

移動閉そくシステムによる 都市鉄道の超高頻度運行の可能性

吉枝 春樹¹・小林 渉²・岩倉 成志³

¹学生会員 芝浦工業大学大学院 修士課程 建設工学専攻 (〒135-0061 東京都江東区豊洲3-7-5 09C32)
E-mail:me16111@shibaura-it.ac.jp

²学生会員 芝浦工業大学大学院 修士課程 建設工学専攻 (同上)
E-mail:me15045@shibaura-it.ac.jp

³正会員 芝浦工業大学 土木工学科 教授 (同上)
E-mail:iwakura@shibaura-it.ac.jp

東京などの都市鉄道の混雑は、継続的な輸送力増強によって改善されつつあるものの、各線区のピーク時の乗車率が180%を超える路線が未だに存在するなど、混雑は依然として続いている。

本研究では、低コストな都市鉄道の混雑緩和方策として、さらなる高頻度運転化を検討した。運転間隔を制約する駅付近での列車の挙動を静的に分析するとともに、列車の乗降旅客の行動を再現するエージェントモデルによって、乗降時間の感度分析を行った。さらに、実線区の列車群の挙動を再現可能なエージェントモデルによって、90秒間隔のダイヤが組まれた列車群の挙動をシミュレーションで推定したところ、運転間隔は80秒から120秒程度の範囲に分布する結果となった。

Key Words : *urban railway, frequent service, moving block, easing congestion, multi agent simulation*

1. はじめに

(1)本研究の目的と意義

東京などの都市鉄道の混雑は、継続的な輸送力増強によって改善されつつある。しかし、各線区のピーク時の乗車率 180%以下とする目標は依然として達成されておらず、大きな社会的費用が生じている。

日本はすでに人口減少時代となっているが、東京圏は人口減少幅も小さく、もともと公共交通の利用度も高いため、混雑が自然解消することは長期間期待できない。

混雑緩和の有効な対策は、主に複々線化や直通運転化などによる輸送力増強である。しかし、大規模な投資を行うことは、鉄道事業者の投資回収リスクや国・自治体の財務制約によって困難な状況にある。

そこで、本研究では、既存ストックを極限まで有効に活用することで、低コストに輸送力を増強する超高頻度運転の可能性に挑戦する。

本稿では検討対象を東急田園都市線および地下鉄半蔵門線とし、距離時隔曲線をベースとした基礎検討と、マルチエージェントシミュレーション (MAS) による列車群としての検討ならびに旅客の行動のシミュレーション

ンとによって、超高頻度運転の可能性を検討する。運転間隔を現状の 130 秒間隔から、海外で実例のある 90 秒間隔に短縮することをひとつの目標として分析を行う。

(2)用語の定義

本稿で使用する主な用語について、次の通り定義する。

- ・固定閉そく:線路上を一定距離で閉そく区間として区切り、閉そく区間ごとに列車の存在を検知して、一つの閉そく区間に複数の列車が進入しないようにすることで列車の追突を防止する運転保安の手法
- ・移動閉そく:線路上を一定区間に区切る固定閉そくに対して、列車が自律的に位置を検出し、後続の列車に無線信号等でその位置情報を伝達することで、列車の追突を防止する運転保安の手法。
- ・軌道回路:レールに電流を流すことで、車両の在線状況を検出する装置。固定閉そくの場合は、閉そくごとに設けられている。
- ・余裕距離:移動閉そくシステムにおいて、安全確保のために実際の先行列車の最後尾と後続列車の停止点の間に確保する距離
- ・追込時間:先行列車が発車してから、後続の列車が到

着するまでの時間

- ・ 運転間隔: 追込時間に停車時間を加えた時間
- ・ パターン減速度: 運転保安システムのブレーキパターンの減速度
- ・ 停止ブレーキ減速度: 運転士が列車を駅に停止させる際の平均減速度
- ・ 空走時間: 列車にブレーキ指令を与えたあと、所定の減速度に達するまでの時間差を補正する値
- ・ 距離時隔曲線: 距離を縦軸にとり、時間を横軸にとり、列車の先頭と最後尾の軌跡を表したグラフ

(3) 運転間隔短縮方策の前提

運転間隔は、停車時間と追込時間に分けて考えることができる。本稿では、追込時間の短縮方策として、移動閉そくの導入を行った場合について検討する。

本稿では、先行列車から余裕距離分手前まで 1 段階に減速する制御を行うものとし、先行列車の減速度を加味する等の制御は行わない。

停車時間については、運転間隔の短縮によって一列車あたりの乗降客や乗車率が低下することによる停車時間の短縮について推定するものとし、特別な停車時間短縮策はとらないものとする。

2. 既存研究のレビュー

鉄道の最小運転時隔に関する基本的な知見を整理し、超高頻度運転に関する既存の研究をレビューする。

(1) 最小運転時隔に関する既存の知見

日本鉄道電気技術協会¹⁾資料では、移動閉そくを含む次世代の運転保安システムを採用した場合の最小運転時隔についての理論が述べられている。

この資料では、加速度と減速度を一定として、停止点に向けて 1 段ブレーキで減速する運転保安システムを備えた線区での最小運転時隔を式(1)と(2)で表せるとしている。

さらに、日本鉄道運転協会資料²⁾では、軌道回路長の部分を除いた同様の式が示されており、軌道回路長 0m の条件において解析的に最小値を求める式として、式(2)および(3)が示されている。

本稿で導入を検討する移動閉そくシステムについては、軌道回路長を 0 もしくは 1 などの小さな値とすることで最小運転時隔を求めることができる。

式(3)、(4)では余裕距離について言及がないが、余裕距離は編成長に加算すれば考慮することができる。

これらから得られる重要な知見は ①最適な駅進入速度があり、この速度以外では追込み時間が伸びる ②最

適な駅進入速度は、列車の加減速性能および編成長で決定される ③停車時間および空走時間は運転間隔に直接作用する という 3 点である。

$v \geq \sqrt{2\alpha(L+k+s)}$ のとき

$$T_{min} = \frac{\sqrt{2\alpha(L+k+s)}}{\alpha} + \frac{v}{\beta} + e + t_0 \quad \dots (1)$$

$v < \sqrt{2\alpha(L+k+s)}$ のとき

$$T_{min} = \frac{(2\alpha+\beta)v}{2\alpha\beta} + \frac{L+K+S}{v} + e + t_0 \quad \dots (2)$$

$$V_{min} = \sqrt{\frac{7.2\alpha\beta}{2\alpha+\beta}} L \quad \dots (3)$$

$$T_{min} = \sqrt{\frac{7.2(2\alpha+\beta)}{\alpha\beta}} L + e + t_0 \quad \dots (4)$$

T_{min} : 最小運転間隔(s) V : 速度(m/s)*

V_{min} : 追込時間最小化速度(m/s)* α : 加速度(m/s²)*

β : 減速度(m/s²)* L : 編成長(m) k : 余裕距離(m)

S : 軌道回路長(m) e : 空走時間(s) t_0 : 停車時間(s)

*式(3)、(4)のみ速度は km/h、加減速度は km/h/s とする。

一方、これらの式では再現できない状況として ①駅の直後に速度制限があり、先行列車の進出速度が遅い場合 ②速度照査パターンの減速度と、運転士が駅に停止する操作を行う際の減速度が異なる場合 が挙げられる。

また、実路線の最小運転間隔について検討するときは、運転間隔に直接作用する停車時間がどの程度になるかを予測する必要があるほか、車両の挙動には車両形式による性能差や気象条件、運転士の操作等も影響するため、実際の挙動はさらに複雑であると考えられる。

(2) 海外の鉄道の超高頻度運転の状況

日本地下鉄協会資料³⁾によれば、2 分以下の間隔で運転を行っている地下鉄は、東京の 1 分 55 秒を含めて世界に 19 都市あり、特にパリとモスクワについては、輸送密度がそれぞれ 7.3 万人/km と 8.8 万人/km を記録しながらも、1 分 30 秒台での高頻度運転を実現している。両都市の輸送密度とも東京の 11.9 万人/km には及ばないものの、大量輸送を高頻度で実現しており興味深い。

これらのうち、パリの地下鉄は普通鉄道と同様のレールと車輪にゴムタイヤ駆動を組み合わせた方式であり、ゴムタイヤの摩擦抵抗が大きい特性を利用して、高い加

減速性能をもたせている⁴⁾。

また、2分以下の間隔で運転を行っているリールやトゥールーズ、パリの一部、バンクーバーの都市鉄道で採用されているVALシステムは、ゴムタイヤで走行する短編成の列車によって運行される中量輸送システム⁹⁾であり、今回の検討の対象とは異なる。

一方、普通鉄道方式を採用するモスクワについては、仮屋崎ら⁹⁾によって調査が行われている。これによれば、乗降時間が短くなる要因として①乗客が駆け込み乗車を行わず、降車の際も車内で声を掛け合いながらドア付近まで移動する②ホーム中央に広いコンコースがあり、乗車客と降車客の錯綜が生じにくい③通路・階段が一方通行の箇所が多い④エスカレーターがボトルネックとなっており、結果的にホームへの乗客の流入が迅速に乗降可能な人数に制限されているといった点があるとしており、追込時間が短くなる理由として⑤日本の地下鉄より車両の加減速性能が高く、編成長が短い⑥ダイヤの余裕時間が多い⑦等時隔を意識した運行管理を行っている⑧長い駅間距離と良好な線形によって駅間でダイヤが回復しやすい点があるとしており、これらによって高頻度運転が実現していると分析している。

東京への適用を考えた場合、モスクワの事例を参考にしてホーム等の大規模な改修を実施すると事業費が高額となり、複々線化など同様の課題を抱えることになる。

一方、①や③、⑤、⑥などの運用や計画面での工夫は東京の地下鉄にも比較的安価に適用できる可能性があり、超高頻度運転への重要な示唆であるといえる。

(3)効率的な運転操作に関する研究

平栗ら⁷⁾によれば、運転時隔が最小になるよう、運転時隔を制約する地点に、最適な時刻に最適な速度で列車が到達するように制御（予測制御）することで、路線網全体の運転が効率化されることを示している。

また、西山ら⁸⁾はマルチエージェントシミュレーションシステムを用いて、列車群のなかに駅間での停止を回避する運転を行う列車が増えると、線区全体の遅延を吸収する効果が高まるとしている。

さらに、仮屋崎ら⁹⁾らによって、本研究の検討対象路線である東急田園都市線において、予測制御に類似した考え方に基づき、特定駅間の沿線に電光表示板を設置し、運転士が先行列車の位置や停車時間を確認できるようにすることで運転操作を効率化させ、遅延を減少させた事例が報告されている。

これらの研究では必ずしも超高頻度運転を念頭に置いているわけではないが、超高頻度運転を安定的に行うためには追込時間の最小化が重要であり、予測制御は有望な手法のひとつであると考えられる。

一方で、予測制御を実現するためには、運転士に対す

る情報提供と、停車時間の予測精度が課題となる。仮屋崎ら⁹⁾の報告例のような仕組みを多くの駅間で採用する場合、リアルタイムに停車時間を予測し、保安システムの速度パターンを先行列車の走行状況に応じて動的に制御することが考えられる。

(4)他の超高頻度運転の可能性に関する研究

清水ら¹⁰⁾は、移動閉そくと最小間隔を維持する同期制御の導入を前提として、長編成の列車を複数の短編成に置換えて超高頻度運転を実現することを提案している。

これは、長編成を置換えた複数の短編成列車からなる緩行列車群が、急行列車の停車しない別々の小駅に選択的に停車し、小駅間相互の利用者については、急行列車の停車する大駅を経由して移動するものである。

この研究は、小駅相互間のODが少ないことに注目したユニークな運転方法を提案しているが、利用者にとって大幅な利用方法の変更になり、鉄道事業者にとっても従来とは著しくことなる運行が必要になる。

本稿では、より従来からの運転手法に近い形で、超高頻度運転を実現する可能性について検討する。

3. 追込時間に関する考察

追込時間を左右する要因としては、保安装置の仕様、車両の性能のほか、駅付近での列車の速度が影響する。

既往の研究では、加減速度を一定として解析的に最小運転間隔を求めているが、ここではそれに加え、東急田園都市線および地下鉄半蔵門線で運用されている東急8500系（10両編成 乗車率100%）の引張り曲線に基づいた距離時隔曲線も作成して影響を考察するとともに、式では解を求められない場合についても検証を行った。

距離時隔曲線は、描画ピッチを1mとし、1ピッチごとに運動方程式を解いて列車の速度と通過時刻を計算して作成した。駅の前後800mについて計算を行っており、列車は加減速時以外は停止するか一定の速度で走行するものとして計算した。編成長はすべてのケースで検討対象路線の列車と同じ200mとした。

(1)追込時間の分析ケースの整理

はじめに、検討対象路線の各駅に対して、移動閉そくシステムを適用した場合の短縮効果について、実際の線形を加味した条件で試算する。

次に、平坦で直線な仮想線形のもとで各種の条件を変動させて、追込時間への影響を考察する。そもそも、追込時間に影響するのは、①後続列車が進入しても安全であると判断する基準②先行列車が発車したあと、後続列車が安全に駅に進入できる位置まで走行する時間③

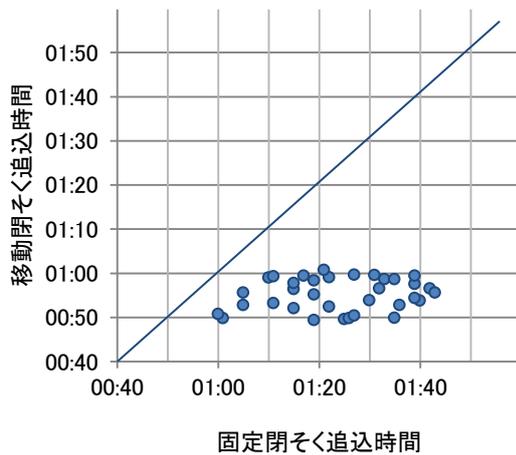


図1 保安装置による追込時間の変化

後続列車が安全に駅に進入できる条件が整ったあと、駅に進入して停止位置に停止するまでの時間であるといえる。

そこで、①に関連して、移動閉そくシステムの仕様と追込時間の関係を分析する。具体的には、余裕距離とパターン減速度の追込時間への影響を考察する。

さらに、車両性能及び運転に関係するものとして、③に影響する停止ブレーキ減速度、①に影響する空走時間、②に影響する加速性能の影響を考察する。

上記以外に②、③が影響を受けるケースとして、進入側、進出側の双方が速度制限を受ける場合についても分析を行う。

(2) 移動閉そくシステムの採用による短縮効果

検討対象路線における、現状の保安装置 (ATC) に対して、移動閉そくを適用した場合の追込時間短縮効果について、ランカーブより試算した。

移動閉そくの追込時間は検討対象路線の実際の線形情報を利用して作成したランカーブをもとにして求めた。固定閉そくの追込時間は、既存のランカーブから軌道回路境界の通過時刻を読み取って求めた。

移動閉そくシステムは、速度照査パターンが減速度を 3.0km/h/s 、余裕距離を 100m として試算した。編成長は 200m である。その結果を図1に示す。

固定閉そくの場合に対して、移動閉そくを適用した場合には、追込時間が短縮している。移動閉そくの場合の追込時間は、固定閉そくの場合の追込時間に関わらず、概ね 50 秒から 1 分の間に分布する結果となった。

これは、停車時間が 30 秒程度までであれば、 90 秒間隔程度で運転できる可能性を示している。

また、今後の分析で検討するが、駅付近での速度制御等によってはこの追込時間をさらに短縮することができる場合がある。

表1 余裕距離変化時の追込時間

ケース番号	1	2	3	4	5	6	7	8
進入速度 (km/h)	90	90	90	90	45	45	45	45
進出速度 (km/h)	90	90	90	90	45	45	45	45
余裕距離 (m)	50	100	150	200	50	100	150	200
空走時間 (秒)	3	3	3	3	3	3	3	3
パターン減速度 (km/h/s)	3	3	3	3	3	3	3	3
停止ブレーキ減速度 (km/h/s)	3	3	3	3	3	3	3	3
追込時間 (秒)	58.5	61.0	63.5	65.8	45.0	49.0	53.0	57.0
計算値 式(1)(2)	56.7	59.0	61.1	63.1	45.0	49.0	53.0	57.0

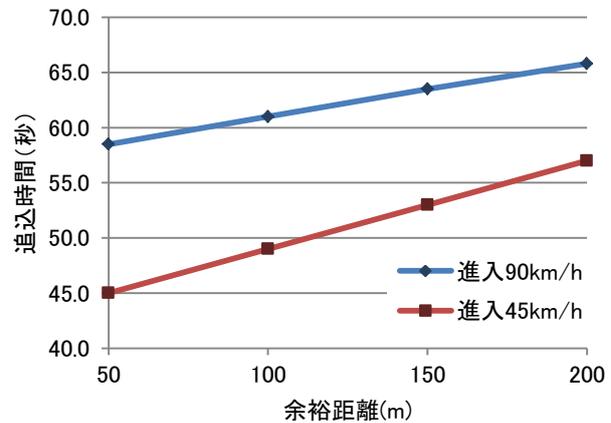


図2 余裕距離の変化に伴う最小運転時隔の変化

(3) 移動閉そくシステムの仕様と追込時間

移動閉そくシステムの仕様による追込時間の変動について検討する。ここからは、直線の平坦路線を仮定した仮想条件の下で東急 8500 系の性能を再現して作成した距離時隔曲線を中心に分析していく。

a) 余裕距離の影響

移動閉そくシステムでは、先行列車の位置を連続的に検出することができるが、その検出した位置に対して、一定の余裕距離を設定している。そこで、駅接近時の速度が低い場合 (45km/h) と高い場合 (90km/h) そのそれぞれにおいて、余裕距離を 50m から 200m まで変動させたときの追込み時間を分析した。結果を表1に示す。

表1の追込時間は距離時隔曲線から求めた追込時間で、計算式とあるのは式(1)と(2)から求めた追込時間である。ケース1~4は進入速度が 90km/h の場合、ケース5~8は進入速度が 45km/h の場合を示す。ケース番号と追込時間の項目に着色しているのは、すべての表に含んでいる共通条件のケースである。

距離時隔曲線から求めた追込み時間を、横軸に余裕距離、縦軸に追込時間をとってプロットしたグラフを図2に示す。

余裕距離が長くなると追込時間も長くなる傾向を示している。速度が低いほうが余裕距離の変化の影響をより大きく受けている。これは、低速時のほうが制動距離が短いため、先行列車との間に確保するべき距離のうち、余裕距離の割合が大きくなり、より影響が大きかったと

表2 パターン減速度変化時の追込時隔

ケース番号	1	2	3	4	5	6	7
進入速度 (km/h)	90						
進出速度 (km/h)	90						
余裕距離 (m)	100						
空走時間 (秒)	3						
パターン減速度 (km/h/s)	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
停止ブレーキ減速度 (km/h/s)	3						
追込時間 (秒)	69.8	64.6	61.0	58.4	56.3	54.5	53.1

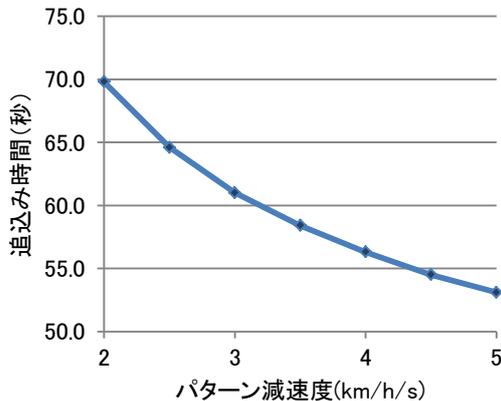


図3 パターン減速度変化時の追込時隔

考えられる。

理論式と距離時隔曲線から算出した追込時間には差があり、進入速度 45km/h では両者の結果は一致しているが、進入速度 90km/h では3秒ほどの開きがある。

これは、理論式では加速度を一定であるとしているのに対して、距離時隔曲線では加速度を東急 8500 系の実際の特性を模擬しており、高速域での加速度の低下を再現していることが主に影響していると考えられる。

a) 移動閉そくシステムのパターン減速度の影響

パターン減速度を、2.0~5.0km/h/s まで変動させた。後続列車の駅進出後の速度は 90km/h、停止ブレーキ減速度は 3.0km/h/s とした。その結果を表 2 に示す。ケース 1 から 7 にかけて、パターン減速度を 0.5km/h/s ピッチで変化させた。図 3 はその追込時間をプロットしたものである。

パターン減速度が大きい方が追込時間を短縮できる結果となるが、パターン減速度の増加とともに、徐々に効果が小さくなる。パターン減速度は、車両のブレーキ性能の安全上の余裕を見て定められており、一定の限界がある。

ATC などの設計上は、車両のブレーキ性能に対して 20%の余裕をもって設定されることが多く、3.0km/h/s 程度が現状の上限であると考えられる。また、下り勾配の場合は勾配に応じて減速度も低減するため、区間によ

表3 停止ブレーキ減速度変化時の追込時間

ケース番号	1	2	3	4	5	6	7	8
進入速度 (km/h)	90							
進出速度 (km/h)	90							
余裕距離 (m)	100							
空走時間 (秒)	3							
パターン減速度 (km/h/s)	3							
停止ブレーキ減速度 (km/h/s)	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
追込時間 (秒)	65.9	65.9	63.2	61.0	59.3	58.0	57.0	56.1

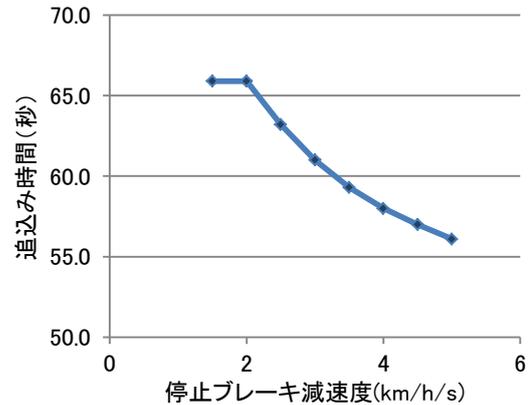


図4 停止ブレーキ減速度変化時の追込時間

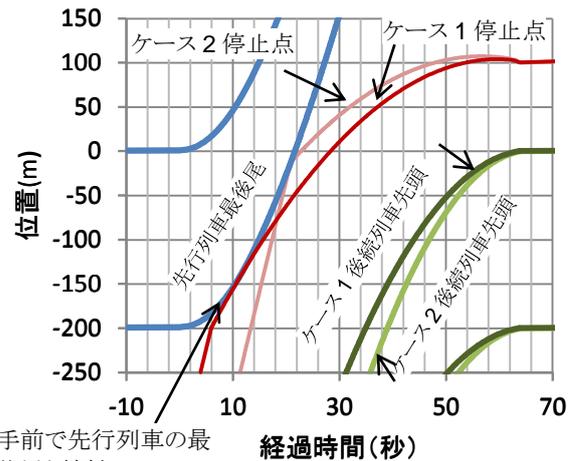


図5 停止ブレーキ減速度変化時の距離時隔曲線

ってはより低い減速度が限界となることも考えられる。

(4) 車両性能および運転の影響による考察

車両の加減速性能やブレーキ時の空走時間の影響について考察する。

a) 停止ブレーキ減速度の影響

パターン減速度を一定として、停止ブレーキ減速度を 1.0~3.5km/h/s の範囲で 0.5km/h/s ピッチで変動させた。その結果を表 3 に示す。図 3 はその結果を横軸に停止ブレーキ減速度、縦軸に追込み時間とってプロットしたものである。

表4 空走時間変化時の追込時間

ケース番号	1	2	3	4
進入速度 (km/h)	90	→	→	→
進出速度 (km/h)	90	→	→	→
余裕距離 (m)	100	→	→	→
空走時間 (秒)	1	2	3	4
パターン減速度 (km/h/s)	3	→	→	→
停止ブレーキ減速度 (km/h/s)	3	→	→	→
追込時間 (秒)	58.5	59.8	61.0	62.3

基本的に、停止ブレーキ減速度を高めると、追込時間が短縮されるとの結果になっている。

しかし、停止ブレーキ減速度を変化させているにもかかわらず、1.5km/h/s と 2.0km/h/s の状態では追込時間に変化がない。これは、停止ブレーキ減速度 1.5km/h/s のほうが先に減速を開始しているため、より先行列車に接近した状態で駅に進入できるためである。両ケースの距離時隔曲線を重ねたものを図5に示す。図5は、横軸が時間、縦軸が位置となっており、経過時間 0 秒は先行列車が駅を発車した時点、位置 0m は先頭車両の駅停止位置である。青線は先行列車の先頭と最後尾の軌跡（停止ブレーキ減速度にかかわらず共通）を示しており、濃緑色線と薄緑色線は停止ブレーキ減速度 1.5km/h/s と 2.0km/h/s のときの後続列車の軌跡を表している。濃赤線と薄赤線で示した停止点とは、それぞれの条件の各時点において後続列車が停止ブレーキ減速度と所定の空走時間で停止できる地点を示している。

先行列車の最後尾と後続列車の停止点が重なる点が追込時間を制約している。停止ブレーキ減速度 1.5km/h/s の場合の停止点は、停止ブレーキ減速度 2.0km/h/s の場合よりも、手前で先行列車の最後尾と重なっていることがわかる。

一般的には、停止ブレーキ減速度を高めるほうが追込み時間を短縮することができるが、低い減速度を用いる場合には、単調な関係にはならないことが示された。

不意に先行列車に接近してしまったような場合は、停止位置より大幅に手前からゆっくりと減速することで、追込時間の伸びを抑えられる可能性がある。

また、停止ブレーキ減速度を向上させて追込時間を短縮するためには、ATO（自動運転装置）やTASC（列車定位停止支援装置）の導入が有効であると考えられる。

b) 空走時間の影響

空走時間は、式(1)、(2)で直接運転時隔に作用するとされていたが、距離時隔曲線によるシミュレーションでもこれを確認するため、分析を行った。結果を表4に示す。ケース1から4にかけて、空走時間を1秒ピッチで変化させた。

理論式では、空走時間の変化は単純に追込時間に上乘せられるとしたが、この分析では空走時間と各時点で

表5 加速性能変化時の最小運転間隔

ケース番号	1	2	3	4	5
進入速度 (km/h)	90	→	→	→	→
進出速度 (km/h)	90	→	→	→	→
余裕距離 (m)	100	→	→	→	→
空走時間 (秒)	3	→	→	→	→
パターン減速度 (km/h/s)	3	→	→	→	→
停止ブレーキ減速度 (km/h/s)	3	→	→	→	→
加速力乗率 (%)	-40	-20	0	20	40
起動加速度 (km/h/s)	1.8	2.5	3.2	3.9	4.6
追込時間 (秒)	69.3	64.3	61.0	58.7	57.0

の速度から、空走距離を割り出して加算した。

その結果、単純に追込時間に加算するよりも 0.2~0.3 秒程度影響が大きくなる結果となった。

c) 加速性能の影響

加速性能の影響を考察するため、加速力を-40%から+40%の範囲で変動させて距離時隔曲線によるシミュレーションを行った。距離時隔曲線の作成上は実車両の加速性能を再現しており、速度に応じて加速度が低下しているため、全速度帯域で一定の割合で加速力を増減させて検討を行った。結果を表5に示す。表5に限って起動加速度を表示しているが、これは列車が発車する時点での加速度である。加速度は、速度上昇とともに漸減する。

加速力 40%の上昇に対して 4 秒程度の最小運転間隔短縮が図れるとの結果になったが、実際に列車の加速度を向上させる場合、変電所容量の増大が必要になったり、乗り心地が低下するなど設備、サービスの両面への影響が大きい課題がある。

(5) 速度制約による追込時間の変動に関する考察

列車の進出、進入速度が制約を受ける場合の追込時間の変動について検討を行う。

a) 後続列車の速度のみが制約される場合

後続列車の速度が制約される場合について検討するため、進入列車に対する進入前の最高速度を 20km/h から 90km/h まで変動させた場合について検討した。その結果を表6に示す。また、進入速度を横軸にとり、縦軸に追込時間をとったグラフを図6に示す。

後続列車の進入速度が制限されるケースでは、45km/h~49km/h で進入する場合に追込時間 49.0 秒の最小値を記録している。追込時間を最小化の上では、後続列車の速度管理が重要であるといえる。

また、最小追込時間となる速度を超える場合のほうが、下回る場合よりも誤差の範囲が小さいことから、信号保安システムによって進入速度を制限する場合、やや高め の速度で規制したほうがより確実に追込時間を小さくできると考えられる。

b) 先行列車の速度が制約される場合

先行列車の速度が制約される場合について、後続列車の場合と同様に、進出速度を 20km/h から 90km/h まで

表6 後続列車の進入速度が制限される場合の追込時間

ケース番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
進入速度 (km/h)	20	30	40	45	50	60	70	80	90
進出速度 (km/h)	90	→							
余裕距離 (m)	100	→							
空走時間 (秒)	3	→							
ハターン減速度 (km/h/s)	3	→							
停止ブレーキ減速度 (km/h/s)	3	→							
追込時間 (秒)	66.9	53.6	49.5	49.0	49.1	50.7	53.6	57.3	61.0

表7 先行列車の進出速度が制限される場合の追込時間

ケース番号	1	2	3	4	5	6	7	8	
進入速度 (km/h)	90	→							
進出速度 (km/h)	20	30	40	50	60	70	80	90	
余裕距離 (m)	100	→							
空走時間 (秒)	3	→							
ハターン減速度 (km/h/s)	3	→							
停止ブレーキ減速度 (km/h/s)	3	→							
追込時間 (秒)	102.4	79.7	70.0	64.8	62.2	61.1	61.0	61.0	

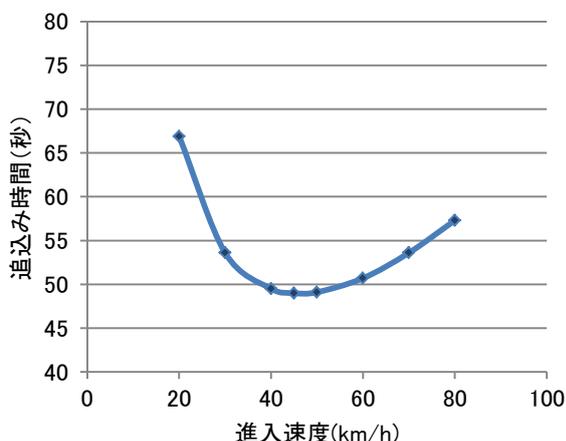


図6 進入速度が変化した場合の追込時間

変動させた場合について検討した。結果を表7に示す。

進出速度が上昇すると単調に追込時間が短縮される結果となった。進入速度の場合と異なり、進出速度は列車間の確保すべき距離に影響がないため、先行列車の進出が遅れることで後続列車の進入が遅れる。そのため、進出速度が早くなると、追込み時間は単調に減少する関係になる。

(6)進出速度と進入速度の関係

後続列車の進入速度の最適値に存在し、先行列車の進出速度は可能な限り早いことが望ましいことはすでに示した通りであるが、やむを得ず進出速度が制限される場合の、後続列車の進入速度について考察する。

そこで、進出速度に応じて進入速度を 1km/h ピッチで変化させて距離時隔曲線を作成し、最適な進入速度を探索した。進出速度が 30km/h, 40km/h, 50km/h の場合それぞれの結果を表8に示す。図7には、各進出速度における進入速度ごとの追込時間を示す。

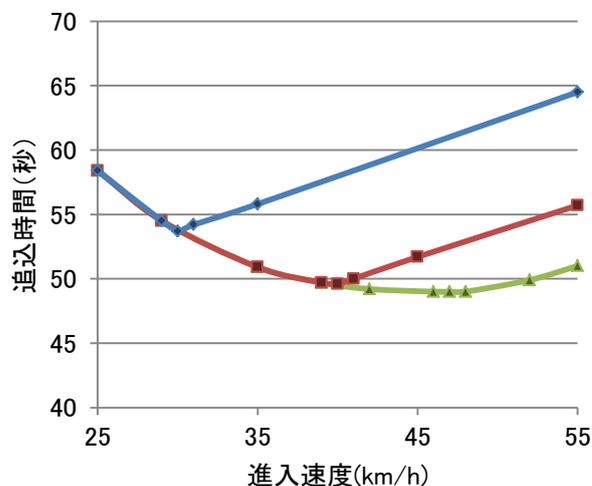
進出速度 40km/h までは進出速度と同じ速度で進入するのが最適との結果を得た。一方で、50km/h では3章で検討した進出速度 90km/h の場合と同じ傾向である。

これは、最適進入速度の 45km/h 程度を越えると先行列車の速度にかかわらず追込み時間が伸びるためである。

進入速度に対する追込時間の感度は、進出速度が低速の場合のほうが高く、より繊細な速度制御を求められる。

表8 最適進入速度の検討

ケース番号	1	2	3
進出速度 (km/h)	30	40	50
余裕距離 (m)	100	→	
空走時間 (秒)	3	→	
ハターン減速度 (km/h/s)	3	→	
停止ブレーキ減速度 (km/h/s)	3	→	
追込時間 (秒)	53.7	49.6	49
進入速度 (km/h)	30	40	44~49



◆ 進出速度50km/h ■ 進出速度40km/h
◆ 進出速度30km/h

図7 各進入速度に対する追込時間

(7)追込時間に関する考察の整理

本章では様々な条件において追込時間がどのように変動するのかを検証したが、重要な知見は ①後続列車の進入速度には最適値があり、減速度の追込時間に対する影響も単調ではない ②先行列車の進出速度は、速いほうが追込時間を短縮できる単調な関係にあり、加速度の追込時間に対する影響も単調 という2点である。

また、やむを得ず先行列車の進出速度が制限されるときは、後続列車の進入速度を先行列車の進出速度と同等とし、余裕距離や空走時間については可能な限り短縮することが望ましい。

つまり、先行列車については可能な限り早くホームから進出させ、後続列車については先行列車の挙動に合わせて進入させることで、追込時間を短縮できる

4. 停車時間の感度分析

停車時間は、運転間隔を直接的に左右するものであり、最小運転時隔に対する影響が大きく、最小運転時隔の評価を行う上で重要である。

本稿では、高頻度運転化による乗客の分散化で停車時間が短縮されることを考慮したシミュレーションを行うが、本章ではその前段として、第 6 章の分析でも用いる角田ら¹⁰⁾による乗降時間推計モデルを利用して、停車時間の傾向の推定を試みる。

(1)乗降時間推計モデルの概要

乗降時間推計モデルは、一定のルールを与えた乗客エージェント群を生成し、ホームと列車の間で乗降行動を再現することによって、停車時間を推定する。乗車旅客、降車旅客、車内に残る旅客の人数をそれぞれ設定可能で、各駅で最も乗降旅客の多い 1 箇所の扉を利用する旅客の行動を再現する。

(1)出力結果の回帰分析

乗降時間推定モデルに複数通りの乗降客数および乗車率の組み合わせた値を入力し、表 9 の結果を得た。

このパラメーターを利用した回帰式により、運転間隔の短縮によって乗降客及び乗車率が比例的に減少した場合の停車時間を分析した結果を図 8 に示す。運転時隔を横軸にとって変数とし、縦軸には時間をとっている。停車時間は停車時間の推計値を示し、上限停車時間はここでは追込時間 50 秒の場合において、各運転時隔において許容される最大の停車時間（運転時隔 - 50 秒）を示している。

停車時間の減少幅に対して上限停車時間の減少幅のほうが大きく、運転時隔を短縮するほど余裕が減少する結果とっており、本条件では 90 秒付近で均衡する結果となっている。

なお、実際のダイヤ編成の際は限界値に 10 秒程度の余裕を見るのが一般的であるほか、停車時間の変動も考慮しなければならない。

(2)出力結果の分布

乗客数を変化させた場合に、エージェントモデルの出力値がどのような分布傾向を示すのかを考察する。表 10 の通りの条件を設定した全 4 ケースで比較を行う。

比較を行った結果を図 9 に示す。乗降人数の変動に従って停車時間も減少しているが、ケース D などの比較的乗降人数が少ないケースでも、長い停車時間となるケースが存在している。

表 9 乗降時間推定モデル回帰分析値

-	パラメータ	t 値
乗車人数(人)	0.771	3142
降車人数(人)	0.472	2748
混雑率(%)	0.040	69.2
定数項	-0.517	-3.9
決定係数	0.932	

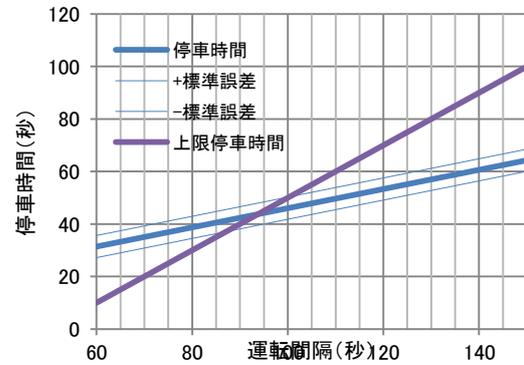


図 8 感度分析結果

表 10 各ケースの設定条件

	乗車人数(人/扉)	降車人数(人/扉)	車内人数(人/扉)
D	26	60	92
C	28	64	92
B	30	68	100
A	32	72	100

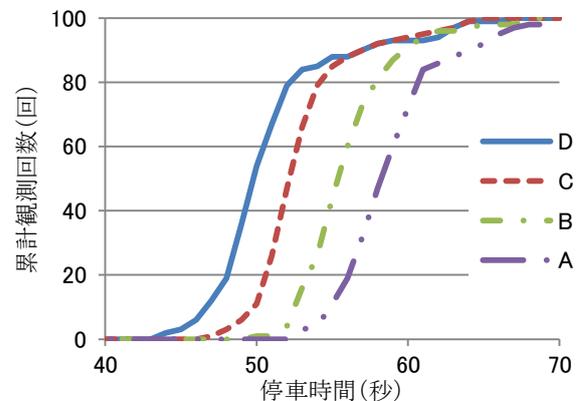


図 9 推定結果累積分布

5. 運転間隔の最小化

運転間隔の短縮方策として、海外の事例やここまでの考察からあげられるものをまとめる。検討の対象とする対策案を表 11 にまとめた。

(1)車両系の対策

車両系の対策としては、3 章での考察より、加減速性能の向上が有効な対策であるといえる。

減速度を大きく取る以外にも、ブレーキの反応速度向

表 11 運転間隔最小化方策

上や安定性の向上が対策として考えられる。ブレーキの反応が早くなれば空走時間を短縮でき、ブレーキの効果の安定性が向上すれば、ブレーキ力が所定値を下回るリスクが軽減され、余裕距離を短縮することができれば、運転間隔の短縮効果が期待できる。

ただし、ブレーキの安定性向上以外の車両系の対策全般について、乗り心地確保の問題がある。

加減速度の上昇は慣性力を増加させることになるほか、空走時間を縮めることは、パターンに接触して自動的にブレーキが作用した場合に、非常に急激に減速が始まることになる。乗り心地の観点から望ましくないうえ、ラッシュタイムであれば立って乗車する旅客も多く、転倒事故につながるなど安全上の問題にもなり得るため、慎重な検討が必要である。

(2)保安装置系の対策

保安装置では、余裕距離の最小化やパターン減速度の向上による追込時間の短縮が考えられる。

パターン減速度の向上については車両系対策と同様の問題が生じる恐れがあるが、列車位置検出の信頼性向上による余裕距離の短縮については、乗り心地等への影響もないことから、技術的に可能な限りの短縮が望まれる。

また、余裕距離については、例えば後続列車の速度に応じて徐々に短縮するなどのより柔軟な対応も望まれる。

(3)運転操作に関連する対策

運転制御の対策の基本は、列車の駅からの進出速度を可能な限り早くするとともに、駅の進入にかかる時間が短くなるようなブレーキ操作や速度制御を実践することである。また、先行列車に過度に接近しないように、到達時間を調整することが運転間隔の短縮につながる。

速度制御に関する対策では、予測制御の実践が究極的な対策である。しかし、実際に適用しようとする、停車時間を正確に予測するとともに、最適な時間に、ある地点を最適な速度で通過できるように後続列車を制御するには、停車時間の予測や運転士に対する速度情報の提供のあり方、そもそもの理想的な走行パターンの導出方法など技術的な課題が多いと考えられる。

ひとまず、予測制御のように到達する時間の調整を行えなかったとしても、接近速度を追込み時間が最小になる速度に合わせるだけでも効果的であると考えられる。

停止ブレーキ減速度の向上については、強いブレーキを使用するのではなく、無駄のないブレーキングによって平均減速度を高めるという視点に立てば、ATO や TASC (列車定位停止支援装置) の導入によって乗り心地と共存しながら追込時間を短縮できる可能性がある。

車両系対策

対策案	効果	課題
加速度の向上	追込時間短縮	変電所容量 乗り心地
減速度の向上	追込時間短縮 停止ブレーキ 減速度向上	安全性確保 乗り心地
ブレーキ反応速度向上	空走距離短縮	ブレーキ技術 の開発 乗り心地
ブレーキの安定性向上	余裕距離短縮	ブレーキ技術 の開発

保安装置系対策

対策案	効果	課題
位置検出信頼性向上	余裕距離短縮	列車位置測定 技術の開発
パターン減速度向上	先行列車との 距離短縮	安全性確保 乗り心地

運転系対策

対策案	効果	課題
予測制御の実践	駅間停車の防 止	列車の適切な 速度制御 停車時間予測
停止ブレーキ減速度の 向上(TASC 等)	追込時間削減	乗り心地
最適速度での進入	追込時間短縮	列車の適切な 速度制御 所要時間増加

その他

対策案	効果	課題
進出側速度制限緩和	追込時間短縮	安全性確保 乗り心地
ホームの増設 (2面4線化等)	停車時間削減	整備コスト 施工の困難さ 用地確保
駅構内階段等の配置 見直し	旅客集中緩和 による停車時 間削減	整備コスト 施工の困難さ
利用者に対する乗降マ ナー啓発	停車時間削減	協力が得られ るか不明確 効果が不確か

(4)その他の対策

主に施設に関連する対策として、進出側の速度制限緩和が追込時間の短縮に貢献する。しかし、速度制限は多くの場合急曲線などに起因する線形上除去が困難な箇所が多いという問題がある。

ソフト的な対策として、利用車に対するマナー啓発を行うことが考えられる。乗降時間が短縮するように車内

で声をかけて譲りあったり、駆け込み乗車を行わないようにすることを求めたりする。コストが比較的安いのが、どの程度の協力を得られるのかが不透明だという課題がある。

6. エージェントシミュレーションを用いた分析

停車時間の感度分析に用いた乗降時間予測モデルに、列車の走行を模擬する駅間走行時間推定モデルを組み合わせた統合シミュレーションを実施した。

(1) エージェントシミュレーションの概要

本稿で使用するマルチエージェントシミュレーションシステムは、乗降時間推計モデルと駅間走行時間推計モデルからなる。まず、列車エージェントが始発駅に配置されると、乗降行動推計モデルが起動して、その列車に乗り降りする乗客を再現して乗降時間を推定する。降車が完了したら、再び駅間走行時間推計モデルが起動して駅間での走行を再現する。

駅間走行時間推計モデルは、実際の列車の動きを模擬しており、先行列車との間隔に基づいて駅間で停車する等の動作も再現することが可能で、先行列車の遅れによる後続列車の遅れを再現することができる。

また、乗降客数は各駅で乗降する人数等は時間帯を区分して任意に設定可能で、様々な状況を再現することができる。

(2) シミュレーション条件

a) 入力ダイヤ

現行ダイヤをもとに、準急と急行が交互に運転されている時間帯の列車間隔を 90 秒に短縮した。また、二子玉川以南で準急が各駅停車を追い越す区間については、各駅停車の運転間隔が短縮されるため、単にダイヤを詰めると追越の時機や実際の列車順序と時刻が整合しなくなることから、個別に調整を行った。

b) 信号保安装置

移動閉そく方式を想定して、余裕距離 100m、減速度 3.0km/h/s にてパターンを作成した。

エアセクションの停止禁止区域への停止を避ける制御を実装している。分岐器の存在する進路については、現状の軌道回路境界を進路の終端とした。

c) 追込時短縮対策

追込時短縮するため、移動閉そくの導入に加えて、東京メトロ線内の各駅で、駅進入速度が最適値に近くなるように最高現示を制限した。

d) その他

車両性能は東急 8500 系の性能とした。停止ブレーキ

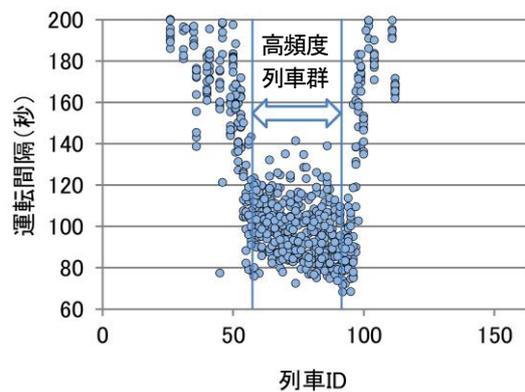


図 10 渋谷駅推定運転間隔

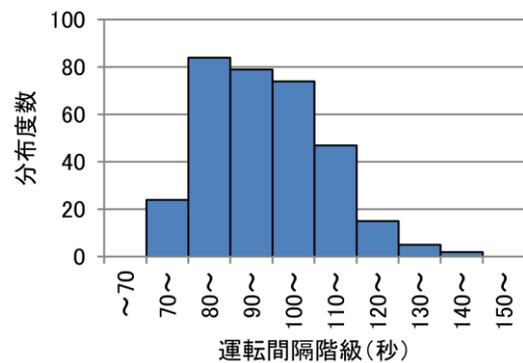


図 11 運転間隔分布ヒストグラム

減速度については、3.3km/h/s でパターンを作成して制動を開始し、15km/h を下回ったところで 3.0km/h/s に切り替わる制御とした。

シミュレーションは結果を安定させるため 10 回実施した。掲載しているデータは、特に断りのない限りその集計値である。

(3) シミュレーション結果

シミュレーションの結果、90 秒間隔を維持できなかった。ダイヤからの差が最大となった渋谷駅断面の運転時隔を図 10 に示す。

運転間隔は 80 秒から 120 秒程度まで分布する結果となっており、90 秒間隔を超過している列車が多数存在している。高頻度運転時間帯に限って運転間隔の分布を示したヒストグラムを図 11 に示す。

(4) シミュレーション結果の考察

既存の状況に比べて運転間隔が縮小される結果となったが、平均の運転間隔は 100 秒程度との結果となった。

一方、状況によっては本数が最大の時間帯でも 80 秒程度の間隔で運転できている列車も存在しており、停車時間のばらつきを抑制することができれば、90 秒程度の間隔で安定した運転を実施できる可能性もある。

今後、シミュレーションから得られた列車の走行状況を精査して、ボトルネックが生じている状況について詳

しく分析する。

(5)シミュレーションに関する課題

今回実施したシミュレーションに関しては、駅間走行時間が過小に推計される傾向がある。また、混雑率等を外生的に与えており、遅れによって乗客が滞留し、乗車率が上昇することを再現できていない課題がある。

また、今回は駅進入時の速度最適化を部分的に実施したが、実際の列車の進入速度が期待した速度を下回る箇所もあるため、速度条件の与え方を改める必要がある。

今後は、これらの課題を解消してシミュレーションシステムの精度を高めたい。

7. まとめ

本稿では、都市鉄道の混雑解消を目的とした高頻度運転の可能性について検討した。

まず、列車の運転間隔は追込時間と停車時間によって決まることを示し、追込時間は列車の駅への進入・進出速度、保安装置の条件などによって左右され、停車時間は概ね車内の混雑状況と乗降客数で説明できると示した。

次に、東急田園都市線および半蔵門線の乗降行動と列車の行動を再現可能なエージェントシミュレーションシステムを用いて、移動閉そくシステムを設備した条件で最小運転間隔 90 秒のダイヤを入力してシミュレーションを行ったところ、運転間隔が 80 秒～120 秒程度に分布する結果となった。

本研究では、検討対象路線について、運転間隔が一つの目標として設定した 90 秒には至らなかったが、今後、速度制御や移動閉そくシステムの再現を精緻化していくことで、高頻度でも安定した運行を行うことができる可能性があるとして、引き続き超高頻度運転の可能性を検討する。

謝辞：本研究の実施にあたり、実路線の設備や車両性能等の情報のご提供を頂いた東京急行電鉄株式会社ならびに東京地下鉄道株式会社に深甚の謝意を表します。

なお、本研究は筆者独自の見解であり、すべての責任は筆者が負うものであります。

本研究は JSPS 科研費【JP16K14323】の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 日本鉄道電気技術協会 平成 7 年度 信号ゼミナール pp.10-pp.27
- 2) 日本鉄道運転協会 鉄道の信号保安設備 付 輸送計画実務の手引, pp.293-pp.317
- 3) 日本地下鉄協会 世界の地下鉄
<http://www.jametro.or.jp/world/> 2016年7月19日閲覧
- 4) 日本地下鉄協会 世界の主要な地下鉄 パリ
<http://www.jametro.or.jp/world/french.html>
2016年7月20日閲覧
- 5) Siemens 社 VAL システム資料
<http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/en/rail-solutions/automated-people-mover/airval-cityval-en.pdf>
<http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/en/rail-solutions/automated-people-mover/paris-en.pdf>
<http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/en/rail-solutions/automated-people-mover/paris-orly-en.pdf>
<http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/en/rail-solutions/automated-people-mover/lille-en.pdf>
- 6) 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, 運輸政策研究 Vol.14 No.2,2011,pp.34-pp.41
- 7) 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, pp29-34, 2010
- 8) 西山正紀, 富井則雄 運転士の操縦方法を加味した列車群運行シミュレーション 平成 24 年電気学会産業応用部門大会, pp.V-271-V-272, 2012
- 9) 仮屋崎佳司, 小野尚, 森地茂 都市鉄道の列車遅延の拡大メカニズムに関する研究 運輸政策研究, Vol.13 No.2 2010, pp.57-64
- 10) 清水嵩弘, 高木亮 移動閉塞を用いた短編成列車群超高頻度運行手法の検討, J-RAIL2015 講演論文集 CD-ROM, No.2511
- 11) 角田隆太, 川村孝太郎, 岩倉成志:都市鉄道の遅延連鎖シミュレーションシステムの再現精度の向上と対策効果の分析,J-RAIL2013 講演論文集,pp.289-292