

# 持続可能な公共交通の実現に向けた自動運転の取り組み

知平雅仁\*  
Masahito Chihira  
十鳥基伸†  
Motonobu Jutori  
岸下整明‡  
Nariaki Kishishita

津田琢士§  
Takuji Tsuda  
住谷泰正†  
Taisei Sumitani

Autonomous Driving Initiatives for Sustainable Public Transportation

\*交通事業部  
†伊丹製作所  
‡コミュニケーション・ネットワーク製作所  
§神戸製作所

## 要 旨

少子高齢化や生産年齢人口の減少によって鉄道業界でも労働力不足が懸念されており、運転士を必要としない自動運転のニーズが高まっている。

三菱電機は1980年代に新交通システムの無人・自動運転を実用化して以来、多くの実績を積んできた。さらに、乗務員の役割を分析し、最新の情報処理・情報伝送技術、AIやセンサー技術を適用して、運転の操作や状況判断、旅客サービス、異常時対応などのシステム化を目指す“自律運転ソリューション”“旅客サービスソリューション”“運用サポートソリューション”を開発・推進している。将来志向の自動運転のソリューションによって、コロナ禍後の鉄道事業者の経営効率化にも寄与する、より快適で効率的な自動運転を実現し、持続可能な公共交通の維持・発展に貢献する。

## 1. ま え が き

国内では少子高齢化や生産年齢人口の減少によって、鉄道業界でも労働力不足が懸念されている。特に運転士には高度な技術と経験が求められ、その養成には相当の期間と熟練が必要なため、運転士を必要としない自動運転のニーズは高い。さらに、コロナ禍によって鉄道事業者の収益は減少し、今後も働き方や生活様式の変化によって旅客需要はコロナ禍以前には戻らないとの見立てもあり、経営効率化の観点からも自動運転への期待が高まっている。

海外の都市鉄道では新線建設の際に、ホームドアを設置し専用軌道として無線式列車制御と併せて自動運転を導入するケースが多く、アジアの主要都市を中心に自動運転が普及している。国内では、1980年代に新交通システムの営業路線で世界初の無人運転を実現し、新交通システムでは自動運転が標準になっている。一方、踏切があり、ホームドアがない既存の普通鉄道では線路内侵入などの対策のため自動運転の普及が遅れているものの、技術開発や法制度の検討が進められており、今後の展開が期待されている。

当社は先に述べた世界初の新交通システムでの無人運転の実用化以来、無人・自動運転のバイオニアとして多くの実績を積んできた。より快適で、より効率的な自動運転の実現を目指して更なる技術開発を推進している。

本稿では、将来志向の自動運転のソリューションとして、当社の最新の情報処理・情報伝送技術、AIやセンサー技術等を適用した“自律運転ソリューション”“旅客サービスソリューション”“運用サポートソリューション”の取り組みを述べる。

## 2. 持続可能な公共交通を実現する三つのソリューション

都市鉄道では、駅での乗降人数が多いことに加えて、踏切などからの線路内侵入による安全・安定輸送への影響を回避するため、運転士や車掌の業務が多岐にわたる。当社では、踏切がある一般的な鉄道線区でのGoA2.5(Grades of Automation Level2.5:緊急停止操作等を行う係員付き自動運転)以上の自動運転の実現に向けて、乗務員の業務内容を詳細に分析した。分析結果から、乗務員の役割である、運転の操作や状況判断、旅客サービス、異常時対応などの業務をシステム化する自動運転の三つのソリューションについて開発を推進している。

### (1) 自律運転ソリューション

主に列車の運転制御に関わる業務のシステム化を目指したソリューションである。運転士は刻々と変化する乗客の利用状況や列車状態、降雨や降雪などの路線環境などの情報から、状況に応じた運転制御や速度抑制、運転継続判断などを行っている。これらを地上・車上間(以下“地車間”という。)のシステムが連携して収集した情報を基に、与えられた役割ごとに自律的に判断を行うことで、最適運行を行うソリューションの実現を目指す。

## (2) 旅客サービスソリューション

主に旅客サービスに関わる業務のシステム化を目指したソリューションである。運転士や車掌は旅客の安全を守る非常に重要な役割と責任を担う。例えば閉扉操作では、ダイヤ上の出発時刻を過ぎても乗降が続く場合や、旅客を挟み込む可能性が高い駆け込み乗車など、乗務員は様々なシーンを想定した対応を行っている。これらをIoT(Internet of Things)やAIなどの最新技術を活用することで、乗務員に代わって旅客サービスの維持・向上を目指す。

## (3) 運用サポートソリューション

主に機器故障による車両トラブルなどの異常事態の対応に関わる業務のシステム化を目指したソリューションである。異常事態が発生した場合、乗務員が乗車しない自動運転では、不具合対応の係員を現場に派遣しても運転再開に時間を要するため、データに基づいて車両の健全性をリアルタイムに把握し、故障が発生する前にいち早く対処する取組みを進めている。

次に、これら三つのソリューションの取組み事例を述べる。

## 3. 自律運転ソリューション

列車を自動運転化するためには、これまで運転士や乗務員が行っていたオペレーションをシステムで実現し、列車を自動制御する必要がある。列車を最適に制御するためには、刻々と変化する乗客の利用状況や列車状態、降雨や降雪などの路線環境などの情報を収集し、状況に応じた運転制御や速度抑制、運転継続判断などが必要になる。

当社は、これまで培ってきた運行管理のノウハウや車両制御技術、地車間をつなぐ無線技術を持っている。さらに、自動運転化が進んでいる自動車技術の鉄道への応用も推進している。それらを高度にシステム連携させることで、システムが自律的に列車を制御し、最適運行を実現する“自律運転ソリューション”の実現に向けた取組みを加速している。

次に、自律運転ソリューションを構成する機能を述べる。

### 3.1 地車間システム連携による列車制御

これまで運転士や乗務員が行っていたオペレーションをシステム化する場合、どの装置にどのような役割を担わせるかが、最適運行を実現する大きな鍵になる。

ATO(Automatic Train Operation)地上装置は、単純に運行管理が持つダイヤ情報を列車個別に通知するだけでなく、路線全体を広く見渡して、路線全体を列車群として運行制御することによって、指令員による手動運転整理では難しかった列車間隔の調整や回復運転のための発着時刻微調整を実現する役割を担う。

一方、乗降用扉の再開閉などによって軽微な出発遅延が発生した場合、手動運転では運転士が自らの判断で回復運転を行うが、自動運転ではATO車上装置がドア閉制御以降の駅間走行で自律的に走行パターン切換制御を行うことで、ATO地上装置の意図した到着時分を守る役割を担う。

この役割分担イメージを図1に示す。このような役割分担とすることで、路線全体を俯瞰(ふかん)した運行制御と駅間走行での省エネルギー走行の両立が可能になる。

また、自動運転時には運転士が不在になるため、鉄道事業者では指令業務の増加が懸念されるが、運転士が行っていたオペレーションの大部分は、システムが自律的に運行制御を行うため、指令員が介在する業務は現行運転と同様に異常発生時だけになる。例えば運行に支障が発生した際には、現行の運用では指令員が運転士や乗務員から情報を収集し、復旧操作を指示した上で、最終的に列車運行可否の判断を行っているが、自動運転時には指令員が各列車に対して操作卓で遠隔指示を行い、車両で回復制御を行った後で、回復状態に合わせて自動運転の継続判断を行うことになる。その際にも、人間工学に基づくGUI(Graphical User Interface)を備える操作卓によってスムーズな操作が可能であり、業務効率化に貢献する。

### 3.2 列車群制御

ある列車に遅延が発生してダイヤ乱れが発生すると、列車間隔が開いた駅では、ホームに旅客が滞留して混雑が発生し、乗降時分が増加するため、更にダイヤ乱れが拡大してしまう。それを回避するために、現行運転でも指令からの無線指示によって列車間隔の調整を行っているが、対象列車数が多いため路線全体を対象に調整することは困難である。また、通常ダイヤに復旧するまでに要する時間が、指令員個人の経験やノウハウに依存することもあり、これらの課題を解決する

ために、列車群制御機能を開発している。これは、ATO地上装置とATO車上装置が無線で協調し、路線全体をまとめて最適化した制御を行うことで、駅ホームの混雑発生を回避し、ダイヤの早期回復を実現する機能である。

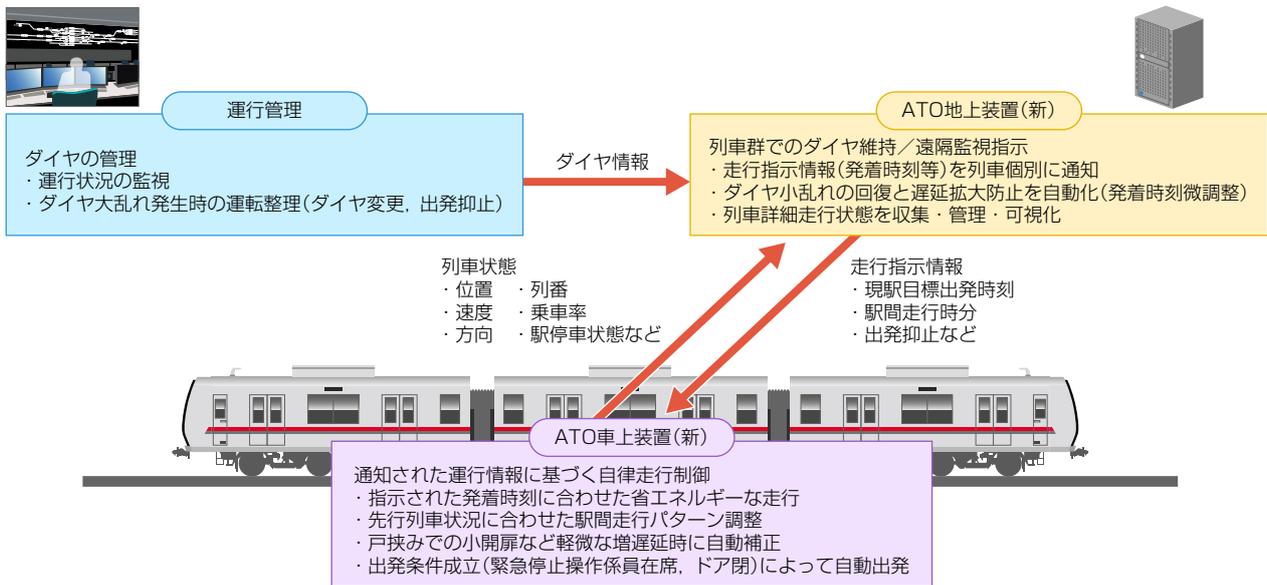


図1. 地車間システムの役割分担

図2, 図3に、列車間隔を均等化することでダイヤの早期回復を実現する場合を例示する。なお、図2, 図3共に、上側が指令員の口頭による列車制御, 下側が列車群制御による新制御を示す。

図2は、左端の駅で乗降人数が増加したことによって、旅客の乗降時間を確保する必要があり、出発遅延が発生した直後の状態を示している。この時点では従来制御でも新制御でも、先行列車との列車間隔は等間隔である。

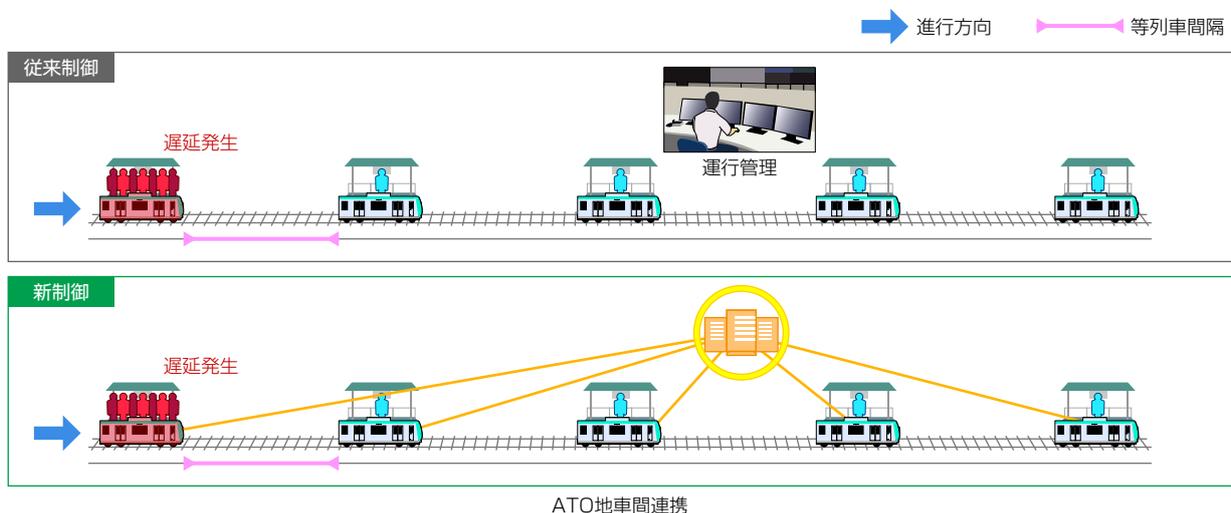


図2. 列車遅延直後の列車間隔状態

出発遅延の発生後、図3の上側に示すとおり、従来制御では指令員が先行列車に対して列車間隔の調整を指示することで、駅に滞留する旅客を先行列車に乗車させ、遅延した列車へ乗り込む旅客人数を抑制する対応を行う。しかし列車への指示が個別指令になるため、指令が届かない先行列車との列車間隔は広がってしまい、列車間隔を均等化するのに時間が掛かってしまう問題がある。

一方、図3の下側に示すとおり、列車群制御による新制御では地車間の装置が連携することで、駅を出発する全列車に対して出発時刻の調整を行うことが可能であり、迅速な列車間隔の均等化を行うことができる。そのため、従来制御では混雑が継続しているのに比べて列車遅延の早期回復が期待できる。なお、新制御は路線の特徴に合わせた制御が必要であり、追越し列車が存在する路線などでは、列車間隔の均等化制御をバランス良く行う必要がある。

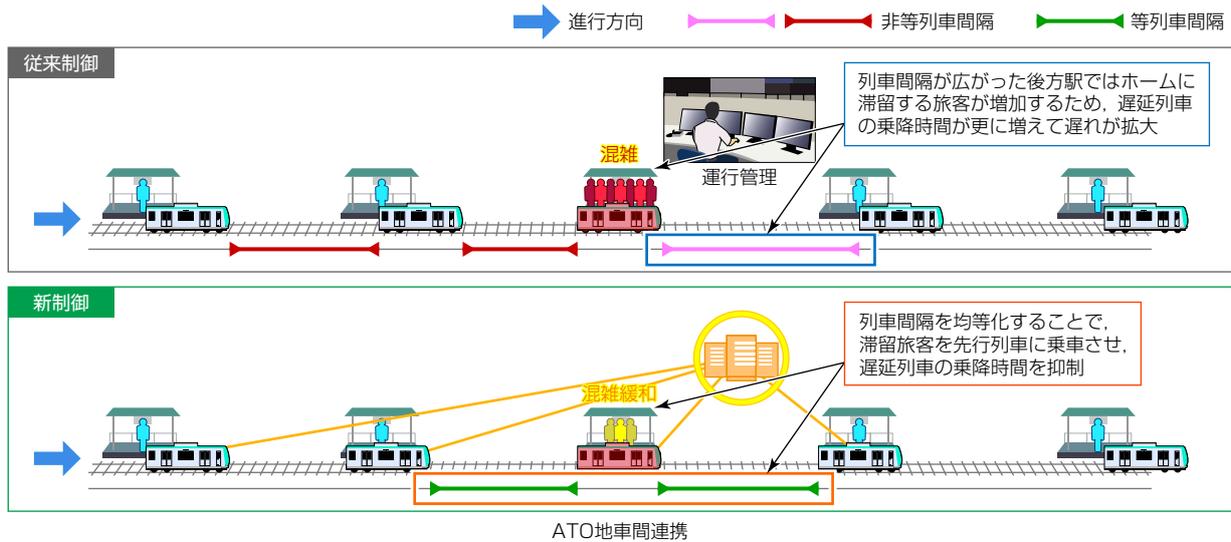


図3. 従来制御と新制御の混雑緩和タイミングの違い

### 3.3 乗務員状態モニタリング

自動車分野での自動運転は、各種センサーを使用した制御技術の開発が進められており、特定条件下での制御が既に可能になっている。当社でも各種技術開発を進めており、ドライバーモニタリング技術などを持っている。

鉄道分野でも、自動車分野のノウハウを活用しながら、鉄道への適用に向けた新規開発を進めている。次に、これらの技術の中から、ドライバーモニタリングシステムについて述べる。ここで、自動車用のドライバーモニタリングシステムは、鉄道への応用に当たって“乗務員状態モニタリング”として開発を進めている。なお、このソリューションは、自動運転ではGoA2.5での添乗員に向けた適用が想定されるが、GoA2(Grades of Automation Level2：半自動運転)以下の自動化レベルでも有用である。

自動車向けに開発されたドライバーモニタリングシステムは、自動車の速度やハンドルの向きなどの車両情報に加えて、ドライバーの表情や目の開眼度、顔の向きや視線などから危険度を判定し、ドライバーに通知を行うシステムである。

鉄道分野では自動運転・ワンマン化の拡大によって、国内鉄道事業者からの“運転士の健康状態の見守りニーズ”が高まっている。そこで、自動車分野のノウハウを活用しながら、鉄道特有の環境や運用条件を加味し、運転室に備えられた装置で得られる映像情報によって運転士の健康状態をモニタリングする。例えば、運転士の居眠り運転を防止するため、開眼度を図4のとおり数値化し、時系列処理を行うことで眠気を推定する。推定結果は音声で運転士に伝えられるとともに、運転指令と運転士の上司にも通知される。運転士の眠気レベルなどの数値データと映像によって、運転指令と運転士の上司が行う運転士交代の判断をサポートする。さらに、列車情報管理装置から受信する速度、位置、及び進行方向などの車両状態情報と連携し、眠気の過検知防止を図る。



図4. 乗務員状態モニタリングの画像読み込みイメージ

#### 4. 旅客サービスソリューション

列車での旅客サービスは、これまでは乗務員を中心に対応していた。自動運転が導入されると、乗務員が行っていたサービスを指令員とシステムが代替する必要がある。しかし指令業務は現状でも負荷が高く、限られた人員で全列車の旅客の様子を把握し、きめ細かな対応を行うことは困難である。

当社は、これまで培ってきた運行管理のノウハウや列車制御技術に、最新の高度なセンシング技術やAIを用いた映像解析技術、無線技術などを組み合わせて業務を自動化する。指令員とシステムが協働で業務を行うことで、自動運転を導入した場合でも指令所の業務量を大きく増加させず、より安全で充実した旅客サービスを維持する取組みを進めている。

そこで、様々な取組みの一例として“AIを活用した閉扉判断システム”について述べる。

列車運行で乗務員は非常に重要な役割を担っている。出発時刻を始めとした様々な運行条件を考慮して、適切なタイミングで閉扉を行うとともに、旅客の乗り心地を考慮した力行・制動制御を行うなど、乗務員の高度な技術によって鉄道の定時運行は維持されている。

都市鉄道では駅での乗降人数が多く、ダイヤ上の出発時刻を過ぎても乗降が続く場合や、旅客を挟み込む可能性が高い駆け込み乗車など、乗務員には様々なシーンを想定した対応が求められている。挟み込み等が発生し、扉の再開扉操作を行うことで出発遅延が発生した場合、定時運行に戻す必要性から出発後に列車の回復運転を行わなければならない。これは、省エネルギー運転を阻害する要因にもなるため、乗務員のような柔軟な閉扉判断・操作の自動化は列車を自動運転化する際の大きな課題である。

当社は、旅客の乗降状態やホーム上での混雑状況を始めとした複雑な状況を加味した閉扉判断業務の自動化だけでなく、列車制御と連携した閉扉操作自動化の取組みを進めている。閉扉判断業務の自動化では、従来、車掌や運転士が使っているホーム確認カメラの映像をAIが解析して、旅客の位置や状態から車両ドアの閉扉を行うことが可能か否かを判断している。

図5のとおり、ホーム確認カメラの映像を解析し、1列車分の解析結果を統合・判断することで、AIが列車としての閉扉可否を判断する。判断結果は無線通信によって当該列車に通知され、車上システムが出発時刻や信号システムなどの出発に関わる条件と合わせて閉扉可否を判断して、実際に自動閉扉を行う。このシステムでは、当社独自のAI技術であるMaisartによって、AIの解析を効率化することで閉扉判断の高速化を実現しており、駆け込み乗車等の急激な状況の変化にも対応可能としている。なお、このシステムは、実際に複数駅のホーム確認カメラの映像を使ったオフライン試験を実施しており、約90%の閉扉判断精度を達成している。

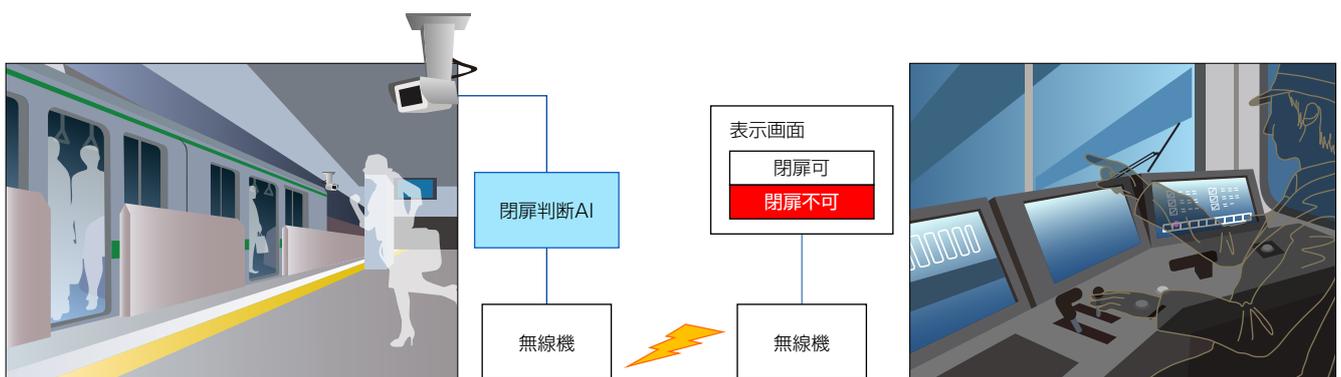
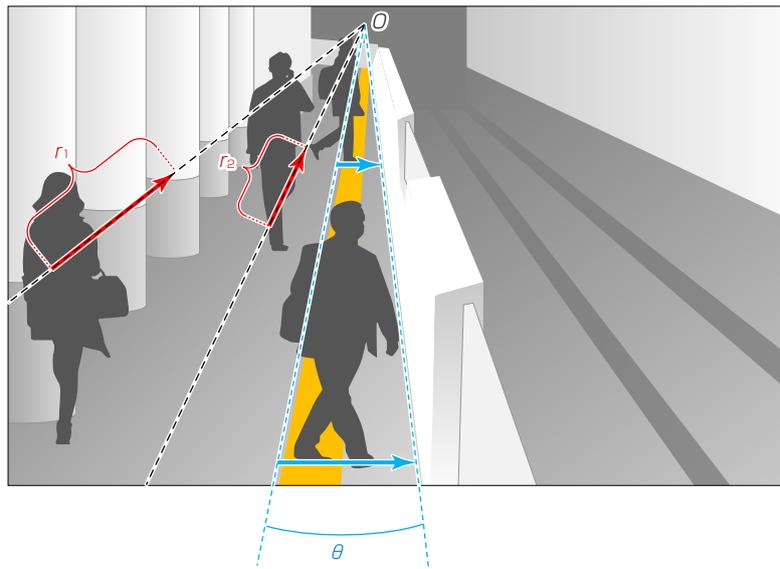


図5. 閉扉判断システムのイメージ

また、ホーム確認カメラ近傍の人物に比べて、見かけ上、遠方の人物の動きが小さくなり、AIの解析が難しいという課題に対しては、図6のように座標変換を使った移動量抽出方法を実装する対策を進めている。

今後は、複数路線へ容易に展開できるようなAI開発の効率化や実際のフィールドでの評価などを進めていく。



ホーム最奥を原点とする極座標に変換し、 $\theta$ 成分(原点周りを回る方向の長さ)を用いて移動方向を判定する。

図6. 座標変換を使用した移動量抽出方法

## 5. 運用サポートソリューション

機器故障による車両トラブルなどの異常事態が発生した場合、現状では乗務員が指令員と連絡を取り合って状況を確認した上で、最終的な判断は指令員が運用ルールに基づいて、機器リセット制御や手動操作による低速走行運転などの最適な対策を指示している。しかし、乗務員が乗車しない自動運転では、遠隔操作による車両の回復制御には限界があり、不具合対応や列車の運転が可能な係員を現場に派遣した場合でも運転再開までに相当な時間を要することが課題である。

現在、当社ではメンテナンス業務の改善に向けてCBM(Condition Based Maintenance)を実現するため、車上の各機器の稼働データを当社独自のIoTプラットフォームINFOPRISMに収集・監視し、機器の劣化傾向をとらえる分析システムを構築している。この分析システムを更に発展させて、データに基づいて車両の健全性をリアルタイムに把握し、故障が発生する前に車両交換を行うなど、いち早く対処することで、継続的な運用を実現するソリューションの確立を目指す。このソリューションによって、運用中での車両故障時の車両交換を回避して、運行障害の発生率を削減することなども可能になる。

## 6. む す び

当社が取り組んでいる自動運転システムに必要な将来志向のソリューションと、その中の一部機能について述べた。これらの技術は既に鉄道事業者と連携して実証実験を重ねており、データの蓄積や課題抽出、異常時の対応検討など、実用化に向けた取組みを加速している。特に安全性の検証については、継続した実証実験と第三者からの評価が必要であり、今後、重点的に取り組む課題であると認識している。

当社は、開発中の各種ソリューションについても実証実験や評価を継続的に実施して、データを蓄積している。鉄道事業者や旅客に安心して使ってもらえるソリューションを、いち早く提供できるように尽力する。

これらの実証実験は、鉄道事業者の協力の下、検証の場の提供を受けて実施した。今後も、鉄道事業者や車両メーカー、各種組織、団体の関係者との連携を強化し、都市鉄道、地方鉄道共に持続可能な公共交通の維持・発展に向けて貢献していく。

## 参考文献

- 1) 星子 遼, ほか: 映像解析と深層学習による鉄道の閉扉判断AIの研究, 第29回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2022)講演論文集, S4-1-1 (2022)