

都市鉄道の超高頻度運転による 混雑緩和の可能性

学生員 吉枝 春樹* 非会員 岩倉 成志**

A possibility of high frequency operation for congestion reducing of urban railway

Haruki Yoshie*, Student Member, Seiji Iwakura**, Non-member,

(2017年5月12日受付)

In this paper, we examined a possibility of a low cost capacity expansion by frequency operation using a moving block for heavy congested, this research is analyzed by two methods that operation curve based approach and multi agent simulation using actual data of Tokyu Denentoshi line and Hanzoumon subway line. This agent simulator can estimate minimum allowable time interval through the calculation on stopping time with decreasing passenger volume in a vehicle by extreme frequency operation. As a result, this study findings that the operation interval can be improved to approximate 110 seconds intervals for the current approximate 130 second interval.

キーワード：都市鉄道，混雑緩和，高頻度運転，移動閉そく，マルチエージェントシミュレーション

Keywords : Urban railway, congestion mitigation, extreme frequent operation, moving block, multi agent simulation

1. 背景と目的

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，線増等の大規模投資は難しい。

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。日本地下鉄協会(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50秒を含めて世界に19都市あり，特にモスクワについては，輸送密度が8.8百万人/kmを記録しながら1分30秒台での高頻度運転を実現している。これらのこと

から，2分以下の間隔を実現することを目指す。

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，車両性能データを用いて検証する。

列車の運転間隔は，駅での停車時間と，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。本研究では，追込時間に関する基礎的な検討を行い，次いで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か二段階で検証する。

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運転曲線の変化を分析し，追込時間の短縮方策やその限界について考察する。

シミュレーションでは列車の挙動のほかには停車時間を推計することで，高頻度化によって混雑が緩和された場合の停車時間の短縮効果を推計する。検討対象路線の実データを用いて推計を行い，実路線の条件下で停車時間の変動を含めた分析を行う点が特徴である。

これらの分析によって，日本の都市鉄道のさらなる高頻度化の可能性を示し，大規模なインフラ投資によらない混雑緩和の可能性を示すことを本研究の目的とする。

2. 追込み時間に関する基礎的検討

<2.1>検討の目的 検討対象路線のうち停車時間が最も長い駅は渋谷駅で，所定停車時間は60秒である。120秒以下の間隔で運行するためには，60秒以下の追込み時間と

Correspondence to: mel16111@shibaura-it.ac.jp

*芝浦工業大学大学院 建設工学専攻 交通計画研究室
〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5 研究棟09C32

Shibaura institute of technology after graduation school
3-7-5 Toyosu Koto-ku, Tokyo 135-8548, Japan

**芝浦工業大学 工学部 土木工学科 交通計画研究室
〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5 研究棟09C32

Shibaura institute of technology department of Civil engineering
3-7-5 Toyosu Koto-ku, Tokyo 135-8548, Japan

Table 1. 追込時間分析の設定条件

Idle running time	3 [Sec]
Starting time after signal clear	5 [Sec]
Deceleration for stop to station	3 [km/h/s]
Deceleration for speed check patterns	3 [km/h/s]
Time of between notch-off and breaking	5 [Sec]
Buffer distance	25 [m]
Maximum speed of forward train	90 [km/h]
Approaching speed of Following train	90 [km/h]

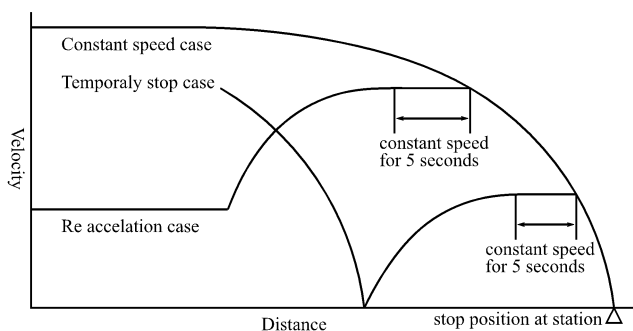


Fig 1. 各ケースの運転曲線の概形

Table 2. 各余裕距離での追込時間

Deceleration for stop to station (km/h/s)	2.0	2.5	3.0	3.5
Temporarily stop case	42.7	40.7	39.3	38.2
Constant speed case	60.5	58.6	56.6	54.9

する必要があり、10秒程度の余裕時間を考慮すると、50秒以下の追込時間がひとつの目標となる。なお、運転間隔を短縮することで混雑が緩和した場合の乗降時間の短縮が期待されるが、その効果はシミュレーションで検証する。

〈2.2〉**検討の条件** 検討は検討対象路線で使用されている東急8500系電車の特性を用いて1mピッチで計算を行った。その他の条件は特に断りのない限りTable 1によった。

(1)空走時間 現状と同等の3秒間とし、緩和ブレーキの動作等は考慮しなかった。

(2)再発車までの時間 車内信号現示の上昇から発車までタイムラグが生じることを考慮し、5秒間は停車する。

(3)減速度 駅へ向けて速度0km/hまで停止する際の減速度と速度照査パターンの減速度は現状の計画値を考慮して3km/h/sに設定した。

(4)加速から減速までの時間 加速の終了から減速の開始まで5秒間一定速度で走行するものとした。ただし、シミュレーションでは考慮できていない。

(5)余裕距離 ATACSで試験実績のある25mとした。

(6)進入速度 駅の手前において、先行列車と最も接近する地点を通過するときの後続列車の速度

(7)進出速度 駅出発後に加速を終了する速度

〈2.3〉**検討ケースの整理** 本検討では、停止位置に向けて減速するまで進入速度を保持するケース（一定速ケー

Table 3. 再発車までの時間

Time of between signal clear and start [sec]	3	6	9	12
Minimum time interval [sec]	45.0	45.3	46.5	49.4

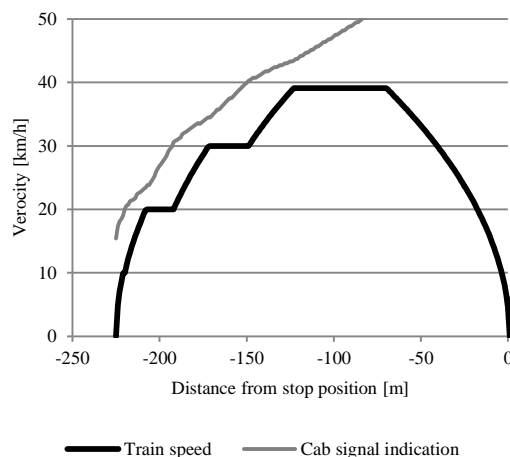


Fig 2. 10km/hごとに加速する場合のランカーブ

Table 4. 発車後の加速操作の影響

Speed step [km/h]	0.0001	1	5	10	15
Minimum time interval [sec]	39.3	39.4	39.8	40.3	41.3

ス)と、先行列車と最接近するまで進入速度で走行し、その後再加速するケース（再加速ケース）、駅手前で先行列車に追いついて一度停止するケース（機外停止ケース）を考える。（Fig 1参照）進入速度が早い場合は先行列車と最接近する地点が停止位置に向けて減速を開始する地点と重なるため再加速することはできず、再加速ケースは定義することができない。

〈2.4〉**駅停止時の減速度の影響** 駅に停車する際のブレーキ操作は運転士個人の技量で変動する。そこで、駅へ向けて減速する際の減速度を2.0km/h/s~3.3km/h/sとして影響を分析した（Table 2参照）。3.0km/h/sを維持した場合に対して、2.0km/h/sでは再加速ケースで3.4秒、一定速ケースで3.9秒伸びた。自動運転装置などの導入によって高い減速度を常に実現できれば、追込時間が短縮できる。

〈2.5〉**再発車までの時間** 運転士が機外停止後に列車を発車させるまでには一定のタイムラグがあると考えられる。分析の結果、再発車までの時間が3秒から12秒への9秒の伸びた場合でも、追込時間は4.4秒の伸びに留まった（Table 3参照）。これは、再発車までの時間で先行列車との距離が開き、走行できる速度が早くなるためである。

〈2.6〉**車内信号現示の上昇への追従操作** 検討対象路線の車両は2ノッチ以上の起動加速度が同一のため、車内信号現示の上昇に完全に追従させた加速は難しいと考えられる。そこで、パターンに追従して加速するケースから、加速操作を15km/hごとに行うケースまで検討した。10km/h

Table 5. 停止点のずれの影響

Distance from actual stop position [m]	0	10	30	50
Minimum time interval [sec]	39.3	39.6	40.4	41.3

Table 6. 進入速度と追込時間の関係

Approaching speed [km/h]	Constant speed case				Temporarily stop / Re-acceleration		
	Maximum speed of preceding train [km/h]				30	50	70
0					44.1	39.6	39.3
10	88.5				44.0	39.5	39.1
20	53.1	53.1			44.2	39.8	39.4
30	44.4	44.3			44.4	40.4	40.1
40	48.8	42.4	42.4			41.6	41.4
50	53.1	43.3	43.2				
60	57.4	47.2	45.6	45.6			
90	70.4	59.0	56.6	56.6			[sec]

* 一定速ケースの空欄は、進入速度が低いケースと同じ値であることを示す。
 * 再加速ケースの空欄は、一定速ケースの同一速度と同じ結果であることを示す。

ごとに加速を行う場合の運転曲線も示す (Table 4.参照) (Fig 2.参照)。1km/hづつ加速する場合に対し、15km/hごとに加速する場合は2秒の伸びとなった。

〈2.7〉停止位置の誤差の影響 移動閉そくシステムのブレーキパターンは必ずしも精度良く停止点に列車を導くことを意図していないため、列車が停止点よりも手前に停止することが考えられる。パターン計算上の停止点に対して、0~50m手前に列車が停止した場合の影響を分析すると、概ね比例的に追込み時間が増加し、50mのずれに対して追込時間は2秒の伸びとなった。(Table 5.参照)

〈2.8〉進入・進出速度の影響 進出速度ごとに進入速度を変化させた。(Table 6.参照) 一定速ケースでは、進入速度が低下すると追込み時間が短縮されるが、ある速度を下回ると追込み時間が増加する。しかし、再加速を行えば進入速度が低下しても追込時間を維持でき、機外停止時も同等の追込み時間となる。(Fig 3.参照)

進出速度が制限される場合は、後続列車の運転速度に関係なく追込み時間が伸びることから、進出側の速度制限を緩和することが望ましい。

〈2.9〉基礎検討のまとめ 追込時間の極限值はTable 6の最小値である39.1秒と考えられる。ただし、実際の運転上は機外停車後の再発車までのタイムラグや車内信号現示への追従操作の影響で5秒程度、運転士のブレーキ操作によってはさらに4秒程度伸びる場合もあると考えられる。

3. マルチエージェントシミュレーション

〈3.1〉シミュレーションの概要 検討対象路線である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線区の列車全体の挙動を再現する。システムは乗降時間推計

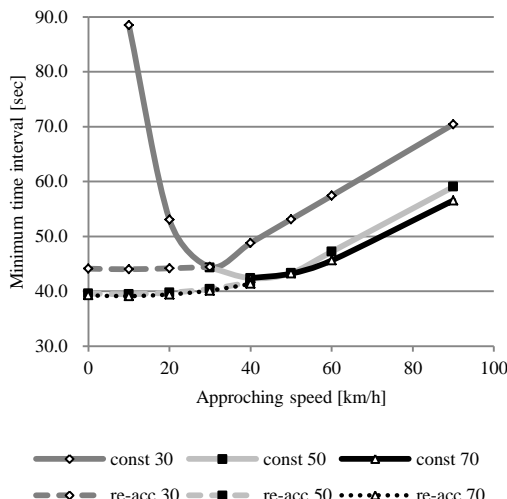


Fig 3. 進入速度と追込時間の関係

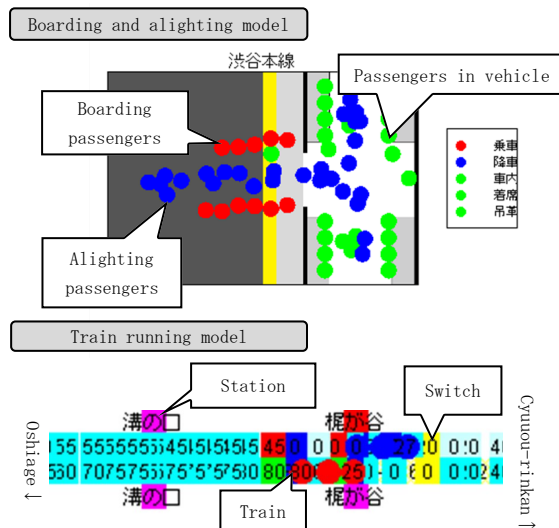


Fig. 4. シミュレーションの概要

モデルと走行時間推計モデルの二つからなり、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 (Fig. 4参照)。乱数を使用するため10回実行して平均値を用いる。

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

(1) 列車の挙動 運転速度は車内信号現示に対して-3km/hから-10km/hの範囲で追従し、駅停車時は3km/h/sで減速する。機外停車した場合は発車可能になってから5秒後に発車する。車両性能は東急8500系を再現しており、全列車が満員乗車で架線電圧1350Vの特性である。

(2) 保安装置 移動閉そくを想定し、余裕距離25mとする。分岐器手前では、正しい進路が開通するまで停止させるパターンとし、エアセクションを避けて停止させる。

〈3.3〉乗降時間推定モデル 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

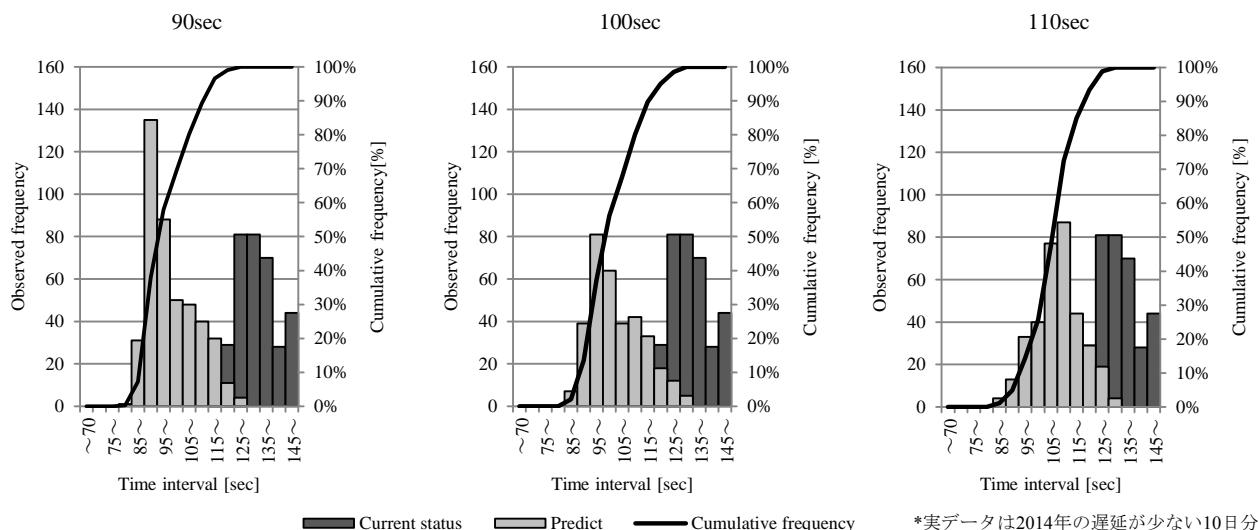


Fig. 5. 運転間隔の分布

Table 7. ダイヤごとの平均運転間隔と停車, 追込時間

Scheduled arrival interval [sec]	90	100	110
Average arrival interval [sec]	100.45	105.36	110.08
Stopping time [sec]	60.2	65.1	69.4
Average time interval [sec]	40.25	40.26	40.68

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したエージェントを、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、車内の混雑率を推計することで、運転間隔に応じて乗降時間を推計することができる。

〈3.4〉乗降客数の設定と入力ダイヤ 小林ら(2)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。

ダイヤは運転間隔が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。

〈3.5〉結果と考察 乗降客数が最も多い渋谷駅に注目して考察する。渋谷駅の到着間隔の分布は、110秒ケースでは110秒を中心としたほぼ対称な分布となったのに対して、その他のケースでは最頻値が短い運転時隔の側に偏る傾向が見られた (Fig. 5参照)。110秒ダイヤのケースでは渋谷駅への平均到着間隔がほぼダイヤ通りとなったが、100秒間隔や90秒間隔のダイヤでは、ダイヤよりも運転間隔が開く結果となった (Table 7参照)。停車時間については、運転間隔が縮まることで減少する効果があり、110秒間隔と90秒間隔を比較すると9.2秒の短縮効果が見られる。一方、到着間隔から停車時間を引いて得られた平均の追込時間は全ケースで約40秒である。基礎検討でも40秒程度が極限值であり、渋谷駅の押上方に分岐器による速度制限があることを踏まえると平均値としては短すぎる疑いがある。

これは、速度照査パターン計算時の精度や列車の運転操作の再現精度等に起因すると考えられ、今後の課題である。

4. 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、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。

基礎検討では、追込時間について検討し39秒が極限的な値で、実際の運転上のロスを考慮すると45秒程度の時間が必要になる場合があるとの結果を得た。

シミュレーションでは、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検証した。その結果、渋谷駅がボトルネックとなり、ダイヤ通りの運転が可能な間隔は110秒程度になるが、入力ダイヤによってはそれよりも短い間隔になる例も観測された。また、運転頻度を上げることで、1列車当りの乗降時間が短縮された。

今後は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。

文献

- (1) 日本地下鉄協会：世界の地下鉄，pp.444-467，ぎょうせい(2010)
- (2) 小林涉，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 (2016-12)