

車上主体の自律型列車制御システムの開発

北野 隆康* 熊澤 一将** 藤田 浩由*** 杉山 陽一*

Development of an On-board Autonomous Train Control System

Takayasu KITANO Kazumasa KUMAZAWA Hiroyuki FUJITA Yoichi SUGIYAMA

As a basic technology for realizing autonomous train operation, we propose two functions: a function to create a running profile onboard a train and a function to directly control wayside equipment from a train. The function to create a running profile onboard a train generates a running pattern to recover from delays caused by abnormalities, based on information such as timetables that is acquired and held by the onboard train. On the other hand, the function to directly control ground equipment from the vehicle is to set the train's path by the on-board equipment, switch the necessary turntable machines, and control level crossing warning.

キーワード：列車運行の自律化，自律型列車制御，走行パターン，車上進路制御，踏切警報制御

1. はじめに

鉄道総研が自動運転の進化形として研究開発に取り組んでいる自律運転¹⁾は、できるだけ少ない地上設備でより安全かつ柔軟な列車運行の実現を目指すものである。自律運転を現実のものとするためには、個々の列車が運転状況と線路内・沿線等の状態を把握し、踏切等の地上設備を制御しながら、自ら安全に走行速度を制御する技術が必要となる。中でも、列車が自律的に走行するための制御システムは、自律運転の基盤となるものであり、列車を安全に走行させる機能をできる限り車上に搭載したうえで、従来は運転士や係員に委ねられていた取り扱いも含めてシステム化する技術を確認する必要がある。そこで、筆者らは、車上装置に列車制御に係る機能を集約し、各列車が自律的に進路を決定して走行できる制御システム（以下、このシステムを自律型列車制御システムと呼ぶ）の開発に取り組んでいる。

本報告では、自律型列車制御システムを構築するための要素技術として、車上装置が列車ダイヤから設定される運転曲線に基づいて走行するパターン（以下、走行パターンという）を自動で作成する機能と、車上から地上設備を直接制御する機能を提案し、各機能の効果を試算した結果を報告する。まず2章で自律型列車制御システムの概要と構成を示したのち、車上で走行パターンを作成する機能を3章で述べる。この機能は、異常発生等で遅延が発生した場合に、車上取得・保有するダイヤ等の情報に基づいて遅延を回復する走行パターンを生成するものである。4章では、車上から地上設備を直接制御する機能について述べる。

2. 自律型列車制御システムの概要

2.1 自律型列車制御システムの構成

自律運転では、列車が単独でも走行できることが基本となるが、都市圏のように複数の路線が集中するエリアや、列車密度が高い線区などでは、広域での運行状況を把握して管理することで、圏内もしくは線区内全体でのスムーズな運行を実現する必要がある。このため、自律運転のシステム構成として、輸送需要に応じて次に示す2種類の形態を想定している。

(1) 列車が単独で自律的に走行する形態

各列車が、事前に入力されたダイヤ情報・ハザードマップと、自列車位置・速度に基づいて走行パターンを作成して進路を構成し、車上から転てつ機や踏切を制御する²⁾。

(2) 列車の自律的な運行を地上からサポートする形態

地上の中央に運行に関わる情報を集約・配信する装置（以下スーパーバイザという）を設置し、スーパーバイザにて線区全体の列車の動きや、旅客の流れ、リアルタイムハザードマップ、メンテナンスなどの情報を集約し、列車の運行を管理する（図1）。各列車は、スー

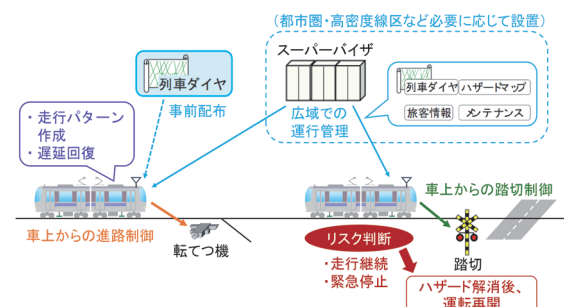


図1 自律型列車制御システムの構成

* 信号技術研究部 列車制御システム研究室
 ** 信号技術研究部 運転システム研究室
 *** 信号技術研究部 信号システム研究室

パバイザから与えられる自列車のダイヤ情報に基づいて、(1)と同様に、走行パターンを作成して進路を構成し、車上から転てつ機や踏切を制御する。

2.2 列車が自律的に走行する列車制御システムの機能

ここでは、2.1節に示した構成に基づいて、自律型列車制御システムに求められる機能を示す。車上で自律的に制御するケースとして、通常走行時と異常発生時のそれぞれの制御が想定される。通常走行時は、車上でダイヤ情報に基づいて進路を構成して走行パターンを作成し、進路上の転てつ機や踏切を直接制御する(図2(a))。異常発生時沿線支障検知等で停止した列車が運転再開する際に、遅延回復を目指す走行パターンを作成する(図2(b))。

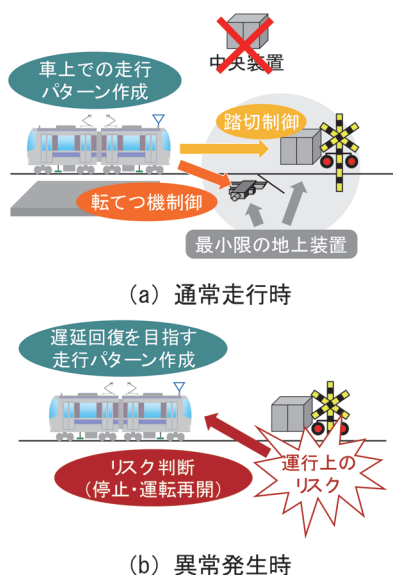


図2 自律型列車制御システムの主な機能

これらを踏まえ、自律型列車制御システムの主な機能として、以下を挙げる。

- (1) 列車出発時に、車上のダイヤ情報に従って車上で走行パターンを生成する
- (2) 列車が安全に走行できる進路を確保する
- (3) 現場に設置される転てつ機と踏切の制御装置を車上から直接制御する
- (4) 列車が沿線支障検知等により停止した後、運転再開する際に遅延回復できるような走行パターンを作成する

2.3 装置構成

提案するシステムでは、車上で自律的な制御を実施するため、図3に示すとおり、車上装置と現場の地上装置で構成する。車上には、車上装置、車上DB(車両性能や線路情報を登録)、および無線機を搭載し、走行パターンの作成、進路設定、踏切制御を行う。現場に設置する地上装置は転てつ機と踏切に対応する制御装置のみとする。

3. 車上装置における走行パターンの作成

各列車は、車上装置が取得して保有している列車ダイヤに基づいて走行パターンを作成し、その走行パターンに従って走行する。これは、自動運転における定時運転機能、すなわち列車ダイヤに設定された各駅の発着時刻通りに列車を走行させる機能を拡張するものである。

従来の自動運転では、あらかじめ走行パターンを作成しておき、その走行パターンに従って走行する^{3) 4)}。これに対して、自律型列車制御システムでは、列車ダイヤの変更等に柔軟に対応するため、始発駅を出発する前に

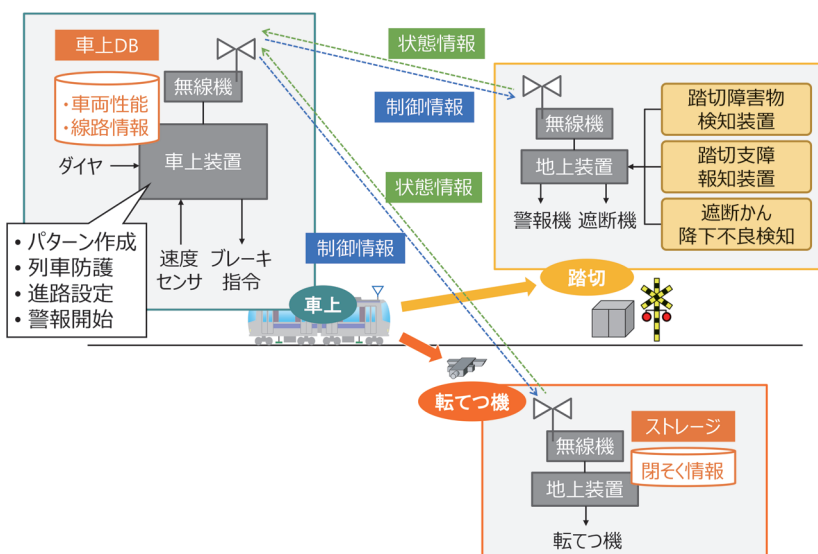


図3 自律型列車制御システムの装置構成

車上で走行パターンを作成および更新する。緊急停止情報等によって駅間で停止した場合は、列車自身が走行パターンを再作成し、運行を継続する。

本章では、自律型列車制御システムにおける車上で走行パターン作成を実現する機能として、列車ダイヤに基づく走行パターン作成と、緊急停止後の回復運転に対応する走行パターン作成の2つの機能について述べる。

3.1 列車ダイヤに基づく走行パターンの作成機能

列車ダイヤに基づいて走行パターンを作成する手法⁵⁾をベースとする。まずは駅間を最短で走行することを基本として、そこから駅間の最高速度を下げる等の処理を適用することで、列車ダイヤ上に定められた駅間の走行時間を満たす走行パターンを作成している。駅間の走行時分については、列車ダイヤに示される各駅の発着時刻から算出する。この手法は各列車の駅間の走行パターンを瞬時に作成できることが利点であることから、この手法を自律型列車制御システムに応用し、車上で走行パターンを作成するアルゴリズムを構築した。

提案する具体的な走行パターン作成アルゴリズムを以下に示す。

- ①列車ダイヤから各駅の発着時刻および発着番線を抽出し、駅間の走行時間 t_1 を算出する (Step 1)
- ②車上に記録される線路データ (停止位置や勾配、速度制限等) および車両データ (引張力や列車長、走行抵抗等) から、駅間を最短で走行する走行曲線を作成する (Step 2)
- ③車上で作成した走行曲線における駅間の走行時間 t_2 と①の走行時間 t_1 を比較し、その差が閾値より大きくなる場合 ($T < t_1 - t_2$) は、駅間の最高速度を低下させて再度走行曲線を作成する (Step 3)
- ④再度作成した走行曲線にて③の処理を繰り返す
- ⑤ $T \geq t_1 - t_2$ となる場合に、その走行曲線を駅間の走行パターンとして確定する (Step 4)

これらのアルゴリズムのイメージを図4に示す。このアルゴリズムは各駅停車を前提としているが、通過列車の場合でも、②にて駅における列車の到着間隔を示す追込時隔を考慮することで対応できる⁶⁾。

3.2 緊急停止後の回復運転に対応する走行パターンの作成機能

自律型列車制御システムでは、自動運転と異なり、緊急停止情報等によって駅間で列車が停止した場合でも、列車自らが運転再開の状況を判断した上で次駅までの走行を可能とすることを目標とする。駅間で列車が停止する場合、駅出発時に作成した走行パターンと実走行の間に乖離が生じるため、列車が停止した地点から次駅の停止位置まで新たに走行パターンを作成する必要がある。また、駅間で列車が停止することで駅間の走行時間が増加し、遅延が生じる。そこで、列車ダイヤに基づく走行パターン作成機能を拡張することで、運転再開した後に自律的に遅延を回復する走行パターンを作成する機能を開発した。以下、走行パターンの再作成および列車遅延の回復を実現する機能について示す。

3.2.1 走行パターンの再作成

駅間で列車が停止した場合、列車の停止地点が運転再開後の出発地点となる。そこで、この停止地点を3.1節の走行パターン作成における始発駅とみなして、走行パターンを再作成する。ただし、列車遅延を回復するため、以下の処理とする。

- ①最短で走行する走行曲線を走行パターンとする (次駅に列車ダイヤより早着する場合でも、3.1節の③④の処理を実施しない)
- ②次駅の発予定時刻が列車ダイヤ上の発時刻より遅延する場合、次駅とその先の駅間を最短で走行する走行パターンを適用する

3.2.2 停車時間調整による遅延回復

一般的な列車ダイヤでは、各駅での最小の停車時間で

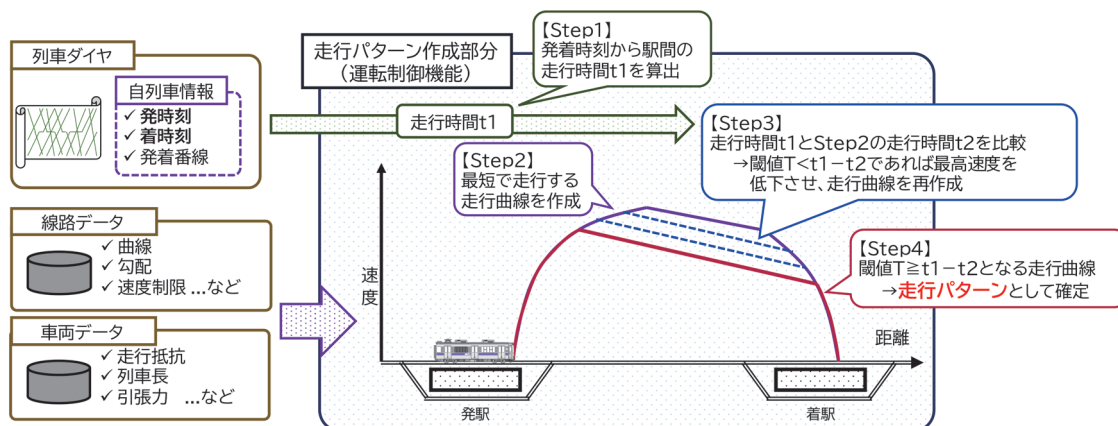


図4 列車ダイヤに基づく走行パターン作成機能

ある最小停止時分と、停車時間に付加される余裕が定められている。

そこで、自律型列車制御システムでは、列車の遅延状況に応じて、停車時間を活用した遅延回復も図る。具体的には、遅延発生時は駅到着時の着時刻と、列車ダイヤで計画された発時刻を比較し、その差分が最小停車時分を満たしている場合は計画された発時刻に従い、対象駅を出発する⁶⁾。ただし、最小停車時分を満たせない場合は、対象駅の着時刻に最小停車時分を加算した時刻を、その駅の発時刻として更新する。

3.3 遅延回復効果の検証

ここで、列車走行中に緊急停止が発生して遅延が生じる場合を例として、提案手法により生成した走行パターンと、その遅延回復効果を試算した結果を図5に示す。この例では、列車ダイヤ上でA～B駅間の走行時間は120秒、B～C駅間は115秒と定められている。駅出発時には、開発した機能により、車上で走行時間に対応した走行パターンが作成される(図5中の青線)。列車走行中、緊急停止情報等によって650m地点に停車するが、それまでの走行パターンから大きく離れ、遅延が発生する(約38秒)。緊急停止した要因が取り除かれて運行再開する場合、提案手法により、遅延が回復するような走行パターンが再作成される(図5中の褐色の線)。

列車がこの走行パターンに従って走行することで、B駅着時点では約2秒、C駅着時点では約9秒の遅延が回復する。これより、再作成した走行パターンは遅延回復にも寄与するといえる。ただし、今回は検証の簡略化のため、最高速度を含む速度制限に達した場合に、惰行運転は適用せずに等速走行することとした。

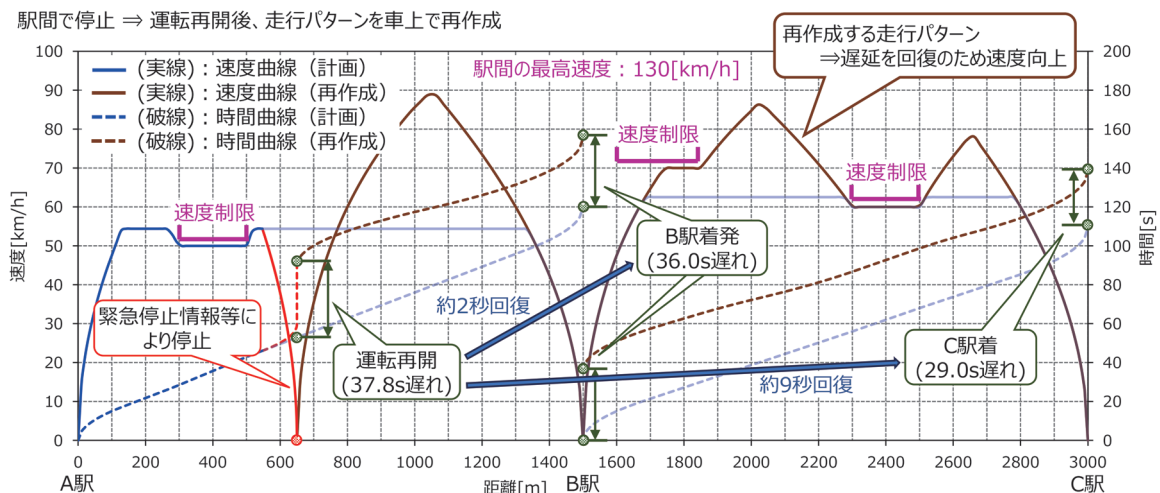


図5 列車ダイヤに基づく走行パターン作成機能

4. 車上からの地上設備制御

4.1 車上からの進路・転てつ機制御

4.1.1 中央装置に依らない進路・転てつ機制御の提案

本節では、列車自身が他列車の位置や進路を踏まえて、進路に関する転てつ機を制御する機能を提案する。この機能は、車上装置が進路を設定し、転てつ機の転換制御を行うが、進路や転てつ機の鎖錠状態については転てつ機を制御する地上制御端末にて保持し、転換鎖錠を指示した車上装置のみが解錠できるという考え方で安全を確保するものである。

4.1.2 装置構成

この機能は、図6に示すように、車上装置と現場設備を制御する地上制御装置によって実現される。地上制御装置は、転てつ機のみと接続され、その制御と列車の位置、進路に関する情報の記憶を行う。一方、車上装置は、分散して配置された地上制御装置と連携して主体的に制御を行う。各装置間で伝送される制御情報は、直近の装置間(車上装置と地上制御装置または地上制御装置同士)で必要な範囲に順次伝送する。なお、装置間の伝送路は特定の回線に限定せず、直近の装置間で情報伝送

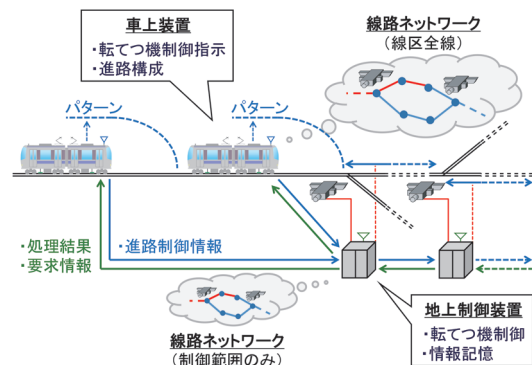


図6 車上からの進路・転てつ機制御

が確立できる伝送回線を使用することを前提とする。

4.1.3 他列車の位置や進路の把握と転てつ機の制御

車上装置が地上制御装置と制御電文を送受信することで間隔制御を含む進路制御を行う。自列車の進路確保にあたって、車上装置は前方直近の地上制御装置に列車位置や進路制御情報を送信する。地上制御装置は、受信した進路制御情報に基づいた処理を行い、処理結果および要求された情報を当該車上装置へ返信し、さらに進路内方側で隣接する地上制御装置にも同じ内容を転送する。この転送処理を進路の終端に相当する地上制御装置に至るまで繰り返すことで、車上装置と関係する地上装置の間で情報を共有する。進路確保を要求した車上装置は、地上制御装置から返信された情報により他列車の進路状況や先行列車の在線状況、装置の状態を取得でき、それに基づいて自身が確保できる進路を決定し、進路の確保・転てつ機の転換・鎖錠を行う。進路や転てつ機は、それぞれ確保・鎖錠した車上装置のみが解錠可能とすることで、他列車に対する排他制御が可能となる。進路の確保・転てつ機の鎖錠を行った車上装置は、安全に走行できる箇所を防護点として、その外方まで走行可能とすることで安全を確保する²⁾。

4.2 車上からの踏切制御

4.2.1 無線を用いた踏切警報制御

自律型列車制御システムにおいても、基本的な踏切制御の考え方は、無線式列車制御システムにおける踏切制御と同様である(図7)。

無線式列車制御システムにおける踏切警報制御では、任意速度において踏切道まで最大加速度で加速した場合に、設定した警報時間を確保できる位置において警報開始とする仕組みとしている。これにより、低速接近時には警報開始位置をより内方に設定することで、現行の固定位置での警報制御と比較して、不要な警報時間の短縮を実現している。しかし、現行の無線式列車制御の踏切制御における警報開始の仕組みは運転士による手動運転を前提としているため、最大加速度にて警報制御することで、警報開始後の運転操縦を限定しないよう配慮している。そのため、本来の意味での定時間警報制御とはなっていない。

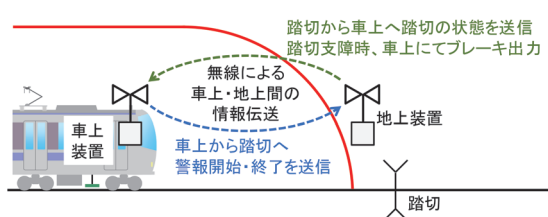


図7 無線を用いた踏切制御

4.2.2 警報制御機能

自律型列車制御システムにおける踏切制御では、3章で述べた機能によって得られる走行パターンの列車位置および速度情報に基づき踏切までの到達時間を算出し、設定した警報時間となる位置において警報開始のトリガとなる情報を踏切に指示する(図8中の警報開始パターン)⁷⁾。警報開始パターンの算出には、設定警報時間に無線伝送遅延時間(マージン)を加算するとともに、走行パターンの速度情報に速度検出センサの変動幅を加算した値を使用する。さらに、実際の列車速度があらかじめ設定した走行パターンを超過しないよう、速度超過防止パターンを設け、警報時間不足を防止する。

駅出発方に位置する構内踏切など、駅出発条件に関する踏切については、走行パターンから当該踏切までの到達時間を算出し、不足する時間分、出発を抑止することで警報時間不足となることを防止する。例えば、設定警報時間に対して踏切到達時間が10s不足する場合は、駅出発予定時刻の10s前を警報開始タイミングとすることで、不要な出発抑止とならないようにする。

4.2.3 列車防護機能

車上装置は、車上DBに登録したブレーキ減速度や踏切位置などの情報に基づき、図8に示すように踏切に対して車上で防護パターンを発生させる⁷⁾。列車の速度が防護パターン速度を超過すると、自動的に常用ないし非常ブレーキを出力する仕組みとする。

正常時は、踏切からの状態情報として、遮断完了条件に加えて「支障検知なし」を受信し、防護パターンを消去する。一方、踏切支障時は「支障検知あり」を受信し、防護パターンを継続とすることで、列車を踏切手前までに確実に停止させる。ただし、列車が踏切に進入する直前に支障を検知した場合は、検知タイミングによって踏切までに停止できない可能性があるが、「支障検知あり」を受信すると同時に防護パターンを再発生させること

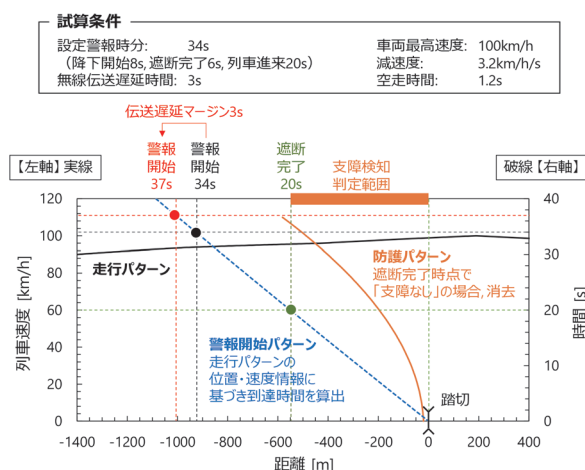


図8 警報制御機能と列車防護機能の概要

で、非常ブレーキを出力する。この防護パターンは、車両のブレーキ減速度や空走時間などを考慮するとともに、遮断完了時点で通常運転に支障しないよう設定警報時間と合わせて設計を行う。

なお、自律型列車制御システムでは、防護パターンによる停止後の運転再開も自動で行う。特に車上および地上に設備した様々なセンサからの情報を組み合わせ、運転再開に支障なしと判断した場合に、防護パターンを消去あるいは徐行パターンを発生させる機能を持たせておくことが重要である。また、大規模な遅延や運休など、一度警報開始した踏切を警報停止して遮断解除する場面も想定されるが、この場面での運転再開については、駅出発時の考え方を適用し、必要に応じて警報時間不足を防止するための出発抑止をかけることで対応する。

4.3 警報時間短縮効果の検証

提案した踏切警報制御方式（以下、走行パターン方式）による警報時間の短縮効果について、現行の固定位置での警報制御方式（以下、現行方式）、ならびに無線式列車制御システムにおける踏切警報制御方式（以下、最大加速方式）と比較を行った。3種類の踏切警報制御方式について、加速、定速（ここでは速度変化が10km/h未満）、減速の3つのケースで警報時間を試算した。ケーススタディとして、駅間の模擬的な走行パターンをSPEEDY（運転曲線作成システム）により作成し、位置および速度情報を約10m毎のデータとして与えた。検証対象の踏切は、1,101m（加速ケース）、3,064m（定速

ケース）、5,200m（減速ケース）の3箇所とし、設定警報時間はいずれも34sとした。また、車両性能は、最高速度100km/h、最大加速度2.0km/h/sとした。車上・踏切間の無線通信による伝送遅延等を考慮し、3sのマージンを設けるとともに、走行パターン方式の算出にあたっては速度検出センサの変動幅として、走行パターンに2km/hを加算した値を採用した。警報時間の算出結果を図9および表1に示す。

現行方式の警報時間は、最高速度で算出されるため走行パターンによって変動するが、警報距離としては一定値（100km/h、34sにおいては945m）となる。最大加速方式においては、低速接近となる加速ケースで短縮効果が得られるが、最高速度付近での接近に対しては、現行方式と比較して伝送遅延等のマージン分だけ警報時間が延長される結果となった。一方、走行パターン方式においては、伝送遅延等のマージン3sならびに速度マージン2km/h（1s程度）が加算されるが、いずれのケースにおいても38sで警報開始となった。

したがって、今回提案するシステムのように事前に走行パターンが得られる場合は、走行パターン方式を採用することで定時間制御の精度向上が実現し、警報時間短縮に大きく寄与できる。

5. まとめ

本稿では、列車運行の自律化に向けて開発した自律型列車制御システムの機能と装置構成を報告した。具体的には、自列車の走行位置や速度に基づいて車上から進路を設定し、転てつ機や踏切などの地上設備を直接制御する機能、車上で適切な走行パターンを生成する機能について、手法の考え方と実現方法を提案し、機能の効果を試算した結果を述べた。

車上に走行パターンの生成機能を持たせることで、緊急停止情報等により駅間で停止後、自律的に遅延回復可能な走行パターンの自動生成が可能となる。また、車上からの進路・転てつ機制御機能により、地上に中央制御装置を設置せずに安全に列車を走行させることが可能となる。さらに、提案した踏切制御手法により、走行パターンに基づく踏切定時間制御、ならびに防護パターンによる停止後の運転再開の自動制御も実現可能となる。

今後は、自律型列車制御システムの機能とハザードに対する走行判断の機能を搭載した車上装置や地上装置を試作して走行試験を行い、列車運行の自律化の実現性や有効性を検証する予定である。

文献

- 1) 川崎邦弘：列車運行の自律化と利便性・効率性の向上、

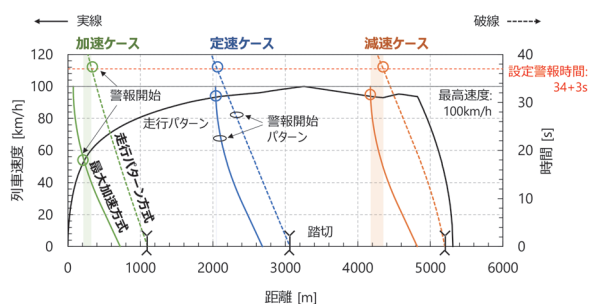


図9 警報時間の算出結果と走行パターン

表1 警報時間の算出結果

試算ケース		走行パターン方式	最大加速方式	現行方式
加速	警報開始地点	778m	880m	945m
	警報時間	38s	45s	50s
定速	警報開始地点	1014m	1024m	945m
	警報時間	38s	38s	35s
減速	警報開始地点	860m	1025m	945m
	警報時間	38s	45s	42s

- RRR, Vol.76, No.1, pp.12-15, 2019
- 2) 曾我俊輔, 杉山陽一, 櫻井勇輝: 車上からの制御を主体とした運行システムにおける自律的な進路制御の安全性検証, 電気学会産業応用部門大会, 2022
 - 3) 木村彰: 時刻一位置パターンを用いた電気車における定時運転制御の提案, 電気学会論文誌 D, Vol.119, No.7, pp.942-949, 1999
 - 4) 大矢純子, 射場智, 中澤弘二: 地下鉄向け自動列車運転システム, 東芝レビュー, Vol.63, No.12, pp.41-45, 2008
 - 5) 武内陽子, 坂口隆, 熊澤一将, 國松武俊, 佐藤圭介: 運転曲線レベルで再現可能な列車運行シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol.28, No.4, pp.41-46, 2014
 - 6) 熊澤一将, 遠山喬, 往古直之, 小野雄人: 追込み時隔を基にした運転パターン作成手法, 令和4年電気学会全国大会, 2022
 - 7) 藤田浩由, 高崎建, 進藤卓朗, 一色竜杜, 曾我俊輔, 北野隆康: 自動・自律運転における踏切制御手法の検討, 令和5年電気学会全国大会, 2023