用が一定と仮定した滞在時間効用最大化モデル (Step Model) として解釈することが可能である。

より一般的に、自宅滞在限界効用を $H(t)$ 、目的地滞在限界効用を $W(t)$ とすると (図-9)、時刻 t_D に自宅を出発して時刻 a に目的地に到着した場合の総効用は、

$$U = \int_A^{t_D} H(t) dt + \int_a^B W(t) dt$$

で与えられる。ここで A, B はそれぞれ任意で定めた分析の開始・終了時刻である。図-9 より明らかなように、総効用が最大化される状況では、 $a = t_D + T$ の関係が成り立っている。

このように滞在時間の限界効用が時刻に応じて可変的であること (Time-varying) を想定したより一般的な選好構造に基づくスケジューリングモデルの枠組みの中で、Fosgerau and Engelson³³⁾は限界効用が線形で時間可変する問題を扱っており、これを Slope Model と称する。出発時刻 t_D に対する自宅滞在による限界効用を $H(t_D) = \beta_0 + \beta_1 t_D$ 、到着時刻 $a = t_D + T$ に対する職場滞在による限界効用を $W(a) = \gamma_0 + \gamma_1 a$ として特定化すると、相

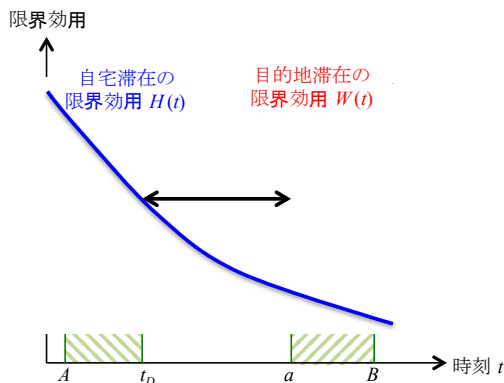


図-9 Vickrey³⁹⁾による一般的なスケジューリング選好

対的な効用値は以下ようになる。

$$U(t_D, a) = - \int_{t_D}^0 (\beta_0 + \beta_1 t) dt - \int_a^0 (\gamma_0 + \gamma_1 t) dt$$

$$= -(\gamma_0 - \beta_0)t_D + (\beta_1 - \gamma_1) \frac{t_D^2}{2} - \gamma_1 t_D T \quad (5)$$

さらに、旅行時間 T が確率的に変動するとき、その期待効用最大化問題を解いて得られる最大期待効用は次式で表される³³⁾。

$$EU^* = -\beta_0 \mu - \frac{\beta_1 \gamma_1}{2(\beta_1 - \gamma_1)} \mu^2 - \frac{\gamma_1}{2} \sigma^2 \quad (6)$$

すなわちこのモデルにおいては、旅行時間信頼性価値に対して旅行時間分布の形状が何も寄与しないことから、その実用性を高めている。加えて、旅行時間変動の尺度としては分散を用いれば良いことが式(6)から示唆されている。隣接する区間同士の旅行時間が独立であると仮定した場合には、それらの旅行時間の和によって構成させる経路の旅行時間変動についても分散が加法性を持つことから、標準偏差を旅行時間変動の尺度として用いる場合よりも操作性に優れている。Xie and Fukuda³⁶⁾は首都圏鉄道通勤旅客を対象に Step Model と Slope Model を実データから推定し、時間帯別課金導入のシミュレーション分析を行っている。

(5) 都市鉄道の遅延評価への適用上の留意点

さて、以上のような道路交通を主な対象とした時間信頼性価値推計の方法論を都市鉄道の遅延の問題に適用するにあたっての留意点は以下のとおりである。まず、道路交通と異なり、鉄道のような公共交通では、通常サービスの利用間隔が時刻表等に準じて離散的にしか提供されないという点である。これについては、Fosgerau³⁷⁾によって、サービス間隔を明示的に考慮した時間信頼性価値の理論的導出が行われている。しかし首都圏都市鉄道のような高頻度運行の場合には、サービス間隔については連続近似がみなせるものと考えられる。次に鉄道の場合には、時刻表上で定められた出発・到着時刻により、

時刻表上の旅行時間が定められている。したがって、道路交通のようにその旅行者の旅行時間全体を扱うのではなく、時刻表上の旅行時間（停車時分の影響を考慮し、ある駅における列車到着時刻とその列車が次の駅に到着した時刻との差）からの乖離に着目する。すなわち、道路交通における平均旅行時間が平均遅れ時間に、旅行時間の標準偏差が遅れ時間の標準偏差に置き換えられることとなるが^{38), 39)}、本研究もこの考え方に従うこととする。

6. 時間信頼性評価のケーススタディ

本節では、前節で概説した時間信頼性価値の評価モデルを用いて都市鉄道の遅延対策の経済便益の試算を行った事例について概説する。

(1) 分析対象区間とデータの概要

まず、スケジューリングアプローチと統合アプローチの推計及び便益試算に用いたデータについて概説する。

a) 第11回大都市交通センサス

本ケーススタディーでは、利用者の乗車時刻と始業時刻等を2010年に調査した第11回大都市交通センサスを用いる。出発時刻選択モデルのパラメータ推定を行うに当たり、以下の条件i)~iv)を満たすサンプルを抽出した。

- i) 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6:00～9:59の間に乗車し、かつ当該区間を終着駅としている。
- ii) 通勤目的かつ定期利用である。
- iii) 乗車時刻・勤務先始業時刻・イグレス所要時間が明らかである。
- iv) アクセスおよびイグレスの交通手段がバス等末端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である。

以上の条件を満たすサンプル数は521となった。

また、全体便益の試算には、第11回大都市交通センサスから東急田園都市線及び東京メトロ半蔵門線の通過客も含めたサンプル全てを抽出した。1回目の鉄道利用で、通勤目的、定期券利用の勤務先の始業時刻が6:00～12:00である4,992サンプルを拡大した217,012人の便益を算出した。なお、最混雑断面において、今回抽出したサンプルを利用者数を都市交通年報と比較すると、利用者数は27%程度過小となっている⁴⁰⁾。

b) 運行実績データ

各駅間の旅行時間の算出のために、運行実績データを用いる。運行実績データとは、自動列車運行制御装置より得られる秒単位の各駅の出発時刻と到着時刻を示すデータである。遅延対策案の便益試算には、SITモデルにより推定された遅延対策実施後の各駅間の所要時間のデータを用いる。これらのデータの取得期間は2010年11月

15日～12月17日までの平日21日間である。図-10は、この期間中の朝時間（6時～10時）における中央林間方面からの上り列車延べ1976本の運行列車に対して、始発駅出発時刻とその列車の各駅到着時刻の時刻表に対する遅れをプロットしたものである。同図にはノンパラメトリック条件付帰帰分析より得られた時刻別の遅れ時間の平均、中央値、上下四分位数も示しており、午前8時付近において遅れの平均やばらつき（上下四分位数の差）が大きくなっていることが分かる。

同様に、SITモデルによる移動閉そくシミュレーション（4.参照）により得られた同21日間の遅れの状況をプロットした結果を図-11に示す。移動閉そく導入により、遅延時間の平均値のみならず、その標準偏差も減少し、定時性が向上することが示唆される。

(2) スケジュールングアプローチによる便益試算

a) スケジュールングモデルの効用関数

まず、乗車時刻6:00～9:59までを15分毎に区切った16枝選択の非集計ロジットモデルを構築する。降車駅への希望到着時刻（PAT）は、勤務先始業時刻からイグレス所要時間を引いた時刻と仮定した。なお、乗車時刻の選択枝集合が不明なため、全時間帯を選択可能としてパラメータ推定を行う²²。各時間帯の効用関数は、式(2)より以下のように特定化した（選択枝と個人の添字を省略）。

$$V = -\alpha E[T] - \beta E[SDE] - \gamma E[SDL] - \theta P_L$$

ここで、 $E[T]$:期待旅行時間[分]、 $E[SDE]$:期待早着時間[分]、 $E[SDL]$:期待遅着時間[分]、 P_L :遅刻確率[%]、 $\alpha, \beta, \gamma, \theta$:パラメータである。旅行時間 T は乗車駅から降車駅まで乗車時間であり、早着時間 SDE と遅着時間 SDL は利用者の降車駅への到着時刻と希望到着時刻の差である。これらの期待値を平日21日間の運行実績データから求める。遅刻確率 P_L は、時間帯別の全列車の運行実績データの中から各旅行者が希望到着時刻に間に合わない列車数を算出し、その比率によって与える。

b) スケジュールングモデルのパラメータ推計結果

スケジュールングモデルのパラメータを多項ロジットモデル（MNL）を用いて推定した。その結果を表-4に示す。全てのパラメータが有意な結果となった。なお、都市鉄道の経路選択モデルに通常導入される混雑率指標のパラメータは有意とならなかったため変数から除外している。早着時間と遅着時間の両パラメータを比較すると、希望到着時刻からの遅れは同程度の早着よりも大きな不効用として評価されていることが分かる。また、時間信頼性価値に関連して、早着時間の1分増加は旅行時間が0.43分増加することと効用値において無差別という結果となった。同様に、遅着時間の1分増加は0.91分、遅刻確率の1%増加は旅行時間が0.25分増加することと等価となった。時間価値を40(円/分)と仮定すると、早着時間の1分

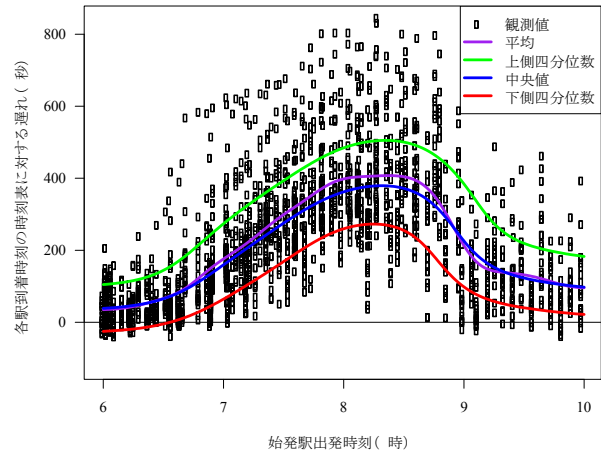


図-10 始発駅出発時刻と終着駅での遅れ時間の関係
[現況]

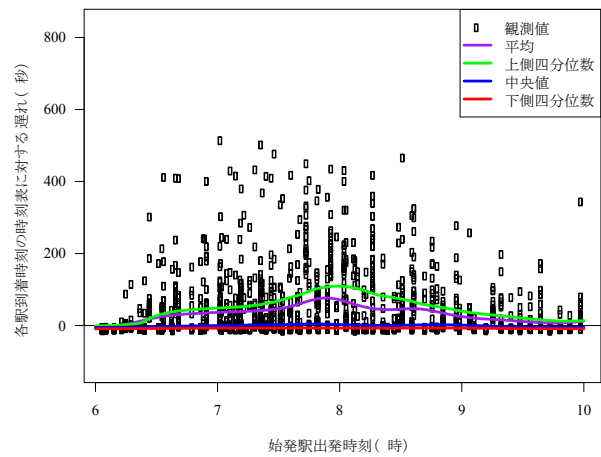


図-11 始発駅出発時刻と終着駅での遅れ時間の関係
[移動閉そく]

表-4 スケジュールングアプローチのモデル推定結果

変数	パラメータ	t値
旅行時間(分)	0.0781	4.35 **
早着時間(分)	0.0332	16.13 **
遅着時間(分)	0.0710	6.05 **
遅刻確率(%)	0.0192	6.70 **
サンプル数		521
自由度調整済み尤度比		0.308

**1%有意

増加は17.0円と等価、遅着時間の1分増加は36.4円と等価、遅刻確率の1%増加は9.8円と等価となる。

c) 遅延対策による利用者便益の試算結果

表-4に示したスケジュールングモデルのパラメータを用いて、ログサム変数より東急田園都市線及び東京メトロ半蔵門線の通勤目的利用者の遅延対策案の便益を試算する。ここでは、固定閉そく割改善、移動閉そく導入という二つの遅延対策案を考える。両対策案共に、対策前後のLOSはそれぞれ推定結果を用い、建設期間3年、供

用期間30年，社会的割引率4%，時間価値40(円/分)と仮定し便益を試算する。

表-5にシミュレーションの前提条件と便益試算結果を示す。11カ所の閉そく区間を分割した場合の1日あたり便益は3,918,510円，供用期間30年間の割引後便益は157.2億円となった。これより，1軌道回路あたりの整備費用が14億円以下であれば費用便益比が1.0以上となるを超えることがわかる。また，余裕距離を100mとした場合の移動閉そく導入時の便益は，1日あたり8,721,052円，供用期間30年間の割引後は348.6億円となった。これより，移動閉そく導入費用が1kmあたり7億円以下であれば，費用便益比は1.0を超えることが示唆される。

(3) 統合アプローチによる便益試算

a) 信頼性比の推計

続けて，統合アプローチによる便益試算結果について概説する。統合アプローチにおいてもスケジューリングアプローチ同様，まず出発時刻選択モデルの推定を行う必要がある。用いるデータや選択肢集合の設定は6.(2)の場合と全く同様であるが，効用関数については，遅着ペナルティを除外した以下のものを用いる。

$$V = -\alpha E[T] - \beta E[SDE] - \gamma E[SDL]$$

パラメータの推定結果を表-6に示す。先述のスケジューリングモデルの結果とも整合的であることが確認される。

次に，式(4)で定義されるH指数を算出する。それに先立ち，列車の運行実績データより始発駅出発時刻毎の遅延時間の平均と標準偏差の関係を図-12のように視覚化し，統合モデル適用のための前提条件である平均値と標準偏差の線形依存関係の有無を確認する。現況，移動閉そくいずれの場合においても，概ね正の相関関係になっており，統合モデルの適用が問題ないことが確認される。これを踏まえ，それぞれの状況における基準化された遅延時間の経験確率密度関数 φ の推定結果を図-13のとおり求める。これらの結果ならびに表-6の推定結果から得られる最適遅着確率の推計値(=0.156)を適用すると，H指数の推定値は，現況：0.277，移動閉そく時：0.285と概ね近い値となった。さらに，これらに γ の推計値を掛けて信頼性比を求めると，現況：0.713，移動閉そく時：0.725となった。これらの推計値は，既存の研究と比べても概ね同程度の傾向を示すものである²⁴。

b) 移動閉そく導入による利用者便益の試算結果

以上を踏まえ，式(3)に基づいて，移動閉そく導入による利用者便益を算出する。時間信頼性向上便益の算出にあたっては，6.(2)の場合と同様に，田園都市線・半蔵門線利用者217012人を対象とする。対策無(Without)の場合の出発時刻分布とLOSについては現況実績値²²⁾による単純集計結果を，また，対策有(With)の場合には，移動閉そく導入時のLOS値による出発時刻変化を考慮し

表-5 スケジューリングアプローチによる便益試算結果

遅延対策案	シミュレーション条件	供用期間30年間の割引後便益(億円)
固定閉そく制改善	渋谷-永田町間11カ所閉そく区間を分割	157.2
移動閉そく導入	余裕距離100mと仮定	348.6

表-6 統合アプローチのモデル推定結果

変数	パラメータ	t値
旅行時間(分)	0.0708	4.8 **
早着時間(分)	0.0284	16.74 **
遅着時間(分)	0.154	11.9 **
サンプル数		521
自由度調整済み尤度比		0.291

**1%有意

てサンプル数え上げ法により全体の出発時刻分布を推計した。その上で，各出発時間帯毎にWith, Withoutの各場合における総移動費用を求め，それらの差によって全体の利用者便益を推計した。すなわち，総便益UBは下記によって定義される。

$$UB = VTT \sum_{i=1}^{16} \{ (D_0^i \cdot MD_0 - D_1^i \cdot MD_1) + RR(D_0^i \cdot SD_0 - D_1^i \cdot SD_1) \}$$

ここで，VTT: 時間価値 (=40円/分/人)，i: スケジューリングモデルで設定した16の離散出発時間帯，0: Without, 1: Withを示すラベル，D: 時刻別需要，MD: 平均遅れ時間，SD: 遅れ時間の標準偏差，RR: 信頼性比である。

以上の設定のもとで移動閉そく導入の総利用者便益を求めると，一日あたり8,502,236円となった。その内訳は平均遅延時間短縮便益7,081,181円に対し，時間信頼性向上便益は1,421,054円となった。すなわち，時間信頼性向上便益の全体便益に対する比率は約20.0%である。これは，道路等の信頼性向上便益の試算²⁴⁾でこれまで確認されてきたものと同程度のシェアとなっている。なお，一人あたりに換算すると，時間短縮便益：32.6円/人，時間信頼性向上便益：6.5円/人，総便益：39.2円/人となった。

同様の手順に従い，4. に示した固定閉そく導入の利用者便益を試算すると，一日あたり5,288,337円となった。その内訳は平均遅延時間短縮便益3,922,224円，時間信頼性向上便益1,366,113円である。すなわち，時間信頼性向上便益の全体便益に対する比率は約34.8%である。

(4) 留意すべき点

スケジューリングアプローチ，統合アプローチ(さらには一般アプローチ)のいずれを用いても列車遅延改善便益の試算が可能であるが，それぞれ特徴を有している。スケジューリングアプローチの場合には，ログサム変数

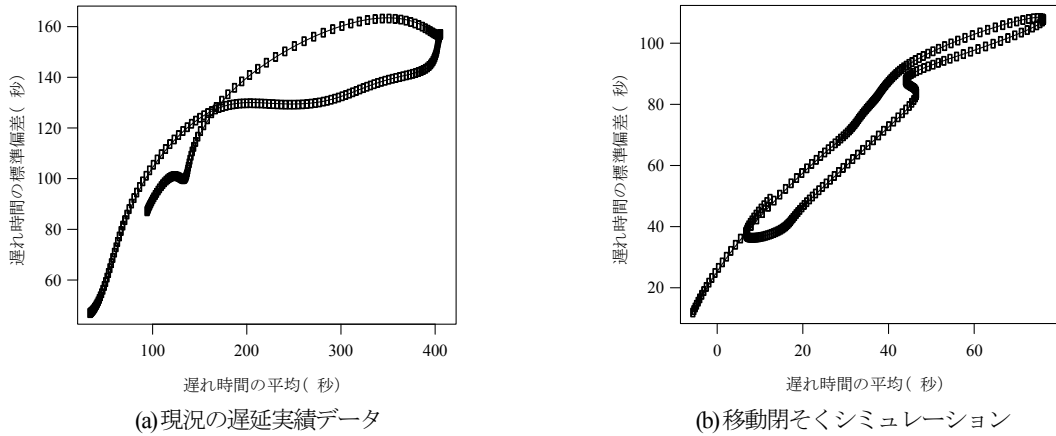


図-12 遅れ時間の平均と標準偏差の時間履歴

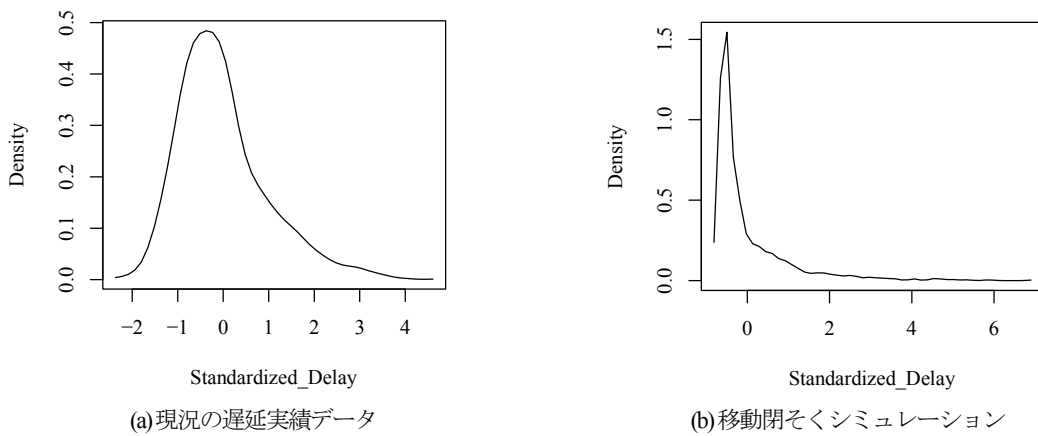


図-13 基準化された遅れ時間の経験分布

を用いていることから需要モデル（出発時刻選択モデル）と便益評価とを統合的に行うことができる。一方、統合アプローチでは、需要予測結果を用いた総費用アプローチにより利用者便益を推計するが、信頼性比を併せて推計するため、時間信頼性向上便益の全体便益に対するシェアを求めることができる。さらに統合モデルでは、単純な平均-分散型のコスト関数の形式をとっているものの、信頼性比を構成するH指数の算定において遅延時間分布の右裾の長さ（すなわち、稀に起こる大規模な遅延）の影響を考慮した価値推計が可能になっている。このようなモデル間の相違が、便益試算結果の違いをもたらしているものと考えられる。

但し現時点では、これらの便益評価方法の適用対象は、田園都市線・半蔵門線のようなネットワーク構造が比較的単純な相互直通路線への適用に留まっている。例えば、副都心線と西武池袋線・東武東上線のような枝分かれが存在するような直通運転形式の評価を行うことは現時点では難しい。さらに、今回のいずれのアプローチにおいても、遅延の改善に伴って利用者が出発時刻を変更し、

さらにそれが各時間帯の列車混雑（率）を変化させるという状況までは記述できていない。Xie and Fukuda³⁶のような時間帯毎の混雑率の内生的変化を考慮した均衡モデルの枠組みに、時間信頼性の影響を導入するようなモデルの拡張が今後必要となると思われる。

7. おわりに

本研究では、セルオートマトンによる GRIPS モデルとマルチエージェントシミュレーションによる SIT モデルの双方とも複数日の平均的遅延の再現性に関しては、高い精度が得られることを示した。GRIPS モデルでは遅延発生時の区間制限速度の設定や意図的な出発時間調整を行わないといった従来実施されていない新しい運行方法によって遅延時間が早期に回復することを示した。また SIT モデルでは、固定閉そく区間長の改善や移動閉そくの導入が遅延の発生を有意に低下させることを示した。旅行時間信頼性の経済評価として4種類の評価方法を

整理し、都市鉄道の遅延評価をおこなう上での留意点を検討した。さらにスケジューリングモデルと統合モデルを用いて固定閉そく区間長の改善と移動閉そくの導入による便益を算定し、両対策とも整備費用に比して十分に大きい便益が得られることが示唆された。ただし、SITモデルのDay-to-dayの再現精度は十分確保されておらず、今後さらなる改善が必要である。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、東京急行電鉄株式会社、東京地下鉄株式会社、東武鉄道株式会社からは協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。また、本研究は科学研究費（課題番号:21360242, 25420536, 25289160）の助成を得て行ったものである。

参考文献

- 1) 運輸省：駅等施設改良事業の具体事案，改良の可否の検討に関する調査 平成 12 年度報告書，2001.
- 2) 国土交通省：都市鉄道の有効活用方策に関する調査 平成 14 年度報告書，2003.
- 3) 国土交通省：都市鉄道における混雑率の測定方法に関する調査 平成 16 年度報告書，2005.
- 4) 国土交通省：鉄道輸送トラブルによる影響に関する調査 平成 20 年度報告書，2009.
- 5) 国土交通省：サービスの高度化に伴い発生する遅延等に対応した定時運行の確保方策に関する調査 平成 22 年度報告書，2012.
- 6) de Kort, A.F., Heidergott, B. and Ayhan, H. : A probabilistic (max,+) approach for determining railway infrastructure capacity, *European Journal of Operational Research*, Vol.148, No.3, pp.644-661, 2003.
- 7) Goverde, R.M.P.: A delay propagation algorithm for large-scale railway traffic networks, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.18, No.3, pp.269-287, 2010.
- 8) Fu, Y., Gao, Z. and Li, K. : Modeling Study for Tracking Operation of Subway Trains Based on Cellular Automata, *Journal of Transportation Systems Engineering & Information Technology*, Vol.8, No.4, pp.89-95, 2008.
- 9) Xun, J., Ning, B. and Li, K. : Station Model for Rail Transit System Using Cellular Automata, *Communications in Theoretical Physics*, Vol.51, No.4, pp.595-599, 2009.
- 10) 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，Vol.27, pp.871-879, 2010.
- 11) 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.
- 12) 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），Vol.67, No.5, pp.879-886, 2011.
- 13) 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，第 20 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp.289-292, 2013.
- 14) 鳥海重喜，中村幸史，田口東：通勤電車の遅延計算モデル，オペレーションズ・リサーチ：経営の科学，50(6)，pp.409-416, 2005
- 15) 仮屋崎圭司：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.
- 16) 山村明義，足立茂章，牛田頁平，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.
- 17) 山村明義，牛田頁平，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-東京地下鉄東西線での実施例とその検証結果-，電気学会交通・電気鉄道研究会資料，TER-12, 2012.
- 18) 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.
- 19) 宮崎一浩，日比野直彦，森地茂：路線の特性に着目した都市鉄道における列車遅延分析，土木計画学研究・講演集，Vol.48, 2013.
- 20) 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
- 21) 馬場裕一 他：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.
- 22) 福田大輔：旅行時間変動に起因するドライバーの移動コストの試算，中山晶一郎・朝倉康夫 [編著] 道路の信頼性評価，コロナ社，2014.
- 23) Bates, J., Polak, J., Jones, P., and Cook, A. : The valuation of reliability for personal travel, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.37, No. 2-3, pp.191-229, 2001.
- 24) 福田大輔：旅行時間変動の価値付けに関する研究展望とプロジェクト評価への適用に向けた課題の整理，土木計画学研究・論文集，Vol.27, No.3, pp.437-448, 2010.
- 25) Small, K. A., Winston, C., and Yan, J. : Uncovering the distribution of motorists' preferences for travel time and reliability, *Econometrica*, Vol.73, No.4, pp.1367-1382, 2005.
- 26) Vickrey, W. : Congestion theory and transport investment, *American Economic Review*, Vol.59, No.2, pp.251-261, 1969.
- 27) Small, K. : The scheduling of consumer activities: work trips, *American Economic Review*, Vol.72, No.3, pp.467-479, 1982.
- 28) Noland, R., Small, K., Koskenoja, P., and Chu, X.: Simulating travel reliability, *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 28, No.5, pp. 535-564, 1998.
- 29) Noland, R. and Small, K. : Travel-time uncertainty, departure time choice, and the cost of morning commutes, *Transportation Research Record*, Vol.1493, pp.150-158, 1995.
- 30) Fosgerau, M. and Karlström, A. : The value of reliability, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.44, No.1, pp.38-49, 2010.
- 31) Fosgerau, M. and Fukuda, D. : Valuing travel time variability: Characteristics of the travel time distribution on an urban road, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.24, pp.83-101, 2012.

- 32) Börjesson, M., Eliasson, J. and Franklin, J. : Valuations of travel time variability in scheduling versus mean-variance models, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.46, No.7, pp.855–873, 2012.
- 33) Fosgerau, M. and Engelson, L. : The value of travel time variance, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.45, No.1, pp.1–8, 2012.
- 34) Engelson, L. : Properties of expected travel cost function with uncertain travel time, *Transportation Research Record*, Vol.2254, pp.151–159, 2011.
- 35) Vickrey, W. : Pricing, metering, and efficiently using urban transportation facilities, *Highway Research Record*, Vol. 476, pp. 36–48, 1973.
- 36) Xie, C. and Fukuda, D. : Scheduling preference modeling of rail passengers in Tokyo Metropolitan Area and evaluation of time-varying fare policy for a congested urban railway line, *Journal of Japan Society of Civil Engineers Series D3*, Vol.70, No.5 (Accepted for Publication).
- 37) Fosgerau, M. : Marginal social cost of headway for a scheduled service, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.43, No. 8–9, pp.813–820, 2009.
- 38) Börjesson, M. and Eliasson, J. : On the use of “average delay” as a measure of train reliability, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.45, No.3, pp.171–184, 2011.
- 39) Fosgerau, M., Hjorth, K., Brems, C., and Fukuda, D. : *Travel time variability: definition and valuation*, Technical report, Technical University of Denmark, 2008.
- 40) (一財)運輸政策研究機構 : 平成 23 年版都市交通年報.

(2014. 8. 1 受付)