

芝浦工業大学

博士学位論文

都市鉄道の遅延連鎖現象のモデリングと  
時間信頼性の評価

Modeling of knock-on urban train delay and  
evaluation of travel time reliability

小林 渉

KOBAYASHI Wataru

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	本研究の背景	1
1.1.1	都市圏における列車混雑・遅延問題の発生	1
1.1.2	朝ピーク時間帯の慢性的な列車遅延の実態	1
1.1.3	東京圏の将来人口の推計結果からみた鉄道混雑・遅延の見込み	3
1.1.4	これまでの列車遅延対策の取り組み	3
1.1.5	遅延対策の評価に関する問題点	6
1.2	本研究の目的	7
1.3	本研究の構成	7
<b>第2章</b>	<b>既存研究の整理</b>	<b>10</b>
2.1	列車遅延推計に関する研究	10
2.2	出発時刻選択行動に関する研究	13
2.3	企業の始業時刻選択に関する研究	14
<b>第3章</b>	<b>TSM 施策評価に向けた列車遅延連鎖予測シミュレーションシステムの開発</b>	<b>17</b>
3.1	研究対象路線と使用データ	17
3.1.1	対象路線	17
3.1.2	使用データ	18
3.1.3	使用ソフトウェア	18
3.1.4	用語の定義	18
3.2	対象路線の実態分析とモデル構築の方針	20
3.2.1	駅間走行時間の計算方法	20
3.2.2	旅客乗降速度に関する分析	21
3.2.3	扉別の乗降人数に関する分析	23
3.2.4	確認時間の集計結果	25
3.2.5	突発的な遅延発生の集計結果と運転整理範囲	25
3.3	シミュレーションシステムの入出力関係	26
3.4	駅間走行時間推計のための走行時間推計モデルの構築	28
3.4.1	モデルの概要	28

3.4.2	列車の行動ルール	30
3.4.3	モデルの再現性の検証	31
3.5	旅客流動を考慮した乗降時間推計モデルの構築	33
3.5.1	モデルの概要	33
3.5.2	旅客の行動ルール	34
3.5.3	モデルの再現性の検証	36
3.6	駅発車時の確認時間推計モデルの構築	36
3.7	停車時間調整による運転整理モデル	38
3.8	乗降人数決定のための乗車位置選択モデル	39
3.8.1	モデルの定式化	41
3.8.2	パラメータ推定結果	43
3.8.3	モデルの再現性の検証	43
3.9	統合モデルを用いた列車運行の現況再現性の検証	44
3.9.1	実行条件と再現性評価のための評価項目の検討	44
3.9.2	到着遅延量からみた現況再現性	47
3.9.3	列車間隔からみた現況再現性	50
3.9.4	到着遅延の拡大・収束傾向からみた現況再現性	52
3.10	使用データが現況再現性に与える影響分析	52
3.10.1	データ欠損を想定した検討ケースの選定	52
3.10.2	検討ケースのシミュレーション結果	53
<b>第4章</b>	<b>TDM 施策評価に向けた乗車時刻選択モデルと始業時刻選択モデルの構築</b>	<b>58</b>
4.1	鉄道利用者の乗車時刻選択モデルの構築	58
4.1.1	データ概要とモデル構築の方針	58
4.1.2	離散選択モデルの基本設定	62
4.1.3	効用関数確定項	63
4.1.4	ランダム項に関する仮定～選択肢相関の表現	64
4.1.5	パラメータ推定結果	65
4.1.6	現況再現性の確認とキャリブレーション	67
4.2	企業間取引に着目した始業時刻選択モデルの構築	69
4.2.1	使用データとその概要	69

4.2.2	基礎集計結果	71
4.2.3	始業時刻選択モデルの基本的な考え方	75
4.2.4	構造推定によるパラメータ推定手法	76
4.2.5	始業時刻選択モデルのパラメータ推定結果	77
4.2.6	定式化における議論	79
<b>第5章</b>	<b>時間信頼性評価価値の算出</b>	<b>80</b>
5.1	旅行時間信頼性評価に関する手法の整理	80
5.1.1	平均－分散アプローチ	80
5.1.2	スケジューリングアプローチ	81
5.1.3	統合アプローチ	81
5.1.4	一般スケジューリング選好アプローチ	82
5.1.5	利用者便益の算出	84
5.1.6	都市鉄道評価における留意点	84
5.2	旅行時間変動価値の算出	85
<b>第6章</b>	<b>シミュレーションによる列車遅延対策効果の検討</b>	<b>87</b>
6.1	シミュレーションシステムで再現可能な遅延対策の整理	87
6.1.1	鉄道事業者11社を対象とした遅延対策に関するインタビュー調査結果	87
6.1.2	シミュレーションシステムでの実装方法	87
6.2	遅延対策案の評価視点の整理	89
6.3	TSM施策の遅延対策評価	90
6.3.1	移動閉そくシステムの導入	90
6.3.2	ワイドドア車両	92
6.3.3	渋谷駅の2面3線化	95
6.3.4	列車の加速性能向上	95
6.3.5	秒単位での発車時刻調整	96
6.3.6	階段の増設	97
6.4	TDM施策の遅延対策評価	97
6.4.1	地域・時間別混雑税の導入	97
6.4.2	始業時刻分散シミュレーションの試行条件	98

6.4.3 始業時刻分散シミュレーションの試行と利用者便益の試算結果 . . . . .	100
6.5 TSM と TDM 複合的な遅延対策の検討結果 . . . . .	100
第 7 章 結論	102
参考文献	105

## 目 次

1.1	突発的なトラブルのない日の遅延 . . . . .	2
1.2	本論文の構成 . . . . .	9
3.1	対象路線と停車駅 . . . . .	18
3.2	用語の定義 . . . . .	20
3.3	属性別歩行速度分布 . . . . .	21
3.4	ながら歩きと直前歩行者の歩行速度関係 . . . . .	22
3.5	混雑率別乗車速度の比較 . . . . .	22
3.6	溝の口駅現況乗車分布 . . . . .	24
3.7	二子玉川駅現況降車分布 . . . . .	24
3.8	確認時間調査結果 . . . . .	25
3.9	突発的な停車と長時間停車の範囲 . . . . .	26
3.10	シミュレーションシステムの構成 . . . . .	27
3.11	モデルの入出力関係 . . . . .	27
3.12	速度・勾配と加減速度の関係 . . . . .	29
3.13	駅間走行時間の残差 RMS . . . . .	32
3.14	乗降時間推計モデルの再現範囲 . . . . .	33
3.15	乗降時間の実績値と推計値の比較 . . . . .	37
3.16	突発的な停車と運転整理範囲 . . . . .	40
3.17	溝の口駅乗車分布 . . . . .	45
3.18	二子玉川駅降車分布 . . . . .	45
3.19	乗車人数の比較 . . . . .	46
3.20	降車人数の比較 . . . . .	46
3.21	統合モデルの現況再現性(渋谷断面) . . . . .	48
3.22	統合モデルの現況再現性(清澄白河断面) . . . . .	49
3.23	統合モデルの現況再現性(三軒茶屋断面) . . . . .	49
3.24	到着断面での残差 RMS . . . . .	49
3.25	駅間走行時間の残差 RMS . . . . .	50
3.26	主要駅断面での運転間隔 . . . . .	51

3.27 統合モデルでの遅延の内訳	52
3.28 突発的なトラブルのない日の遅延	53
3.29 データ制約下でのシミュレーションの結果(渋谷駅)	54
3.30 データ制約下でのシミュレーションの結果(到着断面残差 RMS)	54
4.1 分析に用いるサンプルの乗車駅と降車駅	60
4.2 始業時刻分布	60
4.3 余裕時間分布	61
4.4 長津田～渋谷間の出発時刻別サービス水準	61
4.5 特定化した式の鉄道旅行時間の構成	64
4.6 池尻大橋駅時間帯別乗車分布	68
4.7 中央林間駅時間帯別乗車分布	69
4.8 投入係数例(東京都)	70
4.9 千代田区と町田市の始業時刻分布	70
4.10 8:00-8:29 の始業割合	72
4.11 8:30-8:59 の始業割合	72
4.12 9:00-9:29 の始業割合	73
4.13 9:30-9:59 の始業割合	73
4.14 中央区、港区、日野市の産業分布	74
4.15 中央区、港区、日野市の始業時刻分布	74
5.1 一般スケジューリング選好アプローチ	83
5.2 遅れに着目した鉄道旅行時間の構成要素	86
6.1 移動閉そくシステムのシミュレーション(渋谷断面)	93
6.2 ワイドドア車両との乗降時間比較	94
6.3 加速性能の向上効果	96
6.4 政策前後での始業時刻分布	99
6.5 政策前後での乗車時刻分布	100
6.6 複合的な遅延対策の効果	101

## 表 目 次

1.1	鉄道事業者ごとの遅延対策の整理表 . . . . .	5
3.1	使用データ一覧 . . . . .	19
3.2	走行モデルの入力変数 . . . . .	29
3.3	確認時間の入力値 . . . . .	38
3.4	乗車位置選択モデルのパラメータ . . . . .	44
4.1	乗車時刻選択モデルのパラメータ推定結果 . . . . .	66
4.2	パラメータ推定結果 . . . . .	78
5.1	旅行時間変動価値の算出結果 . . . . .	86
6.1	鉄道事業者ごとの遅延対策の整理表 . . . . .	88
6.2	検討する遅延対策 . . . . .	91
6.3	遅延対策による各断面での到着総遅延の減少量 . . . . .	92



# 第1章 序論

## 1.1 本研究の背景

### 1.1.1 都市圏における列車混雑・遅延問題の発生

東京圏の都市鉄道は、複数の路線で混雑率が非常に高い状況にある。混雑緩和に向けた輸送力増強のために、鉄道事業者は相互直通運転や高頻度運転などをおこなってきた結果、列車本数の増加をもたらし、利用者のサービス水準の向上をもたらした。実際に混雑率は1975年と比較すると年々減少傾向となっており、鉄道事業者の取り組みの成果といえる。

2016年に示された東京圏における今後の都市鉄道のあり方について（交通政策審議会第198号答申）では、主要31路線のピーク時平均混雑率を150%以下とする混雑対策の取り組みに加え、遅延対策の必要性が示された<sup>1)</sup>。これは、混雑緩和のために運転間隔を狭めた高頻度運行により、1つの列車遅延が後続列車に伝播しやすくなり、列車遅延が発生しているためである。朝ラッシュ時間帯の列車遅延は東京圏の多くの鉄道路線で発生しており、鉄道事業者ごとに条件は異なるが平日20日間で10分未満の遅延が発生したときに発行される遅延証明書の発行日数は、東京圏の45路線平均で11.4日である<sup>2)</sup>。このように、列車遅延は東京圏の多くの鉄道路線で慢性的に発生しており、何らかの対策が求められている。

### 1.1.2 朝ピーク時間帯の慢性的な列車遅延の実態

東京圏の実路線での朝ラッシュ時間帯に発生している慢性的な列車遅延の実態について、実際の運行データを用いて解説する。使用するのは、東急田園都市線と東京メトロ半蔵門線のデータである。この路線は、上記2路線に加えて東武スカイツリーラインとの3路線で相互直通運転を実施している。朝ピーク1時間の混雑率は、東急田園都市線池尻大橋→渋谷間で185%、東京メトロ半蔵門線渋谷→表参道間で173%であり（2017年調査）、東京圏でも混雑の激しい路線である<sup>2)</sup>。

朝ラッシュ時間帯の遅延が発生・拡大する原因を整理する。図1.1は突発的なトラブルの発生していない、2014年10月のある平日の東京メトロ半蔵門線清澄白河駅到着時のダイヤ

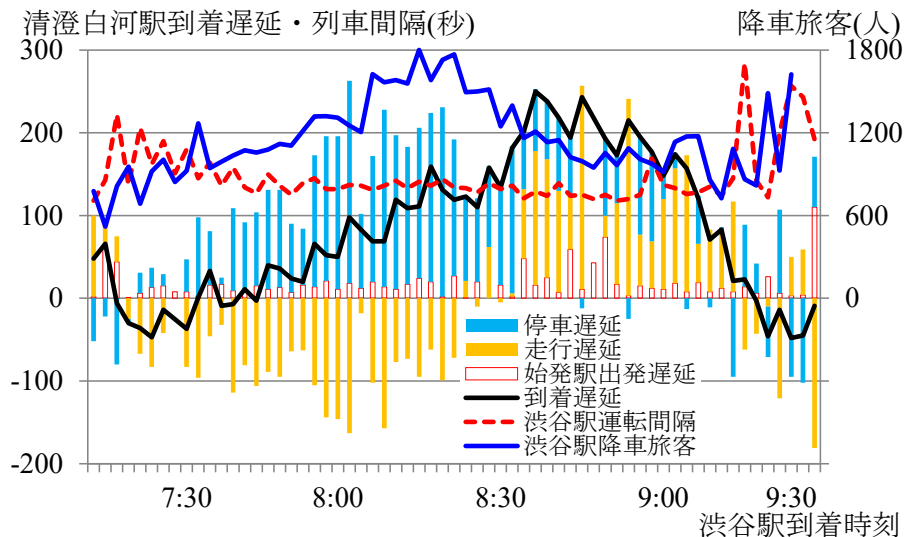


図 1.1: 突発的なトラブルのない日の遅延

からの遅れである。横軸は渋谷駅到着順に列車を1本1本とり、左縦軸に到着遅延量をとる。図 1.1 の検討断面は清澄白河駅であるが、以後の検討との表記統一のため、横軸の時刻は渋谷駅到着時刻としている。図から 7:30 過ぎに渋谷駅に到着する列車から到着遅延が発生、8:30 過ぎまで拡大し、以後減少している様子がわかる。なお、7:30 前後で到着遅延が負値となる列車があるが、これはダイヤよりも早く清澄白河駅に到着したことを示している。

図 1.1 の棒グラフは、到着遅延を駅停車時間の延びに起因する停車遅延と駅間走行時間の延びに起因する走行遅延、更に折返し列車の遅れによる始発駅（長津田・中央林間）での出発遅れに区別したものである。7:30 過ぎから停車遅延が発生しているが、走行遅延がマイナスとなりダイヤよりも早く走行できている。元々走行時間には各駅間で数秒の余裕分が含まれ、停車遅延を吸収しているためである。なお、7:30 から 8:00 にかけて走行遅延がマイナスに大きくなっているのは、停車遅延が増加したためである。8:00 以降に走行遅延のマイナス幅は減少に転じ、8:30 を過ぎると到着遅延の発生原因の多くが走行遅延に変化する。走行遅延が増加する原因には、朝ラッシュ時間帯の列車の運行間隔と特定時間帯に集中する旅客の存在が強く影響している。

図 1.1 の赤破線は渋谷駅での運転間隔、青実線は利用者数（混雑）の指標として渋谷駅での降車旅客数（2013 年調査）である。到着遅延は運転間隔が最小（130 秒間隔）の時間帯に発生し拡大している。同時帯は最小の運転間隔で運転しているにもかかわらず利用者数は増加しており、過度に集中する利用者による乗降時間の延びが停車遅延となって表れている。加えて運転間隔が狭いため、先行列車の乗降時間の延びが後続列車へ影響しやすい。

結果として先行列車の発車が遅れることで後続列車が駅に進入できず、需要のピークを過ぎた 8:30 以降では走行遅延が遅延の主たる要因になっている。

つまり、朝ラッシュ時の慢性的な遅延は次の 3 点が発生している。1 点目に特定時間帯に利用者が集中することで停車遅延が発生する（7:30 から 8:30 ころ）。2 点目に需要に合わせて運転間隔を狭めたことで先行列車の遅延の影響が後続列車へ波及しやすい状態となり、走行時間の余裕分で停車遅延を回復させるのが難しくなる（8:00 から 8:30 ころ）。3 点目に需要のピークが過ぎ停車遅延が減少しても、先行列車が停車時間超過で遅延しているため駅に進入できず走行遅延が増加する（8:30 以降）。

### 1.1.3 東京圏の将来人口の推計結果からみた鉄道混雑・遅延の見込み

2015 年の国勢調査で、我が国の総人口が減少していることが示された。しかし、東京圏においてはその限りではない。東京圏の夜間人口は 2015 年時点で約 3,613 万人であった。国立社会保障・人口問題研究所<sup>3)</sup>による将来人口の推計結果によると、2030 年の東京圏の人口は 3,587 万人と大幅な減少は見込まれていない。さらに交通政策審議会第 198 号答申<sup>1)</sup>の中では、鉄道利用による都区部への流入人口は 2010 年の 391 万人に対し 2030 年では 396 万人と予測されている。これら人口推計結果を鉄道混雑の視点から見ると、現状と同じ輸送力であれば鉄道の混雑は現在と同程度、路線によっては混雑が深刻化する可能性がある。人口の自然減による鉄道混雑緩和が向こう 20 年以上先のことであり、喫緊の課題として存在する列車混雑の緩和と列車遅延の解消には何らかの対策が必要である。

### 1.1.4 これまでの列車遅延対策の取り組み

列車遅延問題に対して、鉄道事業者では様々な取り組みをおこなってきた。ここでは、筆者が 2016 年 11 月から 2017 年 1 月にかけて東京の大手鉄道 11 事業者を対象におこなった、列車遅延対策に関するインタビュー調査の概要と結果を整理する。

インタビュー調査は、筆者を含めた調査員 2 名が鉄道事業者の担当者 1～8 名に対し、調査日の 2 週間前に予め送付した質問内容に沿ってインタビューをおこなった。質問内容は、1. 列車遅延の発生実態、2. 駅間走行遅延対策、3. 駅停車遅延対策、4. 情報収集・発信、5. 今後実施したい遅延対策である。質問内容の送付の段階では具体的な遅延対策を提示せず、幅広い遅延対策の取組みを聞き取るようにした。

インタビューで明らかになった遅延対策を表 1.1 に示す。表中の A～K がそれぞれの鉄道事業者を指しており、事業者の取組み内容が多様であることがわかる。遅延対策は、乗降時間減少に寄与する遅延対策、走行時間減少に寄与する遅延対策、ダイヤ設計の工夫、需要の分散に分けられた。

乗降時間減少に寄与する遅延対策は、ハード面では駅改良と車両に関する対策に大別された。駅改良はホーム上の混雑緩和を目的としたホーム拡幅や混雑箇所からのベンチの移設や、利用者乗降扉の分散とホーム上混雑の早期緩和を目的としたコンコース増設や階段増設の対策があった。また、2面3線化は後続列車の駅進入をスムーズにすることから走行時間短縮にも効果がある。車両の対策の大規模なものは長編成化による混雑緩和対策による特定扉への利用者集中の緩和である。他にも幅広車両の導入や中間車の運転台の撤去による車両定員増加策は、車内混雑緩和が主たる目的ではあるが、車内流動改善による乗降時間の短縮に寄与した例もあった。戸ばさみ検知機能は、混雑時間帯に多く発生する扉に荷物が挟まった場合の再開閉を減らすことで、閉扉時の遅延を抑制している。ソフト的な対策は、多くの鉄道事業者で取組まれていた。ホーム上に押し込みや駆け込み乗車を抑制する整理員の配置に代表される駅側の対策と、ワイドドア車両や高加速車両をピーク時間帯に集中的に投入する車両運用の工夫が明らかとなった。

走行時間減少に寄与する遅延対策は、様々なアプローチからの取組みが明らかとなった。路線では駅部とりわけ待避駅周辺の取組みが多く見られた。例えば待避線のアプローチ部分を延伸させ本線の分岐転換を図る例や、待避駅に安全側線を設置し本線側の速度向上を図る例があった。連続立体交差は道路事業であるが、完成後は走行時間短縮や遅延対策としての役割が期待できることから、この項目に記載している。信号の改良では、システムそのものをATSからATCやATOに切り替える例や、終着駅の終端部を延伸させ駅到着時の速度向上を図る例などがあった。車両の加速性能の向上は、低速域と高速域の向上を別々に取り組んでいた。低速域の加速力向上は、駅から列車を早く進出させ後続列車の進入をスムーズにさせる効果が期待でき、高速域の加速力向上は走行時間の余裕分の増加を目的に導入していた。踏切の降下タイミングの変更は、駅周辺部の遮断器の降下を列車の駅到着後から到着前に変更することで、駅進入速度の向上が期待できる。ソフト的対策にある技術の向上は、運転士の技術の向上に取り組む事業者と、運転士同士の技術レベルを揃えていく取組みとがあった。

ダイヤ設計の工夫は、遅れにくいダイヤとするための取組みである。途中駅止まりの列

表 1.1: 鉄道事業者ごとの遅延対策の整理表

項目			鉄道事業者											割合	遅延対策との関係性	
乗降時間減少に寄与する項目	ハード的対策	駅改良	ホーム上屋設置					○	○		○			27%	雨天時の乗客分散	
			ホーム拡張					○	○		○		○	36%	ホーム上混雑の緩和	
			柱の化粧取り外し					○						9%		
			階段増設		○					○	○		○	36%	利用者の乗降扉を分散	
			ホーム増設				○		○	○		○		36%	整列客の分散，走行時間短縮	
		コンコース増設							○	○		○	27%	ホーム上混雑の緩和		
		ベンチの移設	○										9%	ホーム上混雑の緩和		
		車両	多扉車両					○					○	18%	乗降人数の分散	
			ワイドドア車両							○				○	18%	
			幅広車両		○						○			○	27%	車内面積を増やし混雑緩和
	戸ばさみ検知機能		○		○		○			○				36%	扉の再開閉防止	
	長編成化				○	○		○			○	○		55%	車内混雑の緩和	
	ソフト的対策		中間車改造				○								9%	中間車の運転台を撤去し車内面積増
			発車合図の工夫				○	○			○		○	36%	確認時間短縮	
ホーム整理員増員						○	○		○	○	○	○	55%	押し込みや乗車抑制		
季節で整理員増員				○		○	○	○	○	○		○	55%			
走行時間減少に寄与する項目	ハード的対策	路線	複々線化			○		○					○	36%		
			部分複々線化	○		○	○		○				○	45%	単線路線の駅部複線区間を延伸	
			連続立体交差(道路施策)		○	○	○				○			36%		
			安全側線	○					○					18%	待避駅での本線信号現示向上	
			平面交差解消				○		○				○	36%		
		分岐信号	曲線改良		○						○			○	27%	制限速度の緩和
			分岐器改良	○	○			○			○	○	○	64%	制限速度の緩和	
			ATSから改良	○			○				○	○	○	55%		
			終端部改良					○	○					18%	制限速度の緩和	
			信号現示見直し								○		○	18%		
	車両	定位停止装置(TASC)								○	○	○	27%	停車時の速度制御の自動化		
		閉そく割の分割							○	○		○	36%			
		駅間最高速度の見直し								○		○	18%			
		ATO化										○	9%			
高速域の加速力向上		○				○					○	36%				
ソフト的対策		低速域の加速力向上		○								○	18%			
		先頭M台車						○					9%	分岐通過時の切替時間短縮		
		踏切	○			○							18%			
		運転方法の工夫	○				○	○	○	○		○	55%	先行列車に近づける		
ダイヤ設計			技術の向上		○		○		○	○				36%	運転技術の統一化も含む	
			途中駅どまりの列車削減								○			9%	折返線への分岐転換時間短縮	
		優等列車の格下げ						○					9%	需要の分散		
		ダイヤを寝かす	○	○	○	○	○			○		○	64%	ダイヤ上の余裕時間を増やす		
		待避パターンの変更	○						○				27%	優等列車の混雑集中を防ぐ		
		秒単位での発車時刻調整					○			○	○		27%			
		通過待ち列車に余裕時間を付与	○										9%	待避駅で遅延を吸収		
		最混雑時間帯の列車本数削減					○						9%			
		停車時間を短めにしたダイヤ設計						○					9%	停車時間の遅延を走行時間で吸収		
		需要の分散			オフピーク利用の推進				○	○	○	○	○		55%	
					オフピーク時に優等列車増発		○		○		○					27%
					系列バス会社との連携					○					9%	並行バス路線の利用を促す

車を減らすことで折返し設備へ列車進入の分岐操作や全旅客の降車確認に要する駅停車時間のロスを減らす取組みや、混雑が激しい列車への緩急接続パターンを変更させ乗降時間の短縮を狙った取組みをおこなっている。

最後に需要の分散は、利用者に対するオフピーク通勤の呼びかけによりピーク時間帯の混雑と遅延を減らす取組みである。オフピーク通勤の呼びかけや、オフピーク時間帯に速達列車を増発している事業者がある。

鉄道事業者によるこれまでの取り組みを総括すると、遅延対策の多くは鉄道事業者側の設備の改良をおこない輸送力を増強する施策がそのほとんどを占めている。一方で需要側である利用者に対する取り組みは限られていることが明らかになった。

### 1.1.5 遅延対策の評価に関する問題点

ここまで鉄道の遅延対策の必要性和、これまでに講じてきた遅延対策について整理した。その結果、喫緊の課題として存在する列車遅延問題に対しては、人口減少が見込めないことから遅延対策を講じることで問題解決を図っていくことが必要であると述べた。遅延対策メニューは、インタビュー調査によって鉄道事業者が実施してきた遅延対策が各社で異なっていることを表 1.1 で示した。

さて、実際に遅延対策を考えた場合、表 1.1 には約 50 種類の遅延対策が挙げられている。その中から選ぶもしくは新たな遅延対策を考えていくことになるが、どの遅延対策が効果的なのだろうか。路線の形状や沿線環境によって効果的な対策は変化するに違いない。鉄道事業者も一企業である。財源や空間には限界がある中で効率的な対策を講じる必要がある。そのためには遅延対策の事前評価する手法が求められる。

遅延対策の事前評価にはいくつかのアプローチがある。例えば列車遅延そのものが対策前後でどの程度変化したのかによって評価する視点や、遅延対策によって利用者に生じる便益を計測することで評価するものである。これまでの関連する研究において、列車遅延がどのように変化したのかについて論じている研究はいくつかあるが、鉄道の遅延対策を利用者便益で評価した例はなく、手法そのものも確立されていないのが現状である。

さらに、従来の遅延対策の多くは鉄道事業者が路線の輸送力を増強させる施策がほとんどを占めてきたが、最近では鉄道利用者に対して時差通勤やフレックスタイム制、テレワークなどを活用しピーク時間帯の移動を避けるよう促すキャンペーンが展開されはじめた。東京圏の鉄道遅延の発端となっているのが、ピーク時間帯に輸送力を大きく上回る鉄道需要により停車時間が運転ダイヤに収まらず遅延として現れるため、施策の方向性としては妥当であり今後も鉄道利用者の需要分散策は増加していくと考えられる。しかしその効果の計測手法は、キャンペーン参加者数や断面混雑率の変化にとどまっており、金額ベースの議論には至っていない。

鉄道需要の分散に伴う遅延対策効果に計測にあたっては、需要を分散させる鉄道利用者の乗車時刻選択行動を記述することが必要である。ピーク時間帯の鉄道利用者の多くは通勤目的で利用している。通勤者の日々通勤行動を決定づける最も支配的な要因は乗車時刻ではなく、勤務先の始業時刻である。すなわち勤務先の始業時刻が変更されれば時差通勤が促される可能性がある。そのためには企業の始業時刻の決定要因を記述することが求められる。企業の始業時刻決定行動や、通勤者の乗車時刻選択行動を記述したモデルは既存

の研究が多く発表されている．しかしこれらと鉄道遅延対策を組み合わせたものは存在しないのが現状である．

## 1.2 本研究の目的

上述の背景を踏まえ、本研究では列車遅延現象の再現と、需要分散策を含めた都市鉄道の列車遅延対策について、遅延の減少量の直接的効果と、時間信頼性向上に利用者便益の計測手法の確立を目的とする．具体的にはまず、都市鉄道の朝ラッシュ時間帯の列車運行を再現するエージェントベースのシミュレーションシステムの構築をおこなう．これは列車1本1本ごと、乗客1人1人まで再現対象とし、実路線の駅間での列車挙動と駅での利用者の乗降行動をミクロに表現する．シミュレーションシステムは列車運行を再現するモデルや、駅での乗降行動を再現するモデルなど5つのモデルを統合することで構築する．次にTDM施策の評価に向けて利用者の乗車時刻決定行動をスケジューリングアプローチの考え方を援用し記述する．また利用者の乗車時刻決定の変数となる企業の始業時刻決定行動について、データの入手可能性から地域間のマクロな取引データを用いて記述する．さらに列車遅延や定時性向上による時間信頼性評価価値を先述のスケジューリングアプローチに基づき試算する．最後にTSM・TDMの列車遅延対策について列車遅延や混雑の改善程度、利用者便益の推計をおこなうこととする．

この研究の成果として期待できることは、鉄道事業者側の遅延対策と鉄道利用者側の遅延対策について、対策実施前に複数案検討し同一のシミュレーションシステム下で比較することができる点にある．特に企業の始業時刻の変化が、鉄道利用者の行動変化を通して鉄道の遅延に及ぼす影響を、一連の枠組みの中で定量的に議論できる点は有益と考える．時間信頼性評価によって、列車遅延に対する利用者の抵抗感を数値で評価することにより、遅延対策の評価視点が列車遅延の減少量という列車遅延に対する頑健性の評価にとどまらず、利用者便益での評価も可能となる．

## 1.3 本研究の構成

本研究の構成を図1.2に示す．

本章では、研究背景と目的として、列車遅延問題が積極的に解決されるべき課題であることを示し、問題解決のためには：(1)列車遅延対策を遅延減少量の視点や利用者便益の視点などから比較検討可能な事前評価手法が必要であること；(2)鉄道供給側による対策(TSM)

に加えて、鉄道需要側が主体の遅延対策(TDM)の両面の検討が求められ、TDMに向けた対策は鉄道利用者の乗車時刻の変化を促すことで達成されるため、朝ラッシュ時間帯の利用者の移動目的の多くを占める通勤利用者の乗車時刻選択行動の記述と、通勤者の行動に支配的に働く企業の始業時刻選択行動を記述する必要があること；(3)先述の2点を組み合わせて一つの研究として仕上げた例はない；ことを述べた。

2章では、本研究に関連する既存研究の整理をおこなう。まず列車遅延対策や対策によって得た遅延現象に関する評価方法についての研究を整理したうえで、列車運行を数理的あるいはシミュレーションによって再現する研究の整理をする。この結果から、列車運行の再現手法や遅延対策の評価法について課題と研究の方向性を示す。続いて、乗車時刻選択行動の記述に関連した人々の出発時刻選択行動に関する研究を整理するとともに、企業の始業時刻選択行動についても同様に整理することで、通勤者の出発時刻選択行動が企業の始業時刻に強く影響されていることを示す。

3章では、TSM施策評価に向けた列車遅延連鎖予測シミュレーションシステムの構築をおこなう。まず鉄道に関連する用語の定義をしたうえで、使用データとその特徴と対象路線の概況を述べる。次にシステムの構築の基礎となる考え方を述べたうえで、実路線の構造・運行・需要に関する各種データを使用して、列車運行を5つのモデルで表現する。そしてそれぞれのモデルでの再現対象の現況再現性の検証をおこなったうえで、5つのモデルを統合し再度現況再現性の検証をおこなう。さらに開発したシミュレーションシステムの今後の展開も見据え、システム開発に必要なデータセットの優先順位や、データ欠損時のシミュレーションの挙動を考察する。

4章では、TDM施策評価に向けた利用者の乗車時刻選択モデルと企業の始業時刻選択モデルの構築をおこなう。乗車時刻選択モデルは5章にて時間信頼性価値の算出をおこなうことも踏まえ、スケジューリングアプローチの考え方の基づいた乗車時刻選択モデルの定式化をする。ラッシュ時間帯を15分ごとに区切った16肢の選択問題としてパラメータ推定をおこなう。利用者の乗車時刻の変更に強く影響する要素として、企業の始業時刻が挙げられる。企業の始業時刻をピーク時間帯からシフトさせることで利用者の乗車時間帯は分散されと考えられる。企業の始業時刻の決定にあたっては、取引関係のある他社との就業時間帯を重複させ生産性を向上させる“時間集積性の経済”の考え方が知られている。本研究ではこの考え方にに基づき、データの制約上市区町村間というマクロなデータを用い企業の始業時刻選択モデルの構築をおこなう。



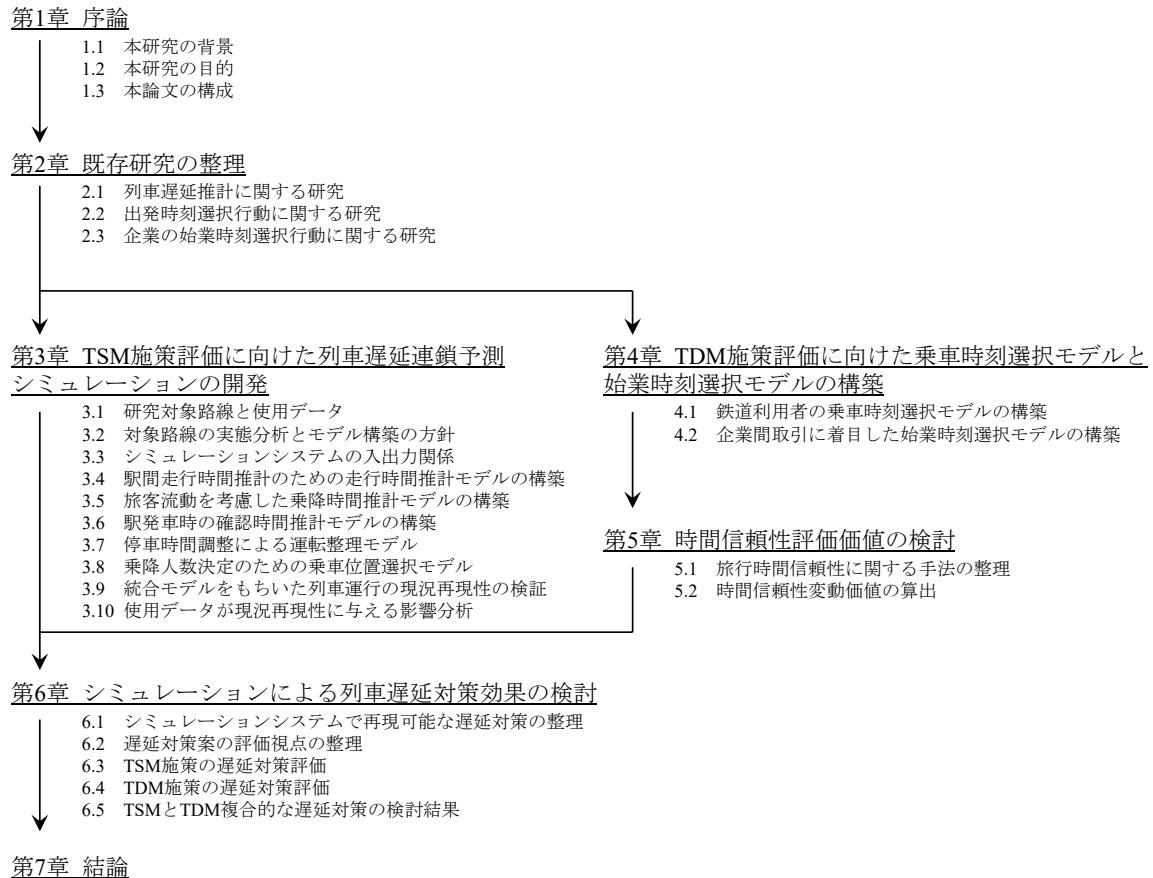


図 1.2: 本論文の構成

5章では、鉄道の旅行時間信頼性価値の推計をおこなう。まず時間信頼性価値の導出手法を整理したうえで、4章で構築した乗車時刻選択モデルの推定パラメータによって、列車遅延が改善されたときに生じる利用者便益を示していく。

6章では、3章で構築したシミュレーションシステムを用いてTSM、TDMに関する遅延対策効果の検討をおこなう。まず大手鉄道11事業者に対して実施した遅延対策のインタビュー調査を整理し、シミュレーションシステムでの検討可能性並びにシミュレーション上での設定条件の整理をする。本研究では鉄道供給側の施策と需要側の施策、これらを組み合わせた計8ケースの遅延対策案についてシミュレーションをおこない、列車遅延量のほかに、生じる利用者便益の視点からも推計結果を示す。

7章では、本研究の成果をまとめる。

## 第2章 既存研究の整理

### 2.1 列車遅延推計に関する研究

鉄道の列車遅延に関する既存の研究は、解析ベースのモデルとシミュレーションベースのモデルに大別される。解析的な初期の研究として、1966年のFrank<sup>4)</sup>がある。この研究では仮想の単線区間において列車の運転間隔や待ち合わせ駅の構造を与えた場合に、運用上必要となる列車本数と所要時間を示している。Carey and Kwieciński<sup>5)</sup>は連鎖的に波及する状況を“knock-on delay”と表現し、knock-on delayの発生が列車の運転間隔に与える影響を確率的に近似する手法を示している。Higgins and Kozan<sup>6)</sup>は、遅延現象を表す確率的な連立方程式を提案し、オーストラリアの郊外路線において大規模シミュレーションから得られた結果との誤差が平均で8%以内であるとしている。Huisman and Boucherie<sup>7)</sup>は、高速列車が低速列車に追い付いて発生する遅延に着目し、各サービス水準の走行時間分布を微分方程式によって解いている。Yuan and Hansen<sup>8)</sup>は、分岐器周辺での列車容量に着目し、列車に所与された余裕時間の長短と knock-on delay の発生確率の検討を行い、余裕時間が短くなるほど、knock-on delay は指数関数的に増加することを示している。和田ら<sup>9)</sup>は、仮想の環状線を対象に、列車の運行システム内に駅停車中の遅延と駅間走行中の遅延を分けて組み込んだ列車運行モデルを提案し、各駅での遅延を考慮したダイヤ維持のための自律的運行制御方策の検討をおこなっており、この運行制御の下では遅延が伝播しないことを示している。

シミュレーションベースの初期の研究は、1982年のPetersen and Taylor<sup>10)</sup>がある。この研究では、路線上の閉そくを明示的に考慮した走行時間関数を提案し、旅客列車と貨物列車が混在するカナダの鉄道路線での検証の結果、一定の精度を確認している。その後、Lu et al.<sup>11)</sup>は、ロサンゼルスに分岐等により接続する4つの鉄道路線を対象に、最高速度制限によって分類されたシナリオにおいて、運行可能な列車本数とそのときの平均遅延を推計するシミュレーションをおこなっている。Li et al.<sup>12)-14)</sup>は、セルオートマトンを用いて閉そく位置と列車の在線状況から後続列車の速度を決定するシミュレーションシステムを開発し、北京地下鉄を用いて走行時間の再現性の確認をおこなっている。また、この研究では閉そく

方式が従来の固定閉そくのほかに移動閉そく方式も検討対象としている。Xu et al.<sup>15)</sup> は、列車長や停車時間、運転間隔を変化させた場合の列車遅延の発生量を推計している。移動閉そくを想定したシミュレーションの結果、先行列車の列車特性に応じて駅出発間隔を調整することで、鉄道の線路容量を増やすことを示唆している。

我が国においても、本研究の先行研究である岩倉ら<sup>16)</sup> は2008年よりマルチエージェントベースで駅間走行時間と駅停車時間を推計するモデルを個々に開発し、それらを統合することで都市鉄道の運行を再現しているが閉扉してから発車するまでの確認時間を考慮していない。その後確認時間を含めたモデルの提案がなされ、実路線のラッシュ時の遅延連鎖現象のモデリングをおこない、混雑駅での2面3線化や需要分散を想定した場合の遅延について試算している<sup>17)</sup>。しかし、降車人数と混雑率を与件としたため、列車遅延発生時の乗降時間の表現には限界があった。乗降人数と混雑率を列車運転状況に合わせて変化させるため、筆者らは<sup>18)</sup>、駅構造を説明変数とした乗車位置選択モデルを用いることで、扉別の乗降人数と混雑率の推計手法を提案した。

武内ら<sup>19)</sup> は列車の駅間走行時間と乗降人数によって変化する乗降時間、並びに車内混雑率の推計も可能な列車走行・旅客流動シミュレータを開発している。高頻度の実路線を模擬したシミュレータを構築しており、複数のダイヤ案の検討もしているが、このシミュレータを用いた実運行の現況再現性に関する記述がなく、シミュレーションを用いた遅延対策案の効果の検証ができない。仮屋崎ら<sup>20)</sup> は東京圏の都市鉄道を対象に遅延の実態分析をおこなった上で、固定閉そくシステムによる列車運行シミュレーションシステムを開発し、実路線での再現性を確認している。また意図的な遅発や閉そく割の見直し等の遅延対策による遅延減少量の推計もおこなっている。

実務で取り組まれた列車遅延対策に関しては、山村<sup>21)</sup> は牛田<sup>22)</sup> による列車遅延の可視化並びに遅延の指標化を踏まえ、東京地下鉄東西線での信号設備や駅設備、車両設備のハード的対策と、ダイヤや駅オペレーションの見直しによるソフト的対策による遅延短縮を時系列比較により定量的に評価している。仮屋崎ら<sup>23)</sup> は、東急電鉄で実施された遅延対策や、田園都市線渋谷駅での在線状況表示器の設置や発車合図の見直しにより、遅延削減効果があったことを示している。

我が国の鉄道の遅延実態として駅での停車時間の延びが原因となっている。その停車時間の大半を占める乗降時間の推計手法については、Lin and Wilson<sup>24)</sup> に代表される乗車人数、降車人数、混雑率の3要素を説明変数とするモデルや、リアルタイム予測には不確実性の

高い乗降人数を含めず先行列車との運転間隔や車両長によって決定するモデル<sup>25)</sup>などに大別される。これまでに述べた列車運行シミュレーションの研究の多くは、停車時間を固定値とするもの、先行列車との運転間隔によって決定するものが多くを占め、乗降人数や混雑率を引数として乗降時間を決定するものは少ない。

これまでに挙げたのは代表的な研究であり、このほか鉄道の遅延や混雑緩和に関する研究には、遅延発生時の運転整理手法<sup>26)</sup>、駅構内の歩行者シミュレーション<sup>27),28)</sup>など多岐にわたる。

これらの既存研究から得られる知見を総括すると以下の様になる。まず第一に東京圏のラッシュ時間帯のような列車間隔が非常に短く、列車遅延が発生すると後続列車へ連鎖的に波及する路線を対象としている研究が少ない。

第二に都市鉄道においては列車運行の半分近くを占める駅停車時間を、既存の研究では一定値で与件とする場合がほとんどであり、仮屋崎ら<sup>29)</sup>の研究においても列車の発着間隔によって停車時間を変化させるにとどまっているため、乗降人数や混雑率の多寡による駅停車時間の変動を表現できない。東京圏のラッシュ時間帯では1.1節で示した通り、慢性的な列車遅延は駅における乗降時間の延びが発端となっている。そのため東京圏の列車遅延の再現にあたっては、車内の混雑状況と乗降人数によって乗降時間が変動するモデルが必須である。

第三に開発したモデルの遅延の再現精度を実路線を用いて確認した研究も少ない。そして列車遅延対策は、各企業での個々の取組みを紹介する論文は散見されたが、鉄道事業者横断的にこれまでの遅延対策を整理した例は存在せず、開発されたモデルを用いて様々な遅延対策を検討した研究は存在しない。

従って本研究では、以上の課題に対応できる列車遅延連鎖予測シミュレーションシステムを開発する。手法としては、岩倉ら<sup>17)</sup>が開発してきたエージェントベースのモデルに、新たに乗降人数と混雑率の推定機能や突発的な遅延発生時の運転整理に関する内容をモデリングする。

本研究での特徴的な点は下記5点である。1点目は、駅での乗降行動と駅間での列車走行とを相互に組み合わせたシミュレーションシステムの枠組みを作ることであり、2点目は駅における乗降時間推計にエージェントモデルを用い、利用者同士の相互作用を乗降時間ならびに列車運行へ反映することである。3点目は、実路線の運行の現況再現精度が高いシステムとすることである。4点目は、将来の遅延対策に向けて、鉄道事業者11社へのインタ

ビュー調査を実施し、過去におこなってきた遅延対策の総括をおこなうことである。5点目は、ソフト・ハード問わず様々な遅延対策のケーススタディをおこない遅延量の推計をおこなうことである。

## 2.2 出発時刻選択行動に関する研究

出発時刻行動を取り扱った先駆的な研究として Vickrey<sup>30)</sup> がある。単一のボトルネックが存在するネットワークでの所要時間のロスに伴う混雑費用と、始業時刻と到着時刻の差によって生じるスケジューリング費用から出発時刻を選択する考え方である。Vickrey<sup>30)</sup> 以後、道路交通を中心に研究の深度化が深められている。我が国の都市鉄道を対象として同様の問題に取り組んだ研究には、家田ら<sup>31)</sup> や岩倉・原田<sup>32)</sup> がある。それぞれ、離散選択モデルを基本として、所要時間や早着スケジューリング費用といった基本的な変数に加えて、鉄道特有の運行頻度に影響される混雑率指標の導入がなされている。都市鉄道の列車運行の特徴として、運転ダイヤが存在していることがある。すなわちダイヤから遅れることによる費用が生じる。出発時刻選択の枠組みによってダイヤからの遅れを明示的に示した研究には、例えば Bates<sup>33)</sup> がある。この研究では、降車駅での到着時刻からの遅れを考慮してモデル化をしているが、他の研究を概観すると時刻表からの遅れを考慮した研究は少ない。

更には時間信頼性の考え方にも、出発時刻選択行動に援用したものがあり、それがスケジューリングアプローチである。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 (Preferred Arrival Time:  $PAT$ , 通常は0に基準化) に対して、出発時刻  $t_D$  並びに到着時刻  $a$  のもとで下記に示す直接効用関数 (利用者選好)<sup>1</sup> を仮定する。

$$U = -\delta C - \alpha(a - t_D) - \beta \min(0, a) - \gamma \max(0, a) - \theta D_L \quad (2.1)$$

ここで、 $\alpha$ : 旅行時間 ( $T = a - t_D$ ) の限界効用,  $\beta$ : 早着時間 (Schedule Delay Early:  $SDE := \min(0, a)$ ) の限界効用,  $\gamma$ : 遅着時間 (Schedule Delay Late:  $SDL := \max(0, a)$ ) の限界効用,  $\theta$ : 遅刻ダミー  $D_L := 1(a > 0)$  の限界効用である (符号はいずれも正)。なお、項“ $-\theta D_L$ ”は含まれない場合もある。

ここで、旅行時間  $T$  がある確率分布に従うと仮定して期待効用  $EU^*$  を求めると、次式が導かれる<sup>34),35)</sup>。

$$EU^* = -\delta C - \alpha E[T] - \beta E[SDE] - \gamma E[SDL] - \theta P_L \quad (2.2)$$

<sup>1</sup>交通経済学では“ $\alpha - \beta - \gamma$  preference”と呼ばれることもある。

ここで、 $P_L$  は最適遅着確率 (Optimal Probability of Being Late)<sup>36)</sup> と呼ばれる。この期待効用関数を離散選択モデルで解くことによりスケジュールコストに関する各パラメータが推定でき、時間帯別の選択確率を求めることができる。

定式化した式を用いて  $SDE$  と  $SDL$  の関係性を調べると、Bates et al.<sup>36)</sup> では  $SDE = 0.56$  £/min <  $SDE = 1.13$  £/min, Hollander<sup>37)</sup> では  $SDE = 0.56$  £/min <  $SDE = 1.13$  £/min のように、 $SDE < SDL$  の関係が成り立っており、遅着による不効用のほうが大きいことが示されている。

## 2.3 企業の始業時刻選択に関する研究

企業の始業時刻と交通混雑に関連する先駆的な研究として Henderson<sup>38)</sup> が挙げられる。企業の始業時刻と通勤者の出発時刻を考慮した均衡モデルから時差出勤制度の効果を検証しており、企業間の始業時間が重なることによる生産性が向上する「時間集積の経済」を提唱している。以降の研究は Henderson が示した時間集積性の概念を下敷きとして、時差出勤やフレックスタイム制度などの TDM 施策の有効性を検証している。

Henderson が提案した均衡モデルを改良・発展させた既往研究として、始業時刻と入社・退社時刻の関係<sup>39)</sup>、時差出勤が鉄道通勤混雑に与える影響<sup>40),41)</sup>、固定始業時刻とフレックスタイム制度の最適採用企業数の分析<sup>42),43)</sup>、始業・出発時刻均衡モデルにおける複数均衡の存在<sup>44)</sup>、ポテンシャルゲームでの定式化と解の一般的な性質の解析<sup>45),46)</sup>、住宅立地を考慮した都市構造変化<sup>47)</sup> などの事例が挙げられる。これらは企業の始業時刻や就業制度と通勤者の出発時刻を均衡モデルとして明示的に定式化し、解の性質を明らかにすることで、始業時刻に関連する TDM 施策の必要性や有効性、成立可能条件などを解析的に示している。

一方、離散選択モデルを援用した計量経済モデルによるアプローチも若干ではあるが存在する。始業時刻を希望到着時刻として出発時刻選択モデルを構築して始業時刻の変化やフレックスタイム制度が与える影響<sup>48),49)</sup> や時間集積性を考慮した業務トリップへの影響<sup>50)</sup> を評価した事例が挙げられる。これらは、始業時刻や時間集積性が通勤トリップ出発時刻や業務トリップの発生に与える影響を評価することに主眼を置いており、始業時刻は外生的なシナリオとして与えられており、始業時刻の決定には言及していない。また、柳沼・岩倉<sup>51)</sup> はゲーム理論を援用して企業をプレイヤーとする始業時刻決定モデルの構築し、企業への時間帯別課金による始業時刻の分散効果をシミュレーションしている。

以上を整理すると、Henderson を踏襲した単一の OD ペア間における仮想空間を対象とし

た始業・出発時刻均衡モデルを解析する研究が中心であり、これまでに多くの示唆が得られている。しかしながら、複数のODや経路、ボトルネックが存在する一般的なネットワークでの解析は困難であり、これらを首都圏のような実空間に適用することは現時点では難しい。一方、計量経済モデルによる研究事例は、実空間への適用可能性が高いが、企業間の始業時刻決定行動が明示的に考慮されていない。また、ゲーム理論を応用した研究事例も企業数が増加すると計算コストが指数関数的に増加するため、実用的とは言い難い。

本研究では、企業の始業時刻に対するTDM施策評価を念頭に、首都圏における企業の始業時刻決定行動を記述する計量経済モデルの構築を目的とする。その際には、企業の始業時刻選択に有意に働く時間集積性を明示的に考慮する必要がある。

首都圏に立地する上場企業を対象とした始業時刻の決定理由に関するアンケート結果から時間集積性が始業時刻に与えていることが確認されている<sup>52)</sup>。具体的には、複数の企業において社外(取引先)との関係(50%)、顧客サービスとの関係(35%)により始業時刻の決定している企業が大半を占めていた。これより、首都圏における企業の始業時刻決定には、他企業との時間集積性が働いており、特に関連する企業との関係性が重視されることをモデルに反映する必要がある。

よって、企業間の戦略的依存関係の下での選択行動を扱うゲーム理論を基本としたモデリングが必須であり、企業の立地エリアや取引関係などの異質性を考慮する必要がある。そのため、柳沼・岩倉<sup>51)</sup>の枠組みを基本とした計量モデルの構築が望ましいと考える。ゲーム理論的な状況を記述する計量モデルとして、Discrete Gameと呼ばれる離散選択モデルをベースとしたモデリング手法(例えば、Aguirregabiria<sup>53)</sup>など)が提案されており、これを援用することで実用的なモデル構築が可能になると思われる。

なお、Discrete Gameは選択確率が入れ異なる内生性を有するため、実データを用いたパラメタリゼーションは通常の最尤推定は不可能である。そのため、誘導型モデルを導出してパラメタ推定を行う方法と構造型モデルのままパラメタ推定を行う構造推定アプローチが存在する。誘導型推定は既存のOLSなどが利用可能であり簡便であるものの、パラメタの識別が困難となり、定式化したモデルとの不整合が生じる。一方、構造推定は構造モデルのパラメタを直接推定でき、政策介入効果を計測することが可能であるが、計算量が爆発的に増加する課題がある。

実データを用いて個々の企業間の時間集積性を考慮した始業時刻選択モデルを構築をする場合に以下の問題が発生する。

- すべての企業の売上データが公開されていない.
- 企業の取引先情報（取引ネットワーク）が入手困難
- 首都圏では企業数が莫大であり，計算コストが高い.

これら制約より，個々の企業を意思決定主体とした始業時刻選択モデルの構築は容易ではない．そこで，個々の企業を市区町村スケールで集約した意思決定主体とし，集計的なプレイヤーが始業時刻選択を行っている状況を想定する．なお，意思決定主体を集計的なプレイヤー（集団）として設定することは進化ゲームや *population game* で見られる．

以上を踏まえた方針として，東京圏という実空間を対象に始業時刻に対する政策介入の効果を定量的に計測することを念頭に置いた始業時刻選択モデルの構築を試みる．具体的には，*Discrete Game* をベースに個々の企業ではなく集計的プレイヤー（地域別での企業の集合体）を分析単位として，地域間の時空間的な集積性に基づく相互作用を考慮したモデリングを行い，構造推定を用いてパラメータを推定する．



## 第3章 TSM施策評価に向けた列車遅延連鎖予測 シミュレーションシステムの開発

1章にて東京圏の都市鉄道の列車遅延の問題と解決の必要性について説明し、2章ではこれまでの遅延対策の取り組みについて触れた。その結果、実路線を対象に、駅での乗降時間を乗降人数から推定したモデルを活用して複数の列車遅延対策を検討するツールの開発はおこなわれていないことが明らかとなった。東京圏の慢性的な列車遅延発生の原因は、輸送力を上回る利用者の需要が集中することで駅での乗降時間超過が発生し、それらが後続列車に波及し列車遅延になっていることはすでに述べた通りである。つまり、東京圏の遅延現象の再現ならびに遅延対策の検討にあたっては、駅での乗降時間推計の変動要因に乗降人数が含まれていることが望ましい。

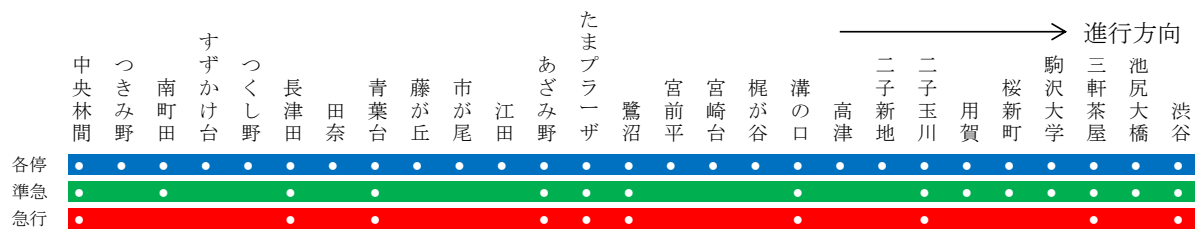
本研究では駅間走行行動や乗降行動を模擬した5つのモデルを統合した列車遅延連鎖予測シミュレーションシステムをエージェントベースのモデルとして構築する。本章の構成は、対象路線や使用するデータを示したうえで列車運行に必要な時間に関する用語の定義を説明する。次にモデリングにあたっての考え方を整理したのち、5つのモデルのルールを記述する。個々のモデルとしての現況再現性を確認し、5つのモデルを統合した統合モデルを構築する。構築した統合モデルは評価視点の整理をおこない、現況再現性を確認する。最後に他路線での展開を見据えて、シミュレーションシステム構築には必須となるデータの整理と、それ以外のデータが不足した場合の現況再現性に与える影響について考察する。

### 3.1 研究対象路線と使用データ

#### 3.1.1 対象路線

本研究の対象路線は東急田園都市線中央林間駅から東京メトロ半蔵門線押上駅の48.3km区間とする。この路線には3つの列車種別が運行している。それぞれの種別の停車駅は図3.1に示すとおりである。最速達列車である急行列車は、ピーク時間帯は運行せず代わりに準急列車が速達列車として運行している。

## 東急田園都市線



## 東京メトロ半蔵門線

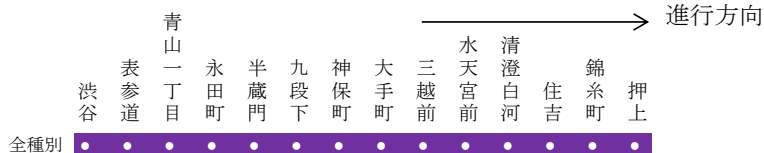


図 3.1: 対象路線と停車駅

### 3.1.2 使用データ

本研究では東京急行電鉄株式会社および東京地下鉄株式会社よりデータを提供いただいている。そのデータと現地調査により取得したデータを表 3.1 に示す。

### 3.1.3 使用ソフトウェア

本システムで使用するプログラミングソフトは(株)構造計画研究所のマルチエージェントシミュレータ artisoc ver4.2 である。本研究では、エージェントを列車、ATC 信号、勾配、駅、旅客などとし、その相互作用によって列車運行を再現する。シミュレーションの再現区間は、東急田園都市線の中央林間駅から東京メトロ半蔵門線の押上駅間とし、5:57~11:30 までに検討路線を走行する全列車を再現の対象とする。

シミュレータ上では時間単位を step と呼んでいる。本研究では、走行・乗降両シミュレーションで 1step を 0.2 秒とし、個々のエージェントの速度や加速度等を変換して用いている。空間の大きさは、走行シミュレーションは列車の編成長や線形情報の観点から 1 マスを 100m とし、乗降シミュレーションは旅客 1 人のサイズに合わせるため 1 マスを現実の 40cm としている。

### 3.1.4 用語の定義

シミュレーションシステム開発にあたって、時刻に関する用語の定義をする。図 3.2 は横軸に時刻、縦軸に列車位置を取り、プロット部分が列車の走行位置を指している。斜線の部分が列車が駅間を走行していることを示し、横線の部分は列車が駅に停車していることを

表 3.1: 使用データ一覧

区分	データ名称	内容	期間
路線	信号コード表	閉そくの最高速度，先行列車の在線位置ごとの制限速度，閉そく長，勾配情報	2014年7月～11月時点のもの
	列車停止位置情報	列車の停止座標	2014年7月～11月時点のもの
	エアセクション位置	き電区間の境界を示し，基本的には停止禁止位置の座標	2015年12月
車両	車両性能表	東急5000系と8500系，東京メトロ08系の加減速度，車両寸法	-
	運転曲線図	先行列車の制約が無い状態における列車の各地点における速度と所要時間をグラフ化したもの	2014年7月～11月時点のもの
	引張力曲線	東急8500系の引張力	-
駅	駅ホーム上図面	各駅のホームの長さや幅	2014年7月～11月時点のもの
	階段・エスカレータ位置情報	各駅の階段・エスカレータ位置	2015年度
	乗降行動の位置座標	ビデオ映像から得られた1秒ピッチの位置座標	2010年11月～12月
運行	運行実績データ	期間内の全列車の発着時刻が記載．軌道回路通過時刻のため誤差を含む	2014年7月～11月のうち 平日25日
	運行実績データ補正值	運行実績データの軌道回路通過時刻と発着時刻の補正值	2014年10月調査
	発着時刻表	運行計画上の各駅の発着時刻	2014年7月～11月時点のもの
	遅延実績データ	朝ラッシュ時間帯に発生した遅延のうち，その要因明らかなもの	2013年4月～11月 2014年4月～11月計16か月
	乗降量カウント調査結果	列車ごとの扉別あるいは階段別の乗降人数	2013年度調査
	確認時間調査結果	閉扉後発車までの時間	2014年10月調査
	応荷重データ	各駅発車時の車両ごとの混雑率	2010年11月～12月 2013年2月～3月
需要	第11回大都市交通センサス	各駅各時間帯の鉄道利用者の乗降駅，利用種別，利用目的	2010年度

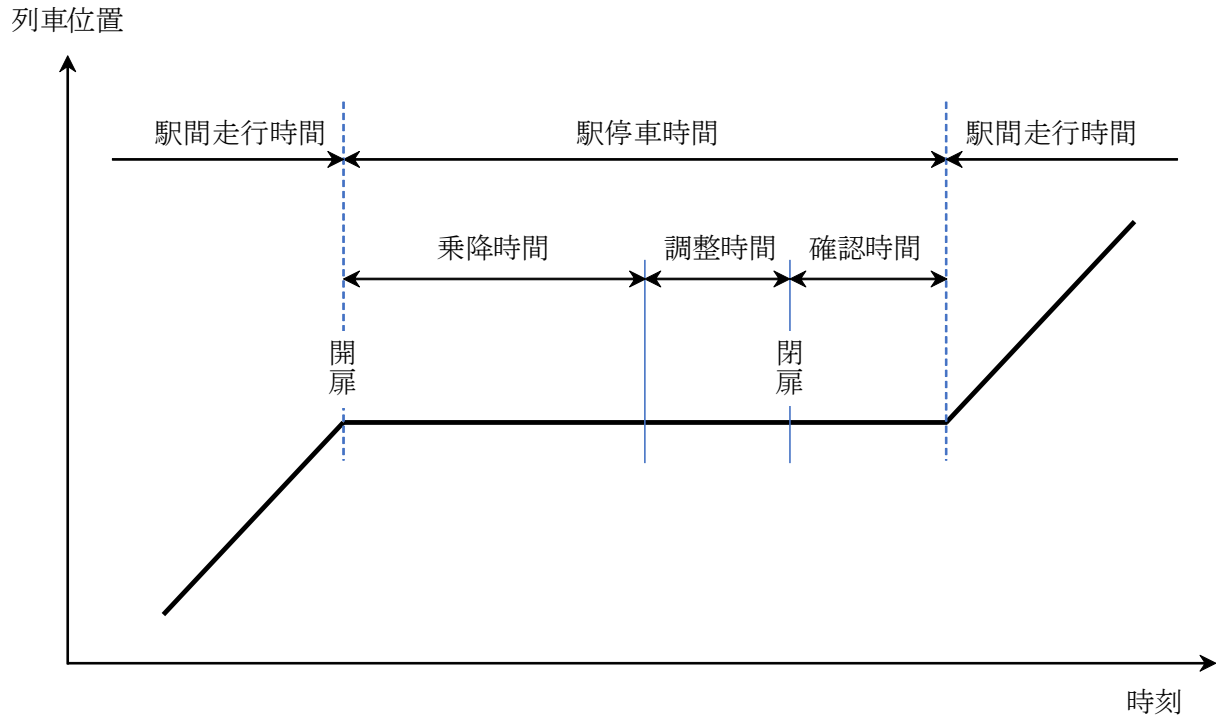


図 3.2: 用語の定義

指す。通常の列車運行の場合は駅を発車し、次駅に向かって走行、駅に到着後利用者の乗降行動ののち、再び走り出すことを始発駅から終着駅まで繰り返している。本研究における用語の定義は次の通りである。まず走行時間は列車が駅を発車してから次駅に到着するまでの時間を指す。乗降時間は、利用者が乗降を開始してから乗降が完了するまでの時間を指す。調整時間は乗降行動が終了してから計画ダイヤの発車時刻までの時間を指す。これは列車運行上認められていない列車の早発を防ぐためのものである。そして確認時間は、乗降終了から発車するまでの間にある乗務員や駅係員による閉扉時の安全確認にかかる時間を指す。

## 3.2 対象路線の実態分析とモデル構築の方針

### 3.2.1 駅間走行時間の計算方法

駅間走行時間は、車両の重量、加減速度、ノッチ（アクセル）とブレーキの程度といった車両側の条件と、制限速度や勾配、曲線の路線側の条件の組み合わせで決定する。吉武<sup>54)</sup>は列車の駅間走行時間の算定に必要な時間ごとの列車速度やその時の列車位置などの算出方法をまとめている。時刻ごとの列車位置や速度については運動方程式を用いて算出している。本研究においても吉武<sup>54)</sup>による走行時間の算定の手順に従い、列車の加減速のルー

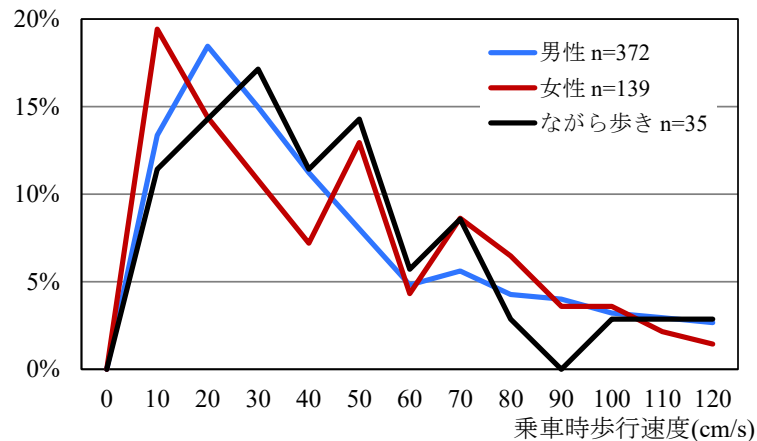


図 3.3: 属性別歩行速度分布

ルを規定する。

### 3.2.2 旅客乗降速度に関する分析

先行研究である岩倉ら<sup>17)</sup>は乗降行動に関して、ホーム上に設置したビデオ映像から取得した座標データと同日同時刻の列車の混雑率データを用いて、乗車旅客が列車に乗り込む際の扉の通過速度について分析している。分析対象駅は田園都市線6駅であり、調査列車数は合計50列車である。分析対象の乗車旅客は501人（男性：372名、女性：139人）である。また携帯電話や新聞等を見ながら乗車している、いわゆる“ながら歩き”をしている旅客は全体の7%にあたる35人だった。

乗車旅客が列車に乗り込む際の歩行速度を取り出し階級別に示したものが図3.3である。男性の最頻値は20cm/s、女性は10cm/s、ながら歩きの場合は30cm/sとなった。また100cm/s以上で歩く歩行者はどのカテゴリにおいても10%未満だった。ながら歩きをしている旅客の歩行速度が高くなった理由として、直前を歩く歩行者の歩行速度が影響している。図3.4では、ながら歩きをしていたサンプルと直前を歩く歩行者の乗車速度を比較している。45度線よりも右側にシフトしている割合、すなわちながら歩きの歩行者のほうが歩行速度が遅いケースが多い。実際に平均歩行速度をみると、ながら歩きが41.8cm/sに対し、直前歩行者は49.8cm/sと2割程度歩行速度が速く、ながら歩きをする乗客は前方の歩行者の速度に対応できていない様子が伺える。

歩行速度と混雑率の関係性についても分析した。混雑率を3階級に分類して歩行速度の頻度分布を示したものが図3.5である。混雑率によって分布が異なることが見て取れる。特

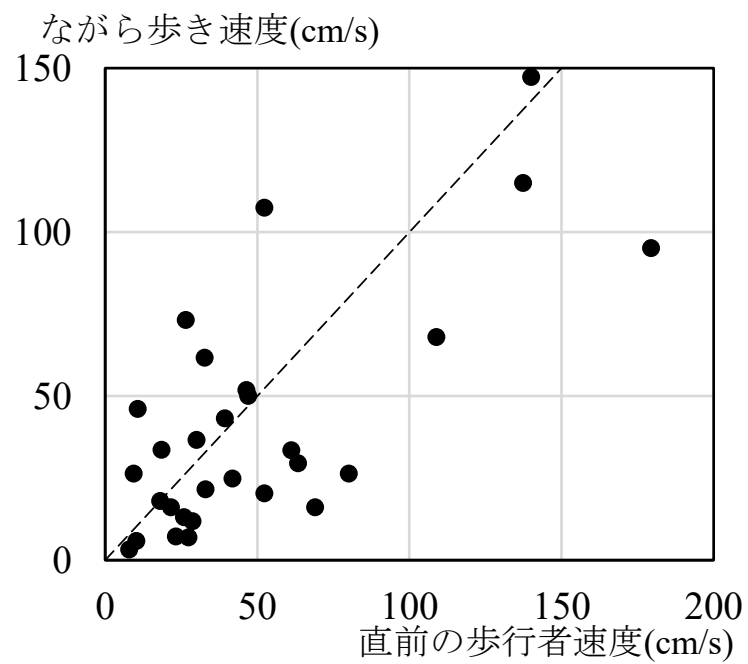


図 3.4: ながら歩きと直前歩行者の歩行速度関係

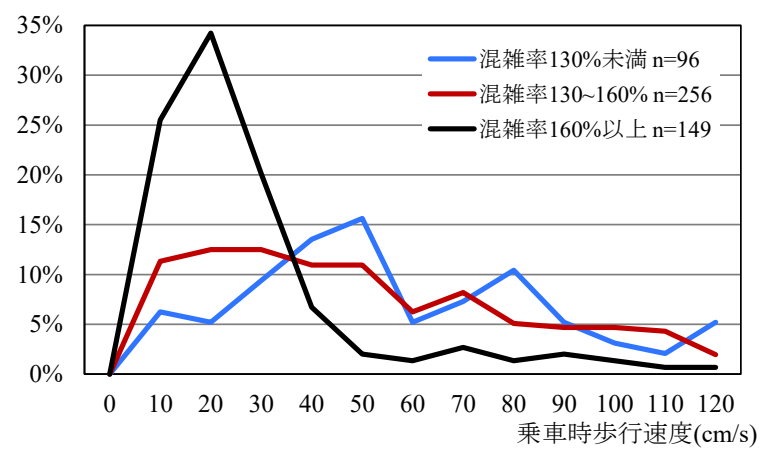


図 3.5: 混雑率別乗車速度の比較

に混雑率が160%以上の場合の歩行速度は40cm/s以下がほとんどを占めていることがわかった。逆に混雑率が130%未満になると、歩行速度50cm/s以下のサンプルは全体の半分の48サンプルしか存在しなかった。

以上の分析結果から得られた知見は次の通りである：(1)歩行速度は属性によって変化している；(2)混雑率が高くなるほど列車乗り込み時の歩行速度は低下する。特に混雑率が160%を超えると歩行速度は急激に低下する；(3)ながら歩きのサンプルは前方の歩行者よりも歩行速度が遅い；これらの項目を考慮したうえで、混雑率や旅客属性が停車時間に影響するよう、旅客1人1人が周囲の状況から行動を決定するモデル構築をおこなっていく。

### 3.2.3 扉別の乗降人数に関する分析

表3.1の乗降量カウント調査結果から得た、田園都市線主要駅の扉別乗降人数データによって乗降分布を描くと同時に、田園都市線と半蔵門線全駅の階段・エスカレータの位置や狭隘部などの駅構造を現地調査によって把握し、駅構造と昇降設備の関係について比較した分析をおこなった。その結果が図3.6と図3.7である。図3.6、図3.7は田園都市線のある駅の乗車旅客と降車旅客を示している。

まず扉別の乗降人数は均一でないことがわかる。そして図3.6の分布を駅構造の視点からみると：(1)階段付近の乗車人数が多く、階段から距離がある扉ほど乗車人数は少ない；(2)扉番号12と21を比較するとエスカレーターのある扉番号21周辺の乗車人数の方が多い；(3)階段からの距離が同程度の扉であっても階段の裏側のほうが乗車人数は少ない。ここでの階段の裏側とはコンコースからホームへ向かう昇降設備の向きに対して反対方向に扉があることを表している；(4)同様にホーム幅が狭く多くの人が整列できない扉では乗車人数は少ない；ことがいえる。次に降車人数の分布を示す図3.7からは：(1)階段のある扉番号1周辺で降車人数が多い；(2)階段設置されていないが扉番号12から21にかけても降車人数が多く分布している。この扉付近には上流駅の昇降設備(階段・エスカレータ)が多く存在している；(3)階段のない扉番号40付近では降車人数は非常に少ない；ことが確認できた。

この結果より、利用者は乗車駅と降車駅の駅構造を踏まえた乗車扉選択をおこなっているとの仮定の下で、駅構造を説明変数とした乗車位置選択モデルを構築し、扉別の乗降人数を推計する。

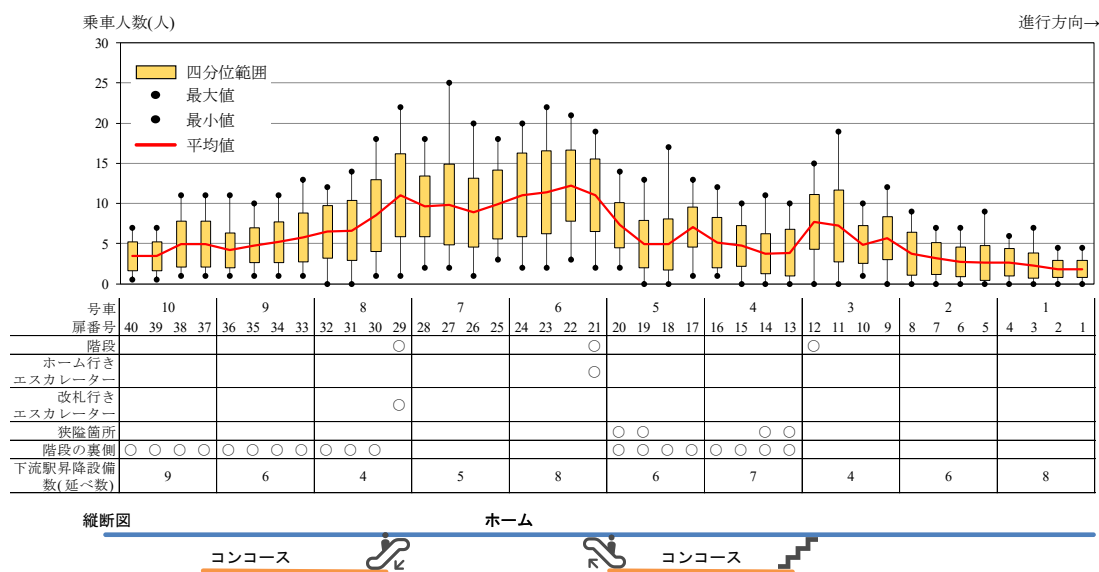


図 3.6: 溝の口駅現況乗車分布

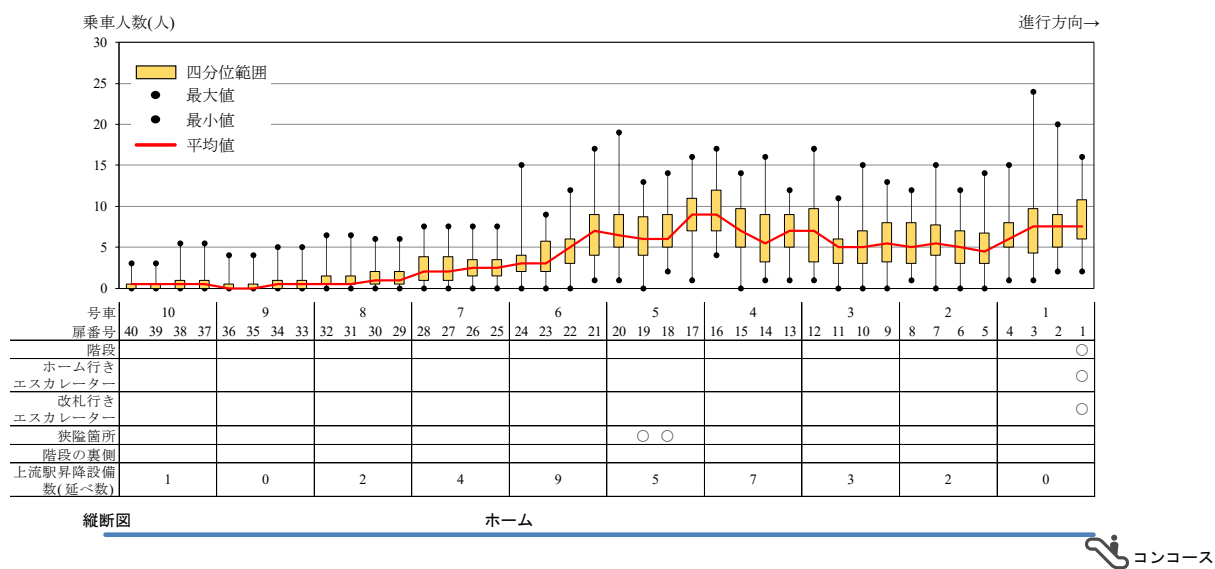


図 3.7: 二子玉川駅現況降車分布



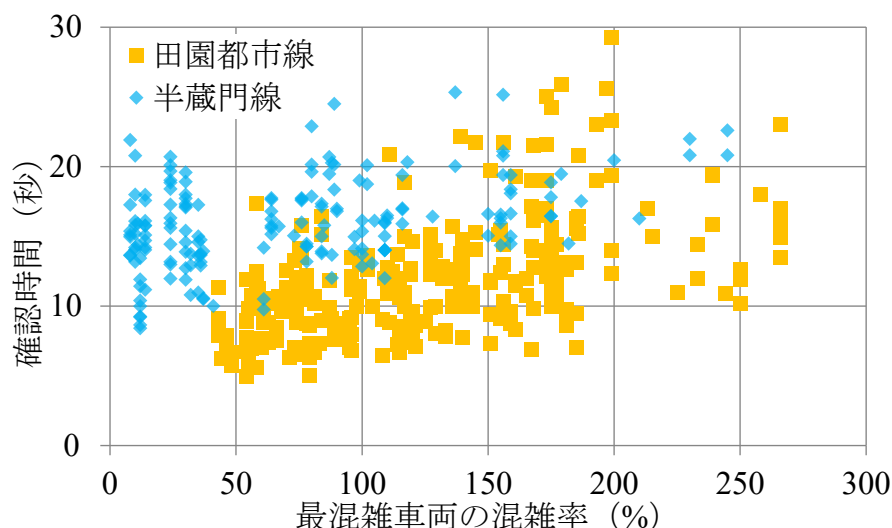


図 3.8: 確認時間調査結果

### 3.2.4 確認時間の集計結果

駅乗降行動が終了した後の確認時間については、既存研究においても大きく取り上げられていない。本研究では、現地調査から確認時間の計測を行った。対象は、田園都市線中央林間駅から半蔵門線押上駅のすべての駅で、ラッシュ時間帯に1駅あたり10本程度の列車を対象に閉扉後から発車までの時間を計測した。その結果が図3.8である。この図は、横軸に確認時間を取り、縦軸は同時間帯・同一種別の列車混雑率を取っている。ラベルで路線を分けている。この調査から得られたこととして：(1) 混雑率が高いほど確認時間が長くなる傾向がある；(2) 田園都市線と半蔵門線では混雑率が低い時間帯でのプロットに差がある；ことが明らかになった。混雑率が高い場合、駅員による押し込みや扉の再開閉による時間がかかるためであり、路線による違いは確認合図の手順やそのときの乗務員の立ち位置が鉄道事業者によって異なるためである。モデル化にあたっては、混雑率と路線によって確認時間が変化させるものとする。

### 3.2.5 突発的な遅延発生の集計結果と運転整理範囲

鉄道では突発的なトラブルにより遅延が発生することがある。それは人身事故のような運転見合わせになる程度のものから、扉に物が挟まるような軽微なものまでである。本研究では、運転見合わせや列車順序変更の伴わない軽微なトラブルに関して、その発生原因やトラブル発生後の運転指令による運転間隔調整を目的とした運転整理について分析する。

使用したデータは運行実績データと遅延実績データである。まず遅延実績データから突

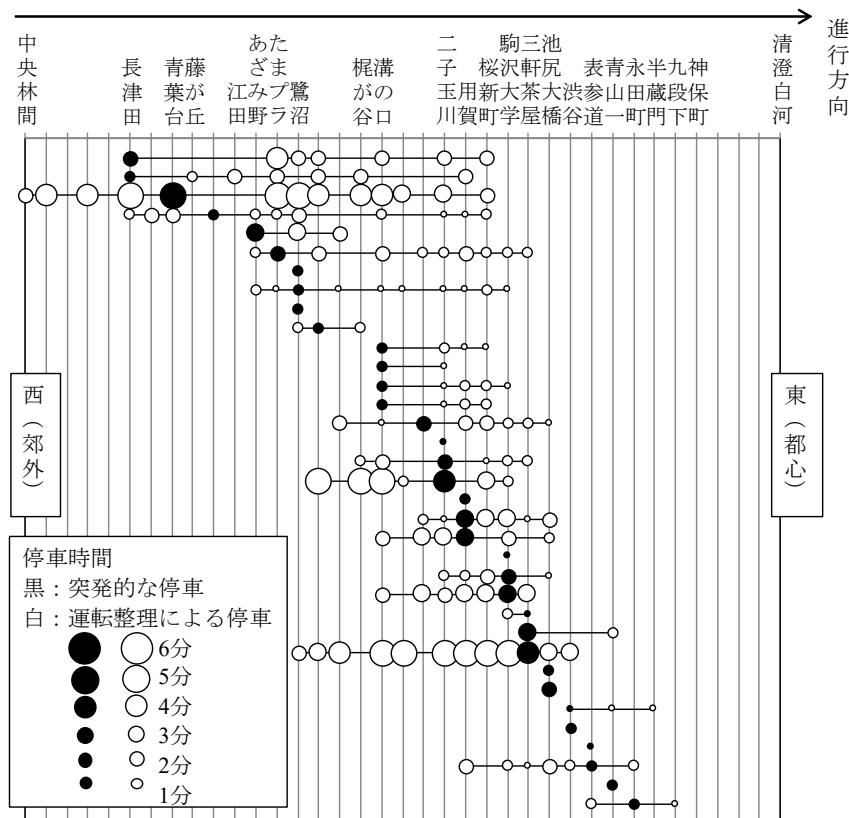


図 3.9: 突発的な停車と長時間停車の範囲

発的なトラブルが発生した列車を特定する。その後運行実績データからトラブル発生直後にトラブル発生駅の周辺において所定のダイヤよりも長い停車をしていた列車を抽出する。本研究ではしきい値は60秒とし、突発的なトラブルが起きた列車と直後に長時間の停車をしていた列車とを関連付けた。その結果が図3.9である。図は横軸に駅をとり、縦軸は突発的なトラブルの発生駅と長時間停車した範囲を示しており、それぞれは独立である。図中の黒い丸が遅延実績データに記載のあったトラブル、白い丸が長時間停車である。平日20日間のデータによって突発的なトラブルは合計35件抽出できた。モデル化に際しては、今回抽出した白い丸を運転司令による運転整理範囲と定義し、発生駅やトラブルの規模から運転整理範囲を決定するルールを設定する。

### 3.3 シミュレーションシステムの入出力関係

システムは図3.10に示すように5つのサブモデルから構成されている。走行時間推計サブモデルは実路線と同じ位置に駅や信号、勾配を配置して列車の駅間走行を再現したモデルであり、乗降時間推計サブモデルは列車の最混雑扉の旅客の乗降行動を再現したモデル

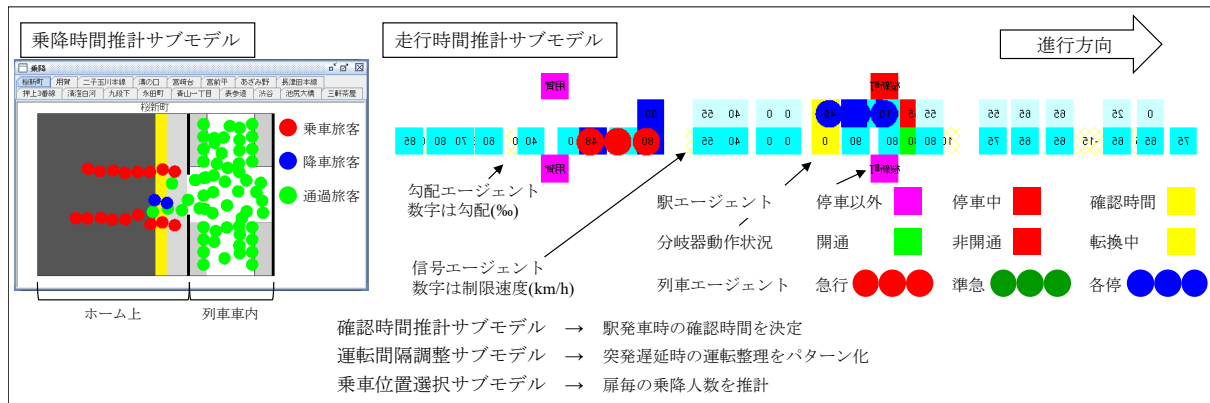


図 3.10: シミュレーションシステムの構成

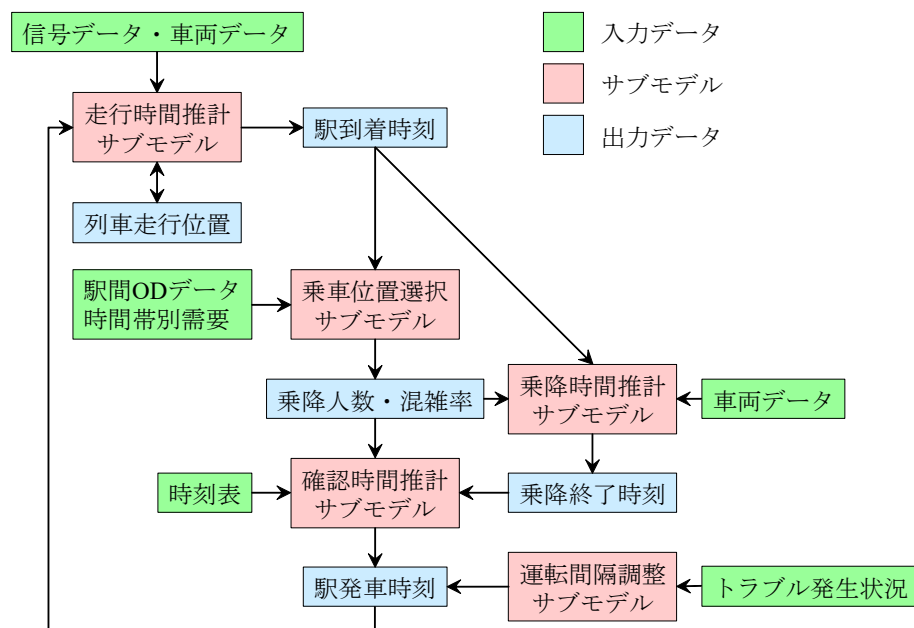


図 3.11: モデルの入出力関係

である。確認時間推計サブモデルは閉扉から発車までの確認作業を再現したモデルである。運転間隔調整サブモデルは、突発的なトラブルにより長時間の停車が発生した場合に、周辺列車に対して運転整理を行うモデルである。乗車位置選択サブモデルは、乗降時間推計モデルで生成する旅客エージェント数を決定するため、乗車旅客の乗車扉選択行動を駅構造等からモデル化したものであり、階段増設等のホーム構造の変化に伴う乗降位置の分散効果を評価することができる。サブモデル間の入出力関係を図 3.11 に示す。

## 3.4 駅間走行時間推計のための走行時間推計モデルの構築

### 3.4.1 モデルの概要

このモデルは、路線の線形情報（ATC 信号、分岐情報）と車両性能、発着時刻表を入力し、各駅の列車発着時刻を出力する。システム内では、列車位置を運動方程式に従い、速度と加減速度によって次に時刻（0.2 秒後）の位置を計算する。加減速の判断は列車速度と制限速度、次の停車位置までの距離をもとに判断させている。ルール構築に際しては、東急電鉄の運転曲線作成基準や吉武<sup>54)</sup>の運転曲線の作成方法を参考とした。運転曲線とは列車位置と速度の関係を表した曲線で、主に運転ダイヤの作成に用いる。

本研究で用いた諸条件を表 3.2 に示す。車両は東急 8500 系をモデルとした。対象路線のなかでも登場してからの年数が長く、最新車両よりも加速力で劣っている。最も水準の低い車両をモデルとすることで、運用上どの車両が充てられたとしても運行可能となるためこのような設定とした。列車減速度は一律で 3.3km/h/s とする。非常ブレーキを除いた常用最大減速度が 3.5km/h/s であるため、強めの減速度となっている。実際には乗務員による乗り心地を考慮した緩やかな減速もおこなわれているが、細かな加減速操作は模擬できないため本研究では 3.3km/h/s を採用した。分岐転換時間とは、分岐器の向きを変えるのに要する時間である。20 秒という値はヒアリング調査と現地調査結果から採用している。この間は分岐器のある閉そくへの列車の進入を禁じる。計算ピッチは 0.2 秒としている。速度 90km/h のとき 5m/0.2s で進むことになり、万が一停止位置を過走しないためにこの計算ピッチから 5m の停止位置誤差を確保している。列車抵抗には勾配抵抗、曲線抵抗、トンネル抵抗、出発抵抗とあるが、本研究では影響の大きな勾配抵抗と曲線抵抗のみを考慮する。

各速度における加減速度の関係と、勾配値と加減速度への関係を示したのが図 3.12 である。勾配抵抗が加減速に与える影響は、例えば 2km/h/s の加速度（図 3.12 の場合約 65km/h）のときに 10 パーミルの上り勾配があると加速度は約 16% 減少する。曲線抵抗  $r_c$  は吉武<sup>54)</sup>より  $r_c = \frac{800}{r}$  で求められ（ $r$  は曲線半径）、 $r = 800(\text{m})$  のとき 1 パーミルの勾配抵抗と等価である。加速を停止する速度とは、制限速度に近づいたときに加速を止め加減速を行わない惰行状態に入る速度である。本研究では運転曲線作成基準から（制限速度-3km/h）とし、同様に制限速度と列車速度との差が開いたときにおこなう再加速の境界点は（制限速度-10km/h）とした。

機外停止とは先行列車に接近したことにより駅間で列車が停止することを指し、機外停止から列車運転を再開するときに乗務員による確認作業や利用者へのアナウンスに要する

表 3.2: 走行モデルの入力変数

項目	設定内容	詳細
モデル車種	東急8500系	対象路線で引張力が低い車両
列車長	200m	対象路線に合わせ20m× 10両編成
列車減速度	3.3km/h/s	固定値を採用
列車加速度	図を参照	速度によって変化
計算ピッチ	0.2秒	
分岐転換時間	20秒	現地調査やヒアリング調査から入力
駅停止位置誤差	5m	
列車抵抗	勾配抵抗と曲線抵抗	トンネル抵抗は考慮しない
加速を停止する速度	(制限速度-3(km/h))	運転曲線作成基準より
再加速を開始する速度	(制限速度-10(km/h))	
機外停止後の加速時確認時間	5秒	機外停止：駅間で列車が止まること
走行調整時間（田園都市線）	10秒	シミュレーションと実運行の補正值,
走行調整時間（半蔵門線）	5秒	駅発車時に与える

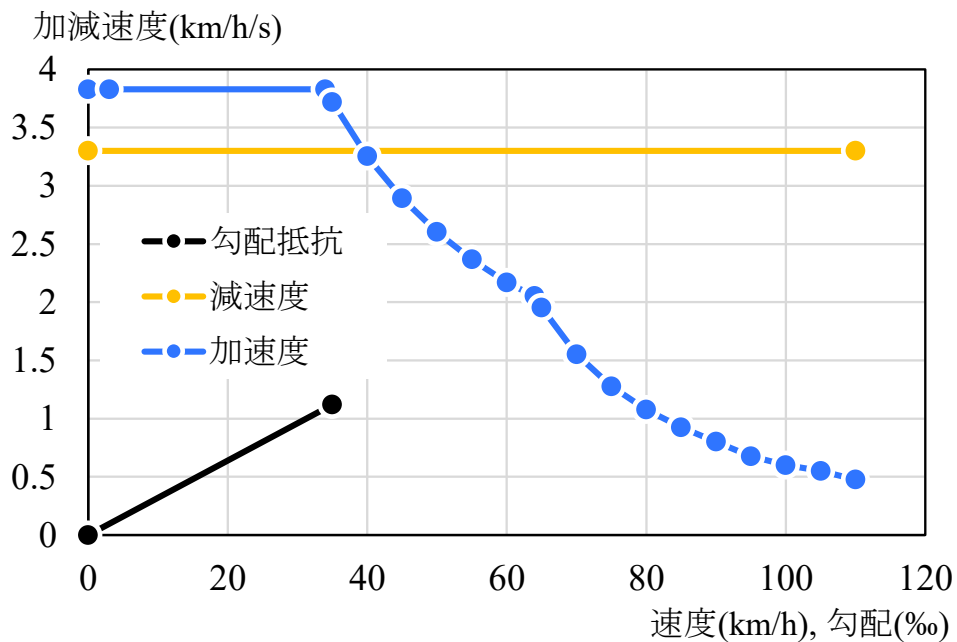


図 3.12: 速度・勾配と加減速度の関係

時間があり，本研究ではヒアリング調査から5秒を与えた．

走行調整時間は後述するが，実運行をシミュレーションで再現させた場合に生じる誤差に対する補正值である．

### 3.4.2 列車の行動ルール

まずエージェントの配置をおこなう．列車エージェントは各始発駅に配置する．ただしシミュレーションを開始する5:57時点で始発駅を出発済みの列車は，時刻表で5:57以降に発車する駅に配置する．駅や勾配，ATC信号エージェントは，信号コード表等を基に路線上に配置する．列車走行のルールは次のとおりである．

**Rule1:** ATC信号エージェントは閉そく区間内の列車在線の有無を調べる．

**Rule2:** 閉そく区間の制限速度を決定する．信号コード表から制限速度決定に影響する閉そく範囲のうち最も遠い前方16個の閉そくの列車在線状況を調べ，いずれかに列車が在線しているときには該当する閉そくに対応した制限速度とし，在線していない場合には閉そく区間の最高速度を制限速度とする．

**Rule3:** 停車駅までの距離  $D_{sta}$  と列車減速度  $a_{dcc}$ ，列車の速度  $V_0$  から式(3.1)を満たす場合には減速をおこなう．

$$D_{sta} < \frac{V_0^2}{2a_{dcc}} \quad (3.1)$$

**Rule4:** 停車駅に接近していない場合の加減速判定は，運転曲線の作成基準を参考に列車速度と制限速度を比較し，(制限速度-列車速度)が3km/h未満の場合は減速，(制限速度-列車速度)が3km/h以上10km/h未満の場合は惰行，10km/h以上の場合は加速をする．

**Rule5:** 1step(0.2秒)後の列車速度  $V_t$  は列車加速度  $a_{acc}$ ，列車減速度  $a_{dcc}$ ，勾配  $i$ (パーミル)を考慮し式(3.2)によりおこなう．

$$V_t = \begin{cases} V_0 + (a_{acc} - 0.035i)t & \text{加速のとき} \\ V_0 + (-0.035i)t & \text{惰行のとき} \\ V_0 + (a_{dcc} - 0.035i)t & \text{減速のとき} \end{cases} \quad (3.2)$$

列車加速度  $a_{acc}$  は東急8500系の引張力曲線を参考に決定し，列車減速度  $a_{dcc}$  は速度に依らず一律3.3km/h/sとする．また，勾配は列車長によって複数区間にまたがることもあるため，各区間の勾配の列車長分の平均とする．勾配による加減速度への影響は図3.12で示した通りである．

**Rule6:** 列車エージェントが停車駅の駅停止位置  $\pm 5\text{m}$  で停止した場合、列車の到着と判定して後述する乗降時間推計モデルを起動させる。

**Rule7:** 運転ダイヤの発車時刻を過ぎ、旅客の乗降行動と後述する確認時間が経過したうえで、在線する閉そくの制限速度が  $0\text{km/h}$  より大きい場合、列車エージェントを駅から出発させる。

駅間に列車が停車（機外停車）した場合の再加速には、運転士の確認作業や、車掌のアナウンス等に要する時間として、制限速度が  $0\text{km/h}$  より大きくなった時点から 5 秒間は加速をせずその場に待機する。また、分岐器の転換が必要な場合、分岐のある閉そくを列車が通過してから 20 秒間は分岐器転換時間として、分岐器のある閉そくの信号現示を  $0\text{km/h}$  とする。

この走行時間推計モデルを用いて、駅間走行時間の再現をおこなうと、実績値と比較した場合に過小推計する傾向がある。これは、乗り心地を考慮した運転士の緩やかな加減速操作や、制限速度を認知してから加減速をおこなうまでの時間が考慮できていないことが要因として挙げられる。本研究では、走行時間推計モデルで表現できない運転ルールを、走行調整時間として考慮する。走行調整時間は、列車エージェントが駅発車時に加速を行わない時間として与え、実績値との比較から田園都市線は 10 秒間、半蔵門線は 5 秒間とした。設定にあたっては、列車間隔の開いている 6:00 前後の列車を対象に走行時間推計モデルだけを実行し、実績値より早着した時間を求め平均的な値を路線別に与えた。

### 3.4.3 モデルの再現性の検証

運行実績データとその補正值から、全ての駅での発車時刻を外生としてシミュレーションを実行した。長津田―清澄白河間の走行時間の残差 RMS は 8.16 秒であり、高い精度で推計できた。渋谷駅を 6:30 から 9:45 の間に通過する全列車の各駅到着時刻の残差 RMS を図 3.13 に示す。図の色付きプロットが、平均残差 RMS を種別ごとにプロットしたものである。箱ひげ図は各駅停車の残差 RMS の最大値、最小値並びに四分位範囲を示している。駅間での走行時間の残差は概ね 10 秒以下という結果となった。

残差 RMS の平均値の大きな区間が存在する要因として、実績データは鷺沼―溝の口間や三軒茶屋駅付近で ATC 信号の最高速度まで加速していないこと、長津田駅や清澄白河駅、押上駅は、出入庫や折り返し列車の影響を受けている。種別による違いを見ると、急行列

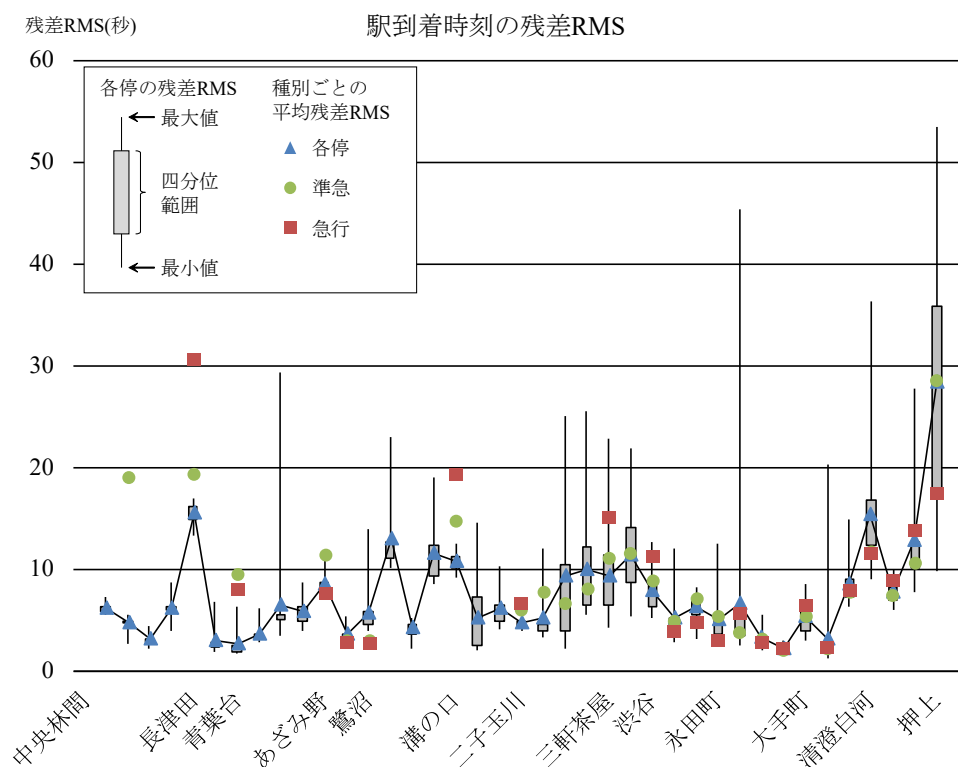


図 3.13: 駅間走行時間の残差 RMS

車のほうが到着時の残差が大きい。これは停車駅が少なく、次に停車する駅までの距離が長いためである。また、残差 RMS の最大値が大きな区間が散見されるが、これは表 3.1 の遅延実績データに記載のない、かつ、駅間走行時に非常停止等の突発的な事象が発生し、駅間で列車が緊急に停車したためであると考えられる。ただし、列車到着にずれが生じた明確な理由については不明であるため、仮に駅到着時刻の実績値と推計値で 30 秒以上の差が生じていたサンプルを除いて計算した場合、長津田ー清澄白河間の走行時間の残差 RMS は上述の 8.16 秒から 6.23 秒となる。

ATC 信号の最高速度まで加速しない運転は、乗り心地の面から乗務員が日常的におこなっていることは東急電鉄へのヒアリング調査でも明らかになっている。加えて乗務員はとある地点での ATC 信号から、先行列車の走行位置を経験的に予測することができる。このような経験に基づく運転操作のモデル化は難しく、本研究では代替的に走行調整時間を導入することで誤差の発生を抑制させている。精度向上に向けては、乗務員の認知にかかる時間を考慮した加減速操作ルールや、乗務員の加減速判断のノウハウをルール化して記述するなど余地はあるが、都心部では駅間走行時間をおおむね 10 秒以下で推計できていることも鑑み提案したモデルで分析をおこなう。



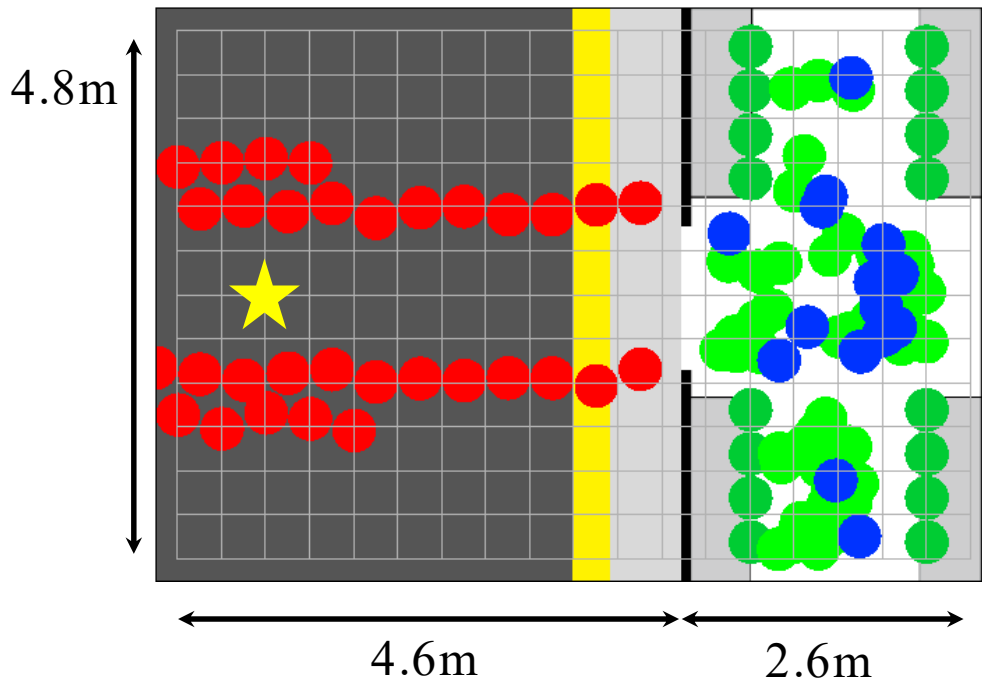


図 3.14: 乗降時間推計モデルの再現範囲

### 3.5 旅客流動を考慮した乗降時間推計モデルの構築

#### 3.5.1 モデルの概要

東京圏の鉄道の遅延発生原因ともいえる駅での乗降行動を、旅客1人1人をエージェントとして周辺の乗客や車両の構造の環境に応じて自身の歩行する向きや速度を決定するモデルを構築する。東京圏での駅での乗降行動に関する基礎的な集計は3.2.2で示した。ラッシュ時間帯の501人を対象とした分析による知見は：(1)男女や携帯電話所持等の属性によって歩行速度が変化する；(2)9割以上の人々の歩行速度は100cm/s以下である；(3)携帯電話や雑誌等を見ながら行動する“ながら歩き”の人々は直前を歩く人よりも歩行速度が遅い；(4)混雑率が高くなるにつれて歩行速度分布が遅くなる；である。

本節では歩行者の行動実態と簡易な歩行モデルを組み合わせ、エージェントベースの乗降時間推計モデルを構築する。まず分析条件の整理をする。エージェントモデルで表現する範囲は、最混雑扉の1扉の車内と扉付近のホーム上の $4.8 \times 7.2(\text{m})$ の領域とする（図3.14参照）。最混雑扉に限定した理由は、最混雑扉が乗降に最も時間がかかり停車時間に直接的に影響を及ぼすという仮定のもと設定している。最混雑扉以外での乗降旅客の挙動については再現対象としないため、ホーム上での旅客の交錯は再現できない。本モデルは所定の乗降人数と混雑率が与えられたときに乗降時間を返すものである。与件とする乗降人数と混

雑率は、時間帯別の駅利用者数、先行列車が発車してからの経過時間、そして後述する乗車位置選択モデルの3つによって決定される。利用者数と経過時間を用いて総乗車人数が決まり、それを乗車位置選択モデルによって扉別に配分していく。乗車時に降車駅情報も付加することで、車両内部の混雑と降車人数も与えられる。対象路線は10編成で各車両4扉の計40扉存在するため、この中から最混雑扉の特定化が必要であるが、その手法は現況再現性の部分で説明する。

旅客の属性は乗降行動の座標データの分析結果を参考に男女比は7:3とし、“ながら歩き”をする人は全体の10%とした。

### 3.5.2 旅客の行動ルール

列車が駅に到着すると、乗降行動を再現する扉の乗降人数と混雑率に応じて、乗車旅客エージェント（本節は以下乗車旅客とする）をホーム上に発生させ、降車旅客エージェント（本節は以下降車旅客とする）と通過旅客エージェント（本節は以下通過旅客とする）を車内に発生させる。乗車旅客は車両の扉幅(車両諸元から1300mmを設定)より外側に4列で整列する。降車旅客と通過旅客の発生位置は扉付近に全体の7割、つり革前に残りの3割をランダムに配置する。なお、車内の移動軌跡データが存在しないため、旅客の発生位置は数ケース検討し最もシミュレーション結果の良好だったものを採用した。旅客の行動ルールは次のとおりに決定した。旅客が他者を認知し行動の有無や振り向く角度などを決定する基本的動作については、本研究と同じエージェントモデルで歩行者行動を記述している兼田<sup>55)</sup>を参考とした。

**Rule1:** すべての旅客は、自身のエージェント(本節は以下自身とする)の周囲の旅客数を計測する。計測方法は前方180度を30度ごと7分割し、それぞれの方向に対して20cmから200cmまで20cm刻みに前方の他の旅客数をカウントする。20cm刻みとしたのは、個人のパーソナルスペースの分類やシミュレーションの計算負荷を踏まえて決定した。

**Rule2:** 歩行速度の初期値は0cm/sとし、0.2秒ごとに6cm/sから14cm/sの間を一様乱数で速度を増加させる。乗車旅客の歩行速度の上限値は100cm/sとする。一方で降車旅客の歩行速度の最大値は50cm/sとする。これは乗降行動の位置座標データから得られた歩行速度分布をもとに設定した。旅客の属性はホーム上ビデオ映像の位置座標の実測調査の結果から男性を7割、女性を3割とし、携帯端末を操作しながら乗降行動をおこ

なう“ながら乗車”は全体の1割とした。女性の初速度は男性を1とすると0.9倍で与え，“ながら乗車”を行う利用者の加速度は通常の46%とする。

**Rule3:** すべての周囲20cm以内に他の旅客が存在する場合には、他のエージェントへの衝突を避けるため利用者の歩行速度を0cm/sにする。

**Rule4:** 降車旅客は、Rule1でカウントした最も旅客の少ない方向を向き、Rule2で決定した速度によって前進させる。このとき自身が向かう目的先は、まず開扉した扉を目指し、次に扉から車両に対して垂直方向かつ車両から離れる方向に4mの地点を目指す。図3.14に示した星の箇所が該地点である。降車旅客が乗車旅客と交錯させないように、ここではホーム上の4mの位置を目的地として設定した。

**Rule5:** 通過旅客は、目的地は設定せず、Rule1でカウントした最も旅客の少ない方向を向き、Rule2で決定した速度によって前進させる。このとき自身が扉の外に出た場合には再乗車エージェント（本節は以下再乗車旅客とする）に変化し、すべての降車旅客が降車するまでホーム上の扉付近に滞留する。

**Rule6:** 乗車旅客と再乗車旅客は、すべての降車旅客が扉の外に出たことを確認した後、車内に向けて行動を開始する。

**Rule7:** 乗車旅客と再乗車旅客の車内での目的先は、乗車した扉付近、車内奥、反対側の扉付近の3つの中から最も旅客数の少ない方向とする。結果的に車内旅客配置は、旅客同士の距離が一定になるように調整される。

**Rule8:** 旅客同士の押し込みがある場合には0.2秒ごとに速度30cm/sで乗車行動を行う。乗車旅客の移動軌跡データから混雑車両への押し込み行動をしているサンプルのみ抽出した結果からこの値を採用した。押し込み行動は扉付近の自身の周囲20cm以内に他の旅客が存在する場合に発生する。

なお、非常に混雑している車両では稀に旅客が車内で互いに重なり合い、身動きが取れない事象が発生する。現地調査にて複数の降車人数や混雑率の駅の降車行動を計測したが、降車行動に要する時間は40秒以下にそのほとんどが収まっていたため、降車開始から40秒を経過しても車内に降車旅客が存在していた場合、その時点で降車旅客を消失させ、乗降行動を開始させる。また、列車が終着駅に到着した場合、乗務員が車内から乗客が完全に

降りたことを確認するために必要な時間として、実際に筆者が清澄白河駅で計測した結果から45秒を最低停車時間として与える。

### 3.5.3 モデルの再現性の検証

構築した乗降時間推計モデルに乗降人数と混雑率を外生し再現性を確認する。ここでは、乗降人数と混雑率、乗降時間が明らかな78サンプルを用い、各ケース100回ずつシミュレーションを実行した。シミュレーションの平均値を推計値とし、実績値と比較したものが図3.15である。各プロットの大きさによって乗降人数の大小を、色で混雑率を表している。実績値と推計値の相関係数は0.82、残差RMSは4.6秒であった。実績値では混雑率や乗降人数の増加に伴って停車時間が長くなっており、推計値も45度線上におおむね分布していることから、高い精度で推計できているといえる。一部で過大・過小推計がみられるが、降車旅客と通過旅客の発生位置が不明であるためこのような誤差が生じたと考える。この課題について、車内行動の軌跡データを取得したうえで乗車旅客の車内行動を詳細に記述することで解決の可能性があるが、同一車両で大量の移動軌跡データの入手が困難であること、構築したモデルの他路線への汎用性が失われることが考えられる。そのため今回構築したモデルを採用する。

統合シミュレーションにおいては、複数の扉から最混雑扉の特定化をする必要がある。駅到着時に決定されるすべての扉の乗車人数と混雑率情報をもとに、乗降時間推計モデルでの期待乗降時間を重回帰モデル（式(3.3)）であらかじめ算出し、期待乗降時間が最も大きな扉の乗降行動を再現させる。

$$\text{期待乗降時間(秒)} = 0.941 * \text{乗車人数(人)} + 0.352 * \text{降車人数(人)} + 0.031 * \text{混雑率(\%)} + 7.099 \quad (3.3)$$

なおシミュレーションには歩行者の速度や向き等に乱数が含まれているため、期待乗降時間とシミュレーションで得られる乗降時間は一致しない。

## 3.6 駅発車時の確認時間推計モデルの構築

駅停車時の閉扉から列車の発車までの時間を推計するモデルである。対象路線全駅で現地調査を実施し確認時間を計測した結果、路線や混雑率により違いが見られた。路線により差が生じた理由は、車掌から運転士へ発車合図を送る際の、乗務員室のドア状態と車掌の立ち方に違いが生じたためである。混雑率による違いは、高混雑率ほど閉扉時に押し込み

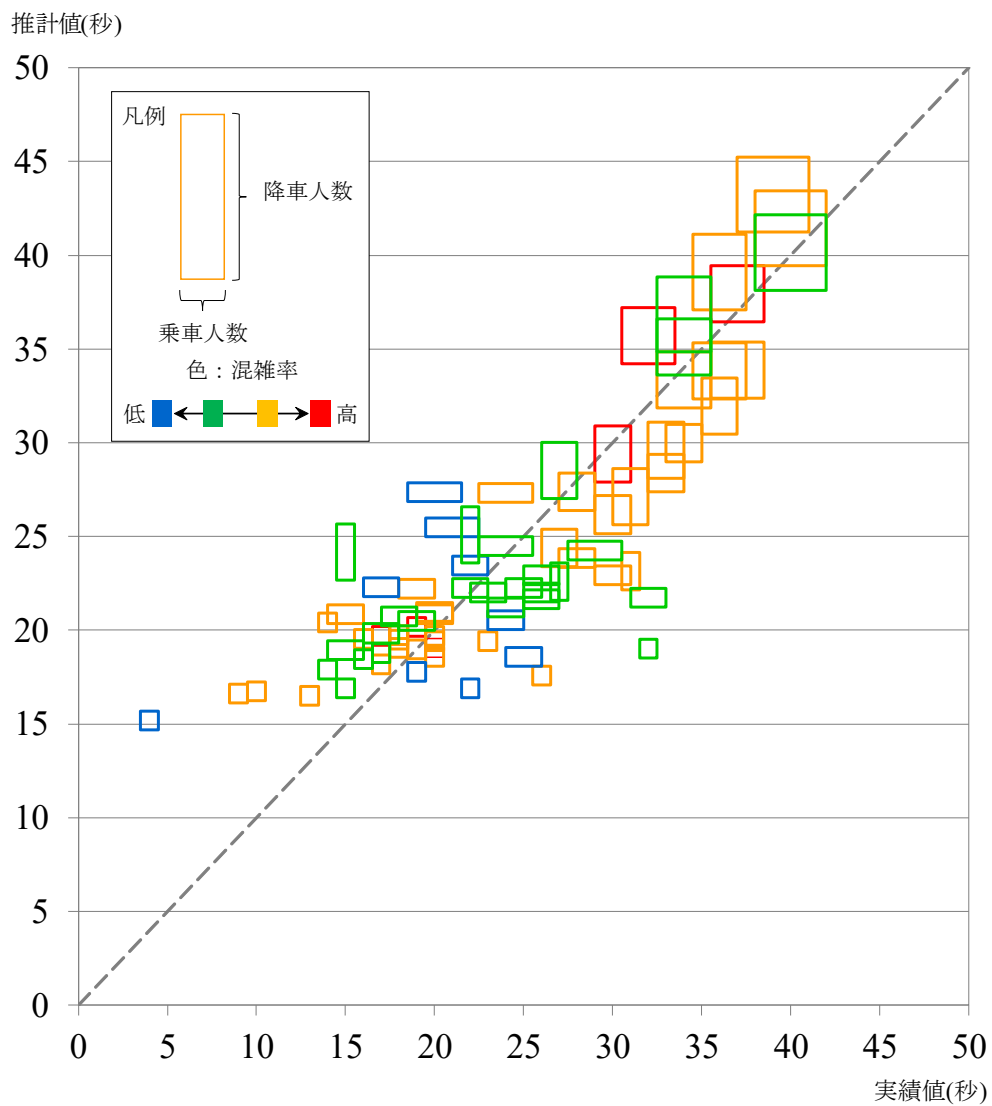


図 3.15: 乗降時間の実績値と推計値の比較

表 3.3: 確認時間の入力値

混雑率	田園都市線		半蔵門線	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
~49%	8.7	1.8	15.1	4.3
~99%	10.0	5.0	16.5	2.9
~149%	11.4	3.1	16.3	2.8
~199%	14.3	6.2	17.6	2.5
200%~	17.4	6.1	20.5	2.0

が生じ、車掌へ合図を送るまでの時間が長くなるためである。これら結果を踏まえて、シミュレーションでは、表 3.3 の平均と標準偏差を正規乱数に当てはめて算出している。

ただし、早朝時間帯は混雑率に関わらず確認時間が短い傾向がみられた。ホーム上で合図を送る駅員がおらず、車掌の安全確認のみで発車できるためと考えられる。そこで本研究では、当該時間帯の列車の確認時間は、最も混雑率の低い水準の平均と標準偏差の正規乱数を発生させる。

### 3.7 停車時間調整による運転整理モデル

突発的なトラブル発生以後の運転間隔整理のパターン化を行う。突発的な停車が発生すると列車間隔は非常に不均等になる。前方との列車間隔が開いた列車には多くの旅客が乗車しやすくなり、停車遅延が発生しやすい状況にある。運転指令は、前後の列車に対して運転間隔の均等化のために意図的に長時間停車をさせることがある。この運転整理をおこなう範囲のルール化を行い、その結果をシミュレーションに反映させる。

運転間隔調整モデル導入の理由は、突発的トラブルを含めた全ての長時間停車を与件とすると高い精度で現況再現可能であるが、遅延対策の感度の低下が懸念されるためである。

図 3.16 は突発的な停車発生直後に周辺列車で、所定の停車時間+60 秒以上の停車が発生している列車をプロットしたものである。図中の黒丸が突発的な停車が発生した当該列車であり、白丸が運転整理とみられる停車である。横軸方向に黒丸と白丸が繋がれた範囲が、ひとつの突発的な停車とその運転整理の範囲である。縦軸方向は、突発的な停車の発生駅順に並べたものであり、発生日時は独立である。

突発的な停車が中央林間に近い駅で発生すると、先行列車に対して運転整理をおこない、渋谷方の駅では後続列車への運転整理が散見される。また、渋谷駅をまたぐ運転整理は少

ない．また突発的な停車が発生した列車の停車時間が長いと，運転整理範囲が広いことを踏まえ，以下のルールを設定した．

**Rule1:** 発生駅がたまプラーザ駅以西の場合には，当該駅から用賀駅，桜新町駅，駒沢大学駅のいずれか(一様乱数により決定)の区間を走行する列車に対し運転整理を行う．突発的な停車によって5分以上停車する場合には4駅後ろまで走行中の列車に対して運転整理を行う．

**Rule2:** 発生駅が鷺沼駅以东の場合には，突発的な停車の規模が2分以上4分未満の場合には3～5駅先を走行する列車まで運転整理の指示をする．また4分以上の場合には2～6駅後ろの駅まで運転整理の指示を行う．

**Rule3:** 渋谷駅をまたぐ運転整理は多くないため捨象する．

**Rule4:** 運転整理を行う列車の停車時間は，突発的な停車が発生した列車の停車時間だけ停車させる．

上記ルールに従うと運転整理範囲は図 3.16 の赤破線の矢印になる．運転整理をおこなう範囲について，実績値と設定したルールとの比較をする．個々の突発的な停車の運転整理範囲した駅数をカウントした結果，相関係数は0.83，残差 RMS は2.28 駅となった．本研究では計 35 回の突発的な停車から4種類のルールを設定した．今回設定したルールのほかにも，突発的な停車の発生要因や発生時刻によって運転整理範囲は異なることが考えられるが，細分化に耐えうるサンプル数が確保できていないため本研究では考慮していない．

### 3.8 乗降人数決定のための乗車位置選択モデル

駅での停車時間を推計する手法は，3.5 の乗降時間推計モデルを用いることで高い精度で推計可能であることを示した．しかし，与えられる乗降人数や混雑率についての議論はなされていない．本節では，乗降時間推計モデルで表現する最混雑扉の乗降人数と混雑率を決定するため，利用者の乗車位置選択行動を記述する．

乗降分布は扉で一定ではなく駅構造に色濃く影響された形状をしていることは，乗降分布のデータの結果を用いて 3.2.3 で示している．3.2.3 で得た特徴的な示唆として：(1) 階段からの距離が乗降分布形状に影響しており，階段付近で乗降人数が多く，エスカレーターの設置状況でも分布形状は変化する．階段が乗車分布に与える影響度は乗車駅側で特に強く，

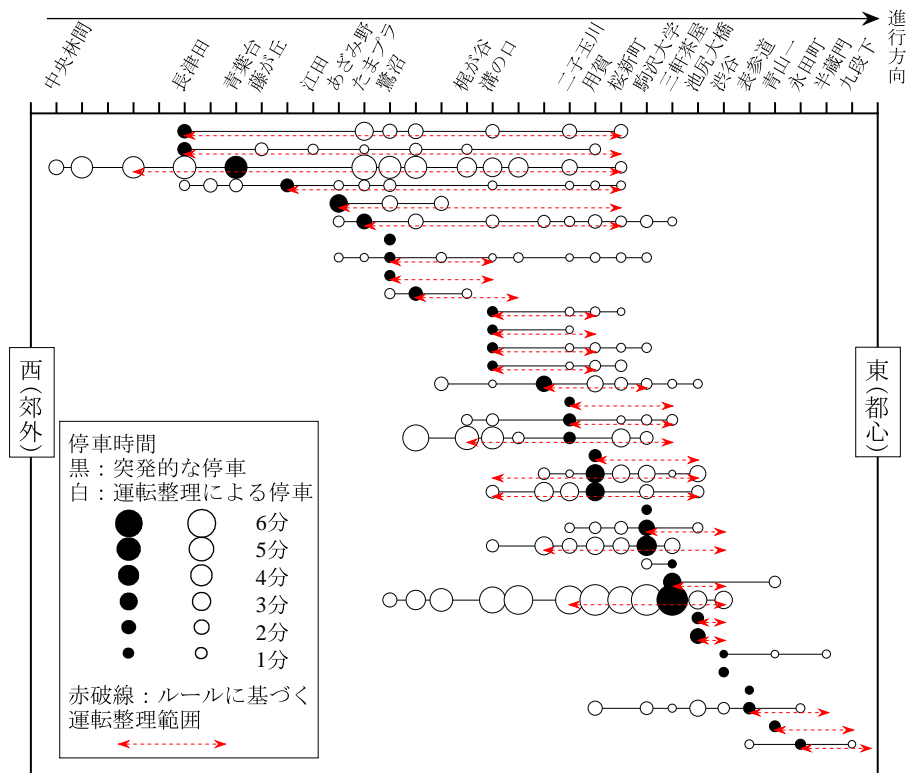


図 3.16: 突発的な停車と運転整理範囲

降車駅側でも傾向がみられる；(2) 狭隘部では待機可能な人数に制限が生じるため乗車人数は少なくなる；(3) 階段の先にある出発地・目的地によって階段の選択割合は変化する；などがあげられる。

全駅全扉の乗降分布とそのときの混雑率データが存在している場合には、実績の乗降分布を直接与えることが可能かもしれないが、本研究で取り扱う乗降量カウント調査には、主要駅の扉別乗降人数データと、それ以外の駅では階段付近でカウントした通過人数となっており、そのようなデータを取得していない。さらに、全駅全扉の調査は物理的には可能であるが調査負荷が大きく現実的とはいえず、モデルによって表現することが適当と考える。遅延対策の面からみると、乗降人数を駅構造を変数としたモデル化ができれば、乗降分布を伴う駅改良に後ほど統合するシミュレーションシステムで検討でき得られる成果は有益である。

本節では乗降時間推計モデルで与える乗降人数と混雑率を決定するために、利用者の乗車位置選択行動を記述する。使用したデータは乗降量カウント調査結果と階段・エスカレータの設置場所と接続する改札データ、大都市交通センサスから作成した駅間 OD 表である。



### 3.8.1 モデルの定式化

乗降人数と混雑率の推計および駅構造を改良した際の最混雑扉の特定のため、ランダム項にガンベル分布を仮定した多項ロジットモデルを構築する。選択対象は乗車扉とし、選択肢数は40である。本研究では利用者に関し以下の仮定をしている。

- 乗車駅と降車駅の構造を十分把握し、最も効用の高い乗車扉を選択する。
- 使用可能な昇降設備は階段とエスカレータとし、利用割合の低いエレベータは考慮しない。
- ホーム上到達時から発車までに移動可能な全て扉を選択肢集合とし乗車扉の選択をおこなうこととする。
- ホーム上の歩行速度は一定とする。つまりホーム上混雑によって乗車可能な扉に制約が生じないことを仮定し、列車発車までの時間だけで到達可能な扉を決定できるようにしている。
- 乗車扉を選択した利用者は降車駅で同じ扉から降車するとし、駅間での車両内での移動や車両間移動は考慮しない。従って乗車扉を選択することで、間接的に降車駅での降車人数とそのときの混雑率も併せて推計が可能となる。
- 各扉から降車した旅客は最寄りの階段のみを使用する。これは、乗降扉と利用する昇降設備との関係性を示すデータがないことと、利用者の昇降設備選択行動を記述しないことに起因した仮定である。
- 列車の混雑率を考慮した乗車位置選択をしない。

上記条件のもと駅構造を説明変数に取ったモデル構築を行う。駅間  $ij$  間を移動する利用者が列車  $c$  の扉  $k$  を選択する際の効用関数を式 (3.4) とする。

$$\begin{aligned} V_{ijk} = & \theta_1 D_r + \theta_2 ES_{rdn} + \theta_3 ES_{rup} + \theta_4 B_r \theta_5 N_r \\ & + \theta_6 S_r + \theta_7 D_d + \theta_8 ES_{ddn} + \theta_9 ES_{dup} + \theta_{10} S_d \end{aligned} \quad (3.4)$$

$D$ : 階段から乗車扉までの距離 (m)

$ES$ : エスカレータ有無ダミー

$B$ : 階段の裏側ダミー

$N$ : ホーム狭幅員ダミー

S:階段利用率

r:乗車駅を示す添え字

d:降車駅を示す添え字

up:上りエスカレータを示す添え字．乗車駅はコンコースからホームへ上りエスカレータが存在すれば1となり，降車駅はホームからコンコースへの上りエスカレータが存在すれば1となる

dn:下りエスカレータを示す添え字

$\theta_1 \sim \theta_{10}$ :パラメータ

効用関数式(3.4)の説明変数の設定根拠は3.2.3の結果に基づき，乗車位置選択に影響しそうな要素を抽出した．エスカレータの有無は，最寄りの階段に利用可能なエスカレータが存在した場合に1，そうでないとき0を返す．階段裏側ダミーとホーム狭幅員ダミーは該当する扉に1を返す．エスカレータを上りと下りで分けた理由は，上り階段と下り階段では上り階段のほうが抵抗感が強いことは知られており，その影響でエスカレータの選好性が変化すると考えたためである．

個人の扉選択に関する非集計データが存在しないため，式(3.4)のパラメータを集計ロジットモデルにて推定する．ここで利用者はホーム上に現れた時刻 $t$ で到達可能な範囲で乗車位置選択行動をおこなう．時刻 $t$ における利用者の発生割合を考慮すると，乗車駅 $i$ ，降車駅 $j$ の利用者が列車 $c$ の扉 $k$ を利用する確率 $P_{ijck}$ は以下のように表すことができる．

$$P_{ijck} = \sum_t (P_{ijckt} \times q_t) \quad (3.5)$$

$$P_{ijckt} = \frac{e^{V_{ijck}} \times WA_{ickt}}{\sum_t (e^{V_{ijck}} \times WA_{ickt})} \quad (3.6)$$

$q_t$ :列車到着までの時間 $t$ に発生する利用者の割合（時刻を15秒ごとに20分割し2分30秒前を最大とする正規分布を仮定）

$WA_{ickt}$ :乗車駅 $i$ で時刻 $t$ に発生した利用者が列車 $c$ の扉 $k$ への到達可否

$q_t$ を正規分布としたのは，一様分布や指数分布などの分布を試した結果，正規分布の推定結果がもっとも良好であったためである．本研究で取り扱う最小のデータ単位は扉ごとの乗車人数であり，駅 $ij$ 間を移動した個々の行動は把握できないため確率 $p_{ijck}$ をOD交通量で重み付けし，乗車駅 $i$ での扉 $k$ を選ぶ確率 $P_{ick}$ は式(3.7)，降車駅 $j$ での扉 $k$ を選ぶ確率 $P_{jck}$ は式(3.8)のように記述する．

$$P_{ick} = \sum_j P_{ijck} \times \frac{OD_{ij}}{OD_i} \quad (3.7)$$

$$P_{jck} = \sum_i P_{ijck} \times \frac{OD_{ij}}{OD_j} \quad (3.8)$$

$OD_i$ :乗車駅  $i$  での発生交通量

$OD_{ij}$ :駅間  $ij$  の分布交通量

乗車駅での扉の選択確率は式 (3.7) にて示した．尤度関数は式 (3.9) に示す通り，乗車駅  $i$  に関する項と降車駅  $j$  に関する 2 つの項とすることで，降車駅の選好を考慮した．

$$\ln L = \sum_i \sum_k \ln P_{ick} \times S_{ick} + \sum_j \sum_k \ln P_{jck} \times S_{jck} \quad (3.9)$$

$S_{ick}$ :乗車駅  $i$ ，列車  $c$ ，扉  $k$  での実乗車人数

$S_{jck}$ :降車駅  $j$ ，列車  $c$ ，扉  $k$  での実乗車人数

### 3.8.2 パラメータ推定結果

データの存在する田園都市線内の主要駅間の全 301 サンプルで推定した効用関数の各パラメータを表 3.4 に示す．選択肢数は 40，推定に用いたソフトウェアは R である．全てパラメータの符号の整合が取れ，t 値が 1% 有意となった．乗車駅と降車駅の距離に関するパラメータを比較すると乗車駅のほうが負に大きく影響が強い．実際の乗車旅客の乗車分布として，乗車駅の階段付近に利用者が集中していることが原因である．乗降人数の実績値と推計値を比較した結果，相関係数は 0.85 以上であり，概ね各扉の乗降人数を再現できている．ただしこのモデルは田園都市線の扉別乗降人数を用いて構築したモデルであり，他地域に適用する際には路線に応じたモデリングが必要である．

### 3.8.3 モデルの再現性の検証

推定したパラメータを用い乗車分布と降車分布を描いたのが図 3.17，図 3.18 である．図 3.17 は溝の口駅における乗車人数分布であり，四分位範囲に 93% 入っている．図 3.18 は二子玉川駅での降車人数分布であり，四分位範囲に 70% 入っている．図 3.18 の降車分布では連続的に降車人数を過大に推計している箇所が見られる．これは，扉単位で変化する変数が  $RD$  と  $DD$  に限られていること，その他の変数が最寄りの階段で共通となっており，パラメータ

表 3.4: 乗車位置選択モデルのパラメータ

説明変数		パラメータ	t値
乗車 駅	01 距離(m)	-0.013	-75.9
	02 下りES	0.222	23.4
	03 上りES	0.328	41.8
	04 裏側	-0.133	-16.6
	05 狭い	-0.089	-9.1
	06 階段利用率	0.652	22.0
降車 駅	07 距離(m)	-0.0013	-12.7
	08 下りES	-0.148	-7.0
	09 上りES	-0.097	-4.7
	010 階段利用率	1.172	20.1
乗車駅重相関係数		0.849	
降車駅重相関係数		0.888	
サンプル数		301	

推定を行った駅間で当該区間に階段が設置されていないため変化が見られないことが要因と考えられる。

パラメータ推定で用いた全列車全扉の乗降人数の実績値と推計値をプロットしたのが図 3.19 と図 3.20 である。それぞれの図中に各駅の実績値と推計値の相関係数を記載している。乗車人数は 45 度線に近いところに分布し各駅の相関係数も 0.8 を超えている。一方で降車人数は実績値が多い扉では過小推計の傾向が見られる。これは *RD* と *DD* のパラメータの大小関係により、降車旅客の多い扉の人数を推計できないためと考えられる。図 3.19 と図 3.20 に着目すると、いずれも実績値が 10 人以上かつ推計値が 5 人以下のプロットが複数みられる。これらの扉は乗車駅および降車駅の階段から遠く離れた同一列車、同一扉であるが乗降数が多い。すなわち団体旅客など定期利用でない旅客の集中乗車による可能性が考えられる。ただし、通勤時間帯においてこのような利用者の割合は少ないと判断し、本研究では特別な考慮はおこなわない。

### 3.9 統合モデルを用いた列車運行の現況再現性の検証

#### 3.9.1 実行条件と再現性評価のための評価項目の検討

3.4 から 3.8 節までのモデルを統合し、シミュレーションを行い現況再現性を確認する。現況再現性には 2014 年 7 月 22 日から 11 月 14 日の期間内で、突発的なトラブルによる列車順序の変更のない平日 20 日間の運行をシミュレーションした。現況再現並びに以後の遅延対策の検討に際して、下記の 2 項目を与件としシミュレーションを実行した。1 つ目は、突

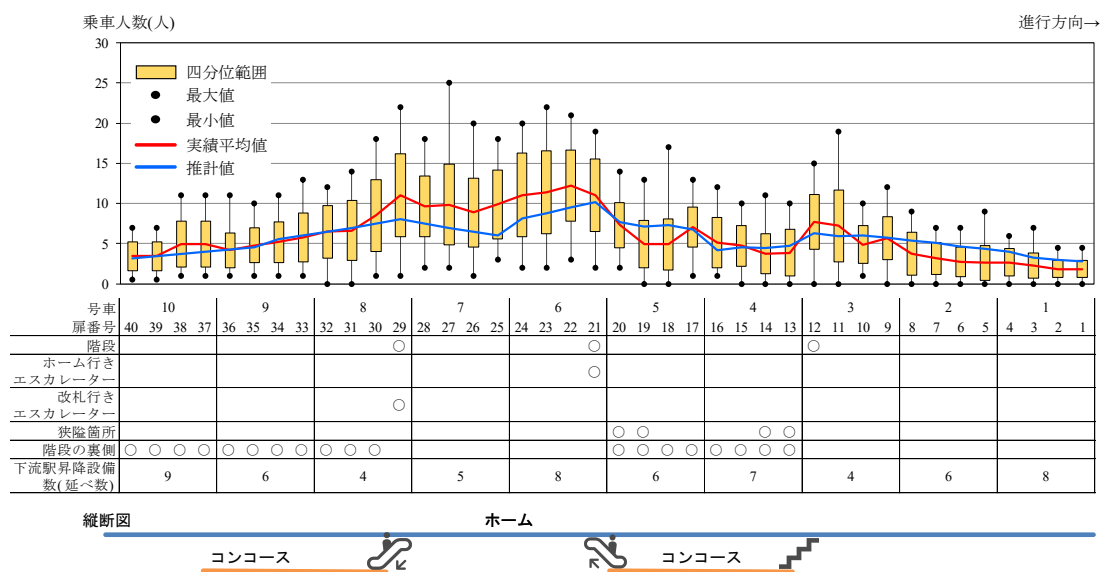


図 3.17: 溝の口駅乗車分布

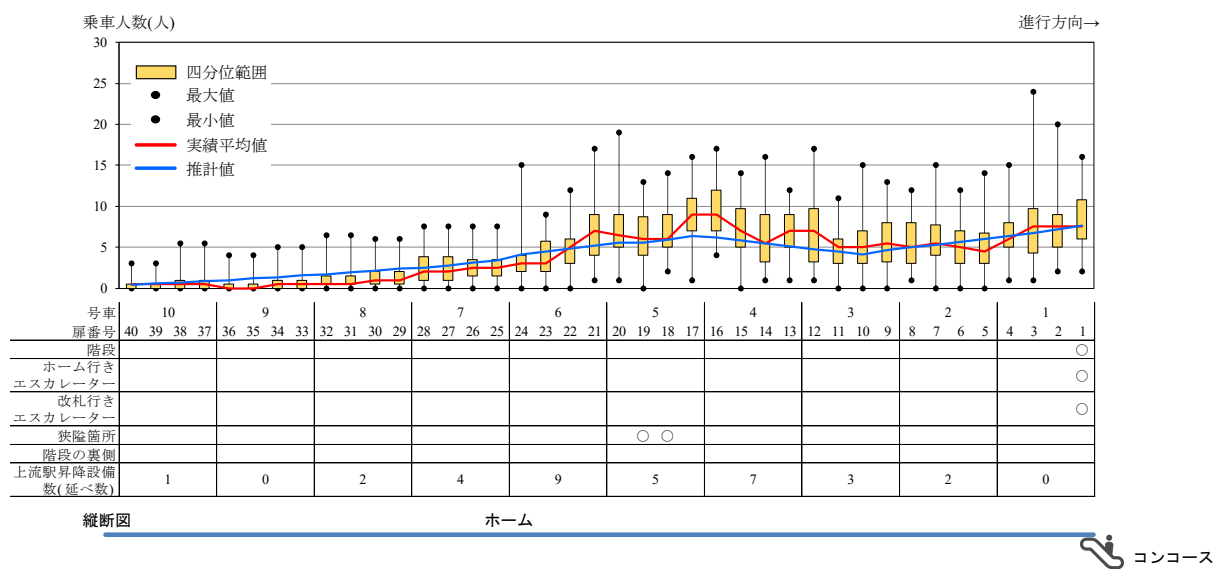


図 3.18: 二子玉川駅降車分布

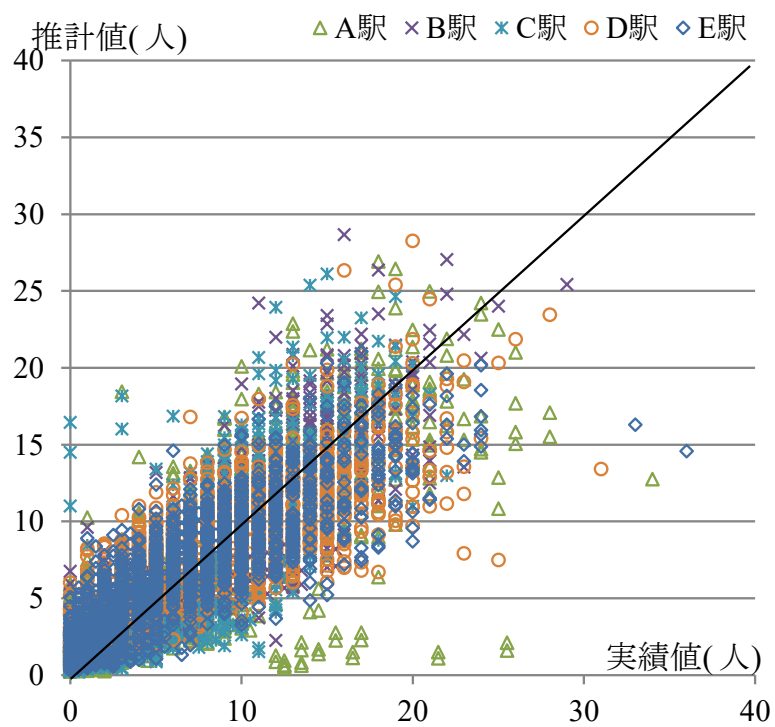


図 3.19: 乗車人数の比較

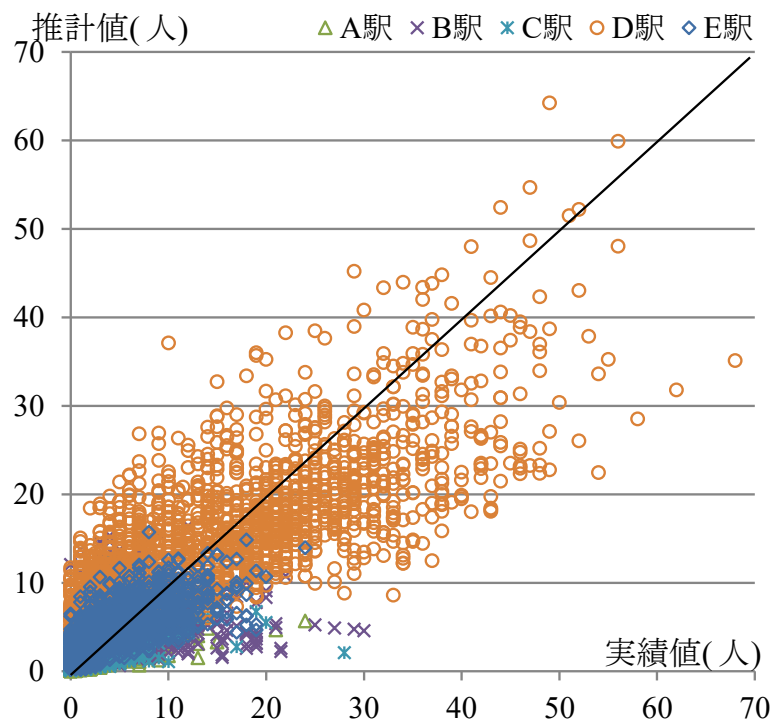


図 3.20: 降車人数の比較

発的な停車が発生した当該列車の停車時間を与件とする。これは20日間合計66,544停車のうち28停車であり全体の0.042%を占める。突発的な停車そのものの予測技術は本システムには組み込まれていないためである。運転整理範囲は運転間隔調整モデルにて制御する。2つ目は、折り返し列車の遅れにより始発駅発車時点で60秒以上遅延していた列車の発車時刻を与件とする。これは20日間合計2,300列車の9.5%の218列車である。折り返し列車の遅れは本シミュレーションの範囲外での出来事であり、折り返し遅れ自体を再現することは本研究の目的ではない。加えて折り返し遅れを与件としない場合には、ピーク時間帯の終盤や遅延収束期の現況再現精度が著しく悪くなることもあり、本研究では60秒以上というその後の列車運行への影響が想定される範囲で限定的に採用している。

統合モデルには様々な変数が含まれているが、このうち確率的な乱数を含んでいる箇所は、乗降時間推計モデルの旅客生成位置と旅客の加速度、確認時間推計モデルで決定される確認時間、運転間隔調整モデルのたまプラーザ以西で発生した突発的なトラブルの運転整理範囲の4点である。これ以外の変数（例えば：列車の加速度、乗客の時間帯別需要やOD、扉選択確率）はシミュレーション開始時に入力した値を採用している。

シミュレーションの再現精度は3つのアプローチで検証する。1つ目は、同一列車同士の到着遅延の大きさで比較する。2つ目は、列車間隔から再現性について考察する。対象路線のような2分前後で運行する路線では、一つの遅れが後続列車に波及しやすいため、ピーク時間帯の列車を抽出したうえでさらに細分化した時間帯別に列車間隔を比較する。これらの精度検証が済んだ段階で、将来的なシステムの運用を見据えた考察をする。具体的には、システム構築において必須となるデータセットの特定化と、今回使用したデータのうち一部が整備できなかった場合を想定し、そのときの現況再現性の検証をおこない、各種データ整備の優先度について検討する。

### 3.9.2 到着遅延量からみた現況再現性

対象区間の最混雑断面の渋谷駅と、終点方の清澄白河駅での結果をそれぞれ図3.21と図3.22に示す。図中の実績値は対象20日間の渋谷駅もしくは清澄白河駅到着時の遅延量の平均と標準偏差、推計値は乱数を含むため各日10回のシミュレーションを平均し、最も平均に近い1回の結果を当該日の代表として、20日間の平均値と標準偏差を求める。図の横軸は列車の統一を図るために渋谷駅到着時刻で整理している。渋谷駅（中央林間駅から31.5km地点）の到着遅延時間の残差RMSは34.3秒、清澄白河駅（同44km地点）での到着遅延時間

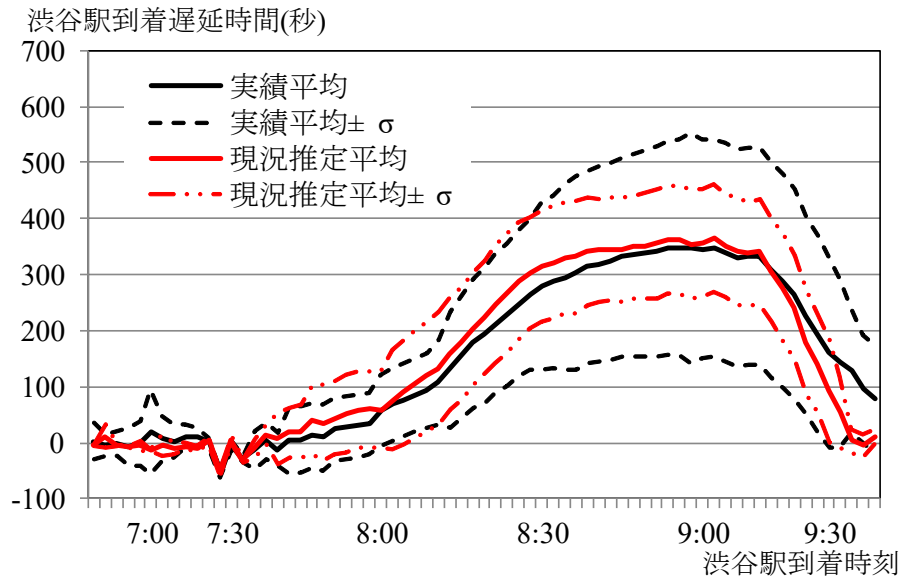


図 3.21: 統合モデルの現況再現性 (渋谷断面)

の残差 RMS は 34 秒であった。

列車遅延の発生・拡大・最大・収束に至る過程が高い精度で再現できている。図 3.24 は各駅到着時の到着遅延量の RMS を始発駅である中央林間駅からの距離別に示している。集計範囲は図 3.21 と図 3.22 と同じ平日 20 日間のデータで渋谷駅を 6:30 から 9:45 に通過する全列車である。始発駅に近いほど誤差の蓄積が少ないため残差 RMS は小さく、終点に近づくほど大きくなっている。渋谷駅の手前の三軒茶屋駅で最大の 69.7 秒となった(図 3.23 参照)。図 3.23 をみると、遅延の最大に到達する前に遅延が収束していることがわかる。要因として走行時間推計モデルの再現性検証で指摘したように、渋谷駅を先頭に列車が詰まった状態となり、実際の運転士は乗り心地やエネルギー消費を考慮して無理な加減速をしない運行をしたため、到着遅延に差が生じたと考える。一方でシミュレーションでは加速ができる状態にあれば加速をするため、三軒茶屋駅では実績値よりも早く走行するものの、渋谷駅到着直前で詰まったため、渋谷駅より下流の残差 RMS は 30 秒程度を推移していると考ええる。

駅間走行時間の残差 RMS を図 3.25 に示す。基本的な傾向は図 3.24 と同様であり：(1) 郊外部や半蔵門線内のみの場合は 20 秒程度；(2) 郊外部から半蔵門線へ向かうサンプルは 30～40 秒程度；(3) 三軒茶屋駅が発着駅となる場合は残差が大きい；結果となった。このようにすべての駅間において非常に高い精度を有したシミュレーションシステムとなっていないが、誤差の大きな範囲は限定的でありそのほかの区間は高い再現性を有しているといえる。



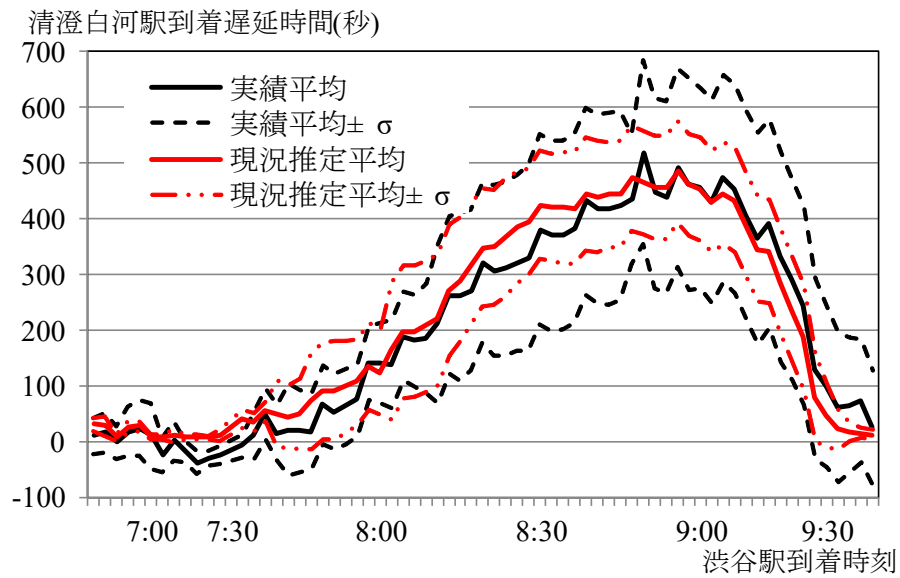


図 3.22: 統合モデルの現況再現性 (清澄白河断面)

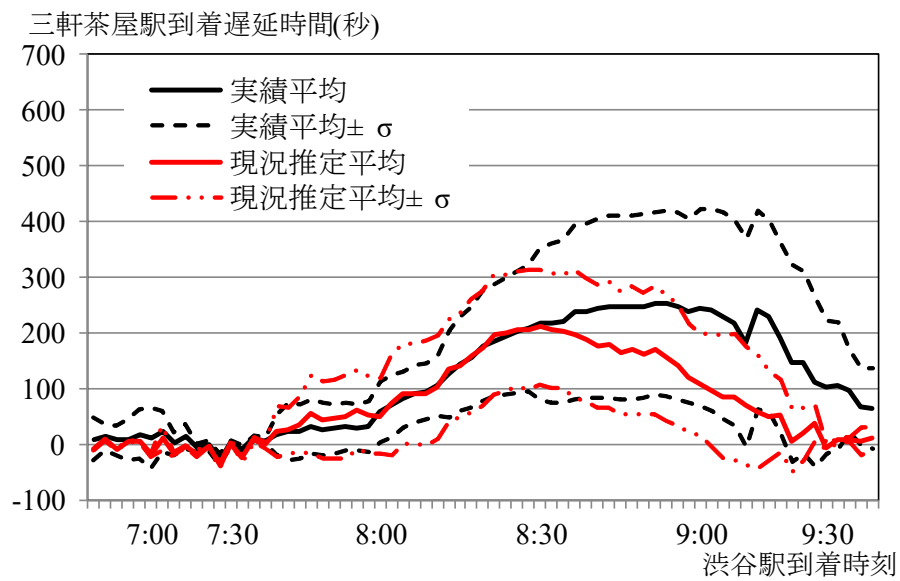


図 3.23: 統合モデルの現況再現性 (三軒茶屋断面)

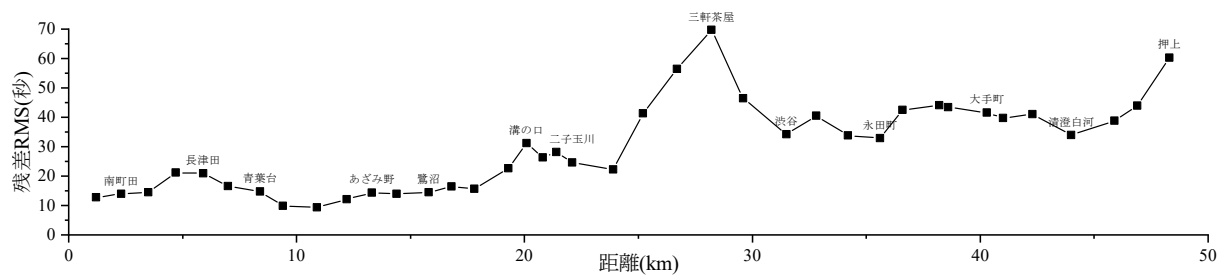


図 3.24: 到着断面での残差 RMS

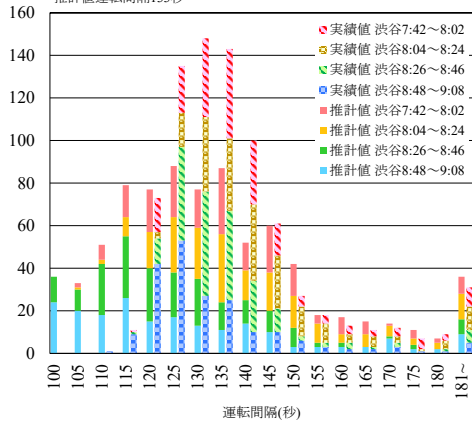
駅間走行 時間RMS		降車駅																				
		中央林間	南町田	長津田	青葉台	あざみ野	鷺沼	溝の口	二子玉川	用賀	桜新町	駒沢大学	三軒茶屋	池尻大橋	渋谷	表参道	青山一	永田町	九段下	大手町	清澄白河	押上
乗車駅	中央林間		10.0	17.8	13.2	13.6	16.3	28.6	23.1	22.5	42.3	58.8	75.7	48.3	39.7	45.1	38.3	37.1	47.2	44.0	32.8	60.3
	南町田			16.5	15.8	18.0	17.5	31.8	25.7	22.8	43.2	60.0	76.4	49.5	38.8	42.8	36.1	34.9	44.6	42.0	33.4	61.6
	長津田				7.0	10.8	19.3	24.1	19.7	24.0	37.3	51.9	65.5	42.3	38.2	47.6	40.4	39.5	50.9	48.5	39.0	61.9
	青葉台					9.0	16.0	24.1	19.1	23.3	37.1	52.1	66.2	43.0	37.9	46.6	39.6	38.6	49.7	47.7	38.1	61.0
	あざみ野						8.8	27.6	21.8	22.8	38.9	54.0	68.5	44.4	35.3	42.1	35.5	34.4	45.2	43.6	35.1	60.1
	鷺沼							33.7	28.5	25.7	44.6	60.0	74.2	49.8	34.9	38.7	33.0	32.0	41.9	41.1	36.0	62.3
	溝の口								16.2	32.5	33.6	46.0	61.2	38.5	46.5	58.1	51.2	49.9	60.8	59.7	48.7	65.4
	二子玉川									21.9	18.9	34.3	49.4	27.7	40.8	55.7	48.4	46.3	56.1	54.5	40.2	55.1
	用賀										24.1	41.1	53.4	32.4	31.2	45.5	39.2	37.2	45.2	43.2	29.5	48.9
	桜新町											13.8	30.2	16.9	51.0	69.3	62.1	59.6	67.1	65.5	48.7	54.7
	駒沢大学												16.7	25.9	66.9	85.9	78.9	76.2	82.3	80.5	62.7	63.4
	三軒茶屋													30.1	69.8	88.9	82.1	79.2	83.8	81.6	64.0	61.9
	池尻大橋														50.9	71.3	64.2	61.5	67.6	65.6	49.5	48.9
	渋谷															25.4	20.3	18.2	22.5	21.4	21.3	34.9
	表参道																9.9	13.0	15.4	18.5	35.3	57.2
	青山一																	3.7	16.0	16.6	27.8	50.4
	永田町																		7.5	12.6	29.8	50.9
	九段下																			9.2	30.6	51.0
	大手町																				23.7	42.8
	清澄白河																					37.6
	押上																					

図 3.25: 駅間走行時間の残差 RMS

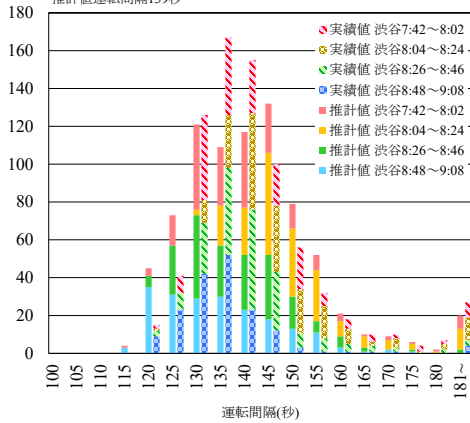
### 3.9.3 列車間隔からみた現況再現性

次に運転間隔の視点からシミュレーションシステムの再現精度を検証する。使用するデータは、3.9.2と同じ実績値と推計値である。渋谷駅断面で運転間隔が3分未満である7:42から9:08に通過する40列車を平日20日分集計した800列車を対象に、駅到着時の運転間隔を求めた。ここでの運転間隔は先行列車の駅到着からの経過時間である。運転間隔を100秒から5秒刻みでヒストグラムで表したものが図3.26である。渋谷駅到着時刻で4色に区別した。実績値を見るとおおむね130秒をピークとする山なりの分布形状である。シミュレーション結果をみると、渋谷駅では実績値に近い分布となっている。時間帯別の分布では渋谷着8:48以降すなわちピーク時間帯が終わりに近づく時間帯で実際よりも短い運転間隔で運行している様子が確認できる。走行時間推計モデルで示した通り、加減速の判断の部分で誤差が生じていることや、ピーク時間帯の終わりで発生する列車遅延の発生要因が走行遅延であることを踏まえると、シミュレーションシステムの特徴として、遅延収束期の早期収束推計の傾向があると考えられる。遅延対策検討時には留意点として挙げられるが、前述の通り全体の分布形状は一致していることから、運転間隔の側面から見ても列車の運行を高い精度で再現している。

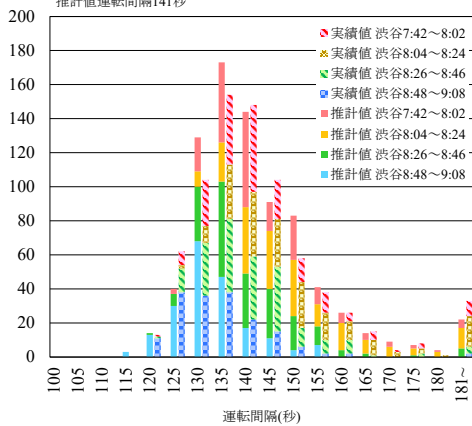
頻度 実績値運転間隔136秒 三軒茶屋駅  
推計値運転間隔133秒



頻度 実績値運転間隔140秒 渋谷駅  
推計値運転間隔139秒



頻度 実績値運転間隔141秒 永田町駅  
推計値運転間隔141秒



頻度 実績値運転間隔142秒 清澄白河駅  
推計値運転間隔141秒

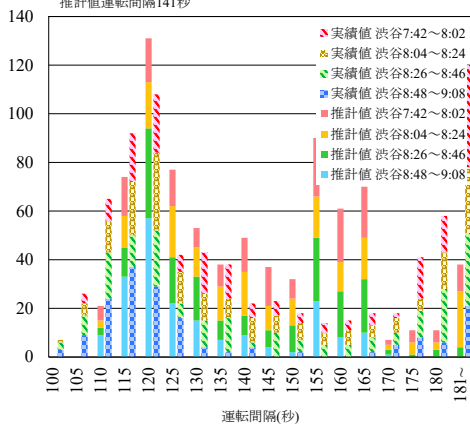


図 3.26: 主要駅断面での運転間隔

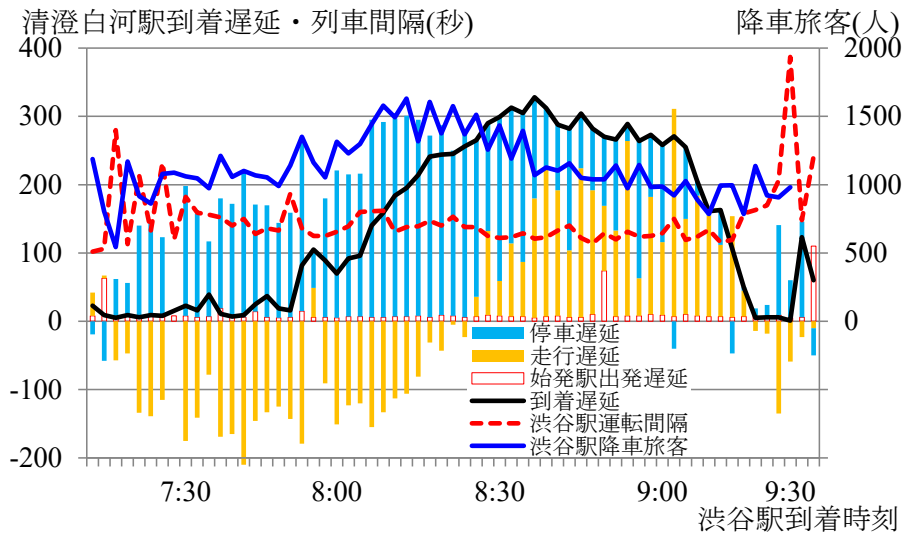


図 3.27: 統合モデルでの遅延の内訳

### 3.9.4 到着遅延の拡大・収束傾向からみた現況再現性

以上までは同一列車の到着遅延量の比較をおこなった。以下ではラッシュ時間全体として列車遅延の拡大・収束の動きの再現性を確認する。まず図 3.27 は図 3.28(図 1.1 の再掲)と同日のシミュレーション結果の遅延内訳を示している。図 3.28 と同様に停車遅延を走行時間の余裕分で吸収し、8:30 以降は走行遅延が遅延の主たる要因となる傾向はシミュレーションでも表現できている。

## 3.10 使用データが現況再現性に与える影響分析

### 3.10.1 データ欠損を想定した検討ケースの選定

本研究では表 3.1 に示すように、実路線の車両、需要、運行に関する様々なデータを、東急電鉄および東京メトロより提供いただきシミュレーションシステムを構築している。この中には機密性の高い資料も含まれており、他路線で同様のシミュレーションシステムを構築する場合、本研究と同程度のデータ整備がおこなえるかどうかは不透明な状況である。そのため、データ整備が十分でなかったときに現況再現性に与える影響を事前に把握しておく必要がある。ここでは、シミュレーションシステムを構築する 5 つのサブモデルのいずれかについて、モデル構築が不十分だった場合を想定し、平日 20 日間の現況再現のシミュレーションをおこない、使用データの再現性への寄与度を検証する。

検証の前に、使用データのうちシステム構築に欠かせないと考えるデータを抽出する。そ

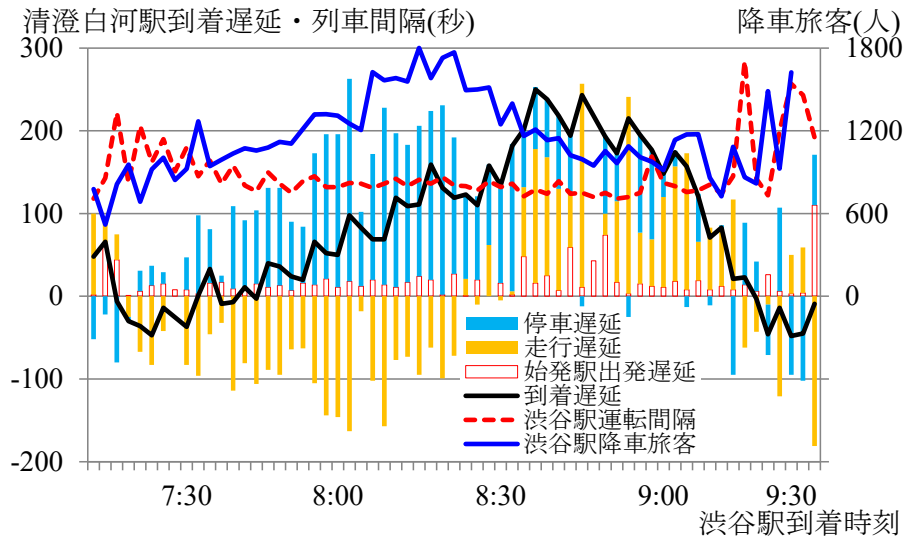


図 3.28: 突発的なトラブルのない日の遅延

これは信号コード表，列車停止位置情報，遅延実績データ，大都市交通センサス，である．このうち最重要データは信号コード表と大都市交通センサスである．信号コード表は走行時間推計モデルのうち，各列車位置での制限速度や閉そく長などが含まれており，このデータなしで走行時間推計モデルは構築できない．また大都市交通センサスで求める駅別総需要や駅間 OD データも同様である．どちらのデータも駅別の乗降人数を決定するうえで欠かせないを考える．したがって本研究では今述べた4つのデータは整備できたことを前提に5つのケーススタディをおこなう．ケーススタディは：(1) 列車加速度を一定としたケース；(2) 乗降時間推計をエージェントモデルではなく回帰式で示したケース；(3) 混雑率ごとの確認時間が取得できなかったケース；(4) 運転間隔調整モデルが構築できなかったケース；(5) 乗車位置選択モデルが構築できず全扉の需要を一定としたケース；を検討した．

### 3.10.2 検討ケースのシミュレーション結果

1つ目の列車加速度を一定としたケースは，表 3.1 のうち引張り曲線が入手できなかったことを想定している．速度上昇に伴って加速度が減退していかないため，高速区間において誤差が生じると考えられる．本研究では，一般に公開されている東急 8500 系の車両の諸元を参考に，起動加速度  $3.3\text{km/h/s}$  をすべての速度帯において与えシミュレーションをおこなった．加速度変更による影響は， $40\text{km/h}$  まで加速に要する時間が 11 秒から 13 秒と約 2 秒長くなり，同  $60\text{km/h}$  の場合は約 18 秒でほぼ等しくなる． $80\text{km/h}$  の到達時間は 31 秒から 25 秒と約 6 秒短くなる．つまり列車の低速域での運行が長くなるほど誤差はプラスに蓄積し，

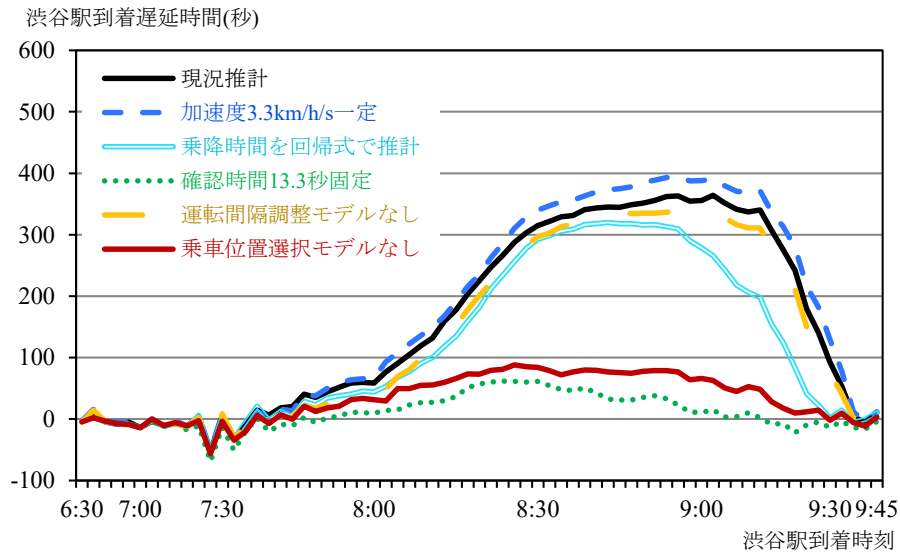


図 3.29: データ制約下でのシミュレーションの結果 (渋谷駅)

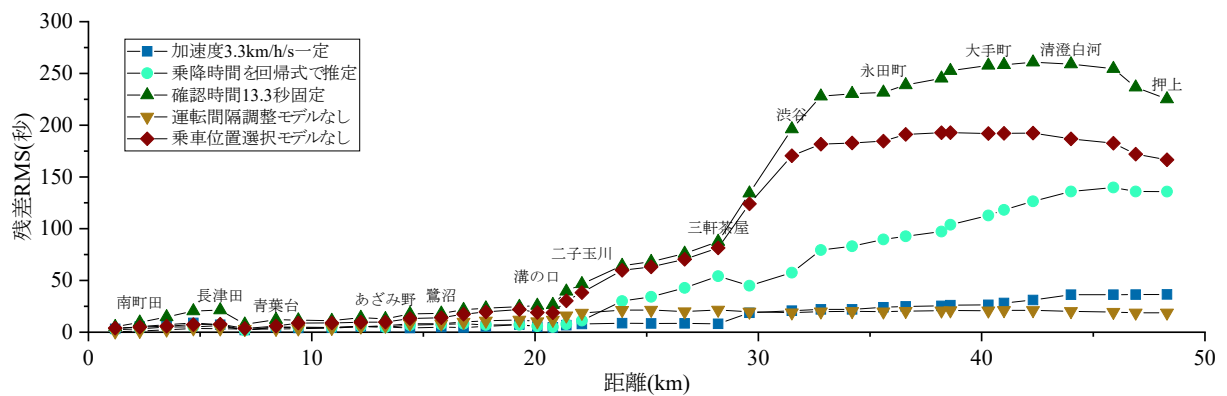


図 3.30: データ制約下でのシミュレーションの結果 (到着断面残差 RMS)

高速域が多いほどマイナスに蓄積する。

結果を図 3.29 と図 3.30 に示す。図 3.29 は渋谷駅到着断面での到着遅延量を示している。図 3.30 はデータ欠損のないデータと各種ケーススタディについて、各駅到着断面で残差 RMS を計算したものである。加速度一定のケースは図中の濃い青色で示したものである。加速度を変化させても列車遅延の再現に大きな変化は見られなかった。駅別にみても三軒茶屋駅までは 10 秒未満の誤差で推計できていた。理由として三軒茶屋駅までの区間は比較的高速で走行できる区間があったため、低速域で生じたロスを高速域で補っていたと考えられる。事実、三軒茶屋駅より下流区間で高速で走行可能な区間はほとんど存在しないために図 3.30 の値は少しずつであるが大きくなっている。結論としては、加減速のロスを少なくできる値を特定化できれば、加速度を引張り曲線から算出する必要はないといえる。

2 つ目の乗降時間推計を回帰式で示したケースは、乗降旅客の位置座標が取得できなかった場合を想定している。現地調査で乗降時間と乗降人数、目視による混雑率の取得は現実的に可能な範囲であり、取得データを回帰式で表現した場合の再現性についてシミュレーションをおこなう。本研究では、乗降時間推計モデルの再現性検証にもちいた 78 サンプルで重回帰モデルを構築した。被説明変数を乗降時間、説明変数を乗降人数と混雑率としパラメータ推定を行った結果が式 (3.10) である。

$$\text{乗降時間(秒)} = 0.895 * \text{乗車人数(人)} + 0.317 * \text{降車人数(人)} + 0.023 * \text{混雑率(\%)} + 9.995 \quad (3.10)$$

すべての変数が 5% 有意、相関係数は 0.833 となりモデルの精度は良好である。式 (3.10) を用いた場合の誤差の発生要因としては、同程度の乗降人数と混雑率のときに返される乗降時間にばらつきが少なく、列車の等間隔運行を阻害する要因が減ることで列車遅延の過小推計が考えられる。

図 3.29 と図 3.30 のスカイブルーで示したものが結果である。想定した通り全体として列車遅延が過小に推計された。ただし遅延の拡大期までは現況再現に用いたデータと似た傾向を示していることが分かった。渋谷駅では 50 秒程度の誤差が生じているが、半蔵門線内に入ると誤差は拡大傾向にあり、清澄白河駅付近では残差 RMS が 135 秒と大きい。したがって乗降時間を回帰式で推計することは避けるべきである。

3 つ目は確認時間推計モデルの整備が十分でなかったケースである。確認時間の取得自体は現地調査から可能であるが、混雑率との関係性が十分検証できなかった場合を想定する。シミュレーションでは確認時間を路線や混雑率に関わらず一律平均 13.3 秒（現地調査全駅の平均値）として与える。シミュレーションへの影響は、最混雑時間帯の停車時間の

過小推計と非混雑時の停車時間の過大推計が考えられる。

シミュレーションの結果、図 3.29 と図 3.30 の緑のプロットで示した通り列車遅延がほとんど発生しない分布となった。本ケースではピーク時間帯の確認時間が短いことに加え、ばらつきを含んだ形にしなかったため、列車が駅手前で滞ることなく運行している。確認時間は駅での簡易な調査によって取得可能なデータであり、対象路線の実態に合致した値を採用すべきである。

4つ目は、運行実績データから運転司令の運転整理パターンを整理できず、運転間隔調整モデルが構築できなかった場合を考える。シミュレーションには最初に発生した突発的な遅延に関しては遅延実績データより取得したと仮定し、停車時間を直接与えるが、運転整理についてのルール化はおこなわずシミュレーションした。

シミュレーションの結果は図 3.29 と図 3.30 の黄色のプロットである。加速度ケースと同様に現況再現に用いた結果と似たような結果が得られた。図 3.30 でも終点方でも残差は小さく推計されている。しかし個々の列車に着目すると、突発的なトラブルを起こした列車の前を走る列車について運転整理をしなかったため、トラブルの当該列車に旅客が集中し混雑率が 250%を超えている車両が散見された。更に混雑により駅に滞留が発生するなど乗降行動の面から実態とかい離れた結果となっている。まとめると、列車遅延だけに着目するとモデル化の必要性について検討の余地はあるが、乗客行動を考慮する場合には運転間隔調整モデルのモデル化はするべきと考える。

5つ目は乗車位置選択モデルの構築をしなかった場合である。乗車位置選択モデルのパラメータ推定の部分で記述したが、今回推計したモデルは乗車駅の階段位置に依存したモデルであり、田園都市線と半蔵門線に特化したものと考えられる。他路線での検討の際にはモデルの再構築が必要と考えるが、全ての扉の乗降人数の把握が困難で乗車位置選択モデルを構築できなかった場合を想定している。大都市交通センサスから時間帯別需要と駅間 OD 表は構築できた前提で、乗車旅客を全扉に均等に配分する。扉ごとの乗客数や混雑率の偏りが無い状態にしてシミュレーションした。

結果は図 3.29 と図 3.30 の赤色で示した。確認時間と同様に遅延の再現ができていないことがわかる。現況の遅延を再現するためには、列車の中でも車両によって混雑率や乗降人数に偏りを表現し、最混雑扉での乗降時間推計をおこなう必要性が明らかとなった。なお、今回のシミュレーション結果を遅延対策の側面から見ると、現在の需要量であっても利用者が混雑車両に偏重せずに分散乗車をすることで、列車遅延はかなり減らせることを示唆



しているともいえよう。

以上，使用データの整備が困難だった場合を仮定し，現況再現性に用いたシミュレーションとどの程度かい離が生じるか確認した．図 3.30 のすべてのケースにおいて，溝の口駅よりも下流断面で誤差が大きくなる結果となった．列車遅延が発生しやすい溝の口駅より渋谷駅寄りの区間の列車運行を再現するためには，確認時間推計モデルと乗車位置選択モデルの構築は必須であるといえる．上記 2 モデルほどの誤差は出ていないが，エージェントベースの乗降時間推計モデルや運転間隔調整モデルも望まれる．列車の加速度については，複数の車両形式から適当な一意の値を特定化しそれらが車両形式問わずほぼ一定であれば，引張力曲線を手付けせずとも比較的制度的良い分析は可能であると考えられる．

## 第4章 TDM施策評価に向けた乗車時刻選択モデルと始業時刻選択モデルの構築

3章では、TSM 施策の遅延対策のためのシミュレーションシステムを開発し、その再現性の検証をおこなった。鉄道の遅延対策には鉄道需要側が乗車時刻を分散させる対策もある。本章では、そのような TDM 施策評価に向けて、鉄道利用者の乗車時刻選択行動を定式化し明らかにする。さらに鉄道利用者が乗車時刻を決定するにあたって、企業の始業時刻が強く影響することが想定される。本研究では企業に対する混雑税等の施策評価のため、企業の始業時刻選択行動についても定式化する。

本章の構成は、まず鉄道利用者の乗車時刻選択行動について、5章の時間信頼性評価でも用いるスケジューリングモデルに列車遅延の影響を明示的に導入したモデルを構築し、パラメータ推定をおこなう。次に、企業の始業時刻選択行動のモデル化に取り組む。企業は関連する他の企業との就業時間を重ねて生産性を高める行動をとっていることが知られている。本研究ではその考え方にに基づき、企業間の取引データから関係性を明らかにする。収集できるデータに制約があるため、ここではマクロな視点から定式化を試みることにする。

### 4.1 鉄道利用者の乗車時刻選択モデルの構築

#### 4.1.1 データ概要とモデル構築の方針

分析対象は、東急田園都市線及び相互直通運転先の東京メトロ半蔵門線上り方面である。利用者の乗車時刻に関する RP データ及び勤務先の始業時刻等の情報に関しては、第 11 回大都市交通センサス（首都圏、2010 年に実施）のマスターデータを用いて分析する。パラメータ推定を行うに先立ち、以下の条件 (a)~(d) を全て満たす 575 サンプルを抽出した。

1. 第一トリップにおいて、6:00~9:59 の間に東急田園都市線および東京メトロ半蔵門線の中央林間駅～押上駅で乗車し、かつ当該区間を終着駅とする。
2. 移動目的が「通勤」かつ「定期利用」である
3. 乗車時刻、勤務先始業時刻、イグレス旅行時間の情報に欠損が無い。

#### 4. アクセスとイグレスの両交通手段において、徒歩または自転車を利用している。

抽出条件のうち田園都市線および半蔵門線完結のサンプルとし、アクセス・イグレス手段に制限を加えているのは、通勤時の旅行時間変動要因を対象路線の旅行時間変動に限定するためである。例えば田園都市線および半蔵門線以外の路線も利用する通勤者の場合、乗換駅での乗り換え時間や乗り換え先の路線の旅行時間の分散も考慮した上で出発時刻の選択をおこなっていると考えられる。またアクセス・イグレス手段に自動車やバスを利用した場合には、道路混雑による旅行時間変動や、バスの運行ダイヤによる時刻選択の制約が起こるため、旅行時間変動が少なく時間制約のない徒歩と自転車に限定している。

なお、データの乗車時刻に関して、基となる大都市交通センサスの調査票では“最初に乗車した駅での乗車時刻”を記入するよう教示されている。この乗車時刻の解釈としては、“時刻表上の出発時刻”、“列車遅延を考慮した実際の出発時刻”という二通りが可能である。分析に当たっては、乗車時刻としてどちらの設定が適切かという点に留意して、スケジューリング関数（効用関数確定項）の特定化を行う必要がある。

各駅間の旅行時間変動の算出のため、東京急行電鉄株式会社及び東京地下鉄株式会社から提供された中央林間駅～押上駅間の列車運行実績データを用いる。これは、この区間の各駅における秒単位の出発時刻と到着時刻が全ての列車毎に記録されたものである。期間は2010年11月15日～12月17日の平日21日間である。大都市交通センサスのデータ年次とそろえるため、3章のシミュレーションシステムの対象路線は同一ではあるが期間が異なることに留意されたい。

大都市交通センサスから抽出した575サンプルのOD分布を図4.1に示す。乗車駅は駒沢大学駅以西が全体の8割以上を占め、その分布は距離帯に関わらずほぼ均等になっている。下車駅は三軒茶屋駅以東で全体の8割以上を占め、特に三軒茶屋～九段下駅間で下車するサンプルが多い。これは分析に向けたサンプルの抽出条件で田園都市線および半蔵門線完結のサンプルに限定したためである。次に始業時刻分布を図4.2に示す。9:00始業のサンプルが575サンプル中216サンプルとなり最も多い。次いで8:30, 9:30, 10:00の順でサンプルが多くなっており、毎時0分と30分に始業する企業が多いことがわかる。これらの始業時刻に対し、基本的に通勤者は遅刻をしないように出社していると考えられる。図4.3は始業時刻と出社時刻との差をとったものである。始業時刻以降に出社しているサンプルは極端に少なく、ほとんどのサンプルは始業時刻前に出社している。始業時刻に対する余裕時間の分布をみると、15分以下が最も多く、余裕時間が長くなるにつれて割合が減少している。

	下車駅					総計
	中央林間～青葉台	藤が丘～宮崎台	梶が谷～駒沢大学	三軒茶屋～九段下	神保町～押上	
乗車						
中央林間～青葉台	6	20	29	67	25	147
藤が丘～宮崎台		5	36	100	47	188
梶が谷～駒沢大学			12	122	42	176
三軒茶屋～九段下				32	30	62
神保町～押上					2	2
総計	6	25	77	321	146	575

図 4.1: 分析に用いるサンプルの乗車駅と降車駅

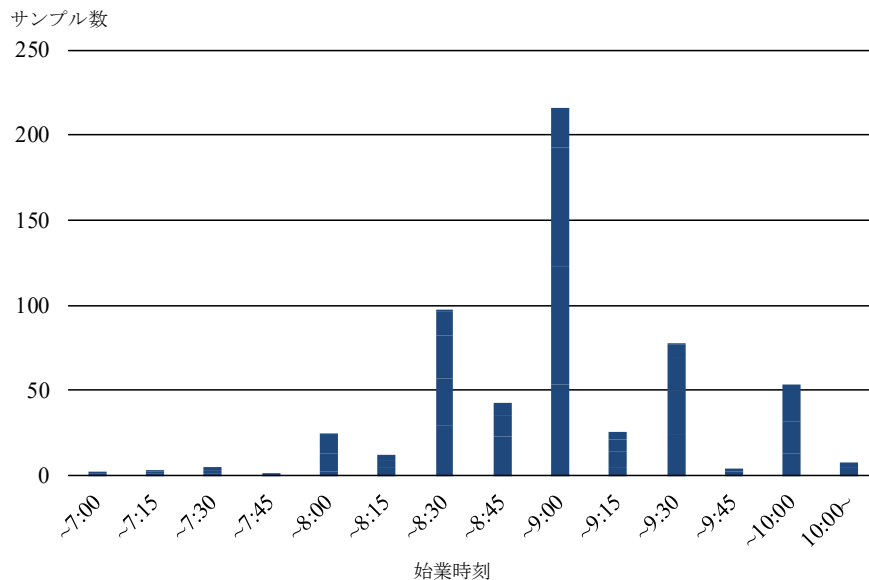


図 4.2: 始業時刻分布

結果となった。

出発時間帯ごとの所要時間や列車遅延量についても整理した。図 4.4 は対象路線のうち長津田→渋谷駅間での種別・時間帯別の時刻表所要時間と、走行遅延(=実績所要時間-時刻表所要時間)を発車駅である長津田駅での 15 分ごとの平均値をとったものである。時刻表所要時間はピーク時間帯(主に 7 時台)とその周辺時間帯で 10 分以上の差が生じていること、走行遅延は 8:30 前後で 4 分程度発生している。

使用データの基礎集計結果を踏まえたモデル構築の方針として：(1) 始業時刻と出社時刻の差が小さいほど効用が大きく、始業時刻に遅刻することが一つのペナルティになること；(2) 所要時間や列車遅延が時刻選択に影響する要因とすること；である。乗換駅による影響については、本分析で乗り換え客を含めた分析をおこなっていないため特別な考慮はしないこととする。したがって本研究は、これらを考慮可能なスケジューリングアプローチに基づいて、乗車時刻選択モデルの構築をおこなう。

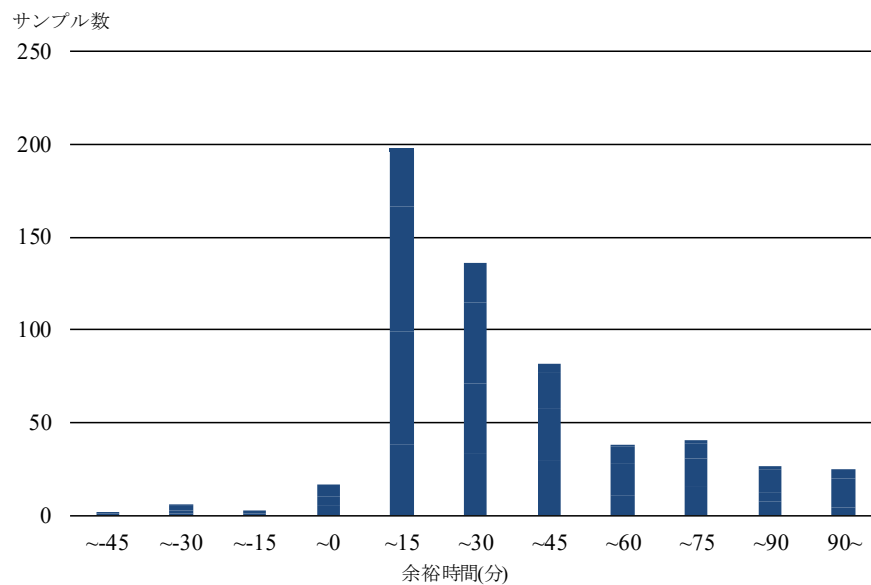


図 4.3: 余裕時間分布

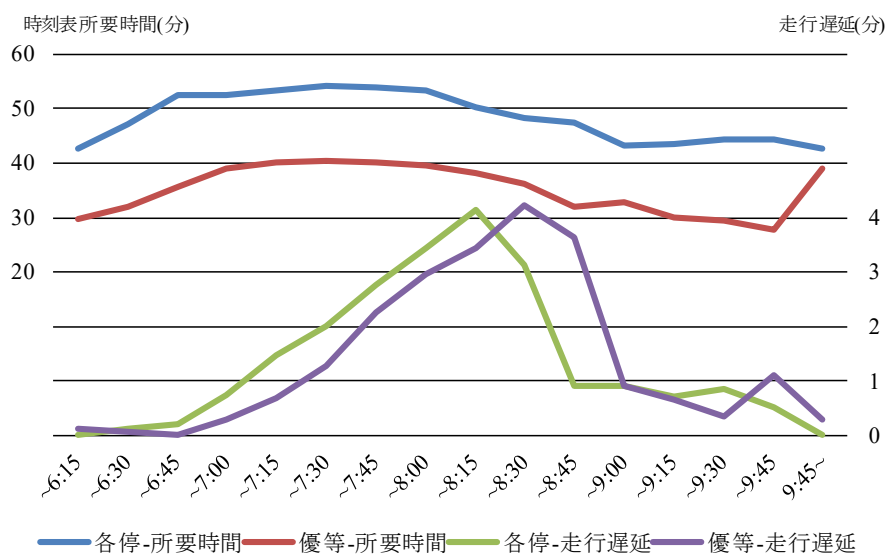


図 4.4: 長津田～渋谷間の出発時刻別サービス水準

#### 4.1.2 離散選択モデルの基本設定

スケジューリングアプローチに基づき、鉄道利用者の乗車時刻選択行動をランダム効用理論に基づいて記述する．ここで“乗車時刻選択”と称しているのは、自宅の出発時刻ではなく、分析対象路線の乗車駅における乗車時刻の選択行動のモデル化をおこなっているためである．

構築するモデルの基本設定は以下の通りである．

- 既往研究<sup>56)</sup>に倣い、6:00~9:59の時間帯を15分毎・計16の時間帯に離散化して乗車時刻選択モデルを構築する．なお、選択肢集合については、全ての個人において、16時間帯ある乗車時刻選択肢すべてを選択可能としている．
- 希望到着時刻 ( $PAT$ ) は、通勤者の勤務先始業時刻からイグレス旅行時間を差し引いた時刻と仮定する．これは、基本的に遅れてはならないとみなされる勤務先始業時刻から、通勤者の最終降車駅から勤務先までの旅行時間（イグレス旅行時間）を差し引くことで、降車駅に到着しなければならない時刻を希望到着時刻と仮定することを意味する．通勤者の勤務先到着時刻と始業時刻が必ずしも一致しないことは図4.3で示しているためこの設定は強い仮定になる．しかし図4.3からは同時に通勤者が明らかに遅刻を避けるような行動と取っていることが伺えることもあり、本研究では希望到着時刻を始業時刻とした．
- 所要時間に関しては、先述の大都市交通センサス調査票の特性を鑑み、モデル構造に応じて実所要時間 ( $TT$ ) と時刻表所要時間 ( $TT'$ ) のいずれかを用いて表現する．
- 通常のスケジューリングアプローチでは旅行時間の変動のみが考慮されるが、本研究では運行ダイヤから乖離も同時に考慮する．ダイヤからの乖離は、出発遅延時間 ( $LB$ )、到着遅延時間 ( $LD$ )、列車乗車中に発生した遅延を示す走行遅延時間 ( $RD := LD - LB = TT - TT'$ ) のいずれかを用いて表現する．
- 現行の鉄道運賃体系では、運賃（移動の金銭費用）は時間帯によって変化しない．そのため、モデルに費用変数は含まれていない．
- 選択肢間の類似性（相関構造）を考慮する．

### 4.1.3 効用関数確定項

上述の基本設定のもと、個人  $n$  が乗車時刻  $i$  を選択するときのランダム効用確定項  $V_{in}$  を特定化する。ここで、列車の乗車時間とダイヤからの遅れをどのように考えるかにより、下記の三通りの特定化を考える。

まず、式 (4.1) では、(a) 列車遅延を考慮した実際の出発時刻に基づいた所要時間の実績値 ( $TT$ )、(b) 出発時遅延 ( $LB$ ) を併用した特定化を行っている。

$$V_{in} = -\alpha E[TT_{in}] - \beta E[SDE_{in}] - \gamma E[SDL_{in}] - \kappa E[LB_{in}] - \theta P_L^{in} \quad (4.1)$$

ここで、 $TT$ : 実績所要時間 (分)、 $SDE$ : 早着時間 (分)、 $SDL$ : 遅着時間 (分)、 $LB$ : 出発遅延時間 (分)、 $P_L$ : 遅刻確率、 $\alpha, \beta, \gamma, \theta, \kappa$ : 未知パラメータである。  $E[\cdot]$  は期待値演算子を意味するが、本研究では Noland et al.<sup>35)</sup> に倣い、離散選択モデルで想定する選択肢 (時間帯) 毎に、4.1.1 で述べた運行実績データから平日 21 日分の相加平均によって推計された値により表すこととする。同様に、 $P_L$  は、運行実績データから時間帯別の全列車の運行実績データの中から希望到着時刻に間に合わない列車本数を求め、各選択肢の時間帯内における総列車本数に対する比率により表すこととする。

次に、式 (4.2) では、(a) 時刻表上の所要時間 ( $TT'$ )、(b) 到着遅延時間 ( $LD$ ) を併用した特定化を行っている。

$$V_{in} = -\alpha' E[TT'_{in}] - \beta E[SDE_{in}] - \gamma E[SDL_{in}] - \nu E[LD_{in}] - \theta P_L^{in} \quad (4.2)$$

ここで、 $TT'$ : 時刻表所要時間 (分)、 $LD$ : 到着遅延時間 (分)、 $\alpha', \nu$ : 未知パラメータである。実所要時間 ( $TT$ ) ではなく時刻表上の所要時間 ( $TT'$ ) を用いているのは、 $TT$  と  $LD$  が線形従属関係にあり多重共線性を起こすためである。

さらに、式 (4.3) では、(a) 時刻表上の所要時間 ( $TT'$ )、(b) 走行遅延時間 ( $RD$ ) を併用した特定化を行っている。

$$V_{in} = -\alpha' E[TT'_{in}] - \beta E[SDE_{in}] - \gamma E[SDL_{in}] - \lambda E[RD_{in}] - \theta P_L^{in} \quad (4.3)$$

ここで、 $RD$ : 走行遅延時間 (分)、 $\lambda$ : 未知パラメータである。やはり時刻表上の所要時間 ( $TT'$ ) を用いているのは、 $TT$  と  $RD$  が線形従属関係にあり多重共線性を起こすためである。

列車遅れと所要時間に関する変数間の関係を図 4.5 に示す。式 (4.2) ではダイヤからの乖離を到着遅延  $LD$  で表現し、所要時間は時刻表所要時間  $TT'$  を与えている一方、式 (4.3) ではダ

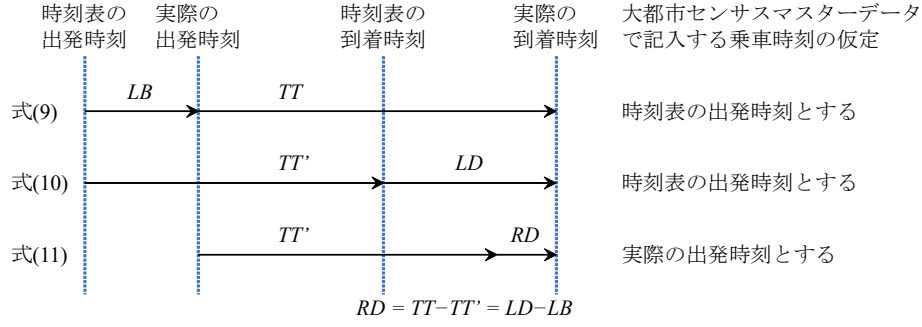


図 4.5: 特定化した式の鉄道旅行時間の構成

イヤからの乖離を走行遅延  $RD$  で表現していることが確認される。4.1.1 で述べた大都市交通センサスマスターデータで明示されていない乗車時刻に関する仮定について、式 (4.1) と式 (4.2) は、時刻表の出発時刻をサンプルの回答した乗車時刻との仮定に基づき定式化している。一方式 (4.3) は、実際の出発時刻をサンプルの回答した乗車時刻との仮定に基づいている。両者の違いは、出発遅延  $LB$  に相当する時間を旅行時間を含めるか否かという点である。例えば AM8:00 に発車予定の列車が遅延して AM8:05 に発車した場合、回答者が時刻表の出発時刻を記入すると AM8:00 となり、ここに出発遅延 5 分を与えることは妥当である。一方で列車遅延を考慮した実際の出発時刻を記入すると AM8:05 となり、出発遅延を 5 分を与えると遅延の二重計上となり妥当でない。すなわち、式 (4.3) では出発遅延を含まない定式化をおこなっていることになる。

#### 4.1.4 ランダム項に関する仮定～選択肢相関の表現

式 (4.1)~(4.3) で示した確定効用関数を有する離散選択モデルに関しては、通常が多項ロジット (Multinomial Logit: MNL) モデルに加え、時間的に隣接する選択肢間の誤差相関を考慮するため、Mixed Logit (MXL) モデル<sup>57)</sup> を用いて誤差項を構造化する。MXL の場合、個人  $n$  が時刻  $i$  を選択するときの総効用  $U_{in}$  は、式 (4.4) で表される。

$$U_{in} = V_{in} + \eta_{in} + \epsilon_{in}, \forall i, n \quad (4.4)$$

ただし、 $\epsilon_{in}$ : 独立かつ同一でスケールパラメータ 1 のガンベル分布に従うランダム項、 $\eta_{in}$ : 選択肢間の相関を表す誤差要素である。

ここで、Ordered Generalized Extreme-Value Model<sup>58)</sup> の考え方に立脚し、誤差要素に関して  $\eta_{in} = \nu'_n \mathbf{z}_{in}$  という特定化を行う。ここで  $\nu_n$  は次元が選択肢集合のサイズ (=16) に等しく、各要素が平均 0 で独立かつ同一の分散  $s^2$  を持つ正規分布に従うランダム項ベクトル、 $\mathbf{z}_{in}$  は選



択肢間の誤差相関を規定する構造化ベクトル（次元は選択肢集合のサイズに同じ）である．Small<sup>58)</sup>と同じく隣接する時間帯の選択肢効用のみが相関を持つという状況を表現するため， $\mathbf{z}_{in}$ の要素については，「選択肢*i*に対して，*i*, *i* + 1 番目の要素のみが1，それ以外は0」という特定化を行うこととする．このとき，隣接する出発時刻選択肢*i*と*i* + 1の効用間の分散は  $\text{Cov}(U_{in}, U_{i+1,n}) = s^2 (\forall i = 1, \dots, 15)$  で与えられる．他方，隣接していない選択肢間の効用の共分散は全て0となる．

$\boldsymbol{\eta}_n = \{\eta_{in}\}_{i=1, \dots, 16}$ に何らかの値が与えられたときの条件付選択確率は，式(4.5)のLogit Kernelで表される．

$$L_{in}(\boldsymbol{\eta}_n) = \frac{\exp(V_{in} + \eta_{in})}{\sum_{i=1}^{16} \exp(V_{in} + \eta_{in})} \quad (4.5)$$

確率変数ベクトル  $\boldsymbol{\eta}_n$  の従う分布  $f(\boldsymbol{\eta}_n | s)$ （互いに独立で同一の標準偏差  $s$  を持つ正規分布の積）の周辺化により，（条件なしの通常の）選択確率を求めると次のように表される．

$$P_{in} = \int L_{in}(\boldsymbol{\eta}_n) f(\boldsymbol{\eta}_n | s) d\boldsymbol{\eta}_n$$

$\boldsymbol{\eta}_n$  は確率変数ベクトルであるため，シミュレーション最尤法によりパラメータ推定を行う． $f(\boldsymbol{\eta}_{in} | s)$  に従う  $R$  個の正規乱数（ベクトル）を発生させ，それぞれの乱数の実現値  $\eta_{in}^{(r)}$ ,  $r = 1, \dots, R$  の下でLogit Kernelの平均値により選択確率  $SP_{in}$  の近似値を求めると，式(4.6)のように表される．

$$SP_{in} = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R L_{in}(\boldsymbol{\eta}_n^{(r)}) \quad (4.6)$$

これを用いて全サンプルの対数尤度を次式のように定義し，その最大化によって未知パラメータを推定する．

$$SLL = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{16} \delta_{in} \ln SP_{in}$$

ここで， $N$  はサンプル数， $\delta_{in}$  は個人  $n$  が選択肢  $i$  を選択したとき1，そうでないとき0を取る選択指標である．

#### 4.1.5 パラメータ推定結果

以上の設定のもとで離散選択モデルのパラメータ推定を行った．具体的には，異なる誤差構造(MNL, MXL)と異なる効用関数特定化(式(4.1)~(4.3))の元で各モデルのパラメータ推定を行った．結果を表4.1に示す．MXLの乱数生成回数は  $R = 5,000$  とし，推定に使用したソフトウェアはRである．なお，全てのモデルにおいて，首都圏鉄道の出発時刻選択分析

表 4.1: 乗車時刻選択モデルのパラメータ推定結果

変数	係数	MNL1:式(4.1)		MXL1:式(4.1)		MNL2:式(4.2)		MXL2:式(4.2)		MNL3:式(4.3)		MXL3:式(4.3)	
		推定値	t値	推定値	t値	推定値	t値	推定値	t値	推定値	t値	推定値	t値
実績所要時間TT(分)	$\alpha$	0.0991	5.32	0.0991	5.32	-	-	-	-	-	-	-	-
時刻表所要時間TT'(分)	$\alpha'$	-	-	-	-	0.1083	4.65	0.1084	4.65	0.0994	4.22	0.0997	4.21
早着時間SDE(分)	$\beta$	0.0339	16.10	0.0340	16.04	0.0342	16.00	0.0342	15.96	0.0360	16.91	0.0361	15.51
遅着時間SDL(分)	$\gamma$	0.0785	6.73	0.0785	6.73	0.0755	6.64	0.0756	6.64	0.0765	6.71	0.0767	6.69
遅刻確率 $P_L$ (%)	$\theta$	0.0178	6.90	0.0178	6.90	0.0183	7.12	0.0183	7.12	0.0180	7.00	0.0181	6.87
出発遅延LB(分)	$\kappa$	-0.4251	-3.90	-0.4250	-3.90	-	-	-	-	-	-	-	-
到着遅延LD(分)	$\nu$	-	-	-	-	0.0300	0.67	0.0300	0.67	-	-	-	-
走行遅延RD(分)	$\lambda$	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1132	2.56	0.1137	2.55
誤差要素標準偏差	$s$	-	-	0.0237	0.07	-	-	0.0187	0.05	-	-	0.1180	0.33
初期尤度		-1594.24		-1594.24		-1594.24		-1594.24		-1594.24		-1594.24	
最終尤度		-1086.53		-1086.53		-1096.32		-1096.32		-1093.28		-1093.23	
修正済み尤度比		0.315		0.315		0.309		0.309		0.311		0.310	
サンプル数		575		575		575		575		575		575	

で導入事例<sup>32),56)</sup>の多い混雑率指標（区間毎の混雑率と旅行時間に乗じて合算した指標）については、全時間帯でほぼ一樣な値のため選択肢間でのばらつきが小さく、パラメータが有意とならなかったため予め除外した。

全ての推定結果に共通に見られる点として、(1) *SDE* と *SDL* のパラメータの大小関係は、従来研究<sup>36),56),59)</sup>と同様（つまり、遅着の不効用の方が早着の不効用よりも影響が大きい）となっていること；(2) MNL と MXL のスケジューリングモデルパラメータは、それぞれの特定化の前でほぼ同一の推定値となっていること；(3) MXL における誤差要素の標準偏差は統計的に有意とならず、選択肢誤差相関は確認されなかったこと；が挙げられる。以下個別の特定化毎の特徴について考察する。

MNL1 及び MXL1 は、効用関数確定項を式 (4.1) によって特定化した場合の結果である。パラメータの符号条件は、確率分布  $\eta$  の標準偏差  $s$  を含め全て正であることが期待される。しかし両モデルとも、ダイヤからの乖離を明示的に考慮するために導入した *LB* のパラメータ推定値の符号が想定に反して負となり、乗車駅におけるダイヤからの遅れに対する利用者の不効用を表現できていない。これより、ダイヤからの乖離を表す変数を単純にモデルに導入しても、利用者の不効用を適切に表現できないことが示された。

次に、効用関数確定項を式 (4.2) により特定化した結果が、表 4.1 の MNL2 及び MXL2 の列である。パラメータの符号を確認すると、ダイヤからの乖離を表す到着遅延 *LD* は正となり全てのパラメータで符号条件を満たしていることが確認される。しなしながら、*LD* のパラメータは、両モデルとも統計的に有意とはならなかった。

最後に、表 4.1 の MNL3 及び MXL3 の列に、効用関数確定項として式 (4.3) を与えた場合のパラメータ推定結果を示す。全てのパラメータにおいて符号条件を満たし、ダイヤからの乖離を示す走行遅延  $RD$  のパラメータも統計的に有意となった。つまり、利用者が乗車中に発生する遅延に対して不効用が生じていることが示唆された。つまり、列車が遅延している状況下で乗車予定の 1 本前の列車に乗車できた場合でも、乗車中に遅延が生じなければ不効用とはならないといえる。3 分前後で後続列車が到着する高頻度路線を対象としているため、利用者自身が時刻表を意識した行動を取らず、乗車中に発生する遅延すなわち走行遅延が有意なパラメータとして推定されたのではないかと考える。

以上の結果を総合的に鑑み、効用関数確定項の特定化としては理論的に不整合とならず、かつ、いずれのスケジューリングモデルパラメータも統計的に優位となった式 (4.3) の結果を用いて、以後の分析を行うこととする。その際、誤差要素の標準偏差  $s$  も統計的に有意でなかったことから、実際的には通常の MNL によるパラメータ推定結果 (MNL3) を用いても大きな差異は生じないものの、以降で詳述する出発時刻選択モデルのキャリブレーションや利用者便益の試算において、MXL モデルを用いた計算手法を示すことには一定程度の意義があると考え、本研究では Mixed Logit モデルを用いた式 (4.3) の推定結果 (MXL3) を用いて以降の分析を進めることとする。

#### 4.1.6 現況再現性の確認とキャリブレーション

前節で推計した乗車時刻選択モデル (MXL3) を用いて出発駅別に各時間帯の選択比率を求め、カウント調査に基づく実績値との比較を行ったところ、RMSE が 3.2%、四分位範囲が 2.8% となった。また、約半数のサンプルで推計誤差が  $\pm 1.4\%$  以内（乗車旅客が 1,000 人いた場合に  $\pm 14$  人の誤差）に収まっていた。しかし、全時間帯の選択比率の合計は必ず 1 に等しくなるという制約があることから、大きな外れ値が存在した場合には他の時間帯の選択比率もその影響を受けるため、推計結果の現況再現性を少しでも上げておくことが必要である。そこで実績の選択確率に合わせるためのキャリブレーションを行う。具体的には、乗車駅別・時間帯別に集計シェアの実績値と予測値が合致するように定数項を各効用関数に導入する、いわゆる定数項補正<sup>60)</sup>を行う。

キャリブレーションでは、式 (4.3) の効用の確定項に乗車駅  $j$  と時間帯  $i$  毎の固有定数  $ASC_{ij}$  を導入し、乗車時刻選択モデルより推計された時間帯選択比率とカウントデータに基づく選択比率との差が 0 になるように  $ASC_{ij}$  を求める。具体的には、乗車駅  $j$  に対して、式 (4.7)

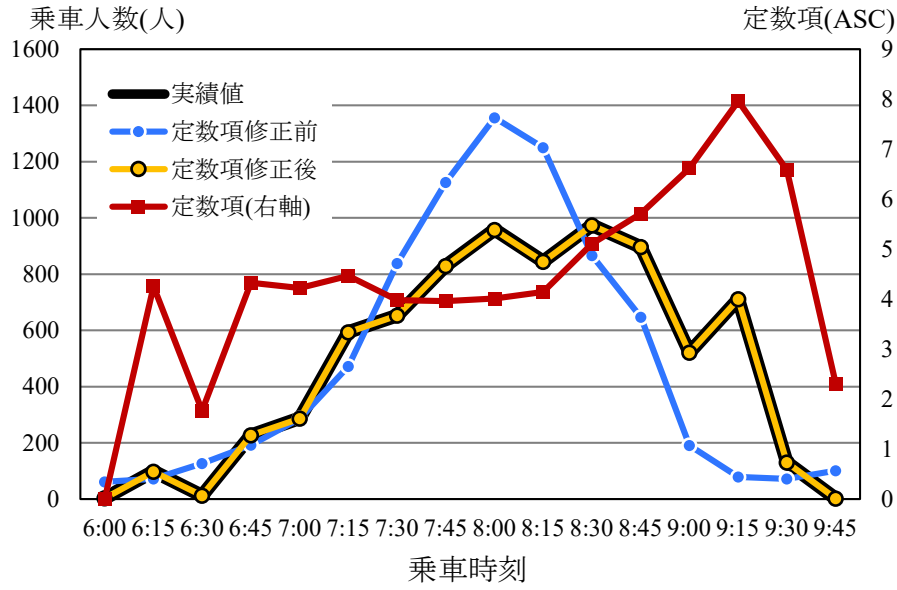


図 4.6: 池尻大橋駅時間帯別乗車分布

に示す 15 元の非線形連立方程式を解くことで  $ASC_{ij}$  のキャリプレート値を得る.

$$\begin{cases} \frac{1}{R} \sum_R \frac{1}{\sum_n r_n} \sum_n \frac{\exp(V_{2jn} + \eta_{2n} + ASC_{2j})}{\sum_i \exp(V_{ijn} + \eta_{in} + ASC_{ij})} r_n - S_{2j} = 0 \\ \frac{1}{R} \sum_R \frac{1}{\sum_n r_n} \sum_n \frac{\exp(V_{3jn} + \eta_{2n} + \eta_{3n} + ASC_{3j})}{\sum_i \exp(V_{ijn} + \eta_{in} + ASC_{ij})} r_n - S_{3j} = 0 \\ \vdots \\ \frac{1}{R} \sum_R \frac{1}{\sum_n r_n} \sum_n \frac{\exp(V_{16jn} + \eta_{15n} + ASC_{16j})}{\sum_i \exp(V_{ijn} + \eta_{in} + ASC_{ij})} r_n - S_{16j} = 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

ここで,  $r_n$  は大都市交通センサスマスターデータより求められる個人  $n$  の拡大係数である. また,  $i$  は時間帯,  $j$  は駅であり,  $S_{1j}, \dots, S_{16j}$  は, カウントデータに基づく選択比率の実績値である. Mixed Logit モデルには誤差相関を表わす  $\eta_n$  が含まれており, それに従う乱数を  $R$  回発生させた上で選択を推計し, さらに個人の拡大率を乗じて重みづけをした上で乱数発生回数で除して選択比率の推計値を定めている. なお, 選択可能な時間帯数は 16 であるが, 選択比率の実績値は必ず 1 に等しいという制約があるため, 冗長な方程式を 1 本 (選択肢 1 のものに相当) 除外した上で, 全ての  $j$  において最初の時刻選択肢の定数項を  $ASC_{1j} = 0$  に固定している. 式 (4.7) の非線形連立方程式をニュートン・ラプソン法により数値的に解き, 駅・時間帯別に  $ASC_{ij}$  を求めた.  $ASC_{ij}$  導入前後の選択確率を図 4.6, 図 4.7 に示す. どちらの駅でも  $ASC_{ij}$  導入前では 15 分あたり 600 人程度の誤差が生じていた. 時間帯別定数項の導入によって, 選択確率の実績値と一致していることが確認できた.

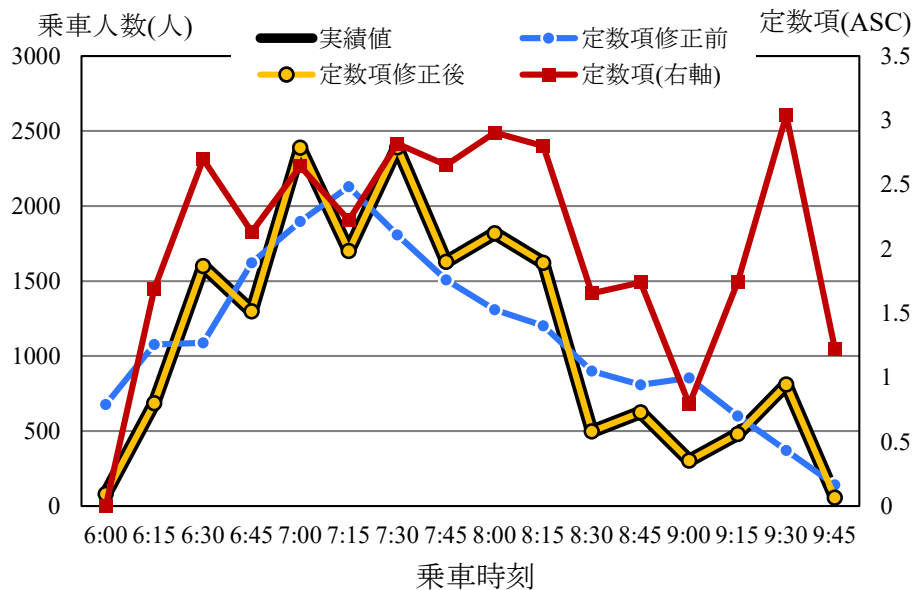


図 4.7: 中央林間駅時間帯別乗車分布

## 4.2 企業間取引に着目した始業時刻選択モデルの構築

### 4.2.1 使用データとその概要

2010 年実施の第 11 回大都市交通センサスより、各市区町村の始業時刻を抽出する。始業時刻は以下の条件を満たすサンプルを対象とする。

- 乗車時刻，降車時刻，始業時刻，イグレス所要時間が明確である。
- 1 回目の移動が定期利用かつ通勤目的である。
- 目的地が明確であり，かつ自宅から出発している。

以降の分析では，以上の条件を満たした 101,752 サンプルを拡大した 4,661,364 人を分析に用いる。なお，東京 23 区に通勤しているのは 3,312,882 人であった。また，自宅から出発している条件を加えた理由は，本研究が朝の通勤利用者が勤める企業の始業時刻を収集するためである。

企業取引関係の代理変数として産業連関表を活用する。大都市交通センサスの調査範囲である 1 都 3 県と茨城県が 2011 年にそれぞれ公表した産業連関表を利用する。具体的には，投入係数表(統合大分類)を用いる。ここで，投入係数とは，ある産業で 1 単位の生産を行うために必要な原材料等の単位を示したものである。

例として東京都の製造業，情報通信業，金融・保険業への投入係数を図 4.8 に示す。製造業であれば製造業，情報通信業であれば他産業である不動産業や製造業で生産された原料

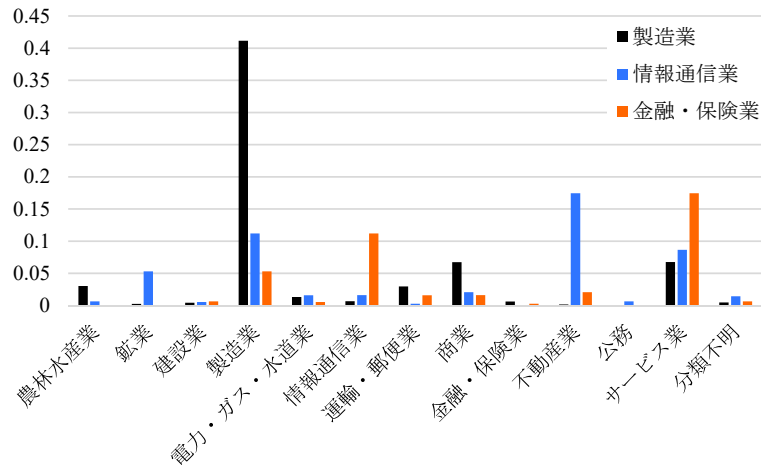


図 4.8: 投入係数例 (東京都)

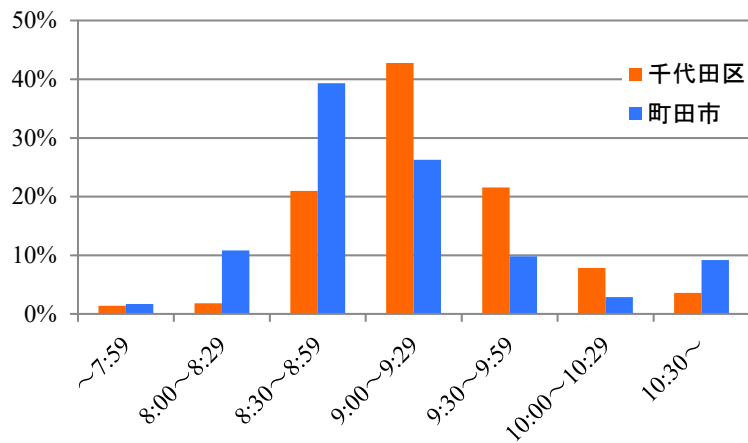


図 4.9: 千代田区と町田市の始業時刻分布

を用いて生産活動を行っている。産業間の取引関係を比率により示すことで、産業の集積関係のある地域の抽出ができる。

企業の基礎的な統計データとして、2012 年経済センサス活動調査<sup>61)</sup>の結果を用いる。具体的には「企業産業 (大分類), 単一・複数 (2 区分) 別企業等数, 事業所数, 従業者数, 売上 (収入) 金額, 費用, 付加価値額及び設備投資額一市区町村」のデータを用いる。経済センサスでは産業を 17 種類に分類しているが、産業連関表の 13 分類と対応させるため、企業産業大分類の「L 学術研究, 専門・技術サービス業」から「R サービス業 (他に分類されないもの)」までを合計してサービス業として分析を行っている。

#### 4.2.2 基礎集計結果

まず始業時刻に関する集計を行う。図 4.9 は千代田区と町田市の始業時刻分布を示している。町田市の始業時刻分布は 8:00~8:29 から立ち上がり、8:30~8:59 にピークとなるのに対し、千代田区の始業時刻分布のピークは 9:00~9:29 である。始業時刻分布は地域間で異なっていることが考えられるため、空間的な広がりについて確認する。大都市交通センサスから抽出したサンプルを用いて、地域ごとの時間帯別始業割合を示したものが図 4.10 から図 4.13 である。これは各市区町村の始業時刻について、7:30~10:30 まで 30 分間隔に 7 分類したときの 8:00~8:29、8:30~8:59、9:00~9:29、9:30~9:59 に始業する割合である。集計したサンプルは、大都市交通センサスの調査範囲のうち、始業時刻のサンプルの少ない自治体を除外した 143 市区町村である。

始業時刻のピークは 8:30~9:29 の間である地域が多い。時刻順に見ると、8:00 過ぎにあたる図 4.10 では、郊外の一部地域の始業割合が 20%を超えている。図 4.11 の時間帯になると多くの地域で始業割合が 20%を超えている。特に郊外部では 40%を超えている地域も散見される。9:00 を過ぎた頃になると（図 4.12 参照）、都心 3 区や副都心 3 区で始業のピークを迎える。都心部は図 4.13 のように他地域がほとんど始業した後になってもなお始業している様子が確認できる。このように始業割合を東京圏全体で見ると、郊外部ほど始業時刻の立ち上がりが早く、都心の中心部に向かうにつれてピークが遅くなっている。また、隣接する地域間に着目すると、始業割合が類似している。つまり、空間的な視点から見た始業時刻の特徴として、近隣の自治体と始業時刻を揃える傾向と、都心部に向けて始業時刻が遅くなっていく傾向の 2 点が考えられる。

続いて、産業分布と始業時刻に関する集計結果を示す。産業分布に関しては様々な示し方があるが、本研究では収入額に対する割合を指す。経済センサスより、全産業総収入額に対する産業別割合を図 4.14 に示す。ここでは中央区と港区、日野市を例に取り上げる。中央区と隣接する港区の産業分布は商業やサービス業に偏っており類似している。一方で日野市は製造業の割合が突出している。これらの地域の始業時刻を示したものが図 4.15 である。中央区と港区の産業分布同様に始業時刻分布も類似しているが、日野市の始業時刻分布はやや早めにシフトしている。このように産業分布と始業時刻との間にも関係性が伺える結果となった。

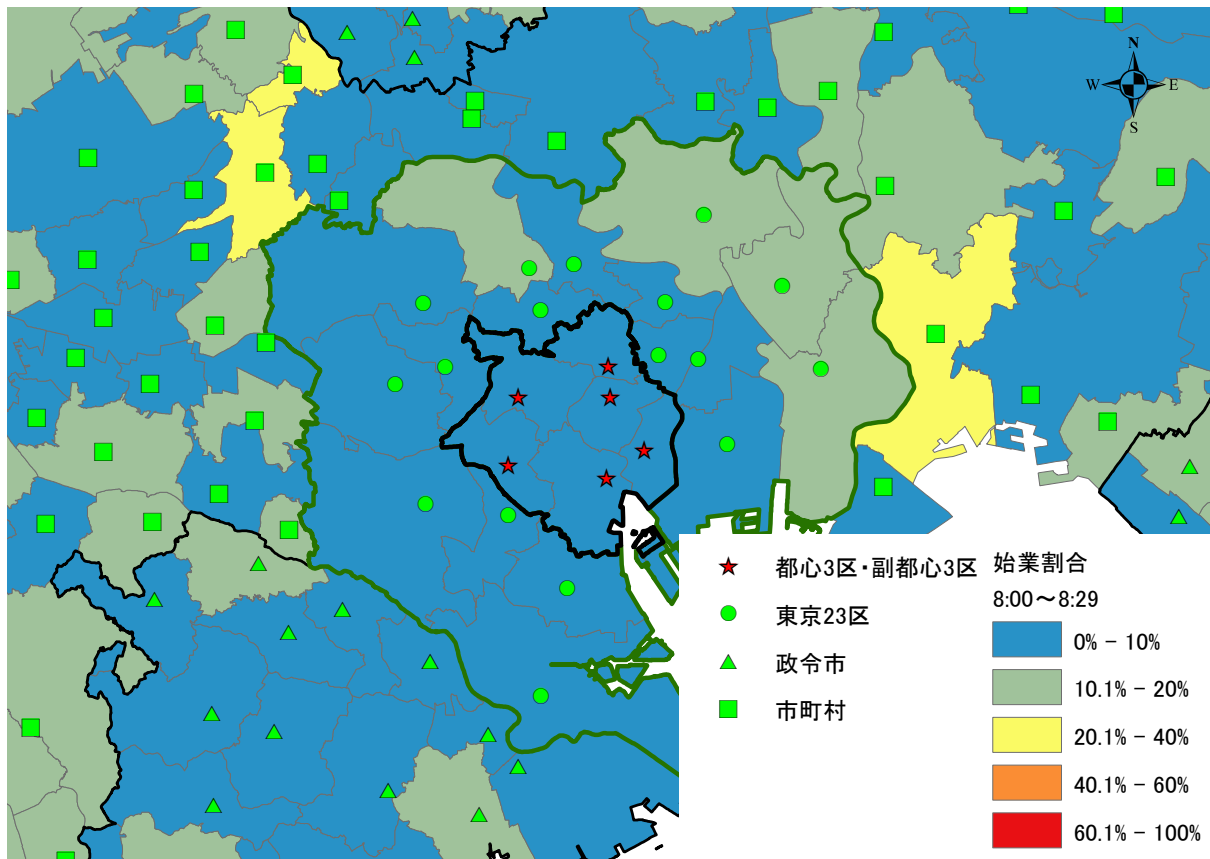


図 4.10: 8:00-8:29 の始業割合

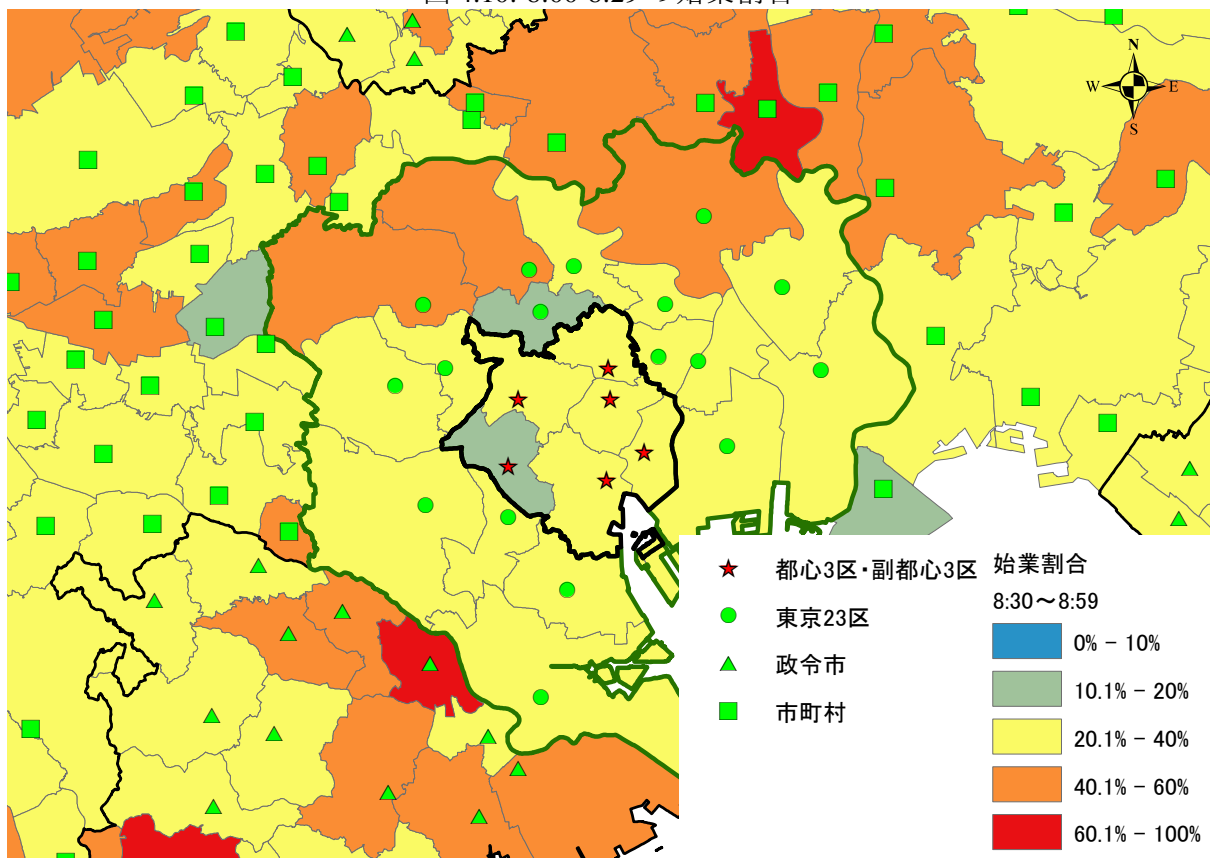


図 4.11: 8:30-8:59 の始業割合



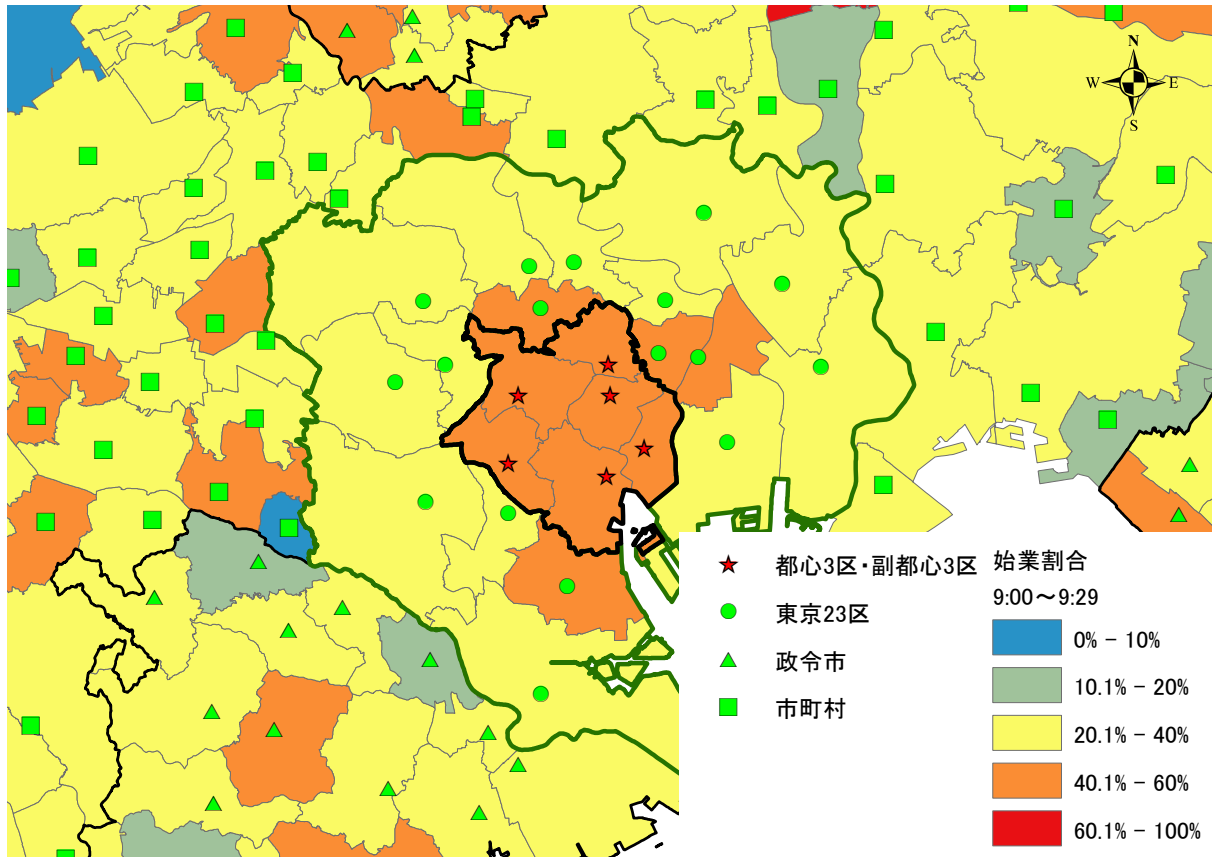


図 4.12: 9:00-9:29 の始業割合

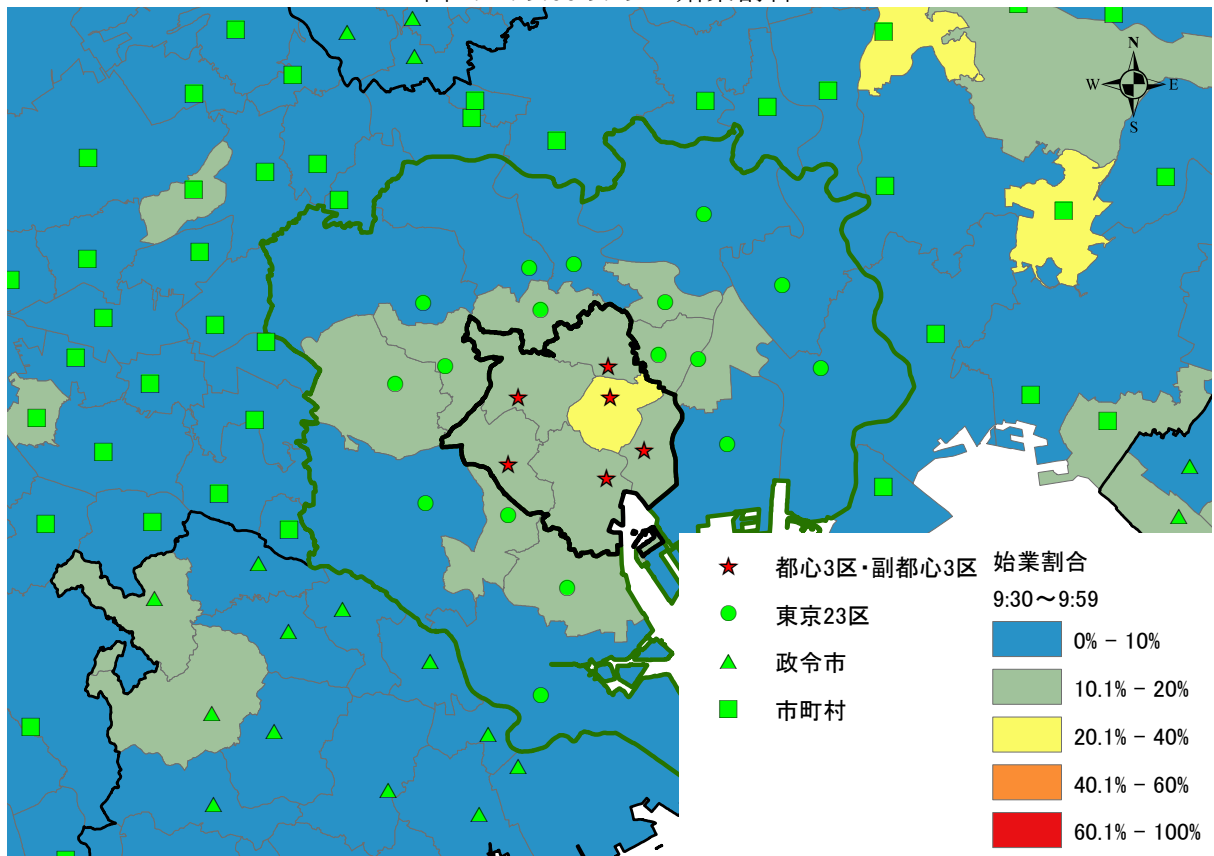


図 4.13: 9:30-9:59 の始業割合

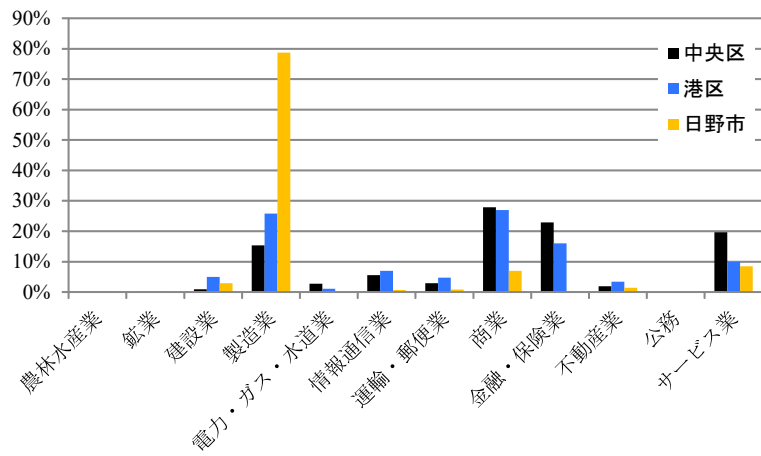


図 4.14: 中央区，港区，日野市の産業分布

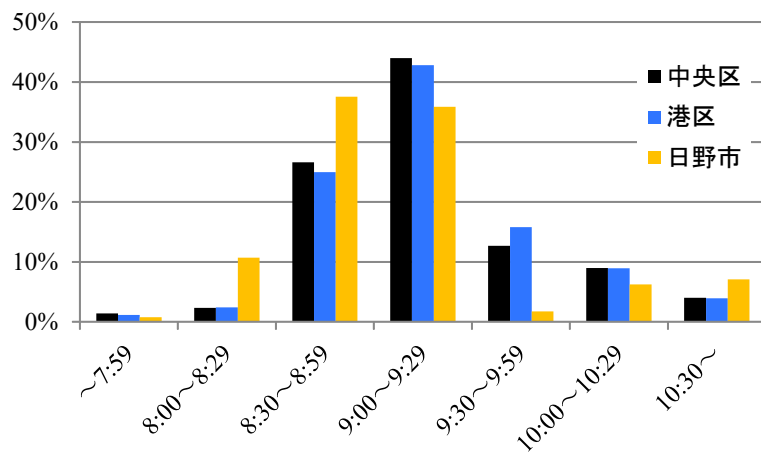


図 4.15: 中央区，港区，日野市の始業時刻分布

### 4.2.3 始業時刻選択モデルの基本的な考え方

本研究では、プレイヤーは戦略的な相互作用の下で利得最大化する選択を行うと仮定し、始業時刻 7:30～10:30 までを 30 分間隔で離散化した 7 選択肢の始業時刻選択行動のモデル化を行う。具体的には、地域別時間帯別の利得関数を構築し、その中に時間集積を表す変数を導入することで、地域間の相互作用を考慮した始業時刻選択行動を表現する。

地域  $i$  に属する企業が始業時刻  $t$  に始業する割合  $p_{it}$  は式 (4.8) のようなロジット型 (誤差項に独立かつ同一なガンベル分布を仮定) の式とし、始業時刻別の利得関数  $\pi_{it}$  として以下の式 (4.9) を定式化する。

$$p_{it} = \frac{\exp(\pi_{it})}{\sum_{t=1}^7 \exp(\pi_{it})} \quad (4.8)$$

$$\pi_{it} = \alpha K_i L_{it} + \beta I_{it} \quad (4.9)$$

ここで  $K_i$  は地域  $i$  の資本、 $L_{it}$  は地域  $i$  の時刻  $t$  における労働、 $I_{it}$  は時間集積を表す変数、 $\alpha$  ならびに  $\beta$  はパラメータである。式 (4.9) はコブ＝ダグラス型関数に時間集積項を加えた構造を仮定している。

労働の項  $L_{it}$  に時刻  $t$  を考慮した理由は、自社の始業時刻における関連企業の始業割合に応じて、取引可能性の有無に差が生じることで生産性が変化すると考えたためであり、具体的には式 (4.10) のように表現する。

$$L_{it} = L_i \sum_{j=1}^J \frac{q_{jt} L_j}{d_{ij}} \quad (4.10)$$

$$q_{jt} = \sum_{k=1}^7 p_{jk} (8 - |t - k| * 0.5) \quad (4.11)$$

式 (4.10) の  $L_j$  は地域  $j$  の労働、 $d_{ij}$  は地域  $i, j$  間の距離 ( $i = j$  の場合は 0.5km) である。 $q_{jt}$  は、他地域  $j$  と時刻  $t$  に始業する地域  $i$  との重複する業務時間を表している (式 (4.11) 参照)。本研究では業務時間を全地域共通に 8 時間とし、式 (4.11) の括弧内にて、他地域  $j$  で時刻  $k$  に始業した場合に時刻  $t$  に始業した企業と重複する業務時間を表現している。また  $p_{jk}$  は他地域  $j$  で時刻  $k$  に始業する割合を表している。したがって、式 (4.11) の値は、始業時刻  $t = k$  かつ始業割合  $p_{jk} = 1$  のとき最大値  $q_{jt} = 8$  (時間) をとる。本研究で定式化しているモデルは始業時刻選択モデルであるが、項  $q_{jt}$  の導入によって業務時間の重複を考慮した定式化を行っている。

時間集積変数  $I_{it}$  は、関連企業の始業時刻を考慮する戦略的相互関係を示す変数である。この相互関係が企業の集合体としてみた地域間にも同様に作用している考えのもと、自地

域が関係性のある地域の始業時刻を考慮した上で自地域の始業時刻を決定する戦略的行動を表現する．本研究では，自地域との関係性を空間的な近接性と経済的な近接性の両面を考慮し，時間集積変数  $I_{it}$  を式 (4.12) のように定式化する．

$$I_{it} = \sum_{j=1}^J \frac{p_{jt}s_{ij}}{d_{ij}} \quad (4.12)$$

ここで， $p_{jt}$  は他地域  $j$  の始業時刻  $t$  の選択割合， $s_{ij}$  は当該地域  $i$  と他地域  $j$  との経済的な近接性を示す指標である． $d_{ij}$  は地域  $ij$  間の距離 ( $i = j$  の場合は 0.5km) とした．これらの変数は  $i, j \in J$  である．経済的な近接性を示す指標  $s_{ij}$  は以下の手順により算出する．

$$IR_{in} = \frac{IN_{in}}{AIN_i} \quad (4.13)$$

$$RM_{in} = \sum_{m=1}^{13} IR_{im} IC_{mn} \cdot pref \quad (4.14)$$

$$s_{ij} = 1 - \left( \sum_{n=1}^{13} (RM_{in} - IR_{jn})^2 \right) \quad (4.15)$$

ここで， $AIN_i$  は地域  $i$  の総収入額， $IN_{in}$  は地域  $i$  産業  $n$  の収入額， $IR_{in}$  は地域  $i$  産業  $n$  全産業総収入額に対する産業別割合， $IC_{mn} \cdot pref$  は都県  $pref$  ごとの産業  $m$  から産業  $n$  への投入係数， $RM_{in}$  は地域  $i$  の産業  $n$  の生産に必要な原材料を表す．

この指標  $s_{ij}$  は，自地域の生産に必要な産業分布が，他地域の産業分布と比較した際の類似度を示した指標である．もし両者が一致していた場合には， $s_{ij} = 1$  となる．本来，生産に必要な原材料は，様々な場所から仕入れているため，地域間の産業構成の類似性で評価出来ない点が存在するが，市区町村間における取引金額に関するデータが無いため，本研究ではその代理変数として採用している．

#### 4.2.4 構造推定によるパラメータ推定手法

本研究の始業時刻選択モデルの利得関数である式 (4.9) に式 (4.12) と式 (4.10) を代入すると，次の式 (4.16) のようになる．

$$\pi_{it} = \alpha K_i L_i \sum_{j=1}^J \frac{p_{jt} L_j}{d_{ij}} + \beta \sum_{j=1}^J \frac{p_{jt} s_{ij}}{d_{ij}} \quad (4.16)$$

パラメータ推定にあたり， $K_i$  と  $L_i$  はそれぞれ，経済センサスより各自治体の有形固定資産，従業員数を全産業で合計した値を用いる．始業時刻の推定対象は，大都市交通センサ

スの調査範囲である1都3県に茨城県を加えた自治体のうち、始業時刻のサンプル数の少ない自治体を除外した143市区町村とする。

式(4.9)の利得関数は、労働の項 $L_{it}$ と時間集積変数 $I_{it}$ に、他地域の始業時刻選択確率 $p_{jt}$ が含まれた入れ子構造となっているため、一般的な尤度関数を正確に定義できない。そこで本研究では、構造推定によって時間集積変数のパラメータ $\alpha, \beta$ を推定する。

構造推定とは、分析の対象とする意思決定主体が、特定の経済理論モデルの中で最適化行動をとっており、観測されたデータが最適化行動や均衡状態を表現している前提の下で、モデルのパラメータを推定することである。本研究では、柳沼・福田<sup>62)</sup>、松村ら<sup>63)</sup>が用いている疑似最尤法の1つであるNested Pseudo Maximum Likelihood(以降NPL)<sup>64)</sup>を適用する。

NPLは、他者の選択割合の初期値に観測値などを与え尤度関数を定義したものを疑似尤度として定義し、繰り返し計算を行うことで、疑似尤度を更新しながらパラメータを推定する手法である。推定するパラメータベクトル $\theta$ 、各地域の選択確率ベクトル $p_{it} = \frac{\exp(\theta, P_{it})}{\sum_t \exp(\theta, P_{it})} = F(\theta, P_{it})$ ,  $P_{it} = \sum_{j \in J} p_{jt}$ , 対数尤度関数 $LL(\theta, P) = \sum_t \sum_{i \in I} \phi_{it} \ln(F(\theta, P_{it}))$ , ( $\phi_{it}$ は実際の選択割合)とする。推定は以下のステップで行う。

**Step1:**  $P$ に初期値(観測値) $P^0$ を与える。

**Step2:** 初期値を用いて疑似尤度を最大化するパラメータを推定する。それを $\hat{\theta}^1 = \arg\max_{\theta} LL(\theta, P)$ とする。

**Step3:** Step2で求められたパラメータ $\hat{\theta}^1$ と $P^0$ を用いて、選択割合を算出し、 $\hat{p}^1 = F(\hat{\theta}^1, P^0)$ とする。

**Step4:** Step3で求められた $\hat{p}^1$ より $\hat{P}^1$ を求め、それを新たな初期値に用いて、Step2とStep3の手順をパラメータが収束するまで繰り返す。

なお、パラメータ推定の収束条件は、算出されたパラメータと、1ステップ前のプロセスで計算されたパラメータの差の絶対値が $10^{-5}$ 以内とした。

#### 4.2.5 始業時刻選択モデルのパラメータ推定結果

式(4.16)のパラメータを推定した結果を示す。なお、式(4.16)の各項は地域によって考慮するレベルが異なると考えられる。従ってパラメータ $\alpha, \beta$ は「東京23区」、「政令市の区と東京23区の隣接市」およびそれら以外の「市町村」にパラメータを構造化して推定した。

表 4.2: パラメータ推定結果

	変数	パラメータ	t値
$\alpha_1$	東京23区	1.010	0.57
$\alpha_2$	政令市と23区隣接市	-1.330	-0.10
$\alpha_3$	市町村	-4.110	-0.24
$\beta_1$	東京23区	0.421	2.78 *
$\beta_2$	政令市と23区隣接市	0.587	5.29 *
$\beta_3$	市町村	0.681	5.81 *
	初期尤度	-278.27	
	最終尤度	-221.75	
	修正済み尤度比	0.181	
	サンプル数	143	

\* 1%有意

推定結果を表 4.2 に示す。  $\alpha$  は東京 23 区のパラメータが正となり、それ以外のパラメータの符号は負となったがパラメータは有意に推定されなかった。  $\beta$  はすべての地域においてパラメータの符号が正となり、周辺地域のパラメータが他地域と比較して大きな値となった。空間的・産業的に近い地域と始業時刻を同調させる傾向があり、それが都心部よりも周辺地域のほうが大きくなることが示された。パラメータ収束時の始業時刻分布は、すべての地域で 8:30～8:59 に始業する割合が最も多い結果となった。本研究のモデル構造が集積による正の効果のみを捉えており、時間集積による混雑に代表される負の効果を含んだ定式化をおこなっていないため、全地域で同一時間帯に始業時刻が集中する結果となった。また 8:30～8:59 に収束した要因は、使用データの初期値の始業時刻分布が 8:30～8:59 に始業のピークを迎える地域が多くを占めていたためである。今回のモデルでは全地域が同一時間帯の始業となるケースが最大利得となるため、均衡解は選択肢数と同一の 7 つある。仮に始業時刻のピークを一律で 30 分遅らせたサンプルでパラメータ推定を行った場合、9:00～9:29 に始業する割合が最も多くなることが確認できた。モデル全体の全体の適合度を示す尤度比は 0.183 であり良好とはいえないが、時間集積によって始業時刻が集中する様子が確認できた。

#### 4.2.6 定式化における議論

企業の始業時刻選択モデルについて、一般に公開しているマクロなデータを用いて定式化をおこなってきた。企業をまとめた地域という単位で市区町村が利得を最大化する仮定のもと、式(4.16)にてパラメータ推定をおこなった。しかしパラメータが有意に推定されず尤度比も良好とはいえない結果となっており、議論の余地があると考えている。まず、意思決定主体が市区町村としたマクロなモデルとしている点である。個々の取引関係を示すオープンデータは無いことが最大の要因であるが、例えば産業別に利得関数を設定することで、相互関係が求められる業種とそうでない業種を区別した現状よりも踏み込んだ分析が行える余地はある。

次に、企業間の相互関係の表現方法である。本研究では、モノの取引関係を示す産業連関表を用いて地域間の経済的な近接性を表現した。このほかにも相互関係を示す手法は挙げられる。例えば、PT調査や大都市交通センサスの業務トリップに着目して、人的交流の強い地域間で始業時刻を同調させる行動をとると仮定する等である。さらに企業間においても取引の売買の関係から始業時刻を同調させる働きと、取引先の始業の前には準備を済ませるため少し早めに始業する働きの双方があると考えられる。後者の場合には企業間あるいは産業間での取引量による上下関係を築くと、特定時間帯への始業時刻の集中は防げると考える。

3つ目は、定式化したモデルの政策への展開方法である。想定しているのは、特定の地域・時間帯に始業する企業に対して混雑税のようなプライシング制度を想定している。式中での置き方としては、利得関数  $\pi_{it}$  に混雑税  $-\gamma C_{it}$  をピーク時間帯の核となる地域に与えることを考えている（ $\gamma$ はパラメータ）。その地域とのつながりが深い企業は就業時間を合わせるために始業時刻を変更させることが想定され、鉄道利用者のピーク需要を分散することにつながると考える。6章にて都心の数地域に混雑税を導入した場合の始業時刻変動、乗車時刻変動、そして列車遅延への影響を分析する。

## 第5章 時間信頼性評価価値の算出

### 5.1 旅行時間信頼性評価に関する手法の整理

都市鉄道における列車の遅延は、日々の旅行時間変動の増大をもたらす、延いてはそれが利用者の移動コストの増加をもたらす<sup>17)</sup>。様々な列車遅延抑止施策は、遅延の平均的な程度を低減させるだけでなく、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。このような旅行時間信頼性向上の便益は、道路交通の場合には利用者便益全体の数割程度（～30%）を占める場合もあることが指摘されている<sup>65)</sup>。

以下では、旅行時間信頼性の経済評価に必要な原単位である旅行時間変動価値 (VTTV) の推計方法並びに利用者便益評価に関する基本的な考え方を概説した上で、都市鉄道遅延の経済評価への適用可能性について概説する。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.<sup>36)</sup> や福田<sup>66)</sup> が詳しい。都市鉄道の列車遅延に起因する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拡張的に援用できると考えられる。

#### 5.1.1 平均一分散アプローチ

時間信頼性価値の計測方法論の中でも、実務における適用例が多いものが平均一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直接効用関数  $U$  に引数として含まれる状況を表したものであり、 $U$  を以下のように特定化する。

$$U = -\delta C - \zeta E[T] - \rho \sigma_T \quad (5.1)$$

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）、 $\sigma_T$ : 旅行時間の標準偏差、 $\delta$ ,  $\zeta$ ,  $\rho$ : 各要素の限界効用（符号はいずれも正）である。この定式化のもとでは、限界効用の比  $\rho/\delta$  が旅行時間変動価値を与える<sup>67)</sup>。

式 (5.1) から明らかなように、平均一分散アプローチは利用者のコスト（効用）の定義が明快かつ簡潔であることから実務への適用が多い。しかし、直接効用の引数に旅行時間



の平均や標準偏差を含んでおり、交通手段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ミクロ経済学的基礎は明確ではない<sup>36),66)</sup>。

### 5.1.2 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短期的な利用者行動変化とされる出発時刻選択行動に着目したモデル化がスケジューリングアプローチ<sup>30),59)</sup>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1990年代後半以降進展した。

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 (Preferred Arrival Time:  $PAT$ , 通常は0に基準化) に対して、出発時刻  $t_D$  並びに到着時刻  $a$  のもとで下記に示す直接効用関数 (利用者選好) を仮定する。

$$U = -\delta C - \alpha(a - t_D) - \beta \min(0, a) - \gamma \max(0, a) - \theta D_L \quad (5.2)$$

ここで、 $\alpha$ : 旅行時間 ( $T = a - t_D$ ) の限界効用、 $\beta$ : 早着時間 (Schedule Delay Early:  $SDE := \min(0, a)$ ) の限界効用、 $\gamma$ : 遅着時間 (Schedule Delay Late:  $SDL := \max(0, a)$ ) の限界効用、 $\theta$ : 遅刻ダミー  $D_L := 1(a > 0)$  の限界効用である (符号はいずれも正)。なお、項“ $-\theta D_L$ ”は含まれない場合もある。

ここで、旅行時間  $T$  がある確率分布に従うと仮定して期待効用  $EU^*$  を求めると、次式が導かれる<sup>34),35)</sup>。

$$EU^* = -\delta C - \alpha E[T] - \beta E[SDE] - \gamma E[SDL] - \theta P_L \quad (5.3)$$

ここで、 $P_L$  は最適遅着確率 (Optimal Probability of Being Late)<sup>36)</sup> と呼ばれる。旅行時間変動に関する情報と希望到着時刻に関する情報が得られている場合には、式 (5.3) の未知パラメータを離散選択モデル等を用いて推計することにより、旅行時間変動価値 (早着の場合  $\beta/\delta$ , 遅着の場合  $\gamma/\delta$ ) を求めることができる。

### 5.1.3 統合アプローチ

Noland and Small<sup>34)</sup> は、限定的な条件、具体的には「旅行時間の確率分布が出発時刻に依存せず、かつ、その分布が一様分布もしくは指数分布である場合」に、式 (5.3) に対応する期待間接効用関数が平均一分散モデルになることを示した。すなわち限定的な条件下では、平均一分散アプローチとスケジューリングアプローチは等価になる。さらに Fosgerau and

Karlström<sup>68)</sup> は、より緩い条件下における両アプローチの等価性を証明した．これを統合アプローチと称する<sup>69)</sup>．

旅行時間の確率的変動を  $T = \mu + \sigma X$  と表す．ここで  $\mu$  は平均旅行時間、 $\sigma$  は旅行時間の標準偏差である．また  $X$  は基準化旅行時間<sup>69),70)</sup> と呼ばれ、その確率密度関数を  $\varphi$ 、分布関数を  $\Phi$  と表す．このとき、式 (5.3) に対する期待効用最大化により得られる間接期待効用は、式 (5.4) のようになる<sup>68)</sup>．

$$EU^* = -\delta C - \alpha\mu - \left\{ (\beta + \gamma) H\left(\Phi, \frac{\beta}{\beta + \gamma}\right) \right\} \sigma \quad (5.4)$$

ここで  $H(\cdot)$  は平均遅れ要素 (Mean Lateness Factor)<sup>71)</sup> と呼ばれ、次式で定義される．

$$H\left(\Phi, \frac{\beta}{\beta + \gamma}\right) := \int_{1 - \frac{\beta}{\beta + \gamma}}^1 \Phi^{-1}(v) dv \quad (5.5)$$

すなわち  $H(\cdot)$  は、基準化旅行時間の確率分布  $\Phi$  と効用パラメータ  $(\beta, \gamma)$  が与えられれば定数となる．また、式 (5.5) の積分の下限を規定する定数  $\beta/(\beta + \gamma)$  は、先述の最適遅着確率に対応している<sup>36)</sup>．

この統合アプローチにおいて、旅行時間変動価値は  $(\beta + \gamma)H(\cdot)/\delta$  で与えられる．また、旅行時間変動の尺度としては標準偏差が用いられる．

Fosgerau and Fukuda<sup>70)</sup> は、統合アプローチの前提条件が現実にも妥当であることを実際の旅行時間データを用いて明らかにしている．また福田<sup>65)</sup> は、統合アプローチにより旅行時間変動に起因するコストを試算し、総移動コストの2~3割になることを示唆している．しかし、統合アプローチを用いて旅行時間変動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形状の情報も必要である<sup>72),73)</sup> ことなど、実用上の課題が残されている．

#### 5.1.4 一般スケジューリング選好アプローチ

Fosgerau and Engelson<sup>74)</sup>、Engelson<sup>75)</sup> は、より一般的なスケジューリング選好を仮定した旅行時間変動価値に関する一般モデルを提案した．本研究ではこれを一般スケジューリング選好アプローチ（一般アプローチ）と称する．これは、Vickrey<sup>76)</sup> によって古くに提案されていた「旅行者は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出発時刻を決める」という状況を直接的に記述するモデルである．実は、先述のスケジューリングアプローチと統合アプローチの利用者選好は、自宅滞在に対

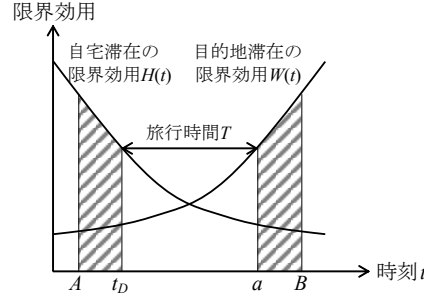


図 5.1: 一般スケジューリング選好アプローチ

する限界効用と目的地滞在に対する限界効用がそれぞれ一定と仮定した場合における一般アプローチのスケジューリング選好と解釈することができ，その場合 “Step Model” と称されることもある<sup>72)</sup>。

一般アプローチでは，通勤者の自宅滞在限界効用を  $H(t)$ ，目的地滞在限界効用を  $W(t)$  とし，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直接効用関数を次式で与える（図 5.1）。

$$U = -\delta C + \int_A^{t_D} H(t)dt + \int_a^B W(t)dt \quad (5.6)$$

ここで  $A, B$  は，それぞれ出発時刻選択分析の開始・終了時刻である．図 5.1 より，効用が最大化される状況では， $a = t_D + T$  が成り立つことが分かる．

このように一般アプローチでは滞在時間の限界効用が時刻に応じて可変的であることを想定している．Fosgerau and Engelson<sup>74)</sup> は，限界効用が線形に時変する “Slope Model” の解析を行っている．Slope Model では， $H(t_D) = \beta_0 + \beta_1 t_D$ ， $W(a) = \gamma_0 + \gamma_1 a$  という特定化がなされ，直接効用関数（相対値）は，以下のように表される．

$$\begin{aligned} U(t_D, a) &= -\delta C - \int_{t_D}^0 (\beta_0 + \beta_1 t)dt - \int_a^0 (\gamma_0 + \gamma_1 t)dt \\ &= -\delta C - (\gamma_0 - \beta_0)t_D + (\beta_1 - \gamma_1)\frac{t_D^2}{2} - \gamma_1 t_D T \end{aligned} \quad (5.7)$$

ここで， $\beta_0, \beta_1, \gamma_0, \gamma_1$  は係数である．旅行時間  $T$  が確率的に変動するとき，期待効用最大化問題を解いて得られる間接期待効用は次式で表される<sup>74)</sup>。

$$EU^* = -\delta C - \beta_0 \mu - \frac{\beta_1 \gamma_1}{2(\beta_1 - \gamma_1)} \mu^2 - \frac{\gamma_1}{2} \sigma^2 \quad (5.8)$$

このとき，旅行時間信頼性価値は  $\frac{\gamma_1}{2\sigma}$  で与えられる．また，統合アプローチと異なり，旅行時間変動の尺度が分散  $\sigma^2$ （式 (5.8) 第四項）であることも確認される．

このように、式(5.8)の一般アプローチは式(5.4)の統合アプローチと異なり、移動費用（間接期待効用）や旅行時間変動価値を求めるにあたって旅行時間分布の形状に関する情報を必要とせず、二次のモーメントまでの情報が分かれば十分であり、操作性に優れている。しかし、Xie and Fukuda<sup>56)</sup>やXiao and Fukuda<sup>73)</sup>で示されたように、離散選択モデルを用いた実証分析ではStep Modelに比べてSlope Modelの適合度は必ずしも高くなく、推定結果も不安定になる場合が多い。これは主に、一般アプローチでは希望到着時刻(PAT)の利用を陽に想定しておらず、パラメータ推定においてその情報を用いていないためと考えられる<sup>1)</sup>。

### 5.1.5 利用者便益の算出

以上で概説してきた各アプローチについて、施策前後における交通量と一般化費用（〔間接期待〕効用）の値が得られていれば、推定された旅行時間変動価値と組み合わせることにより、総旅行時間の変化あるいは需要曲線を線形近似した台形公式によって利用者便益を算出することができる<sup>65),78),79)</sup>

あるいは、離散選択モデルの期待最大効用（例．ログサム変数）<sup>80)</sup>の概念を各アプローチから得られた間接期待効用に対して適用し、消費者余剰変化を求めることによって、利用者便益を直接算出することもできる。

### 5.1.6 都市鉄道評価における留意点

以上で概説した旅行時間変動価値計測の方法論を都市鉄道の列車遅延評価に適用するにあたっての留意点は、以下のとおりである。

第一に、道路交通と異なり、鉄道のような公共交通では、サービスの提供間隔(Headway)は通常は時刻表等に準じて離散的になり、標準的な出発時刻選択モデルの想定に反する。これに対し、サービスの間隔を明示的に考慮した旅行時間変動価値の理論的導出も行われている<sup>81)</sup>が、首都圏の都市鉄道のような高頻度運行のシステムの場合、実証分析で設定する時刻選択肢の時間幅を踏まえると、サービス間隔については連続時間近似しても大きな影響は無いと考えられる<sup>2)</sup>。

第二に、都市鉄道では、時刻表で定められた出発時刻・到着時刻の差として、時刻表上の旅行時間が定められている。したがって、道路交通とは異なり、時刻表上の旅行時間（停車

<sup>1)</sup>すなわち一般アプローチは、業務開始時刻等が厳密に定まっていないFlex Time Travelerを想定したモデルであると解釈することもできる<sup>77)</sup>。

<sup>2)</sup>実際、首都圏鉄道を対象とした既存研究<sup>31),32),56)</sup>でも、そうした仮定の下で実証分析が行われている

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）からの乖離にも着目する必要がある。このとき、道路交通における平均旅行時間の概念が“平均遅れ時間”に、また、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<sup>69),82)</sup>。

第三に、都市鉄道では時刻表の列車の到着時間と出発時刻の乖離を移動費用の要素として評価する必要がある。例えば Bates et al.<sup>36)</sup> は、スケジューリングアプローチに降車駅の到着遅延時間 (Lateness at Destination: *LD*) を説明変数とすることでダイヤからの遅れの影響を考慮し、Stated Preference (SP) データを用いて旅行者の希望到着時刻 (*PAT*) に対する早着時間 (*SDE*) の限界価値、遅着時間 (*SDL*) の限界価値、並びに、到着遅延 (*LD*) の限界価値を推定している。また Batley and Ibáñez<sup>83)</sup> は、通勤鉄道を対象に図 5.2 に示す旅行時間の構成要素を考え、平均一分散アプローチのもとで出発時刻選択モデルを構築している。そして、乗車駅の出発遅延時間 (Lateness at Boarding: *LB*) と到着遅延時間 (*LD*) を説明変数とし、SP データを用いて時刻表からの遅れの影響を考慮してモデルの推定を行っている。

以上の鉄道を対象とした旅行時間変動価値に関する既存研究はいずれも SP データを用いており、通勤者の実行動 (Revealed Preference: RP) データを用いた研究は少ない<sup>3)</sup>。特に、定時性を評価するにあたり日々変動する列車の運行実績データを用いた研究は見られない。出発遅延や到着遅延の影響を考慮せずに定時性評価を行うと、「鉄道が遅れて乗車駅に到着し、その後回復運転によって旅行時間を多少回復させて降車駅に若干の遅延で到着するような状況」において定時性改善の経済便益を過大に推計する可能性がある。こうした点に配慮した新たな評価モデルの構築が必要である。

本研究では今回取り上げた手法のうち、理論的整合性と分析結果の安定性の観点からスケジューリングアプローチを採用する。すでに 4 章で列車遅延を明示的に考慮した乗車時刻選択モデルを構築し（式 (4.3)）、統計的に整合性のある有意なパラメータを得ている。この結果を用いて旅行時間変動価値の算出をおこなう。

## 5.2 旅行時間変動価値の算出

本節では、4.1 節で推定された MXL3 のパラメータに基づいて、旅行時間変動価値を算出する。スケジューリングアプローチの場合、旅行時間変動価値は単一の値として求まらず、

<sup>3)</sup>筆者らが知る限り、RP データを用いた鉄道の列車遅延評価の研究として、Kato et al.<sup>84)</sup> による出発時刻選択を連続時間モデルの研究が挙げられるが、ダイヤ制御された鉄道特有の出発遅延や到着遅延は変数として組み込まれていない。

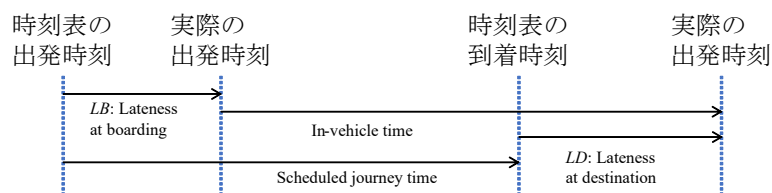


図 5.2: 遅れに着目した鉄道旅行時間の構成要素

表 5.1: 旅行時間変動価値の算出結果

変数	算出式	旅行時間変動価値
早着時間 $SDE$ (分)	$\beta/\alpha \times \omega$	14.5(円/分)
遅着時間 $SDL$ (分)	$\gamma/\alpha \times \omega$	30.8(円/分)
遅刻確率 $P_L$ (%)	$\theta/\alpha \times \omega$	7.3(円/%)
走行遅延 $RD$ (分)	$\lambda/\alpha \times \omega$	45.6(円/分)

早着時間，遅着時間，到着遅延等の限界効用と費用の限界効用の比率として与えられる．先述の通り，構築したモデルには旅行費用の変数が導入されていない．そのため，各パラメータを平均旅行時間のパラメータで除した後に，国土交通省鉄道局のマニュアル<sup>85)</sup>で用いられている時間価値 $\omega = 40$ （円/分）を乗じて各旅行時間変動価値を算出することとした．

算出結果を表 5.1 に示す．早着時間の 1 分減少は 14.5 円．同じく遅着時間の 1 分減少は 30.8 円，遅刻確率の 1%減少は 7.3 円，走行遅延の 1 分減少は 45.6 円の価値に相当するという推計結果となった．また，早着時間と遅着時間の大小関係は既存研究<sup>36)</sup>と同様に遅着時間の方が大きい結果となった．

## 第6章 シミュレーションによる列車遅延対策効果の検討

### 6.1 シミュレーションシステムで再現可能な遅延対策の整理

#### 6.1.1 鉄道事業者11社を対象とした遅延対策に関するインタビュー調査結果

1章で示したインタビュー調査で明らかになった遅延対策を表6.1に示す。表中のA~Kがそれぞれの鉄道事業者を指している。遅延対策は、乗降時間減少に寄与する遅延対策、走行時間減少に寄与する遅延対策、ダイヤ設計の工夫、需要の分散に分けられた。各取り組みの詳細については1章に示しているので参照いただきたい。ここでは3章で構築したシミュレーションシステムをもちいて検討可能な遅延対策を整理する、その結果が表6.1の右2列目の“検討可否”である。◎と○がシミュレーションシステムで検討可能な遅延対策であり、△はシミュレーションシステム以外の部分での修正が必要ではあるが、検討は可能と考える遅延対策である。

#### 6.1.2 シミュレーションシステムでの実装方法

表6.1の右2列目の“検討可否”で記号のある遅延対策のシミュレーションシステム上での表現方法を以下に示す。原則として表の上から解説していく。

乗降時間減少に寄与する項目のうち、階段増設は利用者の乗降分布を変化させて、扉ごとの乗降人数の違いで表す。ホーム増設は、乗降ホームの分離の場合には、乗降時間推計モデルを拡張し、降車旅客の目的地を新たに設ける。新たなホームを増設する場合には新たな線路を走行時間推計モデルに設置し走行時間の短縮で表現する。多扉車両は、乗降人数を分散させて表現する。ワイドドア車両や幅広車両は、乗降時間推計モデルの列車空間の扉幅や車両幅を変更させる。長編成化は乗車位置選択モデルを拡張して長編成化後の乗降分布を当てはめる。発車合図の工夫は、確認時間のパラメータを調整する。列車停止位置変更は乗車位置選択モデルの乗車扉までの距離の変化で表現する。旅客整列方法の工夫は、乗降時間推計モデルの整列位置を変更させる。

表 6.1: 鉄道事業者ごとの遅延対策の整理表

項目		鉄道事業者													A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	割合	検討可否	遅延対策との関係性	
乗降時間減少に寄与する項目	ハード的対策	駅改良	ホーム上屋設置						○	○			○		27%		雨天時の乗客分散												
			ホーム拡張						○	○			○		36%		ホーム上混雑の緩和												
			柱の化粧取り外し									○			9%														
			階段増設		○					○	○		○		36%	◎	利用者の乗降扉を分散												
			ホーム増設					○		○	○		○		36%	◎	整列客の分散、走行時間短縮												
			コンコース増設							○	○		○		27%		ホーム上混雑の緩和												
			ベンチの移設		○										9%		ホーム上混雑の緩和												
		車両	多扉車両						○					○	18%	○	乗降人数の分散												
			ワイドドア車両									○			○	18%	◎												
			幅広車両			○								○	○	27%	○	車内面積を増やし混雑緩和											
	ソフト的対策	戸ばさみ検知機能		○		○		○				○			36%		扉の再開閉防止												
		長編成化				○	○		○			○	○		55%	○	車内混雑の緩和												
		中間車改造						○							9%		中間車の運転台を撤去し車内面積増												
		発車合図の工夫						○	○			○		○	36%	○	確認時間短縮												
		ホーム整理員増員						○	○			○		○	55%		押し込みや乗車抑制												
季節で整理員増員				○		○	○	○			○		○	55%															
列車停止位置変更				○	○	○	○	○	○		○		○	64%	○	ホーム上の流動改善													
車両運用の工夫			○	○		○	○	○	○	○				73%		高性能車両をピーク時に集中投入													
走行時間減少に寄与する項目	ハード的対策	路線	複々線化			○			○			○		○	36%	◎													
			部分複々線化		○		○	○			○			45%	○	単線路線の駅部複線区間を延伸													
			連続立体交差(道路施策)			○	○	○					○		36%														
			安全側線		○					○				18%	○	待避駅での本線信号現示向上													
			平面交差解消			○		○						36%	○														
			曲線改良			○						○		27%	○	制限速度の緩和													
		分岐	分岐器改良		○	○			○			○	○	○	64%	○	制限速度の緩和												
			信号	ATSから改良		○			○						55%														
				終端部改良						○	○				18%	○	制限速度の緩和												
				信号現示見直し									○		18%	○													
	定位停止装置(TASC)										○	○	27%		停車時の速度制御の自動化														
	閉そく割の分割								○	○		○	36%	◎															
	駅間最高速度の見直し									○		18%	○																
	ATO化											9%																	
	車両	高速域の加速力向上		○				○				○	○	36%	◎														
		低速域の加速力向上			○								18%	◎															
		先頭M台車								○			9%		分岐通過時の切替時間短縮														
		降下タイミング変更		○			○						18%																
	ソフト的対策	運転方法の工夫		○				○	○	○	○		55%	△	先行列車に近づける														
		技術の向上			○		○		○	○			36%		運転技術の統一化も含む														
ダイヤ設計			途中駅どまりの列車削減								○			9%	△	折返線への分岐転換時間短縮													
			優等列車の格下げ						○					9%	△	需要の分散													
			ダイヤを寝かす		○	○	○	○	○			○		64%	△	ダイヤ上の余裕時間を増やす													
			待避パターンの変更		○					○				27%	△	優等列車の混雑集中を防ぐ													
			秒単位での発車時刻調整					○			○	○		27%	◎														
			通過待ち列車に余裕時間を付与		○									9%	△	待避駅で遅延を吸収													
			最混雑時間帯の列車本数削減						○					9%	△														
			停車時間を短めにしたダイヤ設計						○					9%	△	停車時間の遅延を走行時間で吸収													
			分散の	オフピーク利用の推進					○	○	○	○	○		55%	◎													
				オフピーク時に優等列車増発				○		○					27%	△													
系列バス会社との連携							○					9%		並行バス路線の利用を促す															
																									◎ 本研究で検討or検討実績あり				
																									○ 検討可能				
																									△ データの追加により可能				



走行時間減少に寄与する項目のうち、複々線化と部分複線化は走行時間推計モデルの中に新たな線路を設ける。安全側線、曲線改良、分岐器改良、終端部改良、信号現示見直し、閉そく割の分割、駅間最高速度の見直しは、該当箇所の制限速度を向上させて、先行列車により近づけるようにするものである。加速力向上は、列車加速度のパラメータを変更させることで対応する。運転方法の工夫は、新たな運転ルールを5つのモデルのいずれかに記述できれば検討可能である。

ダイヤ設計の工夫のうち、△で示したものは新たな運転ダイヤの設計が必要である。運転ダイヤを設計にあたっては、遅延の発生しない実務上も運転可能なダイヤの設計が求められる、その技術は本研究の対象外である。逆を言えば、ダイヤの設計が可能となれば、いずれの遅延対策も検討可能である。秒単位での発車時刻調整は、列車の発車条件を緩和することで表現する。

最後に需要の分散策である。オフピーク利用の推進は、企業の始業時刻選択の結果を通勤者の希望到着時刻に返したうえで乗車時刻選択モデルで時間帯別の需要を推計する。時間帯別需要が変動すると乗降人数も変動する。この乗降人数の変化に伴う乗降時間の変化を比較し評価する。オフピーク時の優等列車の増発は、運転ダイヤの見直しに相当するため、実現可能な運転ダイヤが設計できれば検討可能である。

## 6.2 遅延対策案の評価視点の整理

本研究で検討予定の遅延対策を表6.2に示す。対策のシミュレーション上での表現方法や条件設定、シミュレーション結果については次節以降で述べるとし、本節では遅延対策ケースの評価視点の整理をおこなう。遅延対策案の評価は2つの視点からおこなう。一つが列車遅延量の変化の側面である。列車遅延対策によって列車遅延が変化するが、対策内容によって効果の程度は異なると想定される。そこで、現況再現にもちいたシミュレーション結果と遅延対策ケースのシミュレーション結果について駅到着遅延量と駅間ODベースの走行遅延の変化から、対策効果が強く表れる区間とそうでない区間とを示していく。

二つ目は、利用者便益の視点から比較するものである。従来では取り組みの少ない、遅延対策によって生じる利用者便益を算出する。手法は5の時間信頼性評価で述べたスケジューリングモデルに基づき、列車運行の改善前後でのログサム変数の変化により求める。遅延対策後を **With**、対策前（現況値）を **Without** の各ケースと見立てて列車運行シミュレーションを実行し、それぞれの状況において通勤者の出発時刻選択行動変化を予測した上で、全

体の利用者便益を求める．便益の算出にもちいるサンプルは，第11回大都市交通センサスマスターデータより，東急田園都市線および東京メトロ半蔵門線の通過旅客を含む，以下の条件を満たしたものである．

1. 1回目の鉄道利用で，東急田園都市線中央林間駅～東京メトロ半蔵門線押上駅間のいずれかの区間を利用し，かつ当該路線の乗車時刻が6:00~9:59である．
2. 自宅から出発し，通勤目的かつ定期利用である．
3. 勤務先の始業時刻が明確かつ6:00~12:00であり，イグレス旅行時間に欠損がない．

以上の条件を満たす利用者のサンプル数は4,992であった．これに拡大係数を付与して得られる217,012人の利用者を対象にシミュレーションをおこなう．最後に，列車運行シミュレーションで得られたデータにもとづき，鉄道利用者の各  $SDE$ ,  $SDL$ ,  $P_L$ ,  $RD$  の変数値を更新した上で，そこから算出されるログサム変数（消費者余剰）の変化により利用者便益を算出する．なお，本研究ではMixed Logitモデルをもちいているため，McFadden<sup>86)</sup>に倣って下記のようにシミュレーション積分計算によりログサム変数の近似値を持って利用者便益を求めることとする．

$$\frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \ln \left( \sum_{i=1}^{16} \exp(V_{in} + \eta_{in}^{(r)} + ASC_{ij}) \right) \quad (6.1)$$

なお，スケジューリングモデルの説明変数に費用パラメータが含まれていないため，貨幣価値換算にあたっては，国土交通省のマニュアル<sup>85)</sup>の設定値である40円/分という時間価値を用いた．

## 6.3 TSM施策の遅延対策評価

### 6.3.1 移動閉そくシステムの導入

現在対象路線でもちいられている信号保安システムである固定閉そく方式に替えて，日本国内でも導入が検討されている移動閉そく方式導入による遅延対策の遅延減少効果を推計する．このシステムは，先行列車との距離を無線により連続的に取得し続けることで，安全を担保するシステムである．遅延対策としてのメリットとして，固定閉そく方式で生じていた先行列車が閉そく区間の超えて次の閉そく区間に移動しているときに，後続列車との間に生じるスペースが極限にまで埋めることができ，先行列車との間隔を最適に詰めた

表 6.2: 検討する遅延対策

項目	
TSM	移動閉そくシステム
	ワイドドア車両
	渋谷駅2面3線化
	加速性能の向上
	分単位での発車時刻調整
	階段の増設
TDM 始業時刻の分散	
TSM+TDM	上記7案の複合案
	移動閉そく+ワイドドア
	移動閉そく+2面3線
	移動閉そく+加速性能
	ワイドドア+2面3線
	ワイドドア+階段増設
	階段増設+2面3線
	移動閉そく+ワイドドア+2面3線
	移動閉そく+ワイドドア+加速性能
	ワイドドア+階段増設+発車時刻調整

運転ができることである．このシステムは2020年1月時点でJR仙石線やJR埼京線で導入されており，今後他路線での導入も検討されている．

移動閉そくシステムをシミュレーションで再現するため，走行時間推計モデルのうち列車エージェントの制限速度決定部分を改良した．固定閉そく方式の場合にはATC信号が持つ制限速度情報を列車エージェントが受け取っていたが，移動閉そくシステムでは閉そくには最高速度の情報だけ与え，以下のルールに改める．

**Rule1:** 列車エージェントは停車駅までの距離  $D_{sta}$ (km) を調べる．

**Rule2:** 停車駅までの距離  $D_{sta}$ ，列車減速度  $a_{dcc}$ (km/h/s)，空走時間から制限速度  $V_{sta}$ (km/h) を決定する．ここで空走時間とは列車減速操作から実際にブレーキが作動するまでの時間を指し，この間は列車は初速で惰行させる．この空走時間は4秒を与える．

$$V_{sta}^2 = 7200a_{dcc}(D_{sta} - \frac{1}{900}V_0) \quad (6.2)$$

**Rule3:** 同様に先行列車までの距離  $D_{tra}$ (km) と列車減速度  $a_{dcc}$ ，空走時間，余裕距離から制限速度  $V_{tra}$  を求める．余裕距離とは，先行列車との衝突を防ぐために列車の停止に必要な距離に加えて与える距離である．本研究では東日本旅客鉄道の開発する ATACS を

表 6.3: 遅延対策による各断面での到着総遅延の減少量

項目		到着遅延減少量						利用者便益(円/日)	
		溝の口	二子玉川	三軒茶屋	渋谷	永田町	清澄白河	1日あたり	1人・1日あたり
TSM	移動閉そくシステム	-77%	-37%	-49%	-64%	-63%	-59%	9,780,803	45.1
	ワイドドア車両	-18%	-19%	-33%	-41%	-32%	-30%	5,045,308	23.2
	渋谷駅2面3線化	+9%	-1%	-4%	-44%	+1%	+1%	1,723,606	7.9
	加速性能の向上	-12%	-8%	-11%	-6%	-5%	-5%	572,984	2.6
	分単位での発車時刻調整	-59%	-22%	-17%	-7%	-4%	-3%	-647,241	-3.0
	階段の増設	+4%	-1%	-11%	-8%	-6%	-4%	1,060,624	4.9
TDM	始業時刻の分散	+6%	-2%	+3%	+3%	+3%	+3%	2,963,291	13.7
TSM+TDM	上記7案の複合案	-201%	-107%	-109%	-116%	-97%	-93%	11,184,856	51.5
	移動閉そく+ワイドドア	-95%	-51%	-67%	-82%	-78%	-76%	12,490,806	57.6
	移動閉そく+2面3線	-77%	-43%	-56%	-90%	-72%	-67%	12,201,595	56.2
	移動閉そく+加速性能	-97%	-49%	-60%	-68%	-66%	-63%	10,175,443	46.9
	ワイドドア+2面3線	-17%	-25%	-40%	-79%	-41%	-38%	7,890,014	36.4
	ワイドドア+階段増設	-9%	-11%	-33%	-45%	-38%	-35%	5,933,841	27.3
	階段増設+2面3線	+11%	+5%	-5%	-45%	+1%	+2%	1,933,243	8.9
	移動閉そく+ワイドドア+2面3線	-92%	-53%	-69%	-97%	-82%	-79%	13,570,402	62.5
	移動閉そく+ワイドドア+加速性能	-109%	-62%	-74%	-88%	-82%	-80%	13,128,511	60.5
ワイドドア+階段増設+発車時刻調整	-92%	-55%	-63%	-57%	-46%	-43%	5,926,398	27.3	

※100%を超える減少量は列車が早着したため

参考に余裕距離を 100m とした<sup>87)</sup>。

$$V_{tra}^2 = 7200a_{dcc}(D_{sta} - \frac{1}{900}V_0 - 0.1) \quad (6.3)$$

**Rule4:**  $V_{sta}$ ,  $V_{tra}$ , 現在地点の最高速度  $V_{max}$  の3つを比較し, 最も値の小さいものを制限速度とする。

**Rule5:** 列車速度と制限速度を比較し加減速判定をおこなう。手法は走行時間推計モデルと同一なので割愛する。

遅延推定結果を表 6.3, 図 6.1 に示す。渋谷駅到着遅延の最大値で 173 秒の減少, 総遅延時間で 64%の減少の結果となった。列車間隔を詰められることで走行遅延が短縮され, 8:30 頃から遅延が減少する結果となった。1 日当たりの利用者便益を算出したところ, 路線全体で約 978 (万円/日) との結果を得た。田園都市線および半蔵門線を通過する 217,012 人で除した, 1 人・1 日あたりの利用者便益は, 45.1 (円/(人・日)) となった。

### 6.3.2 ワイドドア車両

乗降扉を拡幅し, 乗降旅客が通過しやすくすることにより, 乗降時間の短縮を考えた遅延対策である。東京メトロでは遅延対策を目的にワイドドア車両を東西線で導入している。

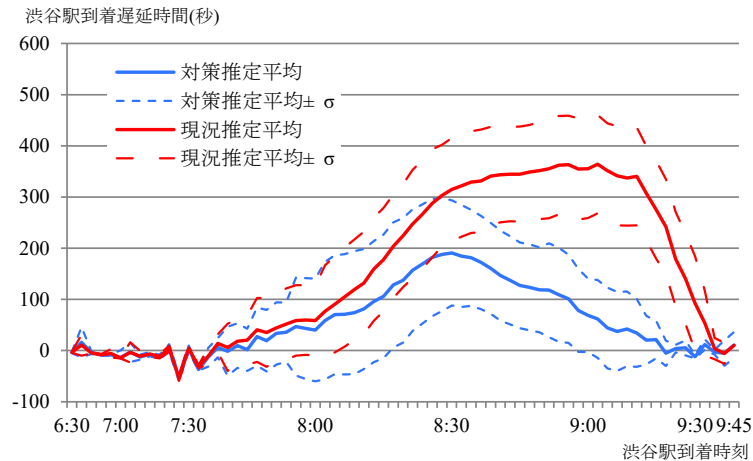


図 6.1: 移動閉そくシステムのシミュレーション (渋谷断面)

本研究では、東京メトロ東西線で実際に運用されているワイドドア車両を参考に、乗降時間推計モデルに用いる最混雑扉の扉幅と車内のレイアウトを改良した。まず東西線で使用されている車両から扉幅を現行の 1300mm から 1800mm に拡幅する。扉幅は広げたが、車両長は長くなっていないため乗降時間推計モデルで再現対象とする範囲は不変とする。次に車内の旅客のうち、拡幅によって座席数が 4 席分減少させた。着席していた 4 人は通過旅客として扱うこととする。ホーム上に整列する乗車旅客の待機場所は拡幅分 500mm を半分にした 250mm 分ずつ隣の扉の方向に移動させる。

統合シミュレーションを実施する前に、乗降時間推計モデルだけを実行し扉幅の違いによる乗降時間の変化をみる。実行条件は 3.5.3 と同じく乗降人数と混雑率、乗降時間が明らかな 78 サンプルを対象に各ケース 100 回ずつ実行し、ワイドドア車両の有無で散布図を描き考察する。結果を図 6.2 に示す。乗降時間が長い駅でその効果は強く現れており、対策前には乗降時間 40 秒前後だった混雑駅では 5 秒前後乗降時間が短縮される結果となった。従来より乗降時間が短い駅では、ワイドドア導入によって乗降時間が大きく変化することはなかった。したがって、ワイドドア車両導入による効果は、混雑区間や乗降人数の多い駅での乗降時間に影響するものとする。

シミュレーションを実行した結果、全区間で 20～30% 程度の総遅延の減少を確認できた。特に最も乗降人数の多い渋谷駅では 40% の遅延減少となった。利用者便益も路線全体で広く発生しており 1 日あたり 505 万円という試算結果であった。

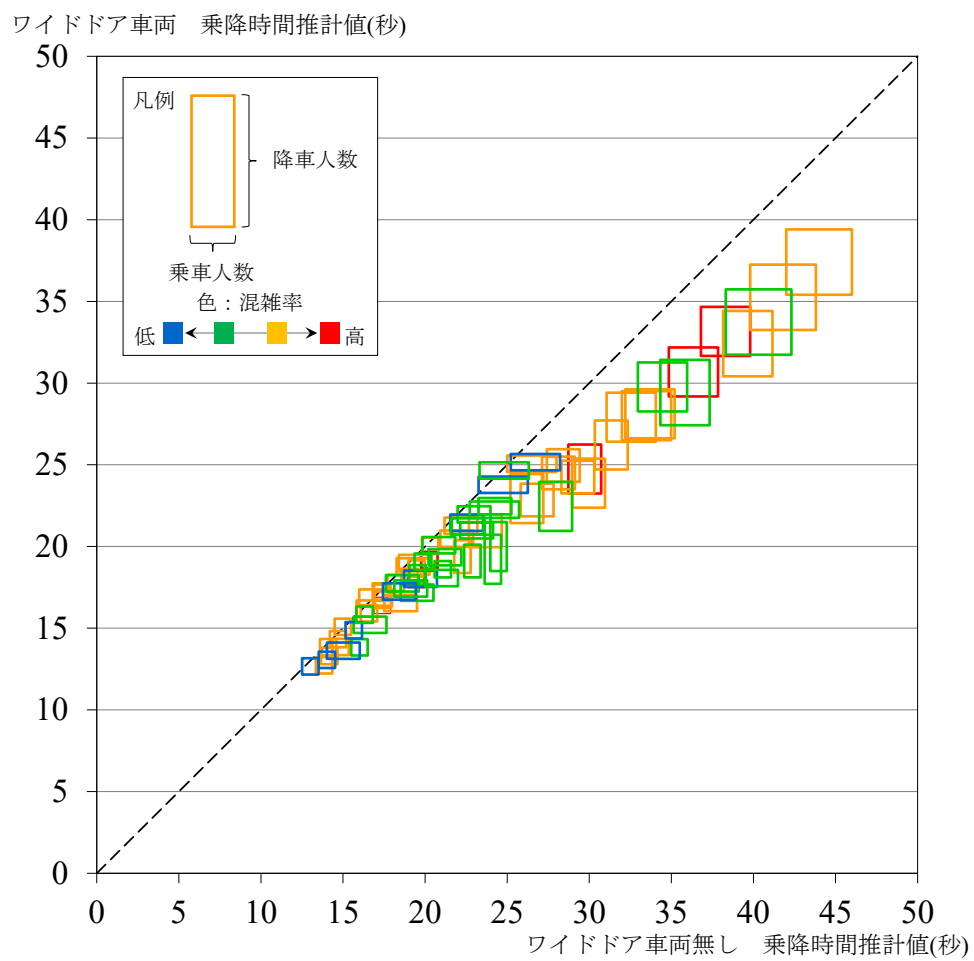


図 6.2: ワイドドア車両との乗降時間比較

### 6.3.3 渋谷駅の2面3線化

対象路線のうち最も乗降人数が多くボトルネックになっている渋谷駅の駅構造を改良し、新たにホームを増設した場合の検討をする。駅改良に伴って、システムの改良を行った点および設定上の仮定は次の4点である：(1)新たに設ける分岐位置は、渋谷駅の列車停車位置と列車最後尾位置からそれぞれ2つ先の閉そくとする。分岐間の距離は450mとする；(2)新たなホーム側の制限速度は、既存の同区間の制限速度と同一とし、分岐器による速度制限は受けないものとする；(3)新たなホームに入線する時間帯は、渋谷駅に7:00から9:45に到着する列車とし、当該時間帯は既存のホームと交互発着させる；(4)新たなホームの階段位置などの駅構造は既存のものと同じとする；

シミュレーションの結果、対策をおこなった渋谷駅において総遅延が44%減少する結果となり、2面3線化によって列車の進入がスムーズになっていることを確認できた。利用者便益は路線全体で176（万円/日）生じており、特に渋谷駅で降車する利用者に限定すると利用者便益は223（万円/日）、46.1（円/(人・日)）となり、渋谷駅で降車する利用者に対して大きな便益が発生する結果となった。

今回の結果の留意点として、渋谷駅を2面3線化することで生じるホーム上の流動改善やそれに伴う停車時間短縮効果は考慮されていない。これは、本シミュレーションの乗降時間推計モデルの再現対象範囲が最混雑扉に限定されているためで、ホーム上の流動は再現対象としていないためである。

### 6.3.4 列車の加速性能向上

対象路線の加速性能を向上させた場合の検討する。対象路線の運転ダイヤや本シミュレーションの走行性能は最も劣る東急8500系を用いて作成されている。これはすべての列車が定められた運転ダイヤの下で運行可能とするためである。実際には加速性能の良い東急5000系なども多く運用に含まれており、加速性能の良い車両は走行時間で回復できる遅延量が多いと考える。本検討においては車両性能を東急8500系の性能から東急5000系相当に向上させた場合のシミュレーションを実行する。具体的には、加速度を決定するために用いる引張り曲線を東急5000系相当のものに改める（図6.3参照）。加速度を向上させたことによって、40(km/h)の到達時間に変化は見られないが、60(km/h)では約2秒、80(km/h)で約6秒早く到達することになる。したがって高速度で走行可能な田園都市線を中心に遅延削減

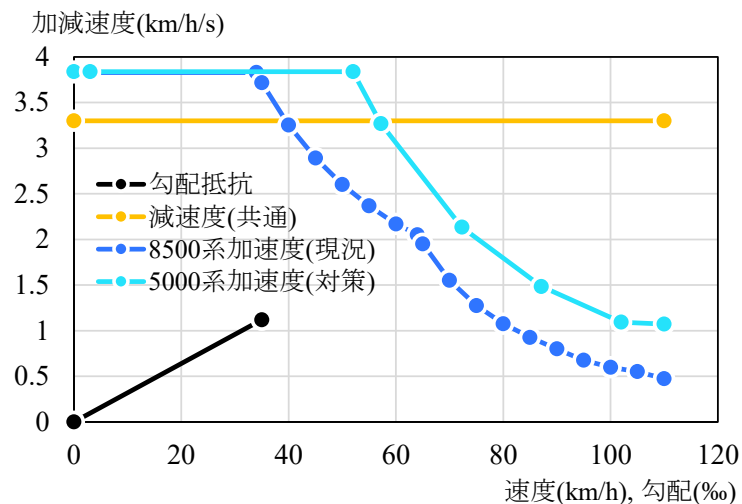


図 6.3: 加速性能の向上効果

効果が得られると想定する．減速度については現況再現に用いた-3.3(km/h/s)をそのまま与える．

シミュレーションの結果，渋谷駅断面での総遅延の減少量は約8%，生じる利用者便益は路線全体で57万円/日であった．

### 6.3.5 秒単位での発車時刻調整

鉄道事業者の作成する運行ダイヤは秒単位で作られているが，利用者が駅で視認する時刻表は分単位であることに着目した遅延対策案である．列車の運行において早発は認められていないが，例えば8:00:50に発車予定の列車の場合，駅の電光掲示板には8:00とだけ掲載されるため，8:00:00を過ぎていれば利用者からみると早発には該当しない．このようなケースのときに，早発を認める遅延対策である．発車時刻調整をおこなう条件は：(1)列車遅延が発生していない；(2)発車時刻前に旅客乗降が完了した；(3)ダイヤの発車時刻と分単位で同一；(4)ダイヤとの発車時刻の差が30秒以内；の4点を満たしたときに限り，発車時刻前ではあるが確認時間推計モデルを起動し所定の時間経過後に駅を発車できるようにした．

この条件のもとでシミュレーションを実行した結果，溝の口駅到着時の総遅延時間が59%，三軒茶屋駅断面で同17%減少した．駅での停車時間に余裕のある駅では，発車時刻調整によって駅での調整時間を減らすことができ遅延の削減につながったと考える．一方で，路線全体で生じた利用者便益は1日当たりマイナス65万円弱と計算された．理由は走行遅延RDの改善による旅行時間変動価値(表5.2)が起こりにくい対策のためである．発車時刻調



整は出発駅を可能な範囲で早めに発車して次駅にも早めに到着するものであり、走行遅延  $RD$  は対策前後でほとんど変化していない。さらに遅延発生後については発車時刻調整の条件を満たさなくなるため、遅延を未然に防ぐ効果は期待できても、発生した遅延を抑制する効果は期待できない。そして郊外部では早めに出発できたものの都心部の到着時刻が対策前と同じ場合、対策前よりも列車乗車時間（すなわち走行遅延  $RD$ ）が延びるためマイナスの便益が生じたと考える。したがって、遅延を吸収する働きのある遅延対策と組み合わせることで、利用者にとっても意味のある遅延対策となるのではないかと考える。

### 6.3.6 階段の増設

対象路線の駅構造を改良し、利用者の乗車分布を分散させることで駅乗降時間短縮を目指す。本研究では、乗車旅客の多い田園都市線の急行通過駅5駅の押上方先頭位置に新たに階段を増設した場合を検討した。階段増設の設定条件は次の通りである：(1) 設置場所には階段のみ設置しエスカレータは設置しない；(2) 階段設置に伴って新たな狭隘部や階段の裏側のような整列を妨げる要因は発生しない。(3) 設置した階段の先には新設の改札口を設け、通過する利用者数は大都市交通センサスの出発地・目的地ゾーンの分布から、既存の改札口よりも直線距離が近くなるサンプルが利用すると仮定する；

シミュレーションを実行した結果、路線全体で遅延が10%程度減少する結果となった。この対策に伴って生じる利用者便益は、1日あたり総額106（万円/日）であった。なお、降車旅客の多い駅の駅構造の改良は、本シミュレーションシステムでホーム上交錯等の混雑状況の再現ができず、遅延の減少効果を図るのは難しいことを踏まえ、本研究では検討しなかった。

## 6.4 TDM施策の遅延対策評価

### 6.4.1 地域・時間別混雑税の導入

現在の首都圏鉄道の列車遅延の主な原因がピーク時間帯に利用者が過度に集中していることにあることは1章で述べたとおりであり、ピーク時間帯の需要を他の時間帯に分散することで列車遅延が少なくなることが期待される。利用者の需要分散化に向けて、ピーク時間帯に始業する企業に対して混雑税を課し始業時刻の分散が列車遅延に及ぼす影響について試算する。具体的には地域  $i$  の始業時刻  $t$  に対し混雑税  $C_{it}$  を課す。混雑税は式4.9の利

得関数式から混雑税分を差し引くことで表現する．

$$\pi_{it} = \alpha K_i L_{it} + \beta I_{it} - \gamma C_{it} \quad (6.4)$$

ここで、 $\gamma$ はパラメータである．混雑税の額は対象となる時間帯に始業する労働者数  $W_{it}$  で増加させる．したがって式 6.4 は式に置き換えられる．

$$\pi_{it} = \alpha K_i L_{it} + \beta I_{it} - \gamma' W_{it} \quad (6.5)$$

ケーススタディで混雑税を課す地域は、都心3区(千代田区・中央区・港区)と副都心3区(新宿区・渋谷区・文京区)の6区を対象8:30始業と9:00始業の通勤者に対して課金をする．パラメータ  $\alpha$  および  $\beta$  は表 4.2 の値を使い  $\gamma$  の値は 0.5 とした．混雑税導入前後の始業時刻分布を図 6.4 に示す．表 4.2 のパラメータ推定時には 8:30 に集中する結果であったが、その度合いは前後の時間帯に緩和されている．この始業時刻分布を用いて通勤者の乗車時刻分布を求め、列車遅延の影響を把握する．

#### 6.4.2 始業時刻分散シミュレーションの試行条件

ケーススタディに用いるサンプルは、本章の利用者便益の試算で用いているものと同じ 4,992 サンプルを拡大した 217,012 人の利用者を対象とする．サンプルの抽出条件を再掲する．

1. 1 回目の鉄道利用で、東急田園都市線中央林間駅～東京メトロ半蔵門線押上駅間のいずれかの区間を利用し、かつ当該路線の乗車時刻が AM6:00~9:59 である．
2. 自宅から出発し、通勤目的かつ定期利用である．
3. 勤務先の始業時刻が明確かつ AM6:00~PM0:00 であり、イグレス旅行時間に欠損がない．

ここで1つ目の条件から、抽出したサンプルには最初乗車駅や最終下車駅が、田園都市線と半蔵門線以外の駅であるサンプルも含まれている．それらのサンプルにおいて、利用者の実際の始業時刻をそのまま分析に用いることは適切ではない．そのため、その始業時刻に勤務先に到着するように間に合わせるために田園都市線もしくは半蔵門線を降車しなければならない時刻を便宜的に算出することでそのサンプルの希望到着時刻と見立てることとした．具体的には、通勤者の最終到着駅、到着時刻(=始業時刻-イグレス旅行時間)、通勤者が回答した乗車経路の条件で Web 乗換検索エンジン上で経路探索を行い、有料特急列

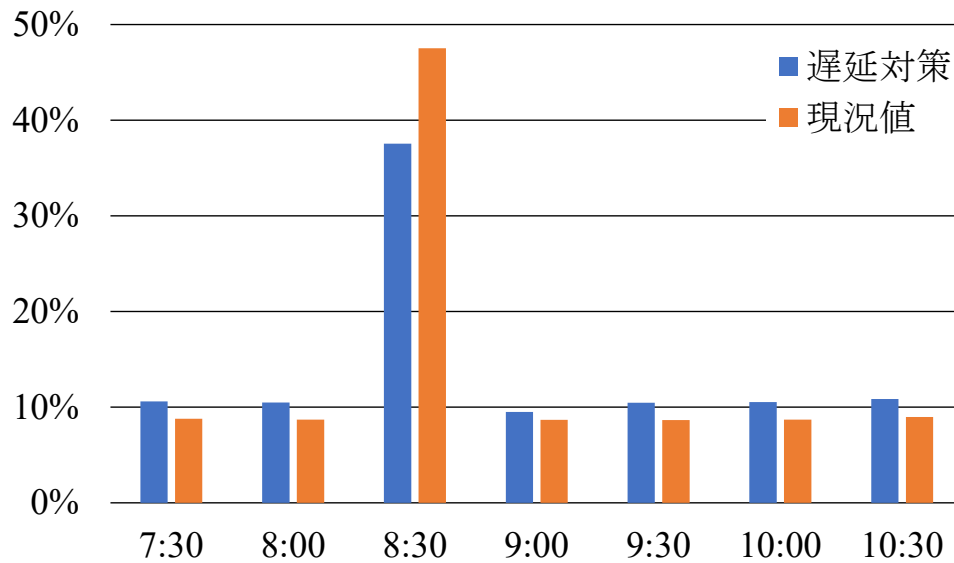


図 6.4: 政策前後での始業時刻分布

車を用いないという条件で最短時間の検索結果における田園都市線もしくは半蔵門線での降車時刻を当該通勤者の希望到着時刻と見立てることとした。

図 6.4 で示した始業時刻分布の変化に伴って、4,992 サンプルの乗車時刻選択が変化し最終的に乗車駅での時間帯別需要を決定する方法は次のとおりである。

1. すべてのサンプルに対し、目的地となる市区町村の始業時刻分布を与える。目的地ゾーンの回答がない場合には、最終降車駅所在地の市区町村を目的地とする。
2. 各時刻の始業時刻に対する希望到着時刻を求める。希望到着時刻から始業時刻までにかかる時間は、先述の方法により求めた値を直接用いる。本来であれば対象路線以外でも時間帯によって所要時間や走行遅延が変化しているため、希望到着時刻から始業時刻までが一定でないことは容易に想像できるが、問題を簡易なものにするため本研究では固定値とした。
3. 希望到着時刻別に乗車駅の乗車時刻選択モデルを実行し、各時間帯別の選択確率を求める。
4. 同じ乗車駅のほかのサンプルについても乗車時刻の選択確率を求め、拡大率を乗じ時間帯別の需要とする。

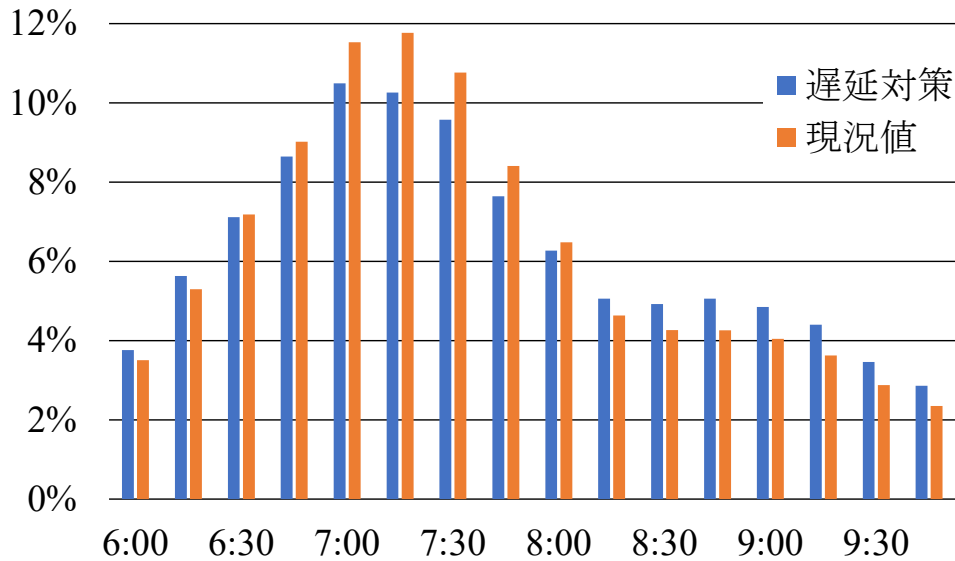


図 6.5: 政策前後での乗車時刻分布

### 6.4.3 始業時刻分散シミュレーションの試行と利用者便益の試算結果

この一連の流れによって求められた乗車人数の分布を図 6.5 に示す。この需要量をシミュレーションシステムに与えて列車運行を推計した。シミュレーションの結果、各断面の到着遅延量は多くが微増という結果となった。利用者便益を求めた結果、路線全体で 296（万円/日）という結果となった。利用者便益は駅間によってプラスに現れた区間とそうでなく区間がさまざまであり、全体としての特徴がつかめなかった。

ここまで企業に対する始業時刻分散を促す混雑税の導入により、それに応じて通勤者が乗車時刻変更をおこない、駅での時間帯別需要が変化し、結果的に列車遅延に与える影響について分析した。施策の導入方法や用いた始業時刻選択モデルに関して議論の余地があるが、始業時刻分散が列車遅延に与える影響を計測する手法は確立できた。

## 6.5 TSM と TDM 複合的な遅延対策の検討結果

ここまでは個々の遅延対策ケースについてその効果を述べてきた。最後に TSM と TDM の遅延対策を組み合わせた検討結果を示す。ここでは、これまでに紹介した 7 種類の対策をすべて組み込んだ場合について検討した。個々の設定条件はすでに述べた下でシミュレーションを行った結果が図 6.6 である。多くの駅到着断面で遅延がほぼ発生しない結果となった。シミュレーションには突発的な遅延も含まれているが、それらも高頻度運行中にも収束している。

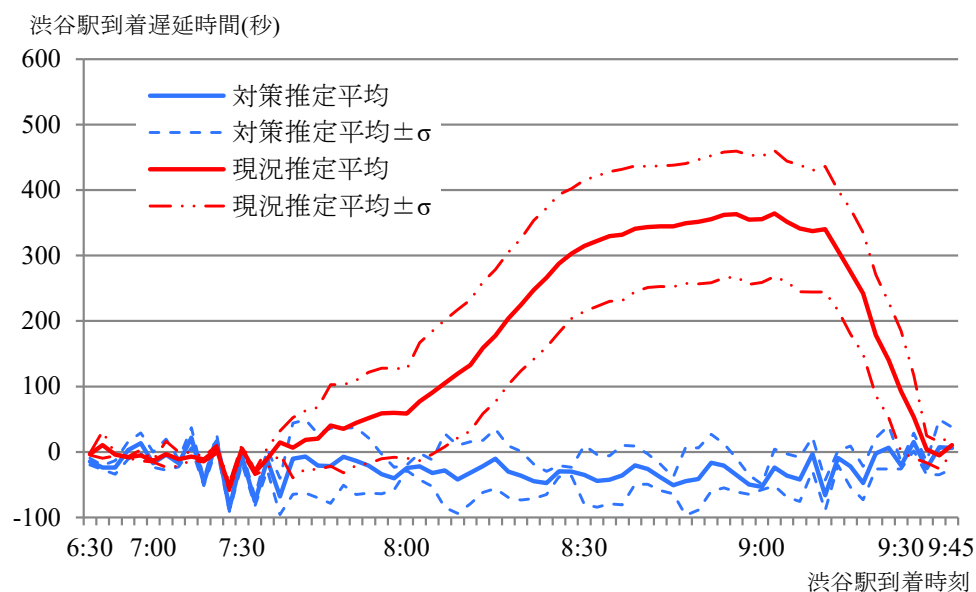


図 6.6: 複合的な遅延対策の効果

複合案による利用者便益の試算の結果，路線全体で1日あたり1,184（万円/日），1人あたり51.5（円/(人・日)）を得た．本ケースでは運転ダイヤの見直しを行わなかったため，遅延対策によって生じた走行時間や停車時間の余裕分はすべて遅延を吸収するために使われている．遅延対策と併せて，駅間所要時間を短くする運転ダイヤの見直しをおこなうことで，過度に駅で発車時刻を待つことのない運行が実現できると考える．

このほかいくつかの遅延対策の組み合わせについて検討した結果も表 6.3 に併せて示す．このように，複合的な遅延対策についてもその効果を遅延の減少量並びに生じる利用者便益の観点から比較することができる．

## 第7章 結論

本研究では、東京圏のラッシュ時間帯で発生する慢性的な列車遅延問題解決に向けた、遅延対策の事前評価手法を確立した。

3章では、TSM 施策評価に向けた実路線ベースの列車遅延連鎖予測シミュレーションシステムの開発を行った。システムは駅間走行や駅での乗降行動を再現する5つのサブモデルで構成している。走行時間の推計は、コンピュータ上に駅、信号、分岐、勾配等の設備を実路線と同位置に配置し、列車間の相互作用によって加減速の判断を逐次おこなうシステムで、高い精度で走行再現ができた。乗降時間の推計にあたっては、扉付近での乗降軌跡データを用いて、歩行速度や属性の実態分析を行ったのち、利用者同士の相互作用を組み込んだエージェントモデルで構築し、最混雑1扉の乗降行動を模擬した。乗降人数や混雑率の幅広い78サンプルを用いて再現性の確認をしたところ、実績値との乗降時間の残差 RMS は4.6秒となり、東京圏の列車遅延の原因である乗降人数と混雑率によって乗降時間が延びる様子を再現できた。確認時間推計サブモデルや運転間隔調整サブモデル、乗車位置選択サブモデルを統合したシミュレーションを用いて、平日20日間の現況再現性をおこなった結果、始発駅から31.5km先の渋谷駅断面で、到着遅延時間の残差 RMS が34.3秒であった。路線全体として列車遅延の発生・拡大・最大・収束へ至る、日々発生している遅延の過程を詳細に再現できた。またデータが完全にそろわなかった場合に現況再現に与える影響についても考察をおこなった。その結果、列車遅延を発生から収束にかけておおむね再現できたケースが加速度一定としたケースと、運転間隔調整モデルを加えなかった場合の2ケースであった。

4章では、TDM 施策評価に向けた乗車時刻選択モデルと始業時刻選択モデルの構築をおこなった。2つのモデルは、TDM による遅延対策を検討する際に、列車の時間帯別需要に変化を与える。遅延対策との関連性は、時間帯別需要の変化によって駅での停車時間が変動し、路線全体の列車運行に効果が波及していくため遅延対策に該当する。まず鉄道通勤者の乗車時刻選択モデルを構築した。スケジューリングモデルにより、希望到着時刻として仮定した企業の始業時刻を基準に早着と遅着はそれぞれ不効用である考え方に基づいて

定式化をおこなった．本研究では説明変数の一つである旅行時間について，所要時間と列車の遅れに区別したうえで，東京圏の大都市交通センサスマスターデータより得られた通勤者の鉄道乗車に関する RP データと列車運行実績データを統合し，ランダム効用理論に基づき通勤者の乗車時刻選択モデルを推定した．所要時間と列車の遅れを表現方法にはいくつかパターンがあるため式 (4.1) から式 (4.3) でパラメータ推定を試みた結果，式 (4.3) の列車走行遅延  $RD$  を列車遅延として組み込んだモデルが，符号条件を満たし得られたパラメータも統計的に有意に推定された．式の解釈として，利用者は走行遅延の増加（すなわち列車乗車中に発生する遅れ）には敏感に反応するものの，駅到着時点で既に発生していた遅れには関心が薄いことが示唆された．これは対象路線が 2~3 分間隔という高頻度運行でさらに都心部では準急としての運行形態を採用しているため，利用者が到着列車の発車時刻をあまり意識することなく，目の前に到着した列車に乗車している行動を反映しているものと推察される．

続いて鉄道通勤者の乗車時刻決定行動に強い影響をもたらす，企業の始業時刻に関して，始業時刻変更を念頭に置いた TDM 施策の検討のため，Discrete game に基づく時空間的な集積性を考慮した始業時刻選択モデルを構築した．モデルは，個々の企業の集合体としての各地域が利得最大化を仮定したうえで，利得関数に他地域の選択確率や空間的・経済的近接性を含めた時間集積変数を導入した．始業時刻選択に他地域の選択割合が含まれる入れ子の構造のため，構造推定的一种である NPL を用いてパラメータ推定を行った．パラメータ推定の結果，モデルの適合度に課題はあるものの，経済的な近接性を示すパラメータは東京 23 区よりも郊外部が大きくなり，産業的に近い地域と始業時刻を合わせる傾向を示唆した．同時就労への集積性のパラメータは有意に推定されなかった．

5 章では，時間信頼性改善による旅行時間変動価値の算出をおこなった．まず時間信頼性評価手法を概観したうえで，都市鉄道の列車遅延及び定時性の評価を行うにあたっては，スケジューリングアプローチが実証分析の信頼性の観点からはより適切であることを指摘した．そのため 4 章でスケジューリングアプローチに運行ダイヤからの遅れを明示的に考慮して，パラメータ推定した乗車時刻選択モデルを用いて旅行時間変動価値を算出した結果，走行遅延  $RD1$  分減少の価値は，早着時間の約 3.14 分減少，あるいは，遅着時間の約 1.48 分減少と等価であるという推計結果が得られた．このことは，利用者の利便性の観点からの列車遅延対策の重要性を改めて示唆するものである．

最後に 6 章では，列車遅延対策の検討をおこなった．まず，3 章で開発したシミュレーショ

ンシステムで検討可能な遅延対策を整理した。鉄道事業者へのインタビュー調査で明らかになった遅延対策のうち半分以上のものについては軽微な変更で検討が可能になることを示した。さらに、運転ダイヤの設計や新たな運転ルールの記述を加えることで、多くの遅延対策が検討可能になる拡張性を有している。本研究では、TSM・TDMの遅延対策に関して、単一の遅延対策と複合的な対策を合わせて8ケースについてシミュレーションを実施した。その結果、講じる遅延対策によって主要断面での遅延減少率は異なることが確認できた。さらに、列車遅延対策で生じる利用者便益の試算もおこない、移動閉そくシステムでは路線全体で978万円/日、7案複合案の場合は1,118万円/日という試算結果となった。



## 参考文献

- 1) 国土交通省交通政策審議会：東京圏における今後の都市鉄道のあり方について（答申）2016.
- 2) 国土交通省鉄道局：東京圏の鉄道路線の遅延「見える化」（平成 29 年度）2019.
- 3) 国立社会保障人口問題研究所：日本の地域別将来推計人口（平成 30（2018）年推計）2018.
- 4) Frank, O.: Two-way traffic on a single line of railway, *Operations Research*, Vol. 14, pp. 801–811, 1966.
- 5) Carey, M. and Kwieciński, A.: Stochastic approximation to the effects of headways on knock-on delays of trains, *Transportation Research Part B*, Vol. 28, pp. 251–267, 1994.
- 6) Higgins, A. and Kozan, E.: Modeling train delays in urban networks, transportation science, *Transportation Science*, Vol. 32, pp. 346–357, 1998.
- 7) Huisman, T. and Boucherie, R. J.: Running times on railway sections with heterogeneous train traffic, *Transportation Research Part B*, Vol. 35, pp. 271–292, 2001.
- 8) Yuan, J. and Hansen, I. A.: Optimizing capacity utilization of stations by estimating knock-on train delays, *Transportation Research Part B*, Vol. 41, pp. 202–217, 2007.
- 9) 和田健太郎，吉相俊，赤松隆，大澤実：高密度鉄道ダイヤにおける列車集群化を抑制する運行制御方策，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol. 68, pp. 1025–1034, 2012.
- 10) Petersen, E. R. and Taylor, A. J.: A structured model for rail line simulation and optimization, *Transportation Science*, Vol. 16, pp. 192–206, 1982.
- 11) Lu, Q., Dessouky, M. and Leachman, R. C.: Modeling train movements through complex rail networks, *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, Vol. 14, pp. 48–75, 2004.
- 12) Li, K. P., Gao, Z. Y. and Ning, B.: Cellular automaton model for railway traffic, *Journal of Computational Physics*, Vol. 209, pp. 179–192, 2005.
- 13) Ning, B., Li, K. P. and Gao, Z. Y.: Modeling fixed-block railway signaling system using cellular automata model, *International Journal of Modern Physics C*, Vol. 16, pp. 1793–1801, 2005.

- 14) Fu, Y., Gao, Z. Y. and Li, K. P.: Modeling study for tracking operation of subway trains based on cellular automata, *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, Vol. 8, pp. 89–95, 2008.
- 15) Xu, Y., Xun, C. C., Hua, L. M. and Jin-Long, L.: Modeling and simulation for urban rail traffic problem based on cellular automata, *Chinese Physical Society and IOP Publishing Ltd*, Vol. 58, pp. 847–855, 2012.
- 16) 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, *土木計画学研究・論文集*, Vol. 67, No. 5, pp. 879–886, 2011.
- 17) 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.
- 18) 小林渉, 岩倉成志: 駅構造を組み込んだ列車遅延シミュレーションの開発, *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, Vol. 72, No. 5, pp. 1067–1074, 2016.
- 19) 武内陽子, 坂口隆, 熊澤一将, 國松武俊, 佐藤圭介: 高機能な列車運行・旅客行動シミュレータの開発と列車運行の多面的評価, *電気学会論文誌 D*, Vol. 135, No. 4, pp. 411–419, 2015.
- 20) 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.
- 21) 山村明義: 列車運行実績データを活用した稠密運転路線における遅延改善アプローチとその効果, *土木学会論文集 D3(土木計画学)*, Vol. 70, No. 1, pp. 44–54, 2014.
- 22) 牛田貢平: 運行実績データを活用した列車遅延の評価指標, *オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学*, Vol. 57, No. 8, pp. 407–413, 2012.
- 23) 仮屋崎圭司, 小野尚, 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 (第 98 回運輸政策コロキウム), *運輸政策研究*, Vol. 73, No. 1, pp. 57–64, 2010.
- 24) Lin, T.-M. and Wilson, N.: Dwell time relationships for light railway systems, *Transportation Research Record*, No. 1367, pp. 287–295, 1992.
- 25) Li, D., Daamen, W. and Goverde, R. M. P.: Estimation of train dwell time at short stops based on track occupation event data: A study at a dutch railway station, *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 50, No. 5, pp. 877–896, 2016.
- 26) 千種健二, 佐藤圭介, 古関隆章: 混合整数計画法に基づく列車運行乱れ時の旅行時間増

- 大量に主眼を置いた運転整理最適化, 電気学会論文誌D, Vol. 132, No. 2, pp. 170–177, 2012.
- 27) Yamamura, A., Koresawa, M., Inagi, T. and Tomii, N.: Dwell time analysis in railway lines using multi agent simulation, *13th World Conference on Transportation Research (WCTR)* 2013.
- 28) 日比野直彦, 山下良久, 内山久雄: 鉄道駅におけるモニターカメラから得られる歩行者挙動データの活用に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 22, No. 3, pp. 531–539, 2005.
- 29) 仮屋崎圭司, 日比野直彦, 森地茂: 高頻度運行に伴う列車遅延の回復方策に向けたシミュレーション, 土木計画学研究・講演集, Vol. 45, No. 1832012.
- 30) Vickrey, W. S.: Congestion theory and transport investment, *American Economic Review*, Vol. 59, No. 2, pp. 251–260, 1969.
- 31) 家田仁, 土谷和之, ファンレビン, 岡村敏之: 大都市圏鉄道需要の時刻集中特性予測モデルの構築と首都圏鉄道ネットワークへの適用, 土木学会論文集, Vol. 702, No. 4-55, pp. 65–79, 2002.
- 32) 岩倉成志, 原田知可子: 都市鉄道のピーク需要分散案を念頭に置いた時刻別需要予測モデルの分析, 運輸政策研究, Vol. 8, No. 8, pp. 4–15, 2005.
- 33) Bates, J.: Practical modelling of trip re-scheduling under congested conditions, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 41, No. 9, pp. 788–801, 2007.
- 34) Noland, R. and Small, K. A.: Travel-time uncertainty, departure time choice, and the cost of morning commutes, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1493, pp. 150–158, 1995.
- 35) Noland, R. B., Small, K. A., Koskenoja, P. M. and Chu, X.: Simulating travel reliability, *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 28, No. 5, pp. 535–564, 1998.
- 36) 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.
- 37) Hollander, Y.: The attitude of bus users to travel time variability, *European Transport Conference* 2005.
- 38) Henderson, J. V.: The economics of staggered work hours, *Journal of Urban Economics*, Vol. 9, No. 3, pp. 349–364, 1981.

- 39) 奥村誠，永野光三：企業行動からみた入社・退社時刻の要因分析，第32回日本都市計画学会学術研究論文集，pp. 79–84，1997.
- 40) 奥村誠，永野光三，小林潔司：始業時刻の設定が鉄道通勤交通に及ぼす影響に関する研究，土木計画学研究・論文集，Vol. 15，pp. 831–840，1998.
- 41) 吉村充功，奥村誠：ダイナミカルシステム論による鉄道時差出勤パターンの分析，土木計画学研究・論文集，Vol. 17，pp. 879–884，2000.
- 42) 文世一米川 誠：フレックスタイムが交通混雑に及ぼす影響，日本交通政策研究会 1999.
- 43) Mun, S. and Yonekawa, M.: Flextime, traffic congestion and urban productivity, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 40, No. 3, pp. 329–358, 2006.
- 44) 佐藤慎太郎，赤松隆：企業と家計の相互作用を考慮した始業・出発時刻均衡モデル，土木計画学研究・論文集，Vol. 23，pp. 903–910，2006.
- 45) 高山雄貴：ボトルネック渋滞を考慮した出発・始業時刻均衡モデル，土木計画学研究・講演集，Vol. 472013.
- 46) Takayama, Y.: Bottleneck congestion and distribution of work start times: The economics of staggered work hours revisited, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 81, No. 3, pp. 830–847, 2015.
- 47) 高山雄貴：時間集積の経済を考慮した始業時刻・住宅立地選択モデル，土木学会論文集 D3 (土木計画学)，Vol. 74, No. 2, pp. 140–151，2018.
- 48) 塚井誠人，藤原章正，杉恵頼寧，周藤浩司：フレックスタイム制度下における通勤時刻選択行動の分析，土木計画学研究・論文集，Vol. 16，pp. 941–947，1999.
- 49) 杉恵頼寧，張峻屹，岡村敏之，藤原章正，周藤浩司：フレックスタイム制度の導入が出社・退社時刻選択行動に及ぼす影響，土木計画学研究・論文集，Vol. 19，pp. 383–390，2002.
- 50) 吉村充功，奥村誠，塚井誠人：都市内業務トリップにおける時間的集積の経済性，都市計画論文集，Vol. 34，pp. 217–222，1999.
- 51) 柳沼秀樹，岩倉成志：行動ゲーム理論を用いた法人の始業時刻決定モデルの構築，土木学会第62回年次学術講演会，Vol. 62，pp. 31–32，2007.
- 52) 原田知可子，鍋山弘道，岩倉成志：ゲーム理論を用いた企業の始業時刻推定手法に関する研究，土木学会第62回年次学術講演会，Vol. 59，pp. 743–744，2004.
- 53) Aguirregabiria, V.: Pseudo maximum likelihood estimation of structural models involving fixed-

- point problems, *Economics Letters*, Vol. 84 2004.
- 54) 吉武勇：鉄道の運転保安設備，日本鉄道運転協会，2006.
  - 55) 兼田敏之：artisoc で始める歩行者エージェントシミュレーション，構造計画研究所，2010.
  - 56) Xie, C. and Fukuda, D.: Scheduling preference modeling of rail passengers in the Tokyo Metropolitan Area and evaluation of time-varying fare policy for a congested urban railway line, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)*, Vol. 70, No. 5, pp. I-535–I-548, 2014.
  - 57) Train, K. E.: *Discrete Choice Methods with Simulation*, Cambridge University Press, 2009.
  - 58) Small, K. A.: A discrete choice model for ordered alternatives, *Econometrica*, Vol. 55, No. 2, pp. 409–424, 1987.
  - 59) Small, K. A.: The scheduling of consumer activities: Work trips, *American Economic Review*, Vol. 72, No. 3, pp. 467–479, 1982.
  - 60) Kato, H., Fukuda, D., Yamashita, Y., Iwakura, S. and Yai, T.: Latest urban rail demand forecast model system in the tokyo metropolitan area, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2668, No. 1, pp. 60–77, 2017.
  - 61) 総務省統計局：平成 24 年経済センサス活動調査 2012a.
  - 62) 柳沼秀樹，福田大輔：混雑外部性を内生化した離散選択モデルと構造推定，土木計画学研究・講演集，Vol. 372008.
  - 63) 松村杏子，武藤滋夫，福田大輔，柳沼秀樹：混雑した都市鉄道における出発時刻選択モデルの構造推定:ゲーム理論に基づいた実証研究，土木計画学研究・講演集，Vol. 452012.
  - 64) Aguirregabiria, V. and Mira, P.: Sequential estimation of dynamic discrete games, *Econometrica*, Vol. 1 2007.
  - 65) 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）「道路交通の信頼性評価」，コロナ社，東京，第 14 章，pp. 227–245，2014.
  - 66) 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.
  - 67) 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.
  - 68) Fosgerau, M. and Karlström, A.: The value of reliability, *Transportation Research Part B: Method-*

- ological*, Vol. 44, No. 1, pp. 38–49, 2010.
- 69) Fosgerau, M., Hjorth, K., Brems, C. and Fukuda, D.: Travel time variability: Definition and valuation, Technical Report, Technical University of Denmark, 2008.
  - 70) 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.
  - 71) Franklin, J. and Karlström, A.: Travel time reliability for stockholm roadways: Modeling the mean lateness factor, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2134, pp. 106–113, 2009.
  - 72) Börjesson, M., Eliasson, J. and Franklin, J. P.: Valuations of travel time variability in scheduling versus mean–variance models, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 46, No. 7, pp. 855–873, 2012.
  - 73) Xiao, Y. and Fukuda, D.: On the cost of misperceived travel time variability, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 75, pp. 96–112, 2015.
  - 74) Fosgerau, M. and Engelson, L.: The value of travel time variance, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 45, No. 1, pp. 1–8, 2011.
  - 75) Engelson, L.: Properties of expected travel cost function with uncertain travel time, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2254, No. 1, pp. 151–159, 2011.
  - 76) Vickrey, W.: Pricing, metering, and efficiently using urban transportation facilities, *Highway Research Record*, Vol. 476, pp. 36–48, 1973.
  - 77) Xiao, Y., Coulombel, N. and de Palma, A.: The valuation of travel time reliability: does congestion matter? *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 97, pp. 113 – 141, 2017.
  - 78) Eliasson, J.: A cost-benefit analysis of the Stockholm congestion charging system, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 43, pp. 468–480, 2009.
  - 79) Peer, S., Koopmans, C. and Verhoef, E.: Prediction of travel time variability for cost-benefit analysis, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 46, No. 1, pp. 79–90, 2012.
  - 80) Small, K. A. and Rosen, H. S.: Applied welfare economics with discrete choice models, *Econometrica*, Vol. 49, No. 1, pp. 105–130, 1981.
  - 81) Fosgerau, M.: The marginal social cost of headway for a scheduled service, *Transportation Re-*

- search Part B: Methodological*, Vol. 43, No. 8-9, pp. 813–820, 2009.
- 82) 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.
- 83) Batley, R. and Ibáñez, J. N.: Randomness in preference orderings, outcomes and attribute tastes: An application to journey time risk, *Journal of Choice Modelling*, Vol. 5, No. 3, pp. 157–175, 2012.
- 84) Kato, H., Kaneko, Y. and Soyama, Y.: Economic benefits of urban rail projects that improve travel-time reliability: Evidence from Tokyo, Japan, *Transport Policy*, Vol. 35, pp. 202–210, 2014.
- 85) 国土交通省鉄道局：鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル（2012年改訂版）2012b.
- 86) McFadden, D.: Computing willingness-to-pay in random utility models, In Melvin, J., Moore, J. and Riezman, R. eds. *Trade, Theory, and Econometrics: Essays in Honor of John S. Chipman*, CRC Press, pp. 253–274, 1999.
- 87) 東日本旅客鉄道株式会社：無線による列車制御システム (ATACS), *JR EAST Technical Review*, No. 5, pp. 31–38, 2003.

## 謝 辞

本論文を結ぶにあたり、本研究を遂行する上で、ご指導・ご支援いただいた多くの方々に對して感謝の意を表したい。

芝浦工業大学工学部土木工学科の岩倉成志先生には、筆者が同教授の研究室に配属されてから、6年にわたり終始ご指導、ご鞭撻を賜った。浅学非才な筆者に対して熱心なご指導いただいたこと、研究を遂行する上での心構えや研究面に限らず様々なことを学ばせていただけたことは、筆者にとってかけがえのない財産である。

本論文の副査をしていただいた芝浦工業大学工学部土木工学科の遠藤玲先生、穴見健吾先生、平林由希子先生、東京海洋大学兵藤哲朗先生には、各所で適切な研究のご意見やご助言をいただいた。ここに深くお礼を申し上げる。

東京工業大学福田大輔先生と東京理科大学柳沼秀樹先生には、筆者が在学中に半年間ずつ研究室に通わせていただき、それぞれ旅行時間信頼性と始業時刻選択に関する研究のご指導を賜った。6年間同一の研究室に在室していた筆者にとって、いつもと異なった環境での研究活動は非常に新鮮であった。期間中には東京工業大学屋井鉄雄先生、朝倉康夫先生、室町泰徳先生、花岡伸也先生、東京理科大学内山久雄先生、寺部慎太郎先生からも研究に対するご意見や考え方を賜った。政策研究大学院大学の森地茂先生、日比野直彦先生、日本大学の金子雄一郎先生、運輸政策研究所の伊東誠氏には、学会の間などを通じて研究に対する貴重なご意見を賜った。心より感謝する次第である。

芝浦工業大学大学院野中康弘客員先生と山下良久客員先生には、6年間学内ゼミなどを通じてご指導を賜った。社会システム株式会社と株式会社道路計画の方々は、博士課程への進学にあたってご支援を賜わった。筆者がこうして博士課程の3年間を有意義な期間にできたのはそのお陰であったことを、強く心に刻んでいく次第である。

東急電鉄株式会社、東京地下鉄株式会社の方々には、運行データ等の貴重なデータをご提供、インタビュー調査のご協力、このほか大変なご支援をいただいた。ここに心からの感謝の意を表する。さらに遅延対策のインタビューにご協力いただいた、小田急電鉄株式会社、京王電鉄株式会社、京成電鉄株式会社、京浜急行電鉄株式会社、相模鉄道株式会社、西武鉄道株式会社、東京都交通局、東武鉄道株式会社、東日本旅客鉄道株式会社の方々にも感謝申し上げます。

最後に、ここに記しきれない多くの方々のご支援によって、本研究がなされたことを明記し、心よりの感謝を申し上げます。

令和2年3月

小林 渉