

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 移動閉そく方式に対応した列車運行シミュレーター

列車運行の安全を確保するための信号システムは、閉そくという概念に基づいて設計されています。近年、列車間隔の短縮が可能な「移動閉そく」とよばれる新しいシステムが実用化されつつあります。移動閉そくの導入には、信号設備の大幅な取り替えが必要となるため、旅客や鉄道事業者にとってのメリットを、事前に定量評価することが望ましいといえます。そこで、移動閉そく方式に対応した列車運行シミュレーターを開発し、ある通勤路線を対象に、移動閉そく導入時の列車遅延の縮小や、旅客の利便性向上の効果を試算しました。



**國松 武俊**  
Takatoshi Kunimatsu  
信号・情報技術研究部  
運転システム研究室  
副主任研究員  
【専門分野】旅客流動推定、輸送計画評価、シミュレーション



**寺澤 孝彦**  
Takahiko Terasawa  
前信号・情報技術研究部  
運転システム研究室  
研究員  
【専門分野】輸送計画システム、列車運行シミュレーション、運転整理



**武内 陽子**  
Yoko Takeuchi  
信号・情報技術研究部  
運転システム研究室  
主任研究員  
【専門分野】列車運行シミュレーション、運行実績分析



**辰井 大祐**  
Daisuke Tatsui  
信号・情報技術研究部  
運転システム研究室  
副主任研究員  
【専門分野】輸送計画作成・評価、旅客流動推定

## はじめに

鉄道では、列車運行の安全性を確保するため、「閉そく」とよばれる概念に基づき、列車どうしの衝突を防ぐ信号システムが使用されています。近年、「移動閉そく」とよばれるシステムが実用化されつつあり、これにより、列車間隔を短縮し、列車の増発や遅延の早期回復を図ることが可能となります。

移動閉そくを実現するためには、一般的には、無線式列車制御システム(☞参照)の導入が必要で、信号設備の大幅な取り替えが必要です。また、無線式列車制御システムには、1か所の無線基地局が同時に通信可能な列車本数などに上限があるため、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、実現する必要があります。したがって、移動閉そくを導入した場合に、

これら無線式列車制御システムの整備に見合うだけの、列車間隔短縮、遅延縮小の効果が得られるか否か、費用対効果を定量的に評価する必要があります。

そこで本研究ではまず、鉄道総研で構築した、ある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ー<sup>1)</sup>を機能向上し、移動閉そくに対応させました。そして、実在通勤路線の朝ラッシュ時間帯を対象に、10分程度のトラブル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ました。最後に、これらの値を比較することで、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ました。

## 固定閉そくと移動閉そく

鉄道の信号システムの多くでは、駅間の線路をある長さごとの区間にあらかじめ分割した閉そく区間を設定する方式を採用しています。これは、固定された一つの閉そく区間に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、「固定閉そく」と

### ☞ 無線式列車制御システム

列車の位置検知や制御情報の伝送を、軌道回路や、地上子によらず、地上一車上間の双方向無線通信で行う列車制御システム。このシステムの導入により、信号機、軌道回路、ケーブルなどの地上設備が削減できるため、設備メンテナンスの省力化も期待できます。

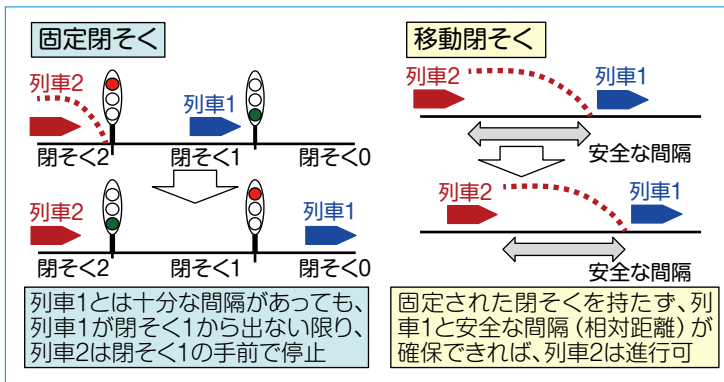


図1 固定閉そくと移動閉そく

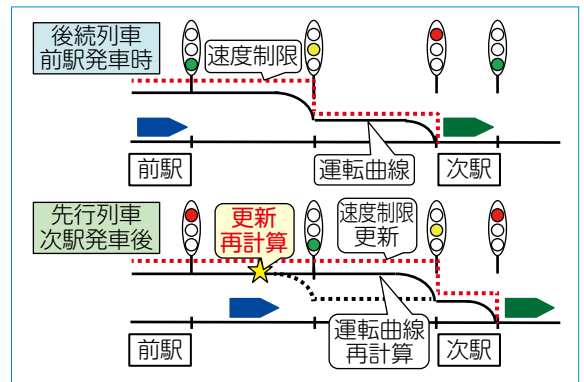


図3 固定閉そくにおける列車運行シミュレーション

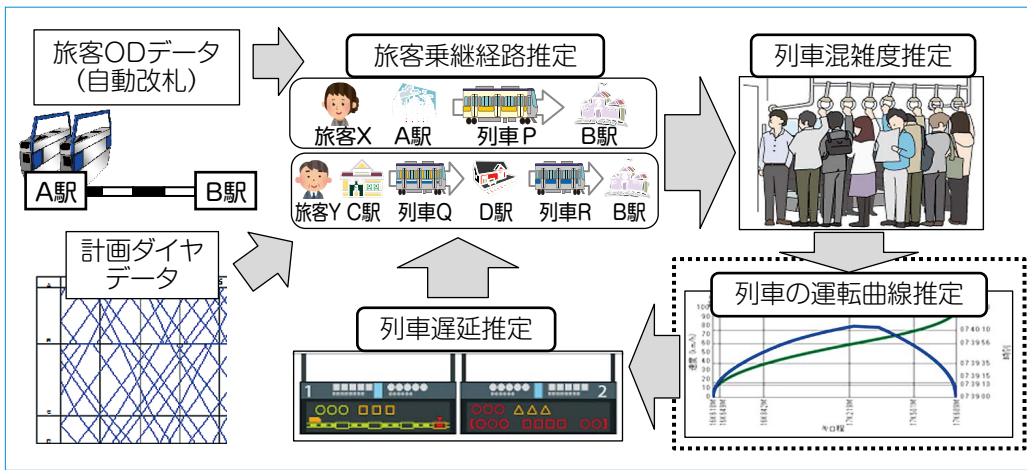


図2 列車運行・旅客行動シミュレーターの概要

よばれます。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ます。これは「移動閉そく」とよばれ、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ります。たとえば、国内ではATACS<sup>2)</sup>が実用化されているほか、欧州では無線式列車制御の規格としても定められています。移動閉そくは、あらかじ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ります(図1)。

### 列車運行・旅客行動シミュレーター

列車運行・旅客行動シミュレーターは、列車ダイヤデータ、自動改札機で

取得される旅客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します(図2)。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、遅延の後続列車などへの波及を推定する機能もあります。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、列車ダイヤに加え、信号設備の事前検証も可能です。とくに、大都市圏の朝ラッシュのように、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、遅延が発生し、それが後続列車にも波及することがありますが、その影響範囲は、信号システムに大きく

依存します。そのような、信号システムの設計による遅延の影響範囲の推定、評価にも活用可能です。従来の列車運行・旅客行動シミュレーターでは、固定閉そく方式での信号現示に従った列車運行シミュレーションが可能でした。具体的には、まず、各列車が駅を発車する時点で、その時刻の信号現示、速度制限に基づき、運転曲線(☞参照)を作成します。その後、列車は作成された運転曲線に従い走行しますが、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時に、信号現示と後続列車の運転曲線を再計算、更新します(図3)。この計算を順次、実施することで、列車ダイヤ、および信号現示に従った列車の運行を模擬し、各列車の着発時刻、および遅延を推定します。

#### ☞ 運転曲線

駅間における列車の位置と速度、または位置と走行時間の関係を表した曲線。引張力や抵抗、ブレーキ力といった列車の運動特性に加え、線路形状や勾配、分岐器などの設備の位置、速度制限を考慮し、列車の駅間の運転を推定します。おもに駅間運転時分を算出する目的で作成されます。

## 移動閉そくに対応した列車運行シミュレーターの開発

列車運行・旅客行動シミュレーター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ります。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よいのですが、移動閉そくでは、時々刻々と変化する先行列車の在線位置に応じ、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する必要があります。計算量が膨大になります。

そこで、計算量を減らすために、この運転曲線の再計算方法を改良しました。具体的には、図4のように、たとえば列車5が駅Bを発車する時、列車5の最初の運転曲線を作成すると同時に、先行列車である列車4の手前に停止するための、惰行開始時刻を求め、それを再計算点に設定します。そして、その後はこの再計算点の時刻まで、列車5の運転曲線の再計算を行わず、列車5が再計算点に到達する時刻になって初めて、運転曲線の再計算、更新を行う形にしました。実際には、先行列車4の位置に応じ、後続列車5の運転曲線は時々刻々変化します。しかし、列車5の停止限界点は、先行列車4が移動すると現在の位置よりも先行列車4寄りに変化し、後続列車5寄り(手前側)には変化しません。すなわち、列車5の運転曲線のうち、再計算点までの部分は、先行列車4が移動しても変化しないことになります。そのため、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ません。なお、後続列車5がすでに、停止限界

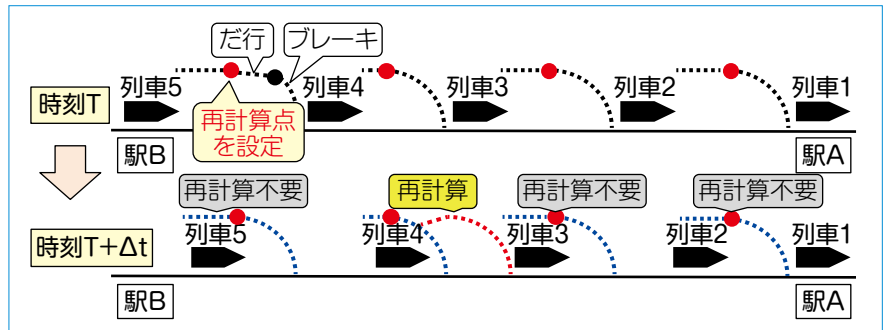


図4 移動閉そくにおける列車運行シミュレーション手法

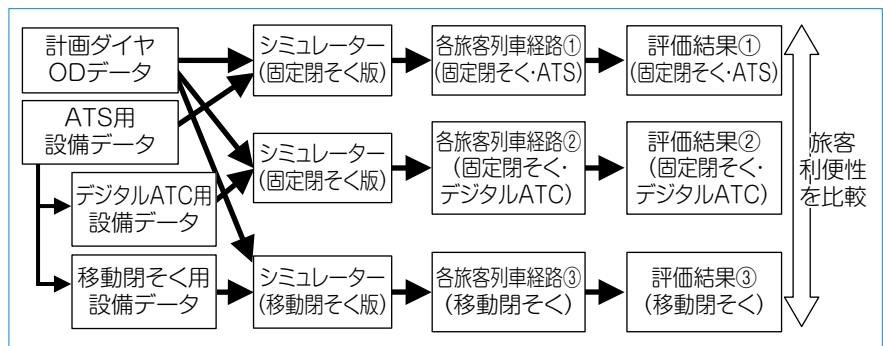


図5 列車制御方式の評価手法

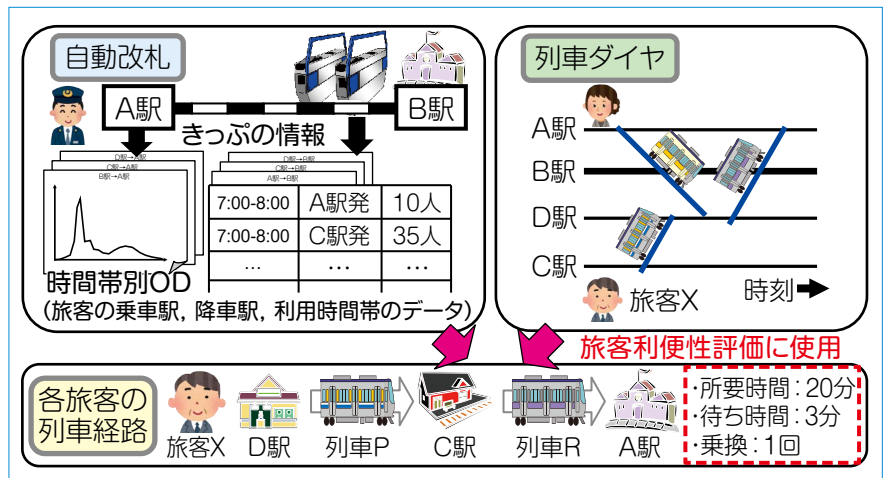


図6 各旅客の推定列車経路に基づく評価手法

点に停止するために、惰行やブレーキを開始している場合には、運転曲線の全部分が先行列車4の移動により変化するため、1秒程度の一定の時間周期ごとに運転曲線を再計算します。

### 実在路線を対象とした試計算

シミュレーター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5に示します。比較する方式としては、①固定閉そく方式で自動閉そくとATSが導入されているケース、②固

定閉そく方式で一段ブレーキ制御を実現するデジタルATCが導入されているケース、および③移動閉そくが導入されているケースの3種類としました。列車制御方式以外の条件をそろえるため、シミュレーター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)は各方式とも同一とし、軌道回路、信号設備のみ、各方式それぞれに対応した条件とします。各シミュレーション結果に含まれる各旅客の列

表1 各指標の1人あたり平均値の比較

	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

(対象：7～10時に対象路線内の駅に到着する旅客：208,355人)

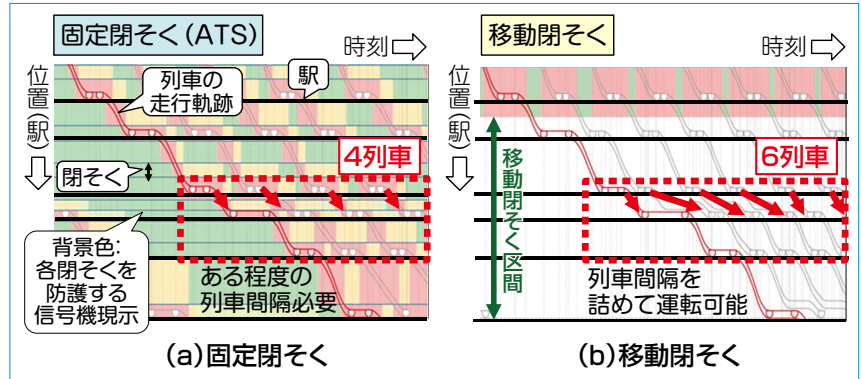


図7 時隔曲線図の比較

表2 2分以上の遅延となる列車・駅の件数

	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

(対象：8～10時に着発する列車・駅)

車経路情報に基づき、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」で定義されている不効用値<sup>3)</sup>を算出し、それを全旅客分集約したものを、列車制御方式の評価値とします(図6)。これらを比較することで、列車制御方式の効果を旅客利便性の観点から評価します。不効用値は、各旅客が鉄道を利用する際の、列車乗車時間、ホーム待ち時間、乗換回数、列車の混雑度を反映し、計算されます。鉄道利用時の利便性と密接に関係する、これらを反映することで、旅客の視点から列車制御方式を評価します。

試算の対象路線は、駅数19の大都市通勤路線(現在は固定閉そく、ATS)とし、そのうちの朝時間帯(7～10時、約3～4分間隔で列車が運行)を対象に、各列車制御方式とした場合の効果を評価しました。

シナリオとして、この路線のある駅で、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できず、遅延が発生した状況を設定しました。この状況下で、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かを、各方式における評価結果を比

較することで考察します。不効用値、および所要時間、乗車時間など、ほかに算出した各種指標の旅客1人あたりの平均値を表1に示します。ATSとデジタル

ATCの比較では、大きな差異は生じていませんが、移動閉そくの場合、とく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つながる事が確認できます。また、これ以外に、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に示します。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、300件程度から140件程度に減少する結果となりました。

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7に示します。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ました。

なお、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、メモリー

4GBのPCで、固定閉そく、移動閉そくともに30分程度となり、列車制御方式を評価する目的では、実用的な計算時間内に収まったと考えています。

### おわりに

列車運行・旅客行動シミュレーターを機能向上し、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りました。また、シミュレーターを使用し、実在線区における移動閉そく方式の導入効果を評価し、その効果を確認しました。

今後は、ほか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、現在、鉄道総研で研究開発中の予測制御など、さまざまな列車制御方式の評価に取り組みたいと考えています。[RRR]

### 文献

- 1) 武内陽子, 坂口隆, 熊澤一将, 國松武俊, 佐藤圭介: 高機能な列車運行・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(産業応用部門誌), Vol.135, No.4, pp.411-419, 2015
- 2) 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
- 3) 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