

都市鉄道における列車遅延の回復
メカニズムの解明と列車遅延防止対応策

仮屋崎 圭司
政策研究大学院大学
博士（公共政策分析）

2016年3月

(論文要旨)

都市鉄道における列車遅延の回復メカニズムの解明と列車遅延防止対応策

2016年3月
仮屋崎 圭司

1. 本研究の背景

東京圏の鉄道は、高密度な鉄道網整備、列車の長編成化、高頻度運行、相互直通運転の実施、ホームドアの設置等の施策により、世界に誇れる都市鉄道システムを形成している。しかしながら、これらの施策は、大きな成果を上げた一方で、その副作用として、①通勤時間帯の慢性的な列車遅延、②人身事故、車両故障等により発生した列車遅延の広域的な連鎖、③一度発生した列車遅延の回復に数時間も要するといった回復困難性の問題等を顕在化させ、ある種のパラドクスとして、東京圏の鉄道に新たな課題を生じさせている。東京圏の都市鉄道は、未だ混雑率190%を超える路線が多く存在しており、慢性的に発生する列車遅延は、遅れ時間が日毎に異なるため、利用者は車内の混雑に耐えながら、所要時間の増加、さらに到着時間の不確実性という幾重ものストレスを強いられている。その社会的費用は年間2,000億円以上と試算される。

都市鉄道の混雑問題と列車の運行方式に関しては、国内外問わず今までに多くの研究がなされてきた。代表的なものとしては、利用者の経路選択、駅における旅客流動、運行ダイヤの最適化等である。また、さらに時代が進み、列車運行と旅客行動のシミュレーションに関する研究も多く発表されている。しかしながら、これらの研究の多くが列車の車内混雑緩和または駅構内の混雑緩和の視点から利用者便益が論じられてきたものであり、列車運行に関する列車遅延の発生、波及および回復のメカニズムに言及し、実効性の視点から列車遅延対策を分析し、技術的、制度的な検討を加えた具体的な解決方策に関する研究の不足が上記の深刻な問題を引き起こしている。

2. 本研究の位置付け

列車遅延の発生要因の一つとして、旅客の駆け込みや混雑する車両への無理な乗車に伴うドアの再開閉、安全確認時分の増加等に伴う駅停車時間の増加が一般的に知られている。高頻度運行下では駅停車時間の増加が、直ちに後続列車の駅間走行速度の低下を誘引し、列車遅延の影響が後続列車へ波及する。運行間隔が短いため、駅間での走行時間の増加は後続列車で回復することなく、その区間の走行時間の増加量として引き継がれる。さらに走行時間が増加するとその影響は後続列車へ次々と伝播し、上流駅間へと波及する。東京圏鉄道が膨大な量の旅客を輸送し、未だに混雑率190%以上の路線が多く存在するなか、列車遅延の発生を抑制することは極めて困難である。抜本的な対策としては、大規模投資を伴う路線容量の増強、あるいは、利用者意識の改革が求められるが、これらは現実的な対策でなく、また

急務である都市鉄道の信頼性回復を成し遂げるには、あまりに長期的な時間を要してしまう。このため、列車遅延の対策にあたっては、列車遅延発生の抑制のみならず、発生してしまった列車遅延に対する拡大・波及の抑制方法、さらには、列車遅延発生状況における早期回復方法といった視点からの検討が極めて現実的かつ有効な手法と考える。そこで、本研究は、既往の研究において所与の条件として与えていた列車運行を、列車運行挙動の分析結果に基づく変数として列車遅延メカニズムに反映することにより、これまで効果的な対策を打ち出せていない高頻度運行下における列車遅延の回復方策について、慣習的な概念から脱却し、新たな理念による実効性の高い手法の提案を行うものである。また、列車遅延メカニズムの列車運行を動的な変数として扱う点において学術的な新規性を有している。なお、本研究は、実データを用いた遅延回復メカニズムの解明といった実証研究として、また、分析結果に基づいた具体的な対応策の提案といった政策研究として位置付けられる。

3. 本研究の成果

本研究では、駅の旅客流動と駅間の列車運行との相互作用により拡大・波及する列車遅延を対象とし、①高頻度運行下において列車遅延が回復する要因とその特性について明らかにし、②列車遅延が回復傾向にある列車群の運行状態から、列車の運行方式が列車遅延の回復に及ぼす影響とその効果について明らかにしている。さらに、③時空間的な列車遅延の回復のメカニズムを踏まえ、具体的な解決方法を提案している。特に、本研究の主要な部分となる①では、列車遅延が顕在化した輸送状況下において、駅での乗客発生率、列車運行間隔等から推定される列車の駅停車時間と、軌道の物理的な制約および先行列車との距離に基づいた速度制約による駅間走行時間との関係について、高頻度で運行する複数の列車を対象として分析した。これにより、遅延回復の契機となった列車の運行状態とその特性、また、その列車が後続列車へ及ぼす影響とその特性を定量的に明らかにしている。②では、①で得た知見を踏まえ、列車の閉塞区間、列車間隔の変化による当該列車の運行状況の変化、また前後に連続して走行する他の列車へ及ぼす運行上の変化が、路線全体の遅延回復に及ぼす影響を明らかにし、その影響を定量的に示した。この2点から駅の旅客流動と連続して走行する列車群の挙動を時系列的に分析し、技術的、制度的な検討を加え、③を導いている。

4. 本研究の意義

高頻度運行下において列車遅延が連鎖する現象に関して、列車運行と旅客乗降との連動性を考慮し、①顕在化した列車遅延の回復要因を明示する点、線路閉塞や信号設備による路線の輸送力と高頻度運行を行う列車1本1本の動的な分析から、②列車遅延が回復するメカニズムを明示する点、列車の運行方式に着目し、③運行本数の減少による輸送力低下を伴わない遅延回復方策を明示する点、これらの3点に本研究の学術的な特色がある。また列車遅延対策の技術的、制度的な検討は本研究に実務的な有用性を付加している。本研究の成果は、従来の車内混雑緩和等を中心とした政策から脱却するとともに、鉄道の信頼性を取り戻し、利用者への新たなサービス向上へと展開できる鉄道計画へ発展するものである。

目次・図表一覧

目次

第1章 序論

1.1 本研究の背景	2
1.1.1 東京圏の鉄道サービスの発展と経緯	2
1.1.2 東京圏の都市鉄道を取り巻く社会状況	7
1.1.3 東京圏の都市鉄道サービスの新たな課題	9
1.1.4 東京圏の将来動向と列車遅延	20
1.2 本研究の目的	23
1.3 本論文の構成	24
第1章 参考文献	

第2章 既往研究の整理

2.1 概説	30
2.2 都市鉄道の列車遅延に関する研究の現状	30
2.2.1 列車遅延を考慮した旅客行動分析及び列車運行に関する研究	30
2.2.2 列車遅延の現象分析及び再現に関する研究	33
2.2.3 時間及びネットワークの信頼性に関する研究	34
2.2.4 駅施設及び運転設備等に関する研究	36
2.3 都市鉄道の列車遅延に関する調査等と事業者の取り組み	37
2.3.1 列車遅延に関する調査等	37
2.3.2 鉄道事業者の取り組み	38
2.4 本研究の位置付け	46
第2章 参考文献	

第3章 列車遅延の現状分析

3.1 概説	58
3.2 列車遅延の定義と使用データ	58
3.2.1 列車遅延の定義	58
3.2.2 使用データ	59

3.3 列車遅延の発生・波及の定量分析	63
3.3.1 東京圏における列車遅延の発生状況	63
3.3.2 駅における列車遅延の発生要因	65
3.3.3 列車遅延の発生と波及	71
3.3.4 列車遅延に影響する要因	80
3.4 列車遅延の発生・波及及び回復のメカニズム	88
3.4.1 利用者混雑に起因する発生・波及	88
3.4.2 列車混雑に起因する発生・波及	90
3.4.3 列車遅延の波及・拡大	92
3.4.4 列車の運行間隔と列車遅延の回復	93
3.4.5 列車遅延のメカニズム	94
3.5 モスクワ地下鉄の事例	96
3.5.1 モスクワ地下鉄の概要	96
3.5.2 モスクワ地下鉄の運行状況	99
3.5.3 高頻度運行の仕組み	100
3.5.4 東京圏の列車遅延対策への示唆	106
3.6 本章のまとめ	108
第3章 参考文献	

第4章 列車運行シミュレーションモデルの構築

4.1 概説	112
4.2 遅延連鎖シミュレーションの構造	112
4.3 列車運行シミュレーションモデルの構築	115
4.3.1 モデルの要件	115
4.3.2 セルオートマトンによる列車運行モデル	118
4.3.3 モデルの再現性	124
4.4 停車時間の設定	128
4.4.1 設定方法	128
4.4.2 停車時間推定モデルの特徴と適用範囲	130
4.5 列車遅延現象の再現	130
4.5.1 定常的な列車遅延現象の再現	130
4.5.2 モデルの適用範囲	132

4. 6 本章のまとめ	133
第4章 参考文献	
第5章 列車運行挙動と列車遅延の影響分析	
5. 1 概説	136
5. 2 連続する列車群の運行挙動に関する分析	136
5. 2. 1 列車密度と走行速度	136
5. 2. 2 列車間隔の縮小による遅延の発生	137
5. 2. 3 遅延の伝播	140
5. 2. 4 停車時間の増加による後続列車への影響	141
5. 3 個別列車の運行挙動に関する分析	142
5. 3. 1 列車間隔と発着時分	142
5. 3. 2 閉そく区分と発着時分	144
5. 4 運行管理手法の基本的な考え方	145
5. 4. 1 列車遅延対策の基本方針	145
5. 4. 2 連続する列車群の運行管理	146
5. 4. 3 個別列車の運行管理	153
5. 5 本章のまとめ	162
第5章 参考文献	
第6章 高頻度運行下における列車遅延対策の検討	
6. 1 概説	166
6. 2 既往手法の効果と課題	166
6. 2. 1 列車運行の間引き	166
6. 3 運行間隔の保持による拡大抑制	168
6. 3. 1 列車の等間隔運行	168
6. 3. 2 群管理による運行間隔の保持	170
6. 4 個別列車の間隔拡大による早期回復	173
6. 4. 1 列車間隔と発着時分	173
6. 4. 2 発着時分を短縮する出発時間調整の検討	174
6. 4. 3 発着時分を短縮する走行パターンの検討	183

6.5 運行間隔の拡大による定時性向上.....	189
6.5.1 遅延発生時の実態に即した対策の検討.....	189
6.5.2 輸送力を保持した所要時間の回復.....	191
6.6 輸送障害時の運転再開手法に関する検討.....	195
6.6.1 輸送障害時の運行状況.....	195
6.6.2 運行間隔調整による拡大抑制.....	197
6.7 本章のまとめ.....	200
第6章 参考文献	
第7章 列車遅延の技術的及び制度的課題の検討	
7.1 概説.....	204
7.2 列車遅延に関する技術上の課題.....	204
7.2.1 駅の旅客乗降に関する課題.....	205
7.2.2 運転設備に関する課題.....	208
7.2.3 列車運行計画に関する課題.....	211
7.3 列車遅延に関する制度上の課題.....	213
7.3.1 列車運行と時刻表に関する諸規程.....	213
7.3.2 列車の運行管理に関する制度上の課題.....	214
7.3.3 輸送障害時の技術と制度に関する課題.....	217
7.3.4 交通政策基本法と列車遅延の指標化に関する課題.....	219
7.4 本章のまとめ.....	221
第7章 参考文献	
第8章 結論.....	224
Appendix 列車運行の基本的な考え方.....	i

謝辞

第 1 章

図-1-1	原因別輸送障害件数の推移（東京都，埼玉県，千葉県，神奈川県）	9
図-1-2	時刻表と実績の所要時間（田園都市線：中央林間駅～渋谷駅間）	10
図-1-3	時刻表の運転本数と所要時間	11
図-1-4	時刻表の表定速度	11
図-1-5	相互直通運転の実施状況	12
図-1-6	利用者アンケート結果	14
図-1-7	都市鉄道の 4 つの混雑とその対策	15
図-1-8	列車遅延の発生状況	17
図-1-9	遅延時間の発生割合	17
図-1-10	列車遅延の社会的費用	18
図-1-11	列車運行サービス指標のイメージ	20
図-1-12	東京圏の将来夜間人口	21
図-1-13	本論文の構成	26

第 2 章

図-2-1	正常運転時のダイヤ	40
図-2-2	列車遅延時のダイヤ	40
図-2-3	駅配線 1	40
図-2-4	駅配線 2	40
図-2-5	部分運休	42
図-2-6	運用変更-1	42
図-2-7	運用変更-2	42
図-2-8	半蔵門線の折り返し設備	43
図-2-9	表示器の点灯表示イメージ	46

第 3 章

図-3-1	計測時分の定義（運行間隔の内訳）	61
図-3-2	計測時分の定義（停車時間の内訳）	61
図-3-3	対象路線図	62
図-3-4	遅延証明書の曜日別発行件数	63
図-3-5	遅延の発生場所	64
図-3-6	相互直通路線の遅延証明書の発行履歴	64

図-3-7	路線別の運行本数と発行件数.....	65
図-3-8	列車別の遅延の累積（9/30）.....	68
図-3-9	渋谷駅の列車運行間隔（9/30）.....	68
図-3-10	二子玉川駅の列車運行間隔（10/9）.....	68
図-3-11	列車別の駅停車時間（二子玉川駅 10/9）.....	69
図-3-12	列車別の駅停車時間（三軒茶屋駅 9/3）.....	69
図-3-13	列車別の駅停車時間（池尻大橋駅 10/3）.....	70
図-3-14	列車別の駅停車時間（渋谷駅 9/4）.....	70
図-3-15	乗降時分の分布.....	71
図-3-16	確認時分の分布.....	71
図-3-17	ダイヤグラム図（1/19）：後続列車への波及.....	73
図-3-18	ダイヤグラム図（1/19）：先行列車への波及①.....	73
図-3-19	ダイヤグラム図（1/19）：先行列車への波及②.....	73
図-3-20	列車別の駅停車時間の増加量.....	75
図-3-21	列車別の駅間走行時間の増加量.....	75
図-3-22	先行列車に対する駅間走行時間の増加量.....	75
図-3-23	列車別の所要時間の増加量.....	75
図-3-24	駅停車時間の増加量の分布.....	76
図-3-25	駅間走行時間の増加量の分布.....	76
図-3-26	駅停車時間の増加量の分布.....	77
図-3-27	駅間走行時間の増加量の分布.....	77
図-3-28	発着時分と駅停車時間の関係.....	78
図-3-29	列車別の遅延時間の累積変化.....	79
図-3-30	自動列車制御装置による列車運転イメージ.....	81
図-3-31	閉そく区分の違いによる速度制限.....	82
図-3-32	半蔵門線永田町駅前後の路線線形.....	85
図-3-33	団子運転のイメージ.....	88
図-3-34	発着時分と停車時間の関係.....	89
図-3-35	後続列車への遅延波及のイメージ.....	90
図-3-36	列車別のダイヤに対する走行時間の増加量.....	91
図-3-37	列車遅延の波及イメージ.....	91
図-3-38	列車遅延の路線全体への波及イメージ.....	92
図-3-39	列車遅延の回復イメージ.....	93

図-3-40	列車別のダイヤに対する遅延時間の構成	95
図-3-41	時間帯別輸送人員	98
図-3-42	最小発着時分の推計	103
図-3-43	平均駅間距離	104

第4章

図-4-1	列車遅延シミュレーションシステムの構造	113
図-4-2	遅延の構成要素の分類	115
図-4-3	基本的な列車信号システム	118
図-4-4	セルオートマトンによる列車運行のイメージ	120
図-4-5	後続列車の速度制限	121
図-4-6	システムのアウトプット（運転時分と運転速度）	122
図-4-7	列車別の駅間運行挙動	122
図-4-8	列車運行シミュレーションの表示画面	123
図-4-9	駅間走行時間の比較（駅間別）	125
図-4-10	駅間走行時間の比較（時間帯別）	126
図-4-11	駅間走行時間の比較（三軒茶屋駅～池尻大橋駅間）	126
図-4-12	発着時分の比較	128
図-4-13	発着時分と停車時間の設定（運行ダイヤベース）	129
図-4-14	発着時分と停車時間の設定（実績値ベース）	129
図-4-15	遅延状況の再現（駒沢大学駅～半蔵門駅）	132

第5章

図-5-1	運転本数と速度の関係	137
図-5-2	交通量と速度の関係	137
図-5-3	列車遅延の波及	139
図-5-4	遅延時間の構成（120秒）	139
図-5-5	停車時間と走行時間の関係	140
図-5-6	後続列車の到着遅れの変化（三軒茶屋駅）	141
図-5-7	後続列車の到着遅れの変化（池尻大橋駅）	141
図-5-8	列車間隔と駅到着時間（池尻大橋駅）	143
図-5-9	列車間隔と駅到着時間（三軒茶屋駅）	143
図-5-10	駅までの距離と到着時間（左：60m間隔，右：120m間隔）	144

図-5-11	駅までの距離と到着時間.....	144
図-5-12	実績ダイヤグラム図（40分遅れ）.....	147
図-5-13	列車遅延ダイヤ模式図.....	147
図-5-14	運行間隔の内訳.....	148
図-5-15	駅別の運行間隔の内訳.....	149
図-5-16	出発時間調整による着時刻の回復.....	150
図-5-17	駅間別の走行時間の余裕時分（回復可能時分）.....	150
図-5-18	回復運転の例.....	152
図-5-19	対策実施の効果が期待される駅.....	152
図-5-20	列車間隔と列車遅延の転移.....	152
図-5-21	出発時間調整による着時刻の回復.....	154
図-5-22	走行パターンと発着時分.....	156
図-5-23	出発調整時間と走行パターン.....	157
図-5-24	出発調整時間と走行パターン（拡大）.....	157
図-5-25	走行パターン別の発着時分.....	158
図-5-26	減速による回復運転のイメージ.....	160
図-5-27	列車遅延時用の走行パターン.....	161
図-5-28	走行パターンと駅到着時間.....	161

第6章

図-6-1	列車遅延時間の比較.....	167
図-6-2	所要時間の増加量の比較.....	169
図-6-3	到着時刻の増加時間の比較.....	169
図-6-4	出発時間調整による遅延回復時間の構成.....	171
図-6-5	列車別の走行状態の変化.....	172
図-6-6	列車間隔の保持と到着時刻のイメージ.....	173
図-6-7	出発時間調整による発着時分の短縮.....	174
図-6-8	減速走行による発着時分の短縮.....	174
図-6-9	出発調整時間と到着時間の増加量.....	176
図-6-10	出発時間調整の適用範囲.....	177
図-6-11	2列車による出発時間調整と到着時間の変化（同位置）.....	178
図-6-12	2列車による出発時間調整と到着時間の変化（同時刻）.....	179
図-6-13	運行挙動の変化.....	181

図-6-14	列車別のダイヤに対する遅延時間の構成.....	183
図-6-15	駅間のタイムスペース図.....	185
図-6-16	区間制限速度（ATCコード）と運行挙動.....	187
図-6-17	運転曲線と時間曲線.....	188
図-6-18	利用者の到着時間分布.....	189
図-6-19	就業規則上の始業時間.....	189
図-6-20	到着時刻と列車運行本数.....	191
図-6-21	ダイヤグラム図の比較.....	193
図-6-22	列車別の所要時間（二子玉川駅～渋谷駅間）.....	194
図-6-23	運行挙動の比較（二子玉川駅～渋谷駅）.....	195
図-6-24	輸送障害時の運行状態（実績値）.....	197
図-6-25	対策実施のダイヤグラム図.....	199

第7章

図-7-1	JR 東日本アプリの画面.....	208
-------	-------------------	-----

第 1 章	
表-1-1	運輸政策審議会等で示された政策課題..... 4
表-1-2	都市鉄道整備等基礎調査等における主な調査内容..... 5
表-1-3	代表路線の混雑率と運行本数 (H20. 4) 13
第 2 章	
表-2-1	鉄道事業者の列車遅延に対する取り組み 39
表-2-2	運行トラブル時の折り返し運転箇所 43
第 3 章	
表-3-1	田園都市線 (上り) 渋谷駅のダイヤに対する遅延状況 (53 本/2h) 66
表-3-2	路線概要の比較 98
第 4 章	
表-4-1	シミュレーションモデルの適用例 133
第 6 章	
表-6-1	駅間走行時間の比較..... 188
表-6-2	シミュレーションの設定条件と結果..... 194
第 7 章	
表-7-1	諸外国の地下鉄の時刻表..... 216

第 1 章

序論

第1章 序論

1.1. 本研究の背景

1.1.1. 東京圏の鉄道サービスの発展と経緯

今日の我が国における鉄道は、大量、高速、安全かつ正確に輸送できる地球環境に優しい輸送手段として、都市の社会活動の根幹を担う重要な役割を果たしている。特に、東京圏では、高密度ネットワーク、高頻度運行、相互直通運転等、世界に誇る都市鉄道システムが構築され、質の高い鉄道サービスが提供されている。

現在の東京圏鉄道ネットワークが形成されてきた背景として、これまでの鉄道整備計画の存在がある。東京圏の高速鉄道網計画は、1903年（明治36）年に東京市の市区会栄条例に始まり、その後、政府が関与した最初の本格的な高速鉄道計画として1920年（大正9）年の市区改正条例告示がなされた。その後、1925（大正14）年当時の内務省告示、終戦直後の1946（昭和21）年の戦災復興院告示を経て、1949（昭和24）年の運輸省設置以降に、現在のような学識経験者や鉄道事業者、利用者の代表を含めた審議会で鉄道整備計画が策定されるようになった。審議会形式になって最初の計画は、1955（昭和30）年に設置された都市交通審議会における1956（昭和31）年の計画になる。現在の運輸政策審議会での東京圏の鉄道整備計画が策定されるようになったのは、1985（昭和60）年の第7号答申以降である。第7号答申以降の各答申の内容については表-1-1に整理する。

第7号答申は、都市交通審議会答申15号による1985（昭和60）年を目標年次とした、東京圏における高速鉄道を中心とする交通網の整備についての基本計画を受けている。東京圏の人口分布及び就業地の状況が、その後の都市圏の広域化、副都心の整備等の進展により、答申時の想定と異なったものとなったため、これらの社会情勢の変化に対応し、更に長期的な展望に立って高速鉄道を中心とする交通網に関する基本的な計画が、2000（平成12）年を目標年次として策定された。その後、経済成長や人口増加の鈍化に加え、将来的には少子高齢社会の急速な進展が想定されるとともに、地球環境問題への対応が重要視される等、社会経済情勢の変化を捉え、第7号答申による基本計画を改定し、新たな鉄道網整備計画として運輸政策審議会第18号が、2000（平成12）年に策定されている。この計画は、鉄道が東京圏における社会経済活動を支える基幹的かつ必須の交通機関であるとの認識の下に、21世紀における東京圏の姿を展望しつつ、新たな東京圏における高速鉄道を中心とする交通網の整備に関する基本的な計画として

策定したものとされている。2015（平成27）年を目標年次としており、現在、この基本計画は、その目標年次を迎えようとしているところである。第18号答申では、社会経済、人口、鉄道輸送需要について、将来展望が示されている。社会経済については、東京中心部の都市再開発等による居住地機能等の再整備や、臨海副都心機能の充実、業務核都心の育成が想定された。東京圏全体の人口は、首都圏基本計画をもとに郊外化が進み、都心部での人口減少が想定された。また、女性や高齢者の社会進出の進展が想定され、これらを踏まえて、鉄道輸送需要は微増となるものとされた。また、計画策定に際し、東京圏の鉄道について今後対応しなければならない課題ごとの考え方について、混雑緩和、速達性の向上、都市構造・機能の再編整備等への対応、空港、新幹線駅等へのアクセス機能の強化、交通バリアフリー化・シームレス化等への推進として掲げ、基本5項目として整理されている。現在までこの基本計画に基づいて、東京圏の都市鉄道整備の推進が図られてきた。

これら答申における政策課題に対応し、国土交通省（旧運輸省）鉄道局では実務調査を行っている。ここでは、都市鉄道調査等での調査テーマをもとに、これまでの政策課題について整理する。表-1-2は、都市鉄道調査等での主な調査内容を整理したものである。最近約10年間の実務調査を概観すると調査テーマとしては、「列車内混雑の解消」、「既存鉄道ネットワークの有効活用」、「鉄道駅における乗換え利便の改善、シームレス化、混雑解消」、「新たな鉄道整備方式の確立」、「輸送トラブルへの対応」等を目的とした内容が多く取り上げられている。これらは、表-1-1に示したこれまでの答申における政策課題に対応していることが見て取れる。また、現行の第18号答申が目標年次を迎えることに伴い、第18号答申のフォローアップとしての調査内容や、今日の都市鉄道の課題を整理し、今後の都市鉄道のあり方を議論する調査等も実施されてきた。近年の調査テーマとして取り上げられている輸送トラブルや鉄道駅の混雑に着目すると、これらの原因が都市鉄道側だけの問題ではなく、都市開発等の都市計画と鉄道計画との整合がこれまで十分に図られてこなかったことが課題として指摘されている。鉄道駅周辺で推進される都市開発により乗降客数が急増し、鉄道駅での混雑が激化するとともに、乗降時間が増加することで列車の停車時間が増加し、それが後続の列車に伝播することで遅延が拡大している。都市開発に伴う混雑問題に対し、どのような役割分担で鉄道施設の整備を行っていくかが、今後の重要な政策課題の1つとして挙げられている。また、鉄道事業者においては、将来的に輸送量の減少が見込まれるなかで、新線建設や複々線等の大規模な輸送力増強投資は限定的になりつつあることも指摘されている。

表-1-1 運輸政策審議会等で示された政策課題

諮問番号等	時期	対象地区	主な内容
第7号	1985年 7月	東京圏	<ul style="list-style-type: none"> ・混雑率200%超路線の新線建設，複々線化による混雑緩和 ・平均混雑率を220%から2000年に約180%以内へ低減 ・人口の外延化に対する対応 等
第10号	1989年 9月	大阪圏	<ul style="list-style-type: none"> ・既設路線の活用，混雑箇所の線増や新線建設 ・関空，学研都市等大規模プロジェクトへの対応 ・2005年に混雑率を約150%へ低減 等
第12号	1992年 1月	名古屋圏	<ul style="list-style-type: none"> ・新線の整備や複線化等による輸送力増強 ・2005年に混雑率を約150%へ低減 ・名古屋～栄駅一極集中の是正 等
第13号	1992年 6月	全国	<ul style="list-style-type: none"> ・信号保安方式の改良等による列車本数の増加 ・ラッシュ時の平均混雑率を150%程度に低減 ・都心と空港間のアクセス時間の短縮 等
第18号	2000年 1月	東京圏	<ul style="list-style-type: none"> ・複々線化の推進，混雑区間長の短縮 ・空港へのアクセス時間，乗換回数の改善 ・シームレス化 等
第19号	2000年 8月	全国	<ul style="list-style-type: none"> ・大都市圏の全区間の混雑率を150%以内に低減 ・国際的な空港と都心部の所要時間を30分台に短縮 ・シームレス化 等
交政審鉄道 部会提言	2008年 6月	全国	<ul style="list-style-type: none"> ・ピーク時間帯やその前後，深夜時間帯の混雑対策 ・駅機能の高度化 ・輸送障害への対策 等
第198号	2014年 4月	東京圏	<ul style="list-style-type: none"> ・空港アクセスの改善，国際化への取組 ・列車遅延への対応 ・バリアフリー対策の強化 ・まちづくりとの連携 ・防災対策の強化 等（審議中 2015.6時点）

表-1-2 都市鉄道整備等基礎調査等における主な調査内容

年度	調査名	主な調査内容
平成 11・12 年度	駅等施設改良事業の具体事案、改良の可否の検討に関する調査	乗換利便性向上を目的とした駅等施設改良事業について、その評価手法の検討や具体事案の検討を行い、これらを踏まえた今後の駅等施設改良の整備促進に向けた提案
平成 13・14 年度	都市鉄道の有効活用方策に関する調査	都市鉄道の既存ストックの有効活用方策の検討
	GISを活用した交通計画支援システムの整備に関する調査	GISの空間処理・分析機能とビジュアルなアウトプット機能を活用した「交通計画支援システム」の構築
	広域的な鉄道プロジェクト実現化に向けた調整方策に関する調査	ケーススタディ路線を対象に、上下分離方式での事業採算性、費用対効果分析、運賃、線路使用料について検討し、一般的な調整方策や整備のあり方について課題整理
平成 15・16 年度	事業評価手法の策定に関する調査	マニュアル99の改訂
	都市鉄道における混雑率の測定方法に関する調査	混雑率測定の現状について整理し、新たな混雑率測定方法の導入の可能性について検討
	空港アクセス鉄道整備の促進に関する調査	羽田空港アクセスの現状、問題点と課題の整理を行い、羽田空港アクセス鉄道のサービス水準、サービス改善方策の体系整理を行うとともに、羽田空港アクセスの今後の検討課題をとりまとめ
	軌間の異なる路線間の相互直通運転化方策に関する調査	相互直通運転に関する既存事例やフリーゲージトレインの技術開発状況等を踏まえ、都市鉄道における軌間の異なる路線間の相互直通運転化の可能性と課題を整理
	鉄道整備における新たな整備方式に関する調査	公益重視型上下分離方式のあり方等について検討
	まちづくりと連携した交通結節点の再生整備方策に関する調査	望ましい駅及び駅周辺のまちづくりを実現するための課題を明らかにし、その課題に対して、実現化に向けた対応策を提案
平成 17・18 年度	運輸政策審議会答申第18号フォローアップ調査	18号答申の計画策定にあたっての基本的な考え方のフォローアップとして、各項目に対する達成状況を把握。また、関係者からのヒアリングで得られた開業に至った要因等に関する知見や最新の施策等による未着手路線の整備促進に向けた対応方策の検討
	上下分離方式における鉄道事業者の受益等に関する調査	都市鉄道利便増進事業を対象に施設使用料算定の考え方を検討
	既存の都市鉄道ネットワークの改良による速達性向上施策に関する調査	都市鉄道における速達性向上施策の類型化や速達性向上施策の評価項目を検討。上記評価項目を用い、連絡整備・追越施設設置等の施策を実施した場合の効果や各施策の評価
	鉄道駅における他交通モードとの連携方策に関する調査	鉄道駅における他交通モードとの乗り継ぎに関して、物理、時間、経済、情報の4つの側面に着目し、行政と交通事業者に対してアンケート調査を実施し、他交通モードとの連携が進む理由と進まない理由を明らかにするとともに、利用者に対するアンケート調査や具体的な対応方策を検証するためのヒアリング・ケーススタディを行うことで、利用者の視点に立った鉄道駅におけるモード間の連携方策について提言

年度	調査名	主な調査内容
平成19年度	多様化する利用者のニーズへの対応に関する調査 鉄道分野におけるITの積極的活用方策に関する検討(混雑緩和に関する検討)	時間帯別混雑率の推計を行い混雑の実態を把握し、夜間や朝ピーク時間の前後における混雑緩和施策のメニューと課題の整理 列車種別選択モデルを構築することで利用者の混雑回避に対する支払い意思額を検討し、朝と夜の混雑に対する抵抗感を比較 夜間の混雑緩和施策について、施策効果を検討
平成19・20年度	都市鉄道ネットワークの高質化に向けた整備方策に関する調査	速達性向上施策実施にあたっての施設整備計画・運行計画に関する技術的検討、それら施策の実施効果等の検討を行うとともに、既往調査も踏まえ、効果的に施策を実施する観点から、速達性向上施策に関する一般的な知見のとりまとめ 都市鉄道利便増進制度のより一層の活用促進に向けた今後の課題等のとりまとめ
	ターミナル駅における混雑解消を実現するための施策の検討	ターミナル駅の混雑に関する快適性が評価可能な指標を提案し、この指標を東京圏のみならず、全国へ適用させることを視野に入れて検証するとともに、混雑解消施策を検討
平成20年度	鉄道輸送トラブルによる影響に関する調査	都市部における輸送トラブルの実態を調査するとともに、輸送トラブルが利用者等に及ぼす影響の大きさを定量的に表現する方法を検討 上記手法を用いて、輸送トラブルによる影響の大きさを具体例に基づき試算
平成21年度	都市鉄道の広域的なネットワーク機能を活用した混雑緩和対策に関する調査	通勤・通学混雑等に起因する遅延について、その発生状況と発生メカニズムを把握 列車運行シミュレーションモデルを構築し、遅延防止施策の効果の検証 鉄道事業者が個別に実施している遅延防止・回復施策をヒアリング 遅延防止対策が混雑緩和に及ぼす影響を分析
平成22年度	東京都心部における都市再生推進のための公共交通サービス水準に関する調査	東京都心部における公共交通に関する課題として、鉄道駅の混雑と鉄道利用不便地域の存在に焦点を当て、それらに対する改善方策及びその効果についての検討
平成22年度	サービスの高度化に伴い発生する遅延等に対応した定時運行の確保方策に関する調査	遅延防止の観点からの混雑緩和対策の検討や、列車遅延の分析、輸送障害時の課題等についての整理検討。
平成23年度	東京圏における鉄軌道整備の現状把握と今後の方向性の検討に関する調査	第18号答申の達成状況の把握と関係者ヒアリングを通じて、基本目標の課題認識の整理と答申以降の社会経済の変化からみた新たな課題の抽出。
平成24年度	東京圏における今後の望ましい都市鉄道のあり方に関する調査	今後の都市鉄道の方向性を検討するため、計画目標、現状の取組みや課題、都市開発・交通計画・防災対策・観光面の取組状況の整理を行い、目指すべき方向性について検討。

1.1.2. 東京圏の都市鉄道を取り巻く社会状況

(1) 東京圏の都市鉄道の現状

東京圏の都市鉄道については、従来から通勤通学の混雑等の問題への取組が行われてきているが、近年では、各国との都市間競争が激化する中での国家戦略特別区域等を活用した都市の国際競争力強化の必要性の高まり、少子高齢化の進展や人口減少時代の到来、首都直下地震をはじめとした災害リスクの高まり、訪日外国人観光客の増加等、取り巻く環境は大きく変化している。さらに、2020年には、東京オリンピック・パラリンピックの開催が決定している。このような状況の中、より質の高い東京圏の都市鉄道ネットワークを構築していく観点から、空港アクセスの改善、列車遅延への対応、バリアフリー対策の強化、まちづくりとの連携、防災対策の強化、外国人の利用しやすさの向上等国際化への取組、ICT（ICT：Information and Communication Technology）の活用の拡大等を進めることが急務となっている。このため、東京圏における今後の都市鉄道のあり方については、昨年4月に国土交通大臣から交通政策審議会へ諮問され、概ね15年後を見据えて、今後の東京圏の都市鉄道に係わる各種政策課題や、これらの政策課題に対応した具体的な鉄道ネットワークのあり方が審議されているところである。

(2) 東京圏の都市鉄道の課題

今後30年間において、首都直下地震が発生する確率は70%と予測される等、東京圏における大規模災害が発生するリスクが高まっている。また、東京圏の社会資本の多くが高度経済成長期に整備されており、今後、社会資本の老朽化が一層進むことが予測される。そのため、来るべく大規模災害への備えを進めるとともに、施設の高齢化に対し適切なメンテナンスを行うことで長寿命化を図っていくことが重要となる。また、災害発生時の帰宅困難者や復旧等に対する対応、災害発生時における鉄道利用者等への情報提供、案内等、大規模災害等のリスクへの対応が課題とされている。

また、快適で安定した鉄道輸送サービスの提供の重要性はより高まるものと考えられる。混雑緩和、特に、一部の路線で引き続き残る激しい混雑の緩和対策や、相互直通運転により利便性が向上する一方、拡大する列車遅延への対応、短絡線の整備による速達性の向上や乗継ぎ円滑化等の既存の都市鉄道ネットワークの機能強化も重要な課題である。

少子高齢化社会の進展や訪日外国人の増加等を背景に、益々多様化する利用者ニーズ

への対応も重要である。誰にも利用しやすい都市鉄道の実現、高齢者、障害者、子供連れ等にも利用しやすいサービスや情報提供のあり方、ホームドアの普及拡大をはじめ、今後のバリアフリー対策はさらなる進展が求められている。ICT等の最新技術の活用により、利用しやすい都市鉄道の実現、多くの人々が訪れる駅空間の活用と、質の向上、利用者利便の向上に資する多様なサービスと連動した各種運賃についても、工夫が考えられる。

国際競争力強化への対応に関する課題として、国際的な都市間競争が激しくなる中、今後の国際空港アクセスのあるべき姿、中央リニア新幹線の開通を見据え品川駅等へのアクセス充実、国家戦略特別区域の効果の発現を後押しする観点から都市鉄道としての貢献等があげられ、いずれも議論が必要である。同様に、観光立国への対応も求められている。案内表示、音声案内、公衆無線 LAN、企画乗車券等、東京圏を訪れる訪日外国人の方々へのサービスの充実や改善、観光による沿線の活性化への協力や、都市鉄道そのものの観光資源としての活用可能性として、都市鉄道の役割が議論される必要がある。オリンピック・パラリンピック大会への対応、また、オリンピック・パラリンピックを契機として、どのような取組を加速・充実させることが期待されるかについても、議論が求められるところである。

一方で、開発による鉄道利用者の急増等に適切に対応するため、都市鉄道ネットワークの機能のあり方と都市との連携、また、その際の受益と負担のあり方について、人口減少や高齢化等が進む中、地域との連携や都市鉄道の利用促進の展開、鉄道路線間やLRT、路線バス、BRT等の他交通モードとの連携や役割分担の強化等、まちづくりや交通モード間の連携についても今後の課題である。

また、環境負荷低減の推進の視点から、鉄道車両や駅の省電力化・低炭素化の推進、他の交通モードからの転移の促進や、今後、各鉄道事業者が各種取組みを進めるにあたって必要となる財源の確保方策や、鉄道事業者・利用者等の負担のあり方についても、議論が必要である。

1.1.3. 東京圏の都市鉄道サービスの新たな課題

(1) 輸送障害と定常的な遅延

東京圏における輸送障害（列車の運休、旅客列車の30分以上の遅延等）の件数は平成17年度をピークに減少傾向にあるが、平成21年度は546件であり¹⁾、これは1日当たり1.5件の輸送障害が発生したことになる。輸送障害とは30分（旅客列車以外は1時間）以上の遅延を生じた場合に鉄道事業者から地方運輸局長へ報告される鉄道事故統計項目の一つである。また、東京圏の全路線長における相互直通運転の路線延長は平成20年度で900kmを越えている。それに伴い、運行形態の複雑化や、他路線の事故等の影響を受ける、また、事故等におけるダイヤ調整の煩雑化といった負の効果が、遅延の発生・波及の現象として顕在化している。このため、輸送障害一件あたりの平均影響列車本数は60本/件となっており、平成14年度と比べ1.6倍に増加している²⁾。

しかし、元データの鉄道運転事故等届出書は30分未満の遅延を報告対象としておらず、恒常化する短時間の遅延は含まれていない。輸送障害に至らない30分未満の遅延については、既往の統計データが存在しないのが現状であり、その実態把握を行うため、国土交通省は平成21年より鉄道事業者と協力して遅延に関する調査^{3), 4)}を実施している。このような慢性的に発生する遅延は、遅れ時間も日毎に異なり、未だ混雑率190%を超える路線が多く存在するため、利用者は車内の混雑に耐えながら、所要時間の増加、さらに到着時間の不確実性という幾重ものストレスを強いられている。その社会的費用は年間2,000億円以上との報告⁵⁾もある。

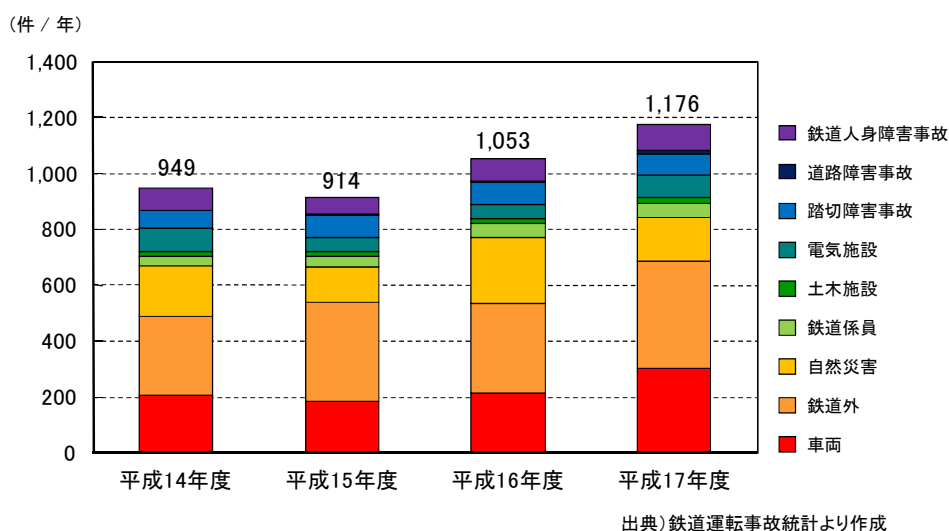


図-1-1 原因別輸送障害件数の推移（東京都，埼玉県，千葉県，神奈川県）

東京圏鉄道の遅延について、時刻表から遅れている場合でも、等間隔での運行が維持されていれば問題ないとの意見がある。利用者にとっては、自らが予定した時間に列車が駅に到着し、予定どおり出発すれば、それが時刻表上で異なる列車であっても問題は無い。しかし、通勤・通学時間帯は列車運行本数が多いため、非ピーク時間帯よりも所要時間が長い運行ダイヤが計画されており、遅延が発生すると、さらに所要時間が増加する。図-1-2は田園都市線の中央林間駅～渋谷駅間の普通列車における列車別所要時間の変化を示している。時刻表においてピーク時間帯の所要時間は、非ピーク時の約1.2倍となっており、運行計画で所要時間の増加を見込んでいるものの、実績は更に遅れが発生しているため、この日は1.4倍となる約20分の所要時間増加が生じている。また、所要時間の増加量は日々異なるため、これまで鉄道が誇ってきた定時性や信頼性が著しく低下している。その一例として、東急田園都市線の遅延証明書発行履歴（平成22年9月1日～10月30日）を集計して遅延時間の発生割合を算出すると、5分以上10未満の遅延が約5割を占めているが、10分以上の遅延も約3割となっており、毎日の遅延時間にバラつきが生じていることが示される。この様に列車遅延は定時的に発生していることから、日々の列車遅延の実態に合わせた運行ダイヤの設定も考えられるが、柔軟なダイヤ設定を困難としている列車運行に関する現状の諸規程の問題もあり、効果的な対応策は見出されていない状況にある。

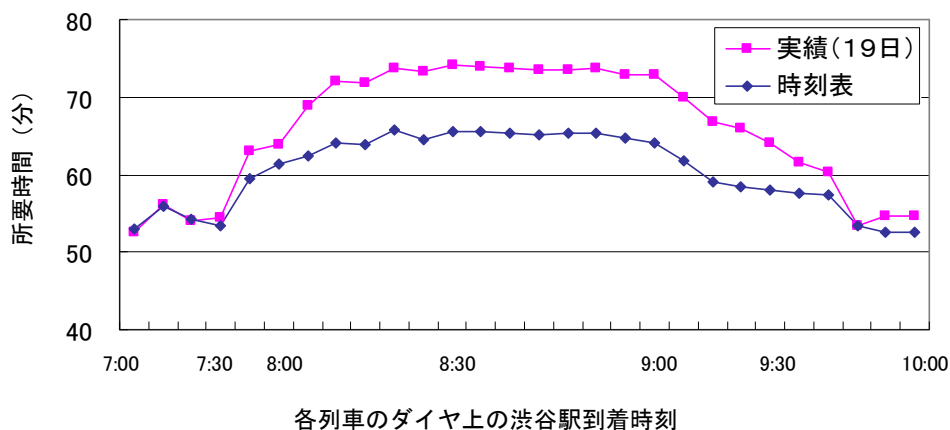


図-1-2 時刻表と実績の所要時間 (田園都市線:中央林間駅～渋谷駅間)

(2) 高頻度運行の負の効果

一般に、運転本数とその限界である線路容量に達する以前に、ある本数を越えたところから駅間の所要時間も増加する現象が発生する。複数の列車種別を運行する路線においては、その影響は著しい。日中の所要時間に対し、朝ラッシュ時は1.2倍以上の所要時間を設定し時刻表を組んでいる路線も多く存在する。朝の通勤時間帯は、車内の混雑を緩和するために線路上に多くの列車が存在する。運行ダイヤは過密に計画され、些細な時間増加で遅延が発生し、それが次々と波及しやすい状態にある。

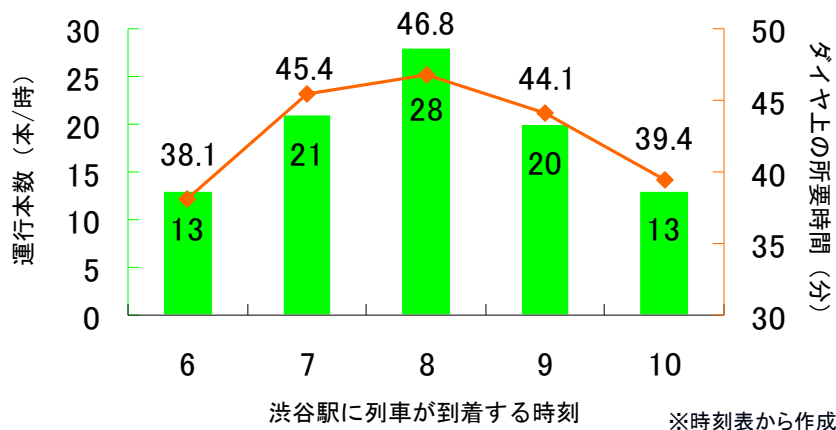
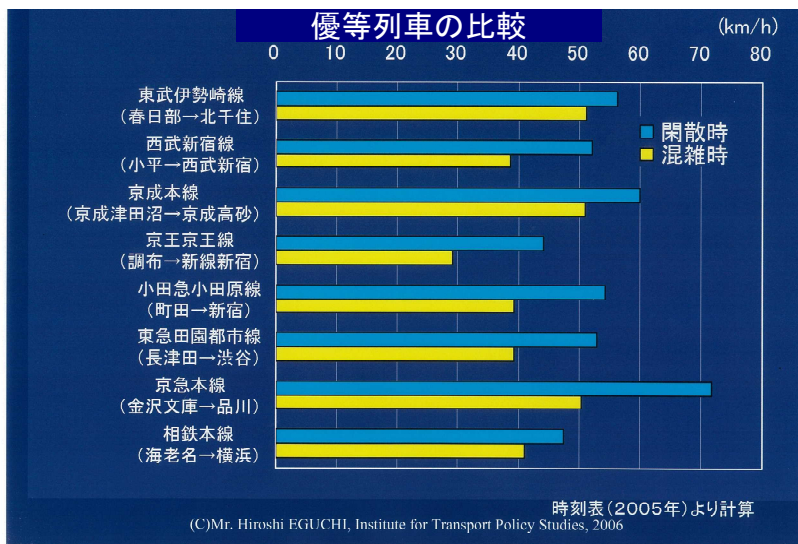


図-1-3 時刻表の運転本数と所要時間
(田園都市線:上り[長津田駅~渋谷駅間]全列車)



出典) 第82回運輸政策コロキウム (江口弘氏講演資料)

図-1-4 時刻表の表定速度

(3) 相互直通運転の負の効果

東京圏の鉄道輸送は未だに混雑率 180%を越える路線が多く存在し、それらはいずれも運行間隔 2~3 分の高頻度運行を行い、既存の施設容量一杯に運行をしている。このため、ある路線で運行トラブルが発生すると、他路線へ振り替えられた需要が、その振り替え路線に新たな遅延を発生させ、ネットワーク状に遅れが連鎖する。つまり、遅延の問題は、混雑率が高く高頻度運行を行い、かつ相互直通運転を実施するある特定路線の問題だけではなく、ネットワークとして広がる東京圏鉄道全体の問題といえる。相互直通運転は利用者にとって、路線や駅の混雑緩和、所要時間の短縮、乗換え時間と回数の減少、切符を買う手間の節約等の正の効果が生まれる。一方で、運行形態の複雑化、着席チャンスの減少、他路線の事故等の影響を受けるといった負の効果も生じる。鉄道事業者にとっては、駅施設等の共用による建設費、経費の削減、車両、運転要員の効率化の正の効果と、車両費が割高になる、事故等におけるダイヤ調整の複雑化等の負の効果が生じる。東京圏の全路線長における相互直通運転の路線延長割合は平成 17 年度で 35%に達している。それに伴い、運行形態の複雑化や、他路線の事故等の影響を受ける、また、事故等におけるダイヤ調整の煩雑化といった負の効果が遅延の発生・波及の現象として顕在化している。その対応として、相互直通運転を一時的に中止し、折り返し運転を実施している。しかし、それに伴う駅ホームの混雑、乗換え時間の増加、時刻表の乱れといった、相互直通運転の正の効果により解消していた問題が再発し、新たな遅延の発生と波及が生じてしまい抜本的な解決には至っていない。

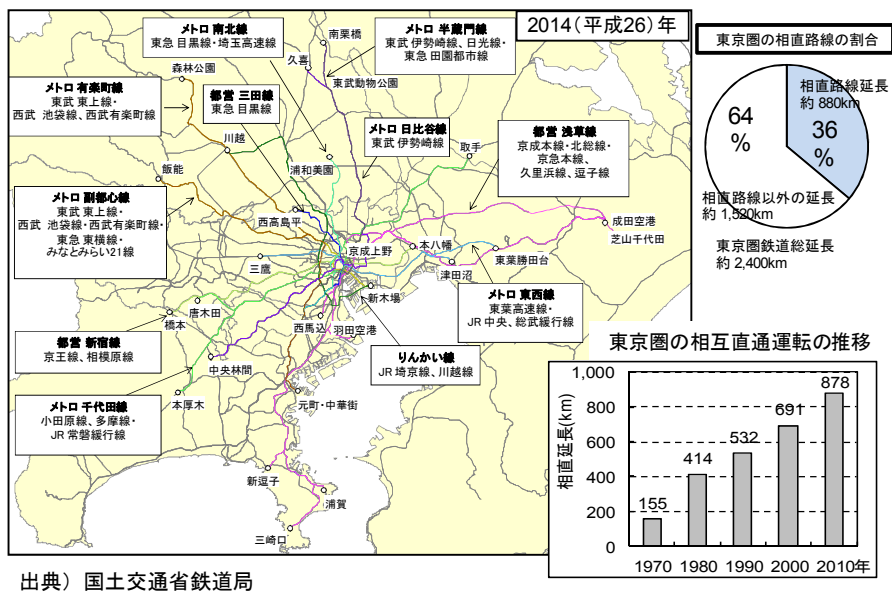


図-1-5 相互直通運転の実施状況

(4) 鉄道ネットワークと遅延

東京圏の鉄道輸送は未だに混雑率 180%を越える路線が多く存在し、それらはいずれも運行間隔 2～3 分の高頻度運行を行い、既存の施設容量一杯に運行をしている。このため、ある路線で運行トラブルが発生すると、他路線へ振り替えられた需要が、その振り替え路線に新たな遅延を発生させ、ネットワーク状に遅れが連鎖する。つまり、遅延の問題は、混雑率が高く高頻度運行を行い、かつ相互直通運転を実施するある特定路線の問題だけではなく、ネットワークとして広がる東京圏鉄道全体の問題といえる。このような混雑と遅延の問題は新聞等でも取り上げられており、社会的にも改善が求められる重要課題といえる。交通政策審議会の鉄道分科会においても 2008 年の報告書で定常的な遅延の問題が述べられており、その対策の必要性が提言されている。下表は、東京圏の代表的な路線の混雑率とラッシュ時間当りの車内混雑率を示している。いずれの路線も高頻度運行により輸送力を高めた運行を実施しているものの、未だに高い混雑率となっている。ここで示している混雑率は 1 時間当りの平均混雑率である。したがって、例えば 15 分当り、あるいは列車別で混雑率を計測した場合には、現在の表記以上の混雑率となっていることは言うまでもない。東京圏全体としては混雑率が低下し、サービス改善が着実に図られてきているところではあるが、個々の路線や、個々の区間、あるいは個々の時間帯でみた場合については、混雑緩和に向けて今後も継続的な取り組みが必要であると言える。

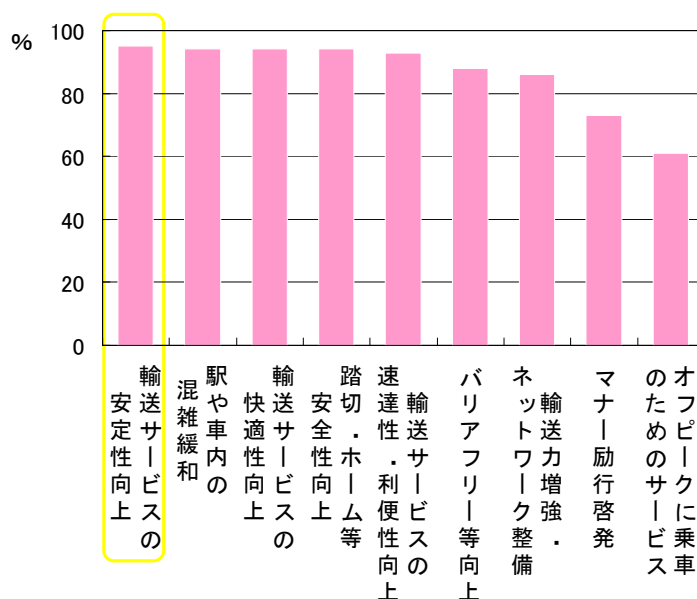
表-1-3 代表路線の混雑率と運行本数 (H20. 4)

事業者	路線名	区間	混雑率	運行本数
JR	中央線(快速)	中野 → 新宿	198%	27(本/h)
JR	山手線	上野 → 御徒町	205%	25(本/h)
東急	田園都市線	池尻大橋 → 渋谷	198%	28(本/h)
JR	総武線(緩行)	錦糸町 → 領国	206%	23(本/h)
メトロ	千代田線	町屋 → 西日暮里	181%	27(本/h)
JR	京浜東北線	上野 → 御徒町	209%	26(本/h)
メトロ	東西線	木場 → 門前仲町	199%	26(本/h)
小田急	小田原線	世田谷代田 → 下北沢	192%	27(本/h)

出典) 数字で見る鉄道 2009 と時刻表より作成

(5) 利用者のニーズと多様化

ある鉄道事業者で実施した利用者アンケートによると、利用者が重要視する改善項目として「輸送サービスの安定性向上」が最上位となっており、利用者サービスの向上としてもその対策が求められている。5分や10分程度の比較的短い列車遅延については、ここ数年、定常的に発生していることから、一部の利用者からは慣れてしまっているという意見も聞くことがあるが、いま一度、利用者のニーズに耳を傾け、鉄道サービスレベルの回復、さらには、サービスレベルの向上が求められている。また乗客の行動・振舞いの変化も遅延に影響している。携帯電話やスマートフォンの画面を見ながらの乗降やホームでの移動、乗降時に列車ドアの両脇に立ち残る人等も遅延の発生・増大の要因となっている。キャリーバックの利用者も増えており、ホーム上やコンコースでの移動の際に、利用者同士のトラブルの要因になっている場合も見られる様になっている。さらに高齢者のトリップ数の増加や、文化の異なる外国人等、利用者の多様化と社会の変化に伴い、対策の考え方も変えていく必要があると言える。2020年に東京オリンピック・パラリンピックの開催が決定し、世界各国から多くの外国人が訪日する。立候補ファイルによると、大会期間中に最大約92万人/日の観客と大会スタッフの輸送需要のうち、約78%が鉄道を利用するとされている。また、2020年に訪日外国人旅行者2000万人の政策目標に対して、2014年の実績では約1300万人に達しており、今後は訪日外国人旅行者2000万人の早期達成を目標とした政策が推進されている。



出典：東急電車モニター2007年上期(274回答)より抜粋

図-1-6 利用者アンケート結果

(6) 都市鉄道の4つの混雑

これまで東京圏の都市鉄道は4つの混雑を改善すべく、その対策を行ってきた。第1は車内の混雑、第2は線路上の列車の混雑、第3はターミナルの混雑である。第4は踏切の混雑、開かずの踏切問題である。これらの混雑に対し、ネットワーク整備や列車の長編成化、運行システムの改良と高頻度運行、車両改良、相互直通運転、ターミナルの改良、ICカードの導入、連続立体事業等、様々な取り組みを実施し、それらの施策は大きな成果をあげてきたといえよう。東京圏鉄道は広域かつ膨大な通勤需要を正確かつ安全に輸送可能とした世界に誇れる都市鉄道システムを構築している。それゆえに、東京圏の鉄道網は「概成された」と言われることがある。この高頻度運行、相互直通運転といった日本の最も特徴的な施策は大きな効果をあげた反面、その副作用として、①通勤時間帯の慢性的な遅延、②人身事故、車両故障等により発生した遅延の広域的な連鎖、③一度発生した遅延の回復に数時間も要してしまうといった回復困難性の問題等が起こり、ある種のパラドクスとなっている。これら毎日のように発生する遅延は、通勤時間帯の混雑と相まって、利用者に多大な苦痛を強めている。このうち、線路上の列車混雑によりもたらされた課題として、ダイヤ上の所要時間と実所要時間の乖離がある。鉄道政策は主として車内の混雑の解消に主眼が置かれてきたが、車内混雑に所要時間の遅れも加わり、二重にサービスが劣化していることが都市鉄道の課題であるといえる。

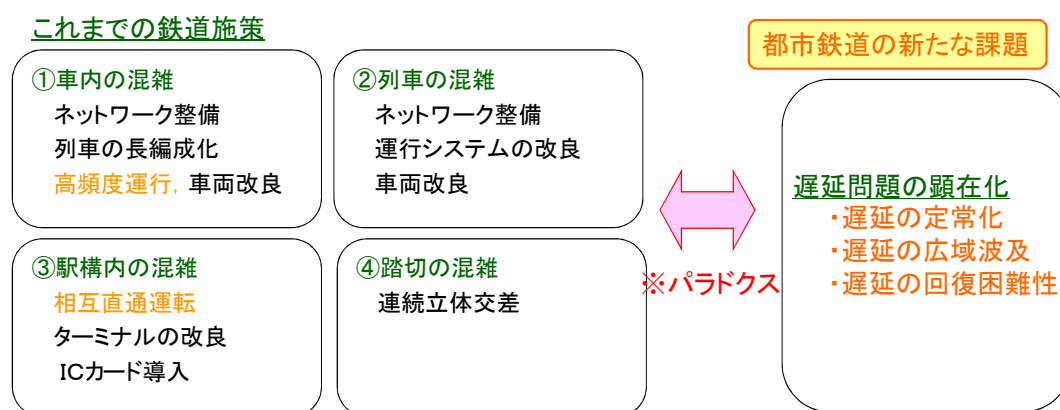


図-1-7 都市鉄道の4つの混雑とその対策

(7) 列車遅延の社会的費用

列車遅延による社会的費用の要素には、①発車時刻遅延による待ち時間の増加、②ダイヤ上の運行時間の遅れによる所要時間の増加、③運行本数減少による輸送力低下と混雑率の増加、④遅刻リスクを回避するための余裕時分の増加がある。これまでの研究における効用関数の推定結果によれば、それぞれ①45 円/分、②25 円/分、③8～12 円/10%、④7 円/分の社会的費用が生ずる。これをもとに東京圏の通勤者を対象とした列車遅延の社会費用を概算すると 175 円/人となり、年間の通勤日数を 250 日とし、鉄道事業者のホームページに掲載された遅延証明書の発行状況から概算すると、東京都市圏では、毎日約 1600 本の列車が遅延しており、300 万人を超える人がその影響を受けていると推計される。発生した遅延の平均遅延時間を約 10 分と仮定し、列車遅延の社会的費用を試算すると、10 年間で約 1 兆 9000 億円と推計され、その経済的な損出の膨大さが伺われる。ここでの推計は概算に過ぎない。しかしながら、列車遅延の問題の規模の大きさ、影響度合いを測るには十分な精度であり、列車遅延は早急な対応が求められる社会問題であることが分かる。

遅延証明書の発行状況 (H22.11.1～12.27：平日 28 日間)

『都心 (23 区) に駅をもつ路線 (35 路線) の遅延発生割合は、57%.』

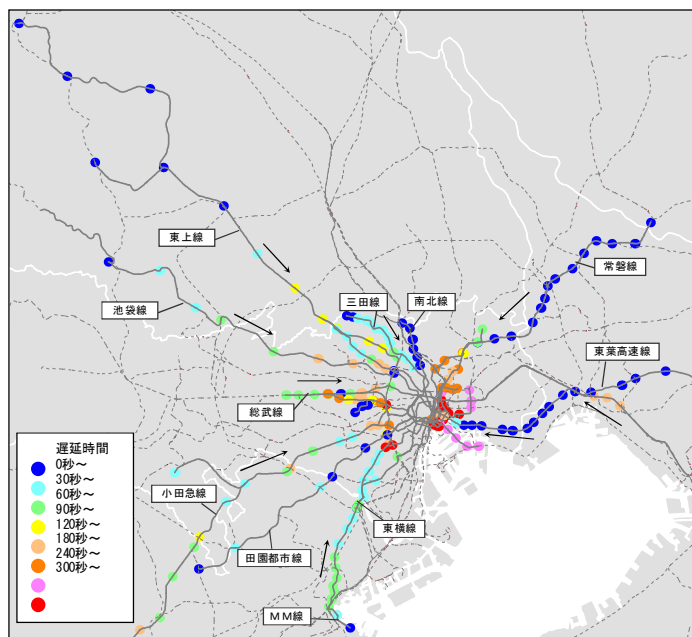
- ・「山手線+地下鉄 (13 路線)」：67%
- ・「その他の路線」：51%

⇒ 東京都心へ通勤・通学する人の 9 割が「山手線+地下鉄 (13 路線)」に乗り換えると仮定した場合 (平均乗換え回数：0.9 回)

$$488 \text{ 万人/日} \times 9 \text{ 割} \times 67\% = 294 \text{ 万人/日}$$

$$488 \text{ 万人/日} \times 1 \text{ 割} \times 51\% = 25 \text{ 万人/日}$$

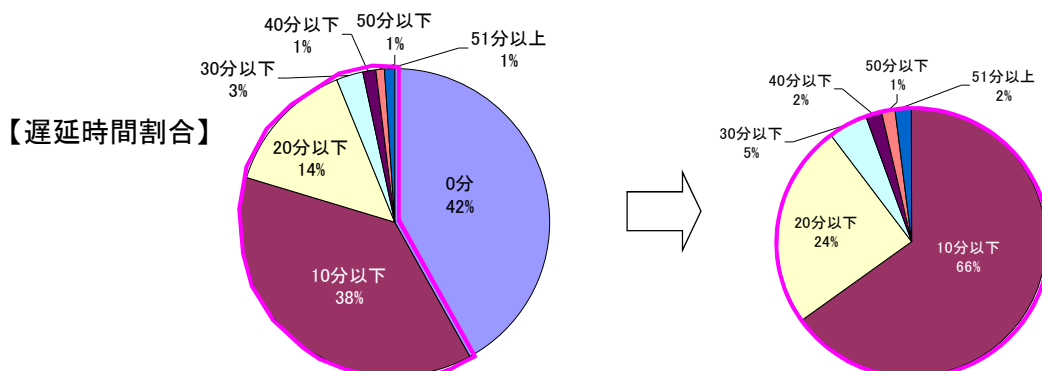
合計 319 万人/日・・・遅延の平均影響人数



出典) 都市鉄道の広域的なネットワーク機能を活用した混雑緩和対策に関する調査, 国土交通省

図-1-8 列車遅延の発生状況

『都心（23区）に駅をもつ路線（35路線）の運行間隔は、概ね2分～3分』
 Σ 『朝ピーク1時間の列車運行本数』 × 『遅延発生割合』 = 798本/時
 ⇒ 遅延発生からダイヤ回復まで概ね2時間と仮定した場合
 $798\text{本/時} \times 2\text{時間} \approx 1,600\text{本/2時間} \dots$ 遅延の平均影響本数
 『都心（23区）に駅をもつ路線（35路線）の平均遅延時間は、約6分』
 そのうち、『遅延が発生日の平均遅延時間は、約11分』



出典: 遅延発生割合は、首都圏鉄道事業者HP掲載(H22.11.1～12.27: 平日28日間)の遅延証明書発行状況(朝ラッシュ時)を集計。列車運行間隔(本数)は、数字で見る鉄道2011より。

図-1-9 遅延時間の発生割合

東京圏の通勤者を対象とした概算 『平均遅延時間と影響人数から試算』

設定条件	一人当たり社会的費用
発車時刻遅延 +3分	135円/人
所要時間増加 +7分 (35分⇒42分)	175円/人
運行本数減少 -1本 (29本⇒28本)	
混雑率の上昇 +6% (170%⇒176%)	8円/人
	計 318円/人



総社会的費用

設定条件	社会的費用
遅延の影響人数 300万人/日・片道	年間 2300億円
通勤日数 250日	10年間 1兆9千億円

出典) 第93回運輸政策コロキウム(岩倉教授講演資料)をもとに試算

図-1-10 列車遅延の社会的費用

(8) 安全対策と駅停車時間の増加

駅停車時間の増加要因として、ホーム柵等の稼働時間がある。また、ホーム柵が設置されていることで確認時間に影響が生じる。東京メトロ丸ノ内線の四ッ谷駅において田園都市線と同様の計測を行った。混雑や乗降人員による影響があるので、一概には比較できないが、ホーム柵が設置されている場合の特徴として、ドアばさみが発生すると列車ドアとホーム柵がそれぞれ再開閉を強いられるので、1回のドアばさみによる確認時間の増加割合が大きくなる傾向にある。近年、ホーム柵等の設置を推進する動きがある。安全性の向上、人命の尊さ、また事故発生による長時間の遅延を考えると重要な取り組みといえよう。ただし、ホーム柵の稼働は一駅当たり約3秒の駅停車時間の増加をもたらす。丸ノ内線で導入した際は、池袋から新宿・荻窪の往路と帰りの復路の合計で、2分20秒の時間増加となり、ダイヤ改正を行っている。このことから、安全上のホーム柵と駅停車時間の増加及び遅延とはトレードオフの関係にあり、導入の仕方の検討が必要である。路線全駅で一律に導入するのが良いのか、駅によっては人員配置の方が適当な場合もあるかもしれない。安全かつ、遅延の最小化を検討していく必要がある。



写真-1-1 丸ノ内線のホーム柵

(9) 列車運行サービス指標の必要性

これまで東京圏の都市鉄道サービスは、混雑緩和を主眼とし、そのための高頻度運行を実施してきた。その結果、限られた路線容量で高頻度運行を実施するため、線路上の列車密度の高まりに伴い、表定速度は低下を余儀なくされている。また、運行ダイヤの余裕時分が縮小されるため、些細な時間増加で列車遅延が発生し、それが次々と波及しやすい状態にある。つまり、現状の鉄道サービスは、混雑緩和を実現するために、ダイヤの速達性と、時間信頼性のサービスレベルが低減されている。これは現在、鉄道のサービスレベルを評価する指標が混雑率だけであり、他のサービスレベルに関する指標が存在していないことが、要因の一つと考えられる。このため、混雑率と速達性、及び時間信頼性の相互の関連性を考慮し、3つ要素を包含した総合的なサービスレベル指標の設定が必要であり、これにより真の鉄道サービスレベルの向上が期待される。その一案として、以下のような列車運行サービス指標の適用が考えられる。混雑率指標、速達性指標、遅延頻度指標を設定し、各指標の目標値を1.0とした場合の実績値の比率をレーダーチャートに図示する。混雑率指標の目標値は、第19号答申の目標値である150%とする。速達性指標は時刻表のピーク／オフピーク所要時間比により算定することとする。遅延頻度指標は、遅延証明発行割合を用いて算定する。例として、東急田園都市線における列車運行サービス指標のレーダーチャートを図-1-11に示す。

混雑率指標 : 既往の混雑率 (%)

実績値 180% ⇒目標値 150%

速達性指標 : 時刻表のピーク／オフピーク所要時間比

実績値 1.25 (=65分/52分) ⇒目標値 1.0 (=52分/52分)

遅延頻度指標 : 遅延証明書発行割合 (%) [遅延頻度は実績値を 1.9 として算出]

実績値 90% ⇒目標値 0%

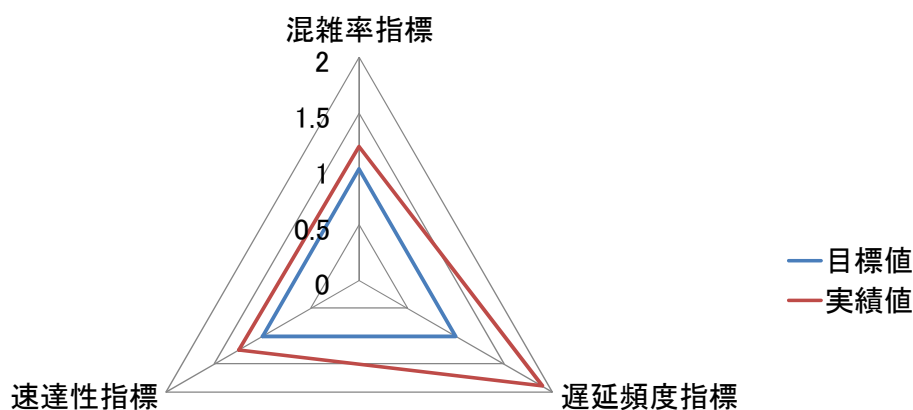


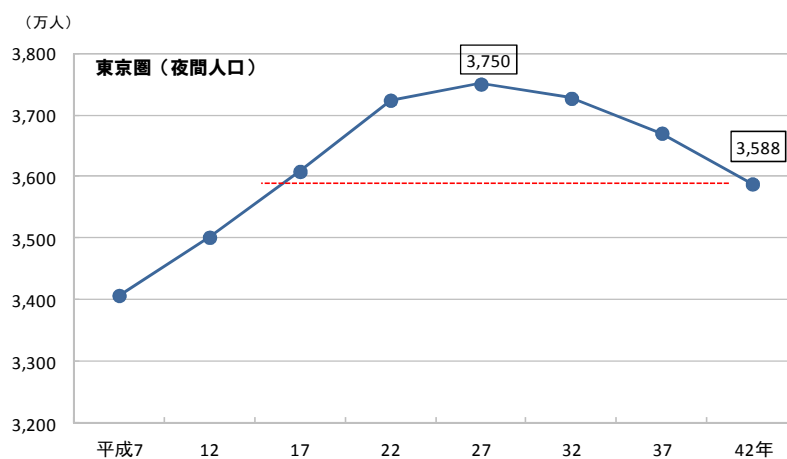
図-1-11 列車運行サービス指標のイメージ

1. 1. 4. 東京圏の将来動向と列車遅延

(1) 東京圏の将来人口

国立社会保障・人口問題研究所の H25 年度推計によると、東京圏の将来夜間人口は平成 27 年頃をピークにとして、以降は現象傾向に転じるとされている。15 年後の平成 42 年には平成 22 年と比べて約 4%減少し 3,588 万人となることが見込まれている。しかしながら、この水準は今から 10 年前の平成 17 年の夜間人口と概ね同程度の規模であり、このとき既に東京圏の都市鉄道では列車遅延の問題が顕在化していた。国立社会保障・人口問題研究所の将来推計は、将来生存率や将来社会増減率等を用いて将来夜間人口を算出しているが、東京圏では平成 7 年以降の過去 3 回の推計で全て過小推計となっており、東京都の推計においては平成 2 年から過去 4 回とも過小推計となっている。また、東京圏の夜間人口は平成 32 年以降も増加傾向にあるとする報告⁶⁾もある。将来従業人口においては、今後 10 年で新規開発される複合ビルの増床が約 800ha に達するとの報告⁷⁾があり、これは六本木ヒルズ 11 街区分に該当する。これらを鑑みると、全

国的には人口減少社会が到来しているものの、東京圏においては急激な人口減少が見込まれず、むしろ増加傾向が続くことも十分に想定される。このため、東京圏の都市鉄道においては、社会的な人口減少による輸送人員の大幅な低下、及びこれに起因した列車遅延の自然解消について期待することが出来ないものと考えられる。



出典)国勢調査(～平成22年)、社会保障人口問題研究所推計値(平成27年～)

図-1-12 東京圏の将来夜間人口

(2) 東京圏の鉄道利用者の将来動向

今後の東京圏の都市鉄道は、利用者属性の多様化が推察される。例えば、東京圏の将来夜間人口を年齢階層別にみると、65歳以上の高齢者の割合は、平成22年で約20%であったのに対し、平成42年では約30%となり10人に3人は高齢者という異次元の高齢社会が到来すると見込まれている。また、近年の訪日外国人の増加数は著しく、目標とされた年間2,000万人は年半ばにして達成されようとしている。さらに日本再興戦略⁸⁾によって女性の就業者数が過去2年で90万人増加していることが報告されており、駅ナカや駅周辺の託児所の設置も進んでいる。これらの利用者の行動特性は各々に異なることから、列車の乗降や、駅構内のホームやコンコース等における旅客流動に乱れが生じることが推察され、今後これに起因した列車遅延の発生頻度が増加することが想定される。また、多様化する利用者ニーズに対応するためのサービス向上策が、今後より一層取り組まれていくものと考えられる。具体的には、相互直通運転の更なる進展や、安全性強化のためのホームドアの設置、バリアフリーの2ルート目の整備、着席サービスの導入等である。これらのサービス向上策は、利用者の利便性を改善する一方で、列車遅延の影響範囲の拡大や、停車時間の短時間化、ホームの狭小化、ラッシュ時間帯の輸送力低下の可能性等の負の作用を生じる場合も考えられ、導入方法について十分な

検討を要する方策である。この様な利用者属性の多様化、及び利用者ニーズの多様化への対応は、列車遅延の発生要因の増加や、影響範囲の拡大等に影響することから、東京圏の都市鉄道の列車遅延は今後更に悪化する可能性を有している。

(3) 列車遅延対策の方向性

東京圏の都市鉄道は、輸送力増強や利便性向上のため、高密度な鉄道網整備、列車の長編成化、高頻度運行、相互直通運転の実施、ホームドアの設置等の施策により、世界に誇れる都市鉄道システムを構築している。しかしながら、これらの施策は大きな成果をあげた一方、その副作用として、通勤時間帯の慢性的な遅延、遅延の広域的な連鎖、遅延回復の長時間化が発生しており、東京圏の鉄道は新たな課題に直面している。抜本的な対策としては、複々線化、駅施設の改良、折り返し設備の増設等の大規模投資を伴う路線容量の増強、あるいは、駆け込み乗車の抑制、時間帯や列車種別及び車両ドアの分散乗車、列車乗降及び駅構内流動の円滑化等の利用者意識の改革が求められるが、これらが可能な場合は限定的であり、また急務である都市鉄道の信頼性回復を実現するまでには、長期的な時間を要してしまう。また、短期的な対策として、運行ダイヤの見直し、あるいは、高頻度運行、相互直通運転、ホームドア設置等のこれまでの施策の一時的な中止が考えられるが、見かけ上の対応であり本質的な改善でなく、解消されていた問題が再燃する可能性が考えられる。このため、早急性が求められる遅延対策において、既存のサービスレベルを低下することなく、列車遅延の問題を解消していくためには、遅延の発生要因への対策のみならず、発生してしまった遅延に対する波及・拡大の抑制方策、さらには、遅延発生状況における早期回復方策といった視点からの検討も実施していく必要がある。

1.2. 本研究の目的

列車遅延の発生要因の一つとして、旅客の駆け込みや混雑する車両への無理な乗車に伴うドアの再開閉、安全確認時分の増加等に伴う駅停車時間の増加が一般的に知られている。高頻度運行下では駅停車時間の増加が、直ちに後続列車の駅間走行速度の低下を誘引し、遅延の影響が後続列車へ波及する。運行間隔が短いため、駅間での走行時間の増加は後続列車で回復することなく、その区間の走行時間の増加量として引き継がれる。さらに走行時間が増加するとその影響は後続列車へ次々と伝播し、上流駅間へと波及する。東京圏の都市鉄道が膨大な量の旅客を輸送し、未だに混雑率 190%以上の路線が多く存在するなか、列車遅延の発生を抑制することは極めて困難である。抜本的な対策としては、大規模投資を伴う路線容量の増強、あるいは、利用者意識の改革が考えられるが、これらが可能な事例は限定的であり、また急務である都市鉄道の信頼性回復を成し遂げるには、あまりに長期的な時間を要してしまう。このため、列車遅延の対策にあたっては、遅延発生の抑制のみならず、発生してしまった列車遅延に対する拡大・波及の抑制方策、さらには、遅延発生状況下における早期回復方策といった視点からの検討が極めて現実的かつ有効な手法と考える。

そこで本研究は、駅の旅客流動と駅間の列車運行との相互作用により拡大・波及する列車遅延を対象とし、①高頻度運行下において列車遅延が回復する要因とその特性について明らかにし、②列車遅延が回復傾向にある列車群の運行状態から、列車の運行方式が列車遅延の回復に及ぼす影響とその効果について明らかにすることを試みる。さらに、③時空間的な列車遅延の回復のメカニズムを踏まえ、具体的な解決方法の提案を行うこととする。

また本研究は、既往の研究において所与の条件として与えていた列車運行を、実績値を用いた列車運行挙動の動的分析結果に基づく変数として列車遅延のメカニズムに反映する点で、学術的な新規性を有するものである。これにより、これまで効果的な対策を打ち出せていない高頻度運行下における列車遅延の回復方策について、慣習的な概念から脱却し、新たな理念による実効性の高い運行管理手法を提案することを目的とする。そして、更なる利用者サービスの向上とともに、我が国の鉄道技術向上に資することを本研究の意義とする。

1.3. 本論文の構成

本論文は以下に示す全8章で構成される。

第1章『序論』では、本研究の背景として、主に日常的な列車遅延について発生状況を確認し、現状の鉄道サービスレベル及び列車遅延の社会的費用について、公表資料をもとに現状把握を実施し、都市鉄道が抱える新たな課題の視点から、本研究の目的を示す。

第2章『既往研究の整理』では、本論文で取り扱う研究分野における既往の研究をレビューし、それらを体系的にまとめる。列車遅延を考慮した旅客行動分析及び列車運行に関する研究、列車遅延の現象分析及び再現に関する研究、時間及びネットワークの信頼性に関する研究、駅施設及び運転設備等に関する研究に分類し、それぞれに対して節を設けて述べる。鉄道事業者が実施する列車遅延対策についても概観する。

第3章『列車遅延の現状分析』では、遅延の発生・波及、及び回復のメカニズムの解明に向けて、列車遅延に関する複数のデータを用いて、遅延の発生・波及及び回復の現象を定量的に把握することを試みる。具体的には、駅での旅客流動と駅間での列車運行方式に着目し、詳細な現状分析を行うことにより、遅延の発生及び波及の現象のメカニズム解明に焦点をあてた定量的な分析を行う。

第4章『列車運行シミュレーションモデルの構築』では、遅延対策の効果を事前に定量評価することを可能とするため、列車遅延の現象を予測するシミュレーションモデルの構築を行う。具体的には、列車別の運行状態を再現する手法として、離散型シミュレーションモデルであるセルオートマトン法を適用し、現実の線路閉そく区間と同様にセルを分割することによって、列車運行状態を再現する。

第5章及び第6章では、輸送力と速達性を維持した遅延対策の観点から、遅延の早期回復方策の一手法を提案する。

第5章『列車運行挙動と列車遅延の影響分析』では、第4章で構築したシミュレーションモデルを適用して、運行に関する遅延対策の課題を抽出し、高頻度運行下における遅延の特性を明示する。さらに、列車の運行間隔に起因する遅延の波及と拡大の現象を定量的に示し、駅到着時間を最小とする走行パターンについて、駅間別に異なる閉そく区分を考慮し、その特性に応じて適用可能な運行管理手法の提案を行うこととする。

続く第6章『高頻度運行下における列車遅延対策の検討』では、本研究における知見をさらに展開し、列車遅延発生時における単位時間当たりの輸送力保持の視点から、遅延と輸送力のバランスを考慮した運行管理の提案について述べる。また、短時間の列車

遅延だけでなく、輸送障害等の長時間の遅延についても対策を検討し、運転再開時の運行管理手法について述べる。

第7章『列車遅延の技術的及び制度的課題の検討』では、列車遅延に影響を及ぼす要因とその解決に向けた技術的及び制度的な課題について整理する。また、列車運行に係わる諸規程を整理し、列車運行と時刻表に関する制度上の課題についても言及する。

第8章『結論』では、各章において得られた成果を総括し、本研究の結論を述べる。前章までの分析結果を踏まえ、本研究で得られた知見の取りまとめを行い、本論文の結論とする。

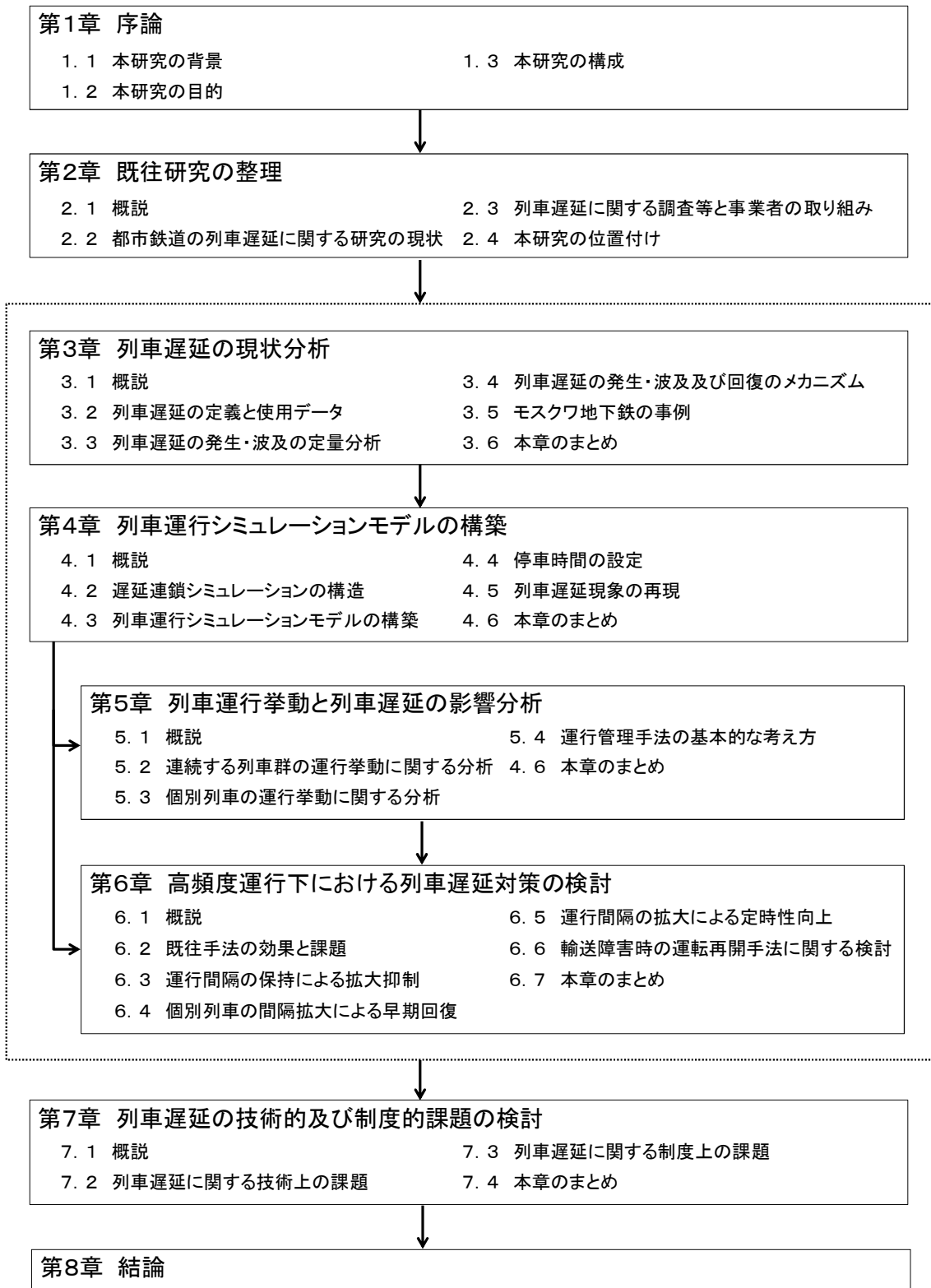


図-1-13 本論文の構成

参考文献

- 1) 国土交通省鉄道局, 首都圏鉄道輸送障害対策会議資料, 2009.
- 2) 国土交通省鉄道局, 鉄道輸送トラブルによる影響に関する調査, 2009.
- 3) 国土交通省鉄道局, 都市鉄道の広域的なネットワーク機能を活用した混雑緩和対策に関する調査, 2010.
- 4) 国土交通省鉄道局, サービスの高度化に伴い発生する遅延等に対応した定時運行の確保方策に関する調査, 2011.
- 5) 仮屋崎圭司, 岩倉成志: 都市鉄道の列車遅延の拡大メカニズムに関する研究, 運輸政策研究, Vol.11, No.4, pp.53-60, 2009.
- 6) (一財)運輸政策研究機構: 30年後の東京圏の人口・鉄道需要及び鉄道の課題 調査研究報告書, 2014.
- 7) 国土交通省鉄道局, 第8回交通政策審議会陸上交通分科会鉄道部会 東京圏における今後の都市鉄道のあり方に関する小委員会, 2015.
- 8) 閣議決定, 「日本再興戦略」改訂2015 - 未来への投資・生産性革命 -, 2015.
- 9) 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.
- 10) 仮屋崎圭司: 都市鉄道の列車遅延の拡大メカニズムに関する研究, 運輸政策研究, Vol.13, No.1, pp.57-64, 2010.
- 11) 江口 弘: 都市鉄道の混雑緩和と速達性向上のための3線運行手法の提案, 運輸政策研究, Vol.13, No.4, pp.2-9, 2011.
- 12) 運輸政策研究機構, 『東京圏の鉄道のあゆみと未来』, 2000.
- 13) (財)運輸政策研究機構: 都市鉄道の広域的なネットワーク機能を活用した混雑緩和対策に関する調査 報告書, 2010.
- 14) (財)運輸政策研究機構: 東京圏における今後の望ましい都市鉄道のあり方に関する調査 報告書, 2013.
- 15) 運輸政策審議会, 東京圏における高速鉄道を中心とする交通網の整備に関する基本計画について (答申第18号), 2000.
- 16) 運輸政策審議会, 中長期的な鉄道整備の基本方針及び鉄道整備の円滑化方策について～新世紀に鉄道整備の具体化に向けて～ (答申第19号), 2000.
- 17) 交通政策審議会陸上交通分科会鉄道部会 東京圏における今後の都市鉄道のあり方に関する小委員会 中間整理, 2015.

第2章

既往研究の整理

第2章 既往研究の整理

2.1. 概説

第2章では、本研究に関連する既往の研究をレビューし、それらをまとめたものを示す。また、鉄道事業者が実施する列車遅延対策についても概観する。本研究では、取り扱う分野が、列車遅延を考慮した旅客行動分析及び列車運行に関する研究、列車遅延の現象分析及び再現に関する研究、時間及びネットワークの信頼性に関する研究、駅施設及び運転設備等に関する研究の4つに大きく分類されることから、それぞれに対して節を設けて述べる。

2.2. 都市鉄道の列車遅延に関する研究の現状

2.2.1. 列車遅延を考慮した旅客行動分析及び列車運行に関する研究

(1) 列車遅延と旅客行動分析に関する研究

列車遅延が鉄道輸送と需要に及ぼす影響に関する研究については、鳥海¹⁾が通勤時間帯の駅停車時間の増加による遅延を、ネットワーク構造の変化として扱った利用者均衡配分を行っている。しかし、遅延の発生した列車の次駅以降での乗客数の増加による遅れの増幅については扱っていない。國松ら²⁾はこの現象に着目し、列車の運行と利用者行動による駅停車時間の推定とを一体的に再現するシミュレーションモデルの開発を行っているが、駅で発生した遅延が駅間を走行する列車に及ぼす影響については扱っていない。また、対象となる遅延時間は、利用者混雑に起因する駅停車時間の変化であり、列車の運行間隔に起因する駅間走行時間の変化については扱っていない。

列車遅延が利用者個人の選択行動に及ぼす影響に関する研究は、定常的な列車遅延が出発時刻選択行動に及ぼす影響と、輸送障害等による長時間の列車遅延が経路選択行動に及ぼす影響の2つに大別される。定常的な列車遅延による利用者の出発時刻選択行動に関する研究としては、金子ら³⁾が、利用者の認知と行動への影響についてアンケート調査を実施し、到着余裕時間の影響要因と遅延対策の効果を分析している。加藤ら⁴⁾は、出発時刻選択モデルを用いてスケジュール変動の費用を推定し、通勤者利用者の列車の待ち時間に対する意識限界を推定している。また、横山ら⁵⁾は鉄道利用者が移動に際して見積もる余裕時分を推計する手法を提案し、所要時間の不確実性下での出発時刻

選択行動を分析している。

輸送障害時における利用者の経路選択行動に関する研究については、武藤⁶⁾が、輸送障害等により一時的な列車運転見合わせ後の運転再開時において、利用者の経路選択行動の変化を推計する手法を提案している。土屋ら⁷⁾は、ダイヤ乱れ時における各目的地までの所要時間を推定し、経路選択の適否を判定するシステムを開発している。また、角田ら⁸⁾は、スイカやパスモに代表される交通系 IC カードのデータを活用し、輸送障害時の利用者不便益を定量化する手法を提案している。明星ら⁹⁾は、自動改札データより輸送障害時における迂回率を推定し、時間帯別交通量の推計方法を提案している。一方で、利用者行動が列車遅延に及ぼす影響に関する研究として、北山ら¹⁰⁾は映像データを用いて、駅停車時間の増加の要因となる利用者行動について整理をしている。また、列車遅延発生時は列車の駅到着間隔に乱れが生じるため、ホーム上や階段、コンコース等において通常以上に利用者が滞留する場合がある。駅構内の旅客流動については、例えば近田ら¹¹⁾が歩行者空間を詳細なセルに分割して個々の歩行者挙動を再現するシミュレーションモデルを構築しており、山下ら¹²⁾は、鉄道駅構内における歩行者の横断挙動を分析し、横断意思決定のプロセスを把握することで実データに基づく歩行者挙動特性を取り入れた歩行者シミュレーションモデルへの可能性を提案している。また、瀬尾ら¹³⁾は、駅構内施設内での歩行者の動的な目的箇所選択を考慮した歩行者挙動シミュレータを開発している。奥ノ坊ら¹⁴⁾は、実際の駅改良事業を対象に、駅構内の施設配置や容量、乗車・降車旅客の多寡等を考慮したマイクロシミュレーションを用いたケーススタディを行っており、駅構内の施設配置による停車時間短縮の効果を示している。

(2) 列車遅延と列車運行に関する研究

列車遅延と列車運行に関する研究については、宮崎ら¹⁵⁾は、列車遅延の路線別特性を踏まえて、山手線において計画ダイヤより早く列車を出発させる早発の効果を分析している。仮屋崎ら^{16),17)}は、実データを基に都市鉄道の列車遅延の発生要因を利用者混雑と線路上の列車混雑に分類し、列車遅延の拡大抑制に列車運行の改善の必要性を指摘している。列車運行及び運行管理に関する研究については、従来から情報工学¹⁸⁾や電気工学^{19),20)}の分野において取り組まれており、主に列車制御及び信号システムの観点から効率化を図ることを目的として実施されている。それらの中で列車遅延に関する研究としては、平尾ら²¹⁾が駅間の列車の運行挙動を連続的に表現し、駅の進入速度と発着時分の変化を考慮したシミュレータの開発を行っている。同様に個々の列車の駅間の運転方法に関する研究として、清水ら²²⁾は、列車遅延が発生した場合に、リアルタイムに目標運転曲線を更新し、素早い遅延の回復を図る運転方式を提案している。菅原ら

²³⁾は、輸送力向上の視点から、移動閉そくにおいて運転時隔を最小とする走行パターン
の検討に遺伝的アルゴリズムを用いている。東急田園都市線では、現業の運転士らによ
る調査研究の成果として、前方の列車状況に関する情報を運転士に与える表示灯を線路
横に設置し、駅の発着時分の拡大抑制を図っている²⁴⁾。

列車群を対象とした運行管理に関する研究としては、岸ら²⁵⁾が、列車遅延が発生し
た際に、遅延の要因列車の前後を走行する列車の駅出発時刻を調整して遅延の拡大を抑
制する列車の群管理に対して協調推論方式を提案している。平栗ら²⁶⁾は、駅近傍にお
ける列車の走行状態を予測し、待避・追い越し設備の有無に応じて発着時分を短縮する
制御方式を提案している。また、信号システムの改良による効率的な列車運行として、
大矢ら²⁷⁾は、自動列車運転（ATO: Automatic Train Operation）システムの性能と効
果について試験結果をまとめている。奥谷ら²⁸⁾は、高速かつ高頻度運行を実現するた
めに自動列車制御装置（ATC: Automatic Train Control）の高度化を図り開業線に導入
している。ロンドンやニューヨークの地下鉄等では、軌道回路に依らない列車位置検
知方式が採用されており^{29),30)}、前澤ら³¹⁾は、運転間隔の短縮と輸送力向上の視点から、
車軸数等のカウントによる列車位置の特定方法を提案している。近年では無線による列
車制御システムの開発と実証実験も行われており、馬場ら^{32),33)}はプロトタイプ現車試
験について報告している。ただし、これらの研究は列車遅延の発生、波及及び拡大の現
象を扱っていないため、列車運行及び運行管理の改善が遅延現象に及ぼす影響を十分に
分析していない。

(3) 他の交通機関における運行遅延に関する研究

自動車交通においては、交通流の視点から道路上の渋滞を対象として数多くの研究が
行われている。例えば、杉山ら³⁴⁾や高木ら³⁵⁾は交通流の物理的研究成果をまとめてお
り、Time-Space ダイアグラムを用いた解析を行っている。航空分野においても、坂下
ら³⁶⁾や平田ら³⁷⁾は、空港容量の不足による羽田空港での航空機遅延を実測データから
明示しており、滑走路運用の制御による遅延の軽減方を提案している。また、バス交
通においては、Daganzo ら^{38),39)}がバスの運行システムを安定化するための制御方式を
提案している。これら他の交通機関のなかでも、バス交通の運行システムは鉄道の運行
システムと多くの類似点を有している。しかし、その研究の多くは、バス停において停
車時間を調整することにより運行間隔を保持するものであり、走行区間へ波及する運行
遅延については考慮されていない。

2.2.2. 列車遅延の現象分析及び再現に関する研究

高頻度運行下における列車遅延については、以下の2つの波及・拡大メカニズムが提唱されている。1つ目は駅における停車時間増加のメカニズムである。列車到着の遅れによる乗客数の増加に伴い、雪ダルマ式に停車時間が増加する現象である。このとき、後続列車では先行列車との間隔が狭まるため停車時間が短くなり、いわゆる団子運転の状態となる。寺田⁴⁰⁾は、この現象を路面電車の観測により提唱している。2つ目は、過密ダイヤによる走行時間増加のメカニズムである。列車間隔の縮小により、後続列車で繰り返される加減速に起因して走行時間が増加する現象である。仮屋崎ら^{41),42)}はこの現象を報告するとともに、これらの2つのメカニズムが相互に作用し拡大することを提唱している。

(1) 列車遅延の解析的モデルに関する研究

列車の遅延時間を取り扱ったモデルは、解析的モデルとシミュレーションモデルに大別される。解析的モデルの研究として、Higginsら⁴³⁾は都市鉄道の運行スケジュールの信頼性評価を行うために、列車の遅延現象を確率的に扱う方程式を提案している。Huismanら⁴⁴⁾は幹線鉄道と都市鉄道とが混合する線路での列車の遅延時間と遅延確率を導出するためにマルコフ連鎖によるモデルを構築し、数値解析を行っている。鉄道の運行遅延とその波及・伝播に関する最近の研究は、de Kortら⁴⁵⁾や Goverde⁴⁶⁾が、Max-Plus代数を活用した遅延の伝播アルゴリズムにより、時刻表の安定性やインフラ容量の決定手法を提案している。和田ら⁴⁷⁾は、停車区間と走行区間における遅延の伝播を統合的に考慮した列車運行システムをモデル化し、列車の集群化を抑制する制御方を提案している。これらの研究は、先行列車と後続列車の発着時分に影響して増加する停車時間増加のメカニズムについては、十分に考慮されていない。

(2) 列車遅延のシミュレーションモデルに関する研究

交通流のシミュレーションモデルに関する研究は、自動車交通の分野で盛んに取り組みられてきた。交通流のモデルは、流体モデル^{48), 49)}、追従モデル^{50), 51)}及びセルオートマトン(CA : Cellular Automaton)モデル^{52), 53), 54)}の主に3つに分類される。そのうち、セルオートマトンモデルは、数値計算に適していることから、コンピューターの性能の向上に伴い、数多くの研究が行われてきた。セルオートマトンモデルは、比較的単純な規則に基づくモデル構築を基本とし、実際の道路設計に応じた流動の変化を容易にモ

デルに反映することが可能である。鉄道分野における交通流のシミュレーションモデルに関する研究として、Lu ら⁵⁵⁾が実際の鉄道路線を対象として区間別の最高制限速度及び加減速ルールに基づくシミュレーションモデルを構築している。Li ら⁵⁶⁾はセルオートマトンモデルにより環状線の列車運行をモデル化し、移動閉そく方式への展開も考慮したシステム開発を行っている。これらの研究は、東京圏の都市鉄道のような高頻度運行路線を扱っておらず、高い混雑率や乗客発生率を考慮していないため、停車時間増加のメカニズムを反映していない。列車遅延の現象についてシミュレーションモデルを用いて分析を行っている事例としては、岩倉ら^{57), 58)}は稲木ら⁵⁹⁾は駅での利用者行動と駅間の列車運行挙動とをマルチエージェントモデルを用いて推定し、遅延の発生及び波及の現象を再現するシミュレーションの構築を提案している。マルチエージェントモデルは、セルオートマトンモデルと一部で同じアルゴリズムを有している。列車運行シミュレーションにセルオートマトンを適用した研究としては Fu ら⁶⁰⁾や Xun ら⁶¹⁾や藤井ら⁶²⁾がその一例である。ただし、遅延に関する統計情報が乏しいこともあり、遅延の現象の実態把握及び現状分析は未だ十分になされていない。遅延の現象解明に焦点をあてた研究は、仮屋崎ら^{63), 64)}が、列車運行の実績データを用いて定量的な現象把握を試みており、それを基に、列車の運行挙動を再現するシミュレーションモデルが構築されている。

2.2.3. 時間及びネットワークの信頼性に関する研究

(1) 時間信頼性に関する研究

時間信頼性の研究は、国内外を問わず主に道路交通の分野において研究が進展している^{65), 66), 67)}。そのなかで、旅行時間信頼性の経済評価に関するレビューについては Bates ら⁶⁸⁾、や福田⁶⁹⁾に詳しい。鉄道の分野においては、Terence ら⁷⁰⁾、Rietveld ら⁷¹⁾が、通常時の列車運行を対象として定時性向上の観点から所要時間信頼性を推計している。高田ら⁷²⁾はこれらの研究のレビューを行うとともに、鉄道事故による利用者の損出時間を推計している。鉄道における時間信頼性に関する研究は、所要時間の不確実性下での出発時刻選択行動を分析する研究⁷³⁾や、所要時間の信頼性を鉄道経路選択行動に反映して旅客を配分する研究⁷⁴⁾が行われている。近年は列車遅延の観点から時間信頼性を評価する研究も行われている。都市鉄道における列車の遅延は、Day-to-day の旅行時間変動の増大をもたらす、ひいては、利用者の移動コストの増加につながる。遅延防止策は、遅延の平均的な程度を改善するのみならず、旅行時間の変動を少なくして定時性を向上させる効果をもたらすと期待される。このような時間信頼性向上の便益は、利用

者便益の数割程度を占める可能性があることが示されている⁷⁵⁾。Xieら⁷⁶⁾は首都圏鉄道通勤旅客を対象に実データからスケジューリングアプローチにより時間信頼性価値を推定し、時間帯別課金導入のシミュレーション分析を行っている。また、鉄道のような公共交通では、道路交通と異なり、通常サービスの利用間隔が時刻表等に準じて離散的にしか提供されないという点である。これについては、Fosgerau⁷⁷⁾によって、サービス間隔を明示的に考慮した時間信頼性価値の理論的導出が行われている。また、東京圏の都市鉄道のような高頻度運行の場合には、サービス間隔については連続近似がみなせるものと考えられるため、道路交通における平均旅行時間が平均遅れ時間に、旅行時間の標準偏差が遅れ時間の標準偏差に置き換えられることとなる^{78),79)}。岩倉ら⁸⁰⁾はこの考え方に従い、道路交通における時間信頼性価値の推計方法について、都市鉄道の列車遅延の経済評価への適用可能性を示し、列車遅延対策の便益計測を行っている。

(2) ダイヤの頑健性と運転整理に関する研究

鉄道の時間信頼性に関する研究は、運行ダイヤの頑健性として盛んに取り組まれている。武内ら⁸¹⁾はダイヤの頑健性は列車運行だけで決まるものでなく、車両及び乗務員の運用計画、配線設備や信号システム、利用者流動等との関連を含めた評価の必要性を考察している。坂口ら^{82),83)}はダイヤ改正時に作成された新しい運行ダイヤに内在する遅延リスクについて、運行調査をもとに定量的に評価し、遅延の発生や伝播が生じやすい点を可視化する手法を提案している。ただし、確率的列車運行シミュレーションを用いてダイヤ上の余裕時分の過不足を算出しているが、駅間走行時間については閉そく区分と信号システムを考慮した設定を行っていない。列車遅延に対するダイヤの頑健性については、ダイヤ上に余裕時分を持たせることが一案となるが、輸送力及び速達性とトレードオフの関係となることから、Kroonら⁸⁴⁾は余裕時分の配分を確率的な最適化問題として定式化している。Delormeら⁸⁵⁾は遅延時の旅客満足度の低下を抑制する視点からダイヤの頑健性を評価しているが、列車別の特性を反映できていない。國松ら⁸⁶⁾は列車運行と旅客流動の相互作用を考慮したシミュレータを用いて、利用者利便性の視点からダイヤの評価を行っている。

鉄道事業者においても、列車遅延に対する利用者意識の変化や相互直通運転による影響範囲の拡大等から、列車遅延の影響を広域化しないための取り組みを重要視しているところであり、牛田^{87),88)}は列車運行実績の可視化による停車時間等の見直しにより列車遅延の縮減を図っている。富井ら^{89),90)}は列車遅延の評価手法として、可視化された列車の運行状況をダイヤの頑健性の評価に適用し、遅延時間の質に着目した評価指標について実務的な検証を行っている。さらに山村ら^{91),92)}は、東京メトロ東西線を対象に、

路線の遅延状況をダイヤグラム図に投影して可視化し、遅延の実態把握から事業者が実施した各種の遅延対策と効果を定量的に検証している。諸外国においても鉄道の上り下り分離施策を導入しているヨーロッパにおいては、提供される鉄道サービスの達成度合いが補助金の給付額に影響することから、頑健な運行ダイヤの作成手法について、数多くの研究がなされている^{93), 94)}。ただし、頑健なダイヤを設定したとしても高頻度運行下における列車運行の不安定性は解消されないため、そのダイヤが維持される保証はない。そのため、ダイヤに乱れが生じた際に、早急に計画ダイヤどおりの運行に回復することと同時に、利用者の利便性低下を緩和した運転整理手法の研究も行われている。ネットワーク全体を対象とした最適な列車接続を推定する手法の開発が古くから行われており⁹⁵⁾、近年では國松ら⁹⁶⁾は旅客流動を可視化し、ダイヤ乱れ時の運転整理手法と旅客流動との関係を分析している。富井⁹⁷⁾はダイヤが乱れた際の列車接続について、利用者の満足度や影響人数の視点から、ネットワーク全体の利用者の利便性を考慮した運転整理の考え方を整理している。古関ら⁹⁸⁾は運転整理における客観的な評価指標の導入と、実務的なシステムを構築する際の考え方を提示している。諸外国における運転整理の実証的分析としては、Wustら⁹⁹⁾が列車接続及び運転士への情報伝達手法の技術開発を行っている。鉄道事業者の実務的対応については、永岡ら¹⁰⁰⁾がインタビュー調査の結果をまとめている。また、事業者の運転整理システムの開発¹⁰¹⁾も進められている。これらの研究は、遅延の影響を最小に抑えるための方策として、運行ダイヤの間引き等による輸送力低下を前提条件としており、列車遅延の早期回復を主目的とするものではない。

2.2.4. 駅施設及び運転設備等に関する研究

鉄道の施設整備については、鉄道駅やターミナルを利用する際の乗換えに焦点を当てた研究が数多くなされている。都築ら^{102), 103)}は、混雑駅における流動諸元を明らかにするとともに、駅計画時に流動状況を容易に評価することが可能な基準として階段・エスカレータ、改札流動を取り上げている。佐藤ら¹⁰⁴⁾は、駅整備を念頭に階段における旅客流動に着目し、その行動特性を明らかにしている。関根ら^{105), 106)}は、鉄道駅プラットフォーム上のエスカレータ付近に形成される利用者の待ち行列をモデル化することを試みている。谷口ら¹⁰⁷⁾は、複合ターミナル駅のコンコースの利用状況を通り抜けや回遊の視点から通行量を調査し、時刻変動を基に利用者の特性と属性について報告している。浜本ら¹⁰⁸⁾は行動経路の動線調査を実施し、動線の交錯や未利用スペース等の流動

空間の使われ方を考察している。杉山ら¹⁰⁹⁾は、旅客の歩行速度別の流動量の調査により、歩行速度と移動目的、コンコースの幅員、乗換えの有無等との相関関係を示している。近年では、長谷ら¹¹⁰⁾は駅構内において旅客流動の支障となる要因について現地観測を基に整理している。鈴木ら¹¹¹⁾は駅施設の設計容量から旅客流動のボトルネック箇所を明示する手法を提案している。鈴木ら¹¹²⁾は導入が推進されるホームドアについて、形式別の特性と導入する上での課題を報告している。仮屋崎ら¹¹³⁾はモスクワ地下鉄の駅の設計思想について、旅客流動の制御の視点から報告している。都市開発と鉄道整備に関する研究として、寺崎¹¹⁴⁾は、都市における容積率変化、通勤鉄道の混雑率の変化とそれに伴い増加する疲労費用を算出している。また、宮下¹¹⁵⁾は、用途や容積率等の規制緩和を利用した開発がインフラに負荷を発生させることを懸念している。森田¹¹⁶⁾は、鉄道駅の容量を考慮した開発規模や駅改良費用の制度設計の必要性を提案している。江口ら¹¹⁷⁾は、複線路線に単線路を追加した3線による運行手法の提案をし、少ない費用と工期で、時間帯によって変化する輸送需要に柔軟に対応する運行が可能であることを示している。さらに、横田¹¹⁸⁾は、輸送力増強に加え、利便性向上の重要性を指摘し、都市鉄道等利便増進法の活用促進と新たな整備手法について提言している。

2.3. 都市鉄道の列車遅延に関する調査等と事業者の取り組み

2.3.1. 列車遅延に関する調査等

(1) 国土交通省鉄道局の調査等

運輸政策審議会の答申で示された政策課題に対応し、国土交通省では継続的に実務調査を行ってきた。第18号答申以降の実務調査を概観すると、列車内混雑の解消、既存鉄道ネットワークの有効活用、鉄道駅における乗換え利便性の改善、シームレス化、事業スキームの検討等を調査目的とした内容が多く取り上げられている（例えば¹¹⁹⁾,¹²⁰⁾,¹²¹⁾）。平成20年頃からは、輸送トラブルや日常的な列車遅延への対応を目的とした調査（例えば¹²²⁾,¹²³⁾,¹²⁴⁾）が実施されており、高頻度運行や相互直通運転等に代表される鉄道サービスの高度化に伴う負の効果として、列車遅延の顕在化が指摘されている。また、平成26年4月には、交通政策審議会に東京圏における今後の都市鉄道のあり方が諮問され¹²⁵⁾、次期第18号答申として、国際競争力強化、オリンピック・パラリンピック大会に向けた取り組み、新線及び新駅のあり方、防災対策のあり方等に関する東京圏の都市鉄道の将来像について、審議が開始された。その中では、列車遅延対策のあるべき水準・方策についても、審議事項の柱として掲げられている。

(2) 鉄道プロジェクト評価マニュアル

国土交通省鉄道局が監修する「鉄道プロジェクトの評価マニュアル 2012 年改訂版」¹²⁶⁾では、列車遅延対策の評価が新たに記載された。列車遅延・輸送障害対策の便益計測は、対象区間における遅延時間や遅延の発生頻度の実態データを活用して実施し、加えて、定性的効果や定量的指標による評価も実施することが新たに記載された。一方、遅延を想定した余裕時間（safety margin）の短縮による便益の計測については、現時点においては、データの制約や国内における推計事例の蓄積が十分でないこと等を踏まえ、本マニュアルにおいては今後の課題として整理されている。手法が十分に確立された訳ではなく、その重要性から参考として記載されており、今後の進展が期待されるどころとされている。

2.3.2. 鉄道事業者の取り組み

(1) 列車遅延に対する取り組み

列車遅延に対する鉄道事業者の取り組みは多岐にわたる。列車遅延の発生防止に関する取り組みと、遅延発生後における波及・拡大の抑制及び早期回復に関する取り組みについて、駅、列車運転及び運行管理の部門別に整理したものを表-2-1 に記す。表の青字は、輸送障害等に起因する大規模な列車遅延に対する取り組みを示している。利用者の混雑等に起因する定常的な列車遅延については、駅における停車時間の超過が主な発生要因と考えられる。そのため、事前の対策を講じることにより、ある程度の効果が期待されることから、ハード施策とソフト施策の双方において、列車遅延の発生防止策が実施されている。しかしながら、遅延発生後における対応策については、発生前の防止策を遅延の拡大抑制として継続して実施する他になく、筆者の知る限り、駅における出発時間調整や、駅間での減速運転等による列車間隔の調整が、団子運転の解消を目的として実施されているのみであり、遅延の早期回復方策については、有効な手法を有していない。一方で、輸送障害等に起因する大規模な列車遅延については、その発生を事前に予測し、防止策を講ずることが困難なため、発生した列車遅延に対して、その影響を最小限にとどめ、早期に回復することを目的とした対応策が実施されている。相互直通運転の中止や、列車の運休、行先変更等により、乱れた運行ダイヤを元に戻す運転整理は、遅延発生時の対応方策として効果的な手法であり、一般的に広く実施されている。ただし、相互直通運転の中止による駅の混雑の発生や、路線の輸送力低下を伴う手法であることから、混雑に起因するラッシュ時間帯の定常的な列車遅延に対して適用することは出来ない。以下に、列車遅延に対する鉄道事業者の代表的な取り組み事例を紹介する。

表-2-1 鉄道事業者の列車遅延に対する取り組み

	防止策		対応策〔回復策〕	
駅	【ハード施策】 停車時間の短縮策 ・施設改良(ホーム増設、構内・コンコース改良) ・複々線化 ・幅広ドア車両の投入 ・ホームドア設置 etc.	【ソフト施策】 停車時間の短縮策 ・駅員の増員 ・出発合図の合理化 ・利用者理解の推進 etc.	【ハード施策】 (防止策と同様)	【ソフト施策】 (防止策と同様) ※ 団子運転でない時は前へ詰める
列車運転	信号システム改良 ・列車制御の高度化 ・在線状況表示器 ・簡易的な閉そく細分化 車両性能の向上 ・加・減速度の向上 ・主要機器の二重化 etc.	走行時間の短縮策 ・回復運転	(防止策と同様)	(防止策と同様) ※遅延の初期段階 列車間隔の調整 ・出発時間調整 ・減速運転
運行管理 (司令) (ダイヤ)	—	運行ダイヤ見直し ・余裕時分の設定 ・運行時分の適正化 ・運行種別の工夫 etc. 即応体制の構築 ・シミュレーション演習 ・復旧訓練 etc.	線路設備の改良 ・折返し設備 ・留置線 etc.	運転整理 ・相互直通運転中止 ・運休、行先変更 etc.

* 青字は輸送障害時等による大規模な列車遅延に対する取り組み

(2) 運転整理

人身事故や車両故障等で列車の運行ダイヤが乱れた際に、乗車予定の列車が突如運転取り止めとなることや、乗車中の列車の行き先が変わり、途中駅で乗客全員が降車を強いられること等、時おり列車の運行計画が大幅に変更される場合がある。鉄道利用者にとって、こうした事象も「ダイヤの乱れ」と認識されるが、この中には、列車の運行を正常に戻すために意図的に実施される「ダイヤの変更」が含まれている。具体的な手法としては、列車を運転する順番の変更、上り列車と下り列車の行き違いを行う駅の変更、運転時刻そのものの変更、運転の取り止め、急遽臨時列車を仕立てての運転、乗務員や車両の運用計画変更等があり、この様な「ダイヤの変更」を行うことを総称して、「運転整理」と呼んでいる。

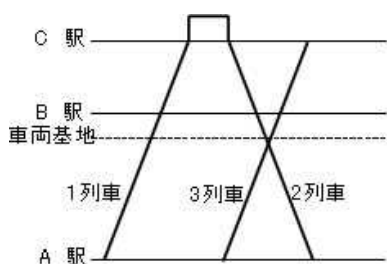


図-2-1 正常運転時のダイヤ

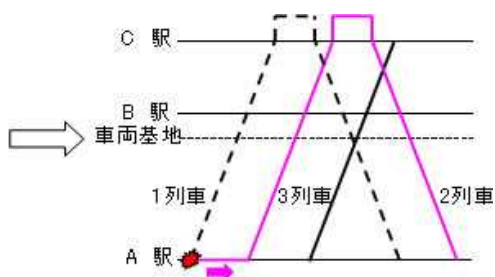


図-2-2 列車遅延時のダイヤ

車両故障の発生により、正常運転であれば図-2-1 のダイヤで走る 1 列車が、図-2-2 のように A 駅で発車遅れを生じて運行する場合を仮定する。1 列車が遅れると後続の 3 列車や、1 列車の車両が C 駅で折り返して運転する 2 列車にも影響が生じる可能性がある。このような場合、輸送司令は運転整理を行い、1 列車の B 駅～C 駅間の運転と、折り返しの 2 列車の C 駅～B 駅間の運転を取り止め、途中駅の B 駅から 2 列車として時刻どおりに運転できるようにする。この様に運転を途中で取り止めることを、「部分運休」と呼んでいる (図-2-5)。この運転整理では、1 列車で B 駅に向かう利用者は遅れながらも目的地の B 駅に到着することが出来る。また C 駅まで行きたい利用者は 1 列車に乗り、B 駅で後続の 3 列車に乗るか、あらかじめ A 駅から 3 列車に乗ることで目的地まで到着可能である。折り返しの 2 列車も、B 駅からは遅れることなく発車でき、ダイヤが正常に戻る。しかしこの運転整理では、2 列車の C 駅～B 駅間が部分運休となっているので、C 駅から A 駅や B 駅に向かう利用者の乗車機会が失われてしまう。また B 駅が図-2-3 に示すような構造であれば、後続の 3 列車を通すことが出来ないうえに、図-2-4 のような構造の場合、後続の 3 列車を通すことができて、線路や信号等の折り返し設備がないため、そもそも B 駅から折り返し 2 列車として走ることができない。この様に、運転整理を行うにあたっては、駅の構造に留意する必要がある。

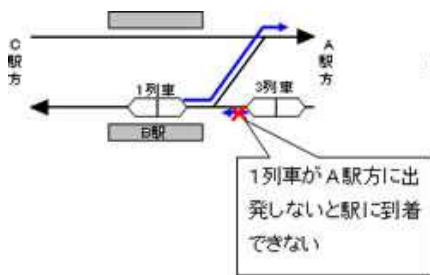


図-2-3 駅配線 1

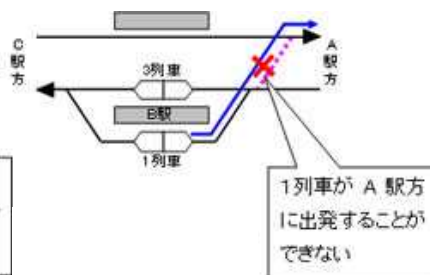


図-2-4 駅配線 2

図-2-6 のように B 駅そばにある車両基地から、別の車両（緑線）を出してきて、B 駅から 1 列車のダイヤと同じように運転を行う。一方、遅れた本来の 1 列車の車両（赤線）は、B 駅到着後に車両基地に留置する。この運転整理では 1 列車で A 駅から B 駅及び C 駅に向かう利用者は遅れてしまうものの、その他の利用者は遅れずに目的地まで移動することができる等、最初の運転整理に比べて利用者を与える影響を抑えることができる。しかしこの運転整理手法を実行するには、車両基地に予備の車両があることや、その車両を運転する別の乗務員がいることが条件となる。また、車両基地から出してきた予備の車両がすぐに基地に戻ってこなくても、車両の検査周期等に問題ないかどうかといった、別の要素も考慮しなければならない。

そこで今度は図-2-7 のように、新しい車両を車両基地から出してきて、B 駅からは 1 列車、C 駅から折り返しの 2 列車として B 駅まで走らせるところまでは先程と同じであるが、B 駅到着時点で再び車両を車両基地に留置する（緑線）。そして本来 2 列車となる予定の車両（赤線）を B 駅から走らせる。こうすることで、C 駅から A 駅に向かう利用者は B 駅で乗り換えが発生するものの、車両の運用計画を正常運転時と同じに戻すことができる。この運転整理の手法も、先の例と同じように、予備の車両や乗務員が必要であることや、2 列車どうしの乗換えを B 駅で行うため、B 駅の構造を考慮しなければならない。以上は運転整理手法の代表的な例であるが、実際にどのような運転整理を行うかは、ダイヤ乱れの発生時間帯や、その種類や規模、線区の特性や駅の設備等、多種多様の事情を指令員が考慮して判断することとなる。ダイヤ乱れの発生時間帯を例とすれば、通勤時間帯ではダイヤ乱れの早期回復よりも輸送力確保を優先し、運休本数はできるだけ少なくする。逆に昼間時間帯であれば、大幅に列車を運休してダイヤ乱れを早期に修復し、夕方以降の帰宅時間帯における定時運転確保を優先する運転整理手法が取られる。列車に乗務員や車両をどのように割り当てるかという計画を運用計画と呼ばれている。限られた人数と車両数で輸送力を提供するために、運用計画は乗務員の休養のための時間や車両の検査・修繕のための時間を確保し、極力無駄が出ないように作成されている。

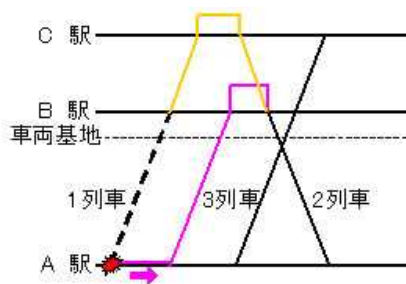


図-2-5 部分運休（黄色線）

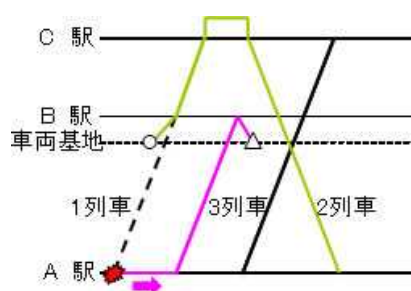


図-2-6 運用変更-1

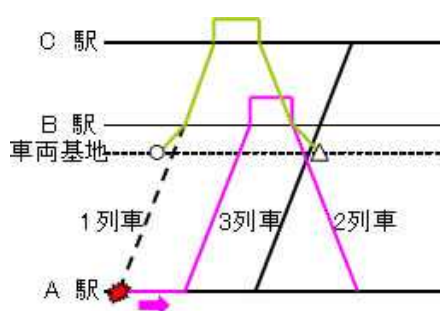
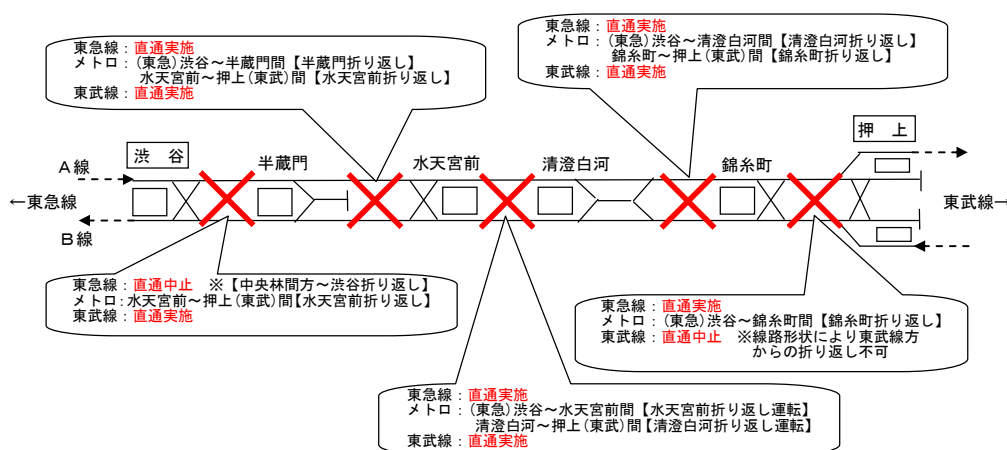


図-2-7 運用変更-2

(3) 折り返し設備

相互直通運転中止時の折り返しについて2008年に実施した事業者のヒアリングを整理する。折り返しを行う駅は、事業者境界となる駅という考え方が基本となっている。他社路線内でのトラブルによる、直通運転中止に伴う折り返し運転については、事業者の境界となる駅で実施される。自社路線内でのトラブルによる直通運転中止に伴う折り返しについては、トラブル発生箇所により対応が異なるが、支障時間が長時間に及ぶと予測された場合、自社路線内の運休区間を極力少なくするために途中折り返しが実施される。また、併せて直通運転を極力維持することとされる。以下に半蔵門線の基本的な考え方を記載する。以前は、東武伊勢崎線との直通運転を中止すると、「曳舟～押上間の運転見合わせ」となっていた。当該区間において、渡り線が整備されていないことから、東武線からの半蔵門線直通列車は押上駅での折り返し運転が出来ず、全列車が北千住駅折り返しとなっていた。このため、東武鉄道は曳舟駅の押上方に渡り線を設置する配線改良工事を実施し、2013年10月に押上駅での折り返し運転が可能となった。



凡例… □ : 境界駅

× : 支障箇所

図-2-8 半蔵門線の折り返し設備

表-2-2 運行トラブル時の折り返し運転箇所

路線	折り返し運転箇所
JR 山手線	外回りのみ運行（内回りで運行トラブルがあった場合）、内回りのみ運行（外回りで運行トラブルがあった場合）、大崎
JR 中央快速線	八王子、豊田、立川（JR 青梅線直通打ち切り）、国分寺、武蔵小金井、新宿
JR 総武緩行線	中野（東京メトロ東西線直通打ち切り）、水道橋、御茶ノ水、西船橋（東京メトロ東西線直通打ち切り）、津田沼、幕張
JR 総武快速・横須賀線	東京
JR 東海道線	国府津、品川
JR 京葉線	新習志野、西船橋～蘇我間で運行（東京方で運行トラブルの場合）
JR 武蔵野線	東所沢、南越谷、西船橋
JR 常磐線	我孫子、松戸、綾瀬（東京メトロ千代田線直通打ち切り）
JR 東北線・高崎線	小金井（JR 東北線）、籠原（JR 高崎線）、大宮（JR 東北線・高崎線共通）
JR 京浜東北線・根岸線	磯子、桜木町、鶴見、蒲田、東十条、赤羽、南浦和
JR 埼京線・川越線	川越（JR 八高線直通打ち切り）、大宮（JR 川越線直通打ち切り）、大崎（りんかい線直通打ち切り）、赤羽、指扇
JR 横浜線	橋本
JR 南武線	稲城長沼、登戸、武蔵中原
東京メトロ東西線	九段下、東陽町、西船橋（JR 中央緩行線・東葉高速鉄道直通打ち切り）、中野（JR

	中央緩行線直通打切り)
東京メトロ銀座線	浅草, 三越前
東京メトロ日比谷線	北千住 (東武伊勢崎線直通打切り)
東京メトロ千代田線	代々木上原 (小田急小田原線直通打切り), 綾瀬 (JR 常磐緩行線直通打切り)
東京メトロ半蔵門線	押上, 水天宮前
東京メトロ有楽町線	和光市 (東武東上線・西武池袋線直通打切り)
東京メトロ副都心線	池袋 (東武東上線・西武池袋線直通打切り)
東急東横線	菊名, 日吉, 武蔵小杉
東急田園都市線	長津田 (長津田以遠で運行トラブルが生じた場合), あざみ野, 梶が谷, 二子玉川, 渋谷 (東京メトロ半蔵門線直通打切り)
東武伊勢崎線	北千住, 曳舟
東武東上線	志木, 川越市
西武線 (池袋線, 新宿線)	なし (列車の運行を打ち切る)
小田急小田原線	本厚木, 相模大野, 町田, 向ヶ丘遊園, 経堂, 代々木上原 (東京メトロ千代田線直通打切り)
小田急江ノ島線	藤沢
京王線	高幡不動, 調布, 笹塚 (都営新宿線直通打切り)
京王相模原線	多摩センター
京急本線	神奈川新町, 川崎
京成線	高砂, 押上 (都営浅草線直通打切り)
新京成線	八柱, くぬぎ山, 新津田沼

(4) ホームの増設, 引上げ線, 待避設備

ホームの増設は、ホーム上の利用者の混雑を緩和し、列車の駅停車時間の短縮に資するだけでなく、配線増により同一方面に複数の配線整備が成されると、列車の交互発着が可能となり、列車遅延のバッファを拡大する効果が期待される。東京メトロ東西線の南砂町駅ではホームの増設工事が進められており、茅場町駅のホーム延伸等の改良工事と合わせて、東西線の混雑緩和と慢性的な列車遅延の改善に向けた取り組みが行われている。また、普通列車と優等列車とが同じ線路上を走行する際に生じる列車の追い越しが、遅延発生時において列車遅延の影響を路線全体に波及する要因と考えられることから、京浜急行では、品川駅から浦賀駅に至る京急本線において、上り方面で平均 4km 毎に駅に待避設備を整備し、列車遅延の波及・拡大の防止策を講じている。また、同社

は、京急空港線の羽田駅において折り返し運転を実施しているが、将来の航空需要の増加に対応するため、輸送力増強及び遅延対策として、羽田空港駅に引き上げ線の整備を計画している。これにより、時間当たり4本の運行本数増加と、遅延発生時の遅れ時間の吸収及び列車運行の柔軟性向上が期待される。

(5) 駅間の在線表示器

東急田園都市線の運転士の取り組みとして、2000年ごろから、運転士数名で研究チームを立ち上げ、遅れの最大の要因となっている池尻大橋駅から渋谷駅間について、最も効率の良い駅進入時の運転方法について研究が実施された。渋谷駅はラッシュ1時間に5万人の利用者が乗降する東急電鉄の最大のターミナルである。乗降時間に長く要するため先行列車がまだ停止しているうちに、後続列車が駅の手前まで接近し、駅間停止してしまうという運行状態が度々あった。その結果、運転操作のタイミングにより発着時分にバラつきが生じていた。そこで研究チームでは、各列車の発着時分を計測し、運転士一人一人から運転方法について丹念に聴き取りを行い、それを分析して、考えられる最も良い運転操作基準を作成した。結論としては、先行列車に接近し、駅手前で駅間停止をしない。そのためには、先行列車の動きに応じ、途中の各地点で最適な速度に調整しながら運転を行うというものであった。効率よく運転するためには、肉眼で見えない先行列車の状況をいかに後続列車の運転士に知らせるかがポイントとなる。しかし、この区間は地下であり、カーブもあることから先行列車が見えない。このため、池尻大橋駅から渋谷駅間のトンネルの壁面に、渋谷駅の先行列車の状況がわかる在線状況表示器を設置した。運転士は、走行地点とこの情報を見ながら最も効率の良い駅進入時の運転方法となるように、速度を調整しながら運転することとした。さらに、運転操作の標準化のため、軌間に運転操作の目安となる補助看板を設置した。これらの研究による標準的な運転操作の確立と、全運転士への水平展開を実施した結果、渋谷駅の発着時分が実施以前と比べ、1列車当たり平均約3秒短縮する改善効果が得られた。ラッシュ1時間29本とすれば、合計で約1分30秒の短縮が図れていることになる。また全運転士が駅進入時の運転方法の改善という共通の目標をもって業務に取り組んだことは、運転士仲間のモチベーションを維持・向上する上でも意義があったとされている。

- 列車運行の円滑化による運転時分の増加抑制
 - ・ 池尻大橋～渋谷間運転方見直し(在線状況表示器の導入)

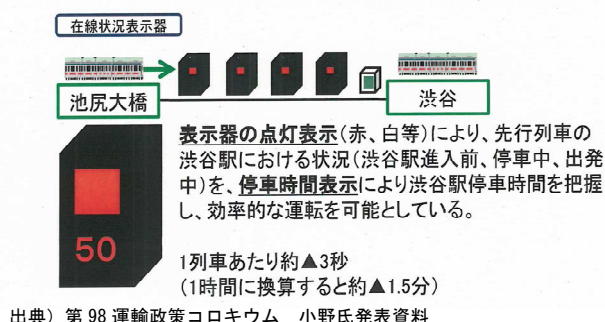


図-2-9 表示器の点灯表示イメージ

2.4. 本研究の位置付け

都市鉄道の列車遅延を扱った研究については、国内外問わず今までに多くの研究がなされてきた。代表的なものとしては、利用者選択行動への影響、列車の運行管理、運行ダイヤの最適化等である。また、近年では、列車運行と旅客行動のシミュレーションに関する研究も多く発表されている。しかしながら、これらの研究の多くが列車の車内混雑緩和または駅構内の混雑緩和の視点から利用者便益が論じられてきたものであり、列車遅延が鉄道輸送と需要に及ぼす影響の分析に主眼を置いている。また、対象となる遅延時間は、利用者混雑に起因する駅停車時間の変化が多く、列車の運行間隔に起因する駅間走行時間の変化について扱う研究は多くない。また、遅延に関する統計情報が乏しいこともあり、遅延現象の実態把握及び現状分析は未だ十分になされておらず、遅延の発生、波及及び回復のメカニズムに言及し、実務的な実効性の観点から遅延対策を論じる研究の不足が、前章で述べた深刻な問題を引き起こしていると言える。

そこで、本研究は、列車遅延の波及・拡大の抑制に加えて、早期回復の視点から信頼性を回復するための具体的な方策を提案することを試みる。その過程において、本研究は、実際の信号コードを反映したシミュレーションモデルを用いて、列車運行挙動の動的分析に基づく列車走行の最適化の検討を実施し、高頻度運行下における列車遅延の拡大抑制及び早期回復方策の検討を試みる点に学術的新規性を有する。また、団子運転の解消のための列車間隔調整でなく、駅間停止を回避して最短時分で駅に到着するための間隔調整、さらに輸送力保持を前提に路線の所要時間を回復するための間隔調整について、運行管理手法の提案を行う点に実務的新規性を有するものである。なお、本研究は、実データを用いた遅延回復メカニズムの解明といった実証研究として、また分析結果に基づいた具体的な対応策の提案といった政策研究として位置付けられる。

参考文献

- 1) 鳥海重喜, 中村幸史, 田口東: 通勤電車の遅延計算モデル, オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, 50(6), pp.409 -416, 2005
- 2) 國松武俊, 平井力, 富井規雄: 列車運行・旅客行動シミュレーションシステムの開発, 鉄道総研報告, Vol.21, No.4, pp.5 -10, 2007
- 3) 金子雄一郎, 曾山禎彦, 加藤浩徳: 都市鉄道の遅延に対する利用者の認知状況と交通行動への影響—東京圏を対象として—, 運輸政策研究, Vol.14, No.2, pp.26 -33, 2011.
- 4) 加藤浩徳, 家田仁, 小野田恵一: MNL に基づく出発時刻選択行動モデルを用いた通勤鉄道利用者の列車待ち時間に対する意識限界に関する実証的分析, 土木計画学研究・論文集, Vol.23, pp.523-530, 2003.
- 5) 横山茂樹, 高田和幸: 所要時間不確実性下における出発時刻決定行動に関する分析, 土木計画学研究・講演集, Vol.41, 2010.
- 6) 武藤雅威: 運転再開時における旅客数の予測手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.22, No.6, pp.17 -22, 2008.
- 7) 土屋隆司, 杉山陽一, 山内香奈, 藤浪浩平, 有澤理一郎, 中川剛志: 列車ダイヤ乱れ時における経路選択支援システムとその受容性評価, 情報処理学会誌, Vol.49, No.2, pp.868-880, 2008.
- 8) 角田史記, 加藤学, 大塚理恵子, 助田浩子, 大関一博: 交通系 IC カードを利用した鉄道輸送障害時の影響を定量化する方法の研究, 情報処理学会誌, Vol.6, No.3, pp.187-196, 2013.
- 9) 明星秀一, 杉山陽一, 松原広: ダイヤ乱れ時の運転再開後の旅客流動予測手法, 鉄道総研報告, Vol.27, No.2, pp.29 -34, 2013.
- 10) 北山由奈, 日比野直彦, 森地茂, 家田仁: 鉄道駅における列車遅延に影響を及ぼす列車乗降行動に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.51, 2015.
- 11) 近田康夫, 廣瀬智士, 城戸隆良: CA を用いた歩行シミュレーションモデルの構築, 土木情報システム論文集, Vol.9, pp.19-30, 2000.
- 12) 山下良久, 関口岳史, 内山久雄: 鉄道駅構内の歩行者空間における交差現象に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.23, pp.489-495, 2006.
- 13) 瀬尾亨, 柳沼秀樹, 福田大輔: Plan-Action 構造を考慮した歩行者挙動モデリングとその適用—駅改札付近を対象として—, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.68, No.5, pp.679 -690, 2012.

- 14) 奥ノ坊直樹, 池田直紀, 庄志強, 花上美津江, 山下良久, 鶴池康介: 歩行者マイクロシミュレーションを用いた駅構内旅客流動分析に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.47, 2013.
- 15) 宮崎一浩, 日比野直彦, 森地茂: 路線の特性に着目した都市鉄道における列車遅延分析, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.70, No.5, pp.477-486, 2014.
- 16) 仮屋崎圭司, 日比野直彦, 森地茂: 都市鉄道の列車遅延の拡大メカニズムに関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.27, pp.871-879, 2010.
- 17) 仮屋崎圭司: 都市鉄道の列車遅延の拡大メカニズムに関する研究, 運輸政策研究, Vol.13, No.1, pp.57-64, 2010.
- 18) 井上大輔, 山本茂: 列車停止時のジャストインタイム予測制御による運転補助と最近傍法に基づく異常検出, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.72, No.721, pp.72-77, 2006.
- 19) 半田哲: 都市交通システムにおける車両群制御の一手法, 電気学会論文誌C, Vol.97, pp.1-6, 1977.
- 20) 荒屋真二, 曾根悟: 都市形軌道輸送システムの列車群制御とシミュレーションによる特性解析, 電気学会論文誌C, Vol.101, pp.17-24, 1981.
- 21) 平尾祐司, 長谷川豊, 稲毛弘苗, 平栗滋人: 列車制御シミュレータ UTRAS の開発と信号方式の評価, 鉄道総研報告, Vol.9, No.1, pp.55-60, 1995.
- 22) 清水紀宏, 坂下修, 永田剛士, 村田悟: 遅れ時分を考慮した新しい運転方式の開発, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.201-202, 1998.
- 23) 菅原宏之, 中村英夫: GA を利用した運転時隔短縮に関する検討, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.203-206, 1998.
- 24) 坂井智光, 岡野明, 佐藤正浩: あれっ? こんなにもスムーズ・えっ? 遅延も短縮, 運転協会誌, Vol.47, No.2, pp.9-12, 2005.
- 25) 岸清美, 鶴田節夫, 大島俊哉: 列車群管理のための協調推論方式, 情報処理学会全国大会講演論文集, Vol.42, No.2, pp.219-220, 1991.
- 26) 平栗滋人, 兎束哲夫: 線区条件に応じた列車群の予測制御方式, 鉄道総研報告, Vol.24, No.3, pp.29-34, 2010.
- 27) 大矢順子, 射場智, 中澤弘二: 地下鉄向け自動列車運転システム, 東芝レビュー, Vol.63, No.12, pp.41-45, 2008.
- 28) 奥谷民雄, 中村信幸, 荒木尚人, 入江章二, 長宏樹, 佐野実, 池田圭吾, 小澤寛之: 高速・高密度・通勤線区用 A T C 装置の開発, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol.127, No.10, pp.1033-1042, 2007.
- 29) 平尾裕司: 無線を利用した列車制御システムの世界の動向, JR EAST Technical Review,

- No.43, pp.1-4, 2013.
- 30) ICE62280-2 : Railway applications -Communications, signaling and processing systems- Part2: Safety related communication in open transmission systems.
- 31) 前澤一洋, 今関真樹, 田中伸治, 平間淳司, 永瀬和彦 : 高密度列車運転システムに関する一研究, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.197-200, 1998.
- 32) 馬場裕一, 立石幸也, 森健司, 青柳繁晴, 武子淳, 齋藤信哉, 鈴木康明, 渡邊貴志 : 無線による列車制御システム (ATACS), JR EAST Technical Review, No.5, pp.31-38, 2003.
- 33) 馬場裕一 他 : 無線による列車制御システム (ATACS) ; JR EAST Technical Review No.5 Autumn, pp.31-38, 2008.
- 34) 杉山雄規 : 交通流の物理, ながれ [特集] 交通流, No.22, pp.95-108, 2003.
- 35) 高木相 : 道路交通流の物理的性質-t-s ダイアグラムによる交通流の表示-, 計測自動車制御学会, pp.1-8, 2008.
- 36) 坂下文規, 森地茂, 日比野直彦 : 羽田空港再拡張後の航空遅延に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.44, CD-ROM, 2011.
- 37) 平田輝満 : 羽田空港の滑走路運用特性に起因した航空機遅延の軽減方策に関する研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.69, No.5, pp.869 -879, 2013.
- 38) Daganzo, C.: A headway-based approach to eliminate bus bunching, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.43, No.10, pp.913–921, 2009.
- 39) Xuan,Y., Argote, J. and Daganzo, C.: Dynamic bus holding strategies for schedule reliability: Optimal linear control and performance analysis, *Transportation Research Part B*, Vol.45, No.10, pp.1831–1845, 2011.
- 40) 寺田寅彦 : 電車の混雑について, 小宮豊隆 (編), 寺田寅彦随筆集第二巻, 1947.
- 41) 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.
- 42) 仮屋崎圭司 : 都市鉄道の列車遅延の拡大メカニズムに関する研究, 運輸政策研究, Vol.13, No.1, pp.57 -64, 2010.
- 43) Higgins A. and Kozan E.: Modeling train delays in urban networks, *Transportation Science*, Vol.32, No.4, pp.346–357, 1998.
- 44) Huisman T. and Boucherie R.J.: Running times on railway sections with heterogeneous train traffic, *Transportation Research Part B*, Vol.35, No.10, pp.271–292, 2001.
- 45) de Kort, A.F., Heidergott, B. and Ayhan, H. : A probabilistic (max,+) approach for determining railway infrastructure capacity, *European Journal of Operational Research*, Vol.148, No.3, pp.644-661, 2003.

- 46) Goverde, R.M.P.: A delay propagation algorithm for large-scale railway traffic networks, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.18, No.3, pp.269-287, 2010.
- 47) 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, No.5, pp.1025 -1034, 2012.
- 48) Musha, T. and Higuchi, H.: Traffic Current Fluctuation and the Burgers Equation, *Jpn.J.App.Phy*, Vol.17, pp.811-1, 1978.
- 49) Kerner, B.S. and Konhauser, P.: Cluster effect in initially homogeneous traffic flow, *Phy.Rev.E48*, pp.2335-1, 1993.
- 50) Newell, G.F.: NONLINEAR EFFECTS IN THE DYNAMICS OF CAR FOLLOWING, *Oper.Res.9*, pp.209-1, 1961.
- 51) Bando, M., et al.: Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation, *Phy.Rev.E51*, pp.1035-1, 1995.
- 52) Nagel, K. and Schreckenberg, M. : A cellular automaton model for freeway traffic, *Journal de Physique I France 2*, 2221-2229, 1992.
- 53) Nishinari, K. and Takahashi, D.: Multi-value cellular automaton models and metastable state in a congested phase, *J.Phys.A:Math.Gen.33*, pp.7709-1, 2000.
- 54) Fukui, M. and Ishibashi, Y.: Traffic Flow in 1D Cellular Automaton Model Including Cars Moving with High Speed, *J.Phys.Soc.jpn.65*, No.6, pp.1868-1, 1996.
- 55) Lu, Q., Dessouky, M.M., Leachman, R.C.: Modeling train movements through complex rail networks, *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, Vol.14, pp.48-75, 2004.
- 56) Li, K., Gao,z., Ning, B.: Cellular automaton model for railway traffic, *Journal of Computational Physics*, Vol.209, pp.179-192, 2005.
- 57) 岩倉成志, 上松苑, 高橋郁人, 辻井隆伸: 高頻度運行下での都市鉄道を対象とした遅延連鎖シミュレーションシステムの開発, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.67, No.5, pp.879 -886, 2011.
- 58) 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.
- 59) 稲木達哉, 富井規雄: 駅ホーム上の旅客流動のマルチエージェントによるシミュレーション, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.507-510, 2010.
- 60) Fu, Y., Gao, Z. and Li, K. : Modeling Study for Tracking Operation of Subway Trains Based on Cellular Automata, *Journal of Transportation Systems Engineering & Information Technology*, Vol.8, No.4, pp.89-95, 2008.
- 61) Xun, J., Ning, B. and Li, K. :Station Model for Rail Transit System Using Cellular Automata,

- Communications in Theoretical Physics*, Vol.51, No.4, pp.595-599, 2009.
- 62) 藤井健介, 飯田晋司, 西成活裕: C Aを用いた列車ダイヤの自動復旧シミュレーション, 日本応用数理学会論文誌, Vol.18, pp.65 -85, 2008.
- 63) Kariyazaki, K., Hibino, N. and Morichi, S. : Simulation Analysis of Train Operation to Recover Knock-on Delay under High-Frequency Intervals, *Case Studies on Transport Policy*, Vol.3, Issue1, pp.92-98, 2015.
- 64) Kariyazaki, K., Hibino, N. and Morichi, S. : Simulation Model for Estimating Train Operation to Recover Knock-on Delay Earlier, *Asian Transport Studies*, Vol.2, No.3, pp.284-294, 2013.
- 65) 山崎浩気, 宇野伸宏, 倉内文孝, 嶋本寛: 交通ネットワーク信頼性研究の展望, 土木計画学研究・講演集, Vol.45, 2011.
- 66) 中山晶一郎: 道路の時間信頼性に関する研究レビュー, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.67, No.1, pp.95 -114, 2011.
- 67) 牧浩太郎, 土谷和之, 伊藤智彦, 由利昌平: 諸外国における道路の所要時間信頼性向上に関する評価手法のレビュー, 土木計画学研究・講演集, Vol.39, 2009.
- 68) 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.
- 69) 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.
- 70) Terence C. Lam and Kenneth A. Small : The value of time and reliability: measurement from a value pricing experiment, *Transportation Research Part E*, Vol.37, pp.231-251, 2001.
- 71) Rietveld, P., Bruinsma, F.R. and Van Vuuren, D.J.1 : Coping with unreliability in public transport chains: A case study for Netherlands, *Transportation Research Part A*, Vol.35, pp.539-559, 2001.
- 72) 高田和幸, 吉澤智幸: 鉄道事故に伴う旅客の損失時間の推計手法に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.22, pp.863-868, 2005.
- 73) 岩倉成志, 原田知可子, 鈴木修司: 都市鉄道利用者を対象とした出発時刻選択モデルの選択肢設定に関する基礎的考察, 土木計画学研究・論文集, Vol.20, No.3, pp.485-492, 2003.
- 74) 倉内文孝, 原尾彰, 嶋本寛: 所要時間の不確実性を経路選択基準に考慮した乗客配分モデルの構築, 土木学会論文集 D, Vol.64, No.4, pp.531-541, 2008.
- 75) 福田大輔: 旅行時間変動に起因するドライバーの移動コストの試算, 中山晶一郎・朝倉康夫 [編著] 道路の信頼性評価, コロナ社, 2014.

- 76) Xie, C. and Fukuda, D. : Scheduling preference modeling of rail passengers in Tokyo Metropolitan Area and evaluation of time-varying fare policy for a congested urban railway line, *Journal of Japan Society of Civil Engineers Series D3*, Vol.70, No.5 (Accepted for Publication).
- 77) Fosgerau, M. : Marginal social cost of headway for a scheduled service, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.43, No. 8–9, pp.813–820, 2009.
- 78) 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.
- 79) Fosgerau, M., Hjorth, K., Brems, C., and Fukuda, D. : Travel time variability: definition and valuation, Technical report, *Technical University of Denmark*, 2008.
- 80) 岩倉成志, 日比野直彦, 仮屋崎圭司, 福田大輔, 森地茂, 川村孝太朗, 角田隆太, 富田拓未:都市鉄道の列車遅延対策の定量的評価, 土木計画学研究・講演集, Vol.47, CD-ROM, 2013.
- 81) 武内陽子, 富井規雄:鉄道の運行計画の頑健性評価に関する考察, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-03-40, 2003.
- 82) 坂口隆, 中村達也, 石原裕介:遅延調査分析に基づく列車運行シミュレーションと遅延リスク評価手法, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol.135, No.4, pp.335-341, 2008.
- 83) 坂口隆, 中村達也, 石原裕介:遅延リスク推定に基づく列車ダイヤ改善手法, 鉄道総研報告, Vol.28, No.4, pp.35 -40, 2014.
- 84) Leo Kroon, Rommert Dekker, Gabor Maroti. : Stochastic Improvement of Cyclic Railway Timetables, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.42, No.6, pp.553-570, 2008.
- 85) X. Delorme, X. Gandibleux and J. Rodriguez : Stability evaluation of a railway timetable at station level, *European Journal of Operation Research*, Vol.195, pp.780-790, 2009.
- 86) 國松武俊, 平井力, 富井規雄:マイクロシミュレーションを用いた利用者の視点による列車ダイヤ評価手法, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol.130, No.4, pp.459-467, 2010.
- 87) 牛田頁平:ダイヤ乱れへの対処とその課題ー東京メトロの場合ー, 電気学会産業応用部門大会講演論文集, pp.61–64, 2009.
- 88) 牛田頁平:列車運行実績データの可視化手法によるダイヤ検討への応用, 日本鉄道運転協会運転協会誌, Vol.52, No.8, pp.17 -20, 2010.
- 89) 富井規雄, 牛田頁平:列車運行実績データの可視化と東西線ダイヤ改正効果の検証, 日本鉄道技術協会協会誌 (JREA), Vol.53, No.8, pp.35274 -35277, 2010.
- 90) 牛田頁平: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, Vol.52, No.8, pp.407 -413, 2012.

- 91) 山村明義, 足立茂章, 牛田頁平, 富井規雄: 首都圏稠密運転路線における遅延改善策の検証, 第19回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, No.12-79, 2012.
- 92) 山村明義, 牛田頁平, 足立茂章, 富井規雄: 首都圏稠密運転路線における遅延改善策-東京地下鉄東西線での実施例とその検証結果-, 電気学会交通・電気鉄道研究会資料, TER-12, 2012.
- 93) Malachy Carey. : Ex ante heuristic measures of schedule reliability, *Transportation Research Part B*, Vol.33, pp.473-494, 1999.
- 94) Christian Liebchen, Marco Lubbecke, Rolf H. Mohring, Sebastian Stiller. : Recoverable Robustness, Technical Report of ARRIVAL-TR-0066, 2007.
- 95) 安部啓介, 荒屋真二: 最長経路法を用いた列車運行シミュレーション, 情報処理学会論文誌, Vol.27, No.1, pp.103 -111, 1986.
- 96) 國松武俊, 平井力: 運行実績・乗車率データを活用したダイヤ乱れ時の旅客流動分析手法, 鉄道総研報告, Vol.27, No.9, pp.35 -40, 2013.
- 97) 富井規雄: 通勤電車のダイヤ乱れへの対応アルゴリズム, 特集「地域交通とOR」, オペレーションズ・リサーチ, Vol.55, No.3, pp.176 -181, 2010.
- 98) 古関隆章, 原和弘: 列車運転小乱れ時の旅客流動解析に基づく旅客損失の計算と運転整理案の評価・提示, スケジューリング・シンポジウム, os3-4, pp.85 -90, 2007.
- 99) Wust, R., Laube,F., Roos, S. and Caimi, G. : Sustainable Global Service Intention as objective for Controlling Railway Network Operations in Real Time, *Proc. 8th World Congress of Railway Research*, Seoul , Korea, 2008.
- 100) 永岡修, 日比野直彦, 家田仁, 森地茂, 富井規雄: 都市鉄道の大規模なダイヤ乱れからの復旧に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.51, 2015.
- 101) 茂木重満, 相馬眞, 辺田文彦: 運転整理システムの開発, JR EAST Technical Review, No.28, pp.47-50, 2009.
- 102) 都築知人, 不破徹, 青木俊幸, 大戸広道, 河合邦治: 鉄道駅の流動評価に関する研究その1 階段・エスカレーター, 日本建築学会大会学術講演概要集, E-1 分冊, pp.841-842, 1999.
- 103) 都築知人, 森田信弥, 青木俊幸, 大戸広道: 鉄道駅の流動評価に関する研究その2 改札流動, 日本建築学会大会学術講演概要集, E-1 分冊, pp.1083-1084, 2000.
- 104) 佐藤隆, 青木俊幸, 薄田勝典, 山本昌和, 古賀和博: 鉄道駅の階段における旅客流動に関する研究, 日本建築学会大会学術講演概要集, E-1 分冊, pp.707-708, 2002.
- 105) 関根宏, 佐藤英彰, 林田和人, 渡辺仁史: 鉄道駅ホーム上のエスカレーター利用に関する研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.93-96, 2000.

- 106) 関根宏, 佐藤英彰, 長澤夏子, 木村謙, 林田和人, 渡辺仁史: 鉄道駅プラットホームにおけるエスカレーター付近の行列形成モデル, 日本建築学会大会学術講演概要集, E-1 分冊, pp.783-784, 2001.
- 107) 谷口典子, 浜本敏裕, 桂井史朗, 小林健二, 小山剛: 複合ターミナル駅における利用者行動その1 コンコース利用者の特性, 日本建築学会大会学術講演概要集, E-1 分冊, pp.505-506, 2001.
- 108) 浜本敏裕, 河合邦治, 薄田勝典, 山本昌和, 古賀和博: 複合ターミナル駅における利用者行動その2 コンコースの利用状況, 日本建築学会大会学術講演概要集, E-1 分冊, pp.507-508, 2001.
- 109) 杉山俊彦, 碓井克彦, 高橋晃久: 駅コンコースにおける旅客歩行速度に関する研究, 日本建築学会大会学術講演概要集, E-1 分冊, pp.509-510, 2001.
- 110) 長谷篤, 日比野直彦, 森地茂: 鉄道駅構内における歩行障害物と旅客流動に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.50, 2014.
- 111) 鈴木章悦, 日比野直彦, 森地茂: 都市開発による鉄道駅の混雑と施設容量に関する研究, 運輸政策研究, Vol.15, No.3, pp.2 -9, 2012.
- 112) 鈴木僚, 日比野直彦, 森地茂, 家田仁: 鉄道における各種ホームドアの比較研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.50, 2014.
- 113) 仮屋崎圭司, 日比野直彦: モスクワ地下鉄の高頻度運行管理ー我が国首都圏鉄道における列車遅延対策への示唆ー, 運輸政策研究, Vol.14, No.2, pp.34 -41, 2011.
- 114) 寺崎友芳: 容積率緩和による通勤鉄道混雑への影響, RIETI Discussion Paper, 2005.
- 115) 宮下奈緒子: 東京都区部における産業構造・分布の変化と市街地再編, 運輸政策研究, Vol.13, No.2, pp.103 -108, 2010.
- 116) 森田泰智: 都市開発と駅整備の整合性に関する研究, 運輸政策研究, Vol.14, No.4, pp.81 -87, 2012.
- 117) 江口 弘: 都市鉄道の混雑緩和と速達性向上のための3線運行手法の提案, 運輸政策研究, Vol.13, No.4, pp.2 -9, 2011.
- 118) 横田茂: 都市鉄道の整備手法の活用促進方策についての研究ー都市鉄道等利便増進法に着目してー, 運輸政策研究, Vol.15, No.3, pp.18 -28, 2012.
- 119) (財)運輸政策研究機構: 都市鉄道の有効活用方策に関する調査 報告書, 2003.
- 120) (財)運輸政策研究機構: 都市鉄道における混雑率の測定方法に関する調査 報告書, 2005.
- 121) (財)運輸政策研究機構: 運輸政策審議会答申第18号フォローアップ調査 報告書, 2007.

- 122) (財)運輸政策研究機構：鉄道輸送トラブルによる影響に関する分析 報告書，2009.
- 123) (財)運輸政策研究機構：都市鉄道の広域的なネットワーク機能を活用した混雑緩和対策に関する調査 報告書，2010.
- 124) (財)運輸政策研究機構：サービスの高度化に伴い発生する遅延等に対応した定時運行の確保方策に関する調査 報告書，2011.
- 125) 国土交通省 HP，http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/s304_arikata01_past.html.
- 126) 国土交通省鉄道局：鉄道プロジェクトの評価マニュアル（2012年改訂版），2012.
- 127) 成山堂書店，『列車ダイヤと運行管理』，2008.
- 128) オーム社，『鉄道ダイヤ回復の技術』，2010.
- 129) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 部内資料，『鉄道運転豆知識』，2008.

第3章

列車遅延の現状分析

第3章 列車遅延の現状分析

3.1. 概説

本研究は、定常的な列車遅延の発生と波及という東京圏の鉄道が直面する新たな課題について、詳細な実態把握と現状分析及び、時系列的な定量的分析から遅延の発生及び線的かつ面的な波及の現象のメカニズムを解明することにより、鉄道の信頼性を回復するための具体的な方法を提案することが目的である。そのために、駅での列車乗降に関わる旅客流動と駅施設が旅客流動へ及ぼす影響を考慮し、加えて列車1本1本の挙動とそれらが互いに与える影響を列車の運行方式と路線特性を踏まえて時系列的に考察する必要があると考える。これは、列車が遅れて駅に到着することで、通常よりも利用者が増加して乗降時間が増大し、さらに遅れが拡大する。さらに後続列車が団子運転状態になりその遅れは増幅されるという考え方である。団子運転については以前から知られていたが、その解消方法まで分析されていないのが現状である。このような現状を踏まえ、駅での旅客流動と駅間での列車運行方式に着目し、詳細な現状分析を行うことにより、遅延の発生及び波及の現象のメカニズム解明に焦点をあてた定量的な分析を行う。

3.2. 列車遅延の定義と使用データ

3.2.1. 列車遅延の定義

列車遅延には次の2つの概念がある。1つは時刻の離れであり、もう1つは時間の増加である。前者の時刻の離れは、駅等の任意の点における計画時刻と実際の列車運行が達成した実績時刻との乖離を示す。利用者の視点からの時刻の離れは、期待した到着時刻との離れであり、事業者の視点からの離れは運行ダイヤとの離れになる。例えば、列車種別や運行区間が単純な路線では、運行ダイヤ上の遅延が発生しても、利用者がその影響を殆ど意識しない場合がある。個々の利用者は、自分が実際に利用する列車の駅での待ち時間と駅間の所要時間の増加に対し遅れを意識するためである。つまり、利用者にとっての遅延とは、期待した時刻と実際の目的地到着時刻との差を意味する。一方で、事業者にとっての遅延とは、運行ダイヤ上の時刻と実際の運行時刻との差を意味し、路線の列車運行状況を示すものである。次に、もう1つの遅延の概念である時間の増加は、発駅と着駅との空間的な移動時間の増加を示すものであり、任意の2駅間における運行

ダイヤに対する所要時間の増加量を示す。目的地までの計画時間に対する所要時間の増加という点においては、前者の利用者にとっての遅延と同様の概念となる。

本研究は、列車遅延の発生及び遅延発生時の列車運行状態等の遅延現象に着目し、列車の駅到着時刻の遅れや、駅停車時間及び駅間走行時間の増加のメカニズムの分析、及び利用者サービス向上の観点から、列車遅延の対策方策を検討することを目的としている。遅延の定義において、後者の所要時間の増加を列車遅延とする概念は、列車の運行状態の分析を可能とし、かつ利用者の視点からの列車遅延に類似することから、本研究ではこの所要時間の増加を列車遅延と定義し、以降の分析を行う。なお、利用者の駅到着時刻に関する統計データは無いことから、待ち時間を考慮しない停車時間と走行時間から構成される所要時間の増加量が列車遅延と定義される。

3.2.2. 使用データ

(1) 鉄道事業者の遅延証明書発行履歴

各鉄道事業者のホームページには、路線別に遅延証明書の発行履歴が公表されている。発行基準は事業者別に様々であり、発行対象となる遅延時間（5分以上または10分以上）や1日当たりの発行回数（朝ラッシュ時のみ、3回/日、2回/日）も異なる。そのため、複数の事業者間でそれらを一様に比較することは出来ない。そこで本研究では、東京圏の中心部を運行し、かつ他事業者と複数の路線において相互直通運転を実施していることから、東京地下鉄株式会社（以下、東京メトロ）の遅延証明書の発行履歴及び運行情報履歴を用いる。対象期間は平成21年4月1日から同年11月30日までの8ヵ月間とする。なお、東京メトロは朝ラッシュ時、日中、帰宅ラッシュ時の3回/日、5分以上の遅延に対して証明書を発行している。（*発行回数はH21年12月より4回/日に増加）

これらは単日のデータでなく、期間をもってデータを取得できるため、東京圏鉄道網で発生する遅延の概況把握に有効である。一方で、遅延時間は5分単位で集計され、遅延の発生場所や発生列車、発生した時刻等の詳細な情報を得ることは出来ない。

(2) 列車運行間隔及び駅停車時間の計測値

列車の運行間隔は、先行列車が駅を出発してから後続列車が到着するまでの時分と、列車が駅に停車している時分とに分類することが出来る。本研究では前者を発着時分、後者を駅停車時間と定義する（図-3-1）。駅停車時間は、列車及び列車ドアの動作時分や旅客行動により、更に詳細な分類が可能であるが、例えば列車の乗降において降車客

と乗車客が交錯するラッシュ時間帯のターミナル駅では、それぞれの時分を厳密に區別して計測することは困難である。他方で、駅停車時間が大幅に増加する要因の一つに、旅客の駆け込みや混雑する車両への無理な乗車に伴うドアの再開閉等（以下、ドアばさみ）が一般的に知られており、その現象が遅延の発生要因の一つであると考えられている。

そこで、本研究では旅客の列車乗降時におけるドアばさみの発生状況に着目し、駅での実地調査を行いデータを収集した。調査は旅客が列車乗降に要する時分を乗降時分、事業者が運行上の安全確認に要する時分を確認時分として定義し計測する（図-3-2）。この場合、列車到着とほぼ同時に列車ドアが開かれることから、列車ドアが開いた時刻と列車ドアが閉じた時刻、及び列車が動き出した時刻を計測することで、乗降時分と確認時分を簡易に計測することが可能である。この調査方法では調査員は目の前の列車ドア1箇所のみを計測すれば良い。なぜなら、他の箇所でドアばさみ等が発生している場合は、目の前の列車ドアが閉じられた後も列車は動き出さないため、ドアばさみの解消に要した時分が確認時分に計上されるからである。一つの駅に対して配置する調査員は一人で済むため、本調査は筆者一人で実施することを可能とした。

調査対象は、相互直通運転を実施しており、かつ定常的な遅れが発生していることから、東急田園都市線及び東京メトロ半蔵門線を対象とした。調査対象駅は、東急田園都市線の渋谷駅、池尻大橋駅、三軒茶屋駅、二子玉川駅である。平成20年9月及び10月の期間で駅別に1～6日間実施した。調査時間は通勤時間帯（7:30～9:30頃）の約2時間とし、秒単位で計測した。計測値は2秒以下を切り捨て、3秒以上を切り上げるごととし、5秒単位で集計した。

これを用いることで遅延の発生要因の一つと考えられる駅での停車時間について、その構成要素を分類し、列車別に増加要因を探ることが可能である。しかし、発生した遅延の波及の様子を把握するためには、他の駅や駅間の列車の運行状況を知る必要があるため、同日に複数駅で調査を実施する必要がある。

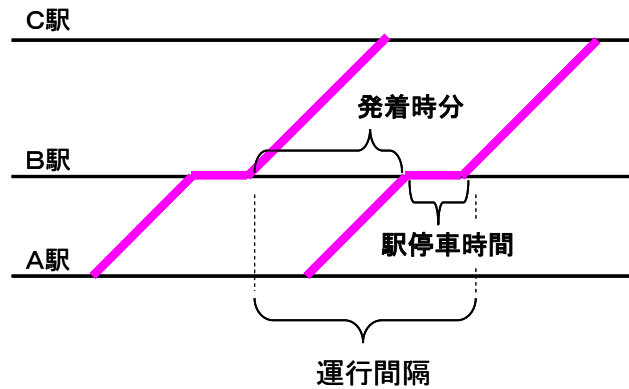


図-3-1 計測時分の定義（運行間隔の内訳）

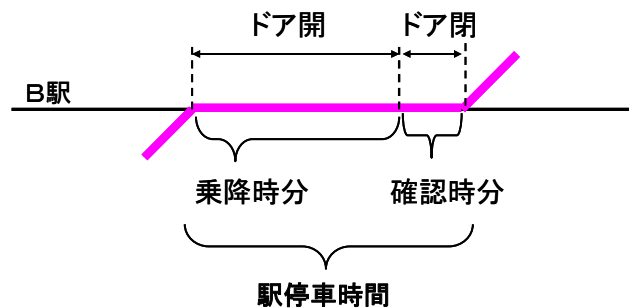


図-3-2 計測時分の定義（停車時間の内訳）

(3) 列車運行実績値

列車運行実績値は、自動進路制御装置（PRC：Programmed Route Control）により得られるデータの一つであり、駅別に各列車の到着時刻、出発時刻が秒単位で記録されている。これにより各列車の運行状況を時系列に把握することが可能である。対象路線は、(2)の实地調査を実施した東急田園都市線及び東京メトロ半蔵門線とする。データ取得日は平成21年1月19日（月）～21日（水）の3ヵ日間とし、時間帯は7:00～11:00である。なお、東急田園都市線は渋谷駅到着7:50～9:00の急行を、二子玉川駅～渋谷駅（6駅間）の区間で各駅停車とする準急運転を実施しており、列車別の混雑を平準化し遅延の抑制を図っている。準急運転時間帯における渋谷駅での最大到着遅延時間は19日が約9分、20日が約3分、21日が約2分であった。

これは列車1本1本の運行状況を、駅及び駅間で連続的に把握できるため、発生した遅延が路線に波及する様子を捉えることが可能である。しかし、駅停車時間の構成や駅間の速度変化についての情報を得ることは出来ない。



図-3-3 対象路線図

これらのデータを用いて、以下の節で遅延の実態把握を試みる。3.3.1.では、東京圏鉄道網における遅延の概況把握を行う。次に路線単位での日常的な短時間の遅延に着目し、3.3.2.では、駅における遅延の発生要因の検証を、3.3.3.では、駅間の運行状況を含めた遅延の発生・波及の実態把握を試みる。なお、輸送障害に至る大幅な遅延は、その発生要因が特定されることが多い。一方の短時間の遅延は、複数の要因の相乗作用より発生・波及するため要因の特定が難しい。遅れ時間にも幅がある。しかし、それらは日常的に発生することから、そのメカニズムは一樣な傾向を有していると考えられる。上記の(2)の計測値及び(3)の実績値のデータの調査日及び取得日は別日であるが、いずれの日も輸送障害に至る大幅な遅延が発生しておらず、10分未満の短時間な遅延であることから、これらを用いて短時間の遅延の実態把握を行うことは可能と考える。

3.3. 列車遅延の発生・波及の定量分析

3.3.1. 東京圏における列車遅延の発生状況

(1) 定常的な列車遅延の発生

図-3-4は、東京メトロの曜日別遅延証明書の発行件数を示している。対象路線は、銀座線、丸ノ内線、日比谷線、東西線、千代田線、有楽町線、半蔵門線、南北線、副都心線の9路線である。約2ヶ月かの集計では、平日は1日当たり平均13.2件の遅延証明書が発行された。1路線当たりで、毎日1日1件以上の遅延証明書を発行した計算となる。遅延発行時間は始発から朝10時までの通勤時間帯に42%が集中し、通勤利用者が少ない土・日曜日は平日の約3割と発行件数が減少する。平日の通勤・通学時間帯については、曜日別の変化は殆どみられず、朝のラッシュに伴い、定常的な遅延が発生していることが読み取れる。

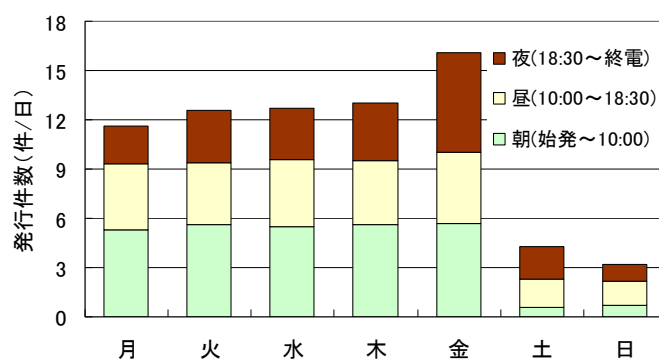


図-3-4 遅延証明書の曜日別発行件数

(2) 相互直通運転による列車遅延の波及

丸ノ内線及び銀座線を除く7路線は他社との相互直通運転を実施している。図-3-5はこれらの路線において遅延時間が20分以上の遅延証明書を発行した際の、遅延の発生場所を示している。発行件数の46%は他事業者（JR、東急、東武、西武、小田急等）の路線内で発生した遅延であり、相互直通運転により遅延の影響が路線間を越えて波及していることが読み取れる。

相互直通運転を実施している東急東横線と東京メトロ日比谷線、東武伊勢崎線において、路線別の遅延証明書（始発～10:00）の発行履歴を図-3-6に示す。集計期間は平成

20年10月29日～同年11月10日の13日間である。30日(木)に東横線で発生した遅延が日比谷線に波及していることが読み取れる。また、6日(木)は、伊勢崎線で発生した遅延が日比谷線及び東横線に波及したものである。相互直通運転により、双方に遅延の波及していることが確認される。

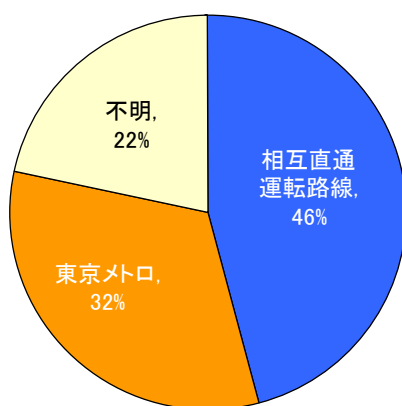


図-3-5 遅延の発生場所

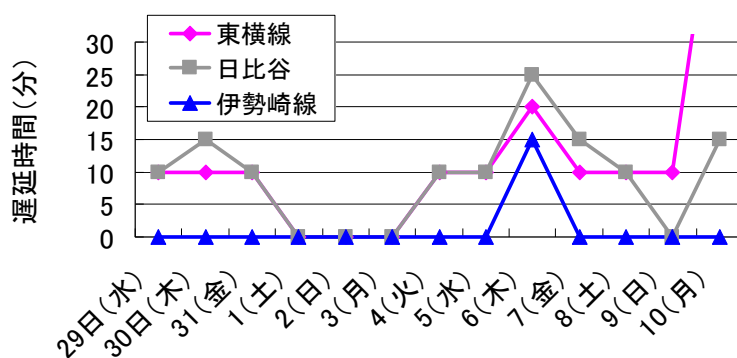


図-3-6 相互直通路線の遅延証明書の発行履歴

(3) 高頻度運行と列車遅延

平日の朝ラッシュ時間帯に着目し、路線別の遅延証明書の発行件数と時間当たりの運行頻度の関係を図-3-7に示す。相互直通運転の実施有無に関わらず、ラッシュ時間運行頻度の高い路線ほど遅延証明書の発行件数が増加する傾向にある。また、丸ノ内線や銀座線等の相互直通運転を実施していない路線に対し、実施している路線は運行本数が少ない状況においても遅延の発生件数が多い結果となっている。相互直通運転により実質的な運行距離が長いことや、相互直通路線先で発生した遅延の波及の影響によるものと考えられる。ラッシュ時間帯の混雑緩和のため、高頻度運行及び相互直通運転により輸

送力増強が図られているが、多くの路線で容量いっぱいの運行計画となっており、列車運行の定時性の確保が困難となっている状況が伺える。

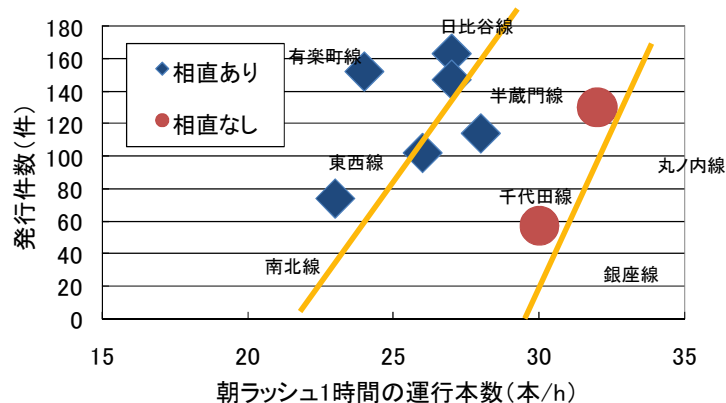


図-3-7 路線別の運行本数と発行件数

3.3.2. 駅における列車遅延の発生要因

次にネットワークを構成する路線に着目し、路線上に発生する日常的な短時間の遅延の実態把握を試みる。遅延の発生要因として駅停車時間の増加が一般に知られている。そこで、駅停車時間の増加と遅延の発生の関係性について要因を検証するため、3.2.2.(2)の列車運行間隔及び駅停車時間の計測値を用いる。

(1) 分析対象路線の列車遅延状況

田園都市線の渋谷駅において、ダイヤに対して60秒以上の遅れが生じた列車の本数とその遅れ時間を集計した(表-3-1)。平日6日間の集計では、全日で遅延が発生しており、遅れた列車の本数は14本~53本/53本中(7:30~9:30頃)、遅延時間は100秒~490秒と日によって様々である。一般的に雨の日は遅れると言われているが、本調査においても雨天日は晴天日より遅延の本数、時間ともに増加する傾向にある。なお、10月8日は、7:00頃にたまプラーザ駅でドア支障が発生したため、調査開始時刻から2分以上の遅延が発生し、ダイヤの回復は10:00頃であった。

表-3-1 田園都市線（上り）渋谷駅のダイヤに対する遅延状況（53本/2h）

調査日	天気	到着遅れ 本数	最大遅れ 時間	出発遅れ 本数	最大遅れ 時間
9月4日(木)	晴	15本	100秒	14本	100秒
9月30日(火)	雨	49本	435秒	49本	420秒
10月2日(木)	晴	34本	162秒	33本	162秒
10月3日(金)	晴	41本	238秒	41本	260秒
10月7日(火)	晴	41本	450秒	41本	443秒
10月8日(水)	晴	53本	488秒	53本	490秒

(2) 遅延要因となった列車の抽出

ラッシュ時は容量を最大限に使用しているため、列車の間隔はほぼ等間隔で運行されている。またダイヤが一度乱れると、駅においてはダイヤを順守した運行よりも、等間隔運行を維持することが遅延の拡大を抑制するため、遅延発生時は先行列車の出発を待たせるといった時間調整を実施する等の対策が取られることがある。そこで、ここでは遅延発生時における列車別の運行間隔に着目し、その変化量から、遅延の要因となった列車の抽出及びその要因の検証を試みる。

田園都市線の朝ラッシュ時間帯の平均運行間隔 125 秒（発着時分 65 秒＋駅停車時間 60 秒）に対して、列車別に運行間隔を求め、その差分を遅延時間とした際の計測結果を集計した。図-3-8 に列車別の渋谷駅到着遅延の累計を示す。渋谷駅 7:45 到着予定の列車で 70 秒の遅延が生じ、その後、増加傾向が続き、9:22 到着予定の列車では最大で約 460 秒の累積遅延となっている。その後、通勤のピーク時間も終わり、運転間隔は 180 秒～240 秒となるため、累積された遅延は急速に回復する。

(3) 列車遅延の発生駅

図-3-8 から所々に大きく遅延時間が増加する列車の存在が見て取れる。図上で枠組みした列車であるが、この日に渋谷駅で計測された遅延は、これらの列車が要因と考えられる。そこで、同日の渋谷駅における列車別の発着時分と駅停車時間をみる（図-3-9）。遅れの要因と推定される列車は、駅停車時間が他の列車とほぼ同値であるのに対し、発着時分は大きな値を示している。発着時分の増加は当該列車の到着遅れを示すことから、渋谷駅における遅延は上流の駅で発生し、その遅れが渋谷駅に持ち込まれていることが読み取れる。単独調査方法のため別日となるが、同路線の上流方の二子玉川駅を例に見る（図-3-10）。二子玉川駅では渋谷駅と対照的に、運転間隔が増加する要因は駅停車時間である。したがって、この調査日においては、路線の遅延要因の一つとして、二子玉川駅で発生した駅停車時間の増加があげられ、その列車が下流方の駅に遅延を波及させたと考えられる。

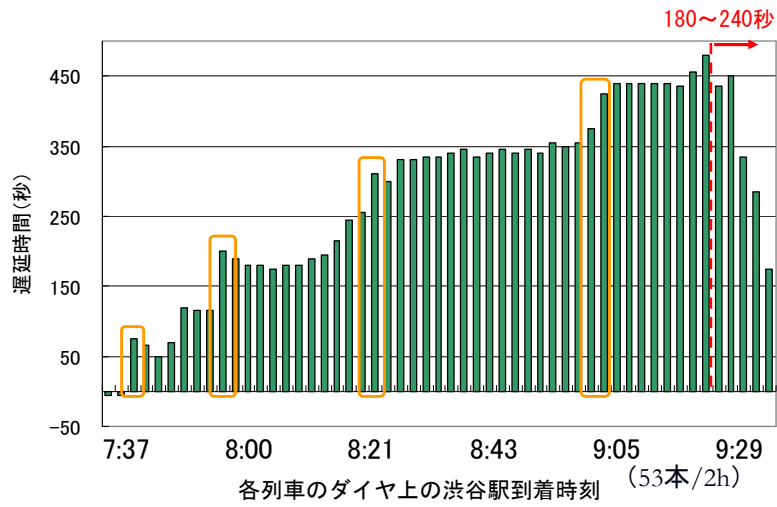


図-3-8 列車別の遅延の累積 (9/30)

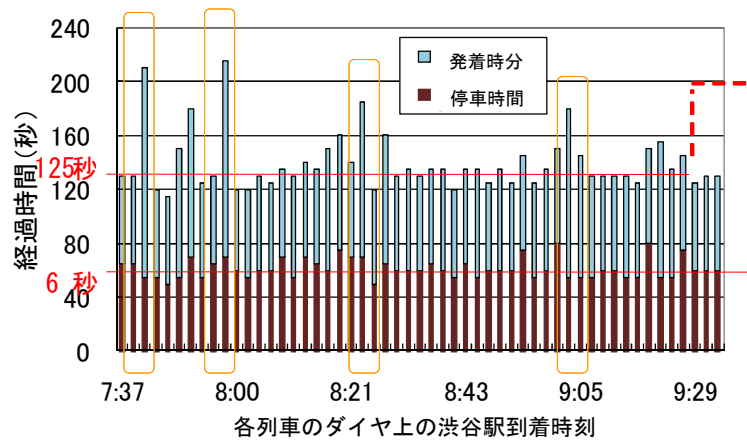


図-3-9 渋谷駅の列車運行間隔 (9/30)

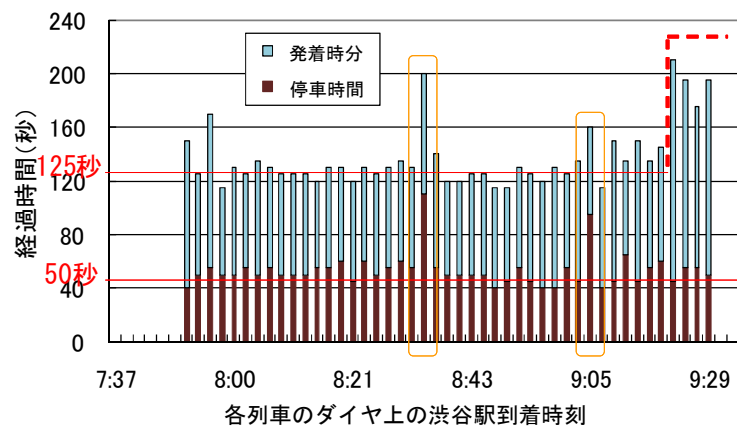


図-3-10 二子玉川駅の列車運行間隔 (10/9)

(4) 駅停車時間の増加要因

列車別の駅停車時間の内訳を駅別に図-3-11～図-3-14に示す。二子玉川駅で遅延が発生した列車は、乗降時分の増加により駅停車時間が増加している。ドア開時の衣服の引込みによるドア支障と、急行運転を再開した列車が乗客の分散乗車を促すために乗降時分を長く取ったことがその原因であった。二子玉川駅から4駅下流の三軒茶屋駅では、乗降時分の増加よりも確認時分の増加が駅停車時間の増加要因となっている。これは乗客の乗車位置の集中や無理な駆け込み乗車によってドアの再開閉を行い、ドア閉め時間が増加したこと、及びドアばさみの解消に時間を要したことがその原因であった。路線の最混雑区間起点となる池尻大橋駅では、確認時分の増加する列車本数がさらに増加している。ドアばさみ等が頻繁に発生し、列車の出発時間が遅れている様子が伺える。一方で、路線内で乗降人員が最大となる渋谷駅では、確認時分が約10秒とほぼ一定の値となっており、ドアばさみ等による停車時間の増加が抑制されている。この要因として、渋谷駅では朝ラッシュ時に駅員を約30名配置しており、10両編成の列車の各ドアにはほぼ一人ずつ駅員を配置している。人海戦術の有効性が現れている。

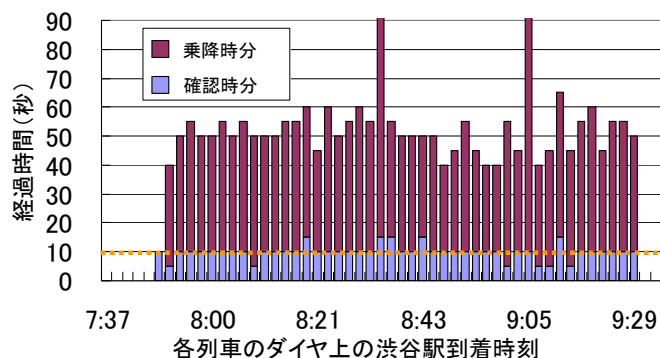


図-3-11 列車別の駅停車時間（二子玉川駅 10/9）

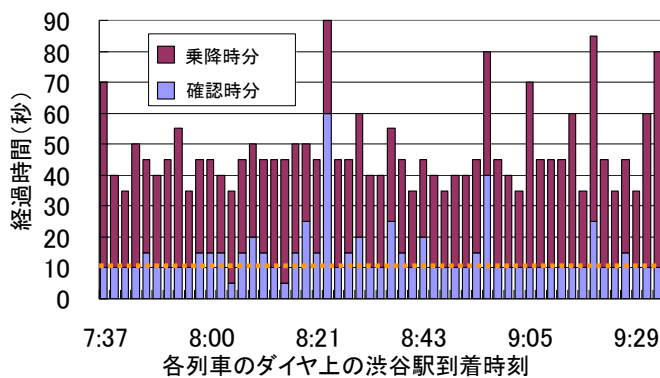


図-3-12 列車別の駅停車時間（三軒茶屋駅 9/3）

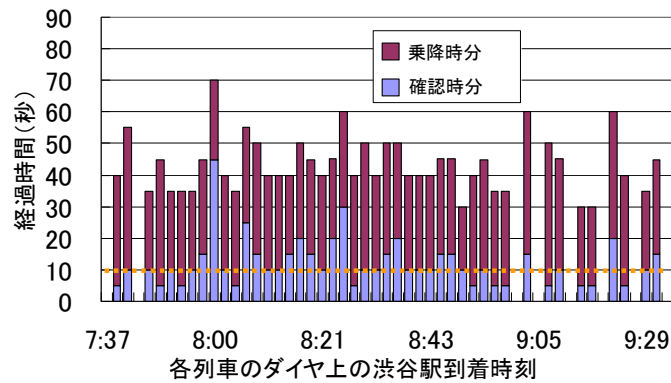


図-3-13 列車別の駅停車時間（池尻大橋駅 10/3）

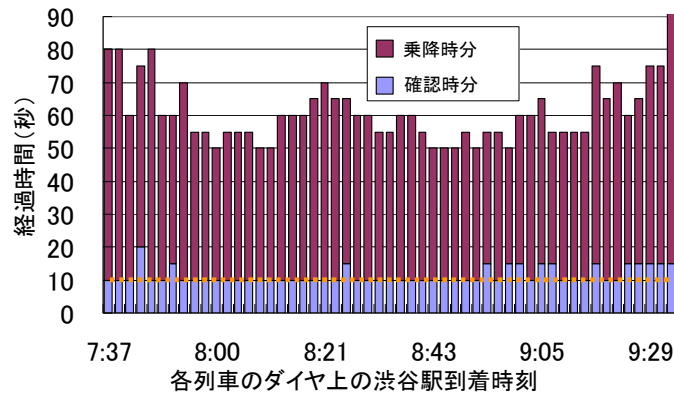


図-3-14 列車別の駅停車時間（渋谷駅 9/4）

(5) 乗降時分と確認時分の増加分布

調査対象駅別に乗降時分と確認時分のヒストグラムを作成する。乗降人員数の違いから乗降時間の平均値は約 30 秒～50 秒まで駅別に異なる値となったが、標準偏差には大きな差異がみられない。一方の確認時分は、約 10 秒～14 秒と平均値の差が小さいのに対し、標準偏差は大きく異なる。都心のターミナル駅手前の三軒茶屋駅では確認時分が 20 秒以上となる列車も複数存在し、値のバラツキが目立つ結果となっている。

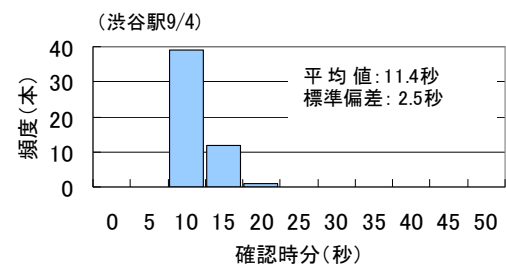
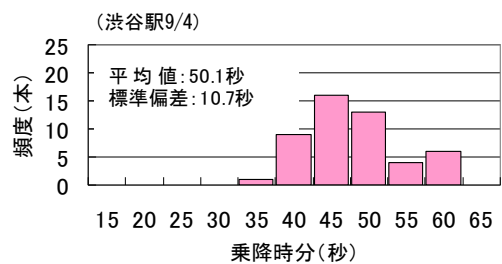
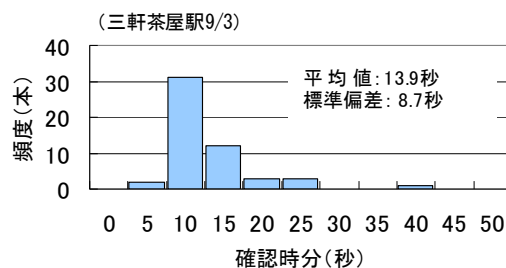
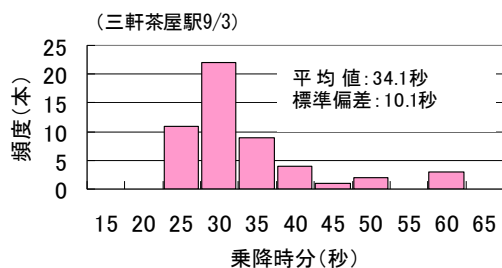


図-3-15 乗降時分の分布

図-3-16 確認時分の分布

3.3.3. 列車遅延の発生と波及

駅で発生した遅延がどのように路線全体へと波及するか、また発生・波及の要因とその特性について、3.2.2.(3)の列車運行実績値を用いて、実態把握及び現状分析を行う。路線全体での運行状態の変化を捉えるためには、列車別に駅及び駅間の運行状況を連続して把握する必要があるため、運行の実績値をダイヤと比較した分析が分かりやすい。駅間の列車走行時間を扱う際には、出発駅と到着駅で先行列車との運行間隔が等間隔に維持されていても、その駅間の走行時間が増加する場合があるためである。したがって、ここではダイヤに対する遅れ時間を遅延時間とし、駅及び駅間の双方から列車別の運行状態を捉えて、遅延の発生・波及現象を定量的に把握する。

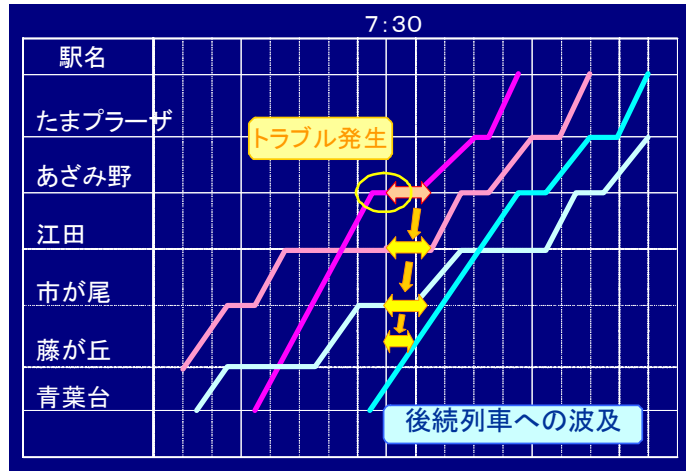
(1) 列車遅延の波及の仕組み

図-3-17～図-3-19は1月19日の運行実績の一部をダイヤグラムの模式図で示している。横軸は1分単位の時間経過である。この日の田園都市線は、あざみ野駅7:29発の準急列車において、車内発病による駅停車時間の増加により約1分の出発遅れが生じた。これに伴い、後続の普通列車2本は各々の停車駅において出発時間の調整を行い、約1～2分の出発遅れが生じた。さらに後続の急行列車は普通列車の追い越し駅である江田駅において、先行の普通列車の到着が遅れるため、走行速度の低下が生じた。これにより急行列車の江田駅通過が遅れ、あざみ野駅には約2分遅れて到着している。

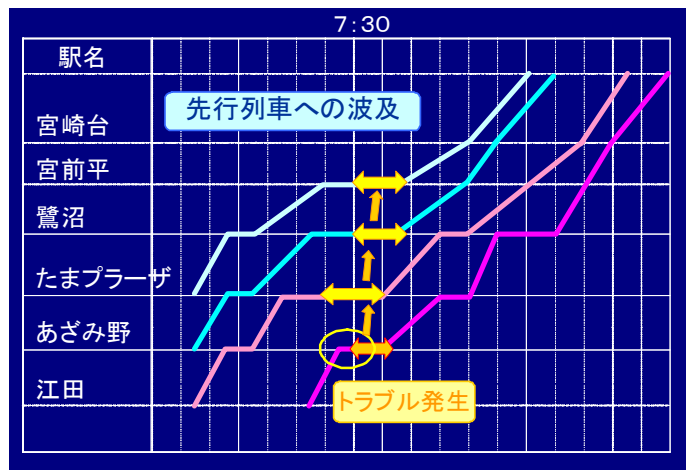
一方、先行列車では、遅延が発生した急行列車との列車間隔が空くことで、団子運転による遅延の増加を防ぐため、出発待ちの時間調整が実施されている。この日は3本先の列車まで時間調整を実施し、それぞれ1～2分程度の遅延が発生・波及した。

その後、あざみの駅から6駅下流の溝の口駅に停車する普通列車において、鷺沼駅で時間調整により出発を遅らせた準急列車との間隔が空いてしまったため、当駅で出発待ちの時間調整が実施された。遅延の発生した列車が運転を再開してから約4分後である。

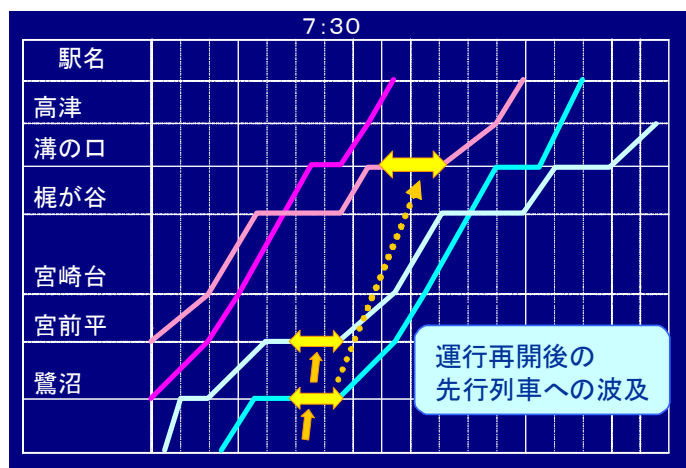
このように、ある列車で発生した遅延が、後続列車、先行列車、そして遅延発生列車の運転再開後も、発生場所から離れた駅で影響を及ぼしていることが見て取れる。今回の事例は遅延の発生・波及の一例に過ぎないが、発生した遅延が路線内で時間的かつ空間的に波及する様子が伺え、優等列車の存在により、その影響が複雑に広域へと作用することが読み取れる。



—図-3-17- ダイヤグラム図 (1/19) : 後続列車への波及



—図-3-18 ダイヤグラム図 (1/19) : 先行列車への波及①



—図-3-19 ダイヤグラム図 (1/19) : 先行列車への波及②

(2) 駅停車時間と駅間走行時間の連続性

図-3-20、図-3-21 は準急運転時間帯における池尻大橋駅の駅停車時間と、三軒茶屋駅～池尻大橋駅間の駅間走行時間を列車別に示している。池尻大橋駅は当該路線の最混雑率区間の起点方の駅である。池尻大橋駅では 8:10 頃に停車時間のピークがあり、その後は増加量が減少する。一方で、三軒茶屋駅～池尻大橋駅間の走行時間の増加量は、通常の走行時間が約 90 秒であるのに対し、8:20 頃から 120 秒程度の時間増加が発生しており、この時間帯に通過する列車の多くが 210 秒以上の走行時間となっている。

また、池尻大橋駅の駅停車時間の最大増加量約 70 秒と比べ、駅間走行時間のピーク時間帯増加量は 120 秒～180 秒であり、停車時間の増加量より大きな値を示した。停車時間と走行時間の増加量の幅や頻度は駅別に多様であるが、他の駅においても同様な傾向がみられた。

図-3-21 の変化率である先行列車に対する走行時間の増加量を図-3-22 に示す。これと図-3-20 を比較すると、駅停車時間の大幅な増加が発生した列車 (N0.6, N0.10, N0.13, N0.24, N0.33) は、その後続列車 (N0.7, N0.11, N0.14, N0.25, N0.34) の走行時間が増加している。

駅に進入できない後続列車が速度低下あるいは駅間停止したと考えられ、駅で発生した遅延が駅間を走行する後続列車へ波及し、新たな遅延が生じていることが読み取れる。

準急運転時間帯の 34 本の列車において、溝の口駅から半蔵門駅までの 13 駅間の所要時間における遅延時間の内訳をみると、遅れの初期段階は駅停車時間の増加が主な要因となっているが、8:40 頃から駅間の走行時間の占める割合が大きくなっている (図-3-23)。利用者混雑に起因する駅停車時間の増加と、線路上の列車混雑に起因する駅間走行時間の増加という異なる遅延の要因が存在し、時間帯によってその構成割合が異なることが見て取れる。

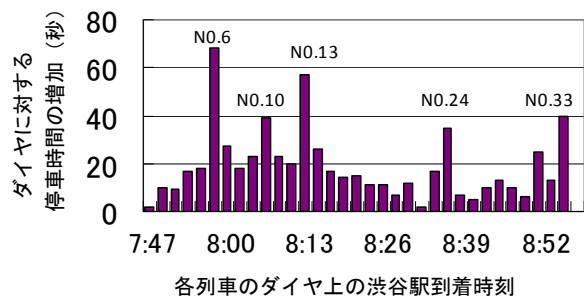


図-3-20 列車別の駅停車時間の増加量
(池尻大橋駅 1/19)

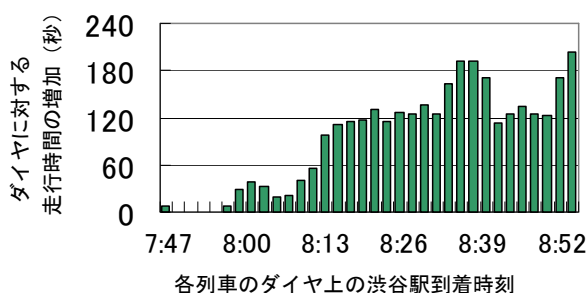


図-3-21 列車別の駅間走行時間の増加量
(三軒茶屋駅～池尻大橋駅間 1/19)

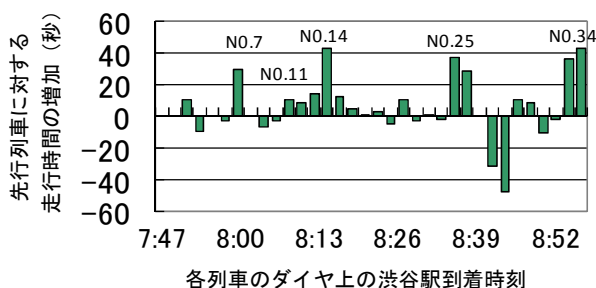


図-3-22 先行列車に対する駅間走行時間の増加量
(三軒茶屋駅～池尻大橋駅間 1/19)

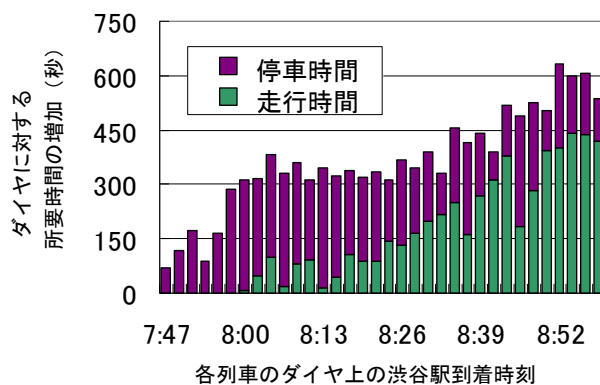


図-3-23 列車別の所要時間の増加量
(溝の口駅～半蔵門駅間 1/19)

(3) 駅停車時間と駅間走行時間の増加量の分布

池尻大橋駅の駅停車時間を日別に比較すると、各日において遅延状況に差異があるものの、同様な分布となっている。大幅な遅れ時間の発生は、全日で発生していることは注目すべき点である。時間帯別では8:00以降に増加の頻度が高い傾向がみられるが、60秒以上の増加は8:00前からの全時間帯で発生している。

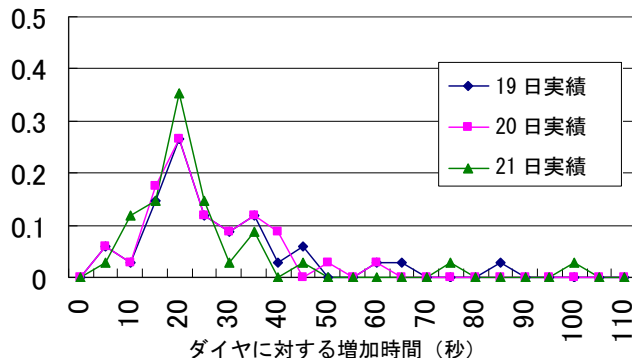


図-3-24 駅停車時間の増加量の分布

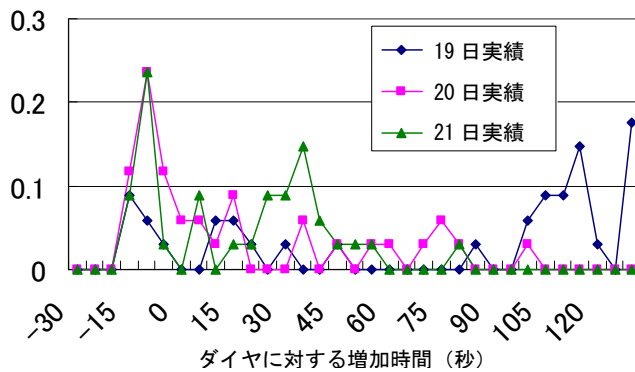


図-3-25 駅間走行時間の増加量の分布

現在の都市鉄道の特徴に短い閉そく長がある。本研究の対象路線においても1列車が複数の閉そく区間に跨って在線している。これにより高密度運行による大量輸送を可能としているが、一方で、自動車の渋滞に類似した列車の線路上の混雑が発生し、これに起因して列車の駅間走行時間が増加していると考えられる。線路上に密な状態で運行している列車は、先行列車の運行挙動に依存し、先行列車の速度変化に応じて加減速を繰り返すため、走行時間の日別比較は駅停車時間のそれのように確率的な傾向はみられない。時間帯別の比較で、時間経過とともに大幅な増加時間の頻度が高くなっていることは、遅延の発生により、線路上の列車の渋滞が徐々に顕在化しているためと考えられる。

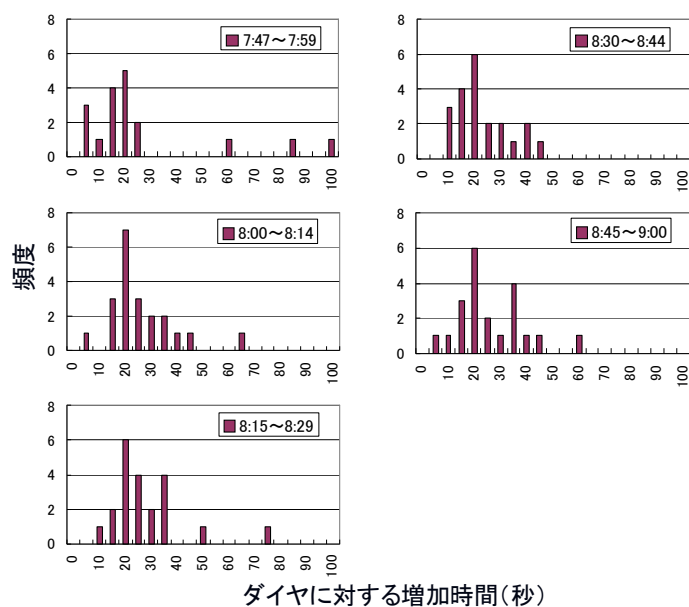


図-3-26 駅停車時間の増加量の分布
(池尻大橋駅 3日間〔時間帯別比較〕)

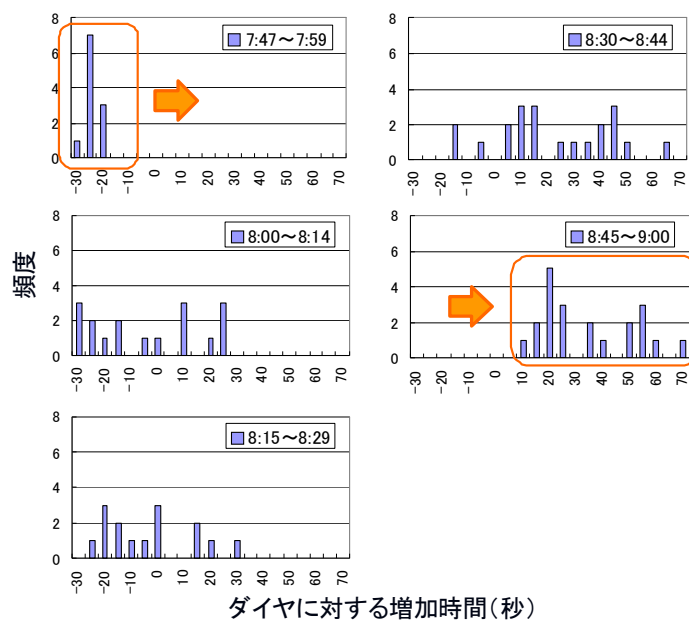


図-3-27 駅間走行時間の増加量の分布
(池尻大橋駅 3日間〔時間帯別比較〕)

(4) 発着時分と駅停車時間との相関

発着時分が大きくなり、乗客が増加して停車時間が増加する現象を捉えるため、二子玉川駅～池尻大橋駅間において列車別に60秒毎にランク分けした発着時分の合計値と駅停車時間の平均合計値の関係を図-3-28に示す。駅間の合計値をとった理由は、乗客の蓄積による混雑率との関係性が高いと考えられるためである。両者に明確な相関性がみられない要因として、列車種別による混雑率の違いや時間帯により発生乗客数が異なること、駅員の対応等が考えられる。これには上記の要素と駅構造を踏まえた詳細な分析が必要と考えられる。

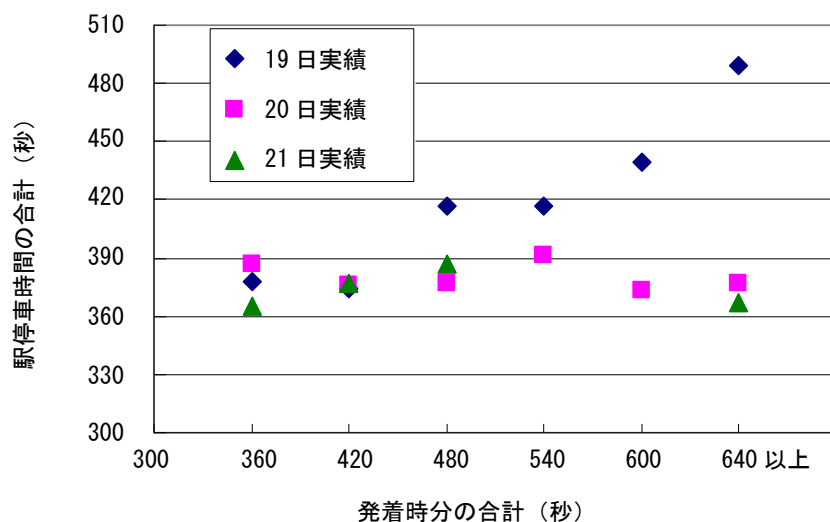


図-3-28 発着時分と駅停車時間の関係
(二子玉川駅～池尻大橋駅)

(5) 列車別の遅延時間

図-3-29 に列車別の遅延時間の累積変化を示す。大井町線溝の口駅延伸前の平成 21 年 1 月時点と、延伸後の平成 22 年 11 月時点である。大井町線溝の口駅延伸前は、溝の口駅から列車遅延が顕在化している。大井町線溝の口駅延伸後は、二子玉川駅～渋谷駅間で遅延が波及・拡大しており、渋谷駅～半蔵門駅間で拡大傾向が継続している。半蔵門駅以降は、維持・回復される。これらにより、二子玉川駅～渋谷駅間で遅延の拡大抑制及び 早期回復方策が重要であることが分かる。したがって、以降の分析については、二子玉川駅から半蔵門線駅の区間を中心に 実施することとする。

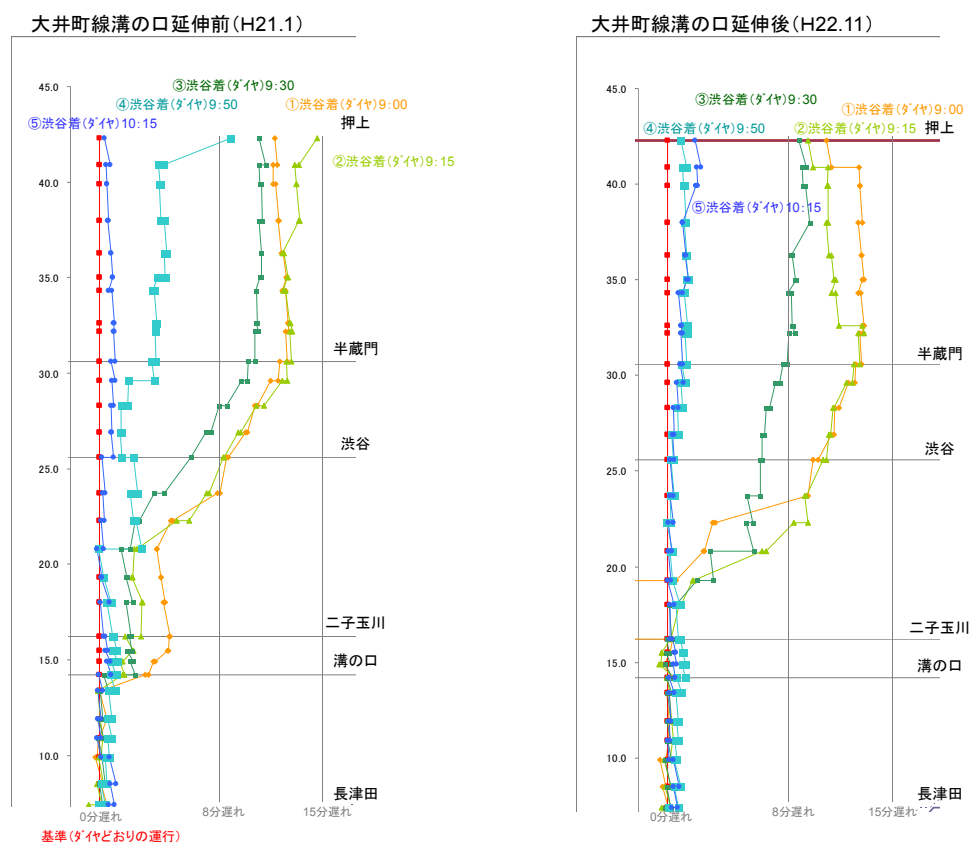


図-3-29 列車別の遅延時間の累積変化

3.3.4. 列車遅延に影響する要因

(1) 駅での旅客乗降

利用者の混雑等に起因する定常的な列車遅延については、駅における停車時間の超過が主な要因の一つである。JR 東日本によると、2014 年から過去 3 年間の 11 月平日の計測において、中央快速線、山手線、京浜東北線、埼京線における列車遅延の要因の約 3 割はドアばさみであり、ホームからの転落や線路内への落し物等による線路内支障は約 2 割、急病人を含めると、利用者要因に関係する遅延の要因は全体の 6 割以上を占めている。停車時間の増加は、利用者の特定時間帯への集中、特定列車への集中、特定車両ドアへの集中に起因して生じる場合が多い。それらは順に、東京都内にある事業所の始業時間の約半数が 8:30～9:00 となっていること、郊外から都心への通勤利用者の多くが急行列車を選択する傾向にあること、利用者の乗車位置が降車駅の階段近くの車両に集中することが要因である。利用者の集中は、乗降時における利用者同士の交錯や、車両の乗車スペースの縮小等により乗降速度を低下させ、さらにドアばさみの発生頻度が増加することとなる。また、スマートフォンを操作しながらの乗降や、キャリーケース等を所持しての乗降、車両ドアの両脇に留まり乗降の支障となる利用者等も、乗降時分を増加する要因となっている。また、コンコースや昇降施設、ホーム上における利用者混雑も、乗降者の交錯が生じることにより、停車時間の増加要因である。

また、第 1 章で記述したとおり、ホーム柵等の設置は、その稼働時間に加えて、ホーム上の見通しが悪化することにより、駅停車時間が増加する要因となる。ドアばさみが生じた場合には、車両ドアとホーム柵がそれぞれ時間差をもって再開閉を強いられるため、増加割合も大きくなる傾向にある。一方で、利用者の転落防止等のホーム上の安全性が向上することにより、輸送障害等による列車遅延の発生件数は大幅に減少することが見込まれ、有効な遅延防止策でもある。

(2) 信号システム

i) 列車運行方式と閉そく区分

列車の運行は、線路を一定区間に区切って 1 区間を 1 編成の列車のみの運行に占有させ、完全に通過し終わるまでは続行列車をその区間に進入させない運行方式をとっている。これを閉そく方式という。この方式に基づき、ATC を導入して運行されている場合が多い。ATC (自動列車制御装置 : Automatic Train Control system) とは、先行列車との間隔等を考慮した許容速度を列車の運転台に信号として表示し、列車速度が許容

速度を上回った場合は自動的にブレーキを作動し、許容速度以下まで速度を低下させるシステムである。運転安全規範には「先行列車との間隔及び進路の条件に応じて、車内に列車の許容運転速度を示す信号を現示し、その信号の現示に従って、列車の速度を自動作用により低下する機能を持った装置をいう」と定義されている。進路を一定距離に分割して構成される閉そく区間を定め、各区間には1つの列車しか入れないようにすることで、列車相互間の安全を確保している。ATC信号は、先行列車との間隔や駅の進路の開通状況に応じて閉そく区間ごとに地上設備で作成される。そのATC信号はレールを介して列車に搭載したATC車上装置に伝送され、車上側でATC信号をもとに許容速度を算出し、信号として運転台に表示する。各閉そく区間において、列車の進行に伴い変化する許容速度のイメージを図-3-30に示す。

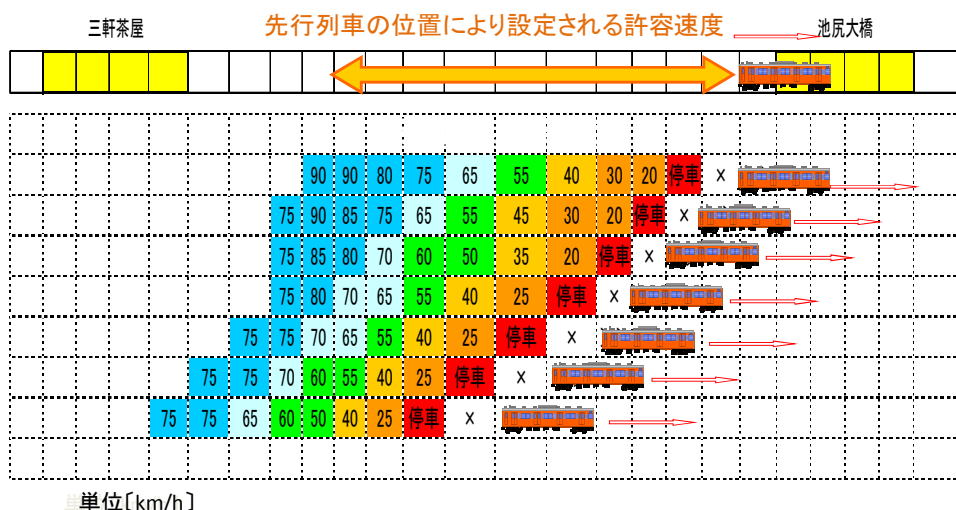


図-3-30 自動列車制御装置による列車運転イメージ

ii) 駅の前後の閉そく区分

列車速度と列車間隔は、走行する列車の安全な停車を確保するよう決定される。このため、閉そく区間長や分割の仕方により、発生した遅延の後続列車への影響度合いが異なる。混雑緩和のため列車本数を増やす場合は、駅手前の閉そく割りを細かくし、線路上の列車密度を高めることになるが、遅延の波及抑制を考えると、駅直後の閉そく割りを細かくすることが有効である。各列車が在線している閉そく区間を、後続列車へ如何に早く空け渡すかということになる。駅直後に曲線線形が存在すると、閉そく区間を抜ける速度が低下し、遅延の影響が後続列車へ及びやすくなるケースもある。

一例として、三軒茶屋駅と池尻大橋駅について、閉そく区分の違いによる後続列車に及ぼす列車運行の影響を図-3-31に示す。駒沢大学駅～三軒茶屋駅間と、三軒茶屋駅～

池尻大橋駅間との2つの駅間は、駅間距離及び駅間の閉そく区分が概ね同様であり、それ故に、運行ダイヤ上で設定された走行時間は前者が1分35秒、後者は1分30秒とほぼ同じ運行パターンとなっている。いずれの駅間も、到着駅付近の閉そくは細分化されており、列車間隔を密にすることを可能としている。しかしながら、三軒茶屋駅及び池尻大橋駅を発車した直後の次駅間の閉そく区分は大きく異なる。三軒茶屋駅発後の閉そく区分は、同駅手前と同様に細分化されている一方で、池尻大橋駅発後の閉そく区分については、1閉そく長が三軒茶屋駅発後の約3倍となる区間があり、粗い閉そく区分となっている。これは、池尻大橋駅発後に電気関係施設が設備されているためである。このため、三軒茶屋駅発後と池尻大橋駅発後では、同じタイミングに出発し、出発駅からの走行距離が同程度であった場合においても、後続列車に速度制限を及ぼす区間は大きく異なることとなる。この要因により、渋谷駅での停車時間の増加による影響と合わせて、三軒茶屋駅～池尻大橋駅間は、駒沢大学駅～三軒茶屋駅間より列車遅延が波及し易く、駅間の走行時間の増加による列車遅延が発生し易い区間となっている。遅延の波及抑制の視点から、駅手前の閉そく区分のみならず、駅直後の閉そく割りを細かくすることの重要性が示される。また、これらの点から走行時間の現状把握は、閉そくの区間割りを考慮し、時系列に列車1本1本の挙動を関連させ分析することが重要といえる。

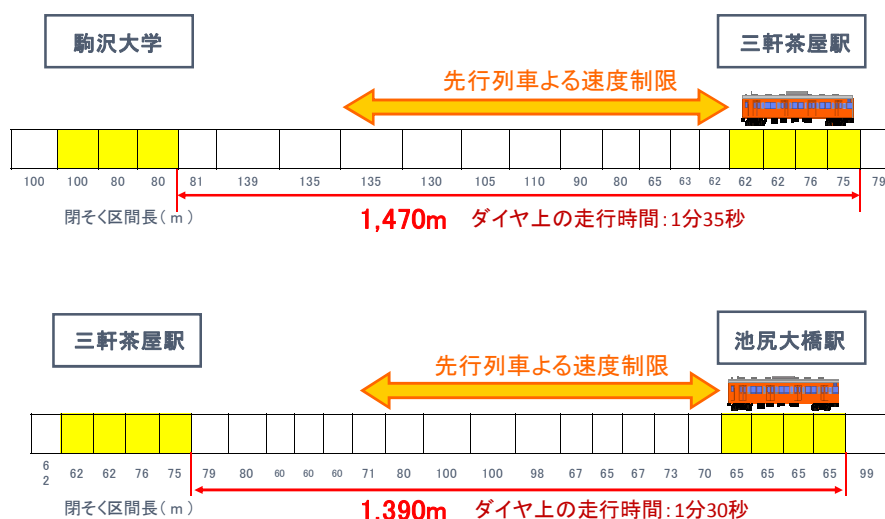


図-3-31 閉そく区分の違いによる速度制限 (その1)

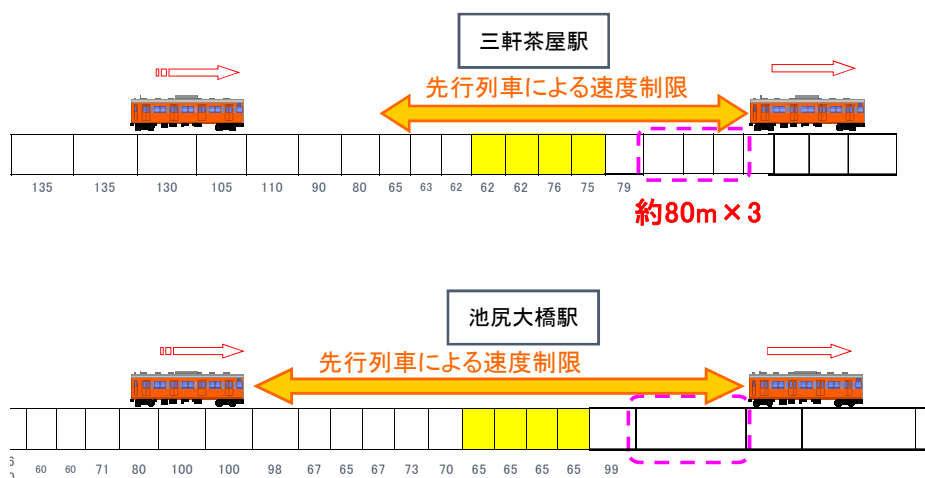


図-3-31 閉そく区分の違いによる速度制限（その2）

iii) 閉そく区分の粗密

閉そく区分の細分化の違いにより、列車遅延が発生し易い状態もある。相互直通運転を実施している東急田園都市線と東京メトロ半蔵門線は、渋谷駅を境界とし、閉そくの一区分長に差が生じている。ターミナル駅の渋谷駅への輸送力を向上するために、田園都市線では渋谷駅までの閉そく区分を細分化している。一方で、渋谷駅を出発後の半蔵門線では、渋谷駅の上流区間と比べて、閉そく区分が粗くなっている。また、半蔵門線は田園都市線と比べて駅間が短いことも作用し、半蔵門線と田園都市線とで同じ路線長において在線可能な列車本数が異なることから、2つの路線の境界駅となる渋谷駅では、旅客乗降に伴う停車時間の増加による列車遅延のみならず、先行列車が渋谷駅を出発後において、駅構内での一時停止が発生し、新たな列車遅延の発生が生じている。

(3) 列車制御システム

高頻度運行下においては、一つの列車の乱れが路線全体へ波及・拡大するため、運転操作に個人差の少ない均一さと即応力が要求される。このために、高頻度運行を実現するための ATC システムや、高頻度運行下で安定で効率的な運転を実現する ATO システムが導入されている。しかし、司令や運転士の技量が介入する余地もあり、それにより、列車の運行管理、引いては列車遅延へ影響する場合がある。

運輸司令においては、東京圏の多くの事業者が平常時の列車の進路制御をシステムを用いて行っている。大手民鉄において、信号扱い所で手動で行っている事業者は筆者が知る限り京浜急行だけである。輸送障害等によりダイヤに乱れが生じた非常時の際には、手動に切り替えたり、システムと手動を組み合わせる進路制御を行う事業者もあるが、

非常時対応のプログラムにより平常時と同様にシステムを用いた進路制御を行う事業者は多い。システムを用いた列車制御は、司令の技術の個人差を緩和し、均一な輸送サービスを提供することに寄与しているが、非常時の対応については、高い技術を持った司令や、各部門の明確な役割分担と自主的な対応が勝る場合がある。全て手動で列車制御を行う京浜急行の輸送障害時の即応力の高さは広く知られるところである。同様に駅間走行時間のバラツキは、運転士の技術や個人差によって生じる。さらに、運転士に前方の状況が伝えられず、定時運行しなければならないという運転士の心理も作用して過度に列車間隔を詰め過ぎる傾向にあることが影響しているものと推察される。手動で行うことによるバラツキは、列車遅延にとって正と負と双方に作用する場合がある。

(4) 車両性能

車両の走行性能のうち、特に加速度及び減速度に関する車両性能は、駅での発着時分を決定する要素の一つであり、その性能向上が発着時分の短縮に寄与する。発着時分の短縮は、列車遅延の拡大を抑制し、早期回復に資すると考えられる。運行ダイヤの設計においては、運行する車両の中で最も低い性能基準が採用されることとなり、新型車両の性能基準が反映されることはない。そのため、ダイヤ設計の採用基準より高い性能を有する車両においては、各駅で余裕時分が生まれることとなり、停車時間の増加等による列車遅延を解消することが可能となる。また、いわゆる電車の耐用年数は13年と定められているが、東京圏の主要路線において供用開始から30年以上経ている車両も多く運行されている。新型車両については列車遅延の発生防止及び影響範囲の極小化の対策として、主要機器の二重化が成されているが、旧型車両の場合は未整備の車両も存在し、列車遅延の要因となる可能性が懸念される。なお、最小発着時分は、以下の式により算定される。

$$T_{ser} = \frac{V_c}{\alpha} + \frac{1}{V_c} \left(L_{tr} + L_{bs} - \frac{V_c^2}{2\alpha} \right) + \frac{V_c}{\beta} \quad \text{if : } V_c \leq \sqrt{2\alpha(L_{tr} + L_{bs})}$$

$$T_{ser} = \sqrt{\frac{2(L_{tr} + L_{bs})}{\alpha}} + \frac{V_c}{\beta} \quad \text{if : } V_c > \sqrt{2\alpha(L_{tr} + L_{bs})}$$

α : 加速度 β : 減速度 V_c : 巡行速度
 L_{tr} : 列車長 L_{bs} : 閉塞防護長

(5) 路線線形

本節の(2)信号システムで記述した先行列車が後続列車へ及ぼす速度制限と同様な事例として、駅発直後の曲線線形の影響がある。半蔵門線押上駅方面において、永田町駅の直後に急曲線があるため、永田町駅を出発した列車は加速度を抑制して走行する必要があるため、他の駅と比べて抜きの速度が低下する。このため、後続列車に及ぼす速度制限が長く残ってしまうことから、一つ上流区間の青山一丁目駅～永田町駅間において、先行列車との接近による速度制限の影響を受けて駅間の走行時間の増加が発生し易い状態となっている。各列車が在線している閉そく区間を、後続列車へ如何に早く空け渡すかということになる。

また、線路方向の縦断勾配についても、列車遅延に影響する要因として考慮が必要である。特に、上り勾配において、駅手前で駅間停止した後に再発車する場合は、平坦部と比べて加速に時間を要するため、発着時分が増加し、列車遅延の増加要因となる可能性が考えられる。駅間停止の位置については、発着時分の短縮の視点から、先行列車への接近が必ずしも有効であるとは限らないため、適切な位置の検討が必要である。詳しくは第5章で記述する。

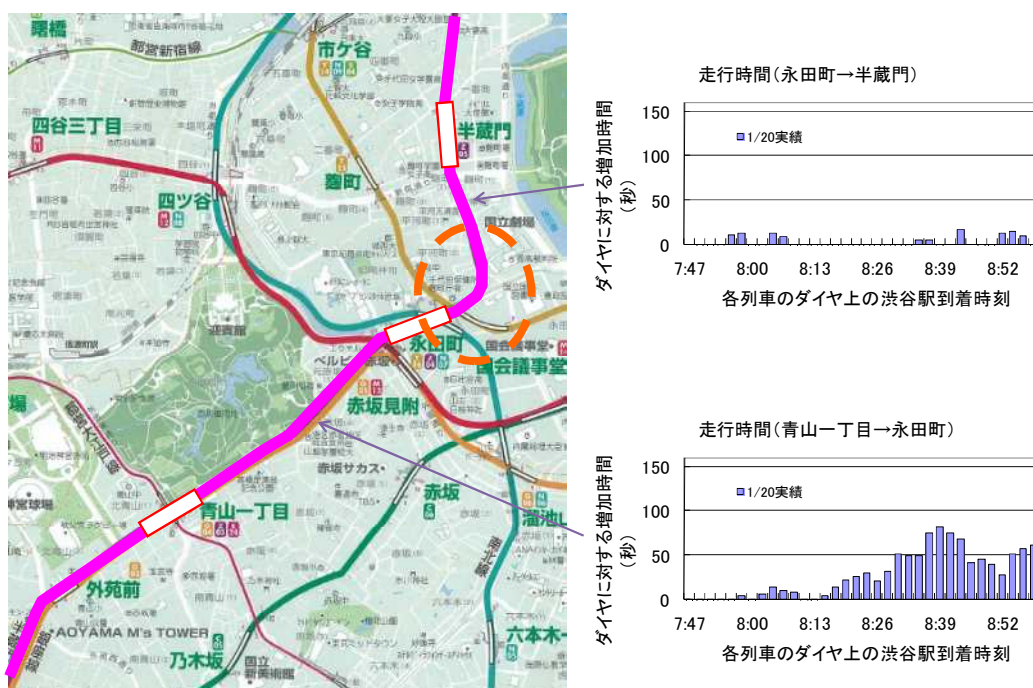


図-3-32 半蔵門線永田町駅前後の路線線形

(6) 折り返し設備（運転整理）

渡り線や引上げ線等の折り返し設備は、輸送障害等による支障区間を極小化して運行可能区間の輸送サービスを維持し、乱れたダイヤを早期に正常化するための運転整理を行う際に、不可欠となる線路設備である。折り返し線が適正に整備されていない場合、列車遅延の影響が広域に波及することとなる。また、列車の運休、折り返し・行き先変更、臨時列車設定等の運転整理は、車両運用計画、乗務員運用計画、構内作業計画を同時に、かつ迅速に検討されるため、折り返し設備だけでなく、車両基地や乗務員基地についても、その適正な配置と整備の有無が、輸送障害等の影響を極小化する際の成否を決める要素となる。

(7) 運行ダイヤ

運行ダイヤ上の運行本数が列車遅延に与える影響は大きい。時間当たりを設定する運行本数と、ダイヤ上の余裕時分がトレードオフの関係にあるためである。運行本数の設定は、主として2つの考え方がある。1つは輸送力最大化であり、もう一つは定時性確保である。輸送力最大化における運行本数の設定は、ダイヤの余裕時分を最小化し、路線のボトルネック駅における最小停車時間及び最小発着時分により決定される最小運行間隔をもって、単位時間当たりの運行本数に換算することにより算定される。ダイヤに余裕時分がないために生ずる列車遅延の発生及び速達性の低下を許容した上で、ボトルネック駅での断面輸送力の最大化を図る考え方である。一方で、定時性確保における運行本数の設定は、駅停車時間や駅間走行時間、あるいは発着時分に十分な余裕時分を設定し、輸送力低下及び速達性低下を許容した上で、定時性の遵守を図る考え方である。実際の運行ダイヤでは、停車時間、発着時分、余裕時分の各時分のバランスを考慮して最小運行間隔が決定され、運行本数が決められている。

田園都市線は最小運行間隔が125秒に設定されている。ピーク1時間の運行本数が28本の場合、1本当たり3秒程度の余裕時分となる。27本の場合は、1本当たり8秒程度の余裕時分となる。駅間停止により再加速する際の時間ロスが10秒程度と言われており、1本当たり8秒程度の余裕時分があれば、その概ねの影響を吸収することが可能となる。一方で、1本当たり3秒程度の場合は、駅間停止の影響が直ちに後続列車へと波及することとなる。

$$3,600 \text{ 秒} \div 27 \text{ 本} = 133.33 \text{ 秒/本} \quad \cdots \text{余裕時分 } 8.3 \text{ 秒}$$

$$3,600 \text{ 秒} \div 28 \text{ 本} = 128.57 \text{ 秒/本} \quad \cdots \text{余裕時分 } 3.6 \text{ 秒}$$

$$3,600 \text{ 秒} \div 29 \text{ 本} = 124.14 \text{ 秒/本} < 125 \text{ 秒/本 (最小運行間隔)}$$

最小運行間隔に対する運行管理上の余裕時間は、列車遅延の顕在化に大きく影響する。余裕時分が、発生した遅延時間より小さい場合は、超過時間が遅延時間として後続列車へと波及するため、遅延が拡大し易くなる。特に、駅間停止が後続列車にも波及する場合、再発車に生じる時間ロスによって、発着時分の増加量が固定化されるため、遅延時間が列車毎に累積して拡大し、遅延発生時は僅か数秒の遅延時間であっても、結果として十数分の遅延に拡大する可能性がある。したがって、定常的に発生する遅延時間及びその結果生じる駅間停止の時間ロスについて、これらを吸収することが可能な余裕時分を、ダイヤ上に設定できない場合は、列車遅延が顕在化し易くなる可能性がある。実際に、田園都市線は、車内混雑の低下を目的として、ピーク1時間の運行本数を29本に設定した際に、これまで以上に列車遅延が顕在化することとなった。

ダイヤ上で余裕時分を設定する時分については、駅停車時間と駅間走行時間との2つの時間がある。駅停車時間に設定する場合は、輸送力低下とのバランスを留意することとなり、駅間走行時間に設定する場合は、速達性とのバランスを留意することとなる。朝ラッシュ時間帯に高い混雑率で運行する路線においては、輸送力を保持することを優先し、路線の速達性を低下させることを前提に、結果として駅間走行時間に余裕時分を設定している路線も多く存在する。

3.4. 列車遅延の発生・波及及び回復のメカニズム

3.4.1. 利用者混雑に起因する発生・波及

何らかの要因で一度遅延が発生すると、次駅で待っている乗客が増え、通常よりも乗降時分が増加し、さらに遅延時間が増大する。それがいくつもの駅で続くと後続の乗車率の低い列車が次々と混雑している列車に追いつき、いわゆる団子運転が発生する。乗車率の低い列車が続くとまた間隔が開き、つぎに混雑率の高い列車が到着する。このような事象は以前から知られているところである。図-3-33 にイメージを示す。

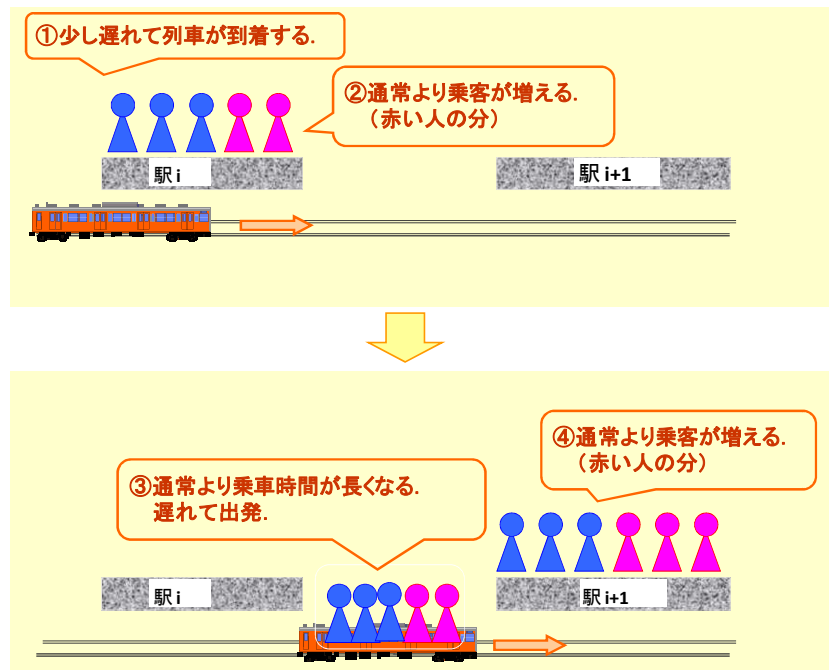


図-3-33 団子運転のイメージ

この事象について、列車運行実績値を用いて駅での乗降時分の視点から検証した結果が図-3-34 である。駅別の停車時間と発着時分を各々に合計し、1 駅当たりに割戻した際の発着時分と停車時間の関係を図-3-34 に示す。対象駅は多くの列車で車内混雑率が180%を超える二子玉川駅から渋谷駅までの7 駅とした。また、停車時間が増加する要因は、発着時分の他に車内混雑率、乗降客数、ホーム上の旅客滞留、駅構造等の様々な要因が影響することが知られている。このため、それらの影響を鑑みて、図の停車時間は、発着時分を60 秒毎にランク分けし、各ランクに属する列車の停車時間を平均した

値を記している。両者には正の相関関係があることから、先行列車の出発後に後続列車の到着が大きくなると、駅の乗客が増加して後続列車の停車時間が増加するといった一般的に知られる事象を読み取ることができる。従って、遅延の発生原因の一つと考えられる駅での停車時間の増加を防ぐ施策として、各駅で列車別の発着時分を一定に保ち、これを増加させない方策の有効性が示唆される。その様な対策の一例として、先行列車に対して後続列車の車内混雑率が著しく高く、列車間隔も大きい状態にある場合に、列車単位での旅客の分散乗車を図るために、駅で先行列車の出発を待ち合わせるといった運行管理手法が実施されている。

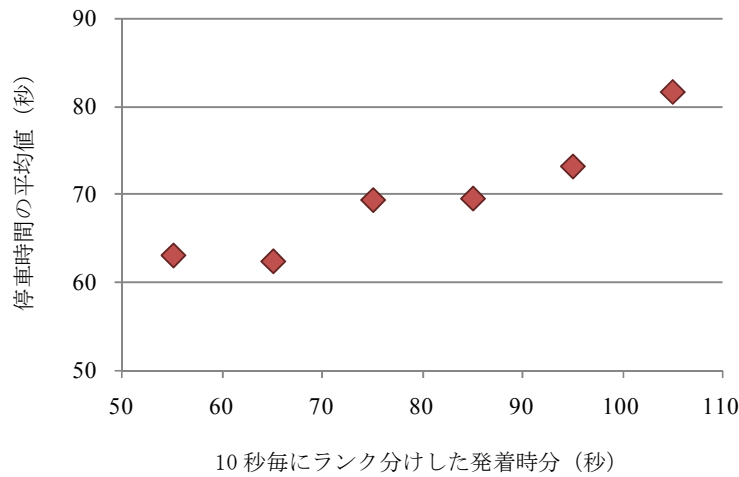


図-3-34 発着時分と停車時間の関係

駅での旅客乗降に伴う列車遅延の拡大について、混雑率の高い遅延の要因列車の駅停車時間の増加により、先行列車との列車間隔が広がるために、次駅で更に停車時間の増加が発生する。このような状況は、ラッシュ時間帯の初期に多く、列車遅延が拡大し、路線全体へと波及する要因となっている。一方で、ラッシュ時間帯の終盤等、さらなる混雑率の増加が生じない場合については、列車間隔を広げることは寝ているダイヤを起こすこととなり、遅延回復に資することとなる。列車別の車内混雑率や、駅別の旅客発生率等の条件の違いにより、列車の運行間隔は列車遅延に対して正と負の双方の効果を生じさせるため、各々の事象について、仕組みを理解したうえで、列車の運行管理を実施することが重要となる。

3.4.2. 列車混雑に起因する発生・波及

列車の運行は、線路を一定区間に区切って1区間を1編成の列車のみの運行に占有させ、完全に通過し終わるまでは続行列車をその区間に進入させない運行方式をとっている。このため、高頻度運行下では、先行列車の駅及び駅間での列車遅延の影響が、駅間を走行する後続列車に波及する。この蓄積と繰り返しの繰り返しにより、列車遅延は上流へと波及し、路線全体に影響が及ぶこととなる。先行列車が駅間に在線しているために、駅発車の準備が整っている場合においても、出発ができずに駅停車時間の増加が生じる。その後続列車は、駅に進入することが出来ないため、駅手前で駅間停止を強いられる。その影響はさらに後続列車へと波及し、前を走行する列車から上流の後続列車へと順番に列車遅延の影響が波及することとなる。駅間が短い区間においては、先行列車が駅を出発した場合でも、さらに先行する列車が次駅に停車している際には、駅間の減速または駅間停止が生じるため、後続列車は駅の停車位置まで走行できず、駅に進入したものの途中で停止をし、再発車のうえ停車位置まで移動する場合も生じる。渋谷駅における実測調査においても、列車遅延が顕在化した時間帯において、時おり観測されている。

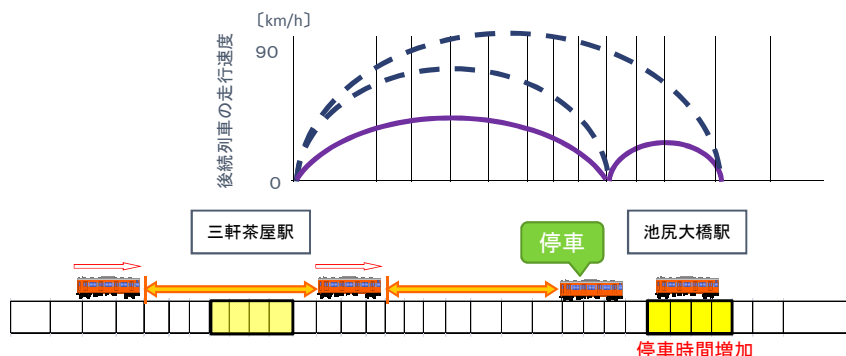


図-3-35 後続列車への遅延波及のイメージ

高頻度運行下では駅停車時間の増加が、直ちに後続列車の駅間走行速度の低下を誘引し、遅延の影響が後続列車へと波及する。運行間隔が短いため、駅間での走行時間の増加は後続列車で回復することなく、その区間の走行時間の増加量として引き継がれる。さらに走行時間が増加するとその影響は後続列車へ次々と伝播し、上流駅間へと波及する。図-3-36は、桜新町駅～駒沢大学駅～三軒茶屋駅～池井尻大橋駅の3駅間における列車別の走行時間の増加量を示している。最下流の三軒茶屋駅～池井尻大橋駅間で生じた走行時間の増加が上流駅間へと波及しており、遅延時間が最大となる時間帯（9:20頃）の列車では、3駅間全てで走行時間が増加するため、遅れ時間が大幅に増加している。

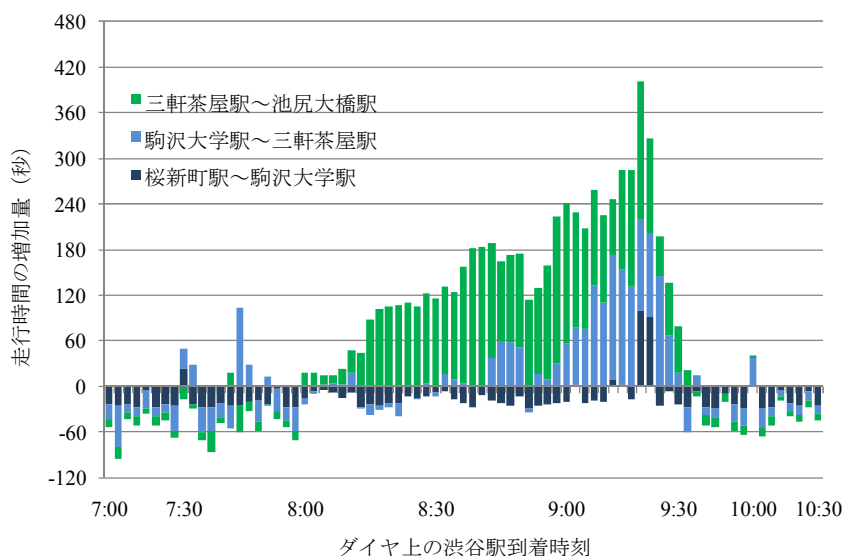


図-3-36 列車別のダイヤに対する走行時間の増加量
(桜新町駅～駒沢大学駅～三軒茶屋駅～池尻大橋駅)

駅間の走行時間の増加に関する模式図を図-3-37に示す。高頻度運行下では駅停車時間の増加が、直ちに後続列車の駅間走行速度の低下を誘引し、遅延の影響が後続列車へ波及する。運行間隔が短いため、駅間での走行時間の増加は後続列車で回復することなく、その区間の走行時間の増加量として引き継がれる。さらに走行時間が増加するとその影響は後続列車へ次々と伝播し、上流駅間へと波及する。一方で、先行列車が後続の遅れのため、間隔調整により、新たな遅延が発生する場合もある。このため、列車遅延の影響は、要因となった列車から上流区間だけでなく、下流の先行区間においてもその影響が波及することとなる。

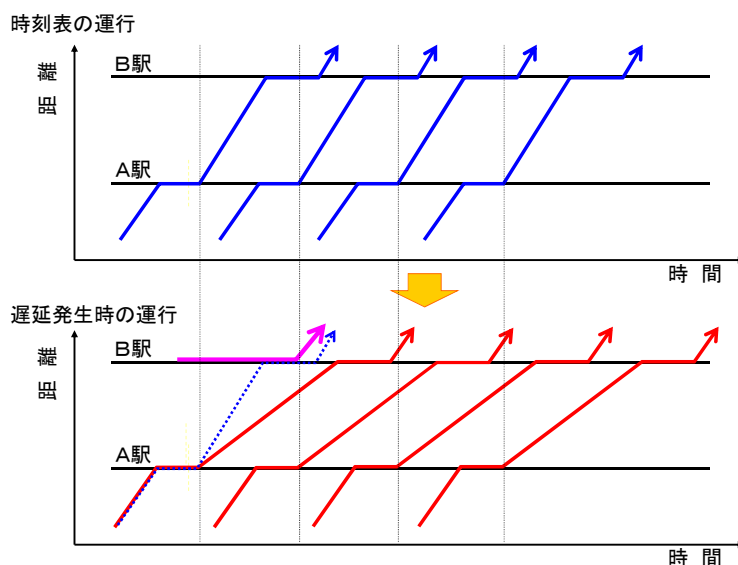


図-3-37 列車遅延の波及イメージ

3.4.3. 列車遅延の波及・拡大

列車遅延の波及，拡大の全体模式図を図-3-38に示す．遅れの発生した列車が次駅以降における乗客の増加により，乗降時間が増加しさらに遅れが拡大する事象や，先行列車の時間調整，優等列車の追越し待ちによる遅れの拡大については，これまでも知られてきた．これらの遅延拡大の要因は駅停車時間の増加である．一方で，ある駅で発生した遅延が後続列車にどのように波及・拡大するかについて記した文献は少ない．列車遅延の発生駅における到着遅れと，次駅以降での運行間隔の乱れによる遅れの拡大は，駅間の走行時間の増加に起因するものであり，駅の乗降に関する分析と併行して，列車の運行挙動を捉えた交通流としての分析及び対策が必要である．

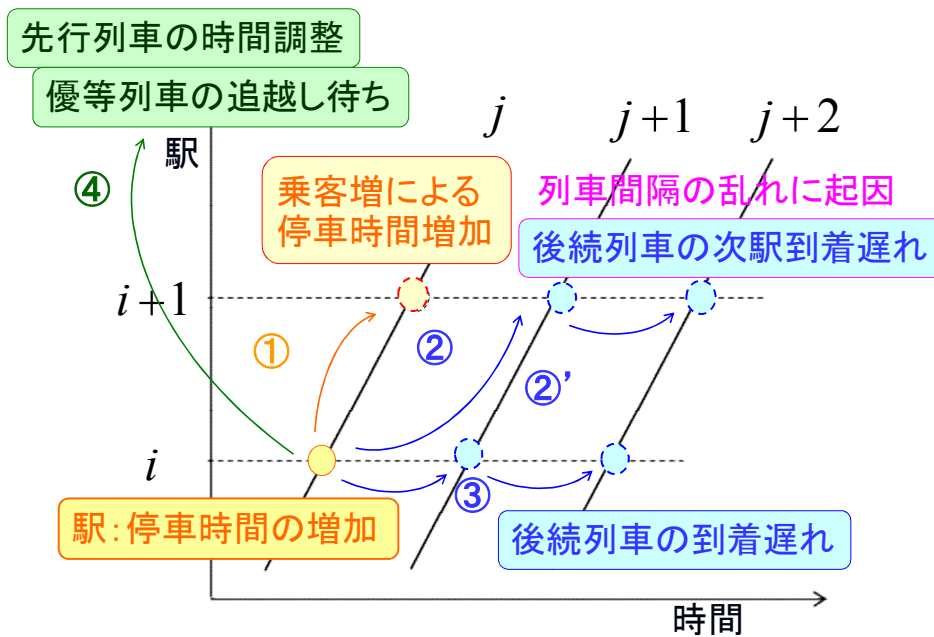


図-3-38 列車遅延の路線全体への波及イメージ

3.4.4. 列車の運行間隔と列車遅延の回復

図-3-40において、着色の濃淡は、運行ダイヤで設定されている運行間隔の違いを示している。図の濃着色は、当該路線の最小運行間隔である125秒間隔または150秒間隔の運行が設定されている列車である。一方で、薄着色は180秒間隔や240秒間隔等、運行間隔が広がり、最小運行間隔に若干の余裕時分が設定された運行される列車を示している。運行間隔が広い早朝の7:00から8:00前までの時間帯は、列車遅延が顕在化していないが、最小運行間隔となる8:00頃から列車遅延が拡大し、再び列車間隔が広がる9:30頃まで列車遅延は回復しない。列車の運行間隔の広がりにより、走行時間の増加量が解消し、停車時間の増加を駅間の回復運転によって補うことで、所要時間の増加が解消され、列車遅延が回復している。図-3-40は所要時間の増加の視点から、列車遅延を表現しているが、運行ダイヤからの乖離の視点で考えて場合においても、列車の運行間隔の広がり、運行ダイヤ上に余裕時分を有することとなるため、同様なタイミングで列車遅延が回復することとなる。したがって、列車遅延の回復には、過剰に密になっている列車間隔の拡大が必要条件となり、列車間隔を広げるための運行管理手法の検討が、列車遅延対策の検討となることが分かる。列車遅延を回復する運転整理の手法として、運行ダイヤに設定される列車の運行を取りやめる、いわゆる“間引き”の効果も、同様な仕組みにより列車遅延が回復される。図-3-39に模式図を示す。列車間隔が広がることにより生まれる時間的、空間的な余裕時分が、所要時分の回復と、ダイヤの回復をもたらすことを示している。

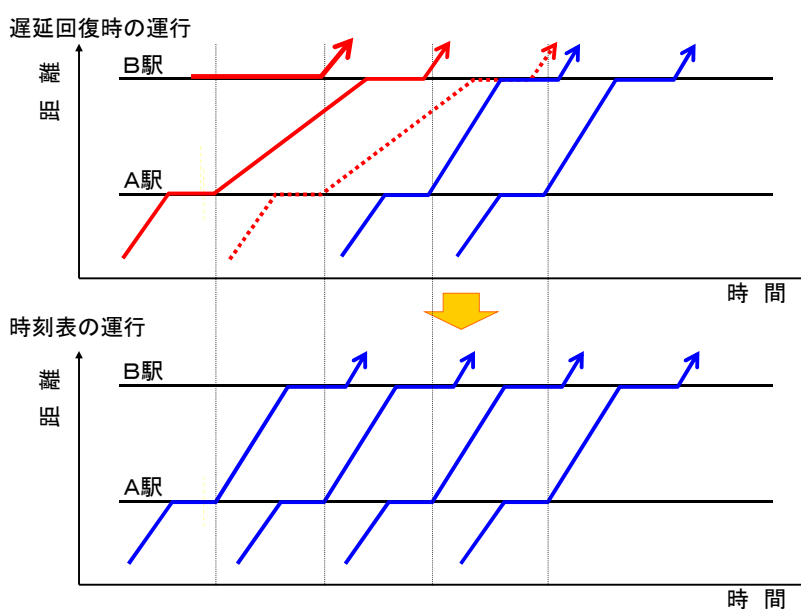


図-3-39 列車遅延の回復イメージ

3.4.5. 列車遅延のメカニズム

図-3-40 に、列車別のダイヤに対する遅延時間の構成を示す。駅停車時間の増加は、ほぼ全ての列車において発生している。しかし、ラッシュ時間帯の前後（ダイヤ上の渋谷駅到着時刻 7:30 以前，10:00 以降）では、駅間走行時間が負の値となっており、停車時間の正の増加量と相殺されて、渋谷駅での到着遅延は生じていないことが読み取れる。また、運行間隔が短くなるラッシュ時間帯では、走行時間の増加量が負から正へと推移しており、これによって、ダイヤ上で 7:40 頃の列車から徐々に遅延が発生している。8:10 頃の列車で停車時間の増加はピークを迎え、8:20 以降の列車から走行時間は増加に転じている。走行時間の増加量がピークとなる時間帯に渋谷駅での到着遅延も最大となり、その後、ダイヤ上で設定された列車の運行間隔が広がると、直ちに走行時間の増加が解消されるとともに、遅延時間も回復している。この様に遅延時間の構成は、利用者混雑に起因する駅停車時間の増加と、線路上の列車混雑に起因する駅間走行時間の増加という異なる要因で構成され、遅延発生初期段階は、駅停車時間の増加が主な遅延要因であるが、その後の時間帯は走行時間の増加の占める割合が大きくなることが分かる。また、ダイヤに対する走行時間の変化量は停車時間のそれより大きいこと、列車の運行間隔が遅延回復に与える影響が大きいことから、遅延時間の拡大抑制及び早期回復において、駅間走行時間への対策が有効であることが示唆される。また、利用者行動の変化を伴う停車時間への対策と比べ、事業者側の取り組みだけを要求する走行時間への対策は、施策の実行性が高く、その効果が期待し易い点も特記すべき事項である。

列車遅延は、利用者要因で発生した駅での停車時間の増加が、駅間を走行する列車の走行時間の増加に波及・拡大する。その後、運行間隔の拡幅に伴う走行時間の回復により、列車遅延が回復する。したがって、列車遅延対策の実効性は列車運行への対応が有効であり、また高頻度運行時間帯において、如何にして列車間隔を拡幅して走行時間を回復するかの検討が重要である。

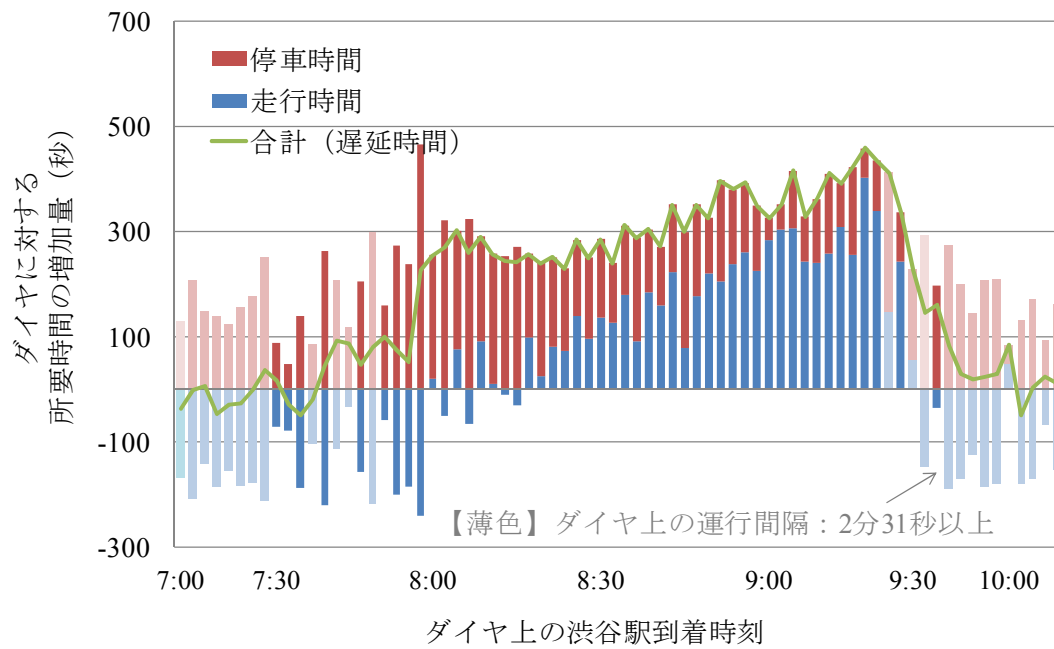


図-3-40 列車別のダイヤに対する遅延時間の構成
(溝の口駅～渋谷駅)

3.5. モスクワ地下鉄の事例

ロシアのモスクワ地下鉄は世界屈指の輸送量を誇っており、その輸送量は東京圏の地下鉄（東京メトロ+都営地下鉄）の輸送量と同程度である。注目すべきは、列車の運行間隔であり、ピーク時は90秒間隔の運行を実施し、東京圏鉄道以上の高頻度運行を実現している。これまでにモスクワ地下鉄の運行管理の詳細について、我が国で報告されている例は筆者の知る限り存在しないが、その内容は今後の我が国の都市鉄道整備と運行管理を検討するに当たり、有益な情報を含んでいる。

本節では、モスクワ地下鉄における列車運行の実態と管理手法について、公開されている文書^{1),2)}と、モスクワ地下鉄に対するヒアリング調査及び現地での観測をもとに紹介するとともに、列車遅延問題の解消に向けた我が国の東京圏鉄道の施設整備及び運行管理に対する示唆についても考察を行う。

3.5.1. モスクワ地下鉄の概要

(1) 路線網

モスクワ地下鉄は、全12路線（ライトメトロ1路線を含む）、180駅、総営業キロ298.2kmを持ち、2009年時点で一日平均655万人と世界有数の輸送人員を誇る地下鉄である。その建設は、旧ソ連時代の「国家5ヵ年計画」により進められた。1931年に地下鉄建設が決定し1932年に着工、1935年に1号線が開業した。現在の運営主体はモスクワ市地下鉄公社である。

地下鉄では数少ない環状路線と放射路線によって路線網が形成されている。環状路線はモスクワ市の中心を取り囲む直径約5km、全長19.3kmのコリツェヴァヤ線（5号線）が1954年に全線開業している。当初、環状線の計画はなかったが、2号線と3号線の開通に伴い市中心部の乗換え駅での混雑が顕在化したため環状線が建設された。モスクワ市とロシア各都市を結ぶロシア鉄道の多くの路線が、この環状線（5号線）の駅と連絡している。また、郊外にある放射路線の終端駅では、多くの旅客が端末交通としてバスを利用している。

停車場は1面2線の島式が多く、広いホーム幅が特徴である。放射路線の終端駅も1面2線の島式で引上げ折り返し型の配線となっているが、ホーム幅が広いため、折り返し線は本線内側に2線配線されている。処理容量が大きい折り返し施設と配線形態は、

モスクワ地下鉄の高頻度運行を可能としている要素の一つである。

また、ロシア鉄道局は2008年3月に、モスクワ地下鉄の混雑緩和を目的とした外環状路線を整備する計画を発表した。地下鉄の外側を走るロシア鉄道の貨物用環状線を改良及び全線電化し、地下鉄との乗換え駅を含む30駅を新設する。2011年の開通を目指している。

(2) 運行概況

モスクワ地下鉄と日本の東京圏地下鉄の概況を表-3-2に示す。一都市の地下鉄路線網として、東京メトロと都営地下鉄の合計値とモスクワ地下鉄とを比較すると、路線数や営業キロ数はほぼ同値である。輸送人員は東京圏地下鉄には及ばないが、一事業者としての年間輸送人員は2008年時から181万人減少したものの、世界一を誇っている。また、一人当たりのトリップ長が2008年時で13kmと長く、延人キロは東京圏地下鉄の約1.3倍である。また、世界でも有数の高頻度運行を実施しており、ピーク時の運行間隔は90秒(40本/h)、オフピークでも120秒~180秒(30本/h~20本/h)で運行している。このため、車両数も東京圏地下鉄の約1.2倍の4535車両を保有している。

主要な路線で8両編成の運行を実施しており、1車両長は20m、4ドアの車両が標準である。3号線は新型車両を一部導入しており、1車両長27m、6ドアの5両編成で運行している。ワンマン運転は8路線で実施されている。軌間は1520mmで、集電は第三軌条方式である。信号システムは、自動閉そく方式でATC(Automatic Train Control)を導入しており、CTC(Centralized Traffic Control)による制御方式を採用している。また、一部の路線ではATO(Automatic Train Operation)による運転が実施されている。

(3) 時間帯別輸送人員

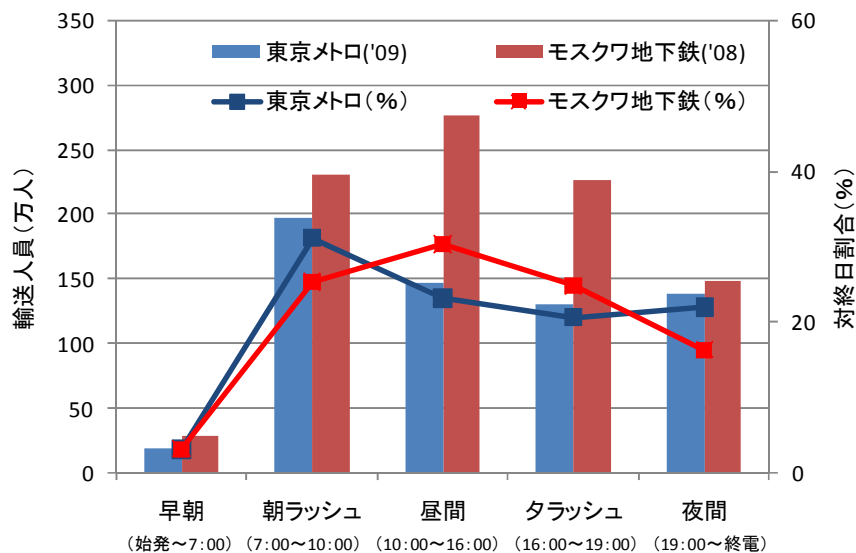
モスクワ地下鉄と東京メトロの時間帯別輸送人員を図-3-41に示す。一般的に、東京メトロをはじめ我が国の都市鉄道は、通勤・通学時の輸送需要が最も多く、日中は需要が減少する。それに対し、モスクワ地下鉄では、通勤ラッシュ時と帰宅ラッシュ時の輸送人員がほぼ等しく、それらは東京メトロのピーク時間帯である通勤ラッシュ時の輸送人員を上回る。さらに、モスクワ地下鉄では日中の時間当り輸送量がラッシュ時の半数程度であるため、輸送人員が最大となる時間帯が日中の10:00~18:00の8時間であり、同時間帯で東京メトロの約2倍に相当する280万人の輸送需要がある。このため、朝夕のラッシュ時間帯のみならず、日中の時間帯においても120秒~180秒間隔の高頻度運行が実施されている。

表-3-2 路線概要の比較

	単位	東京メトロ	都営地下鉄	東京メトロ+ 都営地下鉄	モスクワ地下鉄
開業年	年	1927	1960	—	1935
営業キロ	km	195.1	109.0	304.1	298.2
路線数	線	9	4	13	12
駅数	駅	179	106	285	180
保有車両数	両	2,717	1,086	3751	4,535
年間輸送人員	百万人	2,310('09)	850('09)	3160	2,392('09)
年間客車走行キロ	百万キロ	281.6	116.0	397.6	686.8
延人キロ	百万人キロ	18,519	5,972	24,491	31,099*
一日平均輸送人員	万人	632.8	233.0	865.8	655.3
運賃制度	—	対キロ区間制	対キロ区間制	—	均一性
最小運行間隔	分:秒	1:50	2:30	—	1:30

*2008年の1人平均乗車キロから推計

出典：モスクワ地下鉄¹⁾，東京メトロ³⁾



出典：モスクワ地下鉄¹⁾，東京メトロ³⁾

図-3-41 時間帯別輸送人員

(4) 路線別輸送人員

モスクワ地下鉄の2号線、6号線、7号線、9号線は一日の平均輸送量が100万人/日を超える路線であり、これらの路線ではピーク1時間(8:00~9:00)の輸送量が11万人を超える。最も輸送量が多い7号線は13.8万人/時である。路線別一日平均輸送人員と1km当たりの平均輸送密度を示す。モスクワ地下鉄は輸送人員が多いものの営業キロが長いので、1km当たりの平均輸送密度は4万人/日km以下となっている。

3.5.2. モスクワ地下鉄の運行状況

東京圏鉄道と同様に大量の輸送人員を抱えるモスクワ地下鉄の特徴の一つが、列車の運行間隔である。利用者に対する時刻表は存在しないものの、東京圏鉄道よりも短い90秒間隔の運行を実施している。そこで、モスクワ地下鉄の高頻度運行の現状を把握するため、2010年3月に列車運行間隔の現地計測を行った。なお、計測はスケジューラの都合上、帰宅ラッシュに行ったものであるが、モスクワ地下鉄では、通勤及び帰宅ラッシュ時の輸送人員がほぼ等しいことから、朝の通勤ラッシュ時間帯も本結果と同様な傾向を示すものと考えられる。

(1) ダイヤ上の運行間隔

i) 運行間隔の定義

列車の運行間隔は、先行列車が駅を出発してから後続列車が到着するまでの時分と、列車が駅に停車している時分とに分類することができる。本稿では前者を発着時分、後者を駅停車時間と定義する。さらに駅停車時間は、列車到着と同時に乗降扉が開いて旅客の乗降完了後に再び扉が閉まるまでの時分と、乗降扉が閉まった後に列車が動き出すまでの時分とに分類でき、前者を乗降時分、後者を確認時分と定義する。なおこの場合、ドアばさみ等により列車扉の再開閉に要した時分は、確認時分に計上される。

ii) 運行ダイヤの設定

モスクワ地下鉄はピーク時に90秒間隔で列車を運行している。運行間隔90秒のダイヤは、標準停車時間を20秒、標準発着時分を70秒に設定して計画されている。環状線駅等のターミナル駅では停車時間を25秒~30秒で設定する場合もある。日本と同様に、各駅に要する停車時間を経験的に判断し駅別に停車時間を決定している。

東京圏鉄道で運行間隔が小さい路線の一つに東急田園都市線がある。渋谷駅で東京メ

トロ半蔵門線に直通運転をしている。ピーク時の運行間隔は 125 秒であり、停車時間を 60 秒、発着時分を 65 秒で設定している。なお、停車時間 60 秒は、路線で最も乗降者数が多い渋谷駅での駅停車時間である。

iii) 運行間隔の実測値

2 号線のチェアトラリーリナヤ駅ホームにて帰宅ラッシュ時の列車運行間隔を計測した。当該駅は市の中心に位置しており、1 号線及び 3 号線と結節するターミナル駅である。列車 8 本分の運行間隔を計測した結果を示す。(2010 年 3 月 18 日(木) 18:40～18:52) 乗降時分と確認時分から成る駅停車時間は、全ての列車で 30 秒以内に抑えられており、計測 4 本目の列車も同様であるが、確認時分は他と比べて 7 秒程度大きい結果であった。これは旅客のドアばさみにより、扉の再開閉が発生したためである。当該列車は発着時分が増加していることから、列車の到着遅れによってホーム上に通常より多くの旅客が発生していたと考えられる。我が国と同様に、利用者混雑に起因する遅延の発生・拡大のメカニズムがモスクワ地下鉄でも確認される一例である。

一方で、発着時分は約 60 秒～約 105 秒と列車別に値が異なり、運行間隔の乱れは主に発着時分の増加によって生じていることが計測された。しかしながら、90 秒以下で運行された列車もあり、若干の遅れや間隔の乱れが発生しているものの、概ね 90 秒間隔の高頻度運行が実現されていた。

3.5.3. 高頻度運行の仕組み

モスクワ地下鉄は大量の輸送人員を有するにも関わらず、90 秒間隔の高頻度運行を実現している。そこで本節では、列車の運行間隔を構成する駅停車時間と発着時分の双方について、高頻度運行が実現される運行管理の実態と仕組みについて考察する。

(1) 駅停車時間

列車の運行間隔 90 秒において、東京圏鉄道との明確な違いは駅停車時間である。東京圏鉄道のターミナル駅では、ダイヤ上で 60 秒程度の停車時間が設定されているのに対し、モスクワ地下鉄は半数の 30 秒以下である。東京圏鉄道とほぼ同量の輸送量でありながら、どのようにして停車時間を短時間に抑えているのかが論点となる。

i) 駅停車時間の管理と実状

モスクワ地下鉄では、駅での乗降に関する特別な対策は実施していないのが現状である。旅客の乗降完了、ドア閉め、発車時の安全確認は、各駅のホーム先端に設置された大きな鏡で運転手が確認しており、ホームに配置している駅員が尻押し等の乗車補助を行うことはない。モスクワ地下鉄では、駅別に必要な停車時間を経験的に判断し、運行ダイヤに反映させているため、停車時間が増加することは殆どないとの見解である。しかし、現地観測からは、列車の出発時刻になると運転士が機械的にドアを閉めているという印象を受ける。ドア閉めの際にホーム上で列車の発車を知らせるベル等は鳴らず、車内にドアが閉まることを告げるアナウンスが流れるだけである。このため、利用者の駆け込み乗車を見る機会は少なく、ドアが閉まる前から次の列車の到着を待つ利用者も多く存在する。これには、高頻度運行の効用として列車を見送ることへの抵抗感の小ささや、国民性による時間価値の違い、社会背景、あるいは日本の車両と比べて扉の閉まる速度が速いため、ドアに挟まった際の衝撃が大きいこと等、様々な要因が影響していると考えられる。また短い停車時間を利用者自身も弁えており、混雑率が180%を超える車内では、乗客同士のコミュニケーションによってそれに対処している。次駅で降車する利用者が、ドア付近の利用者に声をかけて立ち位置を交換する様子は頻繁にみられる光景である。この様にモスクワ地下鉄の短い停車時間は、利用者の理解のもとに成立しているといえよう。しかし一方で、旅客の円滑な乗降は、モスクワ地下鉄の駅構造の特性が大きく影響していると考えられる。これについては次節で述べる。

ii) 駅構造

モスクワ地下鉄の駅は豪華な装飾が施されていることで有名であるが、その構造は旅客流動の視点から特筆すべき点がある。

①ホーム上の中央コンコース

1面2線の島式の駅構造は、乗降ホームの中央に広いコンコースを備えている。境界には天井を支える太柱があるため、空間的に分離がなされているものの、双方の往来は容易である。このため、列車到着の際に、降車客は乗降ホームを線路方向に移動することなく、ホームを横断し中央のコンコースへと流れるため、乗降ホームに滞留する乗車客との錯綜は殆ど生じることなく、円滑な乗降が可能となっている。

②通路・階段の一方通行

中央コンコースから他路線へ乗換える通路・階段は、双方の乗換え旅客の錯綜を防ぐため乗換え案内版の設置とともに上り下りで一方通行とし、動線の分離が図られている。

③エスカレータによる流入量の制御

モスクワ地下鉄は市中心部の駅が、地中深くに設置されていることでも有名である。最も深いパールク・ポベードイ駅は地下 84m に位置し、地下のホームまでは延長 126m のエスカレータで約 3 分の所要時間を要する。トンネルの深さは地下 30.5m～39.6m と言われており⁴⁾、その様な駅では地上の改札と地下のホームを往来する手段はエスカレータしかない。エスカレータの定格速度は我が国の鉄道駅で一般的な速度 30m/分に対し、60m/分（勾配 30°）となっている。モスクワ地下鉄では駅構内の混雑緩和を目的として高速エスカレータを導入した経緯があり、処理容量は単純計算で我が国の 2 倍である。しかし、階段と比べてエスカレータは人を捌ける量が少ないため、その手前がボトルネックとなり旅客の滞留が生ずる。朝夕のラッシュ時にはその混雑が、改札を超えて駅前に群衆を発生させている⁵⁾。一方で、地下のホーム上には大量の旅客が一度に押し寄せることなく、旅客の発生は絞られて定常流となる。このため、改札周辺やエスカレータ乗り口の混雑とは対照的に、ホーム上の移動及び列車の乗降がスムーズに行われている状況は特筆すべき点である。エスカレータの乗り込み効率の低さが、結果的に旅客の円滑な列車乗降を可能とし、駅停車時間の増加を抑制している。モスクワ地下鉄の高頻度運行を可能としている要因の一つと言える。

(2) 発着時分（駅間の列車走行）

次に、運行間隔のもう一つの構成要素である発着時分について考察する。モスク地下鉄によると、東京圏鉄道のような高頻度運行に伴う慢性的な遅延は生じていない。これは、上述したように、駅で遅延が発生しにくい状況になっていることが影響していると考えられる。一方で、遅延が発生した場合でも、駅間の列車走行によって遅れを回復出来る状況にあることも要因の一つである。そこで本節では、駅間の列車走行の特性と運行管理の工夫について考察する。

i) 発着時分とバッファの設定

東京圏鉄道の高頻度運行は、短い閉そく割による発着時分の短縮によって実現されており、駅部やその周辺部では 1 編成の列車が複数の閉そく区間に跨って在線する場合も少なくない。同様に、モスクワ地下鉄の閉そく割も短く区分されており、最小閉そく長は 75m である。さらに、モスクワ地下鉄の場合は乗り心地を犠牲にする代わりに、東京圏鉄道よりも高い加速・減速度で運転しているため、発着時分をより短縮することが可能である。

ここで、路線閉そく長 75m における駅間走行速度と最小発着時分との関係を図-3-42

に示す。実際の運行仕様に基づいて、モスクワ地下鉄は列車長 160m、加速度 3.6km/h/s・減速度 4.0km/h/s、東京圏鉄道は列車長 200m、加速度 3.3km/h/s・減速度 3.5km/h/s と設定し、各々に必要な防護長を考慮して試算した。図-3-42 に示すとおり、モスクワ地下鉄の最小発着時分は、56 秒～60 秒程度で東京圏鉄道のそれよりも約 5 秒小さく、より高頻度運行が可能な状況にある。しかしながら、先に述べたようにモスクワ地下鉄の運行ダイヤは発着時分を 70 秒と設定している。つまり、実際に可能な発着時分にバッファ(時間余裕量)を持たせたダイヤを設計していることが分かる。一方で、東京圏鉄道はこの試算条件の場合、65 秒の発着時分が採用される例が多い。実は、モスクワ地下鉄では、過去の検討から等間隔運行を保つために、発着時分に 10 秒～15 秒の余裕時間を設けてダイヤを設計している。このバッファを無くすと円滑な運行に支障をきたすため、ラッシュ時でも現状以上に運行本数を増やすことはなく、ダイヤ上のバッファを確保した。この様なバッファは他の交通分野でも考慮されており、航空管制ではファイアブレークとして、遅延に対する余裕量を考慮したスケジュールが組まれている⁶⁾。

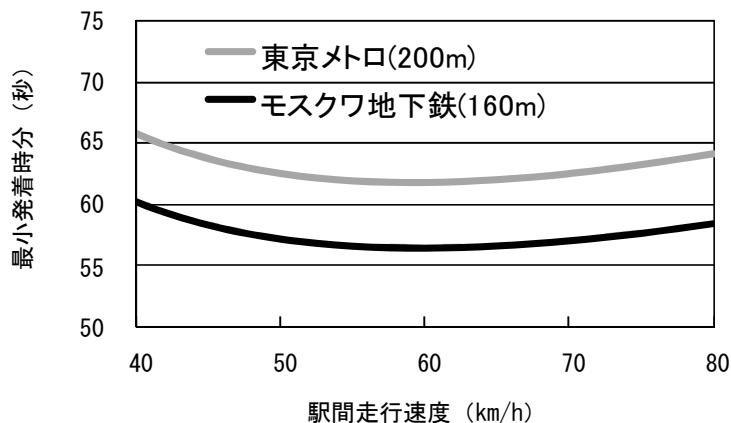


図-3-42 最小発着時分の推計

ii) 等間隔運行

モスクワ地下鉄では、時間帯別で等間隔運行を実施しており、利用者向けの時刻表は存在しない。遅延の発生を抑制する点からも等間隔運行を維持することは重要であり、このためにモスクワ地下鉄ではホーム上のデジタル時計を活用している。

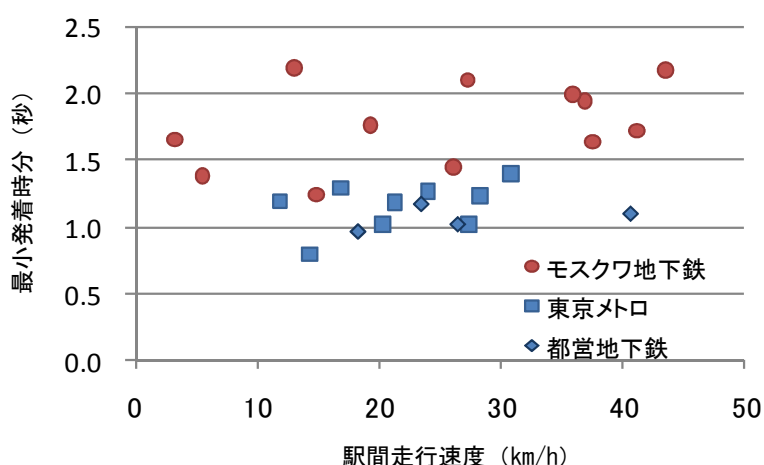
①列車運行表とデジタル時計

運転士は乗務時に列車別に作成された運行表を得る(写真-3-1)。各駅の出発時刻が 5 秒単位で記載されており、運転士はそれを順守するよう運転する。また運行表には列車

の運行間隔も記されており、平常時は出発時刻により駅を出発し、遅延が発生した場合は、時刻よりも出発間隔（列車間の時隔）を優先させる。この等間隔運行の実施において、ホーム先端に設置されたデジタル時計が効果的に機能している。モスクワ地下鉄では、全ての駅ホームの先端にデジタル時計が設置されている。写真-3-2の左側は現在時刻を秒単位で表示し、右側は先行列車が出発してからの経過時間を表示している。これをもって、運転士は先行列車との列車間隔を駅別に認識し、次駅間の列車運転操作を実行する。東京メトロ日比谷線の霞ヶ関駅にも同様なデジタル時計がある。列車が駅に到着してからの経過時間を駅員に知らせるために設置されており、停車時間増加による遅延の発生を抑制している。これにより結果として等間隔運行が実現されるが、モスクワ地下鉄のデジタル時計は先行列車との運行間隔を表示するため、列車間隔をより意識した管理手法と言える。

② 駅間距離

モスクワ地下鉄は東京メトロ路線と比較して駅間距離が長いことから（図-3-43）、駅間の運転操作方法に自由度があると考えられる。このため、駅で発生した遅延は、次駅に到着するまでの駅間走行区間で、運転士の運転技術をもって回復することが可能な状況にある。また、地下鉄路線は必ずしも道路下に建設されておらず、道路線形の制約を殆ど受けていない。このため、急曲線が少ない緩やかな線形になっていることも、回復運転を実施する際に有利に作用していると考えられる。



出典：モスクワ地下鉄¹⁾，東京メトロ³⁾

図-3-43 平均駅間距離

Перед Вами на станции "Войно" из электродепо

П №	ВРЕМЯ	
	ЧАС	МИН
68	48	15
М №	ИНТ - 35	
Вых. инт.	06	59
Ряз. пр-т	02	30
Кузьм	02	30
Текстил	02	25
Волг. пр-т	02	30
Пролет	02	00
Таган	02	25
К.-Город	02	00
Куз. Мост	01	40
Пушкин	02	40
Баррик	02	25
Ул. 1905 г	02	30
Беговая	30	35
Полеж	33	00
Окт. поле	36	15
Щукин	39	00
Тушин	43	10
Сходни	46	25
Планёр	04	48
ОТПР	П № 443 04 50 25	

写真-3-1 列車運行表



現在時刻

先行列車出発からの経過時間

写真-3-2 ホーム先端のデジタル時計

3.5.4. 東京圏の列車遅延対策への示唆

以上でモスクワ地下鉄における高頻度運行の実態とその仕組みについて紹介してきたが、本節では高頻度運行に伴う遅延対策に向けた我が国の東京圏鉄道への示唆について考察を述べる。

(1) 旅客流動

モスクワ地下鉄では、利用者意識の違いだけでなく、駅構造の特性も作用して、遅延の発生要因である駅停車時間の増加が発生しにくい状況が形成されている。モスクワ地下鉄のように駅施設を大きくすることは、現在の我が国において困難である。しかし、改札通過から列車乗降までの一連の旅客流動に関するモスクワ地下鉄の事例は、通路や階段の拡張といった我が国の駅施設整備においても有用な視点を含むものである。特に多くの制約により十分な施設容量を整備できない我が国の東京圏鉄道においては、個別の施設整備と列車の運行管理との整合性を考慮した評価が必要である⁷⁾。これまでボトルネックとなっていた通路や階段等の駅設備を改良した結果、ホーム上での旅客の滞留や錯綜が増加し、列車乗降時間の増加に伴う運行遅延が顕在化する可能性も考えられる。現在の東京圏鉄道は旅客の混雑に起因した遅延の発生により、路線の時間当たり輸送力が低下し、旅客の混雑と列車遅延がさらに増幅するといった悪循環が生じている。ホーム上の円滑な旅客流動は、この混雑と遅延の負の連鎖を絶ち切る一助となることから、駅構内の旅客流動と列車の運行を一体的に評価した駅施設整備・改良の検討が重要と考えられる。その際に、ホーム上に滞留する降車客を円滑に処理するために、流出する側のエスカレータにモスクワ地下鉄でみられる様な高速エスカレータを採用し、一方でホームへの流入側のエスカレータは現状速度のままとする等の工夫も考えられる。これには制度改正等を伴うが、地下鉄の場合、流出側のエスカレータは上昇方向であることが多く、高速エスカレータを導入し易い環境にあると思われる。

(2) 列車走行

運転士は先行列車との位置関係を把握することができれば、走行速度を上げて遅延の回復運転を図る、あるいは、駅間での一時停止を回避して発着時分を増加させない運転等、条件にあった運転方法を実施し、遅延の影響を抑制することが可能である。我が国においては、多くのケースで運転士は先行列車の位置を目視等により確認出来ないため、信号現示に従って最高速度を保持するよう運転している。しかし、遅延発生時にはこの

ような運転方法が遅延を拡大させてしまう一つの要因となってしまうため、駅での出発や駅間走行時において、あえて列車間隔を上げることも遅延の早期回復を図るうえで有効となる⁸⁾。列車間隔を適正に保つためには、運転士への列車間隔の情報提供は効果的であり、モスクワ地下鉄のデジタル表示はその一例である。先行列車の駅間走行状態までは把握できないが、運転士及び駅員にとって駅別に列車間隔を認識することは、路線全体で等間隔運行を図る際に有益な情報となり得る。運転士や駅員に対する列車間隔の情報提供方法、さらには前後の列車の運行状況や路線全体の運行状況に合わせた運転手法の検討を行うことは、遅延の拡大抑制や早期回復に向けた効果的な対策の一つである。

また、些細な遅れで遅延時間が拡大している我が国の東京圏鉄道において、モスクワ地下鉄の運行ダイヤに設定された発着時分のバッファ（余裕時間）は注目に値する。モスクワ地下鉄では、バッファの設定により列車の等間隔運行が維持されるため、駅停車時間の増加による遅延が生じにくくなり、さらに安定した運行が堅持されている。東京圏鉄道の場合、現状より停車時間を短くすることは困難であるため、バッファの設定はダイヤ上の運行本数の減少を伴い、サービス低下となる。しかし、遅延の発生により実質的な輸送力が減少している現状において、ダイヤ上の運行本数の意義を如何に考えるべきであろうか。ダイヤ上の運行本数は減少しても、遅延の発生が抑制され、結果的に現状より輸送力が増加するケースも考えられる。また、列車種別や行き先の違いがあるため、一概には言えないが、高頻度運行や等間隔運行下における時刻表の必要性についても議論の余地がある。駅で時刻表に対する列車の早発が認められないために、ダイヤ上の駅停車時間の設定や列車の運行管理において自由度が低下している可能性も考えられる。運行の信頼性及び輸送力向上の観点から、バッファの効果と課題及び時刻表の意義について、モスクワ地下鉄や他の交通機関における適用事例を参考とし、柔軟な思想で議論する必要があると考えられる。

3.6. 本章のまとめ

本章は、輸送障害に至らない短時間の遅延について、そのメカニズム解明の第一歩として、実態を明らかにするための現状分析を行った。まず、鉄道事業者が発行する遅延証明書を用いて、東京圏鉄道における定常的な列車遅延の発生、相互直通運転の影響及び高頻度運行と列車遅延の関係性を示した。また、発生要因の一つであるドアばさみの発生を計測する簡易な計測方法を提案し、その計測値を用いて、乗降時分の増加や、駆け込み乗車及びドアばさみ、またドア閉めから発車までの安全確認時分の増加等、駅別に遅延発生の要因が異なることを明らかにした。そして、列車遅延の対策の一つとして、ターミナル駅及び、その手前の駅における確認時分のバラツキと時間増加をどのように抑えられるかの検討は有効との示唆を得た。次に、列車運行実績値からある駅で発生した列車遅延が後続列車や先行列車に時間的かつ空間的に波及する様子を確認した。また列車遅延の発生と波及の要因が、利用者混雑（乗降時間拡大による遅れ）と列車混雑（過密ダイヤによる遅れ）とに分類され、その占める割合が時間帯で異なること、さらには各々の特性を定量的に示した。それらを踏まえて、列車遅延の拡大抑制や早期回復において、停車時間短縮の対策のみならず、駅間の列車走行に関する対策も有効であることを確認した。

このような現状分析から、列車遅延の発生・波及のメカニズムの解明に向けて、乗降時分の増加やドアばさみの発生及び安全確認時分の増加に伴う駅停車時間の増加により遅延が発生すること、その影響が後続列車へ波及し、後続列車の駅間走行時間の増加に伴う新たな遅延が発生すること等の列車遅延の発生・波及の連鎖の現象を定量的に把握した。これは今後の進展として、列車遅延メカニズムのモデル化等に取り組むうえで必要となる基礎資料を得るものである。本章ではある1日のデータからその日の運行状況を概観したに過ぎない側面もあるが、これまで実態がよく分からない状況にあった短時間の列車遅延について一定の傾向を定量的に示したことは、今後の列車遅延の発生・波及メカニズムの解明において有益な知見を得るものである。また、列車遅延の回復について、過剰に密になっている列車間隔の拡大が必要条件となり、列車間隔を広げるための運行管理手法の検討の有効性を示唆した。そして、列車間隔が広がることにより生まれる時間的、空間的な余裕時分が、所要時分及び運行ダイヤを回復する可能性を示した。これらを踏まえて、実効性の高い列車遅延対策を検討するため、次章からは、高頻度運行下において走行時間を回復する列車運行手法の導入について検討を行う。

参考文献

- 1) モスクワ市地下鉄公社 (Московский Метрополитен) , 『annual report 2008, 2009』 .
- 2) モスクワ市地下鉄公社 (Московский Метрополитен) , <http://mosmetro.ru/>, 2011/1/28.
- 3) 東京地下鉄株式会社, 『東京メトロハンドブック 2010』 .
- 4) 社団法人日本地下鉄協会編集, 『世界の地下鉄』, ぎょうせい, 2010.
- 5) 鳩山紀一郎:モスクワ市の交通事情, 運輸政策研究, No.42, pp. 31-35, 2008.
- 6) 坂下文規, 森地茂, 日比野直彦:羽田空港における航空遅延および出発時地上走行時間に関する研究, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol.40, 2009.
- 7) 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.
- 8) 仮屋崎圭司:都市鉄道の列車遅延の拡大メカニズムに関する研究, 運輸政策研究, Vol.13, No.1, pp.57 -64, 2010.
- 9) Hibino, N., Yamashita, Y., Kariyazaki, K and Morichi, S. : A Study on Characteristics of Train Station Passengerflows for Train Delay Reduction, *Proceedings of the 12th World Conference on Transport Research*, 2010.
- 10) 仮屋崎 圭司, 日比野 直彦:モスクワ地下鉄の高頻度運行管理—我が国首都圏鉄道における列車遅延対策への示唆—, 運輸政策研究, Vol.14, No.2, pp.34-41, 2011.7.
- 11) 仮屋崎圭司, 日比野直彦, 森地茂:都市鉄道の列車遅延の拡大メカニズムに関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.27, pp.871-879, 2010.
- 12) 国土交通省鉄道局, 首都圏鉄道輸送障害対策会議資料, 2009 .
- 13) 国土交通省鉄道局, 鉄道運転事故等届出書
- 14) 国土交通省鉄道局, 鉄道輸送トラブルによる影響に関する調査, 2009
- 15) 鳥海重喜, 中村幸史, 田口東:通勤電車の遅延計算モデル, オペレーションズ・リサーチ:経営の科学, 50(6), pp.409 -416, 2005
- 16) 國松武俊, 平井力, 富井規雄:列車運行・旅客行動シミュレーションシステムの開発, 鉄道総研報告, Vol.21, No.4, pp.5 -10, 2007
- 17) 宮崎信介, 藤代隆正, 岩倉成志:都市鉄道の線路内混雑に着目した列車速度の推定—エージェントモデルによるアプローチ—, J-RAIL2007 第14回鉄道儀技術連合シンポジウム講演論文集, pp.365 -368, 2007
- 18) 大戸広道, 青木俊幸, 河合邦治, 都築知人:鉄道駅における旅客流動に関する研究その8 乗降速度に関する実験, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.845 -846, 1999.

- 19) 上松苑, 岩倉成志: エージェントモデルによる東京圏都市鉄道の遅延連鎖シミュレーションの構築, 土木計画学研究・講演集, Vol.40, 5page, 2009
- 20) 東京地下鉄株式会社, 東京メトロハンドブック 2008
- 21) 財団法人鉄道総合技術研究所鉄道技術推進センター, わかりやすい鉄道技術 [鉄道概論・車両編・運転編], 2005.
- 22) 曾根悟: 高密度運転の実現に向けて, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER91-46, pp. 121-130, 1991.
- 23) 岩倉成志, 上松苑, 高橋郁人, 辻井隆伸: 高頻度運行下での都市鉄道を対象とした遅延連鎖シミュレーションシステムの開発, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.67, No.5, I_879-I_886, 2011.
- 24) Chiusolo, S., Dicembre, A., Ricci, S., Sorace, F.: Automation of high density metro lines: Rome line a case study, *Proceedings of the 13th International Conference on Automated People Movers and Transit Systems*, pp. 491-501, 2012.

第4章

列車運行シミュレーションモデルの構築

第4章 列車運行シミュレーションモデルの構築

4.1. 概説

列車の運行遅延は、ターミナル駅等で利用者の乗降時間の増加に伴い発生することが多い。しかし、列車別に遅延時間の増加要因をみると、利用者混雑に起因する駅停車時間の増加と、線路上の列車混雑に起因する駅間走行時間の増加の2つに分類される¹⁾。この主因の一つに、現在の都市鉄道の特徴である非常に短い線路閉そく長がある。これにより高密度運行による大量輸送を可能としているが、一方で、列車の線路上の混雑が発生し、これに起因して列車の駅間走行時間が増加している。線路上に密な状態で運行している列車は、先行列車の速度変化に応じて、加減速を繰り返すこととなり、それは自動車交通における渋滞現象と類似する。つまり、線路上において列車の渋滞が発生している。このため、列車遅延の発生及び波及・拡大のメカニズムを解明し、その対策検討を行うには、駅での列車乗降に関わる旅客流動のみならず、列車1本1本の挙動とそれらが互いに与える影響を時系列的に捉えることが不可欠といえる。鉄道の運行遅延に関しては、遅延をネットワーク構造の変化として扱い利用者均衡配分を行った研究²⁾や、列車の運行と利用者行動による駅停車時間の推定を一体的に再現するシミュレーションモデルの構築³⁾がなされている。また、駅での利用者行動と駅間の列車運行挙動についてマルチエージェントモデルを用いて推定し、遅延の発生及び波及の現象を再現するシミュレーションモデルの開発⁴⁾等の研究が行われている。それに伴い、遅延の発生抑制や早期回復方策の検討が成されているが、その多くが駅における列車停車時間の増加に対する抑制方法に主眼をおいており、駅間の列車運行方法に着目した対策の検討を行っている研究は少ない。そこで本章では、列車の相互作用により線路上の列車運行挙動を再現するシミュレーションモデルを構築する。

4.2. 遅延連鎖シミュレーションの構造

前章までの遅延の発生、波及の定量的分析を発展させ、現象の再現を試みるためには、シミュレーションモデルの構築が必要である。モデルは、(1) 駅構内における旅客の発生・流動のシミュレーションモデル、(2) 車内混雑と乗降人数に着目した列車乗降速度推定モデル、(3) 駅停車時間の変化に着目した列車走行速度推定モデルの3段階から構成される。列車遅延を分析するために必要なシミュレーションシステムの枠組を図-4-1に

示す。各モデルはデータを受け渡しにより連携して動作するものである。このうち、本研究では(3) 駅停車時間の変化に着目した列車走行速度推定モデルを構築する。

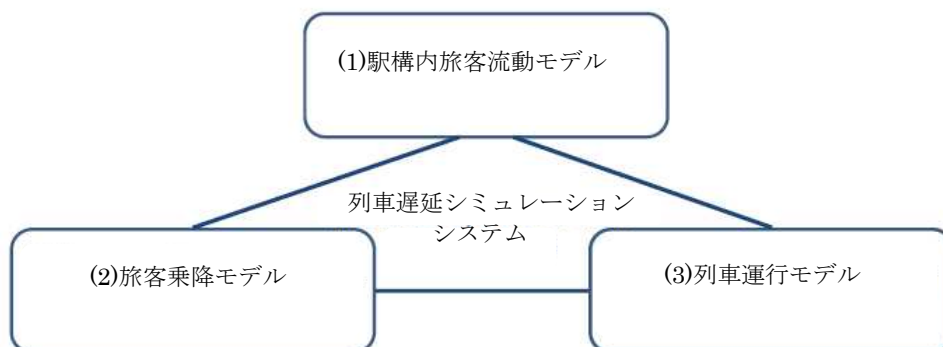


図-4-1 列車遅延シミュレーションシステムの構造

東京圏の都市鉄道ネットワークにおいて、列車遅延が連鎖して拡大するメカニズムは、以下のとおり説明される。ホーム上で列車を待つ旅客は、降車駅での階段やエスカレーター付近に位置する車両扉を選択する傾向があることから、特定の車両扉に旅客が集中し、列車の乗降時間が長くなる。これにより、線路上の後方を走行している列車は駅手前で速度を低下させる。ここで発生した列車の速度低下は以降の後続列車に伝搬する。一方、乗降時間が増加した列車は、次駅の到着が遅れるため、次駅のホーム上には通常以上に滞留する旅客が増加し、次駅ではさらに乗降時間が長くなる。そして、その遅れ時間がさらに後続列車に伝搬する。このとき、後続列車では先行列車との列車間隔が狭まるため、後続列車の乗降時間は短くなり、いわゆる団子運転の状態となる。

列車遅延対策を検討するためには、このような列車遅延が連鎖する現象を再現可能なシミュレーションモデルを構築することが必要である。3つのサブシステムのうち、1つ目の駅構内旅客モデルは、駅での旅客流動を分析するモデルであり、個々の車両扉の降車旅客数を推定する。2つ目の旅客乗降モデルは、旅客の乗車及び降車行動を分析するモデルであり、列車の駅停車時間を推定する。3つ目の列車運行モデルは、列車の走行速度を分析するモデルであり、駅間の走行時間を推定する。

(1) 駅構内旅客流動モデル

$$Volume_{i,a,r,s} = f\left(\sum_{j=1}^m OD_{i,j}, \sum_{j=1}^m OD_{j,i}, Design_i, Dwell Time_{i,a-1}, Arriving Time_{i,a}\right)$$

$$Congestion_{i,a,r} = f\left(\sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^l Volume_{i,a,r,s}, Train Capacity_{a,r}, OD\right)$$

Volume i, a, r, s : 車両ドア別の旅客乗降者数

OD i, j : 駅 i の単位時間当り乗車客数 (4段階推計法の出力結果)

OD j, i : 駅 i の単位時間当り降車客数 (4段階推計法の出力結果)

m : i 駅を除く東京圏の全駅

Design i : 駅 i の改札位置等の駅構造

Congestion i, a, r : 駅 i に到着する列車 a の車両 r における混雑率

Train Capacity a, r : 列車 a の車両 r における輸送力

n : 駅 i に到着していない列車数

l : 車両のドア数

(2) 旅客乗降モデル

$$Dwell Time_{i,a} = f(\text{Max}(Volume_{i,a,r,s}), Congestion_{i,a,r})$$

Dwell Time i, a : 駅 i における列車 a の停車時間

(3) 列車運行モデル

$$Running Time_{i,a} = f(\text{Train Performance}_a, Signalling Design_p, Train Schedule_p, Dwell Time_{i,a-1})$$

$$Arriving Time_{i,a} = f\left(\sum_{i=1}^n Dwell Time_{i,a}, \sum_{i=1}^n Running Time_{i,a}\right)$$

Running Time i, a : 駅 $i-1$ から駅 i 間の列車 a の走行時間

Arriving Time i, a : 駅 i における列車 a の到着時間

Train Performance a : 列車 a の車両性能

Signalling Design p : 路線 p の信号システムと閉そく

Train Schedule p : 路線 p の運行ダイヤ

4.3. 列車運行シミュレーションモデルの構築

4.3.1. モデルの要件

前章で記載したとおり，本研究における遅延対策は，高頻度運行下において走行時間を回復する列車運行手法の導入である．そのため，遅延対策の検討にあたり，高頻度運行下における遅延の発生，波及，拡大，及び回復の現象を連続的な事象として再現することを可能とし，遅延対策の実施により生じる列車運行の変化が，一連の遅延現象に及ぼす影響について推計を可能とする分析システムの開発が不可欠である．前章で示した遅延の構成要素について，利用者要因による停車時間の増加と，列車混雑による走行時間増加とを別々に示したものが図-4-2である．双方が連動して，路線全体の遅延現象が構成されているものの，増加時間が最大となる時間帯の違い等からも明らかなように，それぞれの現象を説明する要因は異なることが読み取れる．したがって，本研究では，利用者行動による駅停車時間を推定する旅客乗降モデルと，列車の駅間運行挙動を推定する列車運行モデルとを，個々に構築し，これらを一体的に動作することにより，遅延現象を再現するシステムを開発することとする．

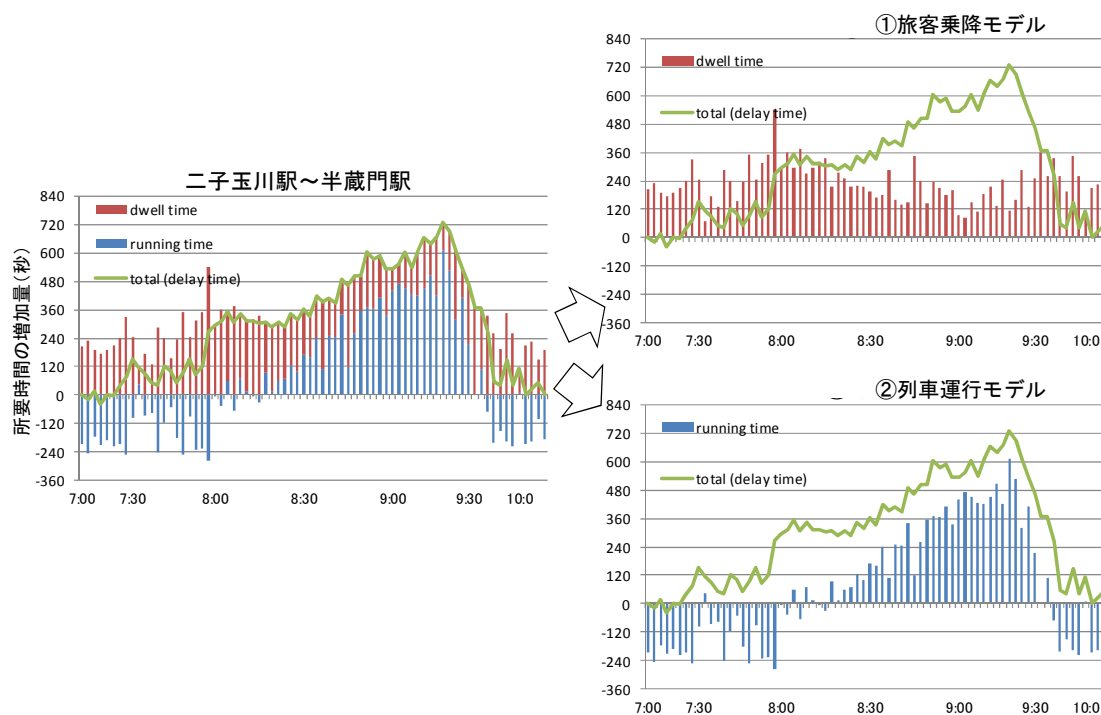


図-4-2 遅延の構成要素の分類

高頻度運行下においては、線路上の列車の混雑、高密度化により、線路上で列車別に速度変化が生じ、遅延が路線全体に波及及び拡大する。線路上の列車速度は、先行列車と当該列車との列車間隔及び線路の閉そく区分に依存するため、線路上に存在する全ての列車の運行挙動を連続して動的に再現する必要がある。

遅延現象の再現に関するアプローチとしては、解析的なモデルによる手法がある。一般的に遅延現象を捉えて分析する有効な手法と言えるが、列車運行の基礎的要素である線路閉そく区分を路線全体にわたって、モデルに考慮することは困難であるため、具体性及び実効性を有した遅延対策を検討し、提案を行うには解析的モデルとは異なるアプローチが必要である。また、線路上の列車運行の変化は、駅部において列車の到着間隔の変化として現れる。駅では旅客が発生するため、列車の到着が遅れて先行列車が出発してからの時間経過が長くなると、通常よりも多くの旅客が駅に発生するため、列車到着時に旅客の乗降に要する時間が長くなり、停車時間の増加を誘引する。駅での停車時間の増加は、遅延の発生要因となり、当該列車に駅出発遅れが生じるとともに、その影響は後続列車の列車運行に影響を与えることとなる。この様に、線路上の列車運行と駅での旅客乗降は、相互に作用する関係にあり、旅客の発生率や乗降者数は、駅別に特性を有している。したがって、遅延対策の検討においては、線路上の列車の運行挙動と、駅別の特性を考慮した停車時間とを、動的に連動して分析を行うことが必要となる。個別に変化する複数の要素を連動して一つの事象として表現する手法としては、シミュレーションモデルによるアプローチが有効である。

シミュレーションモデルは、実世界での試行や観測が困難な事象をコンピュータ上のバーチャルな環境で再現する技術であり、複雑な対象の挙動を予想するため手法として広く適用されている。交通分野においては、自動車交通の分野において、交通流や渋滞の再現手法として、多くの研究及び実務の実績がある手法である。交通流シミュレータは、主として2つに大別される。1つは大規模道路ネットワークを対象としたマクロ交通流シミュレータである。マクロ交通流シミュレータは交通流を連続した流体として扱うため、車線変更や避走現象のような、車両一台一台の挙動に関する現象の再現には適していない。もう1つは、比較的狭いエリアを対象としたマイクロ交通流シミュレータである。マイクロ交通流シミュレータは、車両一台一台の挙動に関する現象を再現するものである。代表的なシミュレーションモデルの一つが、マルチエージェントシミュレーションである。マルチエージェントシミュレーションは、エージェントと呼ばれる知的なソフトウェアの集合であるマルチエージェントシステムに基づくシミュレーションである。人間や組織等意思決定や行動をする主体それぞれを1つのエージェントとして扱い、それらの間における相互作用を計算するシミュレーションの手法である。一次

元のマルチエージェントは、セルオートマトンと同様な理論として定義されている。セルオートマトン (CA: Cellular Automaton) は、格子状のセルと単純な規則に基づく離散的計算モデルである。簡単な規則に従ったモデルであるが、数学、物理学、数理生物学等の分野の研究においても広く使用されている。セルオートマトンモデルは、格子状にセルで構成されており、各セルの値は有限個である。決定論的な規則に従ってセルの内部の状態を時間の進展とともに変化させていく。ここでの時間の進展は離散的であるため、ある時間における 1 つの内部状態はそのセルの近傍のセルの内部状態によって決定される。決定論的な規則は全てのセルに等しく適用され、時間の進展によって新規に更新されると考える。セルオートマトンは時間的な規則の決定により、様々なモデルを構成することを可能とする。セルオートマトンモデルの中でも、直線上にセルを配置した 1 次元セルオートマトンは、交通流の分野において多くの研究が成されている。道路交通の場合、道路を 1 つ 1 つのセルに分割し、それぞれのセルごとに車両の有無を決定する。セルオートマトンモデルにおける道路交通シミュレーションでは、車両の走行速度を自車両と前方車両との距離の関数としてモデルに組み込み、車両の追従挙動を再現することも可能である。

そこで、本研究では、列車遅延現象の再現及び遅延対策の検討に用いる分析システムとして、シミュレーションモデルによる分析システムを採用し、セルオートマトン法の理論に基づくシミュレーションシステムを開発し、列車遅延現象の分析及び遅延対策の検討を行うこととする。

4.3.2 セルオートマトンによる列車運行モデル

(1) 列車の運行方式

線路上に密な状態で運行している列車は、先行列車の速度変化に応じて加減速を繰り返すため、駅間走行時間の分析には、列車1本1本の挙動とそれらが互いに与える影響を時系列的に捉えることが不可欠といえる。

列車の運行は、線路を一定区間に区切って1区間を1編成の列車のみの運行に占有させ、完全に通過し終わるまでは続行列車をその区間に進入させない運行方式をとっている。これを閉そく方式という。つまり、線路を閉そく区間に分割し、空間を離散化しているといえる。また、閉そく区間を通過する走行速度も信号システムにより離散値として与えられる。このため、列車別の運行状態を再現する手法として、離散型シミュレーションモデルであるセルオートマトン法が適用可能であり、現実の列車閉そく区間と同様にセルを分割することによって、列車運行状態が再現可能であるといえる。

また、列車の運行間隔は上述の閉そく方式に基づき、閉そく区間長と列車走行速度から決まる発着時分と、駅別に設定される停車時間の合計値によって決定される。これを列車運行計画に反映させた列車運行ダイヤは5秒単位で作成されることから、上記のシミュレーションモデルにおいても、同様な精度で運行状態の再現が可能と考える。そこで、本研究の列車運行モデルは、セルオートマトン法を適用し、これを用いて高頻度運行を実施する路線の運行状況を再現することとした。

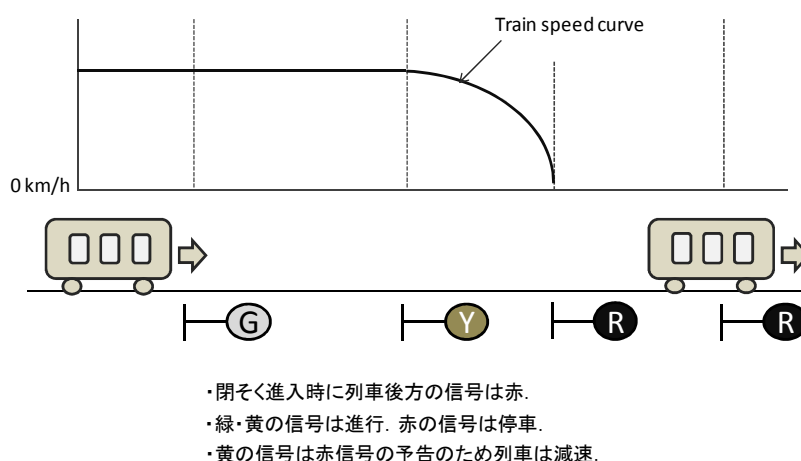


図-4-3 基本的な列車信号システム

セルオートマトン法を用いた交通流の解析では、Nagel-Schreckenberg⁵⁾の1次元モデルが有名である。このモデルは道路をセルに分割し、自動車交通流を以下の4つの基本ルールによって再現している。各車には速度 V を持たせ、 V は 0 以上 V_{\max} 以下の離散値をとるものとする。

- 1) 加速: 車の速度が V_{\max} よりも小さく ($V < V_{\max}$) , かつ, 前方の車との距離が $(V+1)$ より大きければ, 速度を1だけ上げる ($V \rightarrow V+1$).
- 2) 減速: 車がセル i にいて, 前方の車がセル $i+j$ にいるとき, $j \leq V$ なら, セル i にいる車は衝突を避けるため減速し, 速度を $j-1$ まで下げる ($V \rightarrow j-1$).
- 3) ランダム化: 車が停止していないとき ($V > 0$), 確率 p で速度を1下げる ($V \rightarrow V-1$).
- 4) 車の移動: 以上で決めた V の数だけ車は前方のセルに進む.

以上のルールを各車について適用すると、前のセルが空いていれば前に進み、追い越しは許されず、前に車があれば減速し停止することになる。車の台数が増えると前方の車の後ろに付いて停止する状態も予想される。つまり、簡易なルールながら渋滞発生現象を再現できるモデルといえる。高頻度運行下にある列車運行では、単路の自動車交通と同様に先行列車の速度変化に応じて当該列車の走行速度が決定することから、本研究では上記の Nagel-Schreckenberg モデルを適用し、列車の相互作用に基づく列車の運行挙動を再現する。線路のセル分割は列車運行の閉そく方式に基づき、閉そく区間の長さの一つのセルの長さを等しくする。なお、ステップ 3) は列車運行が信号システムに基づいているため、本研究のモデルでは適用しないものとする。

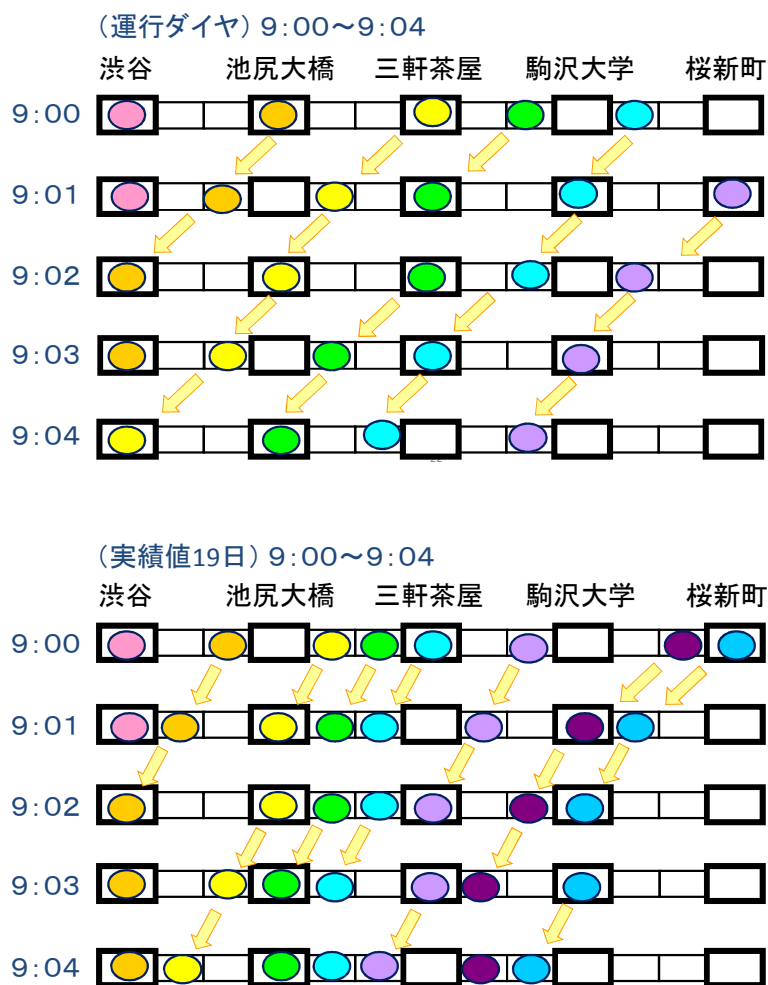


図-4-4 セルオートマトンによる列車運行のイメージ

(2) 使用データ

運行ダイヤ，信号コード表，運転曲線図，列車性能を入力データとし，列車 1 本 1 本の駅間の運行挙動を再現するシミュレーションモデルを構築する．上述のセルオートマトン法に基づき，列車間の相互作用と列車信号方式により時系列で変化する走行速度を，列車別に決定する．なお，駅における列車の停車時間は，列車の発着時分，車内混雑率，ホーム上の旅客滞留等により値が変動するため，本来は列車の駅間運行挙動と利用者行動による駅停車時間の推定とを一体的に再現するシミュレーションモデルが必要である．しかし，本研究はより列車運行に着目した分析を行うため，列車運行実績値から得られる列車別の駅停車時間の実績値を適用した．対象路線は，東急田園都市線及び東京メトロ半蔵門線の二子玉川駅～半蔵門駅間（10 駅間）とし，平成 21 年 1 月 19 日（月）の準急運転時間帯 7：50～9：00 頃（列車 33 本）のデータを用いた．データ

の特性については、前章で述べたとおりである。信号コード表と閉そくデータをモデルに反映し、図-4-5 のイメージができる。列車の進行に伴い、先行列車による後続列車への速度制限を信号コード表に基づき動的に変化させることにより、列車運行を再現することとする。

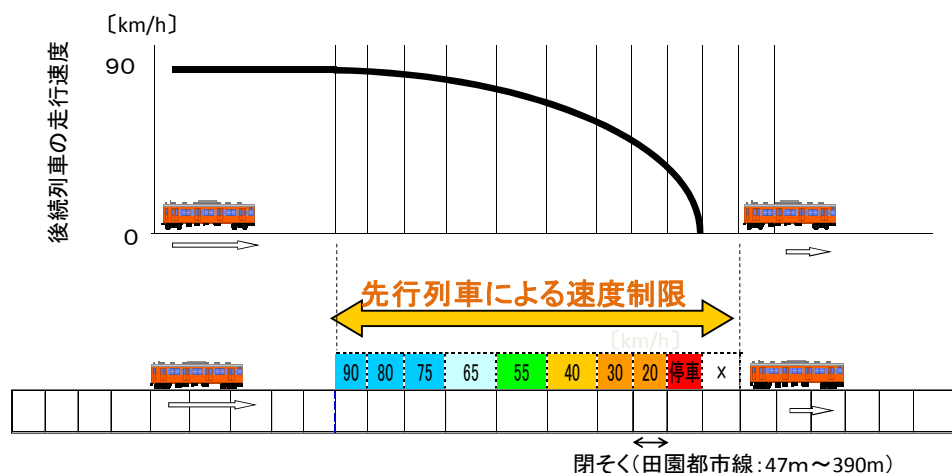


図-4-5 後続列車の速度制限

(3) モデルのアウトプット

i) 列車別の運行挙動

列車の運行手法に着目し、高頻度運行下において走行時間を回復するための列車運行手法を検討するため、本研究では駅間の列車の運行挙動について詳細な分析を行うこととする。そのため、列車運行シミュレーションモデルは、駅間別、列車別に、駅間の運転時分及び運転速度を出力することを可能としている。アウトプットの一例を図-4-6に示す。図はシミュレーションモデルにより再現された列車1本の運行挙動である。三軒茶屋駅から池尻大橋駅へ走行する9:00頃の上り列車について、運転時分と運転速度を表している。駅間の閉そく区分別に、その閉そく区間内での平均走行速度と通過時間を、閉そく区間末部にプロットし、折れ線グラフで結んでいる。池尻大橋駅での先行列車に出発遅れが生じているため、三軒茶屋駅を発車した後、200m付近から減速運転を行い、池尻大橋駅の手前の1100m付近で駅間停止が生じていることを読み取ることができる。遅延の発生、波及、拡大及び回復について、各段階での列車の運行挙動を駅間別に、かつ列車別に分析を行うことを可能としており、これにより遅延現象のメカニズム解明を行うこととする。

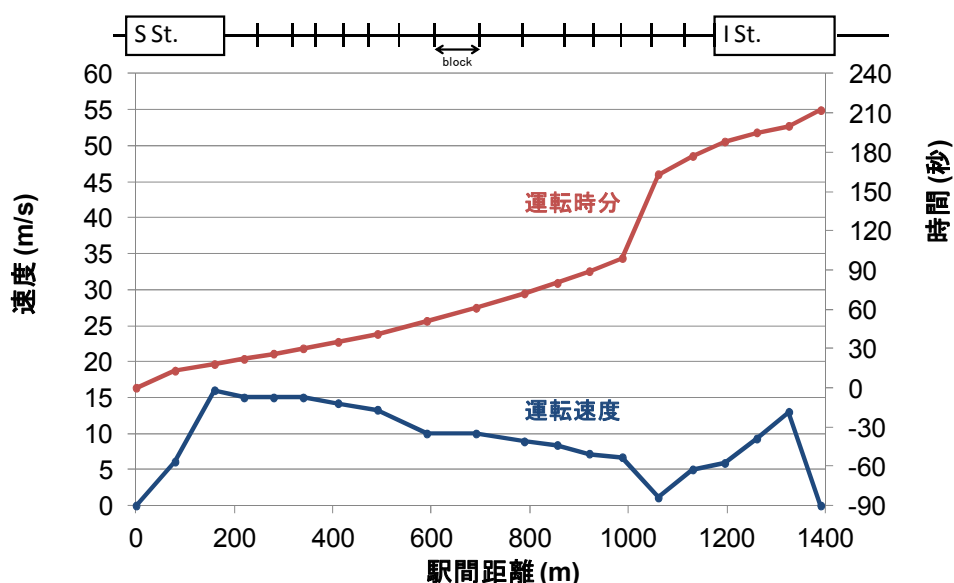


図-4-6 システムのアウトプット（運転時分と運転速度）

図-4-7は時間帯別に列車の運行挙動が異なる様子を再現している。列車遅延が顕在化した8:30頃の列車の走行時間の増加は、池尻大橋駅の手前における減速、駅間停止によるものであることが読み取れる。三軒茶屋駅発後から、駅間停止の手前までで、速度低下していることが分かる。一方で、駅間停止後からの駅到着までの運行挙動はほぼ同様となっており、グラフの傾きや変化点が概ね一致している。駅間の走行時間は、遅延発生以前の約120秒から210秒と増加している状況を読み取ることができる。

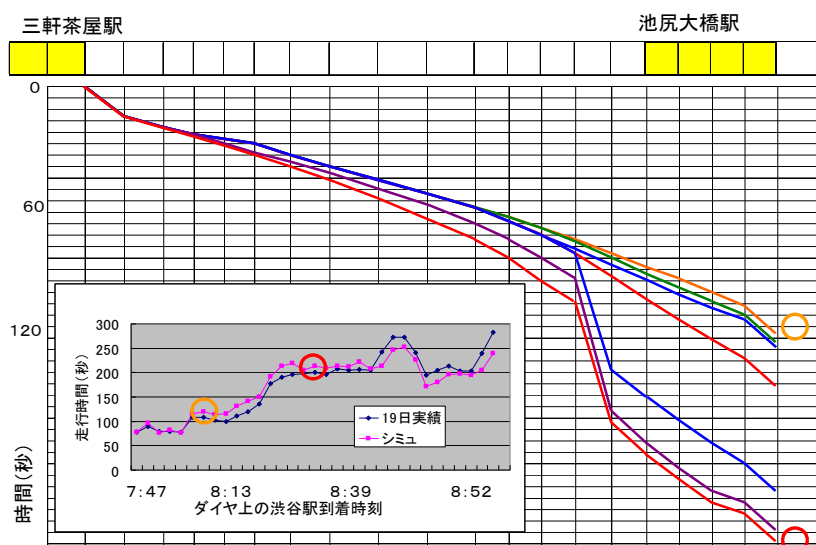


図-4-7 列車別の駅間運行挙動

ii) 列車運行挙動の可視化

シミュレーション時の列車1本1本の運行挙動,及び路線全体の列車運行状態を分析するため,シミュレーションの実行状況を画面に表示することを可能とした.画面表示されるシミュレーションの実行状況を図-4-8に示す.実際には線路は直線で画面表示されるため,全区間を表示すると縮尺が小さくなり見えにくくなる.そのため,図-4-8は表示画面を駅間別に切り出し,折り返して表示している.駅部及び駅間のセルは,信号コード表の閉そく区間長に縮尺を合わせおり,駅部は黄着色している.セル上の赤数字は,運行する列車を表現しており,シミュレーションされる列車の順番に番号を付している.列車の走行に伴い,赤数字が左側から右側へ連続してセルを移動していく様子が動的に表示される.列車が在線するセルに赤数字が表示されるため,列車長200mに対して,閉そく区間長が短い区間では,複数のセルに赤数字が並んで表示される.これにより,どこの駅間でどの様に列車の運行が滞り,遅延が発生,波及していくのかが目視により確認することを可能としている.またこれにより,シミュレーション実行時のエラーも確認することが可能である.

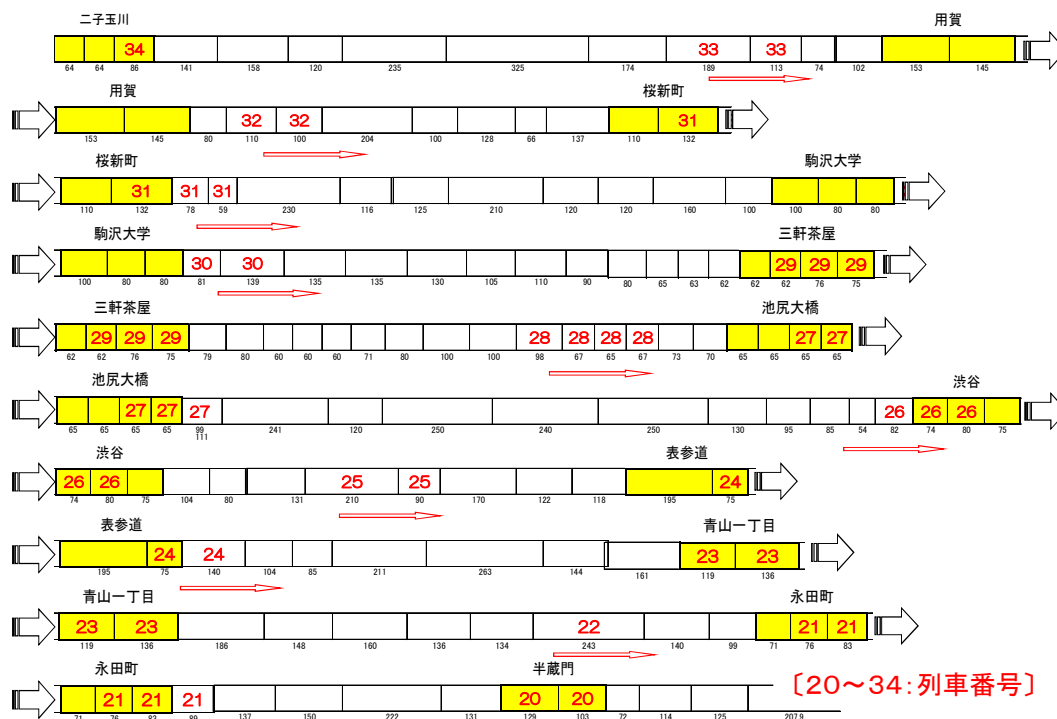


図-4-8 列車運行シミュレーションの表示画面

4.3.3. モデルの再現性

(1) 駅間走行時間の再現性

図-4-9 に駅間走行時間の実績値とシミュレーションモデルによる計算値の比較を示す。同じ計算値を、図 4-9 は駅間別に、図-4-10 は時間帯別に集計し、各々実績値との比較を行っている。駅間別では、走行時間の大小に関わらず、過大推計の傾向にある駅間と、過小推計の傾向に駅間があり、駅間別の閉そく区分の違いや本モデルで考慮していない縦断勾配の影響等により、推計結果の傾向の違いが生じているものと考えられる。池尻大橋駅～渋谷駅間の過小推計は、当該区間で実施している在線状況表示器による影響も要因の一つと考えられる。時間帯別では、早い時間帯の 7:50～8:20 では大きな誤差は見られないが、時間の経過に伴い路線の遅延が顕在化してくる 8:40～9:00 において、走行時間の大小に関わらず、誤差が大きくなっていることが読み取れる。最大で約 50 秒の残差が発生しており、この要因として誤差の累積による影響が考えられる。(サンプル数 330 : 10 駅間×列車 33 本, 重相関係数 0.92)。これについては、個別の駅間を例に、以下で考察する。

分析対象区間において最も駅間走行時間の増加量が大きくなった三軒茶屋駅～池尻大橋駅間の列車別の走行時間の変化を図-4-11 に示す。シミュレーションの初期段階では、計算値が実績値を上回っている。閉そく方式の列車の走行速度は、閉そく区間に進入する度に、その閉そく区間を抜ける際の最高速度が与えられる。速度を表示する信号機は各閉そく区間の進入口手前に設置されているため、閉そく区間を通過するまで信号現示は一定である。シミュレーションモデルも同様な信号方式を採用している。しかし、当該路線の実際の列車は、先行列車が閉そく区間を通過する度に、後続列車の運転台に当該列車の許容最高速度が表示される車上信号方式が導入されている。これにより、実際の列車運行はシミュレーションモデルよりも細やかな速度変化が可能のため、走行時間は計算値よりも小さくなる結果となっている。一方で、23 本目からは計算値が実績値を下回っている。ここで、23 本目の計算値において、実績値との差分である 34 秒を、この列車のみに加算すると、後続列車の運行状態が変化し、24 本目以降の誤差が小さくなる。このとき、前半と同様に計算値は実績値を上回ることから、計算値と実績値の差異に上述した信号方式の違いが影響しているものと考えられる。なお、23 本目の差異については、次節で述べる発着時分のバラツキや、先行列車から蓄積した誤差の影響が考えられる。

本モデルは列車別の運行挙動から路線全体の運行状態を再現するため、微小な誤差で

もそれが蓄積すると後続列車の運行挙動に影響する。このことから、複数の列車を連続して運行させる場合や、複数の駅間で運行状態を再現する場合には、得られる結果に対して留意が必要である。しかしながら、分析対象区間において最も駅間走行時間の増加量が大きくなった三軒茶屋駅～池尻大橋駅間（図-4-11）について、列車別に走行時間の増加量を比較すると、遅延の発生及び回復のタイミングの傾向は概ね再現されており、他の駅間についても同様な傾向を示している。したがって、本モデルは数秒単位の走行時間の変化については参考値となるが、遅延の発生、波及及び回復の要因となる列車の抽出、及び、その運行挙動の変化の把握については適用が可能であるといえる。そこで本論文はこのシミュレーションモデルを用いて、遅延対策に向けた列車運行における課題の抽出を行う。

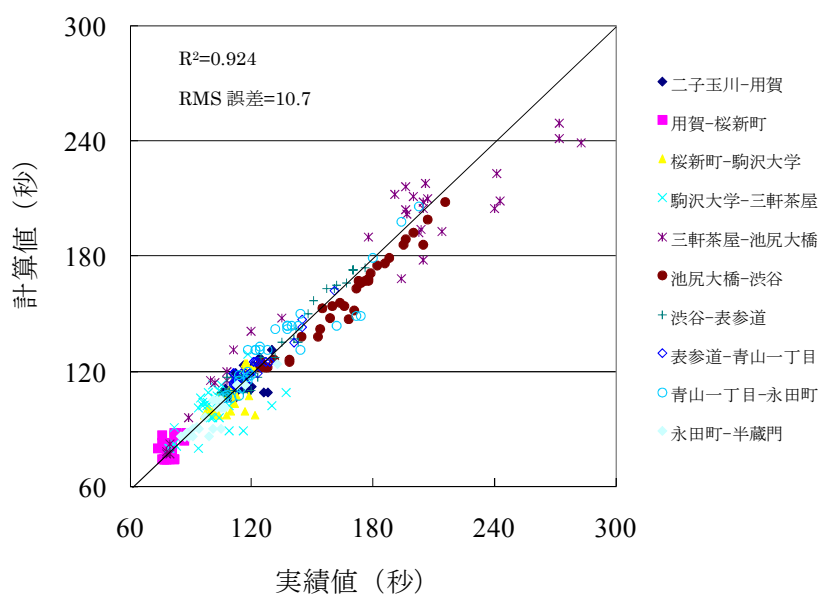


図-4-9 駅間走行時間の比較（駅間別）

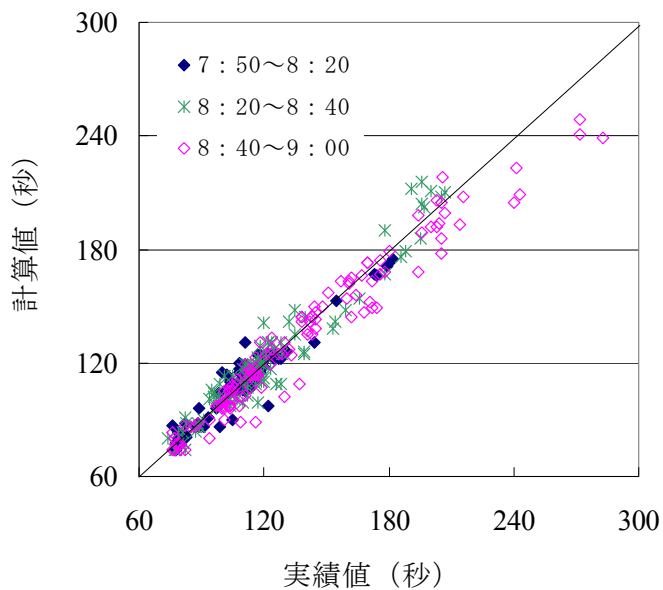


図-4-10 駅間走行時間の比較 (時間帯別)

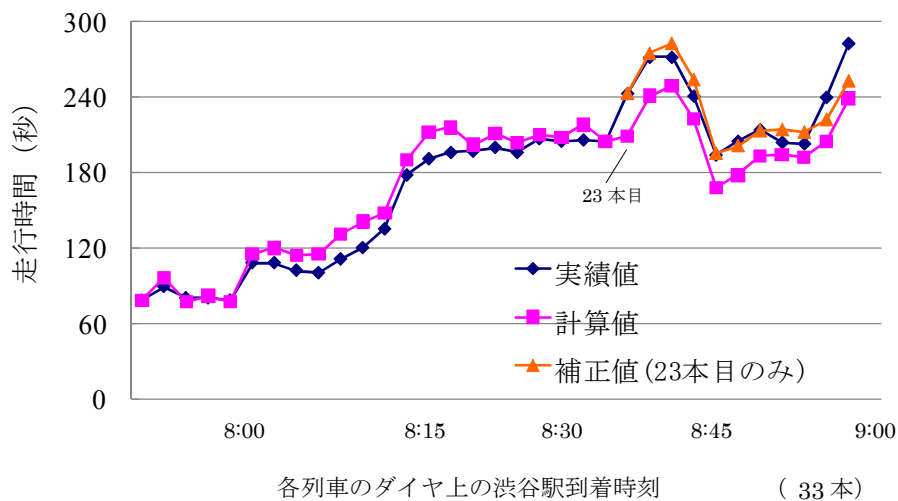


図-4-11 駅間走行時間の比較 (三軒茶屋駅～池尻大橋駅間)

(2) 発着時分のバラツキ

図-4-12 に池尻大橋駅における列車別の発着時分を示す。発着時分は、閉そく区間長と列車の走行速度及び加速度・減速度により決まる。遅延発生時は列車間隔に乱れが生じるため、先行列車が駅を出発する際、後続列車の在線する位置は列車別に異なる。このため、後続列車が駅に進入する際のブレーキ開始位置とブレーキ初速度に違いが生じ、その結果として列車別の発着時分に差異が生じる。

各列車の三軒茶屋駅の出発時刻及び池尻大橋駅の停車時間は、実績値と計算値で同じ条件にある。しかし、双方の値には差異がみられる。4本目までの列車はダイヤ上の運行間隔が3分～4分となっているため、実績値及び計算値ともに発着時分が大きい。5本目以降の列車は運行間隔が125秒であり、計算値の発着時分は概ね70秒で安定している。実績値については、計算値と同様に70秒前後の値が多いものの、50秒～100秒の間で値にバラツキが存在している。実績値と計算値の差異は、2つの要因が考えられる。一つは先述したシミュレーションによる計算誤差である。もう一つは、運転士の運転方法の違いにより生じる発着時分の差異である。シミュレーションによる計算値は、全ての列車が同一の規則により運転されるため、同じ運行条件であれば出力される値も同一であるのに対し、実際の運転には運転士による個人差が生ずるため、実測される値には差異が生ずるものと考えられる。走行時間の増加が抑えられ、比較的スムーズに運行されている12本目までの列車の発着時分は、実績値と計算値に大きな差異が生じていないが、遅延の発生により走行時間の増加量が大きくなる時間帯の列車において、実績値のバラツキが顕在化している。遅延発生状況では、列車は駅間で加減速や発進停止を繰り返すことになり、これは一般に運転士によって異なるためであると考えられる。一方で、計算値の発着時分は信号現示にのみに従い、運転士の個人差が排除された機械的な運転パターンによる発着時分である。このため、実績値がこの値より大きい場合は、運転方法に改善余地の可能性が期待される。駅間の列車運行において、運転士の個人の裁量による運転方法の差異を縮小し、より時間ロスが少ない運転方法の支援を行うことが可能となれば、発着時分の短縮により遅延の拡大抑制及び早期回復の施策として有効であると考えられる。

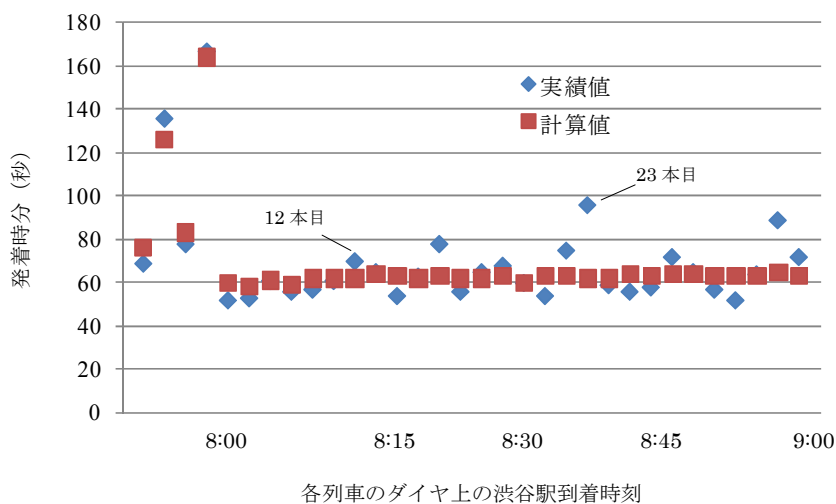


図-4-12 発着時分の比較

4.4. 停車時間の設定

4.4.1. 設定方法

前章の図-3-34 で発着時分と停車時間の関係を示したとおり、先行列車の出発後に後続列車の到着が大きくなると、駅の乗客が増加して後続列車の停車時間が増加する。このため、停車時間の設定は、列車の発着時分と停車時間との連動性を考慮し、駅での旅客流動と列車群の運行挙動との一体的な分析が可能となるよう、列車運行モデルに内生化する必要がある。そこで、前節のシミュレーションモデルにおいて駅別に発着時分と停車時間の関係を図-4-13 のとおり設定する。駅別列車別の停車時間は、運行ダイヤで設定された停車時間を最小値とし、運行ダイヤ上の発着時分を超過した場合に増加する。旅客の発生率は駅別に一定と仮定し、原点を0として、運行ダイヤで設定された発着時分に対する必要停車時間がダイヤ上の停車時間となるように、駅別に停車時間の増加率を設定した。図の傾きは停車時間の増加率を示しており、ターミナル駅である渋谷駅や三軒茶屋駅の傾きが大きくなっていることが読み取れる。図-4-14 は、平成22年11月15日(月)から平日9日間の列車運行実績値を集計して設定した場合である。準急運転時間帯の列車を対象に、駅別かつ20分単位の時間帯別に、停車時間の大きい上位10%の列車サンプルを削除して設定した。これは駆け込み乗車等の突発的な停車時間の増加の影響を排除するためである。その上で、発着時分と停車時間について、発着時分の増加に対する停車時間の増加率を指数関数の回帰式により算出し、駅停車時間推定モデルの

伸び率に設定した。また、列車別に平均停車時間を算出し、駅別列車別の基本実績停車時間を設定した。列車の駅停車時間については、列車到着間隔と旅客の乗降時分に関するより精度の高いモデル式が、他の研究等で構築された場合は、それをシミュレーションモデルに取り入れられるよう、列車運行シミュレーションモデルと、駅停車時間推定モデルを個別に構築し、双方を連動する形式としている。

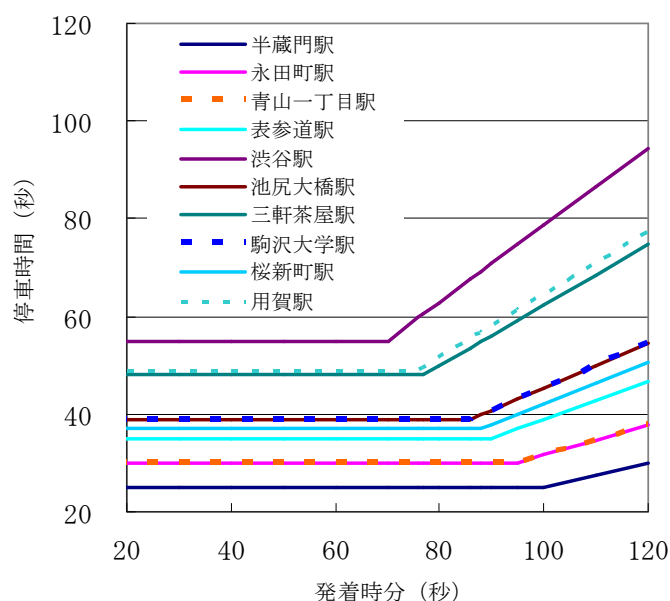


図-4-13 発着時分と停車時間の設定（運行ダイヤベース）

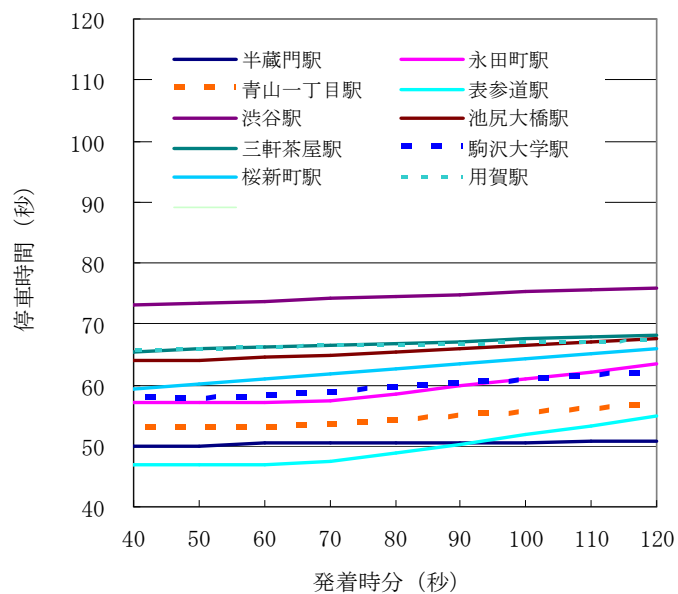


図-4-14 発着時分と停車時間の設定（実績値ベース）

4.4.2. 停車時間推定モデルの特徴と適用範囲

停車時間の増加要因として、駆け込み乗車等による突発的な要因がある。遅延現象のメカニズムを捉えるためには、これらの突発的な要因を排除した分析を行う必要があるため、本研究のモデルでは、駆け込み乗車等による突発的な要因を考慮しないこととしている。ただし、これを考慮した分析を行う場合は、モンテカルロシミュレーション等により、確率的要素をモデルに組み込むことにより、分析を行うことを可能としている。また、より精度の高いモデルが開発されれば、それを反映することを可能としている。また、列車間隔の乱れにより、著しく混雑率が上昇し、発着時分に対する停車時間の増加の感度が高くなった遅延の要因列車については、その様な列車のみのデータを用いて同様な関係式を算定する必要があるが、データが十分でないため、ここでは扱わないこととする。これは輸送障害時等における運転再開時の初期の列車にみられる事象であり、第6章で対策について述べている。

4.5. 列車遅延現象の再現

4.5.1. 定常的な列車遅延現象の再現

前述の列車運行シミュレーションモデルに、列車運行挙動の変化に伴う停車時間の変化を内生化し、通勤・通学時間帯における遅延発生から回復までの一連の遅延現象について、モデルによる推定を行った。発着時分と停車時間の関係は、実績値により算出した図-4-14 を適用した。図-4-15 にシミュレーションによる推定値と駅停車時間の設定に使用した平日9日間の列車運行実績値との比較を示す。シミュレーションの推定結果は、実績値に比べ遅延時間が小さい値となっているものの、実績値の下辺を沿うような結果となっており、定常的に発生する平均的な遅延現象を再現している。また、適用した駅別列車別の基本実績停車時間は、駆け込み乗車等の特異値を削除して設定している。このため、本シミュレーションの推定結果は、当該路線において、突発的な要因による列車遅延が発生しない場合においても、定常的に5分程度の遅延時間が生ずることの可能性を提示するものである。

また、急行列車の追い越しには、待避線が必要となるため、追い越しを可能とする駅は限られる。分析対象区間においては、桜新町駅に待避線が整備されており、急行列車

の追い越しが可能である。一般的な遅延現象を再現した現況再現図において、7:45 頃に渋谷駅に到着する列車の実績値は、全ての観測日で遅延時間の増加が計測されている。この要因は、当該列車の桜新町駅での急行列車の追い越し待ちによる停車時間の増加である。通勤・通学ラッシュが始まる早い時間帯において、急行運転を行う 1 本目の列車は、利用者が集中することから、日常的に列車遅延が発生している。当該列車は桜新町駅でこの急行列車の追い越し待ちを行うために、全ての観測日において遅延時間の増加が計測されている。本シミュレーションにおける駅停車時間は、駆け込み乗車等の突発的な停車時間の増加の影響を排除するため、駅別かつ 20 分単位の時間帯別に、停車時間の大きい上位 10%の列車サンプルを削除して設定した。7:45 頃に渋谷駅に到着する列車の桜新町駅における停車時間は、急行列車の追い越し待ちに伴い、同時間帯の他の列車と比べて停車時間の増加量が大きくなるサンプルが多い。しかし、それらのサンプルは 20 分単位の時間帯別において削除対象となる上位 10%に含まれてしまう。このため、当該列車の桜新町駅における基本実績停車時間は、急行列車の追い越し待ちによる停車時間の増加が発生していないサンプルの平均停車時間となっている。7:45 頃に渋谷駅に到着する列車において、シミュレーション結果が、実績値の遅延時間の増加の傾向を十分に反映していない要因は、上記に依るものである。

ただし、本シミュレーションモデルは、駆け込み乗車等による突発的な要因による列車遅延の影響を排除し、特定要因に依らない状況において発生する定常的な列車遅延の現象メカニズムの分析を目的としている。このため、本研究において上述の特定列車に起因する遅延の影響は、適切に排除されている。なお、上述した桜新町駅での特定列車の影響を考慮した分析を行う場合は、平均停車時間の設定において、集計範囲を時間帯別から列車別に細分化すればよい。本分析では、実績値データ数が 9 日間と少ないことから、突発的な停車時間の増加の影響を排除するためのサンプル削除を、駅別に 20 分単位の時間帯別で行った。しかし、多数の実績値データの取得が可能となれば、サンプルの削除を駅別列車別に行うことが可能となるため、基本実績停車時間の設定について、急行列車の追い越し待ちによる停車時間増加等の個別列車の特性をシミュレーションに反映することが可能となる。

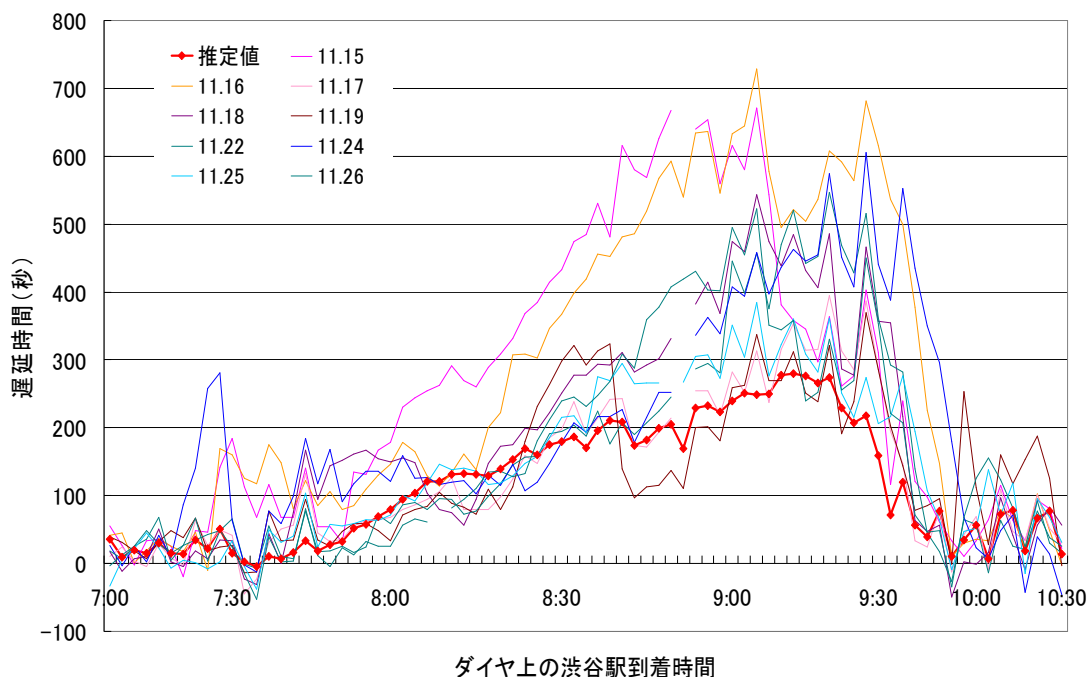


図-4-15 遅延状況の再現（駒沢大学駅～半蔵門駅）

4.5.2. モデルの適用範囲

モデルは列車別の運行挙動から路線全体の運行状態を再現するため、微小な誤差でもそれが蓄積すると後続列車の運行挙動に影響する。このことから、複数の列車を連続して運行させる場合や、複数の駅間で運行状態を再現する場合には、得られる結果に対して留意が必要である。しかしながら、分析対象路線における列車遅延の発生及び回復のタイミングの傾向は概ね再現されており、駅間の列車運行挙動についても同様な傾向を示している。したがって、本モデルは数秒単位の時間変化の絶対量については参考値となるが、遅延の発生、波及及び回復の要因となる列車の抽出、及び、その運行挙動の変化の把握については適用が可能である。本シミュレーションモデルの特徴及び対策案評価の適応範囲を表-4-1 に示す。

本研究は、列車遅延対策の効果計測を目的とするものでなく、列車遅延の現象分析及びそれに基づく対策の方向性や視点を見出すことを目的としている。議論の対象は、算出される数値でなく、算出される遅延現象と対策による変化の傾向であるため、本モデルは本研究の目的を達するに十分な精度を有している。次章以降のシミュレーション結果については、算定された変化としての数値について、その様な変化を誘引した要因及び変化点を考察することに焦点を当て、本モデルの結果を読むこととする。

表-4-1 シミュレーションモデルの適用例

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

4.6. 本章のまとめ

現在の都市鉄道の特徴として非常に短い線路閉そく長がある。これにより高密度運行による大量輸送を可能としているが、一方で、列車の線路上の混雑が発生し、これに起因して列車の駅間走行時間が増加している。線路上に密な状態で運行している列車は、先行列車の速度変化に応じて、加減速を繰り返すこととなり、それは自動車交通における渋滞現象と類似する。つまり、線路上において列車の渋滞が発生している。このため、列車遅延の発生及び波及・拡大のメカニズムを解明し、その対策検討を行うには、駅での列車乗降に関わる旅客流動のみならず、列車1本1本の挙動とそれらが互いに与える影響を時系列的に捉えることが不可欠といえる。本章では、遅延連鎖シミュレーションモデルの構造を示したうえで、上述の分析を実施すべく、列車遅延の現象を予測するシミュレーションモデルを構築した。具体的には、列車別の運行状態を再現する手法として、離散型シミュレーションモデルであるセルオートマトン法を適用し、現実の線路閉そく区間と同様にセルを分割することによって、列車運行状態が再現可能であることを実証した。また、駅での旅客流動と、連続して走行する列車群の挙動とを時系列で一体的に分析するため、駅における列車の発着時分と停車時間との連動性を考慮し、複数日を対象とした平均的遅延現象の再現性に関して、高い適用性が得られることを示した。

参考文献

- 1) 仮屋崎圭司：都市鉄道の列車遅延の拡大メカニズムに関する研究，運輸政策研究，Vol.45, pp.73 -76, 2009
- 2) 鳥海重喜，中村幸史，田口東：通勤電車の遅延計算モデル，オペレーションズ・リサーチ：経営の科学，50(6), pp.409 -416, 2005
- 3) 國松武俊，平井力，富井規雄：列車運行・旅客行動シミュレーションシステムの開発，鉄道総研報告，Vol.21, No.4, pp.5 -10, 2007
- 4) 宮崎信介，藤代隆正，岩倉成志：都市鉄道の線路内混雑に着目した列車速度の推定エージェントモデルによるアプローチ，J-RAIL2007 第14回鉄道儀技術連合シンポジウム講演論文集，pp.365 -368, 2007
- 5) Nagel, K. and Schreckenberg, M. : A cellular automaton model for freeway traffic, *Journal de Physique I France* 2, 2221-2229, 1992.
- 6) 西成活裕：交通流のセルオートマトンモデルについて，応用数理 特集・交通流の数理，Vol.12, No.2, pp.26 -37, 2002.
- 7) 森下信（養賢堂），セルオートマトンー複雑系の具象化ー，2003.
- 8) 高橋幸雄（朝倉書店），混雑と待ちー経営科学のニューフロンティアー，2001.
- 9) Hibino, N., Kariyazaki, K., Yamashita, Y. and Morichi, S. : Simulation Analysis for Estimating Train Knock-on Delay under High-Frequency Intervals, *Proceedings of the 12th Conference on Advanced Systems for Public Transport*, 17 pages, 2012.
- 10) Goverde, R.M.P.: A delay propagation algorithm for large-scale railway traffic networks, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.18, No.3, pp.269-287, 2010.
- 11) Fu, Y., Gao, Z. and Li, K. : Modeling Study for Tracking Operation of Subway Trains Based on Cellular Automata, *Journal of Transportation Systems Engineering & Information Technology*, Vol.8, No.4, pp.89-95, 2008.
- 10) Xun, J., Ning, B. and Li, K. :Station Model for Rail Transit System Using Cellular Automata, *Communications in Theoretical Physics*, Vol.51, No.4, pp.595-599, 2009.
- 11) 仮屋崎 圭司，日比野 直彦，森地 茂：列車間隔に着目した運行遅延に関するシミュレーション分析，土木学会論文集 D3(土木計画学)，Vol.67, No.5, I_1001-I_1010, 2011.

第5章

列車運行挙動と列車遅延の影響分析

第5章 列車運行挙動と列車遅延の影響分析

5.1. 概説

列車遅延の現象解明に焦点をあてた分析を行うため、前章で構築した各列車の相互作用により列車1本1本の駅間運行挙動を再現するシミュレーションモデルを用いて、列車遅延の波及・拡大、及び回復に関する定量的な現象分析を行うこととする。本章では、その応用的位置づけとして、列車の運行間隔に起因する遅延の波及と拡大の現象を定量的に示したうえで、シミュレーションを用いて列車運行における遅延の改善に向けた課題を抽出する。さらにそれらの結果から、遅延発生後における遅延拡大の抑制方法及び遅延の早期回復方法について検討を行い、列車運行に関する遅延対策の可能性と方向性を提示することを試みる。

5.2. 連続する列車群の運行挙動に関する分析

5.2.1. 列車密度と走行速度

上記の議論を進めるうえで、重要となるのが駅間の走行速度と列車間隔である。ダイヤ上の列車運行は、各列車が先行列車の挙動に左右されることない適度な間隔を保ち、スムーズな運行がなされるよう計画されている。しかし、一度遅れが発生すると列車間隔に乱れが生じ、駅間には駅到着の順番待ちをする列車が存在するようになる。遅れが増加するとその列が所々隙間を空けながら上流の駅まで伸びていく。現在の線路閉そく区間長は、高頻度運行を可能とするため、以前のそれより非常に短い。田園都市線においては、列車間隔が1列車長よりも短く設定されている区間も多く、列車は線路上に密な状態で運行している。このため先行列車の速度変化が後続列車の運行速度に直接的に影響を与えるような現象が生じており、道路交通の渋滞と類似した線路上における列車の渋滞が発生している。道路交通においては、交通量と走行速度に関する交通流理論が確立されており、ロードプライシング等の道路使用の最適化の検討に用いられている。その代表例であるQV曲線は、通過交通量 Q と速度 V の関係においてどちらも高い状態が存在することを示したものである。自由走行の状態から自動車の車両間隔が詰まって通過交通量 Q が増加すると速度 V が低下する。それと同様な現象が鉄道においても起きている。図-5-1のように、朝のピーク時は線路上の列車本数が増加すると計画ダイヤ

や、実績値ともに所要時間の増加, すなわち走行速度の低下が起きていることが分かる。しかし、道路交通の QV 曲線は走行速度と車両間隔の関係で、通過交通量の最適値が決まるが、鉄道は路線上に駅が存在するため、連続して走行する列車群の途中で新たな遅れが発生するといった現象や、長時間の運行遅延が発生した際に、ボトルネック駅の列車出発間隔あるいは駅停車時間で線路上の全列車の走行速度が決まる等といった、鉄道特有の現象も存在する。走行速度と車両間隔の関係の他に、もう一つ“駅”の要素を組み込んで考える必要がある。

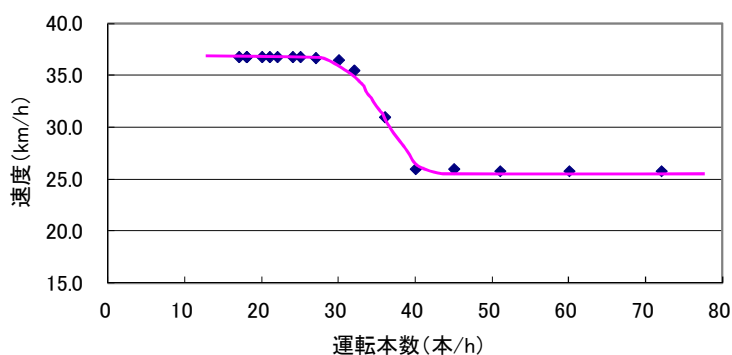


図-5-1 運転本数と速度の関係

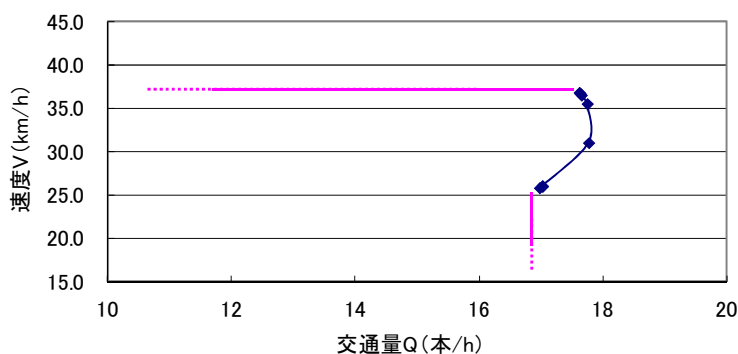


図-5-2 交通量と速度の関係

5.2.2. 列車間隔の縮小による遅延の発生

遅延の拡大・波及は、駅別での停車時間の増加等、様々な要因が複合して起きている。そこで、列車の運行に関する要因つまり列車間隔に焦点を絞り、遅延の波及の様子を考察するためのシミュレーションを実施する。二子玉川駅から 125 秒間隔で列車を発生させ、半蔵門駅まで列車を運行させる。各駅の停車時間は実績値の平均値を適用し、列車の運行状態の変化による駅停車時間の変化は考慮しない。ここで、二子玉川駅から発生する 1 本目の列車（以後、列車 No.1）の池尻大橋駅における停車時間を 10 秒単位で

増加させ、出発時刻を遅らせた際の半蔵門駅における到着遅延時間を、列車別に算出した。図-5-3 は池尻大橋駅で列車 No.1 の出発時刻の遅れに対する列車別（列車 No.1 及び後続列車 No.2~No.8）の半蔵門駅での到着遅延を示している。池尻大橋駅で発生した遅延の影響は、後続列車の順番によらず不規則な変動をしていることから、列車は信号方式に基づき規則的な運行をしているが、遅延発生時のように列車間隔が狭まっている場合には、先行列車の運行挙動が後続列車の運行に複雑に作用することが読み取れる。このシミュレーションでは、停車時間を変動させず一定としたが、現実には列車別に各駅で停車時間が変動するため、それら複雑な列車間の相互作用により決定される遅延時の列車運行挙動を再現し、分析するうえでは、列車別のミクロな運行挙動を再現可能なシミュレーションモデルによる分析が有効であるといえる。また、後続列車のグラフの線は原点を通る 45 度線にほぼ沿っているが、全体的に少し下にずれている。これは駅によっては、125 秒の設定運行間隔は、閉そく区間長と設定速度によって決まる計算上可能な最小運行間隔より少し長いために、停車時間の増大を走行時間を短縮することによって回復しているためである。しかし、後続の列車 No.2 や No.3 と比べて後続の列車 No.7 や列車 No.8 は、列車 No.1 の出発遅れ時間に対する到着遅延時間の増減幅が大きく、半蔵門駅における列車 No.1 の到着遅延時間よりも遅れ時間が拡大しているケースも確認される。この遅れの要因を探るために、列車別の遅れの時間の内訳を図-5-4 に示す。図-5-4 には池尻大橋駅で列車 No.1 の出発時刻の遅れを 120 秒としたときの、半蔵門駅での到着遅延の構成を列車別に示している。列車 No.1 の池尻大橋駅での出発遅れにより、後続列車の列車間隔は狭まり、列車 No.2 においては池尻大橋駅の手前で駅間停車が生じたため、三軒茶屋駅～池尻大橋駅の走行時間が増加している。さらに後続の列車 No.3 以降も同様に駅間の駅間停止が発生したが、徐々に回復へ向かいこの区間の走行時間の増加量は減少傾向にある。ただし、遅延の影響は上流の駅間に波及しており、列車 No.4 以降は駒沢大学駅～三軒茶屋駅間において列車間隔の狭まり起因する速度低下が生じ、走行時間の増加が発生していることが読み取れる。一方で、池尻大橋駅より下流の駅間においても、ダイヤで設定された時隔以上に列車間隔が詰まったために、下流の各駅間で後続列車の走行時間の増加が生じている。このため、後続の列車 No.7 や列車 No.8 では、当初、遅延が発生した列車 No.1 の半蔵門駅の到着遅延時間よりも遅れ時間が拡大していることが分かる。駅停車時間の増加により生じた列車間隔の乱れに起因する新たな遅延の発生が確認され、駅での停車時間の増加が頻発しない場合においても、列車運行に関して遅延が波及・拡大することが示されている。このことから、列車運行に関する遅延対策においては、適度な列車間隔を保持した運行管理の実施が課題となる。

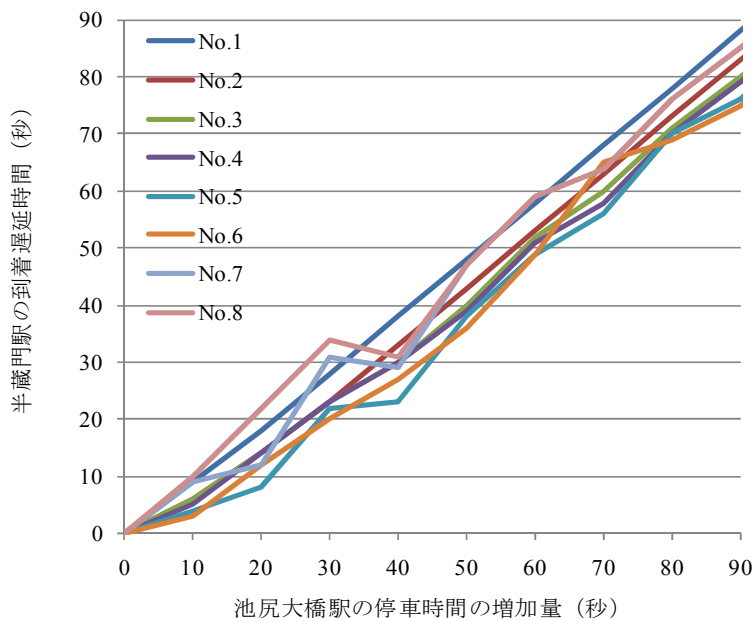


図-5-3 列車遅延の波及

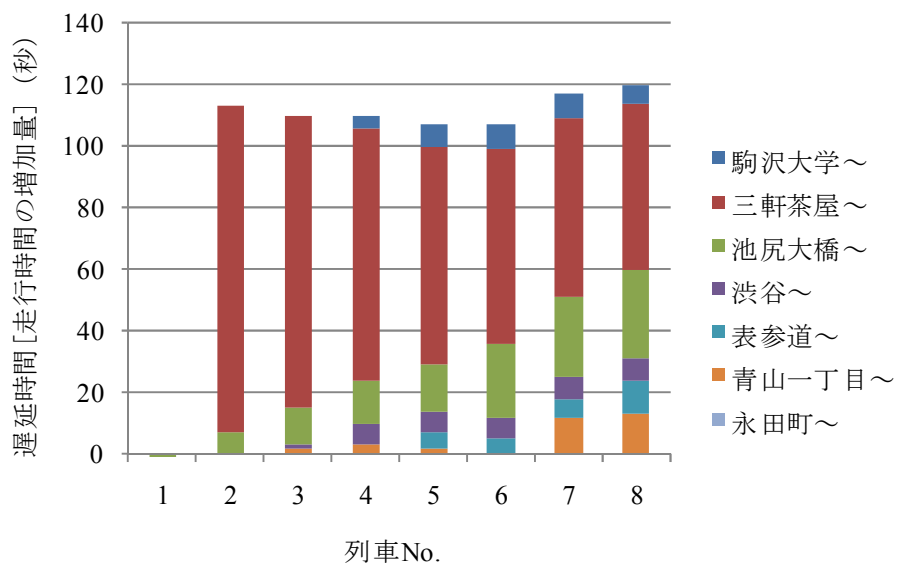


図-5-4 遅延時間の構成 (120 秒)

5.2.3. 遅延の伝播

上記のシミュレーションを用いて、駅停車時間と駅間走行時間の関係から、遅延時間の伝播・波及の仕方について分析を行う。駒沢大学駅～三軒茶屋駅間において、列車運行間隔を125秒で一定とし、三軒茶屋駅の停車時間の増加量と、各停車時間における列車別の駅間走行時間の変化を図-5-5に示す。停車時間は5秒単位で増加させ、停車時間別に14本の列車を運行させた。

三軒茶屋駅では、ダイヤで設定された停車時間に対して、15秒以上の増加が生じると、後続列車の駅間走行時間に影響が及ぶことが読み取れる。ダイヤに対する停車時間の増加量が15秒以上～30秒以下の場合は、走行時間の増加量が比較的小さく、増加率も一定の規則性はみられない。またNo.9以降の列車については、増加率が0でありNo.8列車の走行時間を維持している。一方で、ダイヤに対する停車時間の増加量が35秒以上の場合には、No.9以降の列車においても列車毎に走行時間が増加しており、その増加率は停車時間の増加量に比例している。これは、三軒茶屋駅での停車時間の増加に伴い、後続列車で駅間の駅間停止が生じ、発着時分と停車時間の合計時間が一定値となったためである。これによって、先行列車の停車時間の増加量が、後続列車の走行時間の増加量として付加され、後続列車の走行時間が増幅している。したがって、駅停車時間の増加に伴う遅延時間の拡大を抑制するためには、駅間を走行する列車の駅間停止を回避することが有効であると言える。

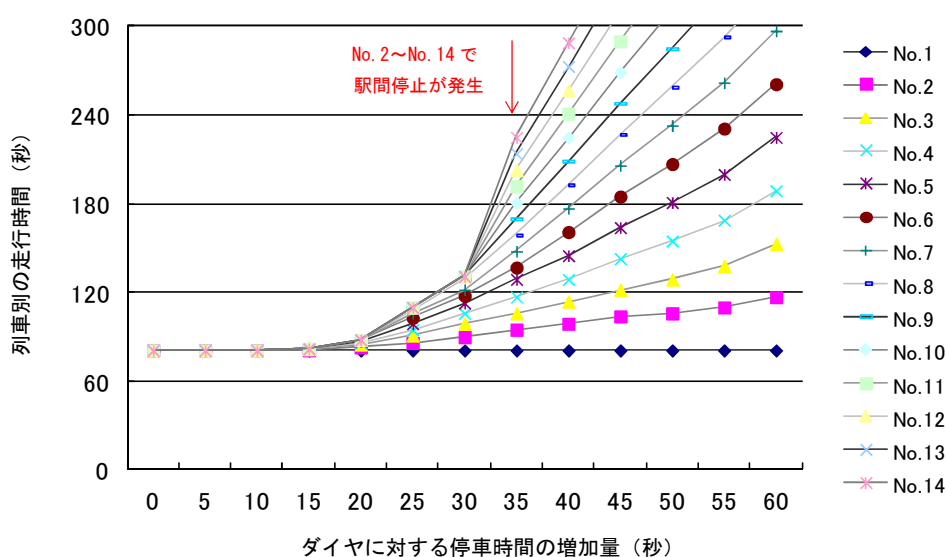


図-5-5 停車時間と走行時間の関係

5.2.4. 停車時間の増加による後続列車への影響

試験的な検討として、駒沢大学駅～三軒茶屋駅～池尻大橋駅間において、通勤ラッシュ時間帯のダイヤ上の運行状態を類似的に再現する。運行間隔は130秒とし、各駅の停車時間はダイヤの平均値を設定する。その上で、三軒茶屋駅において任意の列車1本の停車時間を5秒～30秒まで5秒ずつ増加させた場合の後続列車への影響をシミュレーションする。後続列車4本について、三軒茶屋駅及び池尻大橋駅における到着遅れ時間を図-5-6及び図-5-7に示す。なお、ここでの遅れ時間は、任意の列車の停車時間増加が生じなかった場合に対する各駅での到着時間の増加量を示す。

興味深い点は、三軒茶屋駅にはダイヤどおりに到着した場合でも、次駅の池尻大橋駅に遅れて到着する列車が存在することである。駅停車時間の増加等により列車の間隔が乱れると、停車時間が増加した駅において後続列車の到着遅れが発生するだけでなく、その下流の駅間においても後続列車の走行時間が増加するケースがある。これは駅間距離の短い区間やダイヤで停車時間を長く設定している駅の手前で、先行列車との間隔が小さくなり、後続列車は減速を強いられるためである。一例として、上記と同様にして桜新町駅で任意の列車1本の停車時間を30秒増加させたところ、後続列車1本目の桜新町駅の到着遅れは4秒であったが、その下流駅間で走行時間の増加が繰り返し発生し、4駅先の渋谷駅では到着遅れが20秒に拡大する計算となった。

実際には、駅での対応や経験的な運転技術により、遅れの回復が図られ計算どおり遅延時間が拡大することは考えにくい。また、シミュレーションの再現性の問題もある。しかし、このような計算結果は、ラッシュ時間帯の過密なダイヤとそれを遵守した運行がいかに困難であることを示すとともに、遅延対策において発生・波及メカニズムの解明及び駅部の検討のみならず列車運行と連鎖した一体的な検討の必要性を示唆するものである。

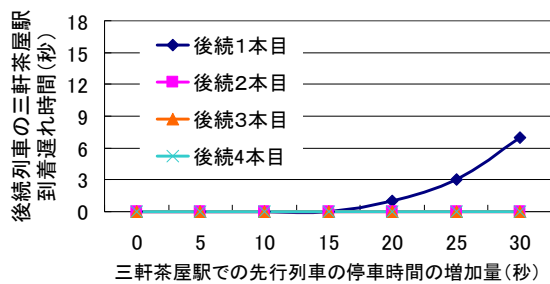


図-5-6 後続列車の到着遅れの変化 (三軒茶屋駅)

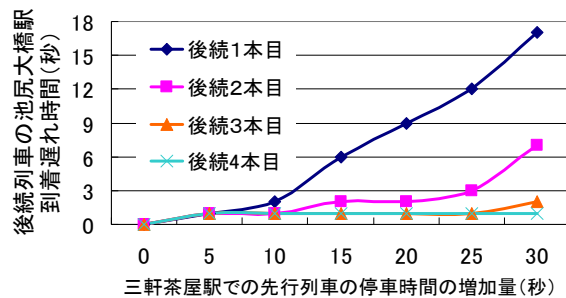


図-5-7 後続列車の到着遅れの変化 (池尻大橋駅)

5.3. 個別列車の運行挙動に関する分析

5.3.1. 列車間隔と発着時分

駅間を走行する列車の駅間停止は、先行列車との離隔が縮小することにより発生する。先行列車の駅停車時間が増加し、後続列車において駅間の駅間停止が予測される場合、これを回避するには、後続列車が停車中の駅において出発を遅らす、あるいは、駅間の走行速度を低下する、といった手法が考えられる。前者の出発を遅らす手法は、それを機に新たな遅延の発生が懸念されるため、本節では後者の駅間走行速度の低下を扱うものとし、この運転手法による駅間停止の回避について検討を行う。

駅間の走行速度を低下させた際に先行列車が予測以上に早く駅を出発すると、後続列車の駅到着が遅れてしまう、つまり発着時分が大きくなることが懸念される。しかし、発着時分がほぼ等しくなる走行パターンは複数存在するため、より駅に接近している方が発着時分が小さくなるとは限らない。図-5-8と図-5-9は、先行列車が駅を出発する際の、後続列車の在線（閉そく）位置とそこからの駅到着時間（発着時分）の関係を示している。縦軸の補助線は、閉そく区間を示している。後続列車が駅手前で駅間停止している場合、先行列車が出発しても最後尾の車両が閉そくを移動するまで信号現示が変わらないため、駅から離れた位置から進入した場合と比べ、双方の発着時分は殆ど等しくなる。他の駅間など閉そく割りによっては、離れた位置からの進入した方が発着時分が小さくなる場合もある。このため、三軒茶屋駅～池尻大橋駅間では先行列車が出発する際に、後続列車は駅まで約500mの位置に在線していると、先行列車の挙動に関わらず発着時分に大きな遅れが生じない。つまり、駅間の走行速度を低下しても、それによる新たな遅延が生じない範囲が存在し、駅間の駅間停止を回避する手法として運転速度の検討の有用性が示唆される。

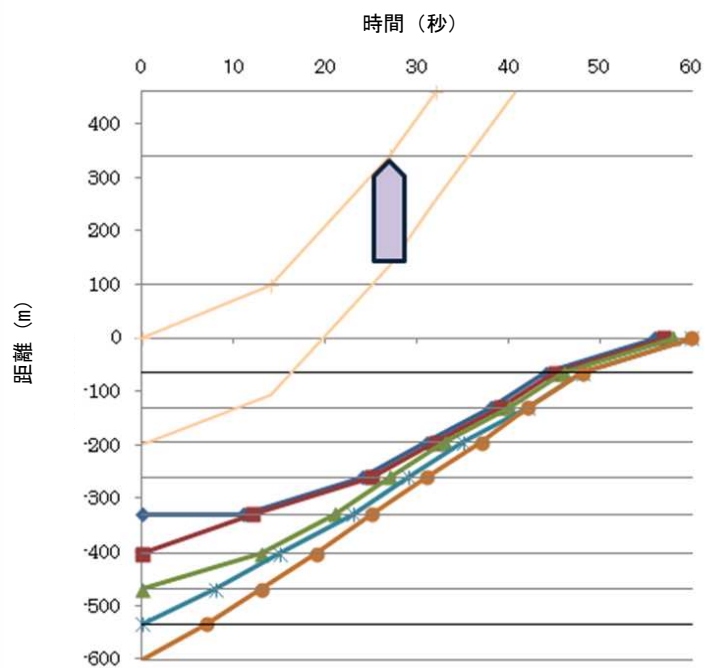


図-5-8 列車間隔と駅到着時刻 (池尻大橋駅)

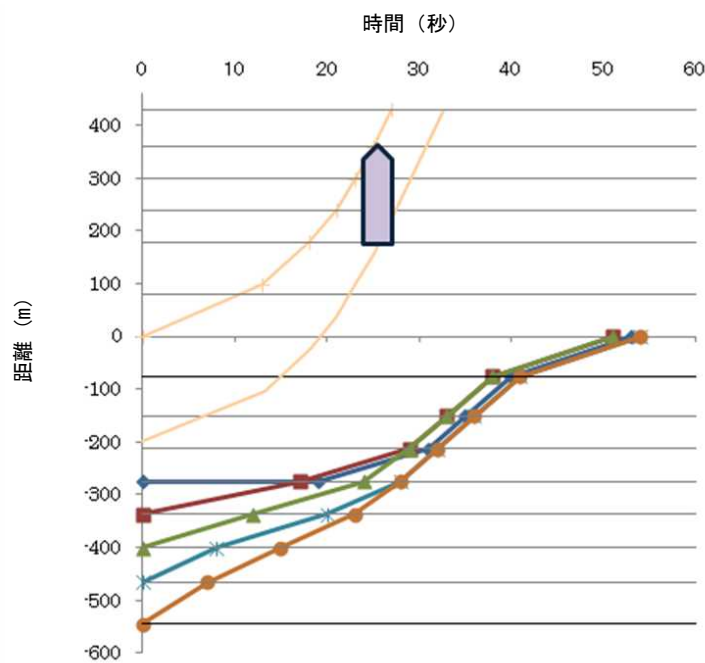


図-5-9 列車間隔と駅到着時刻 (三軒茶屋駅)

5.3.2. 閉そく区分と発着時分

先行列車が駅を出発する時の後続列車の在線（閉そく）位置と駅到着時間関係を図-5-10に示す。閉そく区分を60m等間隔と、120m等間隔としたプロトタイプの実験である。閉そく5区間において、先行列車が次駅を出発する際に、後続列車の在線位置の違いによる次駅での発着時分の違いをシミュレーションする。5閉そく区間を対象とし、後続列車は各閉そく区間の先端に在線している状態から、次駅に到着するまでをシミュレーションする。したがって、最も次駅に近い閉そく区間に在線している場合は、駅間停止からの再加速となり、最も次駅から離れた閉そく区間に在線している場合は、20km/h以上の速度で走行していることになる。閉そく区分が細かい60m等間隔は、120m等間隔と比べて、より次駅に近い位置に在線していることから、発着時分は小さくなる結果となっている。また、個々の閉そく区間長が短いため、発着時分の幅も小さい。閉そく区分が細かい60m等間隔は、発着時分が等しくなる走行パターンが複数存在し、列車運行の柔軟性がうかがえる。ここで注目すべきは、次駅に近い位置に在線していることが、必ずしも発着時分を小さくするとは限らない、離れている方が早く次駅に到着する可能性があるという点である。実際のケーススタディとして、三軒茶屋駅と池尻大橋駅で同様なシミュレーションを実施した。駅手前の駅間停止の回避により発着時分が短くなるケースがある。先行列車が早く出発しても同じ発着時分を保てる範囲がある。これらの結果から、低速度運転による遅延対策が可能であることが示唆される。

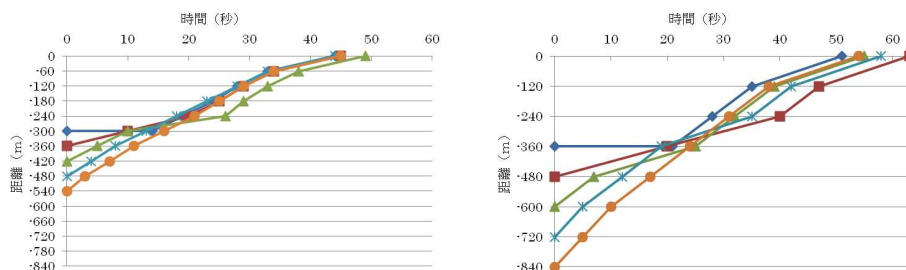


図-5-10 駅までの距離と到着時間（左:60m 間隔, 右:120m 間隔）

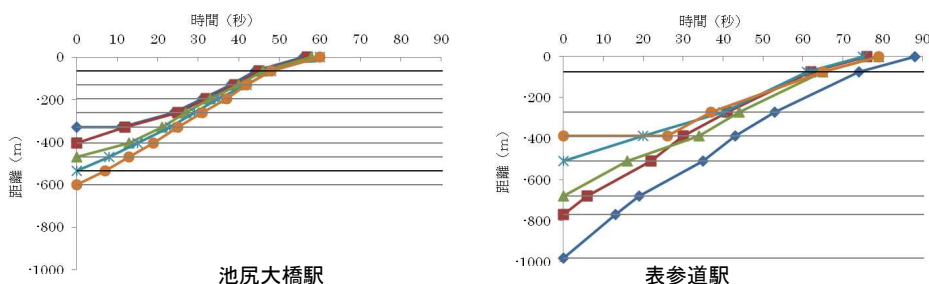


図-5-11 駅までの距離と到着時間

5.4. 運行管理手法の基本的な考え方

前述の第3章で論じたとおり、列車遅延の発生、波及及び回復メカニズムを踏まえ、より実効性の高い列車遅延対策を検討するにあたっては、高頻度運行下における列車運行管理手法の検討が、遅延の拡大抑制及び早期回復に有効であると考えられる。

そこで本節では、第3章の各種実績データを用いた現状分析と列車遅延の発生、波及及び回復メカニズム、また前節のシミュレーション分析の結果を踏まえて、より実効性の高い列車遅延対策を実施することを目的とし、高頻度運行下において走行時間を回復するための列車運行手法について基本的な考え方を整理する。

5.4.1. 列車遅延対策の基本方針

列車遅延の対策方法としては、①高頻度運行及び相互直通運転の中止、②路線容量の増強、③利用者意識の改革、④列車の運転方法の改善の4つが主に挙げられる。

高頻度運行及び相互直通運転の実施は、顕在化した遅延の主な要因の一つであることから、これを中止することは最も簡単な方法であるが、車内及び駅内の混雑が再発してしまい解決策とは言えない。東京圏の都市鉄道が未だに混雑率190%以上の路線が多く存在することを鑑みると、路線容量の増強による抜本的な対策なくしては遅延の発生を抑制することは極めて困難な状況と考えられる。しかし、路線容量の増強は大規模投資を伴い、長期的な時間を要してしまうため、一部都心の限られた場所を除けば現実的な対策として考え難い。大規模投資が不要な施策として、利用者意識の改革による駆け込み乗車の抑制や旅客流動の円滑化が考えられるが、一朝一夕に達成されるものではない。その中で、列車の運転方法の改善は、大規模投資を伴わずに早急な効果が期待され、かつ利用者行動の変化を伴うことなく、事業者側の取り組みだけで実施可能であることから、最も実効性が高く、かつ確実な効果が期待される対策と考えられる。

なお、列車運転方法の検討においては、駅での列車到着間隔が、旅客発生量との相関性により駅停車時間に影響を及ぼすと考えられることから、双方の連動性を考慮した分析が必要である。

そこで本研究では、駅停車時間の増減を内生化した列車運行シミュレーションモデルを用いた分析を行い、列車の運行管理の視点から、列車間隔に着目した遅延発生後における遅延の早期回復方策について検討を試みる。

5.4.2. 連続する列車群の運行管理

(1) 路線容量の決定要因と駅での列車運行管理

路線容量の決定要因、つまりは時間あたりに運行可能な列車本数を決定する要因は、その路線のボトルネック駅での最小運行間隔に依るところである。路線の運行間隔は、駅での停車時間と、最小発着時分、及び余裕時分で構成される。ターミナル駅では、他の駅と比して、乗降客数が多くなることから、停車時間を長く設定される場合が多く、路線のボトルネック駅となる場合が多い。そのため、ボトルネック駅より上流に位置するや駅間において、列車の運行状態が変化し、列車間隔の粗密に変化が生じた場合においても、ボトルネック駅手前の到着間隔に遅れが生じない限り、ボトルネック駅を出発する列車間隔には影響を及ぼすことはない。

列車運行実績値による遅延発生時のダイヤグラムを図-5-12 に示す。菊名駅で急病人が発生したことに端を発し、その他の混雑に起因する遅延の発生とも相まって、渋谷駅で最大40分程度の到着遅延が生じている。遅延の発生、顕在化に伴い、上流の長津田駅から渋谷駅にかけて、ダイヤの傾きが寝てしまっていることが分かる。駅別や駅間別に、また時間帯によってもダイヤの傾き具合や、到着及び出発間隔は様々である。しかしながら、東急田園都市線のボトルネック駅である渋谷駅に着目すると、列車の到着間隔及び出発間隔は概ね等間隔となっていることが読み取れる。

渋谷駅での列車の運行状態を模式的に示したものが図-5-13 である。池尻大橋駅での列車の到着及び出発間隔や、池尻大橋駅と渋谷駅間の走行パターン（走行軌道）に、差異が生じているものの、渋谷駅での列車到着間隔は発着時分の最小値で制約されていることから、最小発着時分を基準値とする大凡の等間隔に列車が到着することを示している。

この様に、高頻度運行下における列車遅延については、ターミナル駅等の路線容量が決定されるボトルネック駅より上流において、列車を進行方向へ進めるべく、前へ前への意識をもって列車の運行管理を実施したとしても、ターミナル駅あるいはボトルネック駅における路線の輸送力には影響を及ぼさないことが分かる。逆に、第3章の現状分析において確認されたように、前へと詰め過ぎることによる列車間隔の狭小により、減速あるいは駅間停止による新たな列車遅延が発生し、遅延時分の増加と路線の輸送力の低下が懸念される場合がある。駅間停止から再発車する際には、信号現示が青色に変わった後の出発確認作業や任意の速度までの加速に時間を要する。駅間停止を回避できれば生じない、駅間停止をすることによって生じる損失時間である。つまり、高頻度運行

下における列車の運行管理は、列車遅延の拡大抑制の視点から、前へ前へと詰めることが、必ずしも最適な運行管理手法ではないとすることができる。事業者が実施している従来の運転管理は、後続列車へ遅延の影響を波及させないために、駅での列車発は出来るだけ早く出すという基本方針のもと、実施されることが一般的である。しかしながら、遅延発生時の駅での運行管理は、必ずしも早く出すことだけが適切であるとは限らず、遅延の波及・拡大メカニズムを踏まえた列車運行に関する分析に基づいた新たな基本方針が必要であることが示唆される。路線容量の決定要因である停車時間と発着時分により、ボトルネック駅が決まり、ボトルネック駅の処理能力が路線容量となる。ボトルネック駅の容量が決まっているため、上流で列車間隔を詰めても、路線の処理容量に影響しない。つまり、前へ詰めても意味がないといえる。そこで次節では、列車運行管理の基礎となる列車運行ダイヤについて、駅部と駅間部と各々の特性を整理し、運行計画の設計に関する視点から、運行管理の基本方針について考察する。

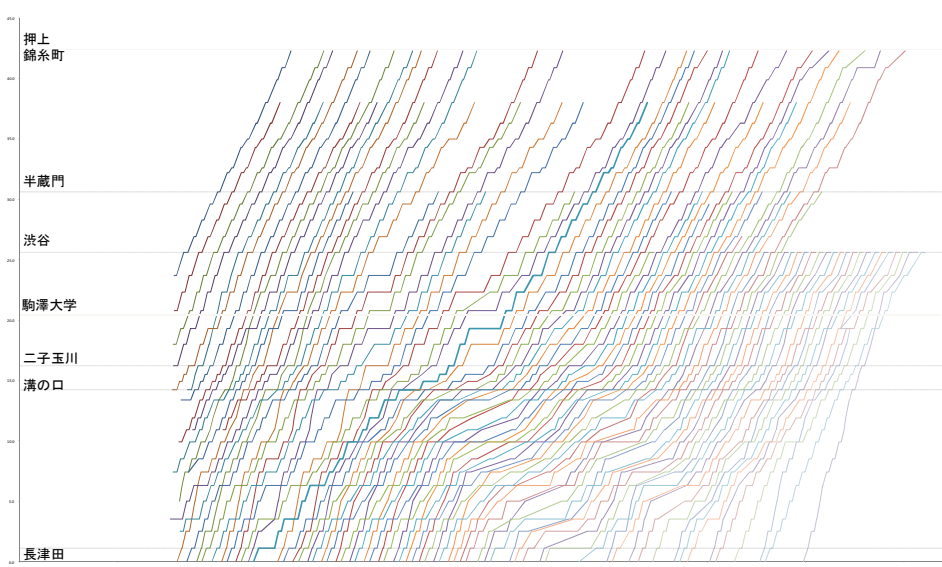


図-5-12 実績ダイヤグラム図（40分遅れ）

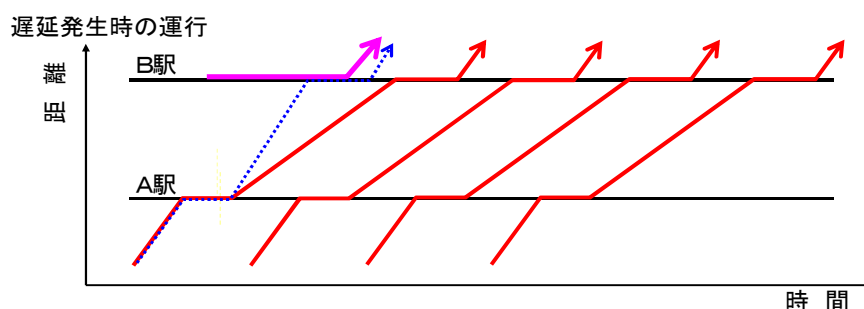


図-5-13 列車遅延ダイヤ模式図

(2) 列車運行ダイヤの構成要素

先に記述したとおり，列車運行時刻表の運行間隔は図-5-14 で示すとおり，停車時間と最小発着時分，及び余裕時分の3つの時分から構成される．停車時間は，利用者の発生率，乗降者数，到着する列車内の混雑状況，駅やホームの構造等，駅別に特性を有する要素により平均的な時分が決まる．駆け込み乗車や急病人の発生等の突発的な要素を組み込むことは困難であるが，事業者はこれまでの経験値から駅の特性を踏まえ，駅別に必要な停車時間を設定している．最小発着時分は，加速及び減速の列車性能と列車編成長，駅間の閉そく区分，安全余裕長を要素として，算定式により算定することが可能である．算定式は第3章の3.3.4に記載．列車の運行間隔は，これら停車時間と最小発着時分の合計時分が最大となる駅において，若干の余裕時分を経験的に考慮して設定される．このため，他の駅の余裕時分は設定された運行間隔と，当該駅の停車時間及び最小発着時分の差分から算出されることとなり，路線の運行間隔に対する3つの時分の構成比率は駅別に異なる．参考として，駅別の各時分の構成を図-5-15 にしめす．路線の運行間隔及び停車時間は列車運行ダイヤの値を適用し，最小発着時分は列車運行実績値（19日）から駅別の最小値を抽出して作成した．東京メトロ半蔵門線に対して東急田園都市線は最小発着時分が小さいことから，線路閉そくを細かく区分していることが読み取れる．また，当該路線のターミナル駅である渋谷駅は乗降者数が多いことから，停車時間は他駅と比べて大きな値が設定されている．駅によって運行間隔の内訳が異なっており，駅別に適した対応を検討することの必要性が示唆される．

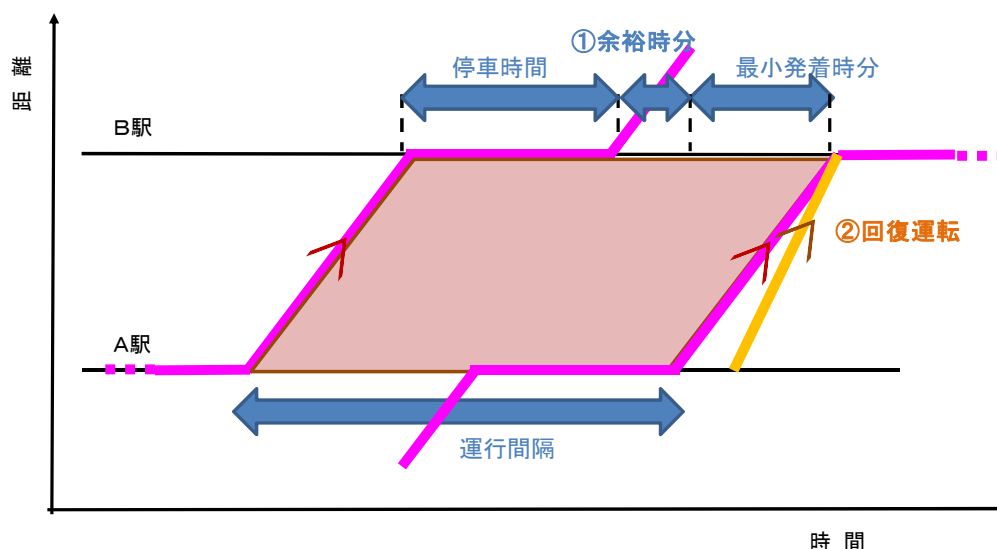


図-5-14 運行間隔の内訳

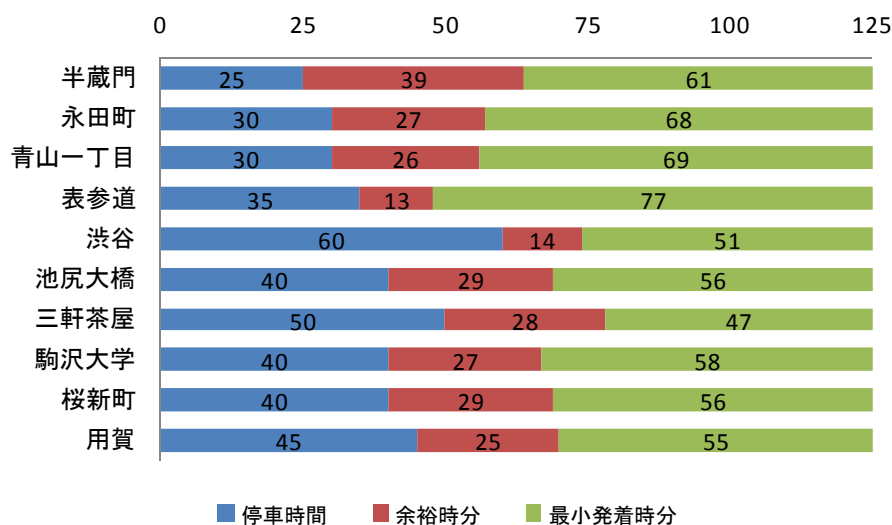


図-5-15 駅別の運行間隔の内訳

(3) 走行時間における余裕時分

回復運転について、イメージの模式時を図-5-16に示す。朝ラッシュ時については駅停車時間の増加分を余裕時分でカバーすることを見込むのとして、列車運行ダイヤを設計していると考えられ、実質上、駅での余裕時間は殆ど設定されていない状況にある。一方で、駅間の走行時間については、車両性能を最大限に発揮した走行時間の最小値を設定しないため、駅間別に運行ダイヤに対する余裕時分が存在する。走行時間の余裕時分は、ランカーブの設定において安全面の視点から創出される時分と、列車の運行間隔を等間隔に保持する運行管理上の調整から創出される時分との合計時分からなる。参考に駅間別の走行速度の余裕時分を図-5-17に示す。列車運行ダイヤに設定された走行時間と運行実績値（19日）から駅間別の最小値を抽出して作成した。池尻大橋駅発の余裕時間は駅間に2列車を在線させるために長くなっている。このような駅間の走行時間には余裕時分が設定されており、駅で停車時間の増加等により発生した遅延は、駅間での回復運転により次の駅に波及することなく、遅延を解消している。

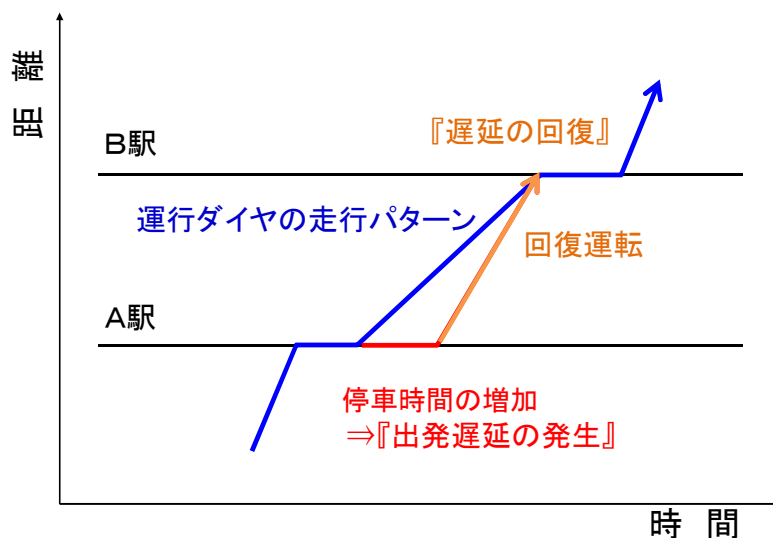


図-5-16 出発時間調整による着時刻の回復

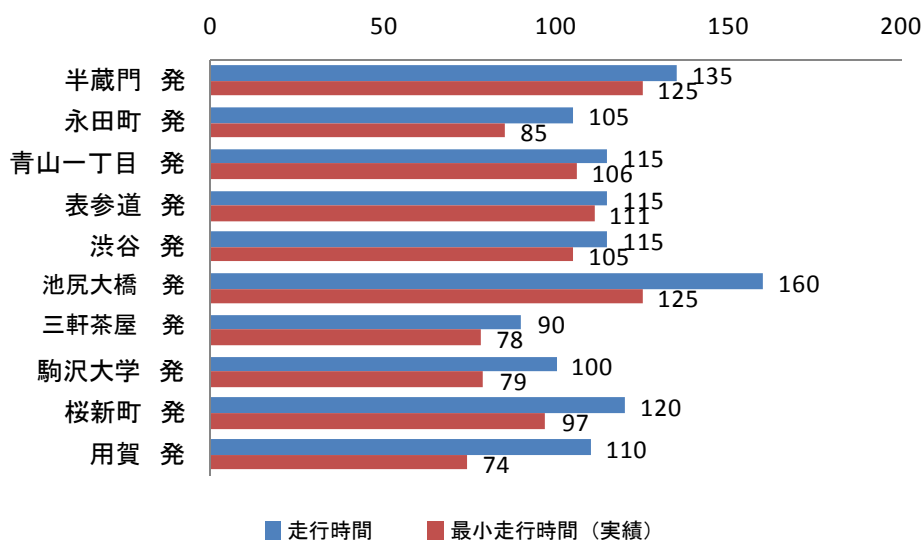


図-5-17 駅間別の走行時間の余裕時分（回復可能時分）

上述したとおり、駅には後続列車に影響を与えない余裕時分が設定されており、駅間には回復運転により次駅に遅れの影響を波及させないための余裕時分が設定されている。このため、列車運行ダイヤで定められた停車時間以上に、駅で列車を待たせた場合においても、その遅れの影響が後続列車へ直ちに波及し拡大しない場合がある。また、

仮に駅での停車時間の増加が後続列車へ波及した場合においても、直ちに遅延が拡大しない場合がある。これらについての一例を図-5-18に示す。上図は、先行列車のA駅での出発遅れが駅の余裕時分により吸収され、後続列車へ遅延が波及しない事例を示している。ただし、A駅でこそ、後続列車への遅延波及が生じないものの、B駅においては列車間隔が狭まったことに起因し、後続列車へ遅延が波及する可能性があることに留意する必要がある。図-5-18の下図は、A駅で後続列車に遅延が波及した場合においても、AB駅間での回復運転により、B駅では遅延が解消される場合があることを示している。また、図-5-19に、駅及び駅間に設定された余裕時分が効果的に機能して、発生した遅延を解消する例を示す。A駅で発生した停車時間の増加による遅延について、A駅で余裕時分を有し、さらにAB駅間で回復運転が可能な場合、A駅における後続列車への波及については、A駅での余裕時分に吸収され、遅延は解消される。また、列車間隔の縮小によりB駅以降で発生する遅延については、AB駅間での回復運転により、先行列車のB駅での到着遅れを回避することで、列車間隔が保持され、B駅以降での遅延発生も解消される。つまり、駅の余裕時分による遅延の吸収と、駅間の回復運転による列車間隔の保持により、発生した遅延を解消することが可能となる。この2つの要素のうち、駅での吸収が満たされない場合、A駅に遅延が残存することとなる。一方で、AB駅間での回復運転が満たされない場合、発生した遅延がA駅からB駅に転移し、B駅に遅延が残存することとなる。つまり、遅延の解消には、双方の要素が必要となる。これらの事象を踏まえると、駅別及び駅間別で、その特性に応じた対応が重要であることが示唆される。つまり、遅延の波及・拡大抑制の視点においては、列車の運行管理は、駅で個々の列車のダイヤからの離れではなく、先行列車との列車間隔を保持するよう運行管理することが重要である。ある駅で、見た目の遅延回復を達成したとしても、それによって生じた列車間隔の縮小のために、次駅で遅延が波及する場合がある。これは遅延の回復でなく、列車遅延の顕在化する場所が転移したに過ぎない(図-5-20)。ただし、回復運転により、発着時分の短縮が達成され、無対策と比べてB駅の着時刻が数秒でも早まれば、それ以降の後続列車で遅延の回復が期待される。遅延発生時の駅での運行管理は、駅で待たせることが必ずしも遅延の波及を誘引するとは限らず、列車遅延の波及・拡大メカニズムを踏まえた列車運行に関する分析に基づき新たな基本方針が必要であることが、ここでも示唆される。

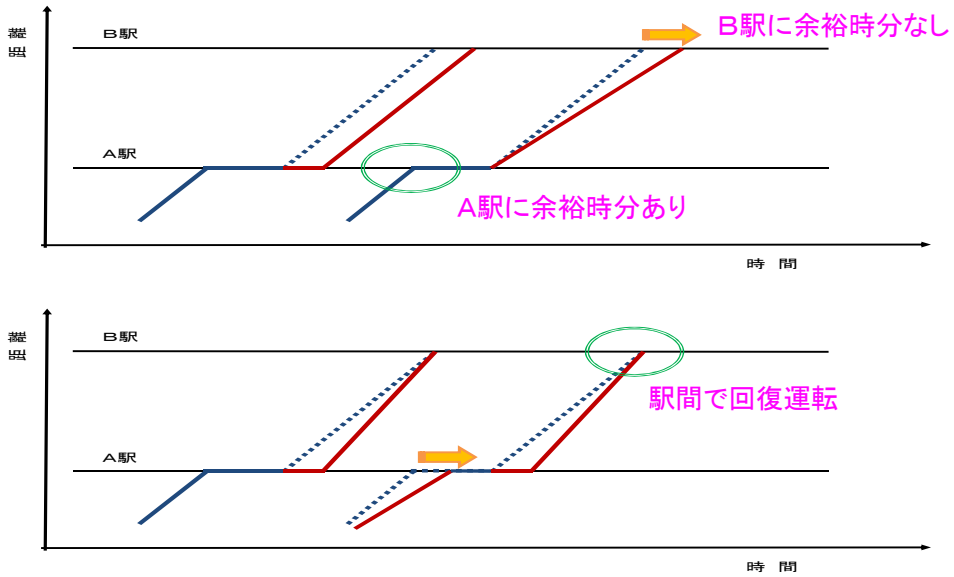


図-5-18 回復運転の例

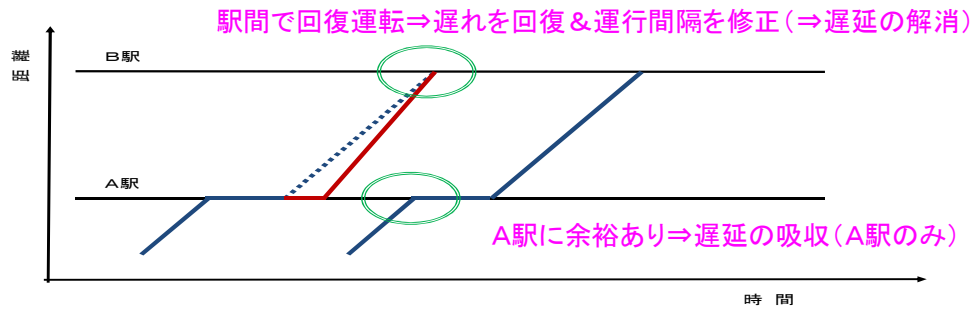


図-5-19 対策実施の効果が期待される駅

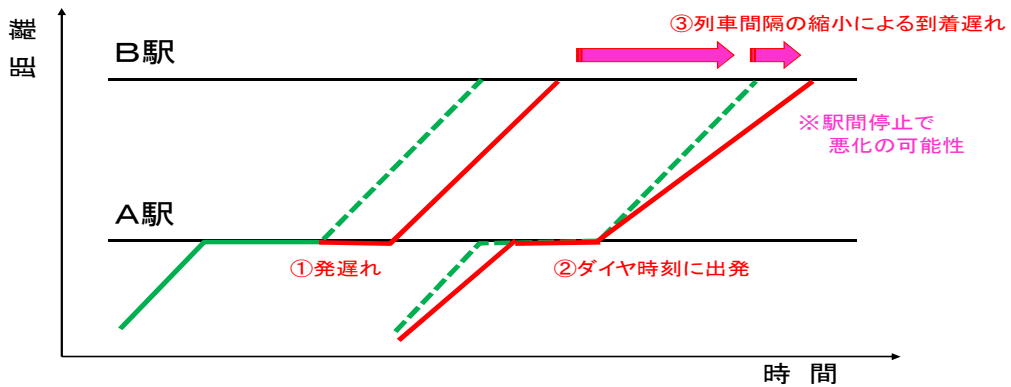


図-5-20 列車間隔と列車遅延の転移

5.4.3. 個別列車の運行管理

(1) 回復運転の走行パターン

高頻度運行を実施している路線においては、通勤時間帯に遅延が発生すると、駅での断面輸送力を確保するため、到着した列車は乗降が完了し次第、次々に出発させるといった運行手法がとられることがある。このとき、列車毎の間隔は通常以上に狭まるため、列車は駅間で加速と減速を繰り返し、時には駅間停止を強いられる。しかし、この方法は遅延時間を拡大させてしまい、列車毎の所要時間も増加することから、遅延の早期回復の妨げとなっており、結果的に輸送力を低下させていると考えられる。

そこで、旅客乗降と列車運行との連動性を考慮して、列車間隔を変化させ、当該列車及び後続列車の運行状況が、遅延の回復時間に与える影響を分析する。具体的には、図-5-21 に示すように、できるだけ駅で長く停車し、先行列車との距離をあけ、走行時間が短くできるような運行を探ることで、発生した遅延の早期回復を試みる。この方法の要点は、列車を間引くことなく、A 駅での停車時間を変数とし、B 駅への到着時刻が最早となる走行パターンを見出す点にある。

図-5-21 の青線は、B 駅で発生した先行列車の停車時間増加に伴い、B 駅手前において駅間停止が生じ、その後の再発車により B 駅に到着、利用者の乗降完了後に B 駅を発車する列車遅延時の走行パターンを示している。一方で先行列車との距離をあけるために、A 駅で出発時間調整を実施した場合の走行パターンを赤線で示している。赤点線の左側は、A 駅での出発時間調整が短い場合に、B 駅手前の駅間停止を回避することが出来ず、再発車後の走行パターンは青線と同じとなるケースである。右側は、出発調整時間を長く取りすぎた場合に、先行列車との間隔が広がったため駅間の走行時間は大幅に短縮されたものの、出発調整時間を含めた合計時分が増加し、駅間停止から再発車する走行パターンよりも、B 駅の到着時刻が遅くなるケースを示している。一方で、赤実線は適切な出発時間調整の実施により、駅間停止を回避し、列車性能を活かした最速の走行パターンではないものの、B 駅により早く到着する走行パターンを示している。赤実線の走行パターンは、高頻度運行下のラッシュ時間帯において、列車を間引くことなく輸送力を維持したまま、列車遅延の回復を可能とする走行パターンであり、本研究が目指すところの列車の運行管理手法の一つである。そこで、この赤実線の走行パターンについて、実際の路線における実現性について実証的分析を進めることとする。

高頻度運行下において、先行列車が次駅に停車している場合は、ATC による後続列車への信号現示は変化しないため、後続列車が当該駅を発車するタイミングに関わらず、

後続列車の走行パターンは同じとなる。後続列車の走行パターンの違い、及び走行時間の違いは、先行列車が次駅を発車した後に生じる走行挙動の違いによるものである。先行列車が次駅を発車するのに伴い、後続列車への信号現示が変化するため、先行列車の発車時点における後続列車の在線位置及び走行速度によって、その時点から次駅到着までの走行挙動に違いが生じることとなる。その結果、後続列車の走行パターンが異なり、次駅での発着時分、及び駅間の走行時間に違いが生じる。したがって、走行時間を短縮し、遅延を回復するための走行パターンとは、列車の走行挙動のうち、最後の部分にあたる発着時分を短縮することにより、走行時間の短縮を実現する運転手法である。よって、運行管理手法に着目した遅延対策において、発着時分の最小化の検討は有益なアプローチ方法であると言える。

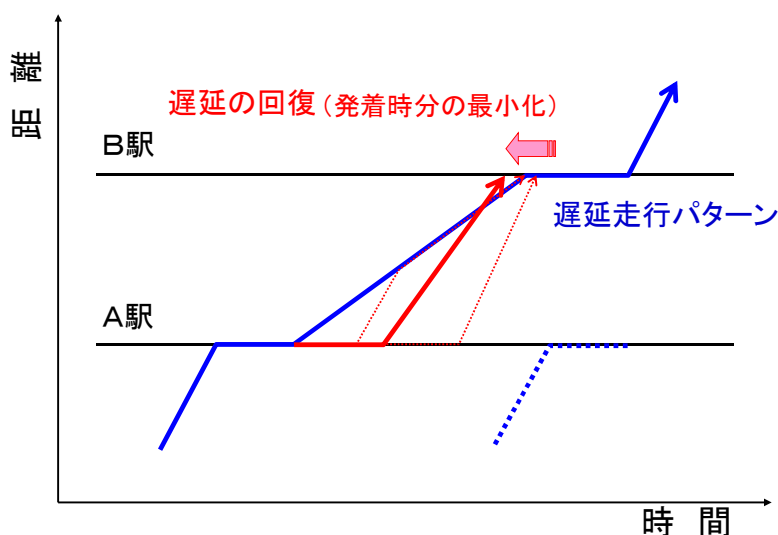


図-5-21 出発時間調整による着時刻の回復

(2) 遅延発生時の走行パターンのシミュレーション分析

前述のとおり、高頻度運行下における遅延発生時において、先行列車が次駅を発車する際に、後続列車の在線位置及び走行速度の違いによって、次駅における発着時分が異なる事例を図-5-22 に示す。図-5-22 はシミュレーションから得た渋谷駅における先行列車と後続列車の時隔曲線を示す。池尻大橋駅～渋谷駅間の走行時間が約 25 秒増加している場合において、池尻大橋駅での停車時間を 1 秒ずつ変化させた際の運行挙動の違いを示している。図には代表的な走行パターンを示す。なお、停車時間の変化を実施しない際の池尻大橋駅出発時刻を横軸の原点 0 秒とした。

ここで着目したい点の 1 つが、列車の出発時間の違いに対して発着時分の感度が低い

点である。池尻大橋駅における出発調整時間の幅は約 30 秒であるのに対し、渋谷駅での到着時刻の幅は約 10 秒となっている。もう 1 点は、駅出発時における列車間隔の最小化は、発着時分を最小化しない点である。池尻大橋駅出発時で列車間隔を最小とする出発調整時間 0 秒の走行パターンに対し、出発調整時間 9 秒を実施した場合の走行パターンは、発着時分を 4 秒短縮している。出発時間調整 0 秒の走行パターンは、先行列車が渋谷駅を発車する前に渋谷駅手前の閉そく区間まで達してしまっただけのため、安全区間の 1 閉そく分を確保し、駅手前で駅間停止が生じている。このため、先行列車が渋谷駅を発車した直後において、再発車に伴う時間ロスが発生していることが読み取れる。なお、本シミュレーションでは、事業者ヒアリングに基づき、10 秒の時間ロスを設定している。一方で、出発調整時間 9 秒を実施した走行パターンは、先行列車への接近が遅くなったことから、駅手前で駅間停止を回避することとなり、再発車に伴う時間ロスを生じることなく渋谷駅に到着している。その結果、出発調整時間 9 秒に走行時間を加算した合計時分で、より早く渋谷駅に到着する結果となった。渋谷駅手前で駅間停止が発生した走行パターンが、再発車に伴う時間ロスに費やす合間に、駅間停止を回避した走行パターンが追い抜いていることが読み取れる。一方で、出発調整時間 12 秒の走行パターンは、駅間停止を回避したものの、渋谷駅への進入速度が相対的に高かったため、渋谷駅に近い位置で減速を強いられ、結果として調整時間 0 秒の様な渋谷駅手前で駅間停止が発生した走行パターンとほぼ同じ到着時刻となった。また、出発調整時間 26 秒では、先行列車との列車間隔が十分に広がったため、走行速度の短縮幅は大きいですが、池尻大橋駅での調整時間が長く、走行時間と調整時間の合計時分では、渋谷駅手前で駅間停止が発生した走行パターンより若干遅い到着時刻となった。

これら走行パターンから逆算すると、池尻大橋駅～渋谷駅間における渋谷駅の発着時分は、先行列車が渋谷駅を出発する時に、後続列車は池尻大橋駅から約 1470m～約 1500 m の位置に在線している場合に、池尻大橋駅での出発時間調整を実施しない場合と比べて、渋谷駅へより早く到着する結果となった。これは池尻大橋駅での出発調整時間で、7 秒間の時間幅である。この結果から、遅延の回復における出発時間調整の効果と、効果が期待できる範囲に幅があることが示唆される。

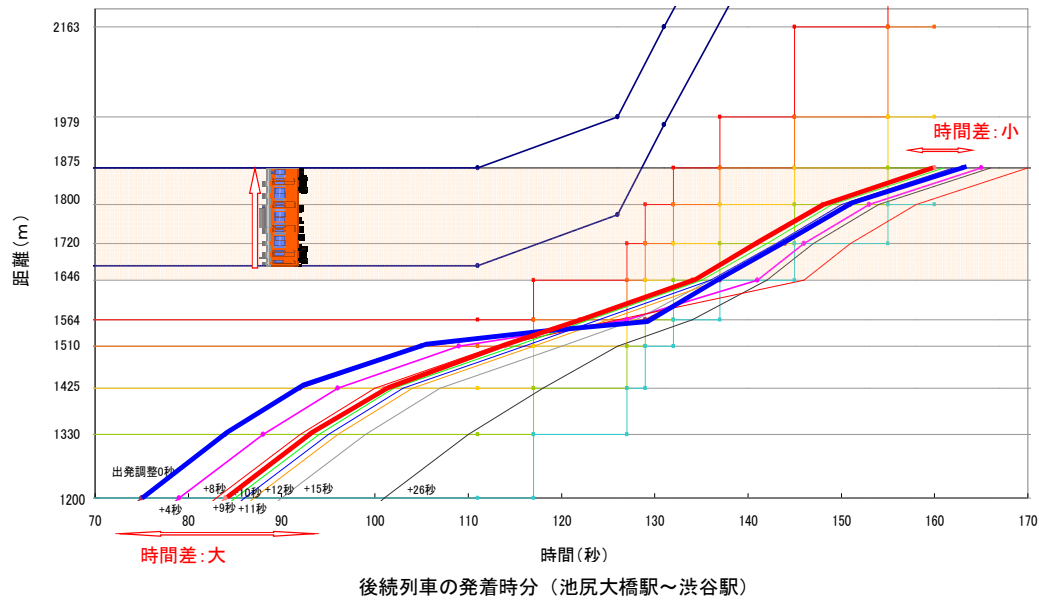


図-5-22 走行パターンと発着時分

(3) 走行パターン別の発着時分

前節の走行パターンと発着時分の関係性について、発着時分の短縮による遅延回復の観点から走行パターンを分類した分析を行う。対象区間は三軒茶屋駅～池尻大橋駅とする。まず、図-5-23 に三軒茶屋駅の出発調整時間の違いによる走行パターンの違いを示す。代表的な走行パターンを示しており、青線は0秒、赤線は9秒、黄線は16秒、緑線は29秒の調整時間とした場合の走行パターンである。青線は池尻大橋駅手前で駅間停止となる場合の走行パターンであり、赤線は池尻大橋駅での発着時分を最小とする場合の走行パターン、黄色線は赤線と緑線の間中間的な走行パターンを示している。緑線は運行ダイヤで設定されている走行パターンとなっており、ランカーブと同じ走行パターンである。青線、赤線、黄線の走行パターンは、池尻大橋駅に停車中の先行列車との接近により徐々に減速し、先行列車の駅出発により再加速をして池尻大橋駅に到着する運行挙動を示している。これを池尻大橋駅付近で拡大したものが図-5-24 である。赤線の走行パターンは、先行列車に接近し過ぎることなく、適度な列車間隔の保持で駅間停止を回避したことにより発着時分を短縮し、より早く池尻大橋駅に到着していることが見て取れる。これらの走行パターンの違いの要因である三軒茶屋駅での出発調整時間と、池尻大橋駅での発着時分との関係を図-5-25 に示す。青線に代表される駅間停止する場合の発着時分に対して、赤線に代表される範囲の走行パターンは発着時分が短縮され、列車遅延の回復が期待される走行パターンに幅があることが分かる。また、黄線の範囲であれば大幅な発着時分の増加が生じないことから、列車間隔の保持により遅延回復方

策の実効性が高いことが示唆される。なお、緑線に代表される範囲は、出発調整時間の実施時間分だけ池尻大橋駅の到着時刻が遅れることとなる。三軒茶屋駅～池尻大橋駅間においては、駅間停止する走行パターンが後続列車に伝播している場合は、十数秒単位での出発調整時分の実行が有効であることが分かる。これによる列車間隔の適切な保持が駅間停止を回避し、発着時分の短縮による列車遅延の回復が期待される。

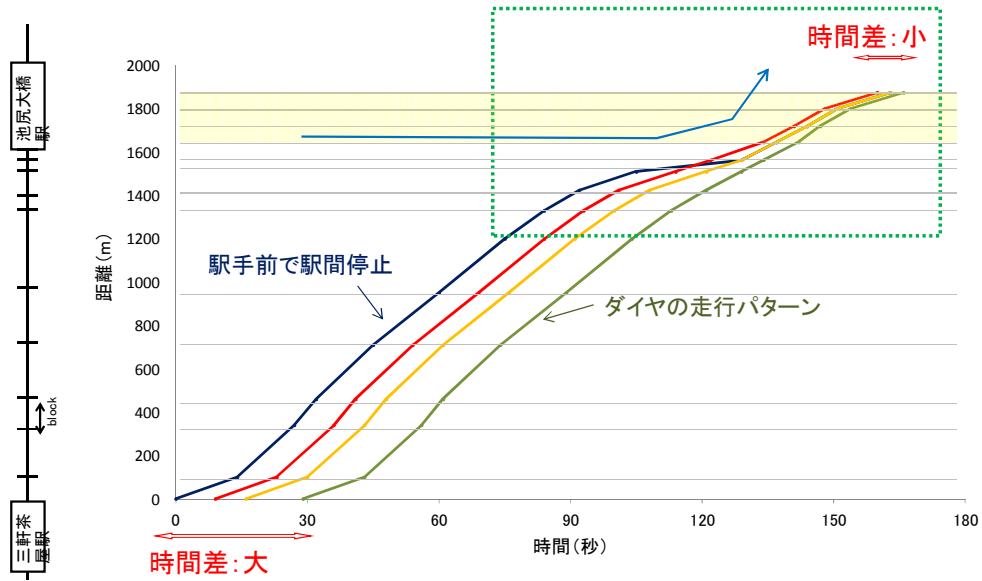


図-5-23 出発調整時間と走行パターン

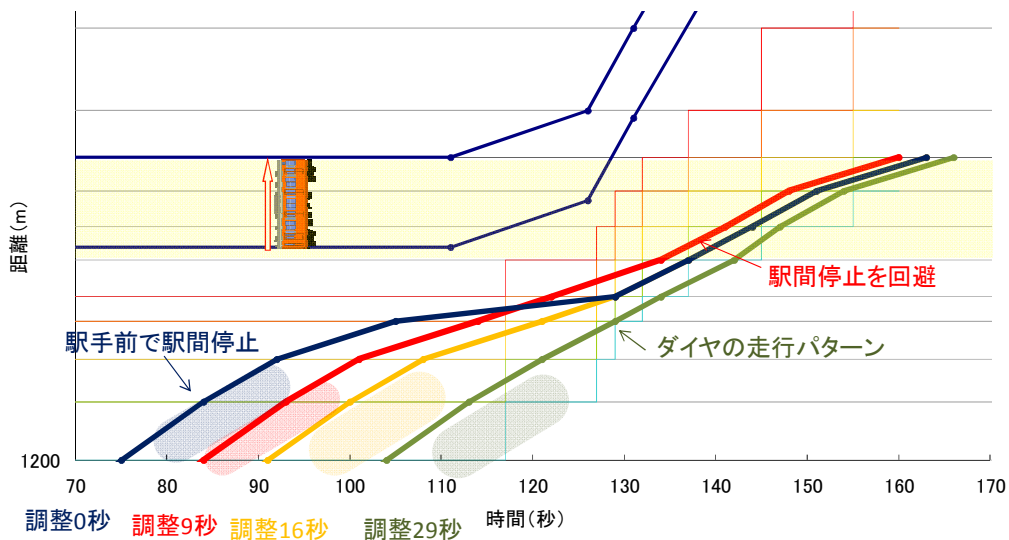


図-5-24 出発調整時間と走行パターン (拡大)

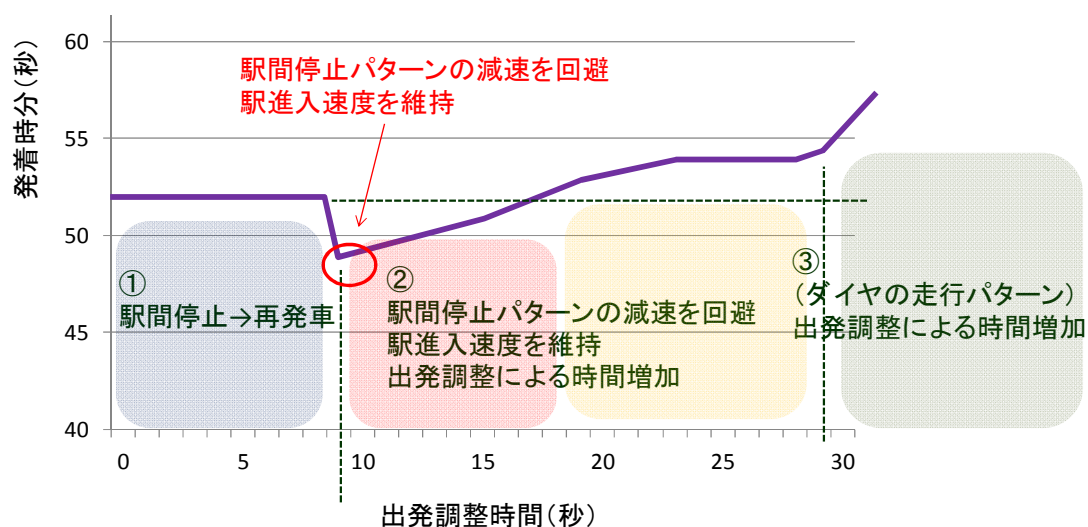


図-5-25 走行パターン別の発着時分

(4) 列車別の運行管理のイメージ

先述したとおり，高頻度運行下における遅延発生時の運行管理手法は，前へ詰めることが必ずしも最適とは限らず，遅れているときこそ，戦略的に待たせるとで，列車間隔の保持及び拡大を促し，走行時間の回復により遅延の回復が期待される．列車間隔を保持及び拡大する手法については，駅で待たせる出発時間調整のほか，駅間の走行において意図的に減速し，先行列車との列車間隔を保持する手法も考えられる．そこで，遅延発生時の列車別の運行管理手法として，駅間の走行速度に関する分析を行う．

駅間の減速による遅延回復手法のイメージを図-5-26に示す．本手法は，前節に記した駅での出発時間調整による列車間隔の保持及び拡大を試みる手法と，同様の基本方針に基づく手法であるが，遅延回復に対してより積極的な手法として位置付けられる．また，新たな遅延の発生リスクを低減することが可能な手法でもある．駅での出発時間調整による手法は，運行ダイヤにおいて駅に設定された余裕時分により，停車時間増加による後続列車への影響を見かけ上で回避した場合においても，当該列車と後続列車の列車間隔が縮小するため，次駅以降の駅において，列車間隔の縮小による遅延が顕在化する可能性を含んでいる．一方で，駅間の減速による手法は，発車駅での停車時間を増加することなく，列車を発車させるために後続列車との列車間隔が変化することなく，次駅以降の駅において新たな遅延が発生する懸念を回避することが可能である．また，走行時間の短縮及び遅延回復の必要条件となる発着時分の短縮について，発着時分は次駅での先行列車の発車時刻に依存するため，駅での出発時間調整により発着時分を制御す

ることは、膨大な実績データに基づき確率的に先行列車の発車時刻を推計することが必要となり、実質的に困難である。一方の駅間の減速による手法は、当該列車が動いていることによる対応の柔軟性と、遅延発生時における戦略的な走行パターンの設定により、発着時分の短縮及び最小化を狙った列車の運行管理の実施が期待される。以下に、駅間の減速による発着時分の最小化を狙った走行パターンの設定手法について記述する。

まずは、発着時分を最小化する最適地点の抽出を行う。ここで最適地点とは、発着時分を最小化する走行パターンにおいて、先行列車の駅発車時における後続列車の在線位置及び走行速度と定義する。後続列車がこの最適地点を越える場合は、先行列車との安全離隔を確保して、駅間停止を強いられることとなる。最適地点の抽出は、各駅間において、目指すべき発着時分を最小とする走行パターンを再現し、その走行パターンにおいて先行列車が次駅を発車する時点の後続列車の在線位置及び走行速度を算出する。前掲の図-5-22 の場合、先行列車の発車時に後続列車は池尻大橋駅から 1490km に在線し、走行速度 27km/h の条件を満たしている場合に発着時分の最小化が達成される。次に、駅間の減速を実施する当該列車の減速開始地点を抽出する。後続列車の駅進入に影響しない駅出発後の減速開始地点であり、当該列車はこの地点までは最高加速度及び最高速度で走行することが必要となる。上記のとおり抽出された最適地点と減速開始地点を、運転曲線図上にプロットし、列車性能及び閉そく区分を考慮して 2 地点を結ぶように運転曲線を描画する。駅間に在線する列車を 1 編成のみとする大手民鉄で一般的な長さの駅間長の場合、減速開始地点を通過後、直ちに減速して最適地点と結ぶ。この様にして得られた運転曲線が、遅延発生時において発着時分の最小化を狙った走行パターンである（図-5-27）。遅延発生時にこの走行パターンを実践することにより、次駅での先行列車の発車時刻に依存するなかで、当該列車の発着時分を短縮あるいは最小化する可能性の向上が期待できる。

図-5-28 は、任意の駅間において遅延発生時に通常の運転手法を適用した場合と、上記の走行パターンによる運転手法を適用した場合における運転速度及び運転時分のイメージを示している。遅延発生時に走行パターンを適用した場合は、先行列車との列車間隔の保持により、不効率な加速及び減速が回避され、発着時分が短縮されたため、結果として通常の運転手法より運転時分が短くなることを表している。

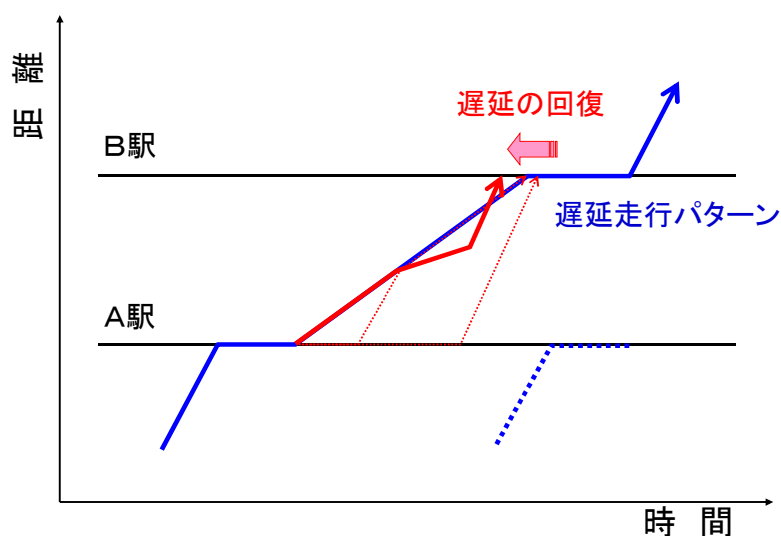


図-5-26 減速による回復運転のイメージ

上述の列車遅延発生時において駅間で減速する走行パターンについては、次駅を先行列車が発車するタイミングは確率的な要素であるため、当該列車が最適地点に到達する前に発車する場合と、最適地点を越えても発車しない場合の双方の可能性が想定される。最適地点に到達する前に発車する場合については、前掲の図-5-22 で示しているとおり、駅間の中間位置での在線位置及び走行速度の違いに対する次駅到着の発着時分の感度は低いため、本手法の実施の有無による到着時刻への影響は小さい。一方で、本手法を適用しても最適地点を越えてしまう場合は、通常の運転手法においても、同様に駅間停止が生ずる。本手法は、次駅を先行列車が発車するタイミングが早い場合でも、通常の運転手法より到着が遅れることなくほぼ同じ時刻に到着が可能である一方で、遅延の拡大につながる駅間停止を回避する確率が大幅に向上することが可能となる。なお、駅間停止する場合は、再発車時に最も発着時分を短くする停止位置を算定し、その位置に停止しておくことで、負の影響を最小限に抑えることも可能である。

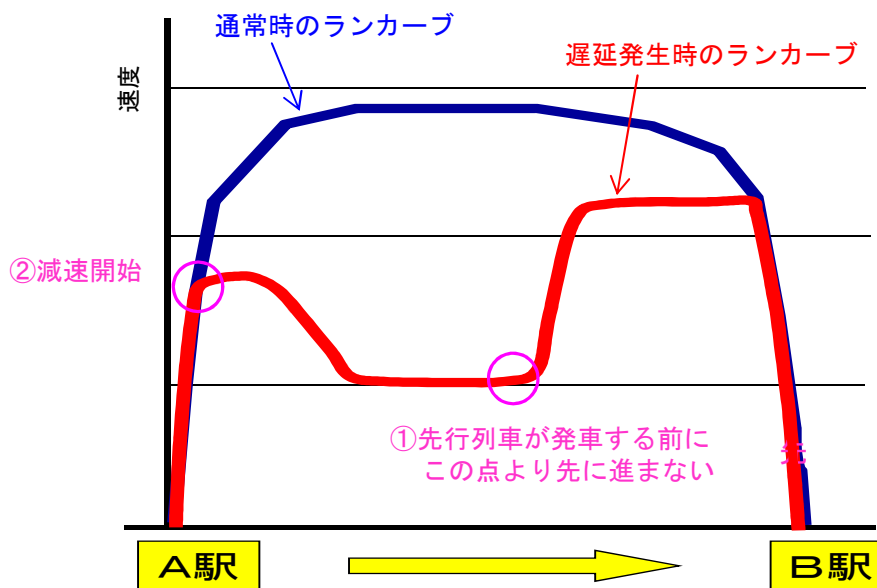


図-5-27 列車遅延時用の走行パターン

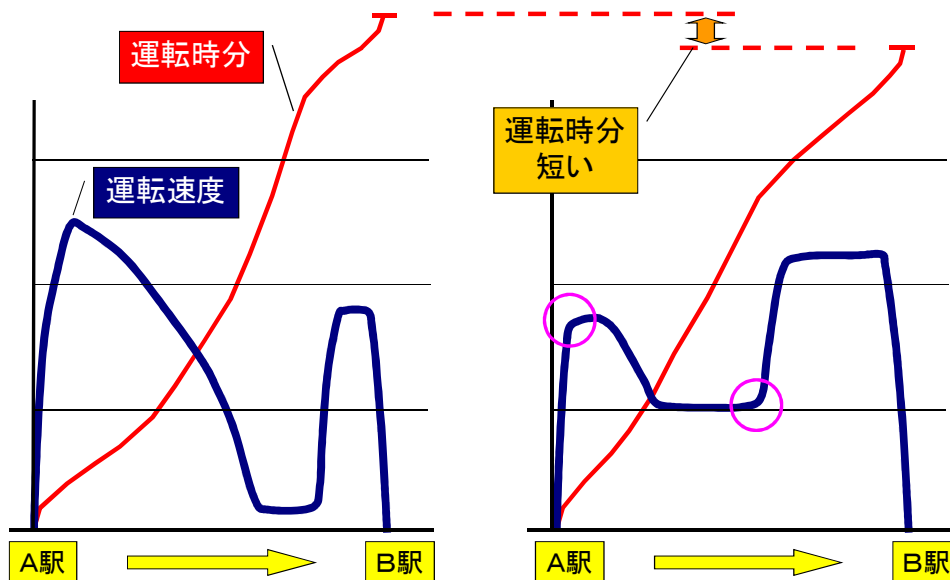


図-5-28 走行パターンと駅到着時間

5.5. 本章のまとめ

前章で構築したシミュレーションモデルを用いて、実際の線路閉そく区分に基づく信号システムを考慮した列車運行挙動と列車遅延に関する分析を行った。

連続する列車群の運行挙動の分析から、線路上の列車運行においても自動車交通と同様の交通流の現象が生じており、運行本数の増加により走行速度の低下が生じることを明示した。特に路線容量を決定するボトルネック駅の処理容量を越えると、当該駅の通過速度が路線全体を支配することを定量的に示した。このとき、ボトルネック駅手前で駅間停止が生じることから、当該駅での停車時間の増加量が後続列車の走行時間に直接付加され、路線全体の遅延時間が増幅することとなる。このため、列車遅延の拡大抑制方策として、駅間停止を回避することの有効性を定量的に示した。また、駅停車時間の増加による列車遅延の発生だけでなく、列車の運行間隔の乱れによる列車遅延の発生を例示し、列車遅延対策における列車運行間隔を保持した運行管理、及び駅部と駅間部との連動による一体的な対策検討の必要性を提示した。

次に、個別列車の運行挙動の分析から、駅間の列車走行において次駅への接近が必ずしも駅到着間隔を最小としないことを例示した。また、列車走行状態について、駅到着間隔が同程度に保たれる範囲の存在を定量的に示し、最適な列車走行パターンの検討による列車遅延の早期回復方策の可能性を示唆した。

これらを踏まえて、列車遅延対策の基本的な考え方として、列車の運行管理の視点から列車間隔に着目した遅延回復方策についての対応方針を整理した。連続する列車群の運行管理については、運行計画における駅部と駅間部の余裕時分に関する特性から、駅別に実施する遅延対策が見かけ上の遅延回復に過ぎず、路線のボトルネック箇所に列車遅延を集積する可能性を提示し、対策実施にあたって意識の共有化の必要性を提言した。個別列車の運行管理については、走行パターン別の駅到着時間の分析から、駅到着時間を最小とする走行パターンの設計手法を提案した。

次章では、本章の知見を踏まえて具体的な列車遅延対策の検討を行うこととする。

参考文献

- 1) 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, I_1001-I_1010, 2011.
- 2) Kariyazaki, K., Hibino, N. and Morichi, S. : Simulation Model for Estimating Train Operation to Recover Knock-on Delay Earlier, *Asian Transport Studies*, Vol.2, No.3, pp.284-294, 2013.
- 3) 荒屋真二, 曾根悟 : 都市形軌道輸送システムの列車群制御とシミュレーションによる特性解析, 電気学会論文誌 C, Vol.101, pp.17 -24, 1981.
- 4) 平尾祐司, 長谷川豊, 稲毛弘苗, 平栗滋人 : 列車制御シミュレータ UTRAS の開発と信号方式の評価, 鉄道総研報告, Vol.9, No.1, pp.55 -60, 1995.
- 5) 清水紀宏, 坂下修, 永田剛士, 村田悟 : 遅れ時分を考慮した新しい運転方式の開発, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.201-202, 1998.
- 6) 菅原宏之, 中村英夫 : GA を利用した運転時隔短縮に関する検討, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.203-206, 1998.
- 7) 馬場裕一, 立石幸也, 森健司, 青柳繁晴, 武子淳, 齋藤信哉, 鈴木康明, 渡邊貴志 : 無線による列車制御システム (ATACS), JR EAST Technical Review, No.5, pp.31-38, 2003.
- 8) 馬場裕一 他 : 無線による列車制御システム(ATACS) ; JR EAST Technical Review No.5 Autumn, pp.31-38, 2008.
- 9) 平尾裕司 : 無線を利用した列車制御システムの世界の動向, JR EAST Technical Review, No.43, pp.1-4, 2013.
- 10) 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, No.5, pp.1025 -1034, 2012.
- 11) 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.
- 12) 財団法人鉄道総合技術研究所鉄道技術推進センター, わかりやすい鉄道技術 [鉄道概論・車両編・運転編], 2005.
- 13) 成山堂書店, 『列車ダイヤと運行管理』, 2008.
- 14) オーム社, 『鉄道ダイヤ回復の技術』, 2010.
- 15) 一般社団法人交通工学研究会, 交通工学ハンドブック 2014.

第6章

高頻度運行下における列車遅延対策の検討

第6章 高頻度運行下における列車遅延対策の検討

6.1. 概説

本章では、前章までの知見を踏まえて、列車運行管理の視点から列車遅延対策の検討を行う。高頻度運行を実施している路線においては、一度遅延が発生すると、ダイヤを回復させる余裕時間が殆どないため、駅での列車到着間隔こそ等間隔でダイヤどおりであったとしても、列車間隔の縮小による駅間の走行時間の増加により、目的地までの所要時間の増加が発生する。これはラッシュ時間を過ぎて、ダイヤの運行間隔に余裕時間が生ずるまで継続する。このような状態がまさに定常化しているのであれば、そもそものダイヤ設定を見直すべきではないかという議論がある。また、ある列車への利用者の集中等により遅延が発生した場合、運行する列車間隔の乱れにより、ダイヤで計画された単位時間当たりの列車本数を運行できず、輸送力の低下が生じている場合がある。その一例が、トラブル等により一時的に運行を見合わせた後に、再開した場合の運行状態である。運行見合わせ中に発生した大量の利用者が、駅に停車中の列車に集中するため、当該駅の出発時だけでなく、次駅以降においても乗降時間の増加が生じる。

そこで本章では、遅延発生時に過密となった列車間隔を駅及び駅間で拡張するための運行管理手法について検討を行う。そして、路線の輸送力の観点から、実態に即した運行ダイヤの検討と、輸送障害時における運行再開時の列車遅延についても検討を試みる。

6.2. 既往手法の効果と課題

6.2.1. 列車運行の間引き

高頻度運行下においては、何らかの要因により発生した列車遅延が、路線全体へと波及する。運行ダイヤに余裕時分が殆ど設定されていない列車運行が続くため、ひとたび列車遅延が発生すると、その遅れ時間を回復することができずに蓄積され、その影響は後続列車へ次々と伝播し、上流駅間へと波及する。列車遅延を回復する最もシンプルな方法は、余裕時分を与えることである。運行ダイヤ上で計画される列車1本を運休させる場合、当該列車の運行間隔分の時間がそのまま余裕時分となる。いわゆる間引きの実施であり、実務上の運行整理においても一般的に適用される列車遅延の回復手法である。

ここで、朝ラッシュ時間帯に列車遅延が顕在化している状態において、列車1本を運

休させた場合に期待される列車遅延の回復効果を計測するシミュレーションを実施する。まず、駒沢大学駅～半蔵門駅間において、最大で約5分の列車遅延が発生した場合の列車運行状態を再現する。運休する列車1本は、列車遅延が拡大する直前の初期段階の列車を対象とすることとする。ここでは、運行ダイヤ上で渋谷駅7:55到着の列車について、駒沢大学駅発を休止する。列車の運休を実施するためには、引き上げ線等の施設が必要となるが、ここでは運休による列車遅延への影響把握を目的としているため、施設等による制約条件が無いものと仮定する。また、高頻度運行下において余裕時分が路線全体の運行状態へ及ぼす影響について把握することとし、運休を実施した列車の後続列車において発生する混雑率の増加、及びこれに伴う駅停車時間の増加については、考慮しないこととする。そのため、列車別、駅別の停車時間は、初期状態と同値とし、変化しないものとしてシミュレーションを実施する。初期状態の列車遅延の構成図を図-6-1（左図）に、列車1本の運休を実施した場合のシミュレーション結果を図-6-1（右図）に示す。初期状態で発生していた最大約5分の列車遅延は、2分30秒程度まで縮減されている。9:00過ぎに大幅な停車時間の増加が発生しているため、これに伴い列車遅延のピーク時間に変化はないものの、運休実施のシミュレーションにおいては、ピーク前後の列車遅延が大幅に縮減されており、9:00以前の時間帯においては、列車遅延が拡大することなく、1分程度の遅延時間に抑えられている。列車遅延が拡大し始めるタイミングで適用した列車1本分の150秒の余裕時分の効果により、路線全体の列車遅延の大幅に抑制する結果となっている。しかしながら、実際には、ラッシュ時間帯の運休による輸送力低下の影響は非常に大きく、その後続列車において、新たな遅延を発生させることから、運休を実施せずに実行可能な列車遅延対策の検討が必要である。ただし、ラッシュ時間帯の終盤においては、運休の輸送力低下による後続列車への影響は小さくなることから推察され、運休の実施のタイミングについては、路線別に検討する価値が高い施策であることが示唆される。

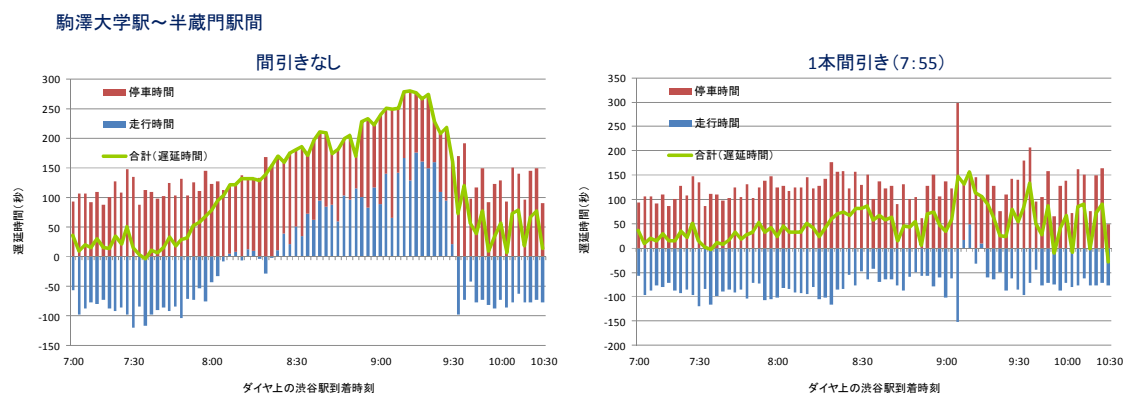


図-6-1 列車遅延時間の比較

6.3. 運行間隔の保持による拡大抑制

6.3.1. 列車の等間隔運行

(1) 始発駅における間隔調整

前章でも述べたとおり、高頻度運行下における列車の運行管理は、列車遅延の拡大抑制の視点から、前へ前へと詰めることが、必ずしも最適な運行管理手法ではない。列車の運行間隔の狭小は新たな列車遅延を生じさせることとなるため、適切な列車間隔を保持することは、列車遅延発生時の運行管理において重要かつ基礎的な要素となる。ここで、列車の運行間隔と列車遅延についてのシミュレーション分析を実施する。朝ラッシュ時間帯に列車遅延が顕在化している状態において、列車運行間隔の最小値を設定し、全ての列車において、最小値以上の運行間隔を保持して運行した場合のシミュレーションを実施する。駅での旅客乗降が完了し、直ちに出発できる状況にある場合においても、必ず列車運行間隔の最小値まで待たせてから駅を出発することとする。本対策は全ての駅において実施した場合が、最も効果的であると考えられるが、実務的に、各駅で列車の運行間隔を管理する手法が整備されていないこと、また駅員の取り扱いが増えることから実行が困難と考えられることから、本シミュレーションでは、本対策の運行管理が比較的容易に実施可能であると考えられる始発駅のみを対象駅として行うこととする。

駒沢大学駅～半蔵門駅間において、運行ダイヤ上で渋谷駅 7:55 到着の列車において、駒沢大学駅で停車時間の増加による列車遅延を発生させ、路線全体で最大約 7 分の列車遅延が発生した場合の列車運行状態を再現する。運行ダイヤで設定されている最小運行間隔は 125 秒であることから、駒沢大学駅を始発駅と仮定し、駒沢大学駅での列車運行間隔の最小値を 125 秒として設定し、駒沢大学駅において列車運行間隔を保持した場合のシミュレーションを実施する。

(2) 等間隔運行の効果

無対策である初期状態の列車遅延の構成図と、駒沢大学駅発の列車運行間隔を保持した場合の列車遅延の構成図について、列車別の所要時間の増加量の比較を図-6-2 に示す。青色が初期状態であり、赤色が対策実施時の所要時間の増加量である。初期状態における最大約 7 分の列車遅延は、約 5 分まで縮減されている。無対策の場合、8:30 頃から所要時間の増加量が拡大し始めているが、列車間隔を保持した場合は、増加量の拡大が抑制されている。双方の差分は、列車間隔を保持することなく、前へと詰め過ぎたこと

により生じた列車遅延であり、列車間隔を詰め過ぎることにより、新たな列車遅延が発生することを示している。列車遅延発生時において、遅延回復のために、駅で停車時間の縮小を図ることは有効な対策であるものの、これに伴い運行ダイヤで設定された最小運行間隔よりも早く列車を出発させてしまうと、逆に列車遅延が拡大してしまうこととなる。また、ミュレーション結果の回復時間は、列車を詰め過ぎたことにより発生した遅延であり、列車間隔を保持した適切な運行管理を実施することにより防ぐとこの可能な列車遅延と言うことができる。駅での列車運行管理において、前へ進めることが必ずしも最適ではなく、最小の列車間隔を保持した列車運行が重要であることが示唆される。

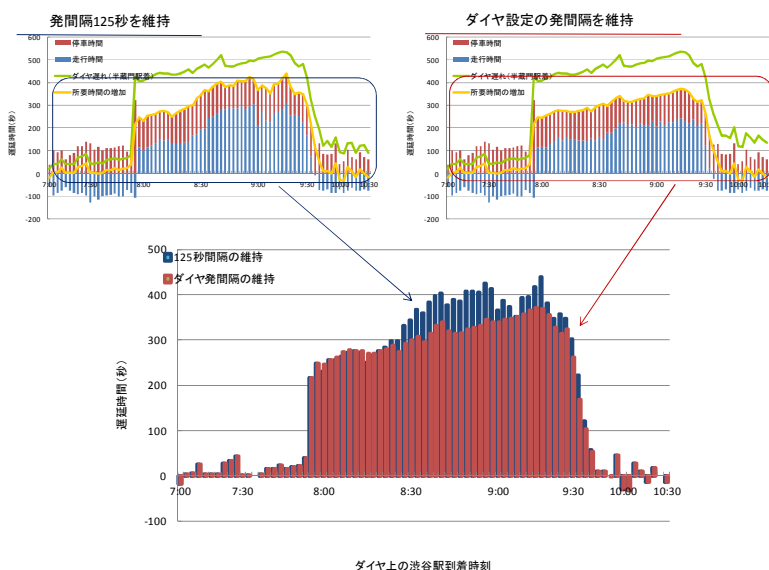


図-6-2 所要時間の増加量の比較

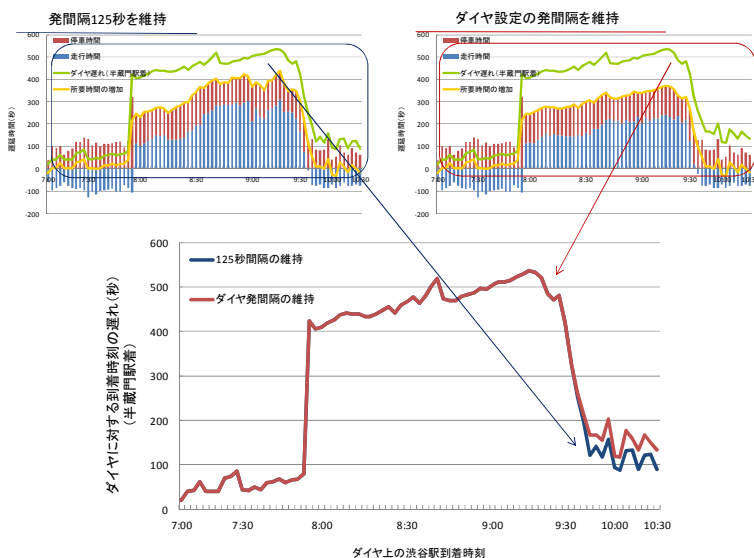


図-6-3 到着時刻の増加時間の比較

6.3.2. 群管理による運行間隔の保持

前方列車の発車と同時に後続列車も駅を発車させる古典的な列車運行法は、運行間隔が十分に大きい路線においては非常に有効な手法である。しかし、今日の東京圏鉄道のように高頻度運行を実施している路線においては、通勤時間帯に遅延が発生すると、駅での断面輸送力を確保するため、到着した列車は乗降が完了しだい次々に出発させるといった運行手法がとられている。このとき、列車毎の間隔は通常以上に狭まるため、列車は駅間で加速及び減速を繰り返し、時には駅間停止を強いられる。しかし、この方法は遅延時間を拡大させてしまい、列車毎の所要時間も増加することから、遅延の早期回復の妨げとなっており、結果的に輸送力を低下させていると考えられる。

そこで、本節では高頻度運行路線において、一時的には断面輸送量が低下するが、あえて列車間隔を拡げる手法を取ることで、高頻度運行下にある列車の運行状態がどの様に変化するかを定量的に把握することとする。

(1) 特定列車に対する運行間隔の保持

前章の図-5-4において、列車間隔を保持した運行を実施した際の効果を計るため以下のシミュレーションを行う。二子玉川駅で発生する列車の運行間隔を125秒とし、列車No.1の池尻大橋駅での停車時間の増加量を120秒とした場合において、後続の列車No.3以降の列車がそのときに停車あるいは次に停車する駅において、其々の停車時間を増加させ、列車No.1の池尻大橋駅出発に合わせて、各列車が各々停車している駅を出発する。この様な列車間隔を保持した運行を実施した場合と、列車間隔の保持を実施しない場合とにおいて、半蔵門駅における到着遅延時間の比較を行う。なお、列車No.2は池尻大橋駅の手前で駅間停止をしているため、間隔保持の対策は実施していない。

列車間隔の保持を実施しない場合に対して、実施した場合の半蔵門駅における遅延回復時間の構成を図-6-4に示す。後続の列車No.3以降は、駅での出発時間調整をしたため、その停車時間分だけ遅延が大きくなる。しかし、列車間隔が保持されたことにより、先行列車との接近に伴う駅間の走行速度の低下が抑制されたため、対策を実施しない場合と比べて駅間の走行時間が短縮している。その結果、僅かではあるが、列車No.4以降で半蔵門駅の到着時間が早まっている。その遅延の回復時間は徐々に拡大し、列車No.8では11秒の回復する結果となっている。

この様な列車間隔の保持は、走行時間の回復が期待されるが、一方で駅での停車時間が通常よりも増加する。本検討では、列車No.1と同時発車するように設定した結果、

停車時間が60秒～90秒の増加となるような計算結果になった。このため、出発時間調整をした列車は通常よりも多くの利用者が乗車すると考えられ、車内混雑の増加やそれに伴う次駅以降の新たな遅延の発生が懸念される。そのため、上述の対策について検討を深度化するには、図-4-14で示したような列車の運行間隔と乗降時間の関係を考慮し、分析を行っていく必要がある。

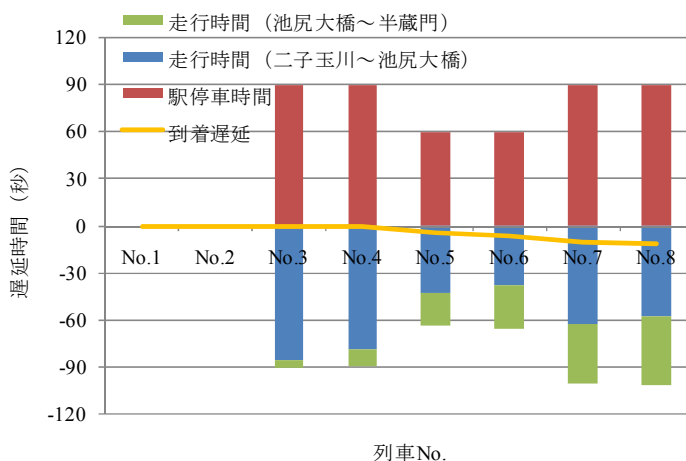


図-6-4 出発時間調整による遅延回復時間の構成

(2) 特定区間における運行間隔の保持

列車間隔の詰まりにより、駅間での走行時間が増加している区間では、ひとたび走行時間が増加するとその後もその増加時間が区間を通過する列車に引き継がれるため、走行時間増加による列車遅延の回復が遅くなる。そこで、走行時間の増加が発生している区間において、それより上流に位置する全ての列車に対して一時的な停車を実施する。シミュレーションでは通常時80秒程度の走行時間が170秒程度まで増加した三軒茶屋駅～池尻大橋駅間(19日)において、その駅間に進入する上流側の列車を同時に60秒停車させた。その結果、先行列車と適度な間隔が確保されたことで、この駅間の走行時間は105秒程度まで回復し、二子玉川駅～池尻大橋駅間の5駅間の所要時間は、一斉停車後の列車21本において1本当たり34秒の回復、所要時間の合計で約12分回復する結果となった(図-6-5)。実際のラッシュ運転時間帯では、停車による乗客の増加により、新たな遅延が発生することが考えられるため、この様な列車の一斉停車を実施するタイミングの判断は非常に難しい。しかし、ピーク時間帯を過ぎた後もダイヤが乱れており、短時間の遅延が残っている場合においては、その実施は可能であると考えられる。この場合、ピーク時間帯を過ぎているので、乗客による新たな遅延発生の心配もさ

ほどなく、運転整理による輸送量低下を招くこともない。一斉停車による間隔調整がなされることで、早期のダイヤ回復が期待できる。通常時と遅延発生時、あるいは遅延発生時も短時間の遅延と長時間の遅延とでは、駅での乗降や列車運行の状況が異なる。全て同様の運行方法ではなく、それぞれの状況に合わせて運行方法の簡易な工夫により、遅れの拡大を抑制あるいはダイヤの早期回復の可能性が示唆される。

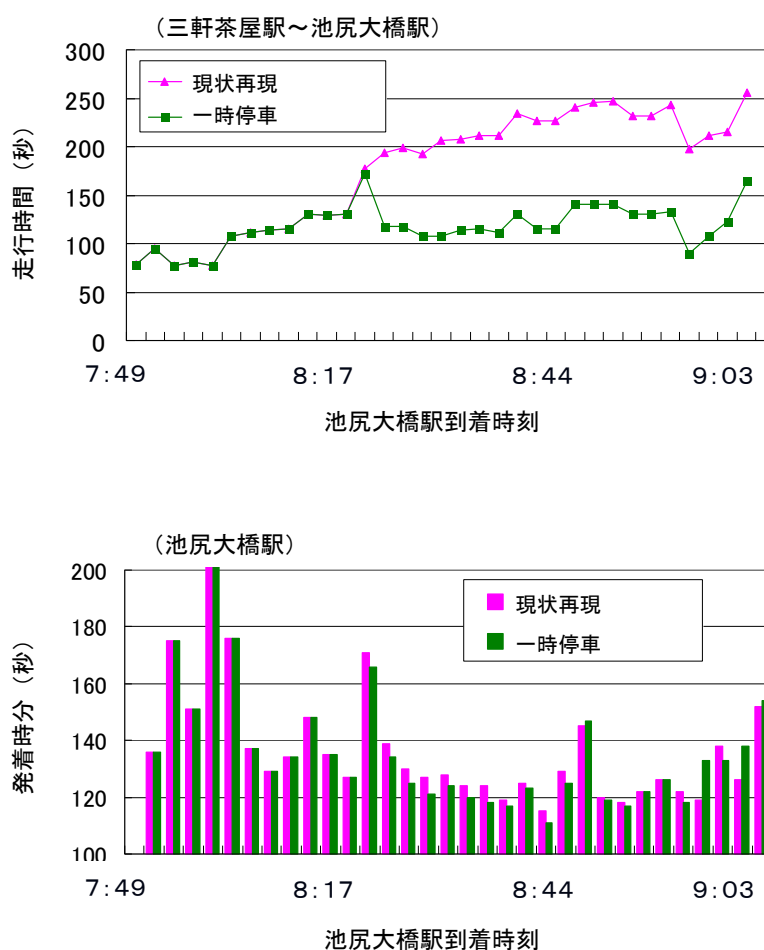


図-6-5 列車別の走行状態の変化

6.4. 個別列車の間隔拡大による早期回復

6.4.1. 列車間隔と発着時分

前章で述べたとおり，先行列車との適切な列車間隔を保持した運行は，列車遅延発生時における駅間停止を回避し，発着時分の短縮による到着時刻の回復が期待される．ここでは図-6-6に示すように，後続列車への影響を考慮しながら可能な限り駅での停車時間を延長し，先行列車との空間的及び時間的な距離を拡げ，発着時分を短縮する走行パターンによる列車走行を探ることで，発生した遅延の早期回復を試みる．これは列車を間引いて輸送力を低下することなく，停車時間あるいは走行時間を変数として列車の到着時刻を回復する方策の検討である．

次節以降では，まず図-6-7の停車時間を変数として，駅における出発時間調整による回復方策の効果を検討する．本手法の利点は実施の容易性であり，適用に際して技術的及び制度的な課題がないことである．しかしながら，次駅に停車する先行列車の出発時刻が不確定要素であることから，調整時間の設定が困難であり，調整時間の合理的な根拠に乏しい欠点を有している．そこで，次に図-6-8の走行時間を変数とした回復方策を検討する．本手法の利点は後続列車との列車間隔が保持されること，先行列車の出発の不確定要素に対して柔軟性を有していること，また事業者が遅延対策として実施している手法の発展であり理解を得やすいことが挙げられる．他方で，駅での出発時間調整の手法と比べて，空間的及び時間的な距離の調整量が小さい欠点を有するものである．

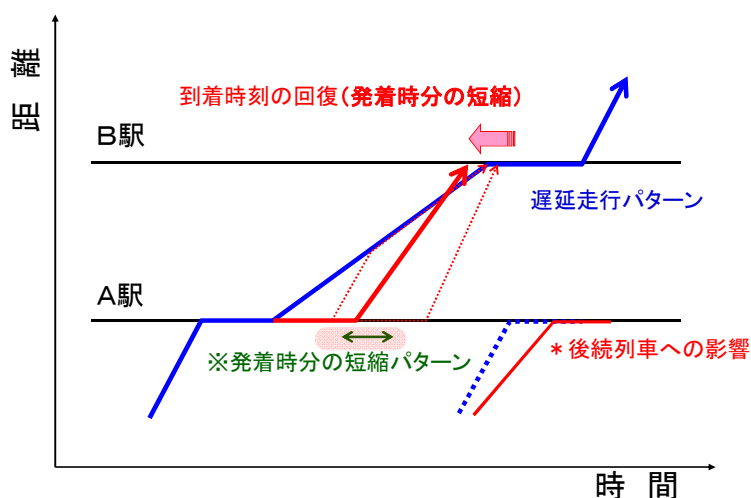


図-6-6 列車間隔の保持と到着時刻のイメージ

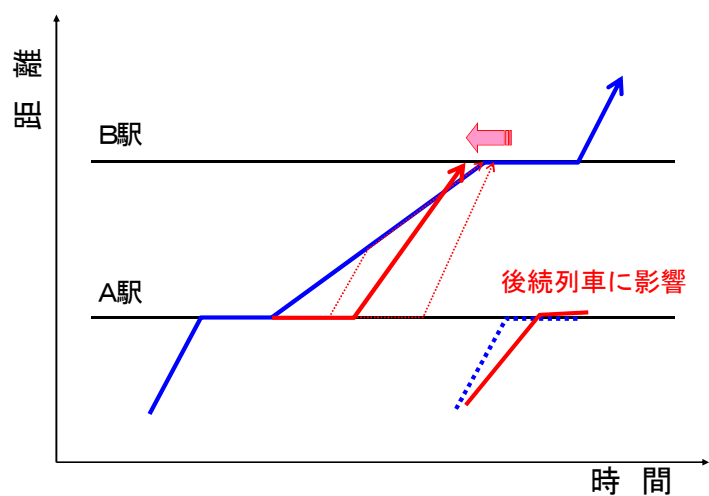


図-6-7 出発時間調整による発着時分の短縮

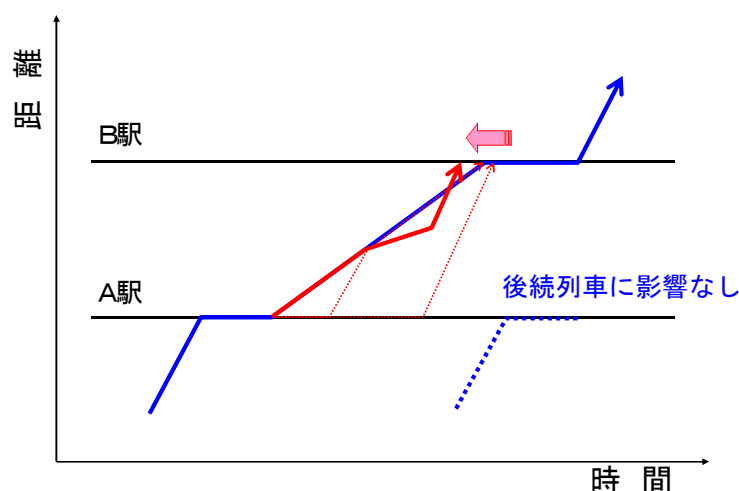


図-6-8 減速走行による発着時分の短縮

6.4.2. 発着時分を短縮する出発時間調整の検討

(1) 出発時間調整と到着時分

東急田園都市線において、定常的に駅間走行時間の増加が発生している区間の一つが池尻大橋駅～渋谷駅間である。ターミナル駅である渋谷駅での停車時間の増加等により発生した列車遅延が、駅間を走行する後続列車に波及するためである。そこで、列車遅延の発生により駅間走行時間が増加した池尻大橋駅～渋谷駅間において、池尻大橋駅における出発時間調整の実施による、駅間走行時間の回復効果について検討を行う。

当該駅間においては、定常的な列車遅延の初期段階として、40秒程度の駅間走行時間の増加が見られることから、渋谷駅において停車時間の増加40秒が発生したものと仮定し、列車遅延の発生状況を再現することとする。列車運行間隔は125秒とする。渋谷駅で停車時間が増加した列車を列車⑮とし、後続列車の列車⑯について池尻大橋駅で出発時間調整を実施する。出発調整時間は0秒から60秒まで5秒単位で変化させ、13ケースのシミュレーションを行う。列車遅延の回復の指標は、出発時間調整を実施する列車⑯の2つ後続の列車⑰が、渋谷駅に到着する時刻変化を計測することとする。発生した列車遅延は、後続列車に連鎖して波及するのと同様に、列車遅延の回復についても、一つの要因を機会として後続列車へ連鎖して回復する。これまで実施したシミュレーションから、列車遅延の回復の機会となった列車から、2つ後続の列車において遅延回復の連鎖が生じている場合、それ以降の後続列車についても同様に列車遅延が回復する傾向が分かっている。このため、列車遅延の回復の指標として、2つ後続の列車⑰の渋谷駅到着時刻の変化を採用する。

図-6-9にシミュレーション結果を示す。図の横軸は列車⑯の池尻大橋駅での出発時間調整の変化であり、縦軸は列車⑮の停車時間増加が発生しなかった場合に対する各列車の渋谷駅到着時間の増加量である。出発時間調整の0秒は、本対策を実施しなかった場合に、列車⑯は渋谷駅に37秒の時間増加で到着することを示している。運行ダイヤが有する余裕時分により、出発時間調整の対策と関係なく3秒の遅延回復が見込まれる。

出発時間調整5秒及び10秒は、無対策の0秒と同じ増加時間であることから、調整時間が十分でなく、無対策と同様に渋谷駅手前で駅間停止が発生したことが読み取れる。調整時間15秒は駅手前の駅間停止を回避できたものの、先行列車に接近したことで駅上ないでの減速あるいは駅間停止を強いられ、渋谷駅到着時間が増加したものと考えられる。調整時間20秒は駅手前の駅間停止を回避し、かつ先行列車との適度な列車間隔の保持により、発着時分を最小とする走行パターンを実践したものと考えられ、列車遅延が約6秒回復している。調整時間25秒以降は、出発調整時間の実施により渋谷駅に停車する先行列車との列車間隔が拡大し、駅間の走行時間の短縮がなされているが、出発調整時間そのものによる増加時間の影響により、出発調整時間の増加に比例して渋谷駅到着時間も増加する結果となっている。後続の列車⑰と列車⑱についても、列車⑯とほぼ同様な傾向を示している。これらの結果から、渋谷駅で先行列車の停車時間40秒が発生した場合については、後続列車は池尻大橋駅で20秒の出発時間調整を実施することにより、列車間隔が適切に保持されて列車遅延の回復が図れることが分かる。ただし、先行列車の停車時間の増加の程度、つまり出発するタイミングにより、後続列車が実施する適切な出発調整時間は異なることとなる。

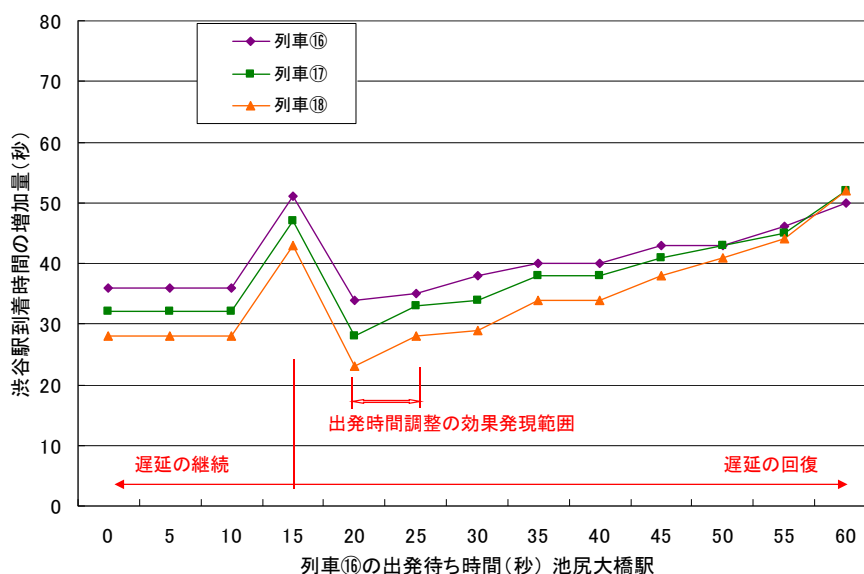


図-6-9 出発調整時間と到着時間の増加量

(2) 出発時間調整の適用範囲

池尻大橋駅での出発調整時間の実施について、池尻大橋駅～渋谷駅間の走行時間の増加量別による、効果の発現範囲を図-6-10に示す。後続列車2本目で遅延が回復していると、その後も回復が続くことが、過去のシミュレーション結果から分かっているため、渋谷駅到着時刻における後続2本目の回復状況を指標とする。点線に囲まれた範囲が、後続列車2本目で回復がみられた範囲である。

走行時間の増加量20秒の場合、池尻大橋駅での調整時間は、13秒～21秒で効果があることが分かる。そのうち最も効果が発揮されるのは14秒であった。遅延の初期段階で見られるような、走行時間の増加量20秒～30秒程度の場合は、本対策の効果発現範囲に幅があるため、先行列車や当該列車の出発時間に多少の変動があった場合においても、回復効果が期待される。遅延の初期段階での出発時間調整は、効果的かつ遅延増加のリスクが小さいことから、実行可能性が高いと考えられる。

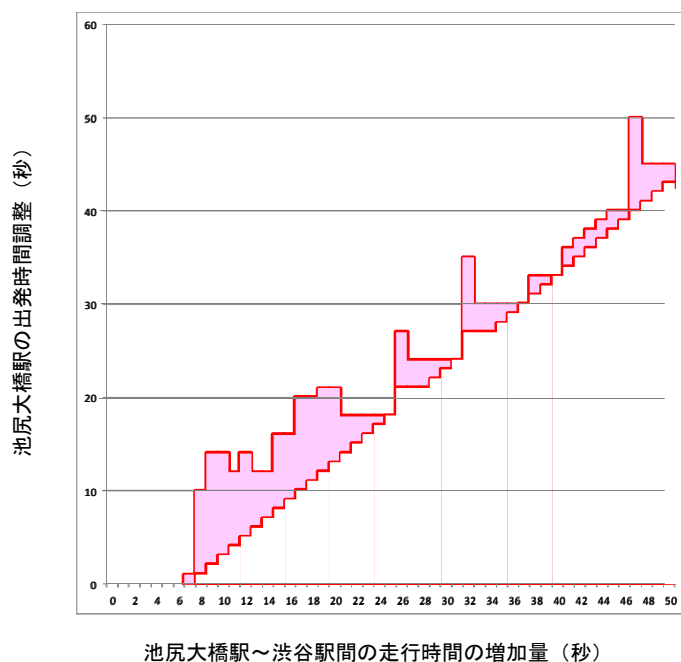


図-6-10 出発時間調整の適用範囲

(3) 複数列車における出発時間調整

出発時間調整により先行列車との列車間隔の拡大を図る本方策は、後続列車に列車遅延が波及しない範囲での対応が基本であり、後続列車への波及が直ちに問題とならない駅においても、後続列車間での列車間隔の乱れや、当該列車の車内混雑率の増加等の懸念が生じることから、列車1本で対応可能な出発調整時間は数十秒程度に限られる。定常的に発生している列車遅延は、1駅間で走行時間が数分単位で増加している駅間もあることから、出発時間調整をより実効性の高い対策として検討するためには、その適用範囲の拡大が求められる。そこで、出発時間調整による列車遅延対策について、適用範囲及び対策効果の拡大を図るために、対策の対処列車を2列車とした場合の対策について検討を行う。前節において実施した列車⑯の池尻大橋駅での出発調整時間に加えて、列車⑰についても池尻大橋駅での出発調整時間を実施することとし、列車⑱の渋谷駅到着時間の増加量を計測した。列車⑯と列車⑰の出発調整時間は、各々に0秒から60秒まで5秒単位で変化した場合についてシミュレーションを行った。列車⑱の渋谷駅停車時間の増加量は先と同じ40秒としている。図-6-11にシミュレーション結果を示す。列車⑯の1列車のみの対策実施の場合において効果が計測された池尻大橋駅で20秒の出発調整時間の実施に加えて、新たに遅延回復の効果が期待されるケースとして2ケースが計測された。出発調整時間の組合せは、列車⑯0秒かつ列車⑰15秒、及び列車⑯10

秒かつ列車⑰10 秒のケースである。列車⑱の渋谷駅到着時間の増加量については、3 秒程度の回復となっており、増加するケース数及び回復時間ともに、列車⑰の1 列車のみの対策実施の場合と比べて有益な効果は認められなかった。

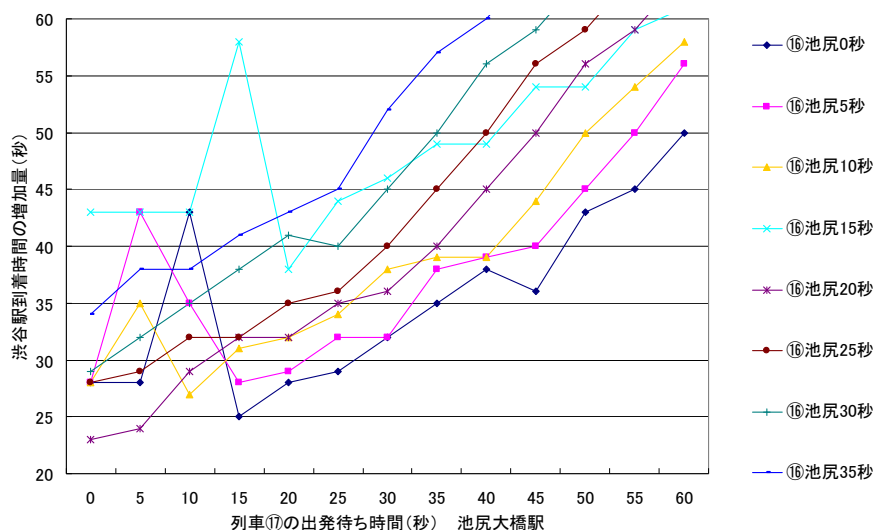


図-6-11 2 列車による出発時間調整と到着時間の変化（同位置）

先のシミュレーションは、列車⑰と列車⑱と共に、同じ池尻大橋駅で出発時間調整を続けて実施した場合の効果を計測した。つまり、同じ駅での対策実施の効果である。次に、同じタイミングで対策を実施した場合の効果を計測する。具体的には、列車⑰の池尻大橋駅での出発調整時間に加えて、列車⑱については一つ上流の三軒茶屋駅において出発調整時間の対策を実施する。これにより、連続して走行する列車 2 本が概ね同じタイミングで対策を実施した場合の効果を計測する。先のシミュレーションと同様に、列車⑱の渋谷駅停車時間の増加量は 40 秒とし、列車⑰と列車⑱の出発調整時間は各々に 0 秒から 60 秒まで 5 秒単位で変化させてシミュレーションを実施する。図-6-12 にシミュレーション結果を示す。列車⑰の 1 列車のみの対策実施の場合において効果が計測された池尻大橋駅で 20 秒の出発調整時間の実施に加えて、新たに遅延回復の効果が期待されるケースとして 5 ケースが計測された。出発調整時間の組合せは、列車⑰0 秒かつ列車⑱25 秒、列車⑰5 秒かつ列車⑱20 秒、列車⑰5 秒かつ列車⑱25 秒、列車⑰10 秒かつ列車⑱20 秒、及び列車⑰25 秒かつ列車⑱10 秒のケースである。列車⑱の渋谷駅到着時間の増加量については、4 秒程度の回復となっている。効果が期待されるケース数については、若干の増加となり、同じ駅での対策よりも同じタイミングで対策を実施することの方が、より実効性が高まることが分かる。

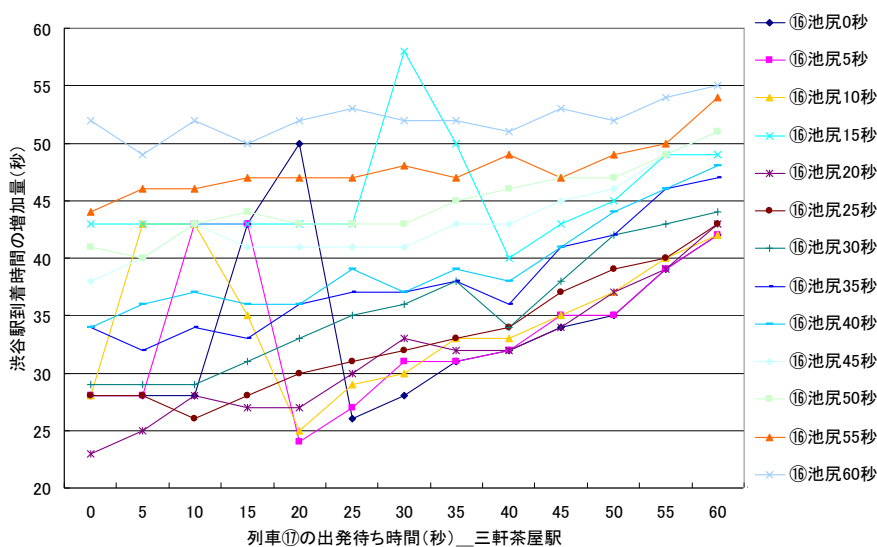


図-6-12 2列車による出発時間調整と到着時間の変化（同時刻）

上記の2つのシミュレーションは、列車⑮の渋谷駅停車時間の増加量を40秒とした場合の計算であり、渋谷駅停車時間の増加量を変化させて同様な計算を実施するには膨大な計算数を実施することとなる。また、細分化された閉そく区間において、複数の列車の相互作用及び駅停車時間の変化等が複雑に連動して列車運行が再現されるため、今回実施した2つのシミュレーション結果からは、出発時間調整を列車2本で実施することの明確な傾向を把握することは困難であり、またその対策効果についても、列車1本で実施する場合と比較して、実務的に有効な差は計測されなかった。結果的には、列車1本で対策実施した場合の回復時間が最も大きい値が計測された。これらを踏まえて考察すると、本対策は、複数の列車で対策を実施した場合においても、最も回復効果が期待されるケースは、各列車が遅延回復を図る駅間において、先行列車の停車時間の増加量に対して、最も効果的な出発調整時間を見出して実施することに集約される。このため、出発調整時間の対策を効果的に実施するには、駅間別に先行列車の停車時間の増加量に対して遅延回復が期待される出発調整時間をシミュレーションにて計算し、効果が期待される適用範囲を把握しておくことが重要である。

(4) 出発時間調整による運行挙動の変化

田園都市線で駅間走行時間の増加が発生しやすい区間の一つが、池尻大橋駅～渋谷駅間である。平日9日間の運行実績値から、渋谷駅で5分以上の到着遅延が発生した際の準急運転時間帯における、この区間の走行時間の増加量は平均で約30秒であった。そこで、渋谷駅の停車時間増加に起因して、池尻大橋駅～渋谷駅間の走行時間の増加量が30秒で定常化した状態をシミュレーション上に設定し、池尻大橋駅で列車1本のみ出発時間調整を実施した場合の後続列車の運行状況の変化を計算した。最も回復効果が表れた池尻大橋駅での出発調整時間14秒の運行挙動の変化を図-6-13示す。池尻大橋駅での出発時間調整は、三軒茶屋駅～池尻大橋駅間を走行する後続列車に影響が波及し、この列車の池尻大橋駅の到着時間は、無対策の場合と比べて遅延している。このため、池尻大橋駅の出発遅延も拡大しているが、池尻大橋駅～渋谷間の走行時間が回復することにより、渋谷駅では遅延が回復している。また、これにより、以降の後続列車や、半蔵門線内における遅延も回復傾向にあり、対策の効果が示されている。出発時間調整を実施した2本後ろを走行する後続列車では、無対策と比べて池尻大橋駅～渋谷駅間の走行時間が15秒短縮し、渋谷駅の到着時刻は4秒回復する結果となった。

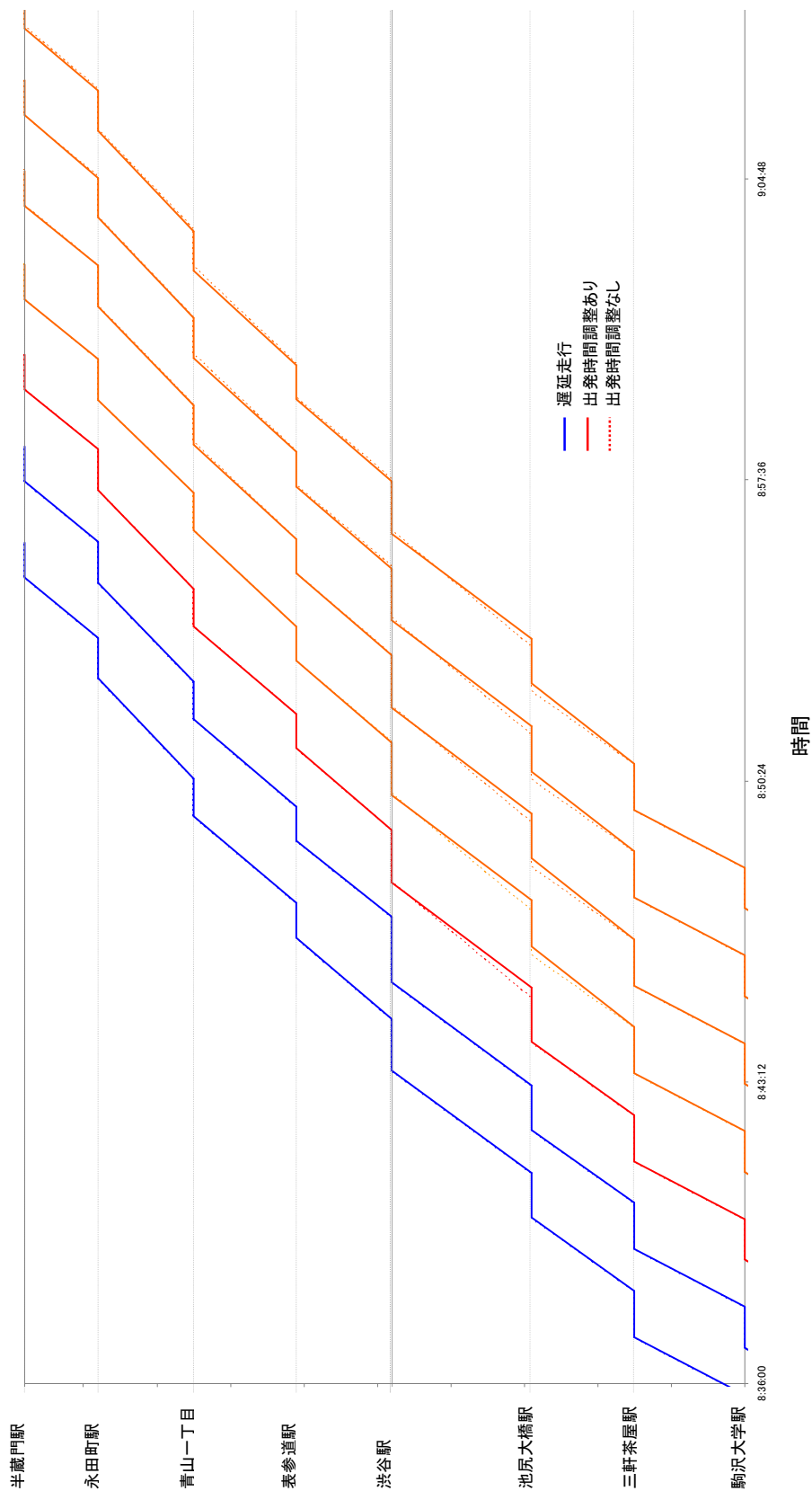
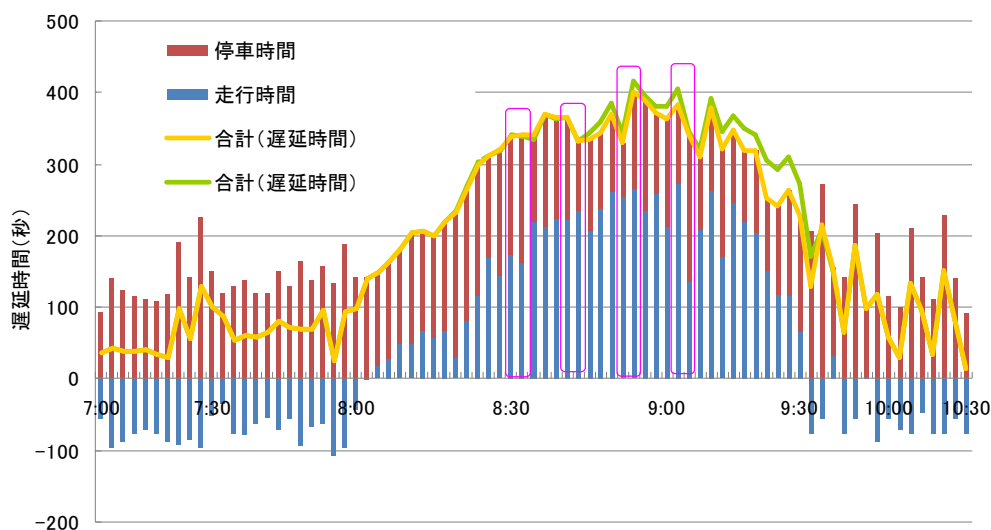


図-6-13 運行挙動の変化

(5) 出発時間調整による遅延回復の効果

ラッシュ時間帯の平均的な遅延状況を再現し、ダイヤ上で渋谷駅 8:00 到着の列車に遅延を発生させた。具体的には、駒沢大学駅で出発遅延 2 分を設定した。その結果、ダイヤ上で渋谷駅到着 9:00 頃の時間帯において駒沢大学駅～半蔵門駅間における遅延時間は約 7 分となる推定値を得た。このときの遅延時間の合計値は、図-6-14 の緑線に示される。本節では、この緑線で示される遅延状況を基本ケースとして、列車間隔に着目した遅延回復方策を実施することにより、遅延の早期回復を試みる。回復方策は、駅での出発時間調整の実施である。高頻度運行により、発生した遅延が回復することなく常態化している状況において、図-6-14 の赤枠で囲む 4 本の列車について、池尻大橋駅で出発時間調整 15 秒を設定した。駅間の閉そく割に起因して、駅間別に出発調整時間の適用可能範囲が存在することが分かっており、池尻大橋駅において、先行列車や当該列車の出発時間に多少の変動があった場合においても、回復効果が期待される出発調整時間 15 秒を設定した。

その結果、出発時間調整の実施によって先行列車との間隔が保持されることにより、各駅間の走行時間の回復が図られ、早期に遅延が回復する結果となった。対策実施後の遅延時間の合計値は、図-6-14 の黄線に示される。準急時間帯の渋谷駅到着時間は、最大で約 50 秒の遅延回復が図られた。出発時間調整を実施した池尻大橋駅では、遅延が拡大する列車があり、池尻大橋駅での到着遅延は最大約 70 秒拡大する結果となったが、その列車においても、渋谷駅以降の各駅での到着遅延時間は回復する結果が得られた。全体の傾向としては、出発時間調整を実施した列車の後続列車において遅延が回復することとなった。したがって、出発時間調整の実施により、一時的な遅延が発生した場合においても、路線全体としては結果的に遅延の早期回復が図られる可能性が示唆される結果となった。



ダイヤ上の渋谷駅到着時刻

図-6-14 列車別のダイヤに対する遅延時間の構成

6.4.3. 発着時分を短縮する走行パターンの検討

列車は先行列車との相互作用による速度制限と、線形や勾配から区間別に制約される区間速度制限（ATC コード）の双方から信号現示を受けて運行されている。運転士は先行列車との位置関係を把握することができれば、走行速度を上げて遅延の回復運転を図る、あるいは、駅間での駅間停止を回避して発着時分を増加させない運転等、条件にあった運転方法を実施し、遅延の影響を抑制することが可能である。しかし我が国においては、多くのケースで運転士は先行列車の位置を目視等により確認出来ないため、信号現示に従って最高速度を保持するよう運転している。この場合、先行列車との接近により、駅間での急な減速や駅間停止が頻発しやすい状況となり、停車からの再発進等の運転の時間ロスが生じやすく、遅延発生時にはこのような運転方法が遅延を拡大させてしまう一つの要因となってしまうと考えられる。そこで、ここでは駅間走行時において、あえて列車間隔を拡げて、遅延の早期回復を図る運転手法について検討する。

(1) 簡易的手法による効果の検証

前章 5.4.3.の基本的に考え方にに基づき、駅間走行速度の減速により、先行列車との接近を回避し、発着時分の縮小化を狙った列車運行手法の効果を検証する。本節では、試験的な取り組みとして、遅延発生時の走行パターンを設定せずに、次駅手前の閉そく区

間において一律的に減速を行うこととし、駅間の減速走行による発着時分の縮小化の効果を計測する。分析対象路線のターミナル駅である渋谷駅とその一駅下流の表参道駅間において、列車の走行速度を信号表示速度より 20km/h 低下して運行した場合の駅到着時刻の変化をシミュレーションで求める。信号表示速度よりあえて遅い速度で運行する区間は、表参道駅の手前 500m（4 閉そく区間）の範囲とする。駅間走行速度の実績値は、列車運行実績値（平成 21 年 1 月 19 日）を用いる。

当該区間における通常の駅間走行時間は約 110 秒であるが、分析対象日は遅延の発生に伴う列車間隔の狭まりにより、渋谷駅 8:29 発の列車で約 20 秒の駅間走行時間の増加が生じた。そこで、この列車及び後続列車において走行速度を 20km/h 低下させた運行をシミュレーションで実施した。その結果、列車毎に先行列車との間隔が適度に空いたことで、減速及び再加速による時間ロスが低減したことにより、速度低下を実施しないときと比べ渋谷駅 8:29 発の列車で表参道駅に 2 秒早く到着する結果となった。さらに次の後続列車は 5 秒早く到着した（図-6-15）。速度低下を開始する 1 閉そく目と 2 閉そく目において、走行挙動の変化がないのは、通常の信号現示が減速を示しており、それぞれ閉そく区間内での最大減速度で走行されたことにより、通常の走行パターンと減速のシミュレーションパターンとで変化が見られなかったためである。先行列車の駅間走行時間の低減は、後続列車との列車間隔の確保において相乗的な効果を発揮するため、速度低下の運行を繰り返すことで、この区間における遅れの回復時間は短縮されることがシミュレーションにより示された。ここでは、前節において設定方法を示した遅延発生時の走行パターンによる減速方法ではなく、簡易的な手法により列車間隔の保持を意図とした減速走行によるシミュレーションを実施したが、この結果は、適度な間隔を保つことが遅延の早期解消につながることを示唆するものである。

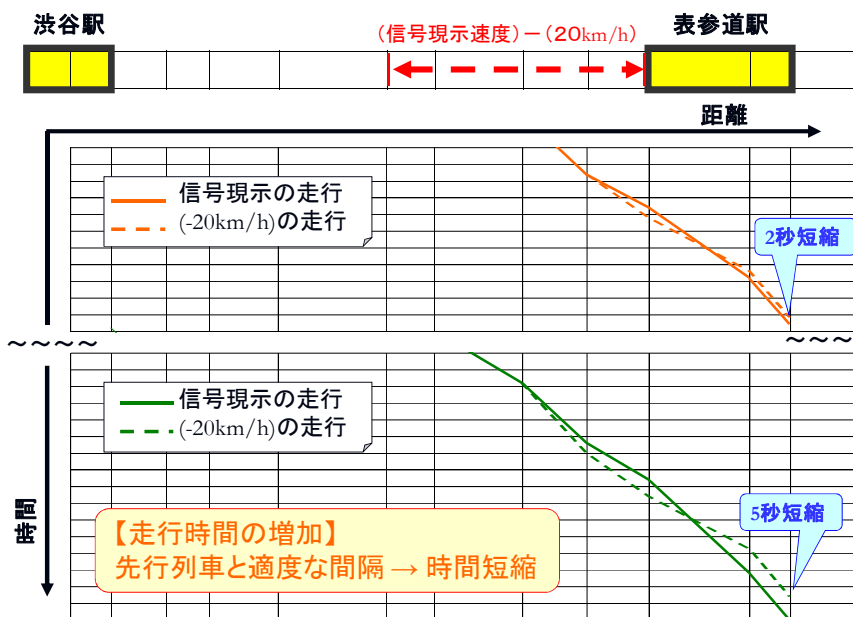


図-6-15 駅間のタイムスペース図

(2) 区間制限速度（ATC コード）による運転支援

前章で提案した列車遅延発生時における発着時分短縮の走行パターンについて、実際の路線への適用の可能性と効果を検証する。前章の考え方に即して基準となる2点を結ぶ走行パターンを実践することとなるが、実際の駅間走行は線路閉そく区分に基づく信号システムにより制御されるため、提案する走行パターンの実践にあたっては、既存の閉そく区分及び信号システムを考慮することが不可欠となる。そこで本節では、既往の区間速度制限（ATC コード）の改良を前提とした手法の検討を行う。ATC コードは、路線の物理的な制約から決定される通常パターンと、遅延発生時パターンとの2種を適用し、列車運行状況に応じて使い分けることとする。対象区間は三軒茶屋駅～池尻大橋駅とし、平成21年1月19日の実績値において当該区間で走行時間が約1分増加した列車（ダイヤ上の渋谷駅到着8:11）に適用する。遅延発生時のATC コードは、提案した発着時分短縮の走行パターンを模擬するよう閉そく区間別に制限速度を設定する。具体的には、三軒茶屋駅から400m付近までは後続列車の駅進入速度に影響がないよう減速を行わず、その後は1100m付近で走行速度20km/hとなるよう設計車両性能の最大減速度で減速させる。1100m付近以降は路線の物的制約条件による区間制限速度のATC コードを設定することとする。

(3) 遅延発生時の走行パターンによる遅延回復の効果

図 6-16 は 0m～1400m の三軒茶屋駅～池尻大橋駅間の運転曲線図を示す。上図に通常の区間制限速度による運転曲線図を、下図に遅延発生時の区間制限速度による運転曲線図を示す。運転曲線図には、その区間を走行する列車の速度と距離を示す速度曲線と、時間と距離を示す時間曲線が描画されている。遅延発生時用の区間制限速度による運転は（図-6-16，下図）、速度低下により先行列車との間隔が保持され、駅間停止を回避したことで通常の走行パターンと比べて走行時間が 5 秒短縮した。後続の列車にも同様に遅延発生時用の区間制限速度を適用したところ、走行時間が 15 秒短縮する結果となった。これは先行列車の走行時間の短縮が、後続列車との列車間隔の保持において相乗的な効果を発揮するためであり、この様な速度低下の運転を繰り返すことで、この区間の走行時間の増加量である遅延時間が連鎖して回復することを示している。しかし、この運転手法は先行列車の駅停車時間に大きく依存するため、大幅な停車時間の増加が生じた場合には効果がない。駅手前で駅間停止した後の発着時分はほぼ一定値となるためである。本手法は発着時分を短くすることで走行時間の短縮及び早期回復を図るものである。なぜなら、発着時分は、バラツキがあること、また、発着時分の増加は停車時間の増加となり、新たな遅延の発生につながる可能性があること、これらの理由から発着時分の縮小を支援する運転支援し、走行時間の減少及び停車時間の増加を防ぐこととした。ただし、これらの結果は列車の運転において、必ずしも前へ前へと詰めるだけではなく、遅れが生じている場合は、あえて速度を低下させ、適度な間隔を保つことが遅延の早期解消につながることを示唆するものである。

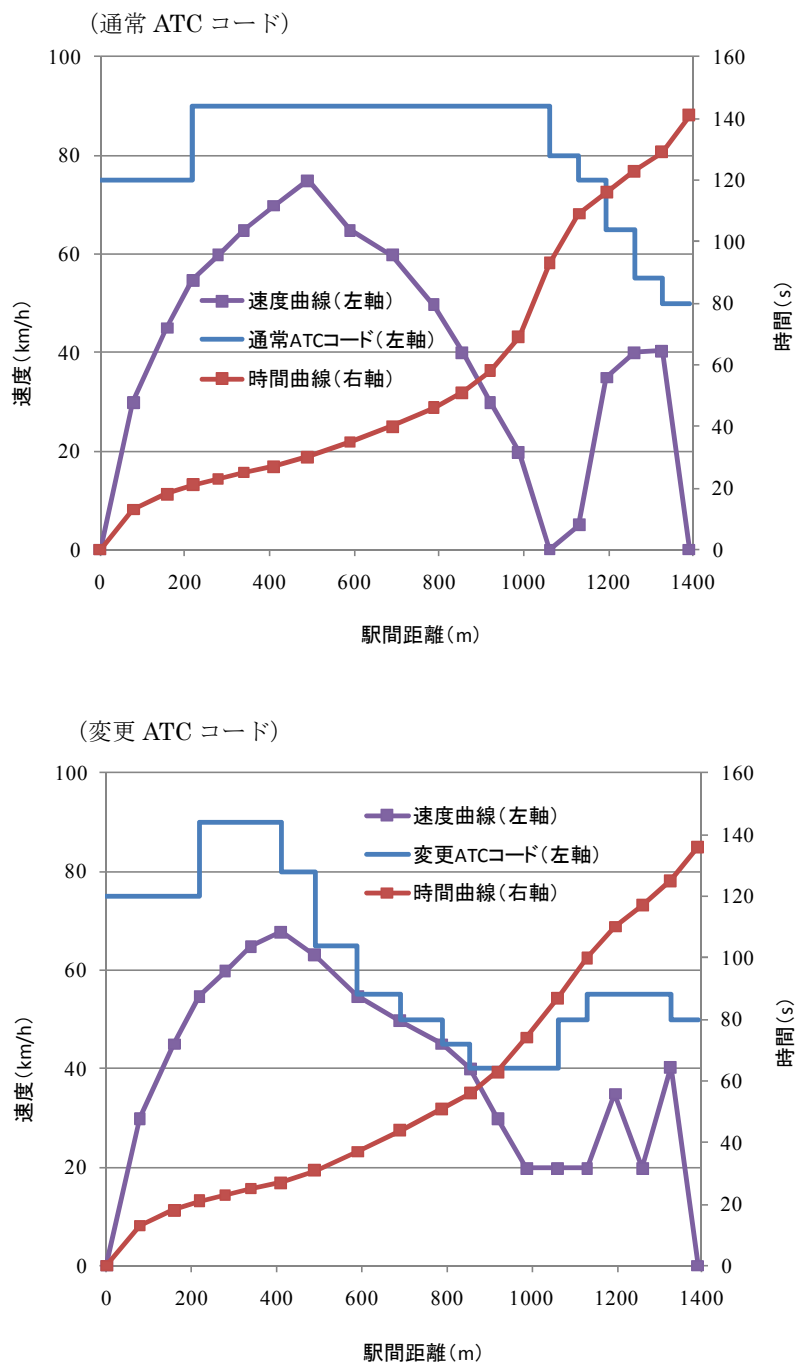


図-6-16 区間制限速度 (ATC コード) と運行挙動

次に、本手法の汎用性を確認するため、他の時間帯の列車について同様の手法を適用した際の効果を計測する。対象区間は先と同様の三軒茶屋駅～池尻大橋駅とし、平成21年1月19日の実績値において当該区間で走行時間が約1分増加した列車(ダイヤ上の渋谷駅到着 8:30)に適用した。遅延発生時の ATC コードを適用した列車は、速度低

下により先行列車との間隔が保持され、駅間停止を回避したことで通常の走行パターンと比べて走行時間が4秒短縮した(図-6-17)。後続の列車にも同様に速度低下した区間制限速度を適用したところ、約30分後に走行時間が40秒短縮する結果となった(表-6-1)。これは先行列車の走行時間の短縮が、後続列車との列車間隔の保持において相乗的な効果を発揮するためであり、この様な速度低下の運転を繰り返すことで、この区間の走行時間の増加量、すなわち遅延時間が連鎖して回復することを示している。

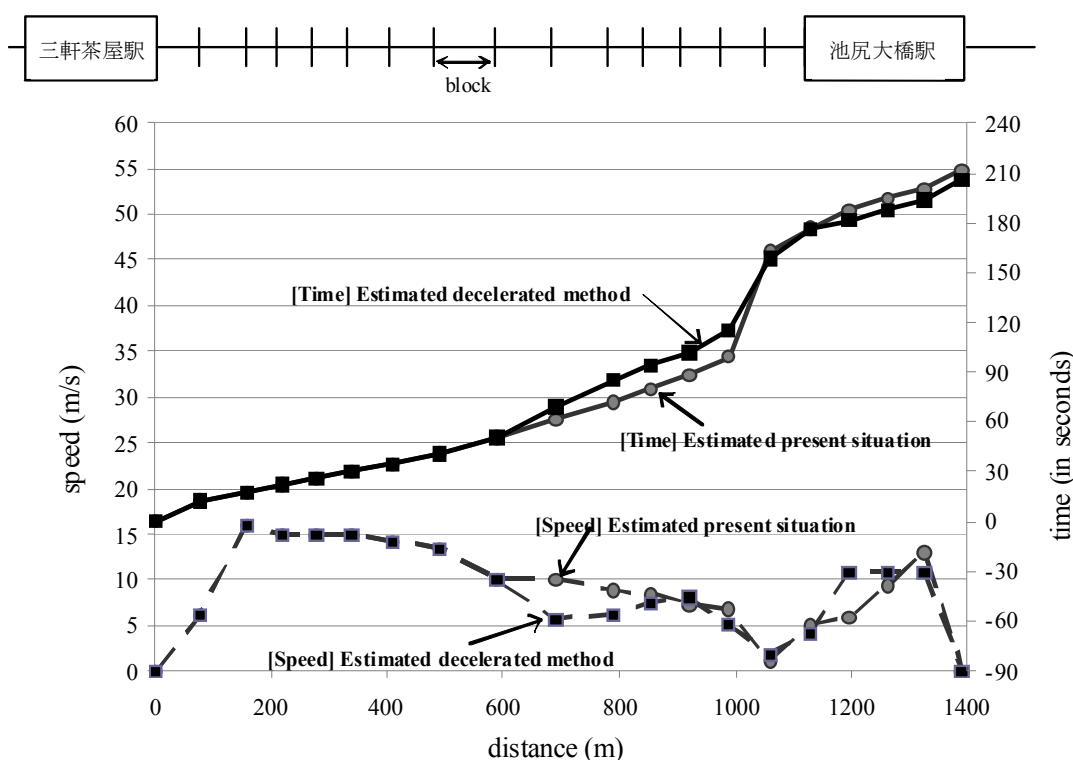


図-6-17 運転曲線と時間曲線

表-6-1 駅間走行時間の比較

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

6.5. 運行間隔の拡大による定時性向上

6.5.1. 遅延発生時の実態に即した対策の検討

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

(1) ラッシュ時間帯の利用実態

東京都市圏の鉄道を利用した通勤・通学時間帯の鉄道トリップの約半数は朝 8:00～9:00 に集中しており¹⁾、また、東京都内にある事業所の就業規則上の始業時間は、約半数が 8:30～9:00 となっている²⁾。したがって、朝ラッシュ時における鉄道利用者行動は、所定の時刻に到着可能な列車を選択しているものと考えられる。また、東急田園都市線の駅別乗降客数は、渋谷駅の乗降客数が全駅合計の3割を占めており、乗降客数が渋谷駅に次いで2番目に多い溝の口駅のそれと比べて約4.5倍の乗降客数となっている³⁾。渋谷駅に向けて混雑率が上昇することから、田園都市線の利用者の多くが、ターミナル駅である渋谷駅を乗降の目的駅としていることが推察される。これらを踏まえると、朝ラッシュ時において、9:00 までに、渋谷駅に、何本の列車が到着するかが、利用者サービスの視点から輸送力を議論するうえで、重要な要素となる。

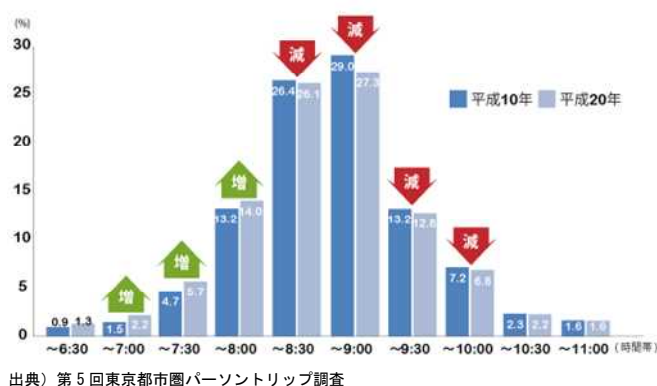


図-6-18 利用者の到着時間分布

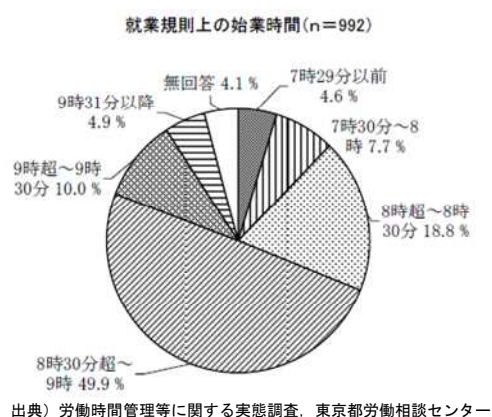


図-6-19 就業規則上の始業時間

(2) 遅延発生時の輸送力と所要時間

二子玉川駅～渋谷駅間における遅延発生時のダイヤグラム図のイメージを図-6-20に示す。運行ダイヤでは、二子玉川駅発 8:00 頃と同駅発 9:00 頃と同じ所要時間であるため、図の四角形の左辺と右辺の傾きは同じとなり、並行四辺形が描かれる。しかし、遅延発生した状況においては、ダイヤの傾きは寝た状態で保たれるため、右辺の上部が外側に開いた台形が描画される。高頻度運行下にある朝のラッシュ時間帯では、このような逆さ台形の形状をした運行状態がほぼ定常化している。利用者は遅延による三重苦を被っており、いち早く増加した所要時間を回復し、傾いたダイヤを起こし、逆さ台形を平行四辺形に戻すことが求められる。そこで、回復メカニズムに基づき、列車間隔の拡大により走行時間を回復し、遅延の回復を図ることとする。具体的には、二子玉川駅での列車間隔を拡げて、二子玉川駅～渋谷駅間の走行時間の回復、ダイヤを起こし、所要時間の回復を行う。ここでのポイントは2点ある。1点目は、二子玉川駅発の列車間隔を拡げても、渋谷駅への輸送力は変わらず保持されることである。上辺の渋谷駅は、田園都市線の路線容量を決定するボトルネック駅であるため、前章で記述したとおり、列車間隔の大幅な乱れがない限り、時間当たりの列車の到着本数及び各列車の到着時刻は変わらない。前章で記述したとおり、路線の処理容量はボトルネック駅で決まる。田園都市線においては、渋谷駅が路線容量を決定するボトルネック駅であることから、図の上辺にあたる渋谷駅において、列車間隔の大幅な乱れがない限り、時間当たりの列車の到着本数及び各列車の到着時刻は変わらない。さらに、2点目は、通勤時間帯において、多くの利用者が集中する9時直前に渋谷駅に到着する数本の列車において、利用者の分散が図られ、混雑緩和が期待される。具体的には、対策前は9時までに渋谷駅に到着するためには、8:40 に二子玉川駅発の列車に乗車する必要がある。しかし、対策後は、8:50 までの列車が到着できるため、この数本に利用者分散が図られ、混雑緩和が期待される。

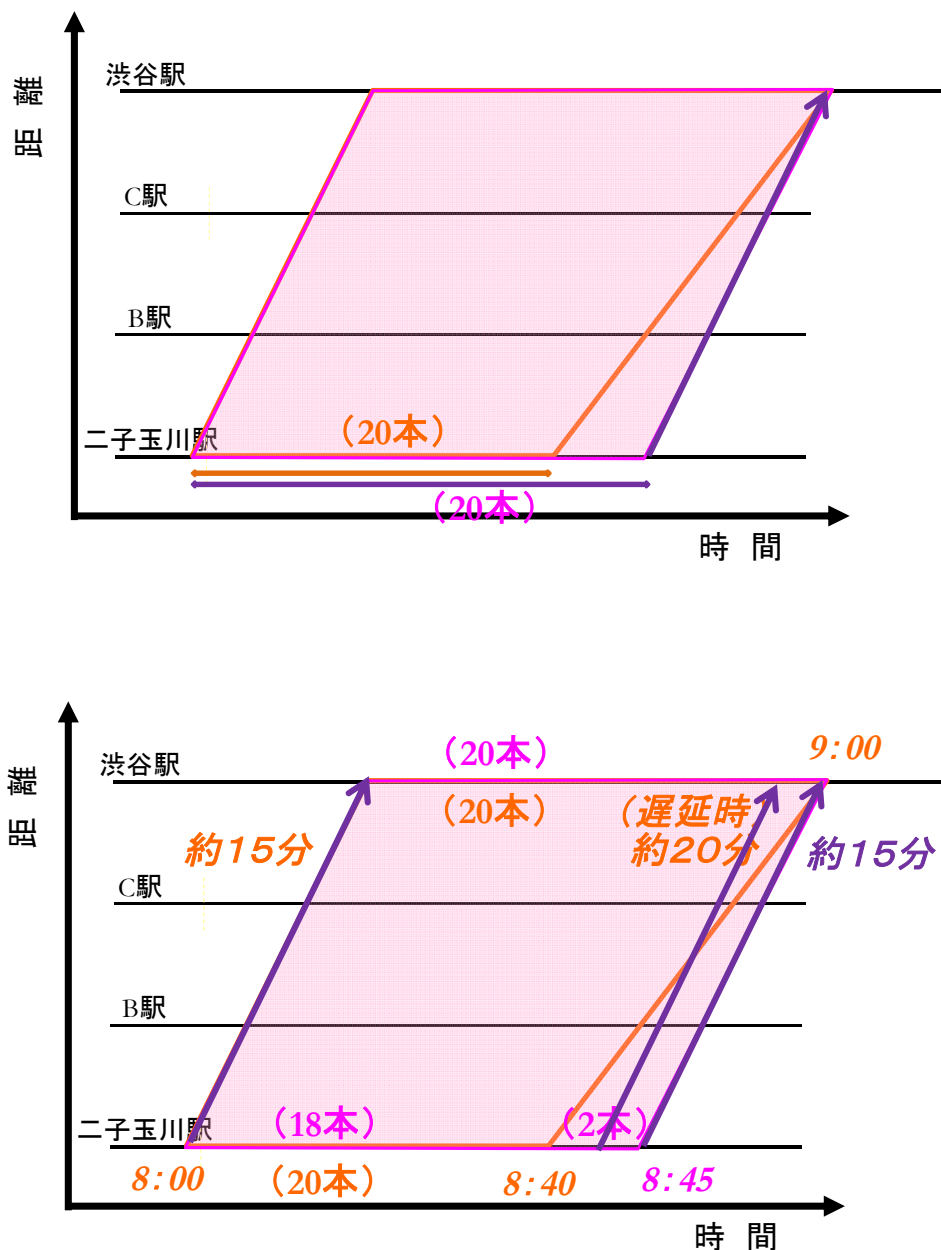


図-6-20 到着時刻と列車運行本数

6.5.2. 輸送力を保持した所要時間の回復

(1) シミュレーション設定

朝のラッシュ時間帯 (8:00~10:30) を想定し、開始の約 2 時間 (8:00~10:00) は 125 秒間隔で列車を運行させ、その後の約 30 分間 (10:00~10:30) は運行間隔を 30

秒増加し、155秒間隔で列車を運行させる。区間は、二子玉川駅から半蔵門駅までとし、優等列車の追い越しはないものとする。駅別列車別の停車時間は第4章の図-4-13で示したとおり、発着時分の増加による停車時間の増加を考慮する。この様な設定のもと、ある列車が二子玉川駅で30秒の発車遅れが生じたとして、シミュレーションを実施した。結果を図-6-21のダイヤグラム図の左図に示す。二子玉川駅で30秒の発車遅れにより、先行列車との離れによる発着時分の増加が生じ、下流の各駅で停車時間の増加が発生している。上流方の後続列車は、列車間隔が縮小して線路上に密な状態で在線しており、駅間の走行時間の増加が発生し、遅延の影響が波及している様子が読み取れる。

運行ダイヤ上の停車時間や走行時間には若干の余裕時分が含まれていることから、遅延時間が最大となる20本目以降は所要時間が緩やかな回復傾向を示す。その後、列車の運行が155秒間隔となると、余裕時間が増加し予め列車間隔が広がるため、急速に回復へ向かい、155秒間隔の8本目の列車で遅延が概ね解消され収束傾向にあることが分かる。なお、155秒間隔の運行の場合、列車間隔に乱れが生じていない状態においても、125秒間隔運行に対して発着時分30秒分の停車時間の増加が生ずるため、駅間の所要時間は125秒間隔と比べて大きな値を示す。

(2) 運行間隔と所要時間

125秒間隔と155秒間隔で運行する各々の列車本数は変えずに、155秒間隔で運行する列車12本の発車時刻を変更したケースについて、シミュレーションを行う。遅延発生後に直ちに、155秒間隔の列車を運行することが、遅延を最も早期に回復する手法と考えられるが、輸送量低下の視点からラッシュ時の適用は非現実的と考えられる。そこで、表-6-2のように、155秒間隔の列車を3本毎に4分割して介入する場合と、1本毎に交互に介入する場合との計3ケースについてシミュレーションを実施する。交互運行の結果は図-6-21のダイヤグラム図の右図に、また各ケースにおける所要時間の変化を図-6-22に示す。運行間隔上の余裕時間をもって、先行列車との間隔が保持されることにより、各駅間の走行時間の回復が図られ、特に、交互ケースの場合は、早期に遅延が回復する結果となった。交互運行開始後の平均所要時間は、基本ケースと比べて約3分/本の遅延回復となっており、全体では約2時間の遅延回復が図られている。なお、4分割ケースにおける経過時間120分頃の所要時間の増加は、遅延回復後の155秒間隔の運行により、発着時分の増加に伴う停車時間の増加が生じたことに起因する。

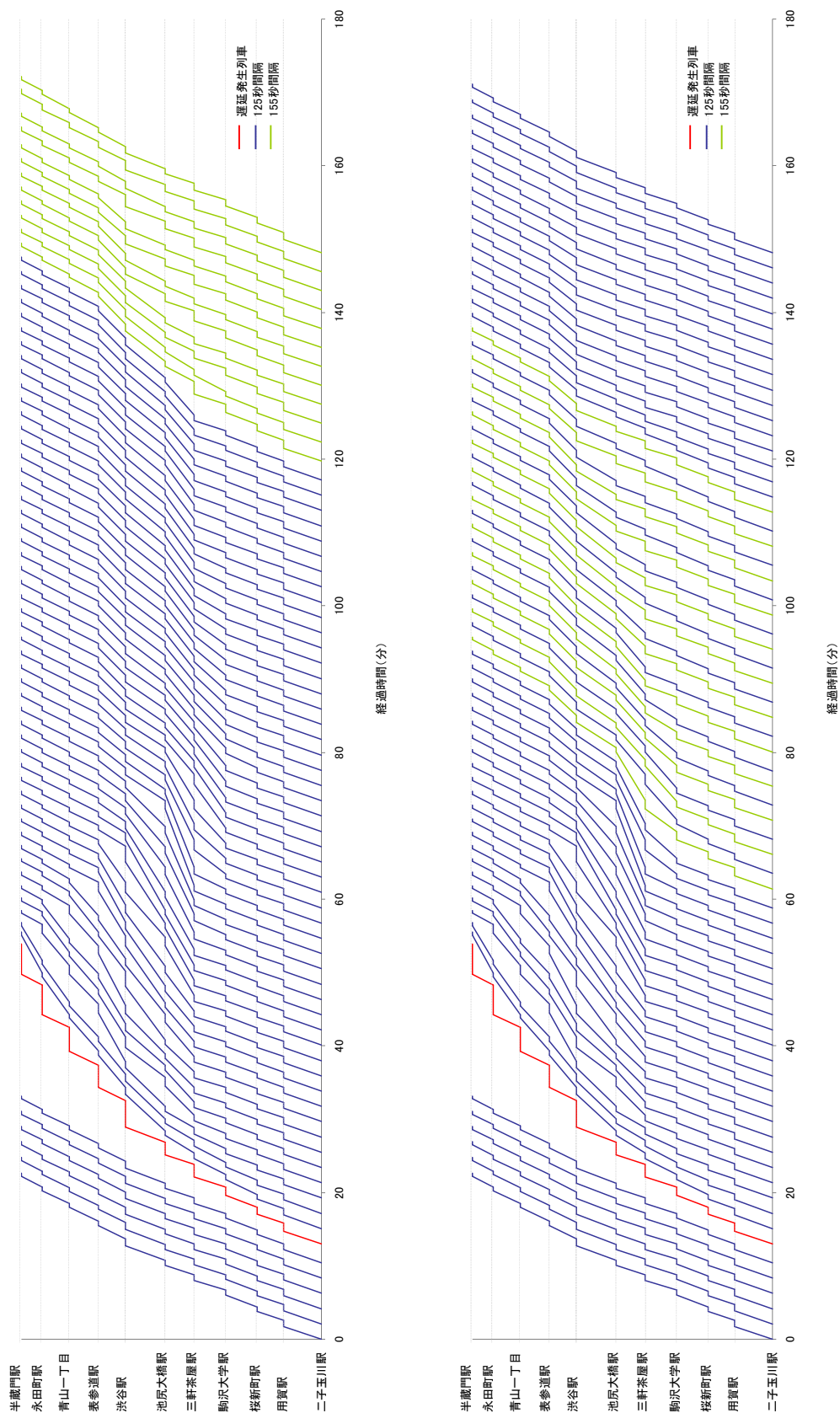


図-6-21 ダイヤグラム図の比較

表-6-2 シミュレーションの設定条件と結果

検討ケース	設定条件	計算結果		
	155秒間隔の列車番号	最終列車(No.69)の渋谷駅発時刻	No.30以降の平均所要時間	遅延回復時間の合計値
基本ケース	No.58～No.69(計12本)	2:42:39	19:57	-
①連続	No.30～No.41(計12本)	2:42:03	15:58	2:39:27
②4分割	No.30～No.32, No.39～No.41, No.48～No.50, No.57～No.59(計12本)	2:43:08	18:02	1:16:41
③交互	No.30, No.32, No.34, No.36, No.38, No.40, No.42, No.44, No.46, No.48, No.50, No.52(計12本)	2:42:02	16:52	2:03:16

(二子玉川駅～渋谷駅間)

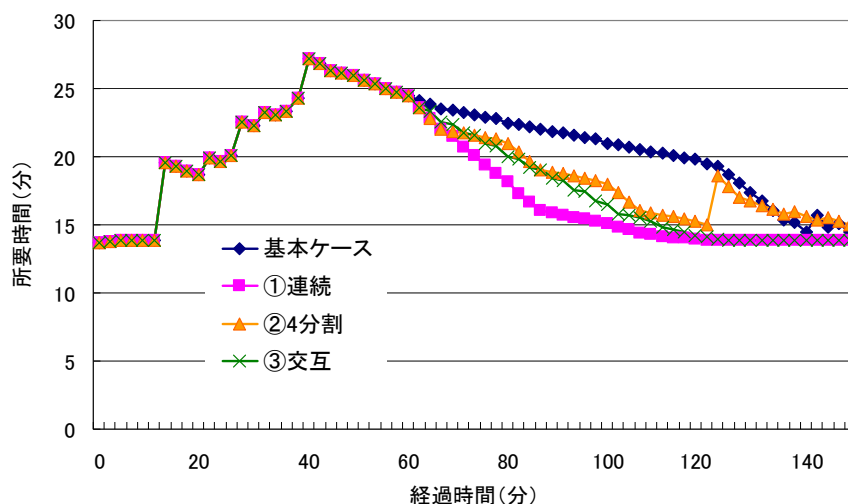


図-6-22 列車別の所要時間（二子玉川駅～渋谷駅間）

(3) ダイヤ設定の検討

前掲の図-6-21の右図について計算時間100～120分付近の拡大図を図-6-23に示す。基本ケースを点線で、交互ケースを実線で表記している。双方のケースの渋谷駅における列車到着本数は同じであり、交互ケースは基本ケースと比べて、渋谷駅の到着時刻が列車2本を見送った場合と同時刻の到着となっている。また、基本ケースの二子玉川駅～渋谷駅間の所要時間は、途中駅の到着時間は異なるが、遅延が発生していないときの所要時間とほぼ同じとなっている。したがって、交互ケースの赤線を渋谷駅到着時刻を9:00の列車と仮定した場合、交互ケースの設定は渋谷駅において輸送力が確保されており、かつ、遅延の早期回復、時間信頼性の向上が期待されるダイヤとなっている。ダイヤの定時性回復は、前掲の図-6-20で二子玉川駅発8:40に集中していた利用者を8:45発までの列車2本へ分散する効果が期待され、混雑緩和が図れる可能性が考えられる。

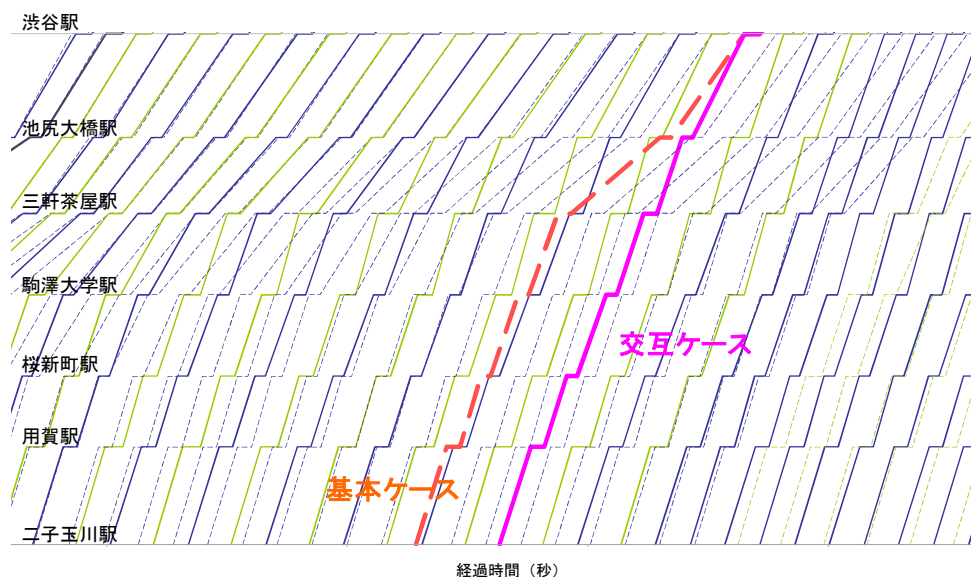


図-6-23 運行挙動の比較（二子玉川駅～渋谷駅）

6.6. 輸送障害時の運転再開手法に関する検討

6.6.1. 輸送障害時の運行状況

定常的に発生する比較的短い時間の列車遅延に対して、車両故障や自然災害等により発生する列車遅延は、遅れ時間や影響範囲が大規模となり、輸送障害として報告される場合が多い。輸送障害とは30分（旅客列車以外は1時間）以上の遅延を生じた場合に鉄道事業者から地方運輸局長へ報告される鉄道事故統計項目の一つである。輸送障害等の長時間の列車遅延は、発生要因が概ね特定される。このような長時間の列車遅延の発生に対して、鉄道事業者の基本的な対応として、遅延要因が解消されるまでの間の一時的な列車運転見合わせが実施される場合が多い。その際、乗客の安全確保や線路内立入りを防ぐため、駅間での停車を可能な限り避けて駅に停車するよう図られる。遅延要因の解消に数時間を要する場合は、振り替え輸送のほかに、相互直通運転の停止や、折り返し運転等の運転整理が実施され、列車遅延の影響範囲を最小限に抑える取り組みがなされる。

特定要因による長時間の列車遅延が発生すると、駅では旅客が滞留し、駅に停車する列車の車内混雑率は増大する。一方で、次駅に停車する列車が存在し、やむなく駅間での停車を実施した列車は、次駅の到着時に旅客が少ないことがあり、この場合は駅に停

車していた先行列車との車内混雑率に大きな粗密が発生する。振り替え輸送の実施までには至らないが、運転再開まで長時間を要する場合は、運転再開時に駅停車中の列車に乗りきれない旅客が駅に残留するため、駅間に停車していた列車においても、駅到着後に車内混雑率の増大が生じる場合がある。一方で、振り替え輸送が実施された場合には、駅で滞留する旅客が比較的少ないため、運転再開時に駅間に停車していた列車は、駅到着後も急激な乗客の増加は生じず、駅に停車していた先行列車との車内混雑率に大きな粗密が発生する。他路線においては、振り替えによる利用者増に伴い、混雑率の増加及び列車遅延の発生が考えられる。

長時間の列車遅延が発生した際の列車運行実績値を、ダイヤグラム図に示す。図-6-24は朝ラッシュ時間帯において、東急田園都市線長津田駅と東京メトロ半蔵門線半蔵門駅間で最大約40分の列車遅延が発生した際の列車運行状態を示している。この時間帯は、二子玉川駅から下流については準急運転を実施しており、各駅運行となっている。このため、列車の追い越しがなく、列車遅延の要因が解消するまでは、可能な限り駅で停車させる措置が取られている。二子玉川駅より上流については、急行列車の運行による追い越しの影響により、普通と急行とともに駅間で停車する列車が発生している。列車の追い越しを実施しなくなる準急運転区間の始点にあたる二子玉川駅では、溝の口駅の複線ホームにより、あるいは二子玉川駅での列車間隔調整により、列車の出発間隔が調整され、二子玉川駅で上流区間の列車間隔の乱れが概ねリセットされている。路線の設備や施設の点については、二子玉川駅より下流の都心に近い駅においては、複線ホーム等の列車遅延を吸収する施設がないこと等、現状において列車遅延対策が困難な区間である。都心に近いこと輸送力を低下する折り返し等による運転整理が実施しにくいという要素も考えられる。また、一般的に輸送障害等による長時間の列車遅延発生時は、列車間隔が乱れやすく、遅延の拡大が生じやすいことから、急行運転を停止するケースが多くみられる。このような路線の特性を踏まえて以下の分析では、二子玉川駅～半蔵門駅間を対象としたシミュレーションを行うこととする。

上述したとおり、輸送障害時は一時的な運転見合わせに伴い、運転再開後に時間的かつ空間的に大規模な遅延を生じる場合が多い。運転見合わせ中に発生した大量の利用者が、特定の列車に集中するため、当該駅の発車時だけでなく、次駅以降においても乗降時間の増加が生じる。そこで、本節では、遅延発生状況における早期回復の視点から、輸送障害等に起因する遅延について、路線特性を考慮した運転再開時の工夫による遅延拡大の抑制について検討を試みる。

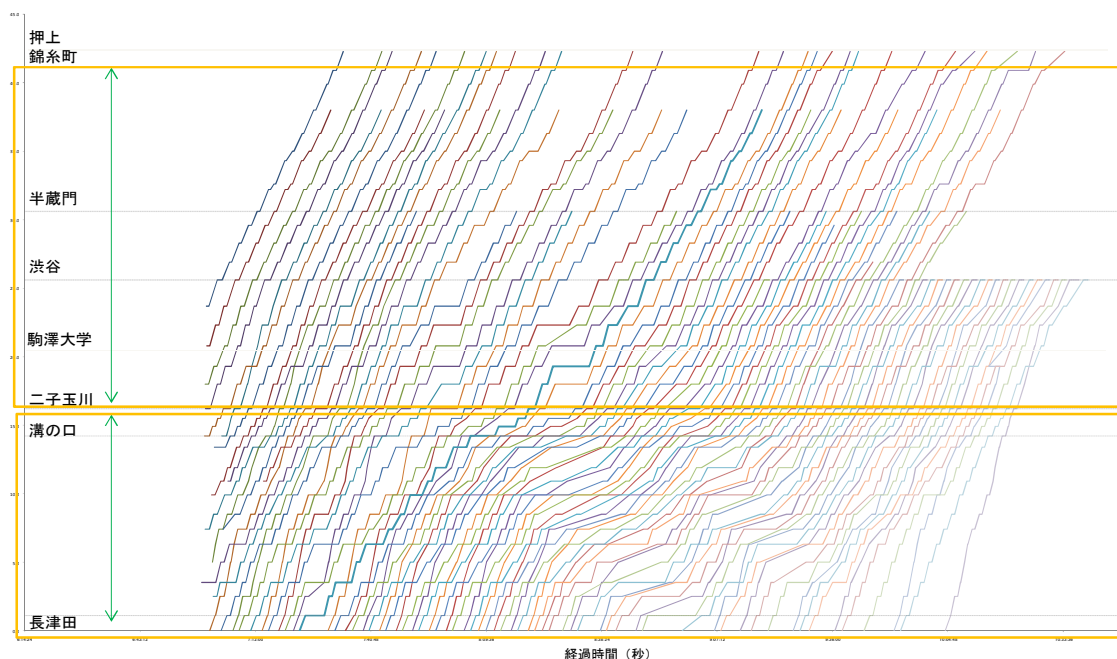


図-6-24 輸送障害時の運行状態（実績値）

6.6.2. 運行間隔調整による拡大抑制

(1) シミュレーション設定

運転再開における遅延拡大の抑制手法を検討するため、ネットワークの複数の列車において、トラブル等の遅延発生に伴う一時的な運転見合わせを行い、その後、運転を再開するシミュレーションを実施した。半蔵門線大手町駅より上流側の駅において、全ての列車を駅にて停車させることとし、先行駅に既に列車が停車している場合は、駅間に停車させる。計算の都合上、渋谷駅に停車した列車の停車時間が10分となった時点で、駅に停車中の列車を一斉に発車させることとした。駅間に停車した列車は、信号現示が青になり次第、順次発車する。駅別列車別の停車時間は図-4-13のとおり発着時分の増加による停車時間の増加を考慮する。駅に停車中の列車は、発着時分に対する停車時間の増加率を2倍に設定し、駅間に停車した列車については、構築しているモデルの増加率をそのまま設定した。振り替え輸送等による旅客の経路変更は想定しない。長時間の遅れの場合、前から順番に駅を発車させることもあるが、遅延の回復が遅くなるため、ここでは、一斉に運転再開するものとした。

(2) 運転再開方法の検討

シミュレーションは、駅に停車中の列車を一斉に発車させるケース1と、特定の列車において間隔調整を行うケース2の、2通りを実施した。ケース1は、池尻大橋駅に停車した列車について、渋谷駅に停車した先行列車との列車間隔が、停車駅毎に拡大し、後続列車において、いわゆる団子運転が発生する結果となった。つまり、当該列車は新たな遅延の原因となったことが分かる。この要因として、駅停車する全ての列車を同時に発車させた場合、池尻大橋駅～渋谷駅間は、他の駅間と比べて駅間距離が長い為、渋谷駅での到着間隔が遅れてしまう。さらに、渋谷駅は他の駅よりも発着時分に対する停車時間の増加率が高いため、停車時間が増加し、新たに遅延を拡大する列車になったと考えられる。そこで、ケース2では、当該列車について渋谷駅到着時の発着時分の増加を防ぐため、渋谷駅停車の列車のみ、発車時間を遅らせて、池尻大橋駅発の列車との間隔調整を行った。調整時間は、ダイヤ設定における両列車の発車時間を鑑みて45秒を設定した。図-6-25にシミュレーション結果を示す。図の丸記号と矢印は、間隔調整を行った箇所と、ケース1における池尻大橋駅発列車の概略軌跡を示している。ケース1と比べ、渋谷駅で間隔調整を実施した列車の錦糸町駅到着時間は143秒増加したが、池尻大橋駅発の列車の渋谷駅到着は6秒短縮、錦糸町駅の到着時間は62秒短縮した。後続列車については、最終的に錦糸町駅の到着時間が206秒回復しており、間隔調整を実施した列車の所要時間は増加したが、路線全体の遅延回復に貢献する結果を得た。

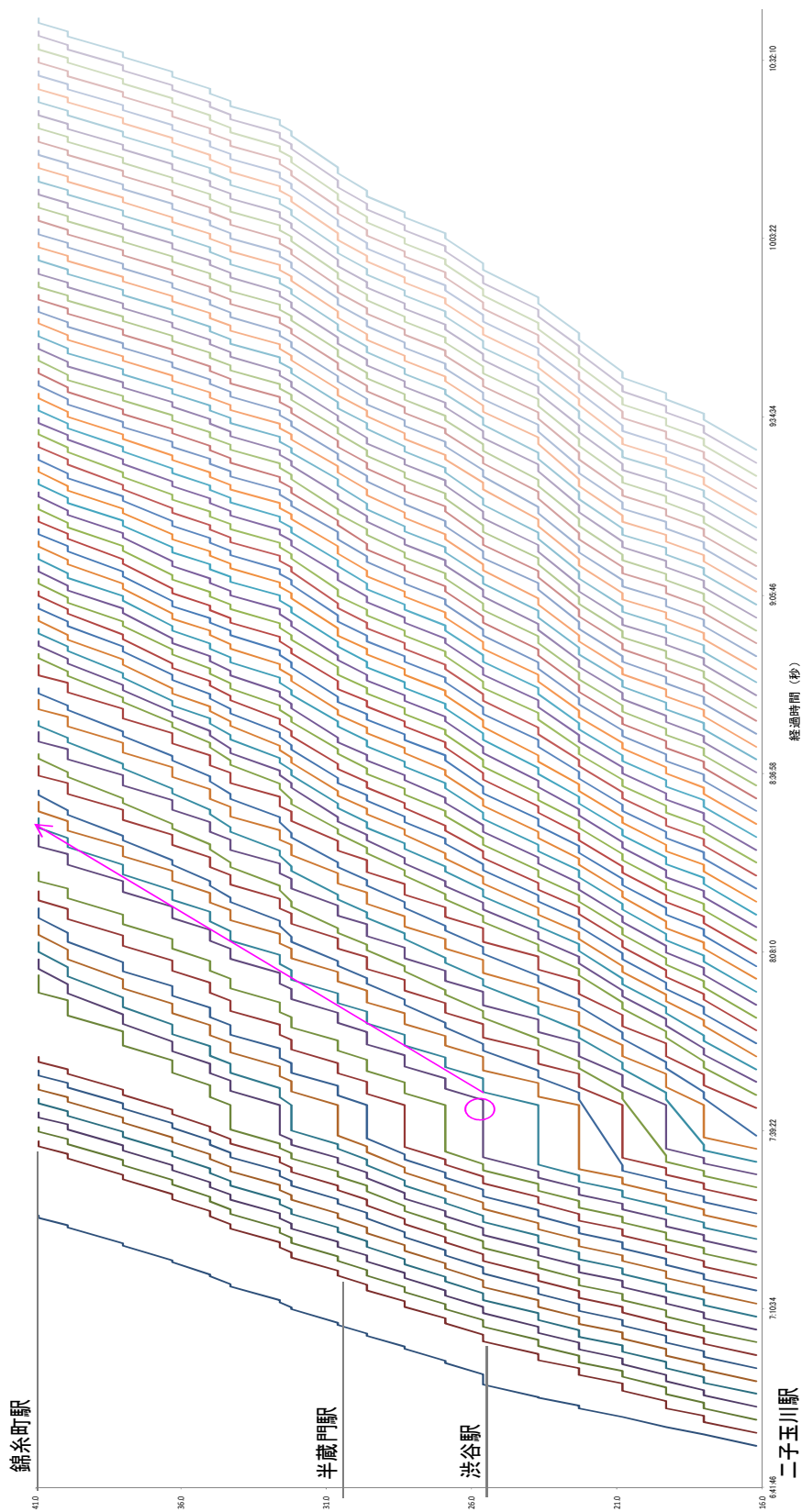


図-6-25 対策実施のダイヤグラム図

6.7. 本章のまとめ

本章は前章までの知見を展開し、高頻度運行下における輸送力の保持を前提とした列車遅延対策の検討を行った。

運行間隔の保持による列車遅延の拡大抑制方策の検討では、過度に列車間隔を詰めたこと起因して拡大した列車遅延を定量的に示した。これは、列車間隔の保持により抑制可能な列車遅延であることから、運行管理における列車間隔の重要性を示すとともに、その実践方法の検討において列車の群管理の有効性を明示した。

個別列車の間隔拡大による早期回復方策の検討では、列車間隔の拡大を図る出発時間調整の実施にあたって、一時的かつ部分的な列車遅延の増加が結果的に解消され、路線全体の列車遅延を早期に回復することを提示した。駅別、列車別に個々の遅延回復を図ることより、路線全体における回復方策の実践が効果的に機能することを実証した。また、駅到着時間を最小とするための走行パターンの実践手法として、実際の線路閉そく区分に基づく ATC コードによる運転支援手法を提案し、その回復効果と適用の可能性を示した。1列車当りの回復時間は小さいものの、列車遅延の回復効果は連鎖して増大することから、路線全体における早期回復が期待されることを定量的に示した。

運行間隔の拡大による定時性向上の検討では、遅延発生時の実質的な輸送力低下において、上流駅における列車運行間隔の拡大による運行管理の有効性を示し、主要 OD 間の着駅側の輸送力を保持したうえで、所要時間の短縮による列車遅延の早期回復の可能性を明示した。回復した所要時間が、運行ダイヤで設定された所要時間とほぼ同程度であることから、本手法により運行ダイヤの頑健性向上が期待されることを示唆した。

また、輸送障害時の運転再開手法に関する検討では、運転再開時に集中する膨大な数の利用者に起因して路線全体の列車遅延が増幅することから、列車間隔を保持した運行管理の重要性が通常時以上に増すことを例示した。利用者発生率等の駅の特性と、駅間の線路条件の違い等を考慮した運転再開手法の検討の蓄積が、遅延の拡大抑制及び早期回復に有効であることを示した。

上述の列車遅延対策はいずれも、遅延発生時に過密となった列車間隔を駅及び駅間で拡幅するための運行管理手法を検証したものであり、その効果が示された。すなわち、列車運行管理における基本方針として、遅延回復のための列車間隔の拡幅という新たな理念の導入が、路線全体の遅延回復を早期化することを定量的に示した。

参考文献

- 1) 第5回東京都市圏パーソントリップ調査, 2009.
- 2) 労働時間管理等に関する実態調査, 東京都労働相談センター, 2009.
- 3) 東急電鉄 HP: <http://www.tokyu.co.jp/railway/railway/west/gaiyou/joukou.html>
- 4) 仮屋崎圭司, 日比野直彦, 森地茂: 列車間隔に着目した運行遅延に関するシミュレーション分析, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.67, No.5, pp.1001-1010, 2011.
- 5) Kariyazaki, K., Hibino, N. and Morichi, S. : Simulation Model for Estimating Train Operation to Recover Knock-on Delay Earlier, *Asian Transport Studies*, Vol.2, No.3, pp.284-294, 2013.
- 6) Kariyazaki, K., Hibino, N. and Morichi, S. : Simulation Analysis of Train Operation to Recover Knock-on Delay under High-Frequency Intervals, *Case Studies on Transport Policy*, Vol.3, Issue1, pp.92-98, 2015.
- 7) Chiusolo, S., Dicembre, A., Ricci, S., Sorace, F. : Automation of high density metro lines: Rome line a case study: *Proceedings of the 13th International Conference on Automated People Movers and Transit Systems*. pp. 491-501, 2012
- 8) Spyropoulou, I. : Modelling a signal controlled traffic stream using cellular automata. *Transp. Res. C: Emerg. Technol.* 15 (3), 175-190, 2001
- 9) Fu, Y., Gao, Z. and Li, K. : Modeling Study for Tracking Operation of Subway Trains Based on Cellular Automata, *Journal of Transportation Systems Engineering & Information Technology*, Vol.8, No.4, pp.89-95, 2008.
- 10) Xun, J., Ning, B. and Li, K. : Station Model for Rail Transit System Using Cellular Automata, *Communications in Theoretical Physics*, Vol.51, No.4, pp.595-599, 2009.
- 11) 岩倉 成志, 日比野 直彦, 仮屋崎 圭司, 福田 大輔, 森地 茂, 川村 孝太朗, 角田 隆太, 富田 拓未: 都市鉄道の列車遅延対策の定量的評価, 土木計画学研究・講演集, Vol.50, CD-ROM, 2014.
- 12) Malachy Carey. : Ex ante heuristic measures of schedule reliability, *Transportation Research Part B*, Vol.33, pp.473-494, 1999.
- 13) Christian Liebchen, Marco Lubbecke, Rolf H. Mohring, Sebastian Stiller. : Recoverable Robustness, Technical Report of ARRIVAL-TR-0066, 2007.

第7章

列車遅延の技術的及び制度的課題の検討

第7章 列車遅延の技術的及び制度的課題の検討

7.1. 概説

前述の5章及び第6章では、列車遅延の現象分析及び対応策について、列車の運行管理の視点から列車相互間の時空間的な間隔に着目し、列車運行シミュレーションによる数値計算を実施した。一方で第3章では、列車遅延の多くが駅部にて発生し、線路上の列車走行に波及することが示されている。そのため、本章では、列車遅延の対策について、駅間の列車走行時間のみならず、駅の旅客流動、運転設備、列車運行計画についても議論の対象を広げ、実務的な視点を含めて技術的な課題の検討を行う。

また、列車遅延は運行ダイヤ及び時刻表に余裕時分を持たせることにより、所要時間増加のサービス低下と引き換えに、見かけ上の改善を図ることが可能である。このため、前述の各章では、利用者サービスの視点から列車遅延の現象を正しく分析するため、列車遅延を所要時間の増加と定義して議論を行ってきた。他方で、事業者の運行管理において、また利用者サービスの視点においても、時刻表からの離れにより定義される列車遅延は改善が求められる重要な検討課題である。そこで、本章の後半は、列車運行と時刻表に関する諸規程を整理するとともに、時刻表の定時性向上を図るための制度的な課題について検討を行う。

7.2. 列車遅延に関する技術上の課題

列車遅延は駅での利用者流動と駅間の列車運行が連動し、その影響の累積により顕在化する。そのため、列車遅延の発生抑制や、波及及び拡大抑制、発生した遅延の早期回復についての対応策は、個々の効果を高めると同時に、一貫した方向性を共有し、各々が連動して一体行う的に取り組むを行うことが重要となる。以下は、個々の対応策について、列車遅延の改善に向けて検討すべき技術的な課題について言及する。

7.2.1 駅の旅客乗降に関する課題

(1) 駅空間の制約

朝ラッシュ時間帯における駅員の増員や、利用者乗降完了及び出発合図の合理化等、事業者別の多様な取り組みが実施されている。停車時間の短縮に向けた駅構造等の施設に関する課題については、都心駅や地下鉄駅における限られた駅空間の問題が考えられる。プラットホーム幅や、階段の幅、位置及び設置数等は、ホーム上の利用者流動性との関係性が高く、引いては車両の乗降時分及び駅停車時間の増減に影響を与える。都心3区や副都心3区を中心に、都区部において今後も開発事業が数多く計画されているなか、その周辺駅については構内混雑問題の顕在化が懸念される。これらの駅において、安全上の問題とともに安定した列車運行を行っていくためには、駅の改良が不可避となるが、空間的な制約が多く、改良事業の実施は容易ではない。つまり、抜本的な対策の実行が困難な駅は数多い。しかしながら、諸外国に目を向けると、我が国においても参考となる事例は少なくない。第3章で記述したとおり、モスクワ地下鉄ではプラットホームとコンコースの空間的な分離により、スムーズな利用者の乗降を実現している。シンガポールでは、駅舎の柱がホーム柵の車両側に建立されているため、ホーム上の利用者流動の支障とならない工夫が施されている。プラットホームの設計思想として、有益な事例と言える。

(2) 駅構内の旅客流動

空間的制約により改良等の事業が実施出来ない駅においても、効率的な運行管理を実施することにより停車時間の短縮が期待される場合がある。その際の課題は、プラットホーム上の利用者の捌け時間、ホームドアやホーム柵の開閉に要する時間、視認性の悪い曲線駅での安全確認、利用者への啓蒙活動等について効率的な対応の可否である。それらの中で、利用者の捌け時間を短縮するためには、利用者の流動性向上が重要であり、車両の乗降客の交錯を出来るだけ回避することが肝要である。到着駅において、乗車ホームと降車ホームを別々に設けることや、ホーム上の階段等を一方通行にする等の工夫が考えられる。ホーム上の整列乗車において、車両扉の両側に列を配置するのではなく、階段位置等の利用者動線を考慮し、片側に配置することも簡易的であるが有効である。副都心線渋谷駅や丸ノ内線霞ヶ関駅等の導入事例も多い。ホーム上で利用者が滞留する場所の一つが、階段やエスカレータの乗口である。利用者の集中により、後続列車が到着しても利用者が捌き切れない駅も存在する。この様な駅においては、エスカレータの

速度向上の検討が期待される。日本のエスカレータの定格速度は建築基準法に基づき、勾配が8度から30度未満は分速45m、30度から35度が分速30mと定められている。このため、速度向上には法改正を伴うが、エスカレータの処理能力はホーム上の捌け時間に直接的に作用し、単純計算で処理能力が1.5倍に向上するため、検討する価値は十分にある。

(3) 安全対策

次に、近年の安全性向上のニーズから、ホームドアやホーム柵（以下ホームドア）の設置が促進されている。ホームドアの開閉に要する操作時間は、駅停車時間の増加に作用するため、可能な限り短縮することが課題となる。列車の到着時は、完全に停車して車両ドアが開くタイミングとほぼ同時にホームドアが開くケースが多い。発車時においては、車両とホームドアの間に利用者が取り残されることのないよう、車両ドアが閉じた後に数秒の時間差をもってホームドアを閉じ、ホームドアが閉まってから発車するケースが多い。安全を軽んじる趣旨ではないことを前置きしたうえで、列車の到着時及び発車時は低速であることから、ホームドアが設置されていない駅と同様に、列車の運行は車両ドアの開閉で確認することとし、列車微動時のホームドア開閉の可能性を検討する余地はある。また、日本の鉄道事業者特有の文化と思われるが、発車時刻を過ぎても乗車しようとする利用者が存在する場合は、車両ドアを閉めず乗車させようとする風土が感じられる。無理やりの乗車は一人の利用者効用の向上であるが、その他の路線全体の利用者の効用を著しく低下させる可能性がある。駆け込み乗車と同様に、乗降や歩行しながらのスマートフォン操作等の行為について、利用者への啓蒙活動を推進し利用者マナーの向上を期待するとともに、事業者のサービス意識についても変化を期待したい。

(4) 発車合図

また、列車が発車する際の安全確認及び運転士への合図の効率性についても、停車時間を短縮するための課題である。第2章で東急田園都市線の渋谷駅におけるドア閉め合図の効率化について紹介したが、車両ドアが閉まってから列車が発車するまでの安全確認と運転士への発車合図については、事業者別に社内規程により定められていることから、様々な方式が取られている。一例として、東京メトロは車両ドアの閉後に駅員の合図によって発車するよう定められている。他方で、JR東日本は車両扉の閉時が発車の合図となる。これにより、車両扉が閉まった後の発車までの経過時間は、各社で5秒程度の差が生じることとなる。各事業者ともに列車運行の定時性のために、列車毎に数秒の時間短縮に尽力をしており、些細な運行管理手法の変更や工夫によって改善される余

地はあるものと考えられる。

(5) 鉄道利用者の協力と啓発活動

利用者の混雑等に起因する定常的な列車遅延については、駅における停車時間の超過が主な要因の一つであることから、利用者の協力により改善できる余地は大きい。利用者一人一人の秩序ある行動が遅延の改善に有効であり、事業者の継続的な啓発活動と、それに応える利用者の振る舞いが期待される場所である。車内での急病人の発生については、利用者が自らの体調に配慮した早めの途中下車を行うことが肝要であるが、やむを得ない場合もあるため、車内トラブル発生時においては、車内の利用者から乗務員への適切な情報伝達が重要となる。各車両の両端部や中央部には、緊急事態を乗務員に伝える緊急ボタンが設置されている。ボタンが押されると直ちに列車は緊急停車し、インターホンで乗務員との通話が可能となる。緊急事態の内容に関わらず、安全上、全ての場合において一端停車することとされており、トラブルが発生した車内の状況が把握されるまでは運転再開されない。フェイルセーフに基づく対応であり、これを否定することはできないが、一刻を争う急病人の場合は停車することなく次駅まで通常どおり運行した方が望ましいことも多い。これまで車内で緊急ボタンが押された事例を集計し、その結果を踏まえて対応方法のあり方を検討することが必要である。少なくとも、地下鉄では駅間に脱出口が無いことから、緊急ボタンが押されても次駅までは走行することを基本としており、安全上の問題を理由に、改善に向けた検討の機会を失う必要はない。

また、多くの路線で容量いっぱいに行っている現在の状況において、駅の停車時間を超過することなく定時性を確保するためには、利用者の分散乗車を推進することも重要である。分散乗車には、乗車車両の分散と、乗車列車の分散、乗車時間の分散との3つの観点がある。乗車車両の分散は、利用者の乗車位置が降車駅の階段近くの車両に集中することにより生じる車内混雑率の偏りを是正する考えである。乗車列車の分散は、郊外から都心に向かう放射線状路線において急行列車に利用者が集中することにより生じる列車種別毎の混雑率の偏りを是正する考えである。乗車時間の分散は、オフピーク通勤等により時間帯別の混雑率の偏りを是正する考えである。いずれも、利用者の乗降時分の短縮、衣類や鞆等のドアばさみの解消等により、駅での停車時間の超過を抑制する効果が期待される。これまでも、運行ダイヤや列車種別の見直しによる乗車列車の分散や、早起きキャンペーン等の啓発活動による乗車時間の分散については、事業者の努力のもと積極的に取り組まれてきた。これに加えて、近年ではスマートフォンのアプリにより、列車の在線位置の情報を提供するサービスが開始されており、特に遅延発生時における乗車列車の分散が期待される場所である。ダイヤが乱れた遅延発生時にお

いて、利用者は、到着した高混雑の列車に無理して乗車するべきか、後続列車を待つべきかの判断を行うこととなるが、その際に後続列車の在線位置から到着時間を推察できるため、後続列車が選択されるケースが多くなると考えられる。さらに、今後の技術の進展により、後続列車の混雑状況等の詳細な情報の提供が可能となった場合には、より一層の乗車列車の分散が期待され、団子運転の早期解消による列車遅延の改善に大きく寄与することが期待される。



図-7-1 JR 東日本アプリの画面

7.2.2 運転設備に関する課題

(1) 信号システム

閉そく区間の細分化等に関する信号システムの改良は、列車間隔を縮小した運行を可能とし、列車運行間隔に余裕時分を生み出すこととなる。これまでは混雑緩和を最優先課題としてきたため、生み出された余裕時分は、運行本数の増加による輸送力増強に充てられてきた。その結果として、列車遅延の顕在化が新たな課題となっており、日々の列車運行において、計画ダイヤの輸送力が確保できていない状況となっている。閉そく区間の細分化は、輸送力増強の視点では駅手前の閉そく区間を対象に実施することが有効であるが、列車遅延対策の視点においては、駅出発後の閉そく区間の細分化も重要であり、後続列車の駅進入に支障することなく発着時分の短縮が図られる。信号システムの改良を実施する際には、目的を明確にし、輸送力と定時性、及び速達性を総合的に鑑みたくえで、細分化する区間と区分長を検討することが重要であり、その際には本研究

で構築したシミュレーションモデル等を活用することが有効である。また、諸外国で導入事例が増えている移動閉そく（CBTC: Communications-Based Train Control）は、国内でも JR 東日本が仙石線において試験導入しており、近い将来に東京圏の都市鉄道に展開される可能性を十分に有している。移動閉そくは、これまでの固定閉そくと比べて駅間の列車走行の柔軟性が向上し、列車間隔の縮小による運行本数の増加が容易となる。しかしながら、前章までに記述してきたとおり、列車間隔の縮小は列車遅延の発生・拡大とトレードオフの関係にあることから、移動閉そくの導入の仕方次第では、今以上に列車遅延の問題が顕在化する可能性も懸念される。一方で、駅間走行の柔軟性は、第5章及び第6章で示した発着時分を短縮する走行パターンの実行を容易とするため、遅延の早期回復が期待される側面もある。移動閉そくは設備投資やランニングコストの縮減、輸送力増強の効果が着目されることが多いが、列車遅延に対しては正と負の双方の効果が発現する可能性を有しており、駅間走行の柔軟性がもたらす列車遅延の早期回復効果を十分に発揮するため、路線別駅間別に走行パターンの最適化に関する検討が不可欠である。

(2) 列車制御システム

一方で、列車の運転制御に関する課題については、走行する列車の列車間隔の保持が挙げられる。その際、先行列車の運行状況に関する情報提供が重要となるが、その一つの考え方として、第6章で記述した遅延発生時における減速運転手法が考えられる。ボトルネック駅手前の区間における減速運転の導入については、事前に運転士への教育及び研修が必要と考えられるが、軌道わきに運転補助標識の設置することにより、十分に対応可能と考える。減速運転の実施の判断については、指令員が司令所のディスプレイをもとに判断することとなる。既往のディスプレイでは、駅間の走行状態についての詳細は把握できないが、列車別の当該区間における出発時刻と到着時刻は把握可能であるため、これにより駅間の駅間停止の発生等の走行状態を推察し、減速実施の判断を行うこととなる。この点については、2点の減速ポイントに先行駅の在線表示器を設置することにより、現地で運転士の判断により実効可能となるため、より効果的に実効することが可能と考えられる。なお、司令から運転士の指示は、列車無線を使用することにより可能である。また、列車間隔の保持による列車制御の事例として、山手線の運転整理がある。当該路線は、等間隔運転の確保が最優先とされている。このため、朝ラッシュ時間帯や夕ラッシュ時間帯の20時頃までは、運休による運転整理を行わないこととしている。

(3) 情報伝達

駅間走行時間の短縮を図るために、駅部の運行管理において課題となる事項が、列車間隔を保持した発車時刻の管理である。これについては、第3章で記述したデジタル時計の導入が有効である。駅で列車の運行間隔を保持するためのデジタル時計の導入は、既に導入されているデジタル時計の計測時分を変更することで対応可能と考えられる。一例として、東京メトロ日比谷線の霞ヶ関駅には、列車の駅到着時刻からの経過時間を表示するデジタル時計が設置されている。ホームの中程に設置されており、運転士に発車合図を行う駅員が、表示される経過時間を認識することにより、停車時間の増加を防止し、列車遅延の発生及び拡大についての抑制効果が期待される。本研究で提案する列車運行間隔に着目したデジタル表示は、既存のデジタル時計の計測開始時刻を変更することで実現される。既存の列車到着時刻からの計測を、列車出発時刻からの計測に変更すればよい。列車の到着及び出発は、軌道回路により列車運行実績値として計測管理されていることから、デジタル時計に表示する時刻の設定を変更するだけで、容易に実施可能である。本提案でデジタル表示される運行間隔は、停車時間も合算された経過時間であるため、駅員の感覚から大きく外れるものでなく導入についての抵抗感も小さいと考えられる。その導入の仕方は2通り想定される。遅延発生時に表示を切り替える方法と、常時新たな表示とする方法である。ラッシュ時間帯においても、時刻表で設定される運行間隔は等間隔ではなく、2分間隔や2分30秒間隔等の多様な運行間隔の列車が混在することから、遅延が発生していない運行状態においては、列車別の運行間隔に依らない既存の停車時間による管理が実行し易いという利点がある。列車の運行間隔の管理は、車掌または運転士の運転時刻表に依っている。しかし、一度、列車遅延が発生すると、駅員及び車掌・運転士ともに、もともと先行列車との列車間隔に関する情報を持っていないため、各駅における停車時間の管理に依る他なく、特に遅延発生時は、遅れを取り戻すべく停車時間の短縮を図ろうと努めることから、先行列車との列車間隔を必要以上に狭めてしまうことが考えられる。その結果、列車間隔の縮小による新たな遅延が発生する。したがって、前者は、列車遅延が発生していない通常時においては、既往の停車時間に着目した経過時間を表示することとし、遅延発生時に列車間隔に着目した経過時間の表示に切り替えることとするものである。通常時と遅延発生時とで表示する時間が異なることから、煩雑性を含んでおり、また誰が表示を切り替えるか、またそのタイミング等、実施については整理すべき事項が存在する。一方、全時間帯において完全にデジタル表示に移行する場合は、遅延が発生していない通常時においては、これまでと同様に、列車の運行間隔の管理は、車掌または運転士の運転時刻表に依ればよい。駅員は、構内の既存の時刻表から出発時刻の把握が可能である。遅延が発生しつつある

状況,あるいは発生時においては,車掌及び運転士は,最小運行間隔を保持したうえで,運転時刻表に即した運転を実行することとなる。したがって,導入に関する運営上の技術的な課題も存在しない。また,特に長時間の列車遅延については,利用者への情報伝達も重要であり,近年の技術革新が著しい ICT の活用により,利用者への早期の情報提供と情報内容の充実を図ることも必要である。



写真-7-1 日比谷線霞ヶ関駅のデジタル時計

7.2.3. 列車運行計画に関する課題

(1) 折り返し運転と路線の運行管理

折り返し施設は,長時間の遅延発生において,遅延の影響範囲の拡大を抑制する効果が期待され,有効な遅延対策の一つである。ただし,新たな乗換え需要が発生することにより,駅での乗換え混雑の問題が再発し,これに起因して新たな遅延が発生する場合も考えられる。同様に,相互直通運転を行う路線において,輸送障害等により一部の区間で運転見合わせが生じた場合,見合わせ区間に依らず,多くの事例において相互直通運転が中止され,事業者境界駅にて折り返し運転が実施される。運転整理の考え方は事業者毎に異なるため,また,運転見合わせが生じた事業者にとっては,直通する事業者への負担を最小限に留めたい思想から,双方にとって取り扱いがし易い相互直通運転の中止を行っている。しかしながら,利用者の観点からは,事業者境界駅で折り返すこと

についての特段の効用はなく、折り返しを実施する駅が降車予定の駅かどうかことが重要である。つまり、折り返し運転を実施すること自体はやむを得ないが、少なくとも他路線へ接続するターミナル駅までは相互直通運転が実施されることが望まれる。またそれは、駅での不要な乗り換えを解消することとなるため、新たな遅延発生リスクを回避し、列車遅延の早期回復が期待される。したがって、列車遅延の対応に関する鉄道事業者間のより一層の連携と、ネットワークとしての列車運行の維持についての検討の深度化が必要である。また、特に相互直通運転路線においては、鉄道サービスが個々の事業者内で閉じてなく、実質的には広域に運転する同一路線として利用者に認識されることから、事業者毎にシステムを共有することに有用な意味はなく、相互直通運転を行う路線毎に共有することの方が、運行管理を効率化し、かつ利用者サービスの向上が図られるものと考えられる。運行系統別に連帯責任を有していることの認識のもと、これまでの既成概念に固執することなく柔軟な発想で、将来的な列車運行管理のあり方を検討することが重要である。

(2) 運行ダイヤ

運行ダイヤの設計思想についても、各事業者で技術検討を継続しており、西武鉄道の千鳥停車や、東急電鉄の利用者の分散を図った準急運転、列車遅延の実態に近いダイヤとしている京王電鉄等、輸送力と速達性及び列車遅延の関係性の中で、事業者別に利用者サービスの向上に取り組んでいる。京王電鉄は平成27年2月のダイヤ改正において、平日朝ラッシュ1時間の明大前駅、千鳥山駅の停車時間を確保するため、運転本数を30本から28本に減少させている。京王電鉄によると、このダイヤ改正により同年3月から5月において、前年同月と比べて1分未満の遅延で新宿駅に到着した列車の割合が約30%向上し、最大遅延時分は平均約2分の改善が達成された。これを踏まえて、現状も1分から2分程度の列車遅延が発生する場合があることから、平成27年9月のダイヤ改正では、ラッシュ1時間の運行本数を更に減少して27本としている。依然として混雑率が180%を超える路線が多くある中で、定時性を維持した列車運行を前提に、運行本数と速達性を向上することの検討が必要である。例えば、早い時間帯の運行本数の増加は、列車遅延の発生時刻を後ろ送りにし、結果として路線の遅延時間の拡大を抑制する効果が期待される。雨天時は通常よりも早く出勤する傾向があるため、より効果的であると考えられる。また、サマータイムやゆうかつ等により、一時的に通勤時間帯を変更した利用者をそのまま定着させる方策としても有効であり、利用者の分散効果との相乗効果が期待される。一律に余裕時分を与えるのではなく、時系列に変化する列車遅延の現象に対応し、時間帯別に運行本数の増減を検討することも考えられる。

7.3. 列車遅延に関する制度上の課題

7.3.1. 列車運行と時刻表に関する諸規程

前章までは利用者の鉄道サービスの視点から列車遅延を所要時間の増加と定義し、議論を行ってきた。他方で、事業者の運行管理や利用者サービスの視点において、時刻表からの離れにより定義される列車遅延についても、重要な検討課題である。そこで、本節では列車運行と時刻表に関する諸規程を整理するとともに、列車遅延による所要時間の増加を抑止し、かつ時刻表に対する定時性の改善を図るための課題について検討する。

列車運行については、鉄道営業法（明治33年法律第65号）第二条において、鉄道輸送に関する事項について鉄道運輸規程が定められている。鉄道運輸規程（昭和17年鉄道省令第3号）第一章総則第四条では、駅には運賃表、料金表、及び旅客列車の時刻表や、その他運輸上の必要な諸表規則等を備附することが規定されている。また、第二章旅客運送第八条では、駅には旅客運賃表及び旅客列車の出発時刻表の摘要を掲示することが規定されている。さらに、同条第二項には、主要な駅については、旅客列車の到着時刻表の摘要を掲示することが規定されている。

時刻表に対する早発については、同規程第二章旅客運送第二十二条に、時刻表に指示した時刻より前に列車を出発することのないよう規定されている。また、同条第二項には、天災事変や已むことを得ない事由、公益上の必要がある場合を除いて、時刻表に指示した列車の運休を休止することのないよう規定されている。

同規程第五章非常事態発生の際に於ける運送第七十七条では、非常事態の発生に際し運送上の必要ある場合に於いては、先の第二十二条第一項の規定に依らないこととされている。

鉄道営業法（明治33年法律第65号）第一条の規定に基づき、鉄道運輸規則（昭和62年運輸省令第15号）が定められており、第六十二条（列車の運転時刻）では、列車の運転は、停車場における出発、通過又は到着の時刻を定めて行わなければならないと規定されている。同条第二項では、列車の運行が乱れたときは、列車の性質等を考慮して運転整理を行い、所定の運行に復するよう努めなければならないと規定されている。

また、同規則第六十三条（運転整理）では、列車の運転順序変更、行き違い変更、運転の取消し等の運転整理を必要とするときは、その都度運輸長または運連整理担当者の指令によって行わなければならないと規定されている。

鉄道営業法（明治33年法律第65号）第一条の規定に基づき、鉄道に関する技術上

の基準を定める省令（平成13年国土交通省令第151号）が定められており、第九十九条（列車の運転時刻）では、列車の運転は、必要に応じ、停車場における出発時刻、通過時刻、到着時刻等を定めて行わなければならないと規定されている。同条第二項では、列車の運行が乱れたときは、所定の運行が乱れたときは、所定の運行に復するよう努めなければならないと規定されている。

鉄道事業法（昭和61年法律第92号）は、第一章総則第一条（目的）に規定されているとおり、鉄道事業等の運営を適正かつ合理的なものとすることにより、輸送の安全を確保し、鉄道等の利益を保護するとともに、鉄道事業等の健全な発達を図り、もって公共の福祉を増進することを目的としている。

同法第十七条（運行計画）は、鉄道運送事業者は、列車の運行計画を定め、あらかじめ、国土交通大臣に届け出ることが規定されている。これについて、鉄道事業法施行規則（昭和62年運輸省令第6号）第三十五条（運行計画の届出）では、届出において提出する事項の一つとして、定期に運行する列車の発着時刻が規定されている。

7.3.2. 列車の運行管理に関する制度上の課題

(1) 列車の運転時刻に関する制度上の課題

高頻度運行下において、最高表定速度に合わせた運行ダイヤの設計、つまり筋を立てたダイヤを設計した場合は、運行ダイヤに余裕時分が殆どないことから、日常的に列車遅延が発生し、駅の時刻表は遵守されない。この対策として、運行間隔のみを掲示する運行間隔時刻表の適用が考えられる。ただし、運行系統が比較的単純な路線への適用は容易であり効果的であると推察されるが、列車種別や行き先が複雑な路線への適用については慎重な議論が必要である。一方で、列車遅延の実績に合わせた運行ダイヤの設計、つまり筋を寝かせたダイヤを設計した場合は、早発禁止の規程があることから、日常的な遅延の実績値よりも停車時間を短く設定するため、駅の時刻表は出発遅延が前提とされる。また、遅延が発生していない際には、運行ダイヤに設定された十分な余裕時分は、不必要な経過時間であり輸送力低下に他ならない。従って、いずれの思想で運行ダイヤの設計を行ったとしても、駅の時刻表が遵守される運行ダイヤは設計されないこととなる。そのため、時刻表を遵守し、定時性を高めるためには、少なくとも早発禁止の規程を見直し、柔軟な運行ダイヤの設計を可能とすることが必要である。

駅における列車の運行管理は、時刻表で示される時刻に対して、数十秒程度の許容時分をもって実行されている。例えば、時刻表で8:00発の場合は、7:59:40～8:00:20の

範囲で出発することとし、実質的に20秒程度の早発は実施されていることになる。現場での取り扱いにおいて必要な余裕時分としての早発であり、利用者全体の利便性を考慮して実施されているものと推察される。ここで、早発の考え方には2つある。1つは上述した運行管理における時間誤差を緩和する余裕時分としての早発である。もう一つは、運行管理の自由度及び柔軟性の向上のための早発である。本章で言及する早発は後者であり、現状の許容時分越える時間を対象としている。ただし、特にラッシュ時間帯においては運行間隔が短く、利用者の乗降に要する停車時間も短縮されることが殆どないことから、早発可能な時間は数十秒から数分程度となる。運行管理の柔軟性の視点から早発を実施している事例として、山手線の運行管理がある。山手線では早朝及び深夜時間帯のみ分単位の時刻表を提示しているが、日中については時刻表を提示していない。幾つかの採時駅でのみ運行ダイヤに基づく時間管理を行っているが、その他多くの駅では等間隔運行を重視した運行管理を実施し効果を挙げている。

諸外国では、郊外への路線や幹線路線については駅に時分単位の時刻表が掲示されているが、地下鉄等の都市内の路線については、始発、終発の時間帯のみ時分単位の時刻表を提示し、その他の時間帯については概ねの運行間隔が掲示されている。ボストンの地下鉄のように、駅の表示は運行間隔のみとなっているが、印刷された時分単位の時刻表が駅で配布されている場合も多い。希少な例として、ソウル地下鉄は、日本の多くの鉄道と同様に、時分単位の時刻表を掲示している。

山手線や諸外国の地下鉄に導入されている運行間隔のみを提示する時刻表は、運行系統が比較的単純な路線において有効な手法である。一方で、列車種別や行き先が多様な路線については、利用者が目的とする種別及び行き先の列車を選択して行動するケースが多いため、時分単位の時刻表を提示しないことにより利用者の利便性が低下する可能性が考えられる。しかしながら、現実の問題として、遅延発生時には、時刻表が乱れているうえに、駅の電光掲示板は種別と行き先のみを表示し、時刻を非表示とする対応が取られている。つまり、現実の問題として、時刻表の非表示による利便性低下は定常的に発生しているが、これに起因した大きな問題が生じていないことから、その影響が限定的であることが分かる。これは、通勤時間帯において、多くの利用者が都心駅で降車し、行き先に表示される終着駅を目的地としていないことが要因として考えられる。したがって、定常的に列車遅延が発生してダイヤが乱れている現状においては、列車運行管理の柔軟性の観点から、運行系統が複雑な路線においても運行間隔のみを提示する時刻表の導入の有効性が伺える。また、同様な事例として、列車の早発については、対象時間が数十秒から数分程度であることから、これによる個々の利用者の利便性低下の影響は小さいと考えられる。その一方で、結果として路線全体の列車遅延は縮小されることか

ら、利用者全体の効用が高くなることが期待される。

一方で別の視点として、時分単位の時刻表の存在が鉄道事業者の定時運行に対する取り組みのインセンティブを高める効果もあると考えられる。利用者にとっても、各駅の到着時分が提示されていることで、数分の遅れが発生していたとしても計画を立てやすくなることの利便性が発生する。列車遅延の発生頻度の高い路線は、複雑な運行系統である場合も多く、パターンダイヤの設計も容易ではないことから、時刻表提示のあり方については、路線の特性に応じて利用者と事業者とを巻き込んだ十分な議論が必要である。



写真-7-2 山手線有楽町駅の時刻表掲示

表-7-1 諸外国の地下鉄の時刻表

地域	都市名	企業体名称	営業キロ (km)	路線数 (線)	最短運転間隔 (秒)	時刻表掲示
北アメリカ	トロント	Toronto Transit Commission	68.3	4	141	始発, 終電
	ニューヨーク	MTA New York City Transit	374	27	120	始発, 終電
	サンフランシスコ	San Francisco Bay Area Rapid Transit District	168	5	150	始発, 終電
ヨーロッパ	ロンドン	London Underground Limited	402	11	105	始発, 終電
	パリ	Regie Autonome des Transports Parisiens	205	16	85	始発, 終電
	モスクワ	Moskovski Metropoliten	325	12	90	始発, 終電
	サンクトペテルブルク	St. Petersburg Metropoliten	110	5	87	始発, 終電
アジア	北京	北京市鉄運営有限公司	450	15	120	始発, 終電
	上海	上海地鉄運営有限公司	77	11	165	始発, 終電
	ソウル	Seoul Metro	138	4	150	終日
	シンガポール	Singapore Mass Rapid Transit Corporation Ltd.	130	3	120	始発, 終電
	東京	東京地下鉄	195	9	110	終日
	東京都交通局	109	4	150	終日	

索引) 東京メトロハンドブック, 世界の地下鉄, 各企業体 HP より作成

(2) 本研究の提案に関する制度上の課題

駅において列車の運行間隔を保持するためのデジタル時計の導入については、既存のデジタル時計が導入されており、これの表示時間の変更のみであることから、制度上の課題は存在せず、信号システムと情報システムを接続する技術的な課題のクリアにより、導入が期待される。ボトルネック駅手前の区間における減速運転の導入については、駅間の列車運転方法に関する規定は安全上のものであることから、本提案は既往のランカーブより速度低下の安全側への誘導を行うものであるため、制度上の課題は存在しないものと考えられる。遅延発生時の間引きについては、鉄道運転規則（昭和62年運輸省令第15号）の第六十二条（列車の運転時刻）第二項に、列車の運行が乱れたときは、列車の性質等を考慮して運転整理を行い、所定の運行に復するよう努めなければならないと規定されている。本規則は、運転時刻に関する規定であることから、ここで言う所定の運行とは、時刻表で記された出発時刻、到着時刻を遵守した運行を意味するものと考えられる。本研究の提案は、出発時刻を遅らせる代わりに、所要時間の回復、到着時刻の遵守する運行管理手法であり、出発時刻については規定に反しているとも解釈される。しかし、既に、列車遅延時に、後続列車の遅れによる間隔調整のために、出発時間を遅らせる運行管理手法は、多くの事業者で実施されていることから、公益上の必要性に基づき、制度上の課題も存在しないものと考えられる。輸送障害時の運転再開における間隔調整については、鉄道運輸規程（昭和17年鉄道省令第3号）第五章非常事態発生の際に於ける運送第七十七条では、非常事態の発生に際し運送上の必要ある場合に於いては、同規程第二章旅客運送第二十二条の、時刻表に指示した時刻より前に列車を出発しないこととする規定に依らないこととされており、所定の運行に復するよう、列車運行の柔軟性が認められている。したがって、制度上の課題も存在しないため、適用に向けた検討の蓄積が期待される。

7.3.3. 輸送障害時の技術と制度に関する課題

台風や降雪等の悪天候に起因する輸送障害は、大規模な列車遅延を発生させ、時折、首都圏鉄道の輸送機能を麻痺させることがある。平成28年1月18日の大雪の影響により、通勤・通学時間帯において発生した首都圏鉄道の利用者混雑及び列車遅延の激化による混乱は記憶に新しい。同日未明からの降雪により、都心等の平野部においても約5cmの積雪が観測された。鉄道事業者各社は、積雪のための徐行運転等による列車運行の乱れの影響を最小限に抑えるため、通常時よりも運行本数を減少させる間引き運転を

実施することで対応することとした。多くの鉄道事業者が通常時の輸送力に対して2割から3割程度まで運行本数を減少させて運行した。京王電鉄は、車両基地内の架線が雪の重みより切断し、車両を出庫出来なくなったことから、運行本数を2割程度に減少させて運行した。それらの結果、駅には列車に乗り切れない利用者が溢れ、都心に近付くほど列車に乗車出来る利用者数は少なくなり、東急田園都市線においては正午過ぎまで入場規制が続いた駅もあった。これを受けて、国土交通省では平成28年1月20日に「首都圏における降雪時の鉄道旅客輸送に関する連絡会議」を開催し、降積雪時に対する安全輸送等の確保、及び利用者への情報提供のあり方等について、鉄道事業者との意見交換を行っている。会議では、間引き運転の実施を前日に告知することにより社会的な混乱を縮小する等の対応策が議論された。

間引き運転は、輸送障害時等において、列車運行の乱れによる駅間停止を防止し運行の安全性を確保するとともに、団子運転の発生による列車遅延の拡大を抑制する運行管理手法として、各鉄道事業者で一般的に用いられている。積雪時の運転規制等については、平成26年2月の積雪による東急東横線の列車衝突事故を受けて、国土交通省が同年同月に全国の鉄道事業者に対して、積雪の状況に応じた適切な運転規制等を実施することの行政指導を行っているところである。

間引き運転の実施は、列車遅延の拡大抑止及び早期回復に有効である。しかしながら、実施の仕方次第では、平成28年1月の事態の様な混乱を招き、結果として列車遅延を拡大させてしまう場合もある。通勤・通学時間帯において、輸送力の確保は首都圏鉄道の責務であり、輸送力を一定程度減少させる間引き運転は、最小限に留めることが必要であり、そのためには、間引き運転の実施方法について、事前に十分な検討を蓄積しておくことが重要である。

平成28年1月のように、首都圏鉄道全体の輸送力が低下している中で、通勤・通学時間帯の膨大な輸送量を捌く場合の列車の間引き方と、特定路線の輸送障害等において振替輸送が実施され需要が分散された後の間引き方では、重視すべき焦点が異なる。前者は輸送力確保が重要課題であり、駅間停止を回避しながら駅での列車到着間隔を可能な限り大きくしない運行管理が求められる。後者は、団子運転の発生を回避し、いかに線路上の列車の詰まりを解消するかに重点が置かれることとなる。

前者の輸送障害時における輸送力を保持した運転再開手法については、郊外部と都心部とで停車駅を偏らせた千鳥停車により、都心に近い駅の輸送力を確保した運行パターンの適用や、東日本大震災時に運転再開直後の銀座線で実施した先行列車出発後に後続列車を出発させ駅間停止を確実に防ぐ運行管理手法等が考えられる。後者の団子運転の回避については、本論文の主題として分析してきたところである。輸送障害時の運行管

理においては、これらいずれの場合も、駅での乗客発生率と線路の閉そく区分を踏まえて、駅別、駅間別に列車遅延の影響を分析し、対策を検討しておくことが重要である。例えば、列車の発車を待たせるべき駅と、待たせずに直ちに発車させるべき駅とを分析したうえで、適切な対応を実行することが賢明である。その一例として、本研究では輸送障害時における運転再開方法に関する分析を行い、単位時間当りの乗客発生率が高く、上流駅との駅間距離が長い田園都市線渋谷駅については、列車到着間隔を大きくしないため、運転再開時にあえて出発を遅らせることが、当該路線の遅延拡大抑制に寄与することを提示した。この様に運行ダイヤが大幅に乱れる輸送障害時等においては、路線全体で均一的な運行管理ではなく、特定の駅や駅間に重点をおいた戦略的な運行管理の検討を各路線の特性に応じて進め、検討の深度化及び蓄積を増やしていくことが不可欠である。

7.3.4. 交通政策基本法と列車遅延の指標化に関する課題

これまでの都市鉄道政策は、混雑緩和を主たる目的として実施されてきた。その弊害として、速達性の低下や慢性的な列車遅延の発生が顕在化している。このため、混雑率のみならず、速達性及び時間信頼性に関する新たな指標を作成し、これら3つの指標を一体的に評価することが重要であることは、第1章で記述したとおりである。指標は継続的に定点観測される必要があるため、新たな指標の策定及び評価を行っていくためには、鉄道事業者の協力が不可欠である。速達性に関する指標については、市販の時刻表の活用により、表定速度等の時系列変化を算定することが可能であるが、列車遅延に関するデータは、これまでに公表されていないことから、分析するためのデータの蓄積が必要である。2013年12月に施行された交通政策基本法に基づき、公共の福祉に資するデータとして共有がなされ、鉄道サービスの更なる向上の視点から、データの活用が図られることが望まれる。

(交通関連事業者及び交通施設管理者の責務)

第十条 交通関連事業者及び交通施設管理者は、基本理念の実現に重要な役割を有していることに鑑み、その業務を適切に行うよう努めるとともに、国又は地方公共団体が実施する交通に関する施策に協力するよう努めるものとする。

2 前項に定めるもののほか、交通関連事業者及び交通施設管理者は、基本理念にのっとり、その業務を行うに当たっては、当該業務に係る正確かつ適切

な情報の提供に努めるものとする。

(国民等の役割)

第十一条 国民等は、基本理念についての理解を深め、その実現に向けて自ら取り組むことができる活動に主体的に取り組むよう努めるとともに、国又は地方公共団体が実施する交通に関する施策に協力するよう努めることによつて、基本理念の実現に積極的な役割を果たすものとする。

(関係者の連携及び協力)

第十二条 国、地方公共団体、交通関連事業者、交通施設管理者、住民その他の関係者は、基本理念の実現に向けて、相互に連携を図りながら協力するよう努めるものとする。

また、データ公表については、ICカードにより蓄積されるビックデータの活用も期待される場所である。列車遅延の現象は、利用者行動と列車運行が連動して時系列で動的に変化することから、列車運行実績値と同様に、利用者行動に関する動的なデータは、遅延の実態分析及び対応策の検討において有益な情報である。ICカードに蓄積される年齢階層別ODデータ等のビックデータは、利用実態に即した鉄道サービスの検討を可能とし、詳細な現状分析から列車遅延の改善のみならず、混雑率緩和や乗換え利便性の向上、起終点間の速達性向上等、多様なサービス向上を導く可能性を有している。情報公開には個人情報の問題等、解決すべき多くの課題が存在するが、将来的には一定の条件を付与して活用可能となることが期待される。

7.4. 本章のまとめ

本章は、列車遅延に影響を及ぼす要因とその解決に向けた課題について、前章までの分析結果を踏まえて、技術的及び制度的な視点から包括的に記述した。技術的な課題として、駅での旅客乗降については、都心駅や地下鉄駅において抜本的な施設改良が困難であることから、限られた空間を活用する設計思想や、旅客流動の効率化及び分散化、利用者及び事業者の意識改革、安全管理及び運行管理上の内部規程の見直しについて検討の余地が考えられる。列車の運転設備においては、線路閉そく区分の目的意識や、その発展形である CBTC 導入時の運用、ICT を活用した情報伝達についての検討の深度化が、列車遅延の解消に向けて有効と考えられる。また、運行計画の視点から、相互直通運転路線における事業者間の更なる連携について、より一層の進展に向けた議論の必要性が考えられる。

制度的な課題としては、列車運行の早発に関する規程と、それを見直した際に必要となる運行間隔を提示した時刻表の導入について、事業者と利用者の双方の視点から効果と適用の可能性を検討した。列車運行に係わる諸規程においては、実態に即してなく、列車運行の自由度の低下による利用者サービスの低下を引き起こしている可能性が指摘される。その一例が列車の早発禁止に関する規程である。時刻表を遵守し、運行の定時性を高めるためには、この規程を見直し、事業者の努力を引き出すための柔軟なダイヤ設定を可能とすることが必要と言える。

東京圏の都市鉄道は膨大な量の旅客を限られた鉄道容量で輸送しており、その歪として顕在化する列車遅延は、様々な要素が複雑に連動していることから、それ一つで列車遅延が解消される施策はない。このため、駅、列車運転、運行計画等において出来る施策を積み上げていくことが列車遅延対策の礎となり、それらの相乗効果が列車遅延を解消するものと考えられる。そのため、各部門において実態分析に基づく技術的、制度的な検討を重ねていくことが重要である。

参考文献

- 1) 交通政策審議会陸上交通分科会鉄道部会 東京圏における今後の都市鉄道のあり方に関する小委員会 中間整理, 2015.
- 2) (財)運輸政策研究機構: 都市鉄道の広域的なネットワーク機能を活用した混雑緩和対策に関する調査 報告書, 2010.
- 3) (財)運輸政策研究機構: サービスの高度化に伴い発生する遅延等に対応した定時運行の確保方策に関する調査 報告書, 2011.
- 4) 岩倉成志: 東京圏の都市鉄道が世界に模範でありつづけるために, 運輸と経済, Vol.75, No.10, pp.40 -47, 2015.
- 5) 宮崎一浩, 日比野直彦, 森地茂: 路線の特性に着目した都市鉄道における列車遅延分析, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.70, No.5, pp.477 -486, 2014.
- 6) JR 東日本アプリ: <http://www.jreast-app.jp/>
- 7) 国土交通省「首都圏における降雪時の鉄道旅客輸送に関する連絡会議」
http://www.mlit.go.jp/report/press/tetsudo02_hh_000068.html
- 8) 成山堂書店, 『列車ダイヤと運行管理』, 2008.
- 9) オーム社, 『鉄道ダイヤ回復の技術』, 2010.

第 8 章

結論

第8章 結論

本研究は、従来の都市鉄道政策の負の側面として顕在化する列車の運行遅延を対象に、鉄道事業者の取組み及び列車運行実績値を用いた現状分析を行い、時系列的な定量分析から列車遅延の発生・波及及び回復メカニズムの解明を試みた実証研究である。これにより、既往の列車遅延対策の課題を抽出し、技術的、制度的な検討を加え、現状の鉄道サービスレベルを維持したうえで、鉄道の信頼性を回復するための具体的な方策の提案を目的として論じている。

第1章『序論』では、東京圏の鉄道政策の経緯及び鉄道サービスレベルの現状を踏まえ、東京圏の都市鉄道が抱える新たな課題である列車遅延の概要について公表資料を基に実態把握を行った。また、人口減少社会においても増加傾向にある東京の夜間人口、女性・高齢者の社会進出の進展、訪日外国人旅行者の著しい増加等を背景に、社会問題化する列車遅延が今後も解消されることなく、現状以上に悪化する可能性が高いことについての問題意識を提示した。

第2章『既往研究の整理』では、本研究に関連する既往研究及び鉄道事業者の列車遅延対策を体系的に整理した。そして、列車運行挙動の動的分析から列車遅延メカニズムの解明及び列車運行の最適化を試みる本研究の学術的新規性を、並びに団子運転の解消を目的とする既往の運行管理と異なり、列車遅延の早期回復を目的とした運行管理手法の提案を試みる実務的新規性を示した。

第3章『列車遅延の現状分析』では、列車遅延メカニズムの解明に向けて、複数のデータを用いた遅延現象の定量分析を行い、列車遅延に影響を与える要因を整理した。定量分析では、列車遅延の発生及び波及・拡大の要因が、利用者混雑（乗降時間拡大による遅れ）と列車混雑（過密ダイヤによる遅れ）とに分類され、その影響度合いが時系列で推移することを示した。加えて、列車遅延の回復が列車運行間隔に作用されることを提示し、列車運行の改善による遅延の拡大抑制及び早期回復方策の可能性を示唆した。

第4章『列車運行シミュレーションモデルの構築』では、駅での利用者乗降と、列車群の運行挙動とを時系列で一体的に分析するため、離散型シミュレーションモデルを構築した。セルオートマトン法を適用し、実際の線路閉そく区間と同様にセルを分割することにより、列車群の運行挙動が再現可能であることを実証した。また、列車到着間隔の乱れと駅停車時間との連動性をモデルに内生し、定常的な列車遅延現象を再現した。

第5章及び第6章では、列車運行挙動の変化が列車遅延に及ぼす影響についてシミュレーションモデルを用いた分析を行い、高頻度運行下における輸送力保持の観点から列車遅延対策を検討した。

第5章『列車運行挙動と列車遅延の影響分析』では、個々の列車の駅間走行挙動に焦点を当て、駅出発間隔と駅到着間隔の関係性を先行列車との列車間隔の違いから分析し、駅到着間隔を最小とするための走行挙動は列車間隔を適切に保持することに依存することを例証した。他方で、連続して走行する列車群の走行挙動の分析から、列車遅延の顕在箇所が転位することを示し、駅別に実施する列車遅延対策が見かけ上の遅延回復に過ぎず、路線のボトルネック箇所に列車遅延を集積させている可能性を指摘した。これらの分析により列車遅延のメカニズム解明を深度化し、対応策の論拠を提示した。

続く第6章『高頻度運行下における列車遅延対策の検討』では、本研究における知見を展開し、駅、列車走行、及び輸送司令の視点から、高頻度運行下で輸送力を保持することを前提とした列車遅延の拡大抑制及び早期回復方策を提示した。遅延発生時に過密となった列車間隔を駅及び駅間で拡幅するための運行管理手法を提案し、その遅延回復効果を定量的に示した。そして、列車運行管理における基本方針として、遅延回復のための列車間隔の拡幅という新たな理念を導入することが、路線全体の遅延回復を早期化することを提示した。また、この理念は輸送障害時における列車運行管理においても有効であることを示した。

第7章『列車遅延の技術的及び制度的課題の検討』では、列車遅延に影響を及ぼす要因とその解決に向けた課題を前章までの分析結果を踏まえて包括的に論じた。線路上の列車走行に加えて、駅停車時間の短縮に向けた技術的課題、さらに、運行ダイヤで設定された所要時間の増加量だけでなく、時刻表からの離れにより定義される列車遅延についても議論を展開し、制度的な課題を提示した。現行の列車運行に係わる諸規程は、実態に即していなく、列車運行の柔軟性を低下させ、列車遅延を誘引している可能性を指摘した。

以上の各章から得られた知見を踏まえ、本論文の結論を述べる。本研究は、高頻度運行下において列車遅延が連鎖する現象に関して、列車運行と旅客乗降との連動性を考慮し、①顕在化した列車遅延の回復要因を明示した点。線路閉そくや信号設備による路線の輸送力と高頻度運行を行う列車1本1本の動的な分析から、②列車遅延が回復するメカニズムを明示した点。列車の運行方式に着目し、③運行本数の減少による輸送力低下を伴わない遅延回復方策を明示した点。これらの3点に本研究の学術的な特色がある。また、列車遅延対策の技術的、制度的な検討は、本研究に実務的な有用性を付加している。既往の研究は、列車遅延の発生・波及のメカニズムにおいて、駅間の列車走行を所与の条件としている。この場合に導かれる遅延対策は、駅停車時間の短縮、及び列車運行の等間隔化に集約されてしまい、ラッシュ時間帯に駅停車時間の短縮が非現実的であることから、実質的には列車運行の等間隔化が唯一の列車遅延対策となっている。しか

し、列車運行の等間隔化は、高頻度運行下の遅延発生時においては、列車遅延の拡大抑制策としては有効であるが、回復方策としての効果は小さい。一方で、現状の列車運行管理は、列車遅延発生時に各列車のダイヤに対する遅れを最小化するために、列車間隔を縮小することが行われている。その例外として列車間隔を拡大する場合が、列車間隔の過剰な拡がりに起因して発生する団子運転を防ぐための、停車時間の延長である。これらに対し、本研究では、先行列車との列車間隔を拡げることにより、次駅へ早く到着できる領域があることを提示し、実データを用いて検証した。すなわち、列車運行手法の最適化を検討するため、列車遅延メカニズムにおける列車運行挙動を動的な変数として扱い、実際の信号コードを反映したシミュレーションモデルを用いた分析を行った。また、そこから得られた知見を列車遅延のメカニズムにフィードバックし、列車運行管理の視点から列車遅延対策の検討を行った。その結果、高頻度運行下における列車遅延の拡大抑制及び早期回復方策について、慣習的な概念から脱却した新たな理念を提示している。これにより得た知見は、駅間の列車走行のみならず、列車遅延発生時における路線全体の列車運行管理の基本理念として応用が可能であり、さらに本研究の分析対象路線だけでなく、東京圏の都市鉄道に広く展開することが可能である。高頻度運行下で発生した列車遅延は、前進することを優先する従来の慣習的な列車運行手法により波及・拡大する場合があるため、「遅延回復のための列車間隔の拡幅」の理念による列車運行手法を導入することが必要であり、これにより輸送力を保持した列車遅延の拡大抑制及び早期回復が実現することを、本研究は示し得た。加えて、一時的な部分最適化を目指すことなく路線またはネットワーク全体の最適化を図ることの必要性を示した。また、政策含意として、列車遅延の状況に応じた的確な方策を施すため、路線の駅別及び駅間別に対応方策の検討を蓄積することの重要性を述べている。

到着時刻の定時性と所要時間の信頼性は、自動車交通や航空機等の他の交通機関に勝る鉄道交通の優位性であり、鉄道が独自に築いてきた文化でもある。東京圏の都市鉄道が誇ってきた国際的にも類を見ない高い鉄道分担率は、この定時性と時間信頼性により遂げられたものであり、今後、東京圏の国際競争力強化を推進するうえで、その重要性は益々高まるものと確信している。

本研究の成果は、従来の車内混雑緩和等を中心とした政策から脱却するとともに、鉄道の信頼性を取り戻し、利用者への新たなサービス向上へと展開できる鉄道計画へ発展するものである。

Appendix

列車運行の基本的な考え方

列車運行の基本的な考え方

1.1 運転曲線（ランカーブ）

運転曲線図とは、列車の走行状態をグラフ化したものである。列車の運転方法は、基本的には力行運転、惰行（等速）運転、ブレーキ操作の繰り返しになるため、これらを表現したものになる。まずは簡単に運転曲線図の見方を紹介する。図1のように、縦軸に速度（青色）と時分（桃色）、横軸に距離（キロ程）を取る。図中の青線は列車の速度と走行状態を示しており、速度曲線と呼ばれている。また、桃色の線は時間曲線と呼ぶ。この列車の場合、A駅を発車してからキロ程1km地点の速度は約100km/hとなり、それはA駅を発車してから約1分後ということが分かる。このように運転曲線図は速度曲線と時間曲線で構成されている。

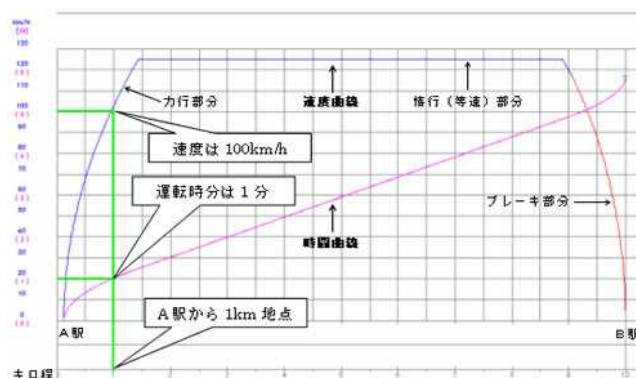


図1 A駅～B駅間の運転曲線図の例

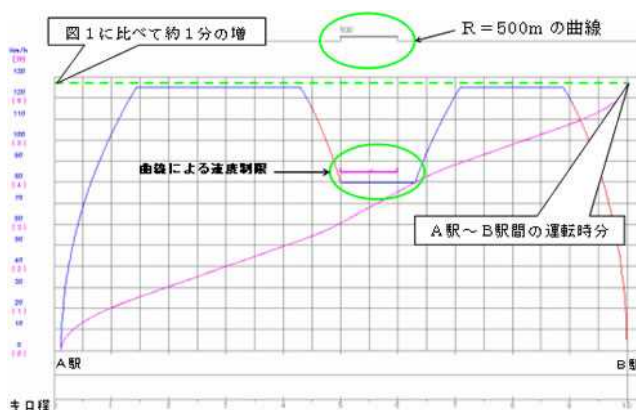


図2 A駅～B駅間の運転曲線図（制限有）

しかし、実際の線路には曲線、勾配、分岐器、トンネルなど様々な条件が付帯し、線路条件による列車速度の制限が発生することがある。例として、速度制限（半径 500m、曲線通過速度 85km/h 以下に制限）がある場合の運転曲線図を図 2 に示す。図 2 のような曲線制限がある場合、図 1 の制限条件がない場合に比べ、A 駅～B 駅間の運転時間が約 1 分増えていることが、運転曲線図を描くことにより分かる。曲線の制限速度は半径だけでなく、車両性能や緩和曲線長など、種々の条件で決まる。半径 500m で必ず 85km/h の制限速度というわけではない。このように運転曲線図は駅間の所要時分だけでなく、列車の運転状態も知ることができるため、列車ダイヤの基となる運転時間や、列車と列車とが運転できる間隔である運転時隔の算出の他に、新線建設や線路改良を行う際の設備検討に幅広く利用されている。また運転時間の算出に運転曲線図が利用されるようになったのは、大正末期頃からであり、それ以前は経験から運転時間を算出し、試運転列車によって確認や修正を行っていた。また、長年にわたり、運転曲線図の作成は手作業によって行われていたが、近年では運転曲線図を作成するためのコンピュータシステムが開発され、利用されている。コンピュータシステムの導入により、運転曲線図の作成は簡単に行えるようになったが、運転曲線図はあくまでも運転方法をシミュレーションした一つの例であり、他のシミュレーションと同様に、実際の列車による確認が大切となる。

1.2 運転時隔

先行列車と後続列車との間隔は運転時隔と呼ばれる。運転時隔には、大きく分類して 4 種類がある。

- 1) 続行時隔：同一線路上における先行列車と後続列車の運転間隔
- 2) 追込み時隔：異なる線路に到着させる場合の先行列車と後続列車の運転間隔
- 3) 開通時隔：異なる線路から発車する場合の先行列車と後続列車の運転間隔
- 4) 平面交差支障時隔：2 線路以上の折返し着発線において、先行列車が進出してから平面交差する対向列車到着後、後続列車が進出できるまでの運転時隔

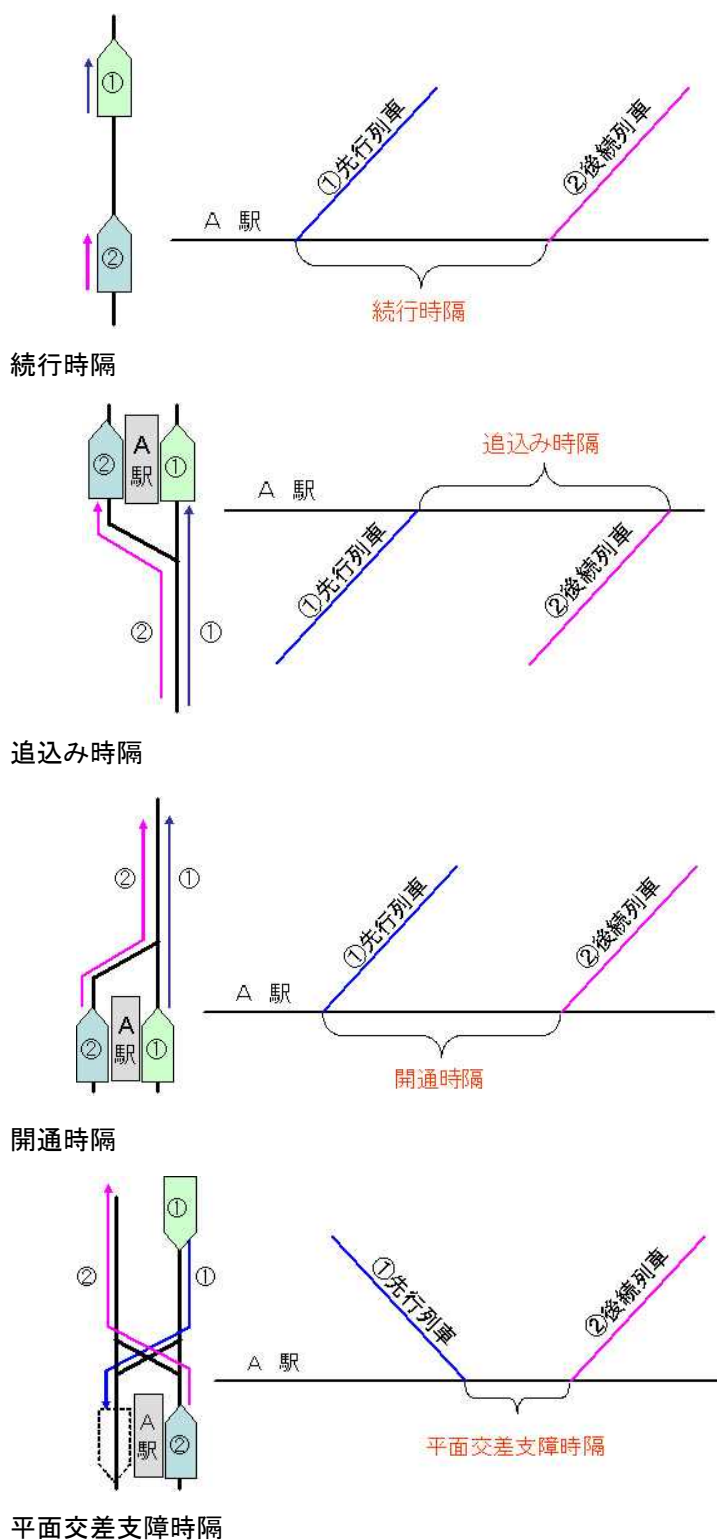


図3 運転時隔の例

駅間運転時分、停車時分、運転時隔の3つの時間に関する情報があると、基本的なダイヤグラムを描くことが可能となる。自動車を運転するとき、おそらく前の車がブレーキをかけた時に、自分の車がぶつからない程度の距離を意識していると思われる。列車相互の距離もぶつからないための距離が信号機によって決まる。図4は列車位置と信号機の現示の模式図を表している。

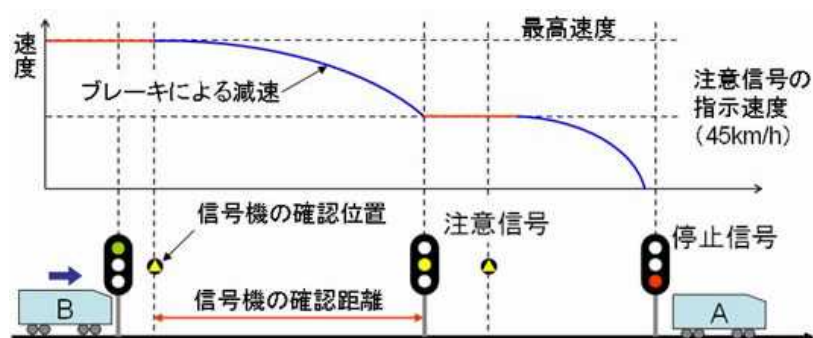


図4 列車の位置と信号機の現示

列車 B の運転士は、自列車の前方に見える信号機の現示に従って運転する。図4で進行（青）信号を見て、信号機内方に進入した列車 B の運転士は、今度は前方に注意（黄）信号を見る。注意信号を見た運転士は、ブレーキを扱い、注意信号の指示する速度（この場合は45km/h）まで減速して、信号機を通過することになる。図3には、「信号機の確認位置」として、黒色丸中に黄色三角のあるマークが記しているが、前方の信号機の現示を確認する位置のため、当然そこから信号機が見える必要がある。また、確認位置と信号機本体との距離は、信号現示を見た運転士がブレーキをかけたときに、信号機本体までにきちんと速度が低下する距離を確保する必要がある。

2つの列車の間隔については、信号機の位置と信号機の確認距離の両方が関係する。実際に走行する2つの列車の間隔について、図5のモデル線区を使って見ていく。先行列車 A の動きに伴って、後続列車 B の運転士が見る信号機の現示がどう変化するか意識すると、図5-1では、列車 A は信号機の内方にある。列車 B は、信号機の進行信号を見ている。次に、図5-2では列車 A は次の閉そく区間（信号機4の内方）に入りかけている。しかし、列車はまだ信号機4の内方に完全に入りきっていないので、信号機2の現示は注意信号のままとなる。一方、列車 B は信号機1の内方に進入してきているが、まだ信号機3の確認位置までは来ていないため、信号機1の進行信号の指示速度（最

高速度)で走っている。図5-3で、列車Aが信号機4の内方に完全に入ると、信号機2の現示は注意(黄色)から進行(青色)に変わる。このとき後続列車Bが、信号機2の確認位置にいれば、進行信号を見ることになる。逆に、列車Aが信号機4の内方に完全に入る前に、列車Bがこの位置に来ていれば(図5-4)、列車Bの運転士は信号機2の注意現示を見て、ブレーキをかけることになる。次に、図5-2では列車Aは次の閉そく区間(信号機4の内方)に入りかけている。しかし、列車はまだ信号機4の内方に完全に入りきっていないため、信号機2の現示は注意信号のままである。一方、列車Bは信号機1の内方に進入してきているが、まだ信号機3の確認位置までは来ていないため、信号機1の進行信号の指示速度(最高速度)で走っている。つまり、列車Bの運転士が信号機2の進行信号を見るために、最低確保しなければならない列車Aとの間隔は、図5-3の青線で示した、信号機4と信号機2の確認位置の距離になる。同様の方法で、信号機ごとの先行列車と後続列車の最短間隔が決まることとなる。

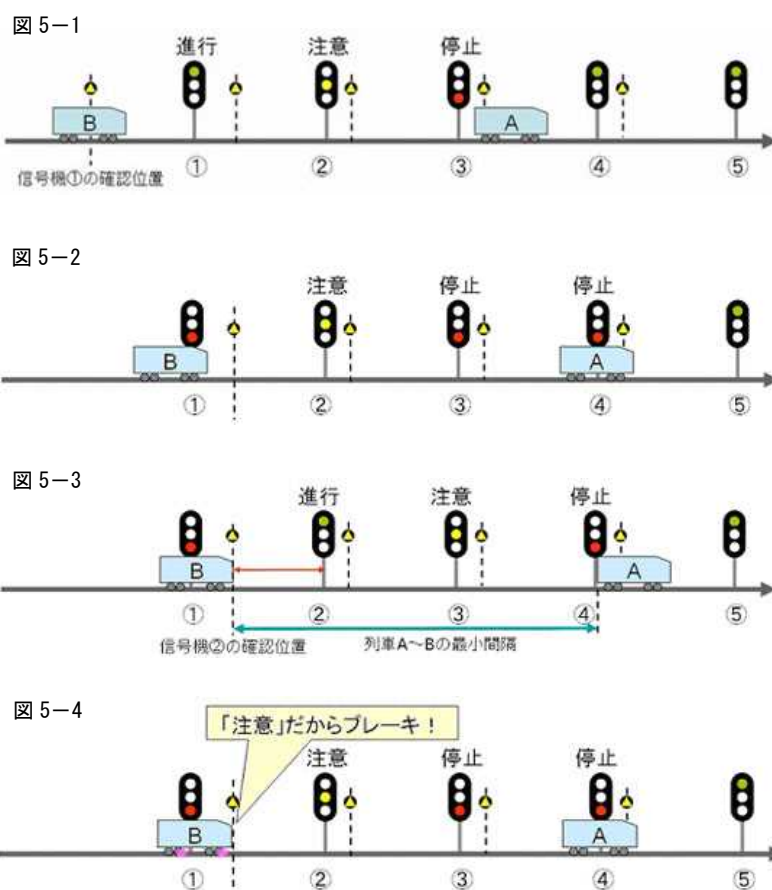


図5 列車運転と信号現示

図5では列車の動きを場面毎に示したが、連続的に図示する。図6に示すように、縦方向に信号機位置を、横方向に時間変化を表す。ここでは列車A、B共に一定の速度で走るものと仮定する。列車Aの移動軌跡を図上に表すと、薄桃色の帯となる。列車の先頭位置、後部位置は帯の両側の紫色の線で示されている。図6で小さく信号機のマークが描かれているが、列車Aの後部が信号機の内方に入りきると、対応して後方の信号機の現示が上位に変化する。このとき、列車Aと列車Bとの最小間隔は、図5-3で示した考え方を図6に当てはめると、列車が信号機3の内方に入りきったとき、列車Bが信号機1の確認位置にいる事が列車AとBの最小間隔になる。図中では点(a)の位置である。同様に列車Aが信号機2、信号機3の内方に入りきったときの列車Bの最小間隔は、図中の点(b)、(c)の位置になる。

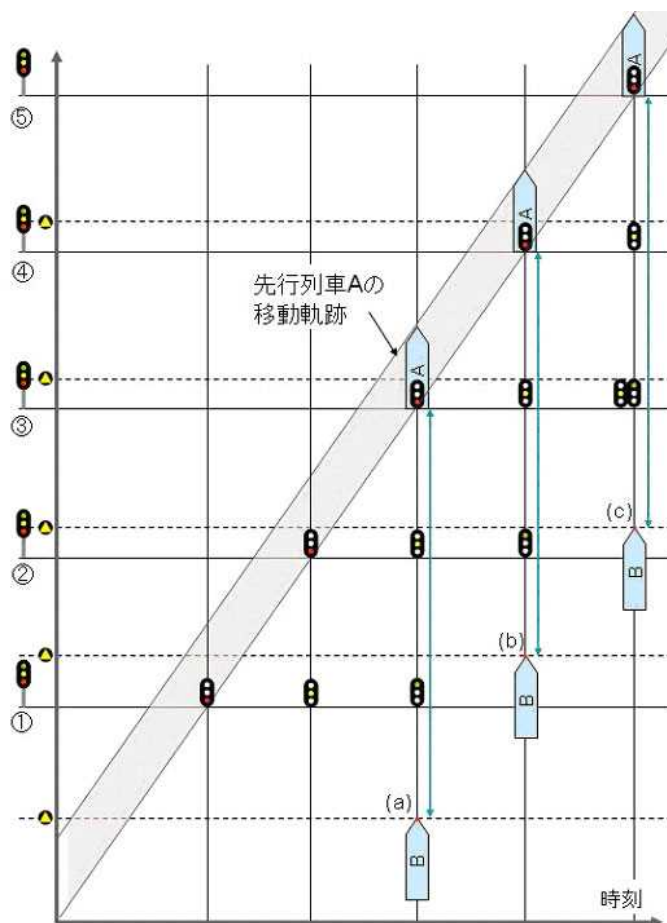


図6 列車位置と信号機現示の時間変化

これまで、二つの列車相互の「距離」という観点で「間隔」を見てきたが、「時間」という観点で「間隔」を見てみる。図6の点(a)は、後続列車Bが進行現示を見ながら、先行列車Aに最も距離的に接近できる位置を示している。点(a)の位置において、先行列車Aが通過してから、後続列車Bが通過するまでの時間は、図7において、列車Aが点(a)と同じ位置(つまり信号機1の確認位置)を通るのは、点(A)になる。よって、列車Aが通過してから、列車Bが通過するまでの時間は、点(A)と点(a)の間の長さ T_a で示される。この T_a が、信号機1の確認位置における「続行時隔」となる。同様の方法で、信号機2と信号機3の確認位置における「続行時隔」は、 T_b 、 T_c になる。

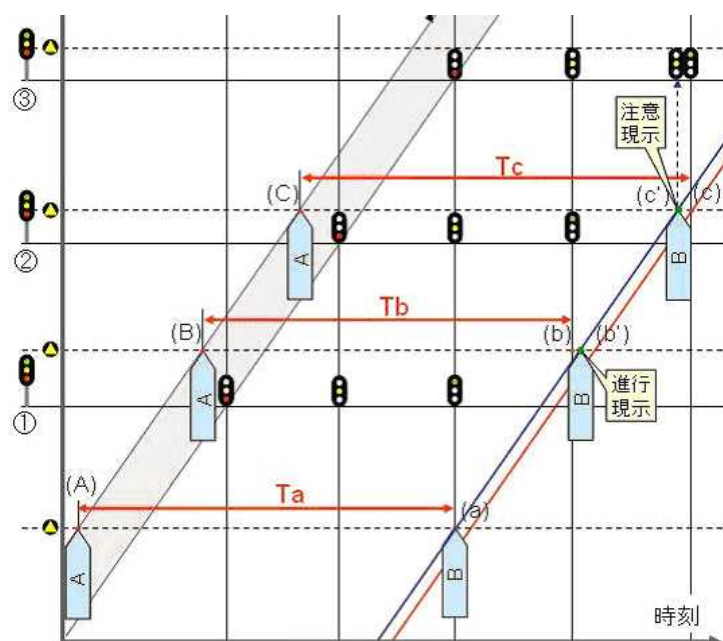


図7 続行時隔の考え方

点(a)にいる列車Bの動きを追っていくと、列車Bも列車Aと同じく等速で走っているため、列車Bの先頭部分の動きを図7に描くと、点(a)を通る青色の直線になる。点(a)を通過した列車が、信号機2の確認位置まで走ると、点(b')に来る。点(b')は点(b)よりも右側(遅い時刻)ため、このとき前方の信号機は、すでに「進行信号」を現示していることになる。次に列車は信号機3の確認位置に来た。これは点(c')で示される。しかし、点(c')は点(c)よりも左側(早い時刻)となるため、このときは前方の信号機3は「注意信号」を現示しており、列車Bの運転士はブレーキを扱っ

で減速することになる。従って、信号機 1, 2, 3 の確認位置において、「進行信号」を見続けるには、列車 B は点 (c) を通る赤線で示された軌跡を通る運転をする必要があり、この区間での「最小」の「続行時隔」は、 T_c で表される時間になる。 $(T_c > T_a > T_b)$ 同様の手法を、各信号機に当てはめていくことで、駅間の「最小続行時隔」が求まる。図 7 で後続列車 B の移動軌跡を帯で表したものが図 8 である。

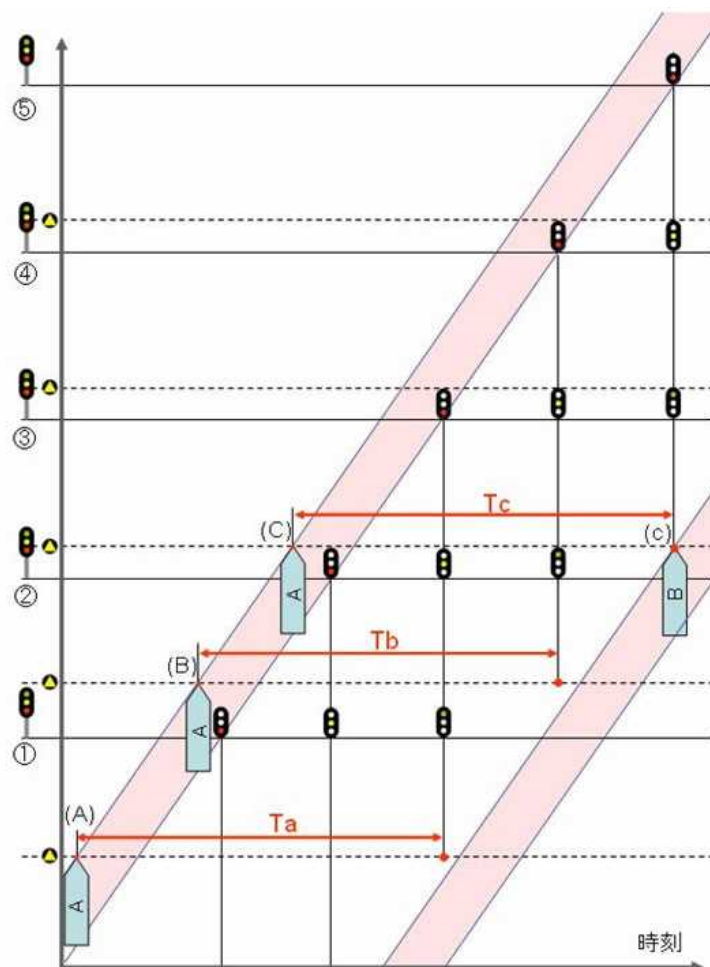


図 8 列車の続行時隔

図 8 では、列車は常に一定速度で走っていると仮定しているが、実際の列車は駅の停車・発車、あるいは曲線などによる速度制限を受けて、加速・減速しながら走行する。具体的には、図 9 に示したような運転をしていることになる。

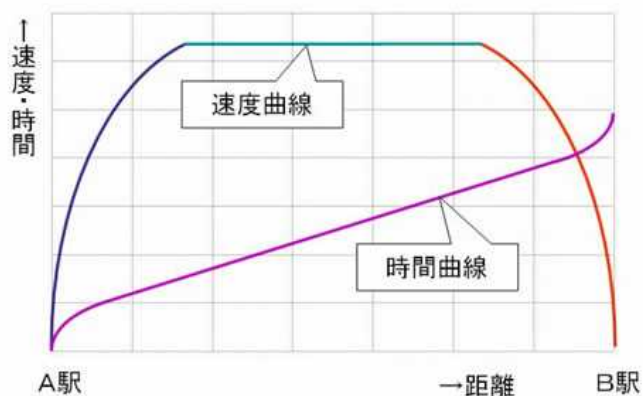


図9 運転曲線図（ランカーブ）

ここで、図9のうち「時間曲線」に着目すると時間曲線は、列車の位置と時間の関係を示したものになる。図8の列車の移動軌跡を示す直線も、列車の位置と時間の関係を示している。この時間曲線の縦軸と横軸を入れ替えて、図8上に描くと、実際の列車の動きが表されることになる。

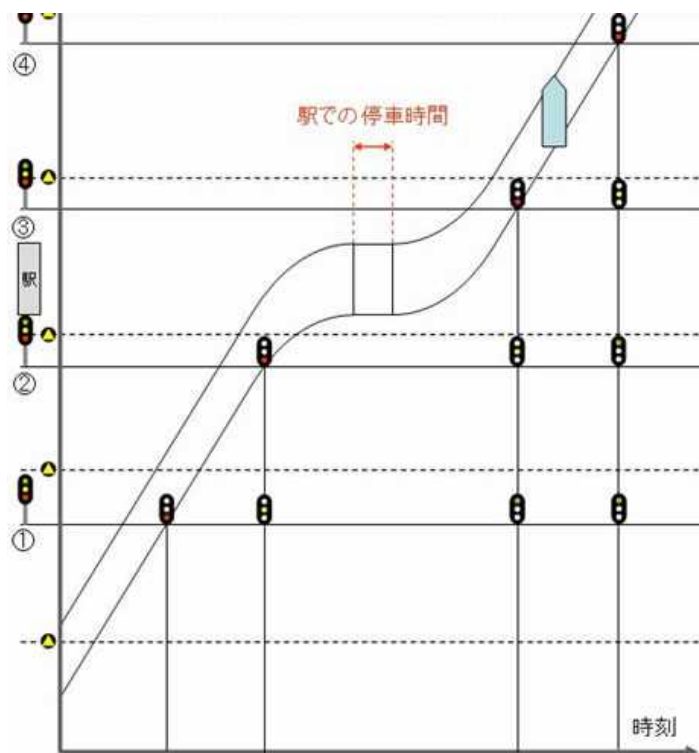


図10 駅に停車・発車する列車の移動軌跡

図10が図8と違う点は、信号機と信号機の中に駅があり、駅に停車して発車する列車の動きが示されている。この列車について、続行時隔を見ていく場合は、図8と同様に、先行列車が信号機の内方に進入した際に、「進行」(青信号)となる後方の信号機の確認位置(図11の赤丸)を見つけていくことになる。各確認位置において、先行列車が通過してからの時間(図11の T_a , T_b , T_c)を取り、そのうち一番長いもの(図11の場合は T_c)が最小続行時隔となる。図8の最小続行時隔 T_c と、図11の T_c とを比べてみると、同じ路線に駅ができて列車が停車することで、時隔が増えていることがわかる。駅だけを作って列車を停車させると、時隔が増えるため運転できる列車の本数が減り、利用者の利便性が損なわれる可能性がある。

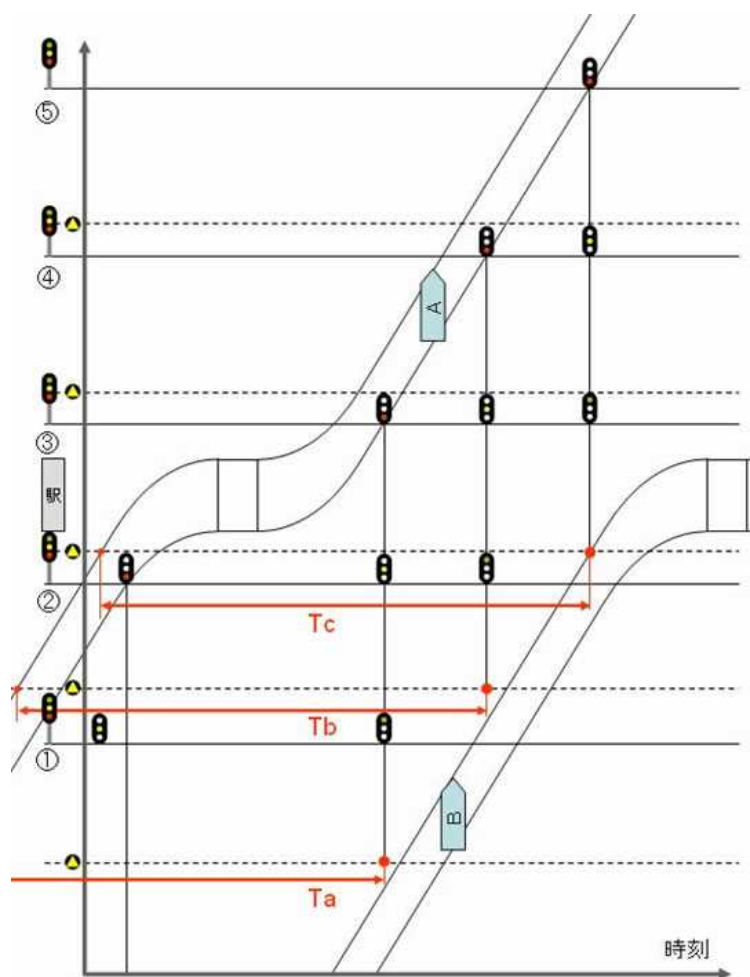


図11 駅に停車する列車の続行時隔

ここで、列車の本数を減らさずに（時隔を増やすことなく）、駅を作るためには、信号機の位置を変えることで、どれだけ時隔を改善できるか検討できる。図 12 では、図 11 における信号機を撤去し、新たに A～F の 6 つ信号機を設置した。新しい信号機配置において、先行列車が信号機の内方に進入した際に、「進行」（青信号）となる後方の信号機の確認位置は、図 12 の青色の丸印で示された位置となる。

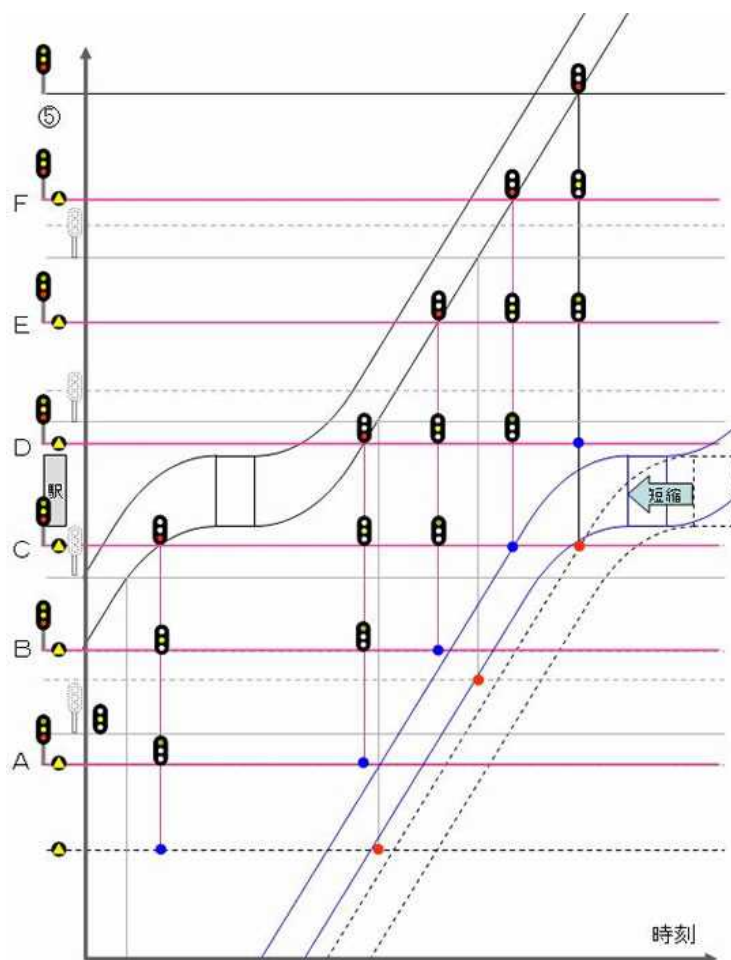


図 12 信号機配置の見直しによる時隔の改善

従来の信号機配置での確認位置が赤色の丸印で、また最小続行時隔で運転される後続列車の軌跡を点線で示しているが、確認位置が青色の丸印の位置に変わることによって時隔が短くなり、後続列車は青色の軌跡で走ることができる。ここでは簡単な例で示したが、実際の新駅設置にあたっては、駅部分の時隔がダイヤグラム作成のキーポイントとなるため、鉄道事業者は信号機配置の見直しを行うこととなる。

参考文献

- 1) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 部内資料, 『鉄道運転豆知識』, 2008.
- 2) オーム社, 『鉄道ダイヤ回復の技術』, 2010.

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、ご支援をいただいた多くの方々に感謝の意を表したい。

政策研究大学院大学 森地茂教授には、筆者が一般財団法人運輸政策研究所への出向以来、終始ご指導、ご鞭撻を賜った。本研究を実施する機会を与えていただくとともに、研究への取り組み方、研究者としての視点や心構えをご教授いただいた。8年にわたり同教授の下で学ばせていただいた経験は、筆者にとって大きな財産となった。心より感謝の意を表する。また、政策研究大学院大学 日比野直彦准教授には、筆者が東京理科大学理工学部土木工学科への入学以来、学部、修士課程から一貫して公私にわたりご指導をいただいた。本研究の着手から論文執筆に至るまでの長い年月にわたり、昼夜を問わず懇切丁寧なご指導をいただいたことに深謝したい。日比野先生の熱心なご指導をなくしては、本論文をまとめることはできなかった。重ねて感謝の意を表する。

本論文の審査において副査の先生方には、多くのご助言、ご示唆をいただいた。政策研究大学院大学 園部哲史教授には、本論文の枠組みや取りまとめ方等について多大なご助言をいただいた。芝浦工業大学 岩倉成志教授には、シミュレーション結果の解釈と妥当性や、研究成果の実社会への展開等についての的確なご助言をいただいた。千葉工業大学 富井規雄教授には、研究の着眼点や今後の拡張性等について熱心なご助言をいただいた。副査の先生方には重ねて深く感謝の意を表する。

東京理科大学 内山久雄教授、一般財団法人運輸政策研究機構 伊東誠主席研究員、東北大学 赤松隆教授、東京理科大学 寺部慎太郎教授、東京地下鉄 山村明義氏には、数多くの有益なご助言、ご指導を賜った。浅学非才な筆者に対し温かいご指導していただいたこと、心より感謝する次第である。日本大学 金子雄一郎准教授、東京工業大学 福田大輔准教授、茨城大学 平田輝満准教授、東京大学 和田健太郎助教には、学会、勉強会等の席上で懇切なご指導を賜った。東京大学 嶋山紀一郎講師には、モスクワ地下鉄へのヒアリング調査にて多大なご協力をいただいた。ここに厚くお礼を申し上げる。

一般財団法人計量計画研究所 毛利雄一博士、公益財団法人鉄道総合研究所 武藤雅威博士、株式会社道路計画 野中康弘博士、一般財団法人計量計画研究所 森尾淳博士、社会システム株式会社 山下良久博士、公益財団法人鉄道総合研究所 柴田宗典博士には、筆者が研究に行き詰っている際に、適切なお助言をいただき、励ましていただいた。深甚なる謝意を表する。また、一般財団法人運輸政策研究所の皆様、鉄道建設・運輸施設整備支援機構の皆様、国土交通省関東運輸局の皆様には、様々な場面でご協力をいただいた。東京急行電鉄株式会社、東京地下鉄株式会社、東武鉄道株式会社、相模鉄道株式会社の方々には、データ提供、調査のご協力等、大変多くのご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。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、心より感謝の意を表する。

最後に、筆者を支え続けてくれた妻 かな、そして、泉宥、泉脩に感謝の意を表したい。

平成28年3月
飯屋崎 圭司