

列車運行の自律化がめざす鉄道の未来



新井 英樹
Hideki Arai
鉄道総合技術研究所
信号技術研究部長

古関 隆章
Takafumi Koseki
東京大学
工学系研究科
電気系工学専攻
教授

川崎 邦弘
Kunihiro Kawasaki
鉄道総合技術研究所
研究開発推進部
主管研究員

司会：長谷川 均 鉄道総合技術研究所 企画室 次長

はじめに

長谷川 鉄道総研では、2022年度初から機関誌RRRに、基本計画RESEARCH 2025で実施している重点研究課題に関連した話題について、対談形式の「展望」記事を掲載させていただいております。今回は「列車運行の自律化がめざす鉄道の未来」と題しまして、東京大学 教授古関隆章先生と、鉄道総研信号技術研究部の新井英樹部長、研究開発推進部の川崎邦弘主管研究員でご対談いただきます。本日は大変お忙しいなか、古関先生には無理を言ってお時間を取っていただきました。よろしくお願いいたします。

自律化に関する取り組みの経緯

長谷川 お手元に、2000年度以降、鉄道総研で行ってきた[列車運行の自律化](#)[®]に関する研究開発テーマの一覧表があります(表1)。年を追

うごとに関連テーマが増えていっている様子がわかりますが、研究開発の経緯はどのようなものだったのでしょうか。

川崎 「自律化」は自動化を一步進めたもの、と考えておりますが、研究所ではかなり古くから鉄道業務の自動化や自律化に関する研究に取り組んできました。1948年に[サイバネティクス](#)[®]という考え方が提唱されたことが大きなきっかけとなっております、1950年代から国鉄で自

☞ 列車運行の自律化

本対談内では、ドライバーなどに代わってシステムが列車の運転を行うのを「自動運転」、車両が情報などを収集してインテリジェントに運行する広い概念を「列車運行の自律化」と表現しています。

☞ サイバネティクス

米国の数学者 N.Wiener によって提唱された概念で、通信技術とコンピューターによる情報分析・制御技術を、機械と生物の関係も含めて総合的に研究する学問と定義されています。人間社会を支えるインフラとして鉄道がどうあるべきかを考え、そのために ICT をいかに活用するかを研究することは、まさにサイバネティクスそのものといえます。

	基本計画RESEARCH 21 (2000～2004年度)	基本計画RESEARCH 2005 (2005～2009年度)	基本計画RESEARCH 2010 (2010～2014年度)	基本計画RESEARCH 2020 (2015～2019年度)	基本計画RESEARCH 2025 (2020～2024年度)
列車制御	<ul style="list-style-type: none"> ・現行システムと併用可能な車上速度照査式ATSの開発 ・地方交通線列車制御の実用化システムの開発 ・予測制御方式の研究 	<ul style="list-style-type: none"> ・次期車上速度照査式ATSシステムの実用化研究 ・車上速度照査式ATS-Xシステムの開発 ・踏切保安設備の安全性の分析と向上策 ・汎用無線技術による低コストな列車制御システムの開発 ・RAMS指標に基づく信号システム構成法の研究 ・RAMS評価ベースシステム構成法の信号システムへの適用 ・列車制御システムの安全性要件の体系化に関する基礎検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・踏切の信頼性評価法 ・汎用無線技術による閑散線区向け列車制御システムの開発 ・車上運動による列車制御システムの開発 ・高度列車安全制御システムの共通基盤技術の開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・ATS-Dxを活用した自動運転装置 ・クラウド型運動装置向け論理部の開発 ・踏切支障時における無線を用いた列車防護システムの開発 ・地方交通線向け列車制御実用システムの開発 ・地方交通線向け列車制御システムの実用化 ・情報ネットワークを利用した列車制御システムの基本設計 ・情報ネットワークを利用した列車運行の評価 	<ul style="list-style-type: none"> ・クラウド型運動装置の処理手法 ・無線式列車制御に対する汎用通信回線の適用手法 ・公衆回線を活用した列車制御・踏切制御システム ・沿線・車両状態情報に基づく運行リスク評価手法 ・沿線・車両状態情報を統合した運行判断アルゴリズム ・自律型列車制御手法 ・自律型運行制御アルゴリズム
前方監視	<ul style="list-style-type: none"> ・列車前方監視システムの開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・画像処理を用いた障害物検知装置の実用化に関する研究 	<ul style="list-style-type: none"> ・特殊信号発光機認識のための画像処理手法 ・特殊信号発光機の車上型視認性確認システムの開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・画像処理技術を用いた前方障害物検知手法の開発 ・特殊信号発光機の視認性確認システムの実用化 ・複数のセンサーを統合した車載型障害物検知手法 	<ul style="list-style-type: none"> ・画像式線路内異常検知装置の実用化 ・車両側面カメラを用いた安全確認支援装置 ・自動運転に向けた踏切遮断かん折損の検知手法 ・前方監視におけるAIの判断ミスのトレース手法 ・集電系の損傷検知・回避技術の構築 ・線路内・沿線の支障検出技術
通信ネットワーク技術	<ul style="list-style-type: none"> ・列車制御に適した移動体通信システムの研究 	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄道沿線における無線伝送回線のモデル化 	<ul style="list-style-type: none"> ・列車制御システムに適用する通信ネットワークの信頼性・安定性評価手法の開発 ・在来線におけるブロードバンド通信システムの構成 ・無線式列車制御用通信ネットワーク性能評価システムの開発 ・列車無線システムにおける広帯域無線技術の活用 	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄道運行向け情報統合技術の研究 ・鉄道運行向け情報ネットワークインフラ基盤技術の開発 ・新たな周波数帯を活用した対列車通信システム ・鉄道における汎用移動体通信技術の活用 ・ミリ波帯による超大容量対列車通信システム 	<ul style="list-style-type: none"> ・リアルタイム列車間通信技術 ・列車制御システム用ビームフォーミング無線伝送の特性評価
その他	<ul style="list-style-type: none"> ・信号システムの安全性技術の定量的評価の研究 	<ul style="list-style-type: none"> ・パリスを用いた列車検知方式の研究 ・無線測距を用いた列車位置検出の課題と対策検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・車上地点検知のためのICタグ送受信の高速化 ・地点検知デバイスを使用した車上位置認識システムの開発 ・高精度複合型列車位置検出装置の開発 ・高精度複合型位置検知システムの実用化 	<ul style="list-style-type: none"> ・無線式列車制御システム設計のための構成要素評価設定手法 ・車上位置検知における列車長管理手法 ・車上完結型位置検知方式の位置補正手法 	<ul style="list-style-type: none"> ・駆動系情報を用いた異常振動検知手法 ・牽引装置を用いた車両の異常検知手法 ・画像・センシング技術を活用した軌道異常の検知システム ・車上レーザ損傷検知システムの適用性評価
自律運転の利活用					<ul style="list-style-type: none"> ・リアルタイム省エネ運転手法の開発 ・リアルタイムエネルギー協調制御

表1 鉄道総研の列車運行の自律化関連テーマの経緯

動化を進める動きが活発化して、まず、ダイヤ作成の自動化とか、個々の業務の自動化の研究が始まりました。その中ではMARS(列車座席予約システム)が一番大きなプロジェクトでした。自動列車制御や自動運転の研究も昔から行われていて、自動車よりも早く導入されてきています。

長谷川 「自律」という言葉を使い始めたのはいつ頃ですか。

川崎 自律という言葉自体は、鉄道分野では1950年代半ばころから使われていたようです。国鉄分割民営化後、鉄道総研になってから研究テーマで自律のキーワードが登場したのは1992年ころで、自律分散を指向したシステムの構成法と性能評価に関する研究開発や、日本初の無線式列車制御システムとして開発したCARATに自律の考え方を適用したインテリ

ジェント列車制御の研究もありました。2014年ころまでに取り組んだ「知能列車」は、いわば今の自律化に関する研究開発の端緒となるプロジェクトでした。

古関 鉄道は昔から、非接触ICカードなど、ITを取り入れていこうというマインドが強かった印象があります。

海外、とくに欧州ではかなり自動運転の開発が進んでいますね。

川崎 はい、フランス、ドイツのほか韓国などでも、自動運転の先のシステムとして、Autonomous Trainとよばれる自律化の取り組みが進んでいます。研究所では、日本ならではの環境や条件にマッチした自律化をめざすべく、2020年から「自律」という言葉を前面に出したプロジェクトを進めています。

◆ 線路内・沿線の状態、旅客流動、防災・メンテナンス・電力に関するデジタル情報に基づいて、列車が沿線設備を制御しながら自律的に、安全かつ柔軟に運行

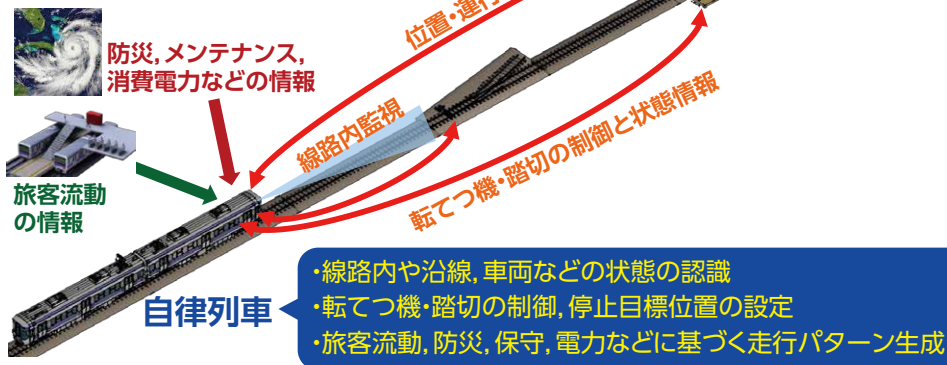


図1 列車運行の自律化とは

自律化の目的

古関 外部から見ていると、「知能列車」という言葉がはじめて出てきたころは、「列車が走りながら、レールのモニタリングをするんだ」みたいな、勢いだったかと思います。

新井 知能列車の構想は、先生のおっしゃるようなものでした。

川崎 現在の自律化の目的は、お客様のニーズに合わせて列車を運転したり、自然災害のダメージを列車自身が判断して安全な範囲で運転するなど、柔軟な運行ができるようにしつつ、ドライバーの減少などに対応することです(図1)。

古関 知能列車というのは列車(車両)の方に焦点が当たっていますよね。なので、鉄道の自律化というと、列車にインテリジェンスをもたせるという方向で進めているんだなと感じていました。

自律化における列車の役割

古関 社会的な背景が変わっても、列車に機能を載せていくというのは、一貫しているのではないのでしょうか。

新井 知能列車もそうでしたが、列車が自分で情報を集めていくという方向性は、現在も踏襲されていると思います。ただ、現在進めている自律化では、その情報を運行に取り入れていくという点が従来とは、大きく違うところだと思っています。列車に情報を持たせる、また乗務員もなくなることができれば、短編成の列車が増発でき、お客さまサービスの向上になります。

古関 自動運転レベルでいうと**第四レベル (GoA4 自動運転)**までいかないと、柔軟な列車増発というところまではいかないのではないかと思います。実現すれば大きなサービス向上になりますね。

新井 運行に係る人手をなるべくなくしたいというのが根底にあります。列車にインテリジェンスを持たせて、スーパーバイザー(中央運行管理装置)も自動化し、それをつなぐ通信網も公衆回線を使えば、大幅なコストダウンになります。

古関 最終的な目標は、そのようなところにあるのでしょうか、GoA4は、なかなか難しいのではないのでしょうか。

新井 踏切のないような専用軌道では、すでに、

GoA (Grade of Automation 自動化レベル)

自動化レベル	JISによる定義	乗務形態のイメージ ([]内は係員の主な作業)	国内の導入状況
GoA0	目視運転	運転士(および車掌)	路面電車
GoA1	非自動運転		踏切道があるなどの一般的な路線
GoA2	半自動運転	運転士[列車起動, 緊急停止操作, 避難誘導など]	一部の地下鉄など
(GoA2.5)	(緊急停止操作などを行う係員付き自動運転) ⇒ JISには定義されていない	列車の前頭に乗務する係員[緊急停止操作, 避難誘導など]	なし
GoA3	添乗員付き自動運転	列車に乗務する係員[避難誘導など]	一部のモノレール
GoA4	自動運転	係員の乗務なし	一部の新交通など

国土交通省「鉄道における自動運転技術検討会のとりまとめ(概要)」, 令和4年9月13日, 鉄道における自動運転技術検討会より作成

GoA3(添乗員付き自動運転)やGoA4で運行するための基本となる個々の技術レベルは完成の域に達していると思っています。ただし、踏切のあるところでの自動運転は、世界中どこも実現していません。踏切のあるところでも、自動運転できるような技術、お客様の安全を確保できる技術を開発しています(図2)。

自律化のメリット

長谷川 鉄道を運営する側からみた自律化のメリットは何でしょうか。

新井 これまで列車の位置情報などは、通信インフラ含めて、鉄道事業者が専用で、自前でシステムを設置して維持しています。通信事業者がもつインフラを、安全とセキュリティは確保したうえで使っていければ、鉄道事業者が抱えるインフラは確実に減りますので、コストダウンにつながります。

古関 自律化において、列車位置検知はとても重要な技術かと思いますが。

新井 列車が自分のいる位置を正確にわかるというのは、重要でコアとなる技術です。自律化の課題とは関係なく、研究を進めていく必要があると思っています。

古関 将来的には、地上子(地上にマーカー)がなくても位置検知できるようにするというのでしょうか。

新井 地上子はあるに越したことはないですが、一方で、コストダウンのためには、数を減らしたいです。絶対に1つも地上子がないという状況は、いろいろな意味で難しいと思いますが、線区の特徴によってどこまで減らせるか検討していく必要があると思っています。

路線の状況に合わせた研究開発

古関 鉄道での自律化は地上がしっかりしていることが大前提だと思います。その上で機能を車両に少し持ってくるといったイメージ



かと思っています。都市鉄道と地域鉄道、新幹線と閑散線区では、考え方が違いますので、それぞれの路線状況に合わせて考える必要があるかと思っています。

新井 おっしゃるとおり、自律化は、路線状況に分けて考える必要があると思います。

古関 鉄道の電力システムが同じような考え方だったのではないのでしょうか。都市部は直流電化して変電所をたくさん置いて電車を頻繁に走らせる、地方は交流電化で変電所間隔を開けて、電車を走らせる、さらに閑散な地域だと車両にエネルギーを持った気動車が走るといった考え方です。情報やデータも同じようなことなのかなと感じました。

新井 地域鉄道では、本当にレールがあるだけ、車両の機能の比重を大きくして、地上設備に依らない気動車タイプですね。都市部では、スーパーバイザーがあって、綿密に連携して、お客様の利便性向上だけでなく省エネを推進していく、直流電化タイプですね。大変参考になります。

列車運行の自律化と脱炭素化

長谷川 鉄道システムが将来にわたって解決しなければならない課題といわれている、脱炭素化については、列車運行の自律化がどのように寄与するのでしょうか。とくに、省エネルギーや脱炭素化については、地球規模で対応を迫られています。

新井 自動運転は、省エネ運転と親和性が高いと思います。人間が運転するより、省エネ運転をやりやすいと思いますし、増発減便も柔軟にでき、エネルギーのロスが減ります。また、ダイヤ全体を見て、ブレーキ時に発生する回生電力を有効に活用するといった、エネルギーリサイクルも今よりも効率よくできると思います。

古関 地域鉄道での省エネについて、架線レスバッテリー車やハイブリッド車など、動力源をどのようにするかといった、ハード面の検討はかなりされてきていると思います。

一方で、都市鉄道では、ソフト面である運転の仕方で省エネ効果が大きく変わると思います。ハード面の省エネ化という意味では、列車の個別のインバーターもモーターも、ぎりぎりまで効率を上げてきていますので、そろそろ限界なのではないでしょうか。

長谷川 確かに、列車のモーターやインバーターの効率は90%を超えていて、すでに改良の余地がほとんどないとも言われています。

古関 そういう状況なので、省エネ運転が重要になると思います。少し専門的になりますが、電力（パワー）と電力量（エネルギー）は次元が違います。電力量を下げると、電力が上がってしまいます。電力をどのように融通するのか、難しい問題です。電力を抑えつつさらに、電力量を減らした省エネ運転するには、上部からスーパーバイズするようなシステムが必要かと思えます。

新井 線区全体の省エネ運行を求めるとなると、スーパーバイザーが必要になると思います。現在、そのようなシステムを実現すべく取り組んでいます。

古関 もう一つは車両で蓄電するような手法が必要です。車上に載った蓄電装置を使って、システム全体の電力

ピークをカットしたり、デマンドレスポンスに対応したりすることが脱炭素化に貢献すると思います。そこでも、地上設備と車両のバランスを取りに行くスーパーバイザーが必要になってきますね。

長谷川 電力会社でも電気自動車などを系統につないで蓄電装置として使うような構想がありますが、需要予測が難しいようです。

古関 そのような面からも、鉄道は計画的に運用しているので、自律化で一層の省エネ効果が期待できますね。

お客様目線の自律化

古関 自動運転は安全を高めるといったことをときどき耳にしますが、実際は、今の日本の鉄道は十分安全であって、安全レベルを落とさずに、いかに省力化するというところを、鉄道事業者は求めているのではないのでしょうか。省人化、省力化、省設備、省エネというすべて、事業者の目線から見たメリットと思えます。

お客様、鉄道を使う人から見たメリットはないのでしょうか。イベントのときの増発が簡単にできて、お客様の利便性が上がるとか、そのような感じのメリットです。例えば電車をよく使う学生さんに、いくら省力化が進むといっても、「自分には関係ない」と言われてしまうのではないのでしょうか。

新井 お客様にとっては、自律化による柔軟な運用によって、利便性が上がるのがメリットだと思います。また、鉄道事業者の抱える専用通信設備などが少なくなっていけば、結果的に、運行コストが下がるため、必要以上に運賃が上がらないことにつながるのではないのでしょうか（図3）。



川崎 先生がおっしゃるとおり、お客様目線でのメリットをきちんと考えて示していくことが大事だと思います。自律化によって、災害時に復旧が早かったり、被災地を回避した柔軟な運行ができるといったことも、お客様へのメリットの一つだと思います。もちろん、安全性向上のため努力はするという前提ですが。

古関 ぜひ、お客様目線のメリットも前面に出して行ってください。

鉄道の未来、人に対しては人

古関 少し話がはずれるかもしれませんが、SF(サイエンスフィクション)プロトタイプという話を某大学の先生がしていました。将来構想を議論するときに、SFを実現するにはどうするかというところから入るとのことです。「自動運転で車両に情報を集めて」という構想は、SFっぽい感じがします。

長谷川 SFには、人間の素直な欲望が表現されているように思います。導入に使うという考え方もあるでしょう。

川崎 SFのお話といえば、発表会などで列車運行の自律化のご紹介をすると、「きかんしゃトーマスを作るのですか」と聞かれることがあります。「いいえ、我々がめざしているのは、ダイヤや管理局の指示にきちんと従いつつも、現場の状況に応じて自律的に運行されている銀河鉄道999の方です」と答えています。

古関 実は、銀河鉄道999は、無人ではないのですよね。結構頼りになる車掌さんが乗っていて、そういう意味で言うと、ドライバーレスなんです。列車は自動で動いているが、車掌さんがお客様を介助してくれます。先ほどお話に出た、お客様目線という意味で一つのポイントだと思います。

川崎 はい、おっしゃるとおりだと思います。今後、少子化で鉄道に携われる人が限られてきます。列車を運転するのはシステムで、お客様に



図3 ローカル5Gによる通信実験の様子

サービスしたり、万が一のトラブル時や車内安全の確保は人間が対応するというのが、お客様から見たサービス向上になるのではないのでしょうか。

古関 鉄道を運営する側の人が減るので、機械ができることは機械にやらせて、お客様には人間が対応するというのが、未来の鉄道の理想ではないのでしょうか。

例えば地域鉄道で自律運転をするとき、ドライバーはいなくても車掌さんには乗っていてほしいですね。

川崎 人間に対しては人間が対応するのが一番のサービスでは、との思いはあります。

古関先生のご指導ご助言を大いに参考にさせていただき、列車運行の自律化を進め、持続可能な未来の鉄道の実現をめざしていきたいと思います。



長谷川 まだまだ、お話が尽きませんが、皆様お忙しいところ時間を割いていただいておりますので、このあたりで終了したいと存じます。本日はお忙しいところ、列車運行の自律化がめざす鉄道の未来について、さまざまな角度からご議論いただき、ありがとうございました。