

都市鉄道の混雑を緩和する 超高頻度運転の可能性

吉枝 春樹¹・岩倉 成志²

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)

E-mail: me16111@shibaura-it.ac.jp

²正会員 芝浦工業大学教授 土木工学科 (〒135-0061 東京都江東区豊洲3-7-5)

E-mail: iwakura@shibaura-it.ac.jp

東京の都市圏鉄道の混雑は、継続的な混雑緩和策によって緩和されつつあるものの依然として激しい。一方、財政制約から多大な投資は難しく、インフラの増強に頼らない輸送力増強が必要である。

本研究では、超高頻度運転によって既存施設を極限まで利用し、信号設備の改良を軸として輸送力を増強する可能性について検討した。追込時間を45～50秒程度に短縮できる可能性が示された一方で、ケーススタディーとしての列車群の挙動を再現可能なシミュレーションを実行したところ、二子玉川～三軒茶屋では90秒間隔、渋谷駅でも80%以上の列車を2分未満の間隔で発着させる可能性が示された。

Key Word : Urban railway , frequent service , moving block , easing congestion , multi agent simulation

1. はじめに

東京の都市圏鉄道の混雑は、継続的な輸送力増強により緩和されつつあるが、各線区のピーク時の混雑率を180%以下とする目標は達成されていない。

東京圏はもともと公共交通の利用度が高いうえ、2050年の東京都の総人口は2005年と同程度を維持すると予想^{脚注}されていることから、混雑の自然緩和は長期間期待できない。一方、国や自治体の財政的制約、鉄道事業者の投資回収リスク等のため、複々線化などの大規模な投資も難しい。

そこで、信号システムを改良し、既存ストックの能力を最大限に引き出すことでインフラへの大規模投資を行わずに輸送力増強を実現する方策を検討する。検討の対象路線を田園都市線および半蔵門線とし、実際の利用客ODや線形、車両性能のデータを用いて検証を行った。

列車の運転頻度は、列車同士が最も接近する駅付近の条件によって左右される。運転頻度は、停車時間と、先行列車が駅を発車してから後続列車が駅に到着するまでの追込時間で決まる。実際のダイヤ編成上は、そこに余裕時間をもたせることで、遅延を回復できるように配慮している。

本研究では、海外事例について考察したあと、追込時間に関する基礎的な検討を行い、シミュレーションによって検討対象路線で運行を実現できる可能性があるか二つのアプローチで検証を行う。

追込時間に関する基礎的な検討では、条件を変化させながら駅付近の列車の挙動を細かく分析し、追込時間の短縮方策やその限界について考察する。

ミクロなシミュレーションによって列車の挙動のほかに乗降旅客の挙動を再現して停車時間を推計することで、実際と同様の利用客が存在する状況での運行可能性を検証する。このシミュレーションには実データを用いており、実路線の環境をベースとしてシミュレーションを行うことを特徴としている。

2. 海外の高頻度運転の事例

(1) 90秒未満の運転間隔の実績

日本地下鉄協会資料¹⁾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7.3百万人/kmと8.8百万人/km (2014年には7.5百万人/kmに低下)を記録しながら

表1 モスクワ地下鉄 運転間隔調査結果

路線	駅名	時間帯	調査 列車数	運転間隔(秒)			停車時間(秒)			追込時間(秒)		
				平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大
6号線	Prospekt Mira	* 7:52~8:40	25	95	87	108	24	6	34	71	62	102
2号線	Teatralnaya	** 16:55~17:34	20	110	87	185	26	14	32	85	62	159
7号線	Krasnopresnenskaya	* 7:48~8:45	33	100	86	125	25	17	41	75	62	98
2号線	Belourusskaya	* 7:45~8:41	33	104	83	140	25	16	35	78	56	122

*環状路線との接続駅 **都心駅（赤の広場近く）

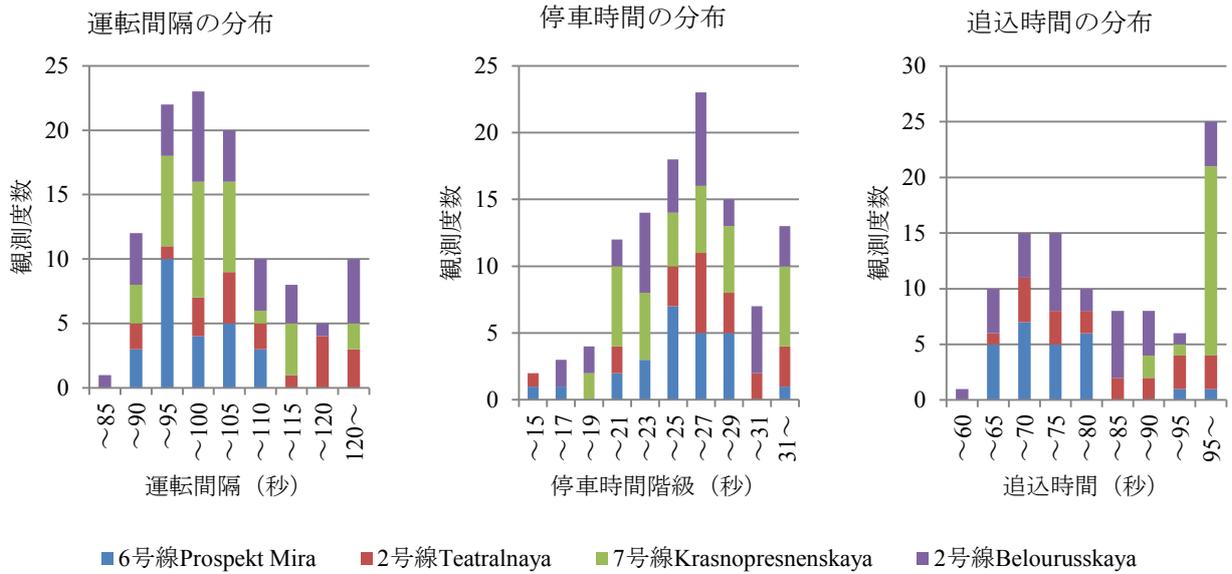


図1 運転間隔，停車時間，追込時間の分布

らも，1分30秒台での高頻度運転を実現している。東京の11.9百万人/kmには及ばないものの，大量輸送を高頻度で実現した事例である。

これらのうち，リールやトゥールーズ，パリ，バンクーバーの都市鉄道はゴムタイヤ駆動であり，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もので，検討対象路線とは条件が大きく異なる。

一方，モスクワでは鉄輪の普通鉄道方式で90秒間隔の運転が実現しており，東京での高頻度運転に向けた重要な示唆を含んでいると考えられる。

(2) モスクワ地下鉄での実測

モスクワの地下鉄は，環状線2路線があり，それらが8路線の放射状の路線と接続している。それ以外の郊外を補完する路線を含めて，全部で13路線がある。総延長は327.1kmで利用客数は24億5130万人/年（延長・旅客数ともに外側環状線完成前の2014年²⁾）となっている。

環状線との接続駅3駅と都心部の1駅で調査を実施した。測定は目視で実施し，スマートフォンの時間計測アプリを使用してラップタイムを記録した。結果は表1に示すとおりとなった。

(3) 実測結果の考察

追込み時間については，各駅を通じて最も短いケースで2号線Belourusskaya 駅の58秒であり，その他の駅では61~62.2秒である。

停車時間については，25秒以下に分布するサンプルが多く，最も長いケースでも7号線 Krasnopresnenskaya駅で観測された41.2秒である。7号線はモスクワで2番目の輸送人員の路線²⁾で，同駅は環状の5号線と接続する主要駅である。

これに対し，半蔵門線の渋谷駅では130秒間隔で発車するダイヤが編成されており，60秒の停車時間と65秒程度の追い込み時間に5秒程度の余裕時間を加えている。モスクワと比べると追込み時間が3~4秒，停車時間が倍以上長いことになる。半蔵門

線では乗降客数の少ない駅でも35秒程度の停車時間を必要としている点から考えると、モスクワは際立って乗降時間が短いといえる。

また、走行速度も東京に比べると速いと考えられる区間があった。可能な範囲だけでも高速運転を行うことは、列車がホーム外に出るまでの時間を短縮することにつながり、追込時間の短縮に一定の効果がある。

(4) 実測結果からの示唆

モスクワの地下鉄の高頻度運転は、停車時間の長さによるところが大きいと考えられる。

停車時間が短くなる要因についての先行研究³⁾では、乗客が乗降時に協力しあい、駆け込み乗車を行わないなどの乗車マナーが優れていることや、ホームが広いこと、通路・階段が一方通行の箇所が多く、エスカレーターがボトルネックとなつて、結果的にホームへの乗客の流入が制限されているといった点を指摘している。

また、日本と比べると、車内やホーム上の混雑が少なく、高頻度運転で混雑率を抑制できていることも迅速な乗降につながっていると考えられる。さらに、停車時間が短いことによって、乗客が戸閉の時機を察知しているかのような様子も見られた。

高頻度運転によって乗車率を下げることで乗降時間の削減につながり、さらに運転間隔を縮小する余裕をつくる好循環を生む可能性がある。

東京でも、信号設備の改良で一定程度の短縮が可能な追込時間の短縮を図れば、それを機に好循環へと進んでいくことが期待できる。

3. 各種の信号システム

鉄道の信号システムは、先行列車に後続列車が追突しないように制御することを大きな目的としている。高頻度運転を実現するためには、安全性を確保しながら極めて短い間隔で列車を走行させる必要があることから、信号システムの改善が重要である。

(1) 閉そくと移動閉そく

閉そく方式とは、線路上を一定長さの区間（閉そく区間）に区切り、この区間ごとに列車の存在を検知して、後続列車を先行列車の存在する閉そくの外側に停止させる運転保安の考え方である。

この考え方では、後続列車が先行列車に接近するとき、先行列車の実際の最後尾位置と閉そく区間の始端までの間の距離の分だけ間隔にロスが生じることになる。

これに対して、移動閉そくは、先行列車の位置を連続的に検知することで、閉そく区間の境界位置に拘束されずに先行列車の手前に後続列車を停止させる考え方である。

従来は、列車の位置を連続的に検出することが困難だったため、固定閉そくの考え方が用いられてきたが、近年になって連続的に位置を検出可能な技術が開発され、移動閉そくが実用化されはじめた。日本国内ではJR東日本の仙石線で運用されており、首都圏でも埼京線で2017年秋から運用が開始される予定である。海外ではすでに複数の実用例がある。

(2) 従来の信号システムの作用

a) 検討対象線区の信号システム

検討対象線区では、固定閉そくのもと、ATC（自動列車制御装置）が用いられている。動作の概要を図2の最上段に示す。

先行列車までの閉そく数に応じて閉そく毎に最高速度が指示される。速度の指示は運転台にある車内信号機に示されるようになっており、示された速度（現示速度）を上回ると自動で減速する。

列車を停止させるのは、安全上の余裕を確保するため、先行列車の存在する閉そくの直前~数閉そく手前となる。

後続列車が先行列車に接近した場合には、車内信号機の現示速度が低下する前の閉そくで運転台に前方予告が表示され、現示速度の低下を知らせる。現在の走行速度よりも現示速度が低い閉そくに進入すると自動的にブレーキが作用する。

各閉そくで現示される速度は、閉そく区間の長さや勾配などの条件によって5km/h単位で予め決められており、先行列車の位置に応じて車両に送信されている。

直前の閉そくで指示された速度に近い速度で次の閉そくに進入した場合には、列車の減速幅よりも現示速度の低下が僅かに大きくなるように考慮されており、先行列車の手前までブレーキが緩解することなくそのまま停止する（一段ブレーキ制御）。ただし、直前の閉そくでの走行速度が遅い場合などは、必ずしも一段ブレーキ制御とはならず、途中で空走する場合もある。

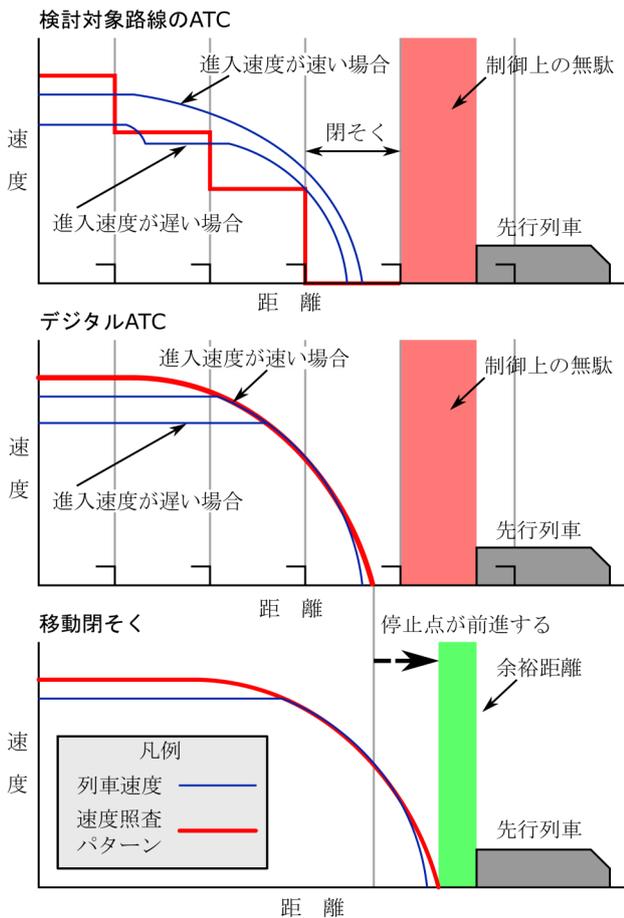


図2 保安装置の動作比較図

また、ATCによって自動的にブレーキが作用したときは、ブレーキ開始時と停止直前にブレーキ力を弱める制御（緩和ブレーキ）を行う。

b) デジタルATC

東武東上線や京王電鉄、山手線などで使用されているATCである。作用を図2中段に示す。

検討対象線区のATCでは、走行速度が閉そくごとに指示されていたのに対して、デジタルATCでは先行列車の存在する閉そくの直前～数閉そく手前を停止点として、そこまでに停止可能な速度が、閉そくとは関係なく連続的な関数である速度照査パターンとして与えられる。速度が速度照査パターンを超えると、自動的に減速する。検討対象線区のATCと同様に緩和ブレーキ制御が行われることもある。

デジタルATCでは、閉そくに拘束されずに速度が現示されることから、一段ブレーキ制御よりも無駄の少ない制御が可能となるほか、車上でパターンを計算することで、各車両の性能を最大限に活かした運転が可能になるメリットがある。しかし、先行列車の位置検出が閉そくに制約される点は同じで、一定のロスが生じる。

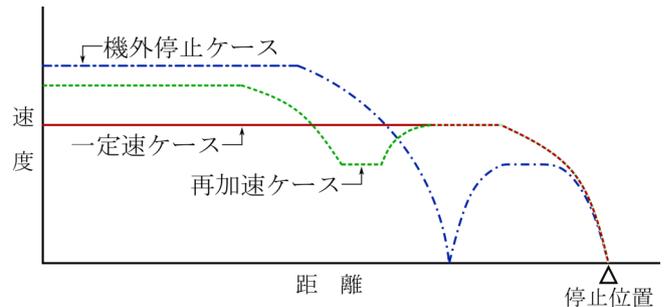


図3 各ケースの走行パターンのイメージ

(3) 移動閉そくシステムの作用

作用を図2の下段に示す。速度照査パターンによる速度制御を行う点はデジタルATCと同様であるが、速度照査パターンを生成する際の停止点の設定を閉そく境界に関係なく行う。これにより、デジタルATCよりも無駄の少ない制御ができる。

ATCでは安全上の余裕を確保するために、先行列車の直前～2閉そく手前に列車を停止させる制御を行っていたが、移動閉そくでは先行列車の手前に余裕距離を設定し、この外側を停止点としている。余裕距離長については、25mでの試験実績があるが、現状では80mが確保されている。

移動閉そく以上のシステムとして、先行列車がすぐには停止しないことを想定して、さらに間隔を詰める方法も構想レベルとしては存在しているが、今のところ実用に供された事例はない。

4. 追込み時間に関する考察

本章では、移動閉そくシステムを導入した場合に、移動閉そくシステムの仕様や運転操作によって、追込み時間への影響を分析する。

(1) 運転状況を分析する走行パターン

運転間隔の最小値について検討する場合、後続列車の走行パターンとして3種類が考えられる。走行パターンを図3に示す。

1種類目は、一定の速度で駅に接近してゆき、停止位置に向かって減速するケースである（一定速ケース）。2種類目は、先行列車に追いついてある程度の速度まで一度減速してから、再び加速し、その後停止位置に向かって再度減速するケースである（再加速ケース）。3種類目は、先行列車に追いついて駅の手前で停止し、先行列車の駅発車を待って後続列車も再度発車して停止位置に移動す

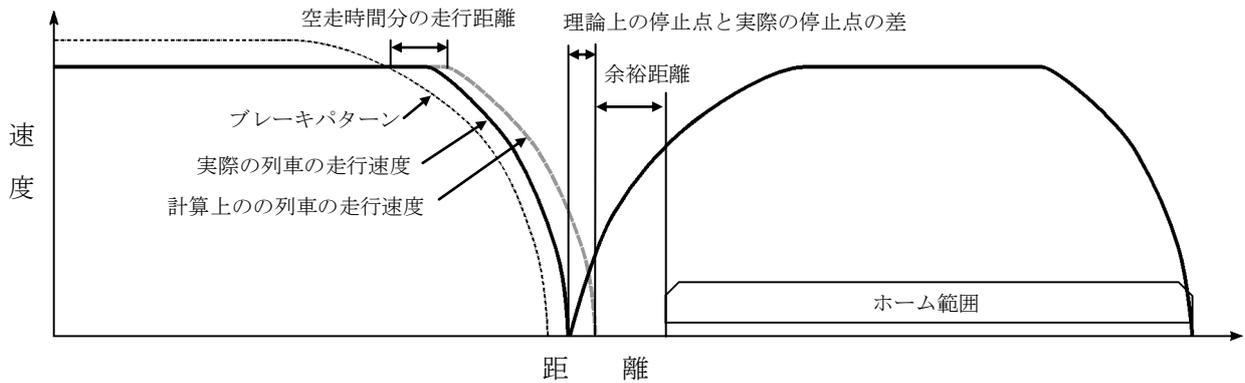


図4 駅付近での走行の概要と検討条件

表3 追込時間分析の設定条件

余裕距離	100 m
空走時間	3 秒
再発車までの時間	5 秒
停止位置の差	0 m
停止ブレーキ減速度	3 km/h/s
加速終了→ブレーキ開始	5 秒
パターン減速度	3 km/h/s
一度に加速する速度	0.0001 km/h
先行列車の進出速度	90 km/h
後続列車の進入速度	90 km/h

車両性能は検討対象路線で運用されている車両としては旧形式にあたる東急8500系とし、仮想的に勾配のない水平な線区を考える。その他の計算条件は表3に示す通りとした。変数のランカーブとの対応関係を図4に示した。

- ・余裕距離：速度照査パターンを計算する際の停止点と先行列車の最後尾位置との間に安全上設ける余裕距離を示す。実用例をもとに基本を100mとして設定する。

- ・空走時間：速度照査パターンに接触後、ブレーキが動作し始めるまでの時間を表す。現状の基準をもとに3秒とした。

- ・再発車までの時間：後続列車が先行列車に追いついて停止した場合、先行列車が発車して速度照査パターンが上昇し始めてから実際に車両が起動するまでの時間を表す。計算上は基本5秒としたが、変動したときの影響も分析した。

- ・停止位置の差：速度照査パターン計算時の停止点と、実際の車両の停止点の差を表している。速度照査パターンは停止位置に精度良く停止させることではなく、停止点の手前に停止させることを目的としているため、停止点よりも手前に停車しやすい。計算上は基本0mとしたが、変動したときの影響も分析した。

- ・停止ブレーキ減速度：列車が駅の停止位置に停止するために減速する際の平均減速度を表す。実際には、運転士が停止前にブレーキを緩めて衝動を防止するなどの細かな操作を行っているが、ここでは一律の減速度で減速するものとして計算した。

- ・加速終了からブレーキ開始までの時間：列車が加速している状態から急にブレーキ操作をして減速に移ることは乗り心地を損ねるため、通常は一定時間惰性で走行してからブレーキ操作を開始する。この動作を考慮するため、加速操作の終了から5秒間は一定速度で走行するものとした。

るケースである（機外停止ケース）。なお、後続列車の進入速度が速い場合、先行列車と最接近した地点から、停止位置に停車するためにブレーキを開始する必要のある地点までの距離が少なくなるため、再加速することができなくなり、再加速ケースと一定速ケースの走行パターンは同一になる。

本稿では、上記3ケースについてそれぞれの追込時間を比較し、理想的な運転方法について議論する。また、機外停止ケースについては、計算の前提条件として検討すべき項目があることから、それらの検討も行う。

(2) 検討の概要

a) 検討の方法

まず、先行列車が駅を発車して加速する際の変化と時間経過を1mピッチで計算し、後続列車に対して生成される速度照査パターンを計算する。次に、この速度照査パターンのもとで、後続列車を走行させた場合の速度と時間経過計算し、先行列車の発車から後続列車の停止までの時間を求めた。

b) 検討の条件

表4 再発車までの時間

発車までの時間 (秒)	3	6	9	12
追込時間 (秒)	45.0	45.3	46.5	49.4

表5 停止点と停止位置の差

停止点の差 (m)	0	10	30	50
追込時間 (秒)	45.1	45.3	45.9	46.6

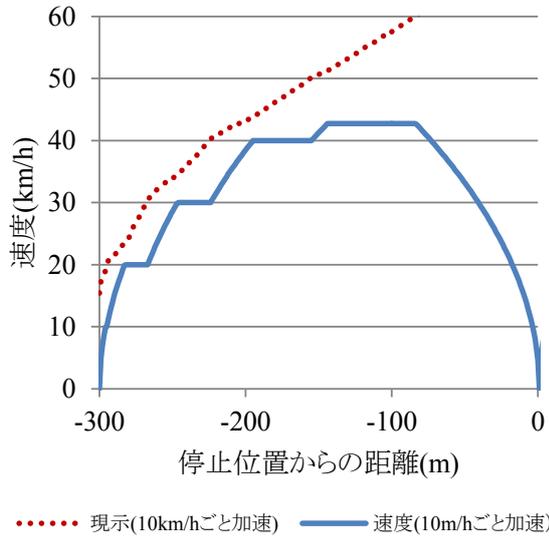


図5 10km/hごとに加速する場合のランカーブ

表6 発車後の加速操作の影響

加速する速度 (km/h)	0.0001	1	5	10	15
追込時間 (秒)	45.1	45.2	45.7	46.6	46.9

・パターン減速度：速度照査パターンを計算する際に仮定する減速度を示す。本分析では減速度は一律とし、緩和ブレーキは検討しなかった。車両の性能に対して20%程度の余裕を持った値とするのが一般的で、本分析では東急8500系の性能から設定した。

・一度に加速する速度：移動閉そくの場合、速度の上昇とともに制動距離や空走距離が伸びて、先行列車との間に確保すべき距離が長くなる。先行列車と後続列車の性能が同じ場合、同時に発車すると、後続列車は速度パターンの上がり方が制動距離と空走距離が伸びる分だけ緩くなる。

検討対象路線の車両は、加速度の微調整が難しいため、完全に速度照査パターンの変化に追従して加速し続けることは困難である。そのため、ある程度まで速度照査パターンが上昇する毎にまとめて加速を行うケースを検討する。この場合に加速を開始する条件となる速度差を示す。

・先行列車の進出速度：先行列車が加速を終了する

表7 停止ブレーキ減速度の影響

停止ブレーキ減速度 (km/h/s)	1.5	2	2.5	3	3.5	4
機外停止追込時間 (秒)	52.6	49.0	46.7	45.1	43.9	43.0
一定速追込時間 (秒)	65.6	65.4	62.6	60.2	58.5	57.1

速度を示す。加速終了後は進出速度を維持して走行するものとした。

・後続列車の進入速度：一定速ケースにおける後続列車のブレーキ初速度を示す。進入速度が先行列車の進出速度より速いときは再加速できないため、一定速ケースと再加速ケースは同じ条件となる。

(3) 機外停止ケースの分析条件の検討

a) 再発車までの時間の影響

分析結果を表4に示す。発車までの時間が長くなると追込時間は増加するが、5秒未満では追込時間の短縮効果が小さくなる。再発車までの時間が追込時間に直接影響しないのは、発車が遅れることで先行列車との距離が確保されるためである。

なお、停止信号解除後3秒未満で発車するケースの分析を行っていないのは、3秒未満では計算の最小ピッチである1m進む時点で車内信号の指示速度を上回ってしまい、計算が行えないためである。実用上も、3秒未満での発車は困難と考えられる。

b) 速度照査パターン停止点と実際の停止位置の差

停止点の差による影響を表5に示す。概ね比例的に追込み時間が増加するが、50mの変動に対しても1.5秒の変動にとどまった。

c) 発車後の加速操作の影響

分析結果を表6に示す。10km/hづつ加速する場合の速度変化を図5に示す。細かく加速操作を繰り返すほうが追込時間を短縮できるが、1km/hづつ加速する場合と15km/hごとに加速する場合を比べても1.7秒の伸びとなり、影響は比較的小さい。

(4) 各ケース共通の分析条件比較

以下の分析は一定速ケースと機外停止ケースでの結果を示す。基本ケースでは進入・進出速度ともに90km/hに設定しているため、再加速ケースも一定速ケースと同じ速度パターンとなる。

a) 停止ブレーキ減速度の影響

分析結果を表7に示す。停止ブレーキ減速度が高いほうが追込時間を短縮できる傾向にあるが、

表7 空走時間の影響

空走時間 (秒)	(秒)	1	3	5	7
機外停止追込時間 (秒)		44.0	45.1	46.2	47.2
一定速追込時間 (秒)		57.8	60.2	62.6	64.9

表8 進入・進出速度の影響

進入速度	一定速ケース				再加速/機外停止ケース			
	進出速度(km/h)				進出速度(km/h)			
	30	40	50	65	30	40	50	65
機外停止					53.3	48.2	46.1	45.1
10	115.5	115.5	115.5	115.5	53.3	48.2	46.0	45.0
20	66.6	66.6	66.6	66.6	53.4	48.3	46.2	45.3
30	53.4	53.3	53.3	53.3	53.4	48.7	46.6	45.7
40	57.8	49.2	49.2	49.2	49.2	47.5	46.7	
50	62.1	53.3	48.7	48.6		48.7	48.3	
65	66.4	57.4	52.6	51.4	単位：秒			51.4
90	79.4	69.6	64.4	60.8				60.8

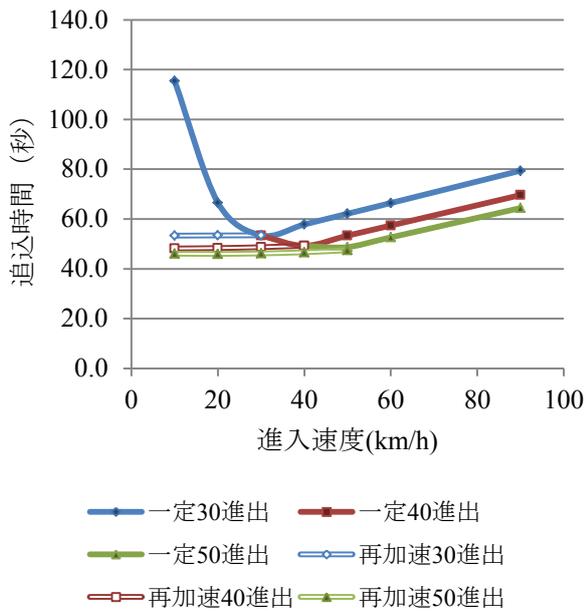


図6 進入・進出速度の影響

1.5km/h/sのケースについては、進入速度を低下させた場合と似た効果が現れて、2.0km/h/sケースと同じ追込み時間となっている。停止ブレーキ減速度を高めるには、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。

d) 空走時間の影響

分析結果を表7に示す。空走時間は短いほど追込み時間が短縮できる。機外停止ケースに比べ、一定速ケースのほうが追込時間の変動が大きいのは、先行列車と最接近する時点での速度が速いためであ

表9 余裕距離の影響

余裕距離 (m)	0	25	50	100	150	199
機外停止ケース追込時間 (秒)	37.1	39.3	41.3	45.1	48.7	52.0
一定速ケース	55.3	56.6	57.8	60.2	62.6	64.8

※基本条件では進入速度が高速のため、一定速ケースと再加速ケースは同一走行パターンとなる

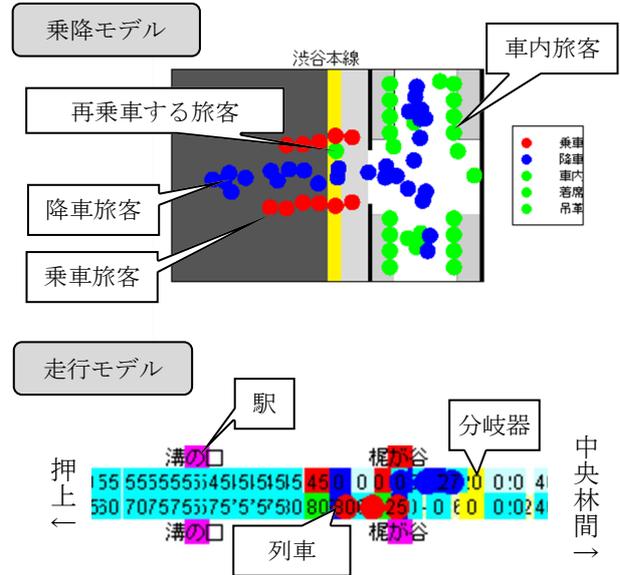


図7 シミュレーションシステムの動作状況

る。緩和ブレーキを行う場合は空走距離が長くなるのと同様の状況となるため、緩和ブレーキは追込時間の増大要因となる。

(5) 各種ケースにおける追込時間の比較

a) 検討の条件

表3の条件を基本として、各項に示す条件を変化させて分析を行った。

再加速ケース及び機外停止ケースの場合の加速操作については、パターンの上昇に追従する設定としたため、再加速ケース及び機外停止ケースの適用にあたっては、2秒程度の余裕が必要である。

b) 進入・進入速度の影響

分析結果を表8と図6に示す。再加速ケースについては、進入速度が進出速度以上になるときは再加速できないため、一定速ケースと同じ条件になることから空欄としている。

一定速ケースでは、先行列車の進出速度と同じ速度で進入させると追込み時間が最小となる。

機外停止ケースおよび再加速ケースでは、低速で進入しても先行列車が離れれば再加速できるため、ほぼ最小の追込時間を保つことができる。ただし、

再加速の操作の行い方にも影響を受ける。

c) 余裕距離の影響

分析結果を表9に示す。全ケースとも余裕距離に対して比例的に追込み時間が伸びる。

ATACSで試験実績のある25mの余裕距離では、機外停止ケースで追込み時間が約39秒となるなど、大きな短縮効果がある。進入速度を90km/hに設定している一定速ケースよりも、機外停止ケースのほうが余裕距離の影響を受けやすい。

仙石線では余裕距離を80m確保しているとされるが、試験実績のある25m程度での運用を行えば、追込時間の大幅な短縮が期待できる。

(5) 検討結果のまとめ

これまでの検討を踏まえると、機外停止の場合の追込み時間が短く、表9にあるように、余裕距離が100mのとき45.1秒、25mのとき39.3秒が極限值と考えられる。ただし、進入速度や進出速度が制限される箇所では表8にあるように追込時間が制限される。特に進出速度が30km/hに制限されるケースでは追込時間の伸び方が顕著であることから、40km/h未満の進出速度に制限される箇所がないように配慮する必要がある。また、実際に適用する場合は、本章(3)での検討も踏まえると、追込時間は停止点と停止位置の差や加速操作の影響により、各1.5~2秒程度のロスが生じて、極限值よりも3~4秒程度長い45~50秒程度を見込む必要があると考えられる。

5. マルチエージェントシミュレーション

(1) システムの概要と特徴

東急田園都市線及び半蔵門線の中央林間~押上間の路線を実データによって再現しており、入力したダイヤに応じて当該区間内の列車全体の挙動を再現するものである。

乗降時間推計モデルと走行時間推計モデルからなり、走行時間推計モデルが列車の走行挙動を再現し、駅に停車すると乗降時間推計モデルが起動して乗降時間を推計する。動作状況を図7に示す。

走行時間再現モデルは、実際の線形や施設の状況に基き、列車の走行速度・位置を常に推定しており、ここから駅間の所要時間を推定している。

乗降時間推計モデルは実際の乗降客数に基づいて旅客を各駅の再混雑扉での乗降を再現している。

乗降客数や車内の旅客数に応じてホーム部分や車内に乗客エージェントを配置する。そのエージェン

トを、ビデオカメラ映像の調査をもとにして設定したルールに基づいて移動させ、乗降時の旅客の行動を再現することで停車時間を推計する。

なお、本シミュレーションは乱数を使用するため、各ケースにつき10回実行して平均値を用いる。

(2) シミュレーション条件

a) 入力ダイヤ

運転間隔が90秒、100秒、110秒の3種類を設定した。既存のダイヤをもとに、準急と各駅停車の交互運転を行っている時間帯について、上記の運転間隔になるように所要時間や本数を調整した。

b) 信号保安装置

移動閉そくの導入を想定し、余裕距離は100mに設定した。分岐器がある駅では、正しい進路が開通するまで手前で停止させるパターンとする。なお、変電所の受け持ち区間の境界であるエアセクション上で停車すると、再発車の際に架線を損傷するおそれがあることから、エアセクション上では停車しないように制御した。

c) 乗降客数の設定

小林ら⁴⁾の開発したモデルを用い、時間帯別に設定した頻度で駅に乗客エージェントを発生させ、乗車行動を再現する。なお、車内の混雑率を推計することで、列車の運転本数に応じた乗車率の場合の乗降時間を推計することができる。

(3) シミュレーションの精度と課題

a) 駅間走行時間の過小推計傾向

実際の運転では、運転士は駅間の走行時間に応じて最高速度に達する前に加速を終了させるなどして運転時間を調整しているが、現状では本シミュレーション上でそのような挙動を再現できておらず、最高速度に近い速度で走行してしまう。

小林ら⁴⁾が遅延対策の効果推定のために行ったシミュレーションでは、この傾向を緩和するため、乗降終了後も一定時間駅に停車させて調整を行っていた。これは、遅延時間の評価を行うために、列車の所要時間の精度を確保する必要があるためだった。

しかし、本研究では追込み時間が重要な要素となるため、駅に停車させて補正を行うことができないため、補正は行わなかった。そのため、本検討では列車間隔に注目することとし、ダイヤからの遅れについては評価を行わない。

b) 移動閉そくの速度照査パターン計算精度

速度照査パターンの計算時に、空走距離や勾配に

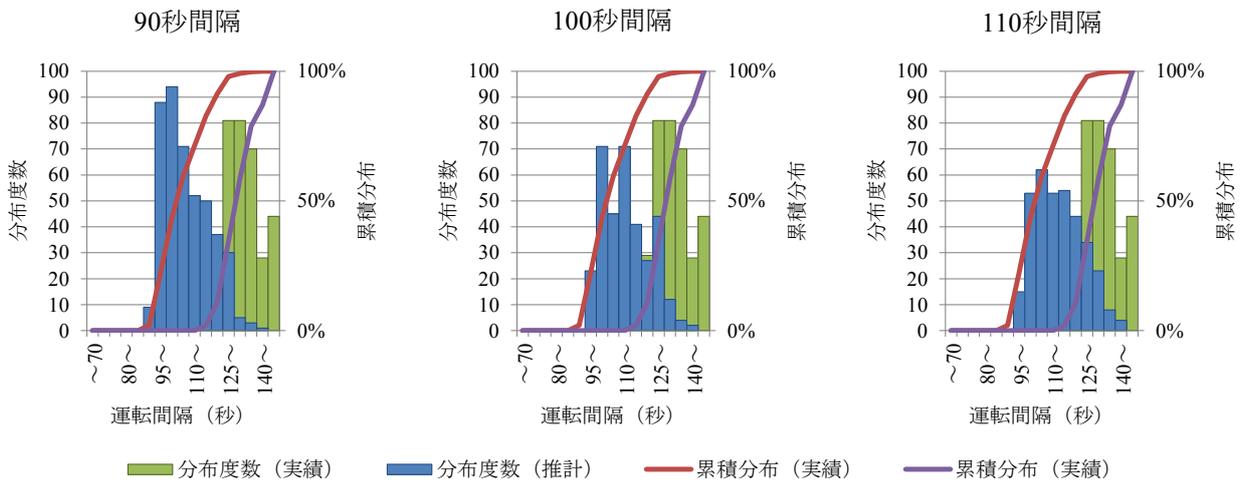


図8 渋谷駅発車間隔分布

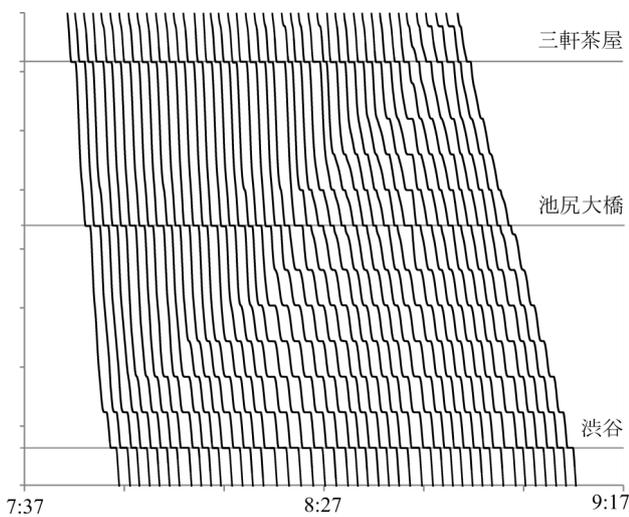


図9 90秒間隔ダイヤの列車走行軌跡

よる影響の計算が不十分で、パターンに歪みが生じている。条件によっては、列車の間隔が本来より短くなっているため、追込み時間が過小に推計されている駅が存在していると考えられる。

c) 折り返し駅の推定

折り返し駅で折り返し列車と到着列車の進路が輻輳した場合や、遅れが反対方向にまで波及した場合、終着駅で機外停車が発生する可能性があるが、本シミュレーションでは押上→中央林間方向の列車を再現していないことから、この影響を考慮できていない。

d) 評価用ダイヤの品質

評価用に用いているダイヤデータは、準急と各停が交互に運転されている時間帯の列車について、一律に運転間隔を縮めたものとしている。田園都市線内での追い越し等のための時間調整は行っているが、前後時間帯との間で本数が急変しているほか、

折り返しや相互直通運転上の都合を考慮するなどの吟味が不十分な箇所がある。

e) 変電所容量の考慮

列車の走行に必要な電力は専用の変電所から供給されるが、運転に必要な消費電力が変電所の容量を上回らないように計画する必要がある。また、変電所の容量の限界に近い消費電力となると、架線電圧が低下して車両の加速性能を低下させる。

現状では、架線電圧について安全側の1350Vを想定して見積もられた車両性能データを使用しているものの、変電所容量や架線電圧の変動までは再現できていない。

(4) シミュレーションの結果と考察

各ケースの渋谷駅断面における列車出発間隔を図8に示す。90秒間隔のダイヤでは、所定の間隔で渋谷駅を発車できた列車は存在せず、110秒間隔のダイヤでは37%程度にとどまった。

次に、渋谷駅付近の走行軌跡を図9に示す。本図はダイヤグラムに似ており、列車の先頭を基準に横軸に時間、縦軸に距離を取って列車の位置を示している。線の傾きが緩いほど遅い。渋谷駅から後方に機外停車が伝搬しており、最も多い列車では渋谷と池尻大橋の間で5回機外停車して、渋谷駅の出発を待って前に進む状態となっている。このことから渋谷駅のボトルネックの状態が明らかであるとともに、渋谷駅付近の走破に長い時間を要しており、サービス水準が低下している。

さらに、実際にこのような運転状態となった場合、変電所容量の不足をきたすことが想定される。特に渋谷駅から列車が発車したあと短時間のうちに各列車が力行を開始することになるため、負荷が大

きくなることが懸念される。

ただ、各ケースともに実績に比べると大幅な運転間隔の短縮が図られており、移動閉そくに運転間隔短縮効果があることは確認できる。

110秒間隔ダイヤのもとで実際に110秒間隔以下で走行できた列車は約37%に留まったのに対して、90秒間隔ダイヤのときには約60%が110秒以下の間隔で発着していることから、110秒間隔ダイヤのケースでは必ずしも限界の運行間隔に到達していないことを示唆している。駅手前での機外停車は全ケースで発生していることから、追込み時間には大差がないと考えられ、運転間隔の伸びの主な原因は停車時間の違いであると考えられる。

停車時間に差が生じている理由については、ダイヤからの遅れなどとは明確な関係が見られないことから、渋谷より手前の駅で高頻度運転した効果で混雑率が低下していた等の影響が考えられる。

6. まとめ

本稿では、都市鉄道の超高頻度運行の可能性を検討することを目的として、海外事例の調査、移動閉そくシステムのポテンシャルの考察、移動閉そくシステムを実路線に適用した場合を想定したシミュレーションを行った。

モスクワの高頻度運転の事例では、停車時間が極めて短い時間に保たれている特徴がある。東京で超高頻度運転を実現するためには、停車時間を短縮することが重要になると考えられる。

追込み時間については、余裕距離を25mまで短縮すれば、現状の65秒程度に対して、最大で45秒程度

までは短縮が可能である。また、移動閉そくのもとで効率的な運転を行うためには、車両の加速度を容易に調整できるようにすることが望ましい。

最後に、東急田園都市線および地下鉄半蔵門線を対象に、高頻度運転の可能性をシミュレーションによって検証した。その結果、渋谷駅がボトルネックとなって運転間隔が開くことが明らかになった。

ただし、シミュレーションについては精度面の課題も多く、まだ精査すべき課題が多い。

今後は引き続きシミュレーションシステムの精度向上に取り組むほか、ダイヤデータの品質向上や検討の範囲拡大に務め、都市鉄道の混雑緩和の方策を検討したい。

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をご提供いただいた東京急行電鉄ならびに東京地下鉄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、筆者がその全責任を負うものです。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) 日本地下鉄協会WEBサイト 世界の地下鉄 <http://www.jametro.or.jp/world/>
- 2) モスクワ地下鉄アニュアルレポート2014 英語版 <http://old.mosmetro.ru/upload/4157/2014en.pdf>
- 3) 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
- 4) 小林渉, 岩倉成志: エージェントシミュレーションを用いた列車遅延対策の効果比較, 第23回鉄道技術連合シンポジウム(J-rail2016)論文集CD-ROM, 2016