

移動閉そく方式に対応した列車運行シミュレータの開発

國松 武俊* 寺澤 孝彦**
 武内 陽子* 辰井 大祐*

Evaluation of Effects of Installation of Moving Block Signaling System Considering Drivers' Operation

Taketoshi KUNIMATSU Takahiko TERASAWA
 Yoko TAKEUCHI Daisuke TATSUI

In recent years, to increase transportation capacity, various intelligent signaling systems, like the moving block have been proposed and put in operation. Hence, it is important to estimate the effects of these new signaling systems, as replacement of the existing signaling systems take many costs. In this research, we developed a train operation and passenger flow simulator corresponding to the moving block. The new simulator can estimate the train traffic condition and the passenger flow under the moving block within the practical computation time. It also takes into consideration the drivers' operational restrictions or requirements, like the minimum duration time for coasting. We applied it to an actual commuter line, and conducted a test evaluation for the effects of the moving block.

キーワード：列車ダイヤ，運行管理，列車制御，移動閉そく，シミュレーション

1. はじめに

鉄道においては、列車運行における安全性を確保するため、「閉そく」と呼ばれる概念に基づき、列車同士の衝突を防ぐ信号システムが使用されている。近年では、「移動閉そく」と呼ばれるシステムが実用化されつつある。これは、列車に対する信号を、従来の制限速度を指示する情報から、先行列車の移動に伴って連続的に変化する停止限界位置の情報に置き換えるものである。この方式により、列車間隔を短縮できるため、列車の増発や遅延の早期回復が可能となる。一般的に移動閉そくは、無線式列車制御システムの導入が必要となるため、設備の大幅な更新が伴ううえ、無線基地局の配置などシステム設計が列車運行に影響することも想定される。よって、移動閉そくの導入による効果の適切な見積りが必要であり、旅客や鉄道事業者にとっての定量的なメリットを事前評価することが求められている。

そこで本研究ではまず、筆者らが以前構築した、任意の列車ダイヤで運行した場合の列車運行や旅客流動を模擬する列車運行・旅客行動シミュレータ¹⁾（固定閉そくを前提）を機能向上し、移動閉そくに対応したシミュレータを開発した。具体的には、加速、だ行、ブレーキ等の列車の運転操作を考慮し、移動閉そく下での運転曲線を

効率的に作成、更新するシミュレーション手法を開発し、シミュレータに搭載した。そして、実在通勤路線の朝ラッシュ時間帯を対象に、短時間の支障発生時における列車運行（遅延）の変化を、固定閉そく、移動閉そくの双方を前提に試算した。各方式を前提とした場合のシミュレーション結果から、旅客の平均不効用値や、2分以上の遅延となる列車・駅数等を計算、比較することで、移動閉そくの導入による列車遅延の回復効果を定量的に評価した。

2. 列車制御方式と移動閉そく

2.1 列車運行と列車制御方式

鉄道の信号システムの多くでは、駅間線路上の各区間を予め分割した閉そく区間を設定しており、「固定閉そく」と呼ばれている。これは、1つの閉そく区間に1列車のみの進入を許可することにより、安全を確保する方式である。一方、近年、閉そく区間を固定的に設定せず、先行列車との間で安全な列車間距離を確保する方式が提案されている。これは「移動閉そく」と呼ばれ、無線式列車制御システムの開発、普及とともに実用化されつつある（図1）。移動閉そくは、予め固定的な閉そくを設定しないことから、安全を確保したうえで、より列車間隔を短縮した運行が可能となる。

しかし、移動閉そくの導入には、無線式列車制御システムの導入を含め、信号システム全体の取替が必要とな

* 信号・情報技術研究部 運転システム研究室

** 前 信号・情報技術研究部 運転システム研究室

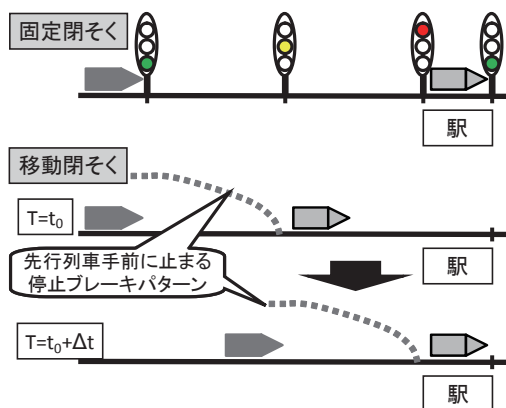


図1 固定閉そくと移動閉そく

るため、1か所の無線基地局が同時に通信可能な列車本数などのシステムの制御容量が列車運行に影響する可能性が想定される。したがって、対象路線の列車運行に十分なシステムの制御容量を設計、実現する必要がある。それに加え、信号システム全体の取替にあたっては、移動閉そくの導入により、列車間隔の短縮や、遅延の早期回復等のメリットが、路線全体でどの程度あるのかを定量的に評価し、費用対効果を把握する必要がある。

2.2 関連研究

近年、開発や実用化が進んでいる、移動閉そくを実現可能な高度な列車制御方式として、国内では ATACS²⁾ を挙げることができる。また、欧州では、移動閉そくに基づく無線式列車制御の規格を ETCS-Level3 として定めている。

一方、列車制御方式に基づく信号条件や運転曲線を考慮した列車運行シミュレーション手法に関しては、武内らの固定閉そく方式に対応した列車運行・旅客行動シミュレータがある¹⁾。また、移動閉そく方式を採用した場合の遅延減少効果に関しては、神田らが評価を行っている³⁾。しかし、運転曲線の推定にあたり、運転士の運転操作上の詳細な制約が考慮されていないという課題がある。より精緻な評価を効率的に行うためには、実際に運転士が行う加速、だ行、ブレーキ等の運転操作を考慮し、運転曲線を推定したうえで、運転曲線が逐次更新されるシミュレーションを、実用的な計算時間で実現することが重要である。

2.3 研究の目的

以上を踏まえ本研究では、次の要件を満たすシミュレーション手法を開発することを目的とする。

- ①実際の運転操作を加味したシミュレーションを実用的な計算時間内で実施すること
- ②旅客が受ける輸送サービスの観点から、移動閉そくの導入効果を定量的に評価すること

これらの達成のために、まず、運転士の運転操作を加味した、移動閉そくに対応した列車運行シミュレータを構築する。次に、移動閉そく／固定閉そくのいずれかを前提として、何らかのトラブルにより10分程度の遅延が発生したケースをシナリオとして想定し、その条件下での列車運行と旅客行動を、シミュレータを用いてそれぞれ推定する。そして、移動閉そく／固定閉そくを前提としたシミュレーション結果を比較することにより、列車制御方式変更が、旅客利便性に与える効果を定量化する。

3. 列車運行・旅客行動シミュレータ

3.1 概要

列車運行・旅客行動シミュレータの概要を図2に示す。列車ダイヤデータ、自動改札機で取得される旅客の移動データ(ODデータ)、および対象路線の信号・運転設備データを入力とし、信号現示に従った各列車の運行時刻と、各旅客の列車乗継経路、および各列車、各区間の乗車人数を推定する。また、各駅において、旅客乗降に要する時間が所定停車時間を超過し、列車遅延が発生する現象や、遅延の後続列車等への伝搬を推定する機能もある。旅客の列車乗継経路、列車の乗車人数、遅延の推定を逐次連成して行うことにより、ダイヤに加え、信号等の設備の事前評価、検証が可能である。特に、大都市圏の朝ラッシュ時間帯等、多くの列車が運行される時間帯では、列車の混雑により乗降時間が伸び、遅延が発生するが、それがどの程度、後続列車に伝播するかは、信号システムの設計に大きく依存する。そのような、信号システムの設計にも活用可能な構成である。

列車運行・旅客行動シミュレータは、与えられたダイヤで運行した場合における旅客の列車乗継経路の推定結果を出力する。旅客の乗継履歴データを使用することで、旅客の視点から列車ダイヤや信号設備等を評価可能である。

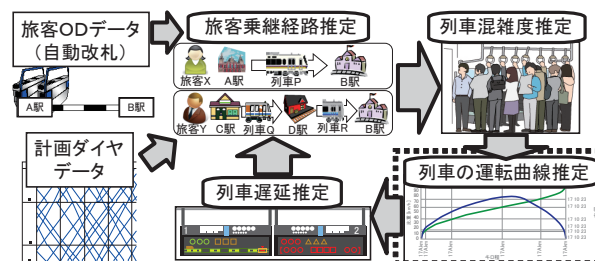


図2 列車運行・旅客行動シミュレータの概要

3.2 固定閉そく下における運転曲線推定機能

現在、列車運行・旅客行動シミュレータでは、固定閉そくを前提としたシミュレーションが可能である。固定閉そくでのシミュレーションにおいては、図3のように、まず、各列車が駅を発車するタイミングにおいて、その時刻における各信号の現示、速度制限に基づき、運転曲線を推定する。その後、列車は推定された運転曲線に従い走行するが、その先行列車が、在線中の閉そく境界を越えて次の閉そくに移動した場合には、そのタイミングで信号現示と後続列車の運転曲線を再計算、更新する。この場合、運転曲線の再計算は、先行列車が閉そく境界を通過した回数だけ行われる。計算回数の概算値は、(列車本数) × (閉そく数) となる。一般的なパソコンで固定閉そくのシミュレーションを実施すると、通勤路線の終日分のダイヤに対し、30分程度で完了する。

信号現示を踏まえた運転曲線の推定は、鉄道総研で構築し、運転時分査定用の運転曲線作成システムとして実用化されている、SPEEDY⁴⁾と同手法を使用している。具体的には、現在時刻における列車位置を基準に、その先の列車の加減速等を順次推定すると同時に、停止信号等で停止する位置からブレーキ曲線を逆引きすることにより、運転曲線を高速に計算する。また、運転曲線において、力行からだ行、だ行からブレーキといった運転操作が変化するタイミングでは、運転操作をすぐに切り替えることは困難であり、例えばだ行であれば、必ず一定時間以上、だ行を継続する必要がある。このような、運転操作の切り替え条件も考慮した運転曲線が作成可能である。

4. 移動閉そくに対応したシミュレータの開発

4.1 移動閉そくへの対応にあたっての課題

列車運行・旅客行動シミュレータを移動閉そくに対応させるにあたり、前節の固定閉そくにおける列車運行シミュレーション手法をそのまま適用すると、先行列車の

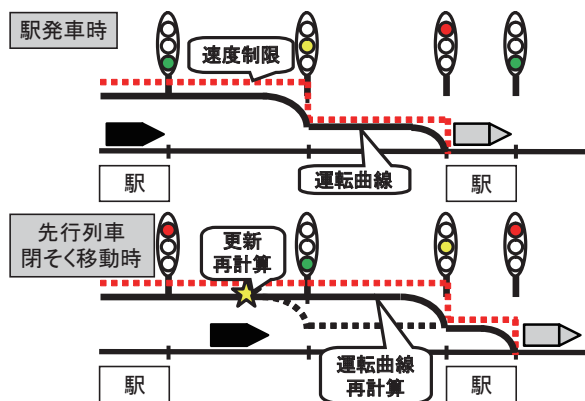


図3 固定閉そくにおける列車運行シミュレーション

在線位置に変化が生じる度に、後続列車の運転曲線の再計算が必要になる。固定閉そくでは、固定された区間である閉そく単位で在線が管理され、列車が閉そくを遷移するタイミングで再計算すれば良かったが、移動閉そくでは、時々刻々連続的に変化する先行列車在線位置に応じ、後続列車の停止限界位置が変化するため、運転曲線も連続的に再計算させる必要があるからである。これに対応して、新たな課題が2点生ずる。シミュレーションの計算時間に関する課題と、停止限界位置に停止可能な運転曲線の推定に関わる課題である。

4.2 運転曲線計算の効率化

まず、シミュレーションの計算時間の課題がある。固定閉そくと同様の考え方で運転曲線の再計算を実施すると、移動閉そくの場合、シミュレーション計算周期時間毎に再計算を行うことになる(図4)。仮に計算周期を1秒とすると、計算回数の概算値は、(列車本数) × (シミュレーション時間(秒)) となり、固定閉そくと比較して膨大となる。

そこで本研究では、図5のように、後続列車が駅を発車する時、最初の運転曲線を作成すると同時に、先行列車の手前に停止するための、だ行開始時刻を求める。そして、その後はこの時刻まで後続列車の運転曲線の再計算を行わず、後続列車がだ行開始位置に到達する時刻になって初めて、運転曲線の再計算、更新を行うこととした。実際には、先行列車の位置に応じ、後続列車の運転曲線は時々刻々変化する。しかし、そのうちのだ行開始時刻までの運転曲線は、先行列車の在線位置の変化による影響を受けないため、運転曲線の再計算タイミングを上記のように限定しても、最終的なシミュレーション結果には影響しない。なお、後続列車が既にだ行開始位置よりも先行列車寄りに在線している場合には、運転曲線の全部分が先行列車に影響を受けて変化するため、計算周期毎に再計算を行う。

提案手法に基づくシミュレーションでは、必要な運転曲線の再計算回数が、工夫を行わない場合と比べ減少す

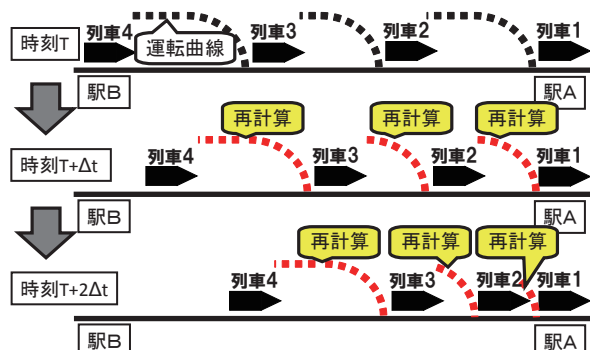


図4 移動閉そくにおける運転曲線の再計算(工夫無し)

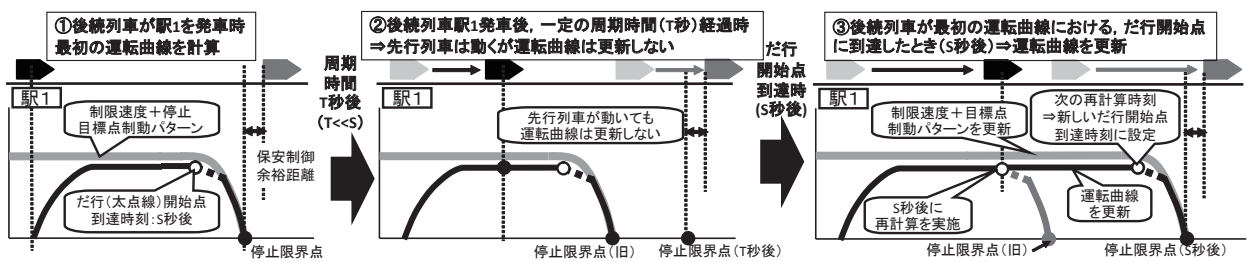


図5 考案した列車運行シミュレーション手法

る。その程度は、列車本数による先行列車と後続列車の詰まり具合により異なる。仮に、後続列車が先行列車のだ行開始位置よりも、先行列車寄りに在線することが無ければ、必要な計算回数の概算値は、(列車本数) × (だ行開始位置への到達回数) となる。これは、工夫を行わない場合の(列車本数) × (シミュレーション時間(秒))と比較し、大幅な減少となる。

4.3 停止限界点に停止可能な運転曲線の推定

もう1つの課題は、運転曲線を時々刻々更新する場合には、先行列車位置に対応した停止限界点を守れない場合がある、というものである。具体的には、例えば図6のように、現在時刻において、後続列車の停止限界点付近に線路形状等を原因とする速度制限がある場合を考える。この後、先行列車が前方に移動し、後続列車の停止限界点も微小な距離、前方に移動した場合を考える。このとき、前節で述べた運転士の運転操作を考慮し、停止限界点を合わせるためには、現在のブレーキ曲線上の運転パターンから、ブレーキ→だ行→ブレーキ、といった運転操作の追加が必要な場合がある。このとき、ブレーキ操作の間の「だ行」は運転操作上、一定時間以上継続する必要がある。しかし、仮に「だ行」の時間を最小限とした場合にも、最終的に停止限界点までに停止する運転曲線が作成できず、停止限界点を越えた位置に停止する運転曲線しか実現できないケースが発生する。

このようなケースへの対策として、運転曲線の再計算の結果、停止限界点を超過する運転曲線しか作成不可能

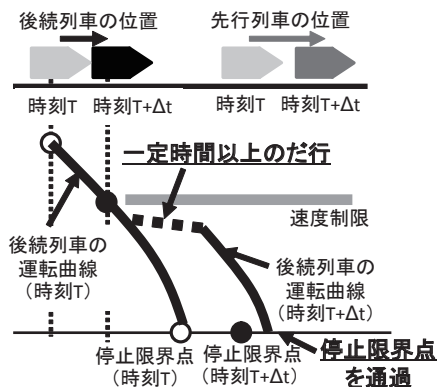


図6 停止限界点が前方に微小距離移動時の運転曲線

な場合には、その直前に計算し保持している運転曲線を更新しないこととする。これにより、停止限界点を越えた位置に停車する運転曲線が作成されるのを防止する。

この対策は次の理由から妥当とみなせる。実際の列車運行でも、停止限界点が前方に微小距離しか移動していない場合には、運転士はそれに応じた運転操作をきめ細かく変更することは、乗り心地の面から考えにくい。実際には、そこからさらに停止限界点が前方に動いたときに、運転操作を変更し、新たな停止限界点に停止する運転操作に切り替えることが考えられる。

5. 実在路線を対象とした試算

5.1 移動閉そく方式の評価手法

前節の機能を搭載したシミュレータを用いて、移動閉そく方式の導入効果を評価する手法を図7に示す。比較する列車制御方式としては、固定閉そくのATS、固定閉そくで一段ブレーキ制御を実現するデジタルATC、および移動閉そくの3種類とする。列車制御方式以外の条

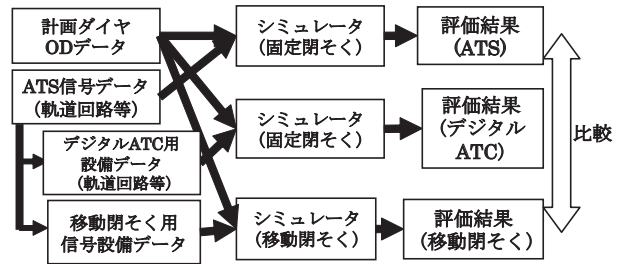


図7 列車制御方式の評価手法

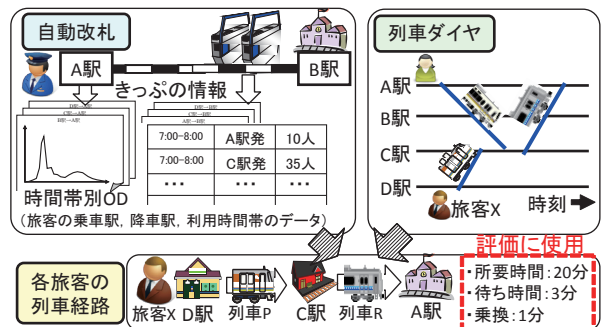


図8 各旅客の推定列車経路に基づく評価手法

件を揃えるため、シミュレータへの入力となる対象路線のダイヤ、旅客の列車乗継経路の選択基準、設備（軌道回路、信号設備を除く）は同一とし、軌道回路、信号設備のみ、各方式に対応したものとす。また、トラブル等による小規模な遅延が発生した場合を想定する場合には、遅延の発生元の列車、駅、支障時間のシナリオは、各方式で同一とする。

各シミュレーションの出力となる旅客の列車乗継経路に対し、旅客利便性を示す評価値を算出するとともに、全旅客分集約したものを、各列車制御方式の評価値とする（図8）。この値を比較することで、列車制御方式の効果を旅客の利便性の観点から評価する。

5.2 路線の概要、評価対象

構築した、移動閉そくに対応したシミュレータを用い、大都市通勤路線（現在は固定閉そく、ATS）を対象に、仮に列車制御方式をデジタルATC、および移動閉そくに変更した場合の効果を、前節で述べた手法により評価した。対象路線は、駅数19駅、終日の列車本数が約1,000本の路線で、このうち約3～4分間隔で列車が設定されている朝通勤時間帯（7～10時）を中心に分析した。

評価対象とする旅客を、対象路線の駅を7～10時の間に出発した旅客（計：208,335人）とし、各列車制御方式下における、各旅客の利便性評価値を算出し、旅客1人あたりの平均値を求めた。利便性評価値には、国土交通省が監修する「鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル2012」の手法に基づき、乗車時間、待ち時間、乗換回数、混雑度を反映し、以下の式で算出される不効用値⁵⁾を使用した。

（不効用値）＝列車乗車時間（秒）＋2×ホーム待ち時間（秒）＋600×乗換回数＋ Σ （（各駅間の走行時間（秒））×駅間の混雑度に応じた不快度を表す式）

※ Σ は、利用者が列車で通過する各駅間について、「走行時間×不快度」の総和を算出することを示す。

5.3 評価結果

まず、列車運行にトラブル、支障等が一切生じない場合を前提に、固定閉そく方式、および移動閉そく方式に対応したシミュレータを用い、各列車制御方式に対し5.2節の評価を行った。終日の列車運行の推定にかかるシミュレーション時間は、CPUがIntel(R) Core i7 3.4GHz、メモリ4GBの一般的なPCで、固定閉そく版、移動閉そく版ともに30分程度となり、4.2節の計算の効率化により、移動閉そくでも、固定閉そくと同程度の実用的な計算時間でシミュレーション可能なことを確認した。また、列車制御方式による不効用値の差異は、ほぼ生じていないことを確認した。

表1 各指標の1人あたり平均値の比較
（対象：7～10時に対象路線内の駅に到着する旅客：208,355人）

	ATS	デジタルATC	移動閉そく
全所要時間（秒）	735	731	717
乗車時間（秒）	595	593	579
駅停車時間（秒）	138	142	143
ホーム待ち時間（秒）	140	138	139
平均混雑度（%）	73	74	74
平均着席確率（%）	57	57	57
不効用値（秒）	928	923	898

表2 2分以上の遅延となる列車・駅の件数
（対象：8～10時に着発する列車・駅）

	ATS	デジタルATC	移動閉そく
着遅延（件）	314	240	146
発遅延（件）	301	233	140

次に、この路線のある駅において、停車中の列車が8:00～8:10の10分間、何らかのトラブルで発車出来ず、遅延が発生した状況をシナリオとして設定する。このような状況下で、列車制御方式により、遅延の回復の速さに相違が生じた結果、旅客利便性にどの程度影響するのかを、各方式におけるシミュレーション、評価結果を比較することで考察する。

不効用値、および所要時間、乗車時間等、他に算出した各種指標の旅客1人あたりの平均値を表1に示す。ATSとデジタルATCの比較では、大きな差異は生じていないが、移動閉そくの場合、特に旅客の乗車時間が減少し、ATSとの比較で、旅客1人当たり平均で30秒程度の不効用値の低下に繋がることが確認できる。

また、旅客単位の指標以外にも、列車単位での遅延を比較し、2分以上の遅延となる列車・駅の件数を、着遅延、発遅延それぞれについてカウントしたものを表2に示す。固定閉そくのATSやデジタルATCに比べ、移動閉そくの場合には、列車遅延が早期に回復し、ATSとの比較で、2分以上の遅延の列車・駅の件数が、約300件程度から約140件程度に減少することを確認した。

さらに、トラブル発生直後の周辺列車の運行状況を、縦軸が位置（駅）、横軸が時刻の時隔曲線図により比較したものを、図9に示す。固定閉そく、ATSの場合における時隔曲線図では、トラブル発生直後にある区間、時間帯を走行する列車本数が4本であったのに対し、移動閉そくでは、同じ区間、時間帯に6本が走行しており、列車間隔を詰めた運行が可能となることを確認した。

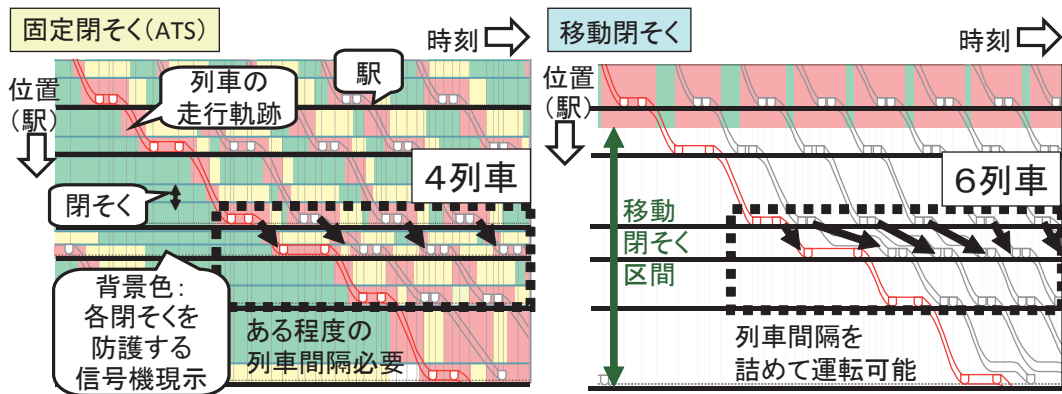


図9 時隔曲線図の比較（左：固定閉そく，右：移動閉そく）

6. おわりに

本研究では、列車運行・旅客行動シミュレータを機能向上し、移動閉そく方式に対応した列車運行シミュレーションが可能となった。また、シミュレータを使用し、実在線区における移動閉そく方式の導入効果を評価した。

開発したシミュレータは、力行→だ行→ブレーキといった運転士の運転操作条件を加味したうえで、運転曲線の計算方法を工夫し、シミュレーションの計算時間を終日ダイヤで約30分程度と、実用的な範囲内に抑えた点の特徴である。また、列車制御方式の評価手法として、旅客が体験する輸送サービスを不効用値により定量的に評価し、旅客の観点での効果を推定、比較する手法を採用した。大都市通勤路線を対象に試算を行い、ATS、デジタルATC、および移動閉そくの列車制御に対する評価を行った結果、10分程度の小規模遅延時において、移動閉そくの導入によって旅客1人あたりの不効用値を、現行ATSに対して平均30秒程度減少させることができ、利便性改善効果があることを確認した。

今後は、他のシナリオや他路線での試算、検証を重ねるほか、移動閉そく以外にも、予測制御等、研究開発レベルで提案されている様々な列車制御方式の評価に取り組みたいと考えている。

文献

- 1) 武内陽子, 坂口 隆, 熊澤一将, 國松武俊, 佐藤圭介: 高性能な列車運行・旅客行動シミュレータの開発と列車運行の多面的評価, 電気学会論文誌 D, Vol.135, No.4, pp.1-9, 2015
- 2) 馬場裕一他: 無線による列車制御システム (ATACS), Technical review, JR East (5), pp.31-38, 2003
- 3) 神田大輔, 川村孝太郎, 岩倉成志: 移動閉そく導入による都市鉄道の遅延減少効果のシミュレーション分析, 土木学会第69回年次学術講演会, IV -078, 2014
- 4) 山下修: 特集 鉄道総研 運転曲線図と運転曲線作成システム「SPEEDY」, 運転協会誌, Vol.48, No.3, 2006
- 5) 国土交通省鉄道局: 鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル 2012年改訂版, 運輸政策研究機構, 2012