

自律運転に向けた沿線・車両状態情報に基づく 運行リスク評価手法

太田 佑貴* 祇園 昭宏* 西本 翔* 櫻井 勇輝*

Operation Risk Assessment Method based on Information on Wayside and Vehicle Conditions
for Autonomous Train Operation

Yuki OTA Akihiro GION Sho NISHIMOTO Yuki SAKURAI

We have been developing an autonomous train operation system that allows trains to be operated automatically while controlling wayside equipment based on the conditions of a vehicle and wayside. Autonomous train operation not only controls the acceleration and deceleration of a train, which is achieved by automatic operation, but also automatically makes operational decisions on board. We have developed a railway dynamic map as an information infrastructure for collecting and sharing necessary onboard and wayside condition information for making operational decisions and for risk assessment. This paper provides an overview of condition information management and risk assessment using railway dynamic map.

キーワード：自律運転，運行リスク評価，ダイナミックマップ，情報共有・配信

1. はじめに

鉄道における自動運転は、地下鉄や新交通システムなどにおいて実用化されており、これらにはATO（Automatic Train Operation）システムが利用されている。近年、乗務員の負担軽減や輸送の効率化を目的に、自動運転に注目が集まっており、一般線区におけるドライバレス化を目標とした自動運転の検討と実証実験^{1) 2)}が進められている。

鉄道総研では、この自動運転の進化形として、より安全で柔軟な列車運行をできるだけ少ない地上設備で実現する自律運転³⁾の研究開発に取り組んでいる。ここでの自律運転は、線路内や沿線の状態、旅客流動、防災情報などの様々な情報に基づき、列車が沿線設備を制御しながら、自律的に走行する運行制御システムを指す。自律運転と従来の自動運転（ATO）との違いは、ATOで実現されている列車の加減速制御に加え、従来は指令員や地上装置が担っていた運行判断を車上で自動的に行うことにある。このうち、車上で運行判断を実現するには、各種状態情報を車上に集約するとともに、地上・車上間および列車間での情報共有の仕組みが必要である。

そこで本研究では、この車上で運行判断を実現するための要素技術として、状態情報の収集・管理と、状態情報に基づくリスク評価手法について検討を行った。

2. 自律運転の概要と実現の課題

2.1 自律運転システムの概要

2.1.1 現在の自動運転

鉄道における自動運転を乗務形態により分類したものを表1に示す。表中のGOA⁴⁾は、Grade Of Automationの略であり、数字が大きくなるほど自動化のレベルが上がっていくことを示している。現在、地下鉄等で行われているATOによる自動運転は、運転士による列車起動操作などを伴うことから、GOA2に相当する。また、高架のように人が容易に立ち入れない構造でホームドアが整備されている線区では、GOA3やGOA4に相当する自動運転が行われている。現在実用化されているこれらのシステムでは、各地点の制限速度や駅間の運転時分に沿って作成された速度パターンに従って走行するように列車の加減速が制御される。近年では、列車の前頭に

表1 JIS E 3802⁴⁾に準じた自動運転の分類

自動化レベル	乗務形態	導入状況
GOA0	運転士（および車掌）が乗務	路面電車
GOA1		一般線区
GOA2	運転士が乗務	地下鉄 首都圏新都市鉄道 等
GOA3	前頭以外に係員が乗務	舞浜リゾートライン
GOA4	係員の乗務なし	ゆりかもめ 神戸新交通 等

* 信号技術研究部 列車制御システム研究室

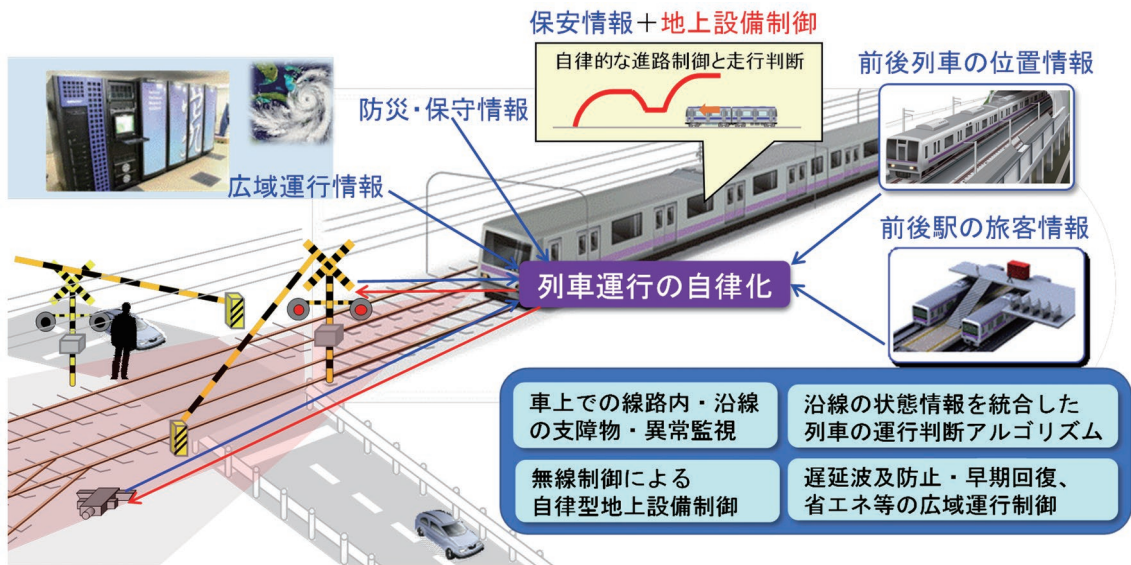


図1 自律運転の実現イメージ

係員が乗務して自動運転を行う方式（GOA2とGOA3の中間のためGOA2.5と呼称）以上のレベルに相当する自動運転を、踏切などがある一般線区で実施する場合の技術的課題の抽出と要件が検討されている⁵⁾。

2.1.2 自律運転

自律運転では、GOA3以上に相当するドライバレス運転をさらに高度化させ、従来から行われている加減速制御だけでなく、各種状態情報に基づいた適切な運行判断を自動的に行う。その実現イメージを図1に示す。

図1のように、個々の列車が自ら線路内・沿線等の状態を把握し、踏切等の地上設備を車上から直接制御しながら、走行速度を制御する。自律運転実現のための要素技術として、次の①～④が挙げられる。

- ① 画像・LiDARによる線路内・沿線の異常検知
- ② 線路内・沿線と車両の状態情報を統合して列車運行の可否を判断するアルゴリズム
- ③ 列車からの無線による地上設備の直接制御
- ④ 遅延波及防止・早期回復、省エネ等のための広域での運行管理アルゴリズム

③ 列車からの無線による地上設備の直接制御

④ 遅延波及防止・早期回復、省エネ等のための広域での運行管理アルゴリズム

自律運転では、これらの要素技術を統合することで、乗務員が担っていた車上での判断だけでなく、地上の指令員や地上装置が担っていた各種判断や制御も車上主体で実施し、少ない地上設備で高度な自動運転を実現する。

2.2 自律運転の課題

取り上げた技術的課題のうち、「②線路内・沿線と車両の状態情報を統合して列車運行の可否を判断するアルゴリズム」には、運行上の影響（リスク）となる沿線や車両の状態情報を車上に集約する手段と、列車が安全に走行できる範囲を車上で判断する手法が必要である。

現在の鉄道運行では、地上装置が検知した各種情報をもとに、指令員が運行判断と運転規制を行い、列車（乗務員）は指令員から指示された運転規制に従って走行している。また、乗務員またはシステムが線路内や車両状態の異常に気付いた場合は、停止判断等を行うことで安全を確保している。ここで、運行判断に関わる情報の流れを図2に示す。地上側では各種設備の監視システム、および防災情報システム等の情報を指令所に集約して運行判断を行い、運転規制が必要な場合はCTC/PRCを介した運転抑止と臨時速度制限の設定、表示器または無線等による乗務員への通告を行っている。さらに、指令所を介さない方法として、現場装置である踏切支障検知装置や落石検知装置等が監視と信号発報を行っている。

列車の自律運転の実現には、自列車の認識範囲の安全を確認するだけでなく、自列車の視認範囲外の状況を正しく認識して適切な制御を行うことが求められる。しかしながら、現行の運行制御システムにおいて地上・車上

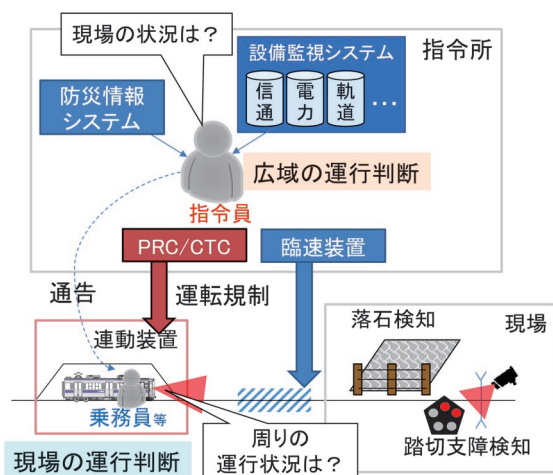


図2 現行の運行判断・運転規制

間で送受信できる情報は限られているため、指令所や周囲の列車が取得または集約した情報の大部分を活用することができない。さらには、複数の競合する情報から運行に係るリスクを自律的に判断する手法も確立されていない。

したがって、自律運転システムの実現には、これらの状態情報を取得する手法に加え、多数の情報を集約・共有によって運行判断を行うためのリスク評価手法が必要である。

3. 状態情報の管理手法

3.1 管理対象とする状態情報

列車の運行に影響する事象として、大きく線路上や沿線の支障によって列車がその地点を通過することやその地点にとどまることに危険がある場合、および、車両の状態によって列車の走行が継続不可能になる場合が考えられる。このような影響を判断するには、沿線や車上の状態情報の中から列車運行へ影響するものを抽出する必要がある。このような、列車運行に影響のある状態情報を、ハザード情報と定義する。

ハザード情報の抽出元となる状態情報には、大きく車内由来、沿線由来および作業等の計画に基づく情報がある。これらのうち、沿線由来の情報は鉄道事業者の内外から得られる情報に分類できる。対応する情報例と情報の特性を整理すると、表2のようになる。

沿線で検知できる情報は、予め対象となるエリアを明確化し、異常発生時にハザード情報として取り扱う一方、車上で検知する地上支障は臨時にハザード情報を設定することが基本となる。車上で検知できる情報でも、車両の状態にかかわるものは、現在地からの走行継続可否の判断として、他の状態情報に基づく判断を上書きして列車の停車等を行う場合に利用できる。計画に基づく情報は、保守作業等を実施する範囲をハザード情報と同等なものとして設定し、作業進捗などに合わせて状態を変化させることが考えられる。

3.2 状態情報管理の要素

自律運転における運行リスク評価に必要な状態情報には、3.1節で示したように、様々な種類のものが存在する。これらの情報は、それぞれ情報変化の時間特性が異なり、時々刻々と変化するものから、長いスパンで変化がないものまで多様である。このような時間特性が異なる情報を一元的に扱う手法として、自動車分野で検討が進められている、ダイナミックマップ⁶⁾がある。概念図を図3に示す。ダイナミックマップでは、情報変化の時間特性に応じて動的情報、準動的情報、準静的情報、静的情報の4階層に区分しており、例えば突発的な変化が

表2 状態情報の分類と特性 (例)

情報元	主な情報の例	情報の特性
車 上	<ul style="list-style-type: none"> ・車両電装品状態 ・異音、異臭 ・振動センサ 	<ul style="list-style-type: none"> ・列車の走行継続可否に影響 ・時間経過により変化
	<ul style="list-style-type: none"> ・前方支障検知 	<ul style="list-style-type: none"> ・列車位置からの相対距離で検知 ・短時間で状態変化
沿 線	<ul style="list-style-type: none"> ・転落検知装置 ・踏切支障検知 	<ul style="list-style-type: none"> ・情報源の位置や警報が報知される範囲が既知 ・時間経過により変化
	<ul style="list-style-type: none"> ・気象警報 ・地震情報 ・ハザードマップ 	
計 画	<ul style="list-style-type: none"> ・保守作業 ・工事速度制限 	<ul style="list-style-type: none"> ・日や時間などの単位で範囲設定

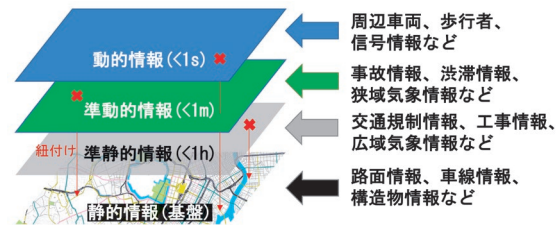


図3 ダイナミックマップの概念

考えられる前方障害物の情報は動的情報に、大規模な工事等がない限り長期にわたって変化がない車線情報などは静的情報に区分される。自動車のダイナミックマップは、これら4階層に割り付けた情報をもとに、自動運転時の危険回避や、渋滞を避ける走行などに活用される。これらの情報は緯度・経度による座標を基準にダイナミックマップ上に展開される。

このような概念は、鉄道の自律運転にも活用可能であることから、鉄道への適用可能性について検討した。自動車と異なる点として、展開する状態情報の位置が緯度・経度による座標を基準としたものと、キロ程のような線路上の位置を基準にしたものの2種類が存在する点である。そこで、鉄道への適用においては、地図情報をベースとした地図面に加えて、自動車におけるダイナミックマップの車線情報に相当する線路配線略図をベースとした線路図面を用意し、これら2面に展開された情報を統合して活用することとした。これを鉄道ダイナミックマップ^{7) 8)}と称し、概要を図4に示す。

鉄道ダイナミックマップは、地図面と線路図面の2面を持つことにより、状態情報を統合して一元的に管理できるだけでなく、使い方に応じた情報提供が可能となる。自律運転の制御に用いる場合には、列車の線路上の位置を基準にリスク評価をすることになるため、線路図

面に展開された情報が有効となる。一方、指令員等の人間系への情報提供の観点では、地図上に展開された情報を表示することで、現状に応じた判断を補助することも可能である。

3.3 鉄道ダイナミックマップを用いたリスク管理・評価手法

鉄道ダイナミックマップは、列車および各種監視シス

テムのダイナミックな情報を統合管理するデータベースであることから、鉄道内のセンシングデータを集約するシステムと捉えることが出来る。

各列車、防災システム、設備監視システム、または沿線設備は、自身が取得または検知した情報を、鉄道ダイナミックマップのフォーマットに変換して配信する。配信情報の利用にあたって参照する情報の抜けや漏れがないよう、走行中の列車、存在する設備、防災情報の配信元の情報リストを線区単位で管理する(図5(a))。

列車は、この配信元の情報リストを用いて各配信元から情報を取得することにより、自列車で直接認識できない範囲の状況も把握できる。さらに、自列車で直接認識した情報を重ね合わせて判断に用いる(図5(b))。例えば、大雨により斜面崩壊の可能性をハザードマップと気象情報により認識し、監視システムの情報、先行列車または対向列車の観測情報や当該区間の通過実績の有無による通過可否の推定と、自列車による見通し確認を組み合わせることで、総合的なリスク評価ができる。また、地上側においても、各装置の配信情報を取得することにより、従来と同様の設備管理、および状況把握が可能である。

なお、情報配信の単位については、装置個別に実施する分散構成を基本とするが、中間装置が一部情報を集約

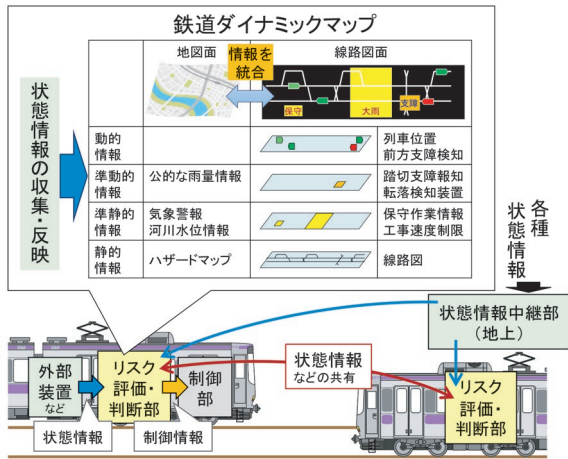
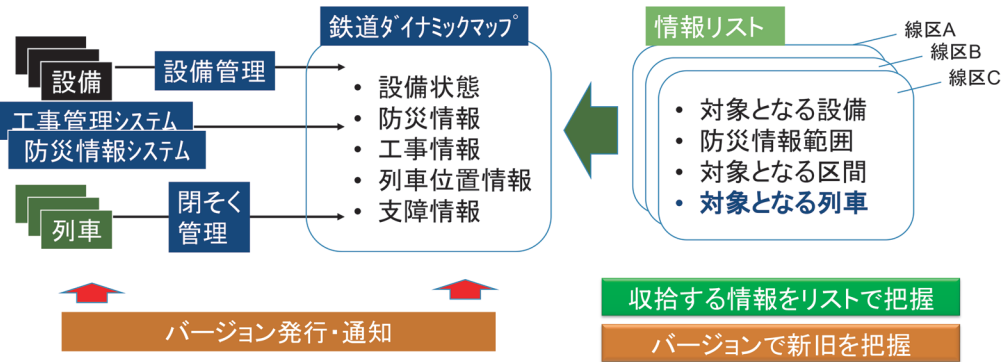
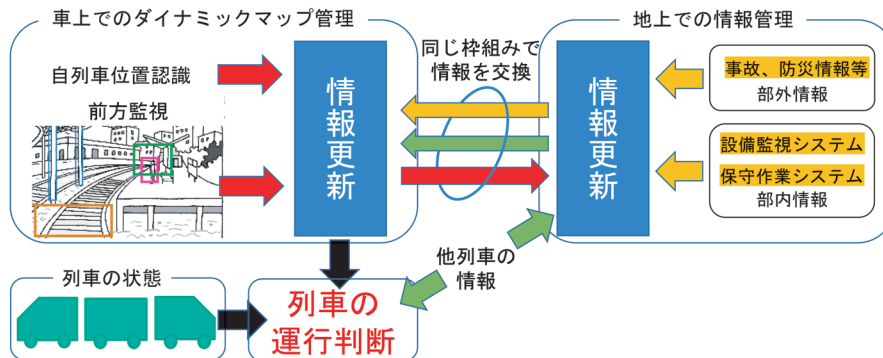


図4 鉄道ダイナミックマップの概要



(a) 共有・配信する情報の管理



(b) 運行判断への適用時の情報共有・配信手法

図5 鉄道ダイナミックマップにおける情報共有・配信手法

して再配信する構成や、統合する構成も可能である。

このようにして各列車のダイナミックマップ上に集約された状態情報と、自列車の現在位置および走行経路に基づいて、各列車自身の走行に影響する状態情報がないかをダイナミックマップ上で分析する。

4. 鉄道ダイナミックマップの実装

4.1 鉄道ダイナミックマップの実装例

これらの検討を踏まえ、鉄道総研の所内試験線を対象として、地図と線路図のデータを用意し、図6、図7に示す鉄道ダイナミックマップを作成するとともに、模擬列車の配置が可能な鉄道ダイナミックマップのシミュレータを開発した⁹⁾。基盤となる地図情報は、国土地理院が提供する地理院地図¹⁰⁾のデータに、別途作成した線路データ等を重ねて利用している(図6)。

開発したシミュレータでは、地上設備の故障、運転規制、支障物などが設定可能である。これらの情報を設定すると、各列車が認識する情報が更新され、列車から一定の範囲内に存在する運転上の制約を認識できる。図7は、図6に示したハザード情報が得られた場合に、図6中の列車1・列車2がそれぞれ認識する情報の例を示し

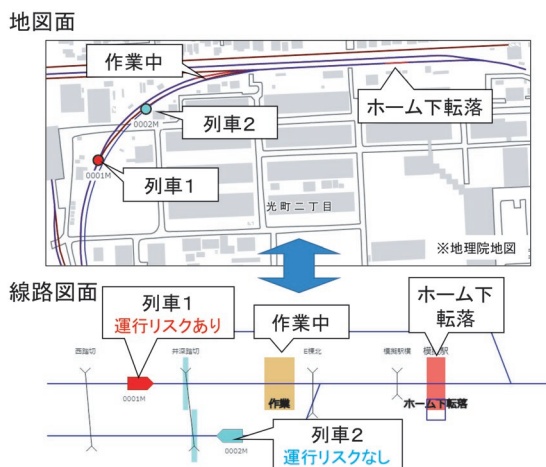


図6 鉄道ダイナミックマップの実装例
(地図画面・線路画面)

列車1の状態情報テーブル

列車番号	列車種別	列車位置	列車速度	列車向き	列車状態
0001H	普通列車	0001H	100km/h	北	運行中
0002H	普通列車	0002H	100km/h	南	運行中
0003H	普通列車	0003H	100km/h	北	運行中
0004H	普通列車	0004H	100km/h	南	運行中
0005H	普通列車	0005H	100km/h	北	運行中
0006H	普通列車	0006H	100km/h	南	運行中
0007H	普通列車	0007H	100km/h	北	運行中
0008H	普通列車	0008H	100km/h	南	運行中
0009H	普通列車	0009H	100km/h	北	運行中
0010H	普通列車	0010H	100km/h	南	運行中

列車2の状態情報テーブル

列車番号	列車種別	列車位置	列車速度	列車向き	列車状態
0001H	普通列車	0001H	100km/h	北	運行中
0002H	普通列車	0002H	100km/h	南	運行中
0003H	普通列車	0003H	100km/h	北	運行中
0004H	普通列車	0004H	100km/h	南	運行中
0005H	普通列車	0005H	100km/h	北	運行中
0006H	普通列車	0006H	100km/h	南	運行中
0007H	普通列車	0007H	100km/h	北	運行中
0008H	普通列車	0008H	100km/h	南	運行中
0009H	普通列車	0009H	100km/h	北	運行中
0010H	普通列車	0010H	100km/h	南	運行中

図7 鉄道ダイナミックマップの実装例
(シミュレータによるハザード情報の更新例)

ている。列車1は、走行経路上に運行に影響するハザード情報があるため図7の当該情報が赤色で示されるとともに、図6の列車シンボルも赤色となっている。列車2もこれらのハザード情報を認識しているが、走行経路上ではないため、図7の状態情報の色は変化せず、図6の列車シンボルも水色となっている。このように、鉄道ダイナミックマップ上に展開された状態情報と列車の走行経路を組み合わせることで、各列車への影響を評価することが可能である。

4.2 自律運転以外への活用

鉄道ダイナミックマップは、現行の運行業務における指令員や乗務員の運行判断の補助にも適用可能である。何らかの輸送障害が発生した場合、現状では指令員等が各装置から収集した情報を指令所内のホワイトボード等に展開して状況の可視化等を図っているが、ここに鉄道ダイナミックマップを適用すると、情報の一元的な収集・表示ができ、判断の効率化が可能となる(図8)。また、車上にも表示装置を設置することで、指令員と乗務員の間での情報共有を円滑にすることも可能である。

5. まとめ

自律運転における車上での運行判断を実現するための要素技術として、状態情報の収集、管理、評価の方法について検討を行った。

運行判断に必要な車両や沿線状態情報を整理し、これらの情報を管理するための情報基盤として、地図画面と線路画面の2面を有することを特徴とする、鉄道ダイナミックマップを開発した。列車位置および進路に対して、列車の運行に影響するハザード情報を状態情報から抽出する機能を鉄道ダイナミックマップに実装した。また、鉄道ダイナミックマップを、現行の運行業務における輸送障害発生時の指令員の判断支援として活用する方法を提案した。

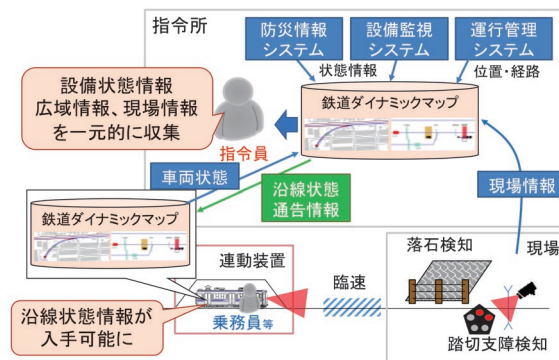


図8 鉄道ダイナミックマップの指令業務への活用イメージ

今後は、開発した鉄道ダイナミックマップを自律運転車上装置のリスク評価・判断部に適用し、自律運転における運行判断機能の詳細な開発に活用する。

文 献

- 1) 横山啓之：山手線におけるATO走行試験の概要，JREA，Vol.62，No.8，pp.8-11，2019
- 2) 青柳孝彦，溝尻将征：ATS-DKをベースとした自動運転システムの概要，運転協会誌，Vol.63，No.4，pp.9-12，2021
- 3) 川崎邦弘：信号通信分野におけるICT活用に関する研究開発の経緯と展望，鉄道総研報告，Vol.34，No.7，pp.1-4，2020
- 4) 自動運転都市内軌道旅客輸送システム（AUGTシステム）—安全要求事項，JIS E 3802：2012
- 5) 鉄道における自動運転技術検討会：鉄道における自動運転技術検討会とりまとめ，2022，<https://www.mlit.go.jp/tetudo/content/001512132.pdf>（参照日：2024年1月5日）
- 6) 佐藤健哉，渡辺陽介，高田広章：解説 動的地理情報共有のためのアプリケーションプラットフォームとしてのダイナミックマップの役割，電子情報通信学会誌，Vol.101，No.1，pp.85-90，2018
- 7) 祇園昭宏，太田佑貴，西本翔，櫻井勇輝：列車自律運転のための情報共有及び情報配信手法の検討，令和4年電気学会全国大会講演論文集，pp.248-249，2022
- 8) 太田佑貴，祇園昭宏，西本翔，櫻井勇輝：自律運転列車のリスク判断における鉄道ダイナミックマップの基礎検討，令和4年電気学会全国大会講演論文集，pp.250-251，2022
- 9) 太田佑貴，祇園昭宏，西本翔，櫻井勇輝：鉄道ダイナミックマップを活用したリスク判断に基づく自律運転，鉄道と電気技術，Vol.33，No.7，pp.3-6，2022
- 10) 地理院タイル：<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>（参照日：2024年1月5日）