

脱炭素化社会におけるスマートな列車の運行制御

信号・情報技術研究部長
川崎 邦弘



1. はじめに

脱炭素化を目指す社会において、鉄道が安全で便利なモビリティサービスを提供する基盤インフラとして存在し、鉄道へのモーダルシフトを誘起するためには、列車運行に係る消費エネルギーを削減しつつ、さらに利便性を高めるための技術の確立が必要である。本講演では、リアルタイム省エネ運転や省エネダイヤ作成手法と、デジタル技術を活用した列車運行制御の高度化・自動化に関する研究開発状況を紹介し、省エネルギーでスムーズなモビリティサービスの実現に向けた今後の課題と研究開発の方向について述べる。

2. 列車運行の省エネ化と利便性向上

鉄道の最大の特徴は、多くのお客さま・貨物が、安全に、予定した時刻通りに目的地まで移動できることであり、エネルギー効率の高い移動モードである。脱炭素化社会の実現に向けては、鉄道へのモーダルシフトによるCO₂排出量の削減が期待されている一方で、自動車や航空など他の交通モードにおけるCO₂削減に向けた技術開発も急速に進んでいる。将来の脱炭素化社会においても鉄道がモビリティサービスの中心に存在しつづけるためには、列車運行に係るCO₂排出量をさらに減らしながら、利便性をより高めることができる技術の確立が必要と考えている。

列車運行に係るCO₂排出量のさらなる削減に向けては、き電システムと車両システムにおけるハード面での省エネルギー化に加え、運転方法の工夫、すなわちソフト面でも省エネルギー化を図ることが重要である。また、鉄道がより便利な移動モードとして発展していくためには、車両や駅などのハード面の改善と、ダイヤの設定と運行管理・旅客への情報提供サービスなどの

ソフト面の充実が求められる。なかでも、ダイヤの設定と運行管理は、車両・線路・駅・乗務員などのリソースを効率よく運用して便利なモビリティサービスを提供するためのベースとなる重要な技術のひとつである。鉄道利用者のニーズの変化をきめ細やかに把握することはもちろん、車両や地上設備の条件や沿線地域の特性、相互直通や接続、そしてエネルギー消費量など様々な要素を考慮しながらダイヤを設定する必要がある。列車の運行中も、常に運行状況とエネルギー消費量を把握し、遅れが生じた場合は、エネルギー消費も考慮しながら速やかに遅延を回復することが求められる。

すなわち、脱炭素化社会においては、鉄道自身のCO₂排出量削減につながる省エネルギーな列車の運行と、モーダルシフトの促進につながる利便性の高い列車の運行とを同時に実現できる技術が必要となる。鉄道総研としては、鉄道利用者のニーズや他の交通モードの状況、そしてエネルギーの消費状況など、複数の情報に基づいて、安全で利便性の高い列車の運行を、少ないエネルギーと設備で実現できる“スマートな”列車の運行制御技術の確立を目指すことで、脱炭素化に寄与したいと考えている。

以降、利便性を考慮した省エネ運転の手法に関する研究開発状況を3章で紹介したのち、省エネ運転を含む高度な列車運行制御の実現に向けた取り組みを4章で紹介する。

3. 列車運行のさらなる省エネ化

3.1 省エネ運転の実現に向けた課題とアプローチ

列車運行の省エネ化においては、個々の列車の走り方を工夫して消費エネルギーを削減しつつ、線区全体で列車の動きを調整することで、トータルの消費エネ

ルギーを効果的に削減することができる。単純に省エネ化だけを狙うのであれば、列車本数を減らす、あるいは走行時分を長くする、などの方法が考えられるが、いずれも利便性を下げる方向の施策となり、モーダルシフトにつながる魅力的なモビリティサービスを提供できなくなってしまう。

省エネ運転に関しては幾つかの方法が提案されており、鉄道事業者においても様々な取り組みが行われている。鉄道利用者の視点から見た利便性が損なわれることがないように省エネ運転を行うためには、複数の条件・要因を同時に考慮する必要があるため、その実現は容易なことではない。鉄道総研では、利便性を損なう要因の一つである遅延に着目し、遅延量の予測手法や早期回復手法、遅延しにくいダイヤの設定手法などの研究開発に取り組むと同時に、これらを考慮しながら省エネ運転を実現するための研究開発も進めている。前基本計画RESEARCH 2020では、計画ダイヤ通りの列車運行を前提とすることで速達性・定時性を維持し、線区全体で列車の動きを調整して運転に係る消費エネルギーを削減できる運転曲線設定法を開発した。現基本計画RESEARCH 2025では、その成果を発展させ、遅延発生時にリアルタイムで走行時分を設定することで運転整理時の列車運行エネルギーを削減する手法の開発に取り組んでいる。また、計画ダイヤを省エネになるように自動修正する技術の開発にも取り組んでいる。

以降の各節では、省エネ効果を予測・評価するために開発した列車運行電力シミュレータを紹介したのち、省エネ運転手法に関する研究開発の事例を紹介する。

3.2 列車運行電力シミュレータ

消費エネルギー削減の観点から、地上設備や車両における様々な省エネ施策が検討されているが、それらの効果を予測・評価するためには、消費電力を精度よく計算できるシミュレータが必要となる。従前から、複数車両と複数変電所間での電流・電圧の相互作用を詳細に計算し、電圧の変化による加速の変化を運転曲線に反映させる列車運行電力シミュレータを開発してきたが¹⁾、このシミュレータに、営業時の平均的な運転操縦を再現する運転曲線作成機能²⁾を組み込み、さらに、複数線区、さまざまな車両形式など、営業路線を想定した実用規模の計算に対応可能とした(図1)³⁾。また、消費エネルギーの計算結果に大きな影響を与える補機電力、走行抵抗、ブレーキ扱い等のパラメータについて、従来は定格値・規格値等を使用していたが、車両情報記録装置による車両大規模データを活用して実態に近い値を設定することも可能としている。ある営業路線を対象として営業時間帯での消費電力量測定結果と本シミュレータによる推定計算結果を比較したところ、5%以内の精度で実際の傾向を再現できることを確認した。

このシミュレータは、鉄道事業者における運転方法の変更や電力貯蔵装置・新型車両の導入など省エネ施策の効果の予測・評価に利用されているが、鉄道総研における省エネルギーに関する研究開発に欠かせないツールとしても活用しており、現在も改良を続けている。なお、本シミュレータでは旅客流動や乗車率も考慮しているので、モーダルシフトによる効果の試算にも活用できるのではないかと考えている。

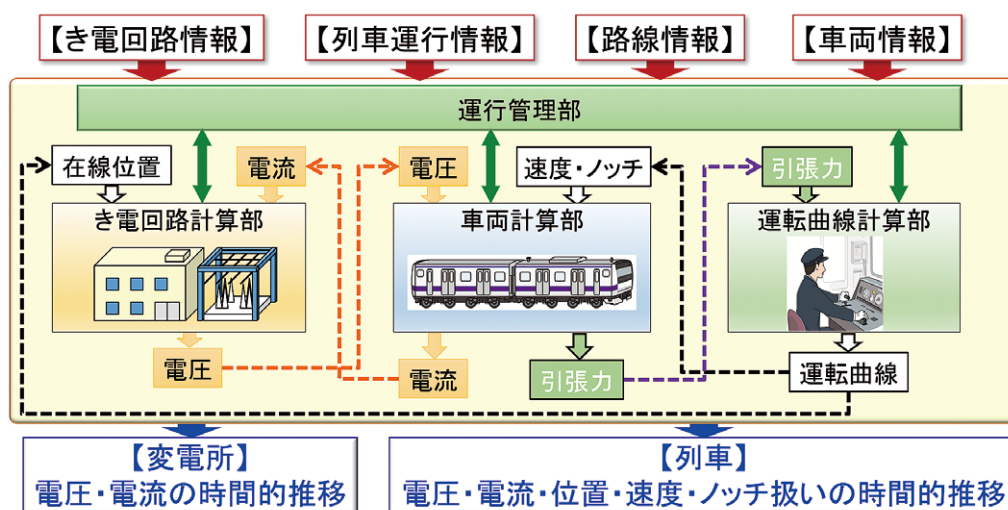


図1 列車運行電力シミュレータ

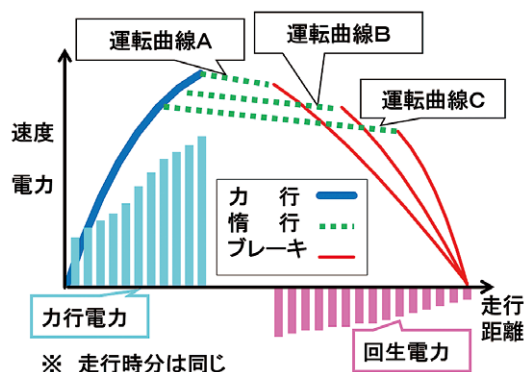


図2 利便性を考慮した省エネ運転曲線の設定

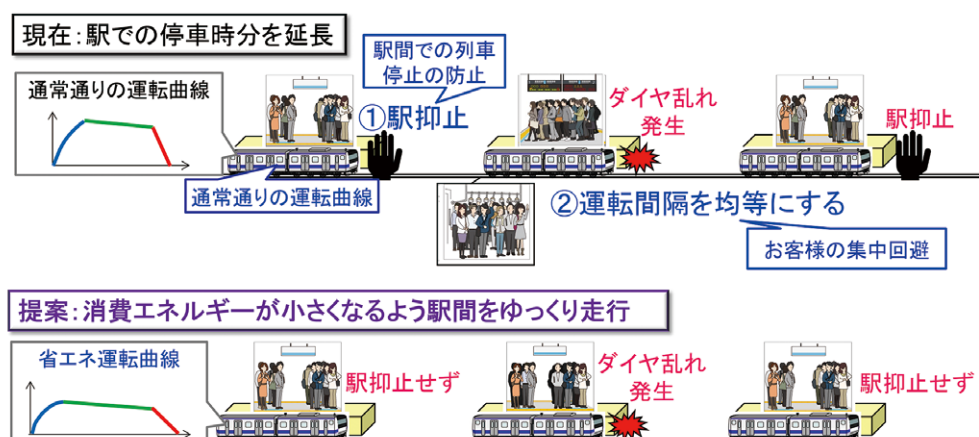


図3 遅延発生時のリアルタイム省エネ運転

3.3 省エネと利便性を考慮した運転曲線の設定手法

省エネ運転を実現する最もシンプルな方法は、力行の電力を減らすために、速やかに加速して加速時間を短くし、惰行を多く使うことである。しかし、加速時間が短くなるような運転を単純に実行すると、概して走行時分が延び、速達性や定時性を損なうことになる。また、回生ブレーキを使用したときに発生する回生電力の絞り込みをできるだけ少なくすることも重要であるが、回生電力の絞り込み状況は、他の列車負荷に依存する。そこで、ダイヤを守ったうえで力行電力量を極力少なくするとともに、回生電力の絞り込みをなるべく少なくなるよう、他の列車の運転操縦の状況と電力を考慮して運転曲線を設定するアルゴリズムを開発した⁴⁾。具体的には、各列車の各停車駅間ごとに、図2に示すようなダイヤを守る複数の運転曲線をあらかじめ用意しておき、駅出発時点での他列車の運転状況と力行電力と回生電力から、最も省エネとなる運転曲線を選択して次駅までの力行とブレーキを制御する。

3.2節で述べた列車運行電力シミュレータにより、実路線規模でのケーススタディを行って効果を試算したところ、7.7%の省エネ効果が得られることを確認した。

3.4 リアルタイム省エネ運転

ダイヤが乱れた際の運転整理法の一つとして、特定の列車にお客さまが集中したり、駅の手前で列車が長時間停車してしまうことを防ぐため、列車をあえて遅らせることにより、列車の運転間隔を均等にする方法がある。現在は、駅での停車時間を延ばすことで運転間隔を調整しているが、停車時間を延ばす代わりに速度を落として駅間を走行するように運転曲線を変更することができれば、運転整理と消費エネルギーの低減を同時に行うことが可能となる。

そこで、列車の運行状況に応じて、利便性を考慮しながら省エネルギーとなるように走行時分を調整して運転整理ダイヤを修正し、修正したダイヤに合わせた運転曲線を生成する手法を提案した(図3)。始点から終点までの所要時間は同じとし、従来手法では力行速度

が高くなる駅間での走行時分を延ばすことで、速度が低くなるように制御を行う。ある実路線を想定して7列車が50駅間を走行するシミュレーションを行い、遅延が発生した場合に提案した手法によって得られる省エネ効果を試算した結果、1列車あたりの平均で約10～20%、変電所全体（＝線区全体）では0.9～1.9%の消費エネルギー削減効果が得られることを確認した⁵⁾。

3.5 利便性を考慮した省エネダイヤ

前節で述べたリアルタイム省エネ運転は、遅延が生じたことを前提として、次駅までの消費エネルギーが低くなるように運転曲線を求める手法である。これに対し、省エネダイヤでは、拠点となるような駅間での所要時間は変えずに、線区全体でのトータルの消費エネルギーが減るように各列車の発着時刻や各駅間ごとの運転曲線を調整してダイヤを生成する。

一般的に、列車ダイヤ作成においては、利便性と省エネ性はトレードオフの関係にある。列車走行のための運転曲線を作成する際に省エネ性を考慮することはあるが、ダイヤを作成する際には省エネ性は考慮されてこなかった。そこで、利便性を維持しつつ、省エネ性を向上させるダイヤの作成手法の開発に取り組んでいる。

省エネダイヤを生成する手法としては、二つの方法が提案されている。一つは、各列車の発着時刻を調整して力行と回生のタイミングを一致させることで、回生電力の融通量を増やす方法である。もう一つは、各駅間ごとの走行時分を調整することで線区全体での消費エネルギーを削減する方法である⁶⁾⁷⁾。駅間の走行エネルギーは線形や最高速度などの条件によって異なり、走行時分を延ばして省エネ運転をした場合のエネルギーの削減効果も異なる。そこで、省エネ効果の高い区間では走行時分を延ばして消費エネルギーの削減

を図る一方で、省エネ効果の低い区間では走行時分を縮めることで、トータルでの走行時分は同じのままとする。このような調整により、速達性・定時性を維持したまま、省エネ運転が可能なダイヤを生成する。

鉄道総研では、この二つの手法を組み合わせることで、利便性を損なうことなく、さらに高い省エネ効果が得られるダイヤの生成法の確立を目指している（図4）。

4. 利便性向上のための運行制御の高度化

4.1 詳細な列車位置・速度に基づく運行制御

現在、ダイヤの作成や運行管理では、駅ごと、もしくは閉そく区間単位で列車の位置を管理しているが、より多くの詳細な情報を効率よく活用できるようになれば、さらに利便性の高い運行の実現が期待できる。

近年、無線通信技術とデータベース技術を活用することにより、列車の位置や速度等の情報を細かく把握しながら列車を安全に制御する無線式列車制御システムが実用化されている。無線式列車制御システムの導入のメリットは、地上設備の削減や柔軟な列車間隔の設定が可能なことである。さらに、現在の運行管理システムでは用いられていない詳細な列車位置や速度の情報を、運行管理にも活用することで、従来はできなかった柔軟できめ細かい運行制御の実現も可能となる。

例えば、都市部などで先行列車に遅延が生じたとき、現在の運行管理では、固定された閉そく区間単位で列車の位置と速度を制御しているため、後続の列車が駅の手前で一旦停止する場合が生じる。ここで、列車の位置を詳細に把握し、速度も細かく制御できれば、先行列車が遅れた際に、駅に向かう後続列車を停止させずに走行させることができ、運転時隔を短く、また遅延の伝搬も抑

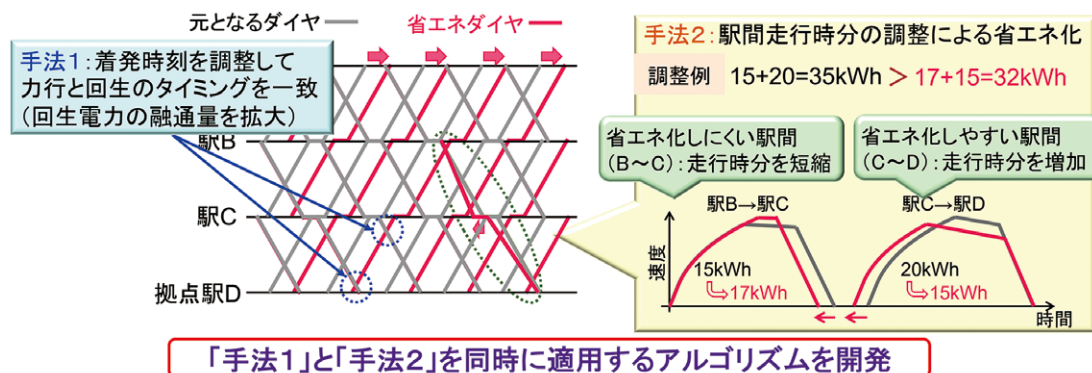


図4 利便性を考慮した省エネダイヤ

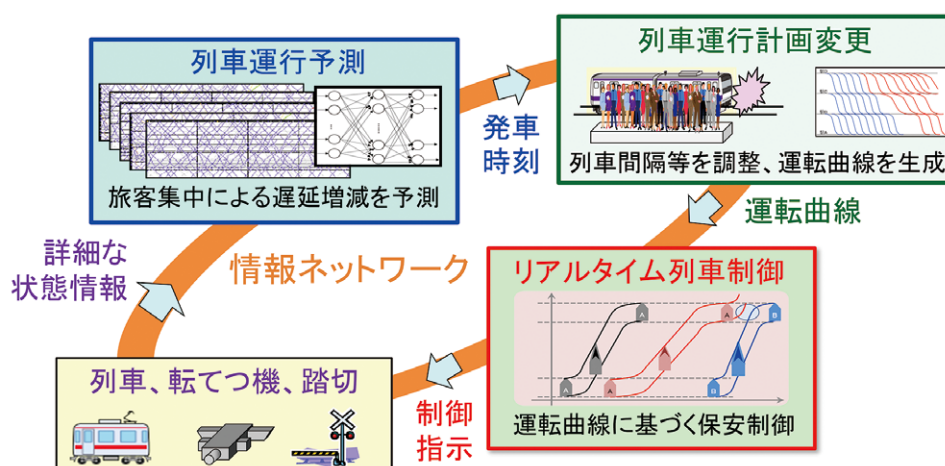


図5 リアルタイム情報による列車運行制御

運行管理と保安制御を融合した運行制御システム

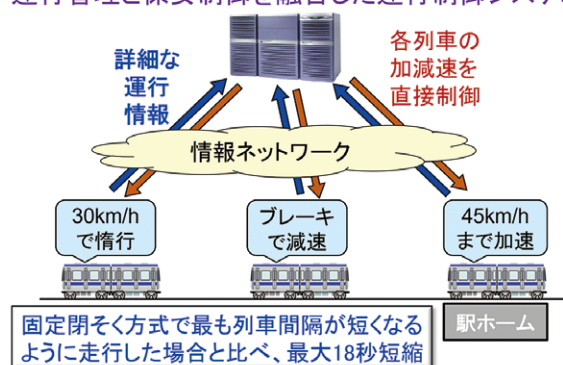


図6 詳細な運行情報に基づく運行管理と保安制御

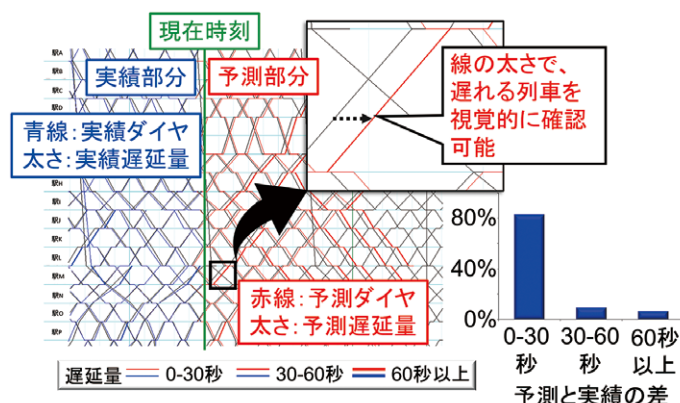


図7 AIによる列車遅延予測

制することが可能となる。旅客の集中や列車の遅延といった状況に応じて列車の着発時刻や列車同士の間隔を柔軟に制御できれば、ダイヤ乱れを早期に回復することができ、利便性を向上することができる。

4.2 情報ネットワークを活用した列車運行制御

前節で述べたような運行制御を実現するため、前基本計画RESEARCH 2020において、現在は別々のシステムとして稼働している運行管理システムと信号保安システムの機能を情報ネットワークにより融合することで、運行に係わる情報に基づいて運行状況を予測し、運転曲線をリアルタイムに再計算して個々の列車や進路を制御するシステムを提案した(図5)⁸⁾。

図5中のリアルタイム列車制御では、横軸を時刻、縦軸を詳細な列車位置とする「制御マップ」を用いて、列車が在線する位置と時刻をマップ上に「オビ」とし

て表現することにより、列車の運行管理と保安制御を同時に行う。このアルゴリズムにより、安全な制御ができ、かつ運転間隔の短縮など利便性向上の効果があつことをシミュレーションで確認した(図6)⁹⁾。

また図5中の列車運行予測については、AIの一種であるニューラルネットワークを活用し、列車の遅延と乗車率のデータをリアルタイムに取得して数十分先までの遅延、乗車率を予測する手法を開発した¹⁰⁾。本手法により、前日までの遅延、乗車率データによる事前学習を行った上で、当日、現在時刻までの直近数駅の遅延、乗車率データを入力することで、各列車の数十分先までの遅延、乗車率の複雑な推移を予測可能とした。突発的なトラブル発生時を除き、30秒以上遅延がある列車のみを対象とした場合、全予測データの約80%が、誤差30秒以内となることを確認している(図7)。なお、この遅延予測手法については、独立し

た技術として、指令員に対して数十分先までの遅延と乗車率の変化を予測・表示するなど、指令業務の支援技術としても活用が可能である。

図5中の列車運行計画変更では、列車運行の予測結果と、旅客の流動データに基づいて、計画ダイヤを修正するとともに、各列車に対する運転操作の指示、すなわち運転曲線を生成し、リアルタイム列車制御に制御指示を出す。RESEARCH 2020の段階では、列車の遅延状況と旅客流動のみに基づいて運転曲線を生成していた。この運転曲線を生成する際に、3章で述べた省エネ運転のアルゴリズムを反映することにより、利便性と省エネを同時に考慮できる運行制御が実現可能となる。ただし、このように生成された運行制御指示は、タイミングや操作量が非常に細くなるため、手動による操作が極めて困難となる。制御のタイミングと操作量を粗くすることにより、手動運転に適用させる方法も考えられるが、省エネ効果は限られてしまう可能性が高いであろう。運転操縦の工夫による省エネ効果を最大のものとするには、力行・ブレーキの操作を自動で行う自動運転の技術との併用が有効と考える。

4.3 高度な運行制御を省設備で実現する自律化

前節で述べたシステムは、列車位置を把握して制御する中央装置を地上に配置し、無線通信によって列車に制御指示を与える構成となっている。このような地上集中型の制御システムでは、中央の制御装置が運行に係る詳細な情報を収集して処理を行うため、膨大な

量の情報を高速で伝送・処理する必要があり、システムの規模が大きく、また複雑になることが懸念される。また、中央の制御装置が故障した際はシステム全体が停止するなど影響範囲が広く、自然災害等による被災時の復旧に時間・コストがかかることも懸念される。

そこで、現基本計画RESEARCH 2025では、前節で述べた列車運行制御システムを発展させ、運行に必要な情報を列車に集めて列車が自律的に判断しながら安全かつ柔軟な運行を行う自律型列車運行制御システムの開発に取り組んでいる(図8)¹¹⁾。列車を自律化できれば、現場の詳細なデータを活用して安全・適切な判断を迅速に行うことができ、高度な自動運転をシンプルなシステム構成で実現できると考えている。

自律型列車運行制御システムでは、前節で述べたシステムで融合した運行制御機能のうち、保安制御の機能と個々の列車周辺のローカルな範囲の運行判断を担う管理機能を車上に搭載し、地上には線区全体や他線区の状況など大域的な運行管理機能をスーパーバイザーとして置く構成としている。個々の列車には自列車専用のミニ指令があり、地上には全体を見渡して各列車の判断をサポートするアドバイザーが置かれるイメージである。スーパーバイザーは、広域の旅客流動や防災情報、省エネ運転や遅延回復がどの程度必要かなど、個々の列車の判断に必要な支援情報を提供できるよう、前節で紹介した遅延予測手法の技術、また国鉄時代から培ってきた運転時分計算技術や各種の運行シミュレーション技術をベースに、その機能を実現し

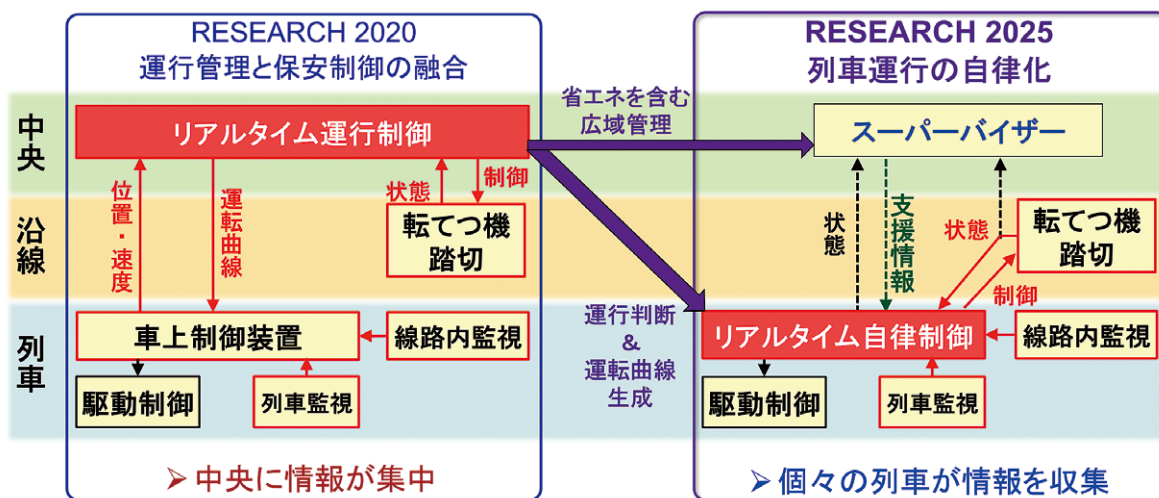


図8 自律型列車制御への展開

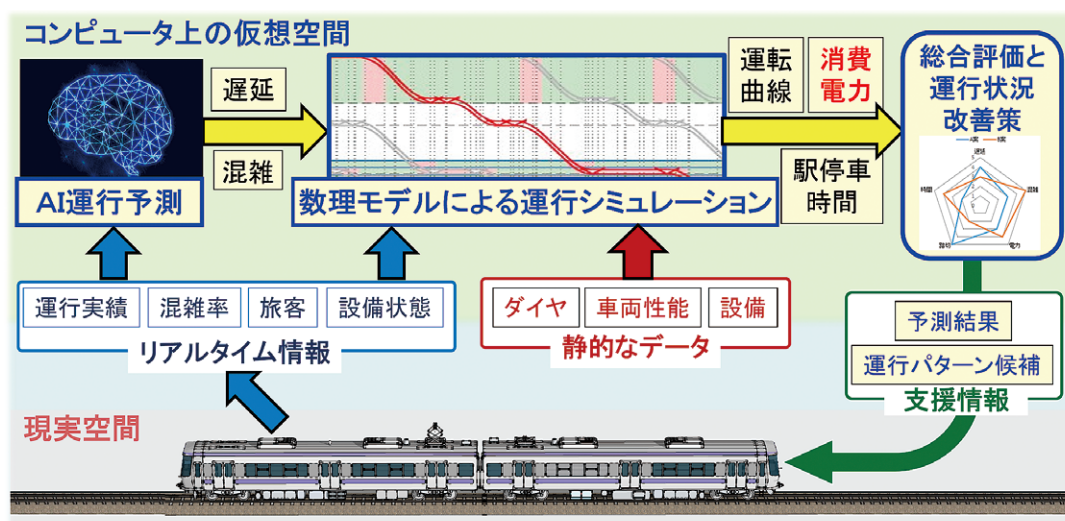


図9 スーパーバイザーの機能構成

ていく計画である（図9）。さらに、2025年度以降、3章で述べた速達性・定時性を損なうことなく省エネ運転を実現するためのアルゴリズムを、スーパーバイザーの機能として組み込むことを考えている。

4.4 高度な運行制御を支える通信基盤の整備と課題

高度な運行制御によって省エネと利便性の双方を考慮した列車運行を実現するためには、き電システムの状態や車両の運転状態など、鉄道システム全体の動作状態をデジタルデータとして伝送・共有できる情報基盤が必要となる。

これまで鉄道では、制御など安全に係る情報の伝送には自営の回線を構築して利用してきた。しかし、大量の情報を扱える周波数資源は割り当てられておらず、また大容量の情報ネットワークを自営で構築・運用できたとしても、コストが膨大となる。この課題を解決するためのアプローチの一つとして、第五世代移动通信システム（5G）の活用が考えられる。

5Gは、従来の4Gに対して超大容量の伝送が可能だけでなく、超低遅延の伝送や、多数同時接続が可能である。現在、鉄道事業者と通信事業者が連携し、超大容量の伝送を活かした新しいサービスの実証実験が進められている。しかし、列車の制御など安全に関わる用途への適用に関しては、伝送性能が定量的に把握できていない。そこで、鉄道総研では、ローカル5Gシステムを所内試験線に構築し、列車制御や設備状態の監視など、列車の安全・安定運行に係る用途に適用

するための伝送特性（特に伝送遅延）の評価と、具体的な活用法に関するガイドライン案の作成に取り組んでいる¹²⁾。

なお、AI・5Gなど最新のデジタル技術を活用する際には、高速のプロセッサや無線端末を多数利用することになる。脱炭素化の観点からは、それらが消費するエネルギー量も導入時に考慮する必要がある。上述した列車の運行業務における5G活用に関するガイドライン案には、利用する端末の消費電力も考慮・検討すべき要件として挙げることを考えている。

5. おわりに

本講演では、脱炭素化社会におけるスマートな列車の運行制御の実現に向けた取り組みを紹介させて頂いた。今回の講演会で紹介した電力、車両、運行制御の三つの分野の技術を組み合わせることによって、省エネルギーでありながら、安全・安心な輸送サービスを提供できるシステムを実現することが期待できる。

しかし、これを実現するためには、ときに相反・競合する条件や要求を同時に考慮でき、かつリアルタイムで処理できる技術の確立が必要であり、解決すべき課題は多く、難易度も高いと考えている。

脱炭素化社会の実現に向けて、鉄道がモビリティインフラの基盤として存在しつづけていけるよう、国内外の鉄道事業者や先端技術を有する研究機関・大学・メーカーと連携させて頂きながら、研究開発に鋭意取り組んでいきたい。

なお、本稿の一部には、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した研究開発、および日立製作所との共同研究で実施した研究開発が含まれている。

参考文献

- 1) 武内陽子, 小川知行, 森本大観, 今村洋一, 美濃部晋吾, 杉本祥一: 列車運行電力シミュレータの開発, 鉄道総研報告, Vol.30, No.8, pp.5-10, 2016
- 2) 小川知行, 佐藤圭介, 今村洋一, 美濃部晋吾, 川村淳也, 影山真佐富, 島田直人: 鉄道車両走行シミュレータのエネルギー評価用運転曲線の開発, 電気学会論文誌D, 電気学会, Vol.135, No.5, pp.563-570, 2015
- 3) 小川知行, 武内陽子, 森本大観, 影山真佐富, 美濃部晋吾: 列車運行電力シミュレータによる消費エネルギー予測手法, 電気学会論文誌D, 電気学会, Vol.141, No.5, pp.374-387, 2021
- 4) 武内陽子, 田口東, 小川知行, 森本大観: き電回路の簡易模擬とブレーキパターン選択による列車運行エネルギーの最小化, 自動車/交通・電気鉄道合同研究会, 電気学会, VT-20-077/TER-20-073, 2020
- 5) 国崎愛子, 武内陽子, 小久保達也, 田中峻一, 小川知行, 生出珠之助, 明石太輔: 力行電力量変化量に基づいた走行時分変更による省エネ運転整理ダイヤ作成, 交通・電気鉄道/マイクロマシン・センサシステム合同研究会, 電気学会, TER-21-031/MSS-21-024, 2021
- 6) 宮武昌史: 省エネルギーな列車ダイヤ作成のための簡易数値モデル, 電気学会論文誌D, 電気学会, Vol.131, No.6, pp.860-861, 2011
- 7) 明石太輔, 仲野淳, 佐藤拓哉, 宮武昌史, 渡邊翔一郎, 武内陽子, 小川知行: モデル線区での省エネルギー列車ダイヤの作成と列車運行電力シミュレータでの評価, 令和2年電気学会全国大会, 電気学会, 5-205, 2020
- 8) 杉山陽一, 岩田浩司, 山本春生: 運行管理と保安制御を融合した列車運行制御システムの基礎検討, 鉄道総研報告, Vol.32, No.5, pp.35-40, 2018
- 9) 杉山陽一, 山本春生, 岩田浩司: 移動閉そくにおける無線伝送断を考慮した運転時隔の推定, 信頼性研究会, 電子情報通信学会, R2017-58, 2017
- 10) 辰井大祐, 中挾晃介, 國松武俊: ニューラルネットワークによる列車運行予測手法, 鉄道総研報告, Vol.31, No.10, pp.29-34, 2017
- 11) 川崎邦弘: 「列車運行の自律化」, 第32回 鉄道総研講演会 講演要旨集, pp.33-38, 2020
- 12) 中村一城, 北野隆康, 川崎邦弘, 近江泰志, 藤嶋堅三郎, 奥村太一: 鉄道における5Gの活用に向けた検討, 第58回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, No.802, 2021