講演６．鉄道の自動運転における安全性評価手法の検討

交通システム研究部　　※工藤　希　　望月 駿登　　押立 貴志(客員研究員)

１．はじめに

人口減少社会を迎え、鉄道分野においても運転士や保守作業員等の鉄道係員の確保、養成が困難になってきていることから、踏切道がある等の一般的な路線（以下、「一般的な路線」という。）における自動運転の検討が進められている。特に近年の地方鉄道では、運転士を含めた鉄道係員不足による減便や、経営状況の悪化からの路線廃止が相次いでいる。地域の足を少しでも残す観点から、運転コストの削減が可能となる自動運転を、最小限の設備投資で実現することが待たれている。また、近年開発が進むカメラ・センサ類は、見通しがよい等の条件において車上における走行路上の障害物検知に活用できる可能性がある。

一方、当研究所ではこれまでも新たな設備の導入や更新する設備に対して安全性評価を実施してきた[1)]。自動運転を導入する場合においても、既存の装置との機能の差を考慮した安全性評価を実施することが想定される。

これらの状況を踏まえ、当研究所では、自動運転に対応した安全性評価手法の確立を目的とした研究を実施している。本稿では、一般的な路線における自動運転を現行の手動運転と同等の安全性で実現することに資する安全性評価手法について、カメラ・センサ類を対象に検討したので報告する。

２．鉄道における自動運転の現状と課題

２．１．鉄道における自動化レベル

鉄道における自動運転に関する検討は、平成 30 年より「鉄道における自動運転技術検討会」において実施され、その内容を取りまとめた結果が、「鉄道における自動運転とりまとめ」[2)]（以下、「とりまとめ」という。）として発行されている。とりまとめにおいて鉄道における自動運転の自動化レベルは、IEC（International Electrotechnical Commission：国際電気標準会議） 62267（Automated urban guided transport (AUGT)-Safety requirement：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。以下、「AUGT 規格」という。）を基に GOA（Grade Of Automation）として定義している（表 1）。表 1 のうち、GOA2.5 は AUGT 規格には定義されていないが、鉄道の技術上の基準を定める省令の解釈基準においては、「AUGT 規格における半自動運転であって、動力車を操縦する係員以外の係員が列車の前方の線路を目視し、列車運行上の障害となる事象が発生したことを認めた場合に緊急停止操作を行うために列車の最前部の車両の前頭に乗務する形態」と定義されている。

表１　自動化レベル

GOA	乗務形態	国内の例
GOA0	目視運転	路面電車
GOA1	非自動運転	踏切道がある等の一般的な路線
GOA2	半自動運転	東京地下鉄丸ノ内線
GOA2.5	緊急停止操作等を行う係員付き自動運転	JR 九州香椎線
GOA3	添乗員付き自動運転	舞浜リゾートライン
GOA4	自動運転(無人運転)	神戸新交通ポートアイランド線

（参考文献１に加筆して作成）

２．２．GOA3 及び 4 の実現に向けた課題

GOA3 及び 4 は新交通システムやモノレールにおいて既に実現しているが、一般的な鉄道においても実現が期待されている。GOA3 及び 4 においては、GOA2.5 までと異なり、前方を視認できる係員が不在となるため、走行路上の安全確保が重要になる。すでに実現している新交通システムやモノレールにおいては、走行路上の安全確保を高架構造やホーム柵により実現している。しかし、一般的な路線においては人や自動車などが容易に線路内に立ち入ることができる。全線にわたって立ち入り防止柵や地上側の支障物検知装置を設置する方法も考えられるが、コスト面から現実的ではない。

この点について、とりまとめでは、「鉄道は、各種装置や管理体制等のほか、鉄道利用者、踏切道通行者、鉄道沿線住民等の遵法行動や自制的行動により運行の安全を確保するものであり、一般的な路線での自動運転を導入する場合においても、この方針は大きく変える必要はない」としたうえで、「各路線の実情を十分に評価し、従来の一般的な路線での安全性と同等以上の性能が確保できるように、安全に関する総合的な対策の視点により線路上の支障物への対応を行うことが適切であると考える。」とされており、この「従来の一般的な路線と同等以上の安全を確保」する方法をどう実現するかが課題となる。なお、現在 GOA3 は東武鉄道[3]で検討されている。

３．安全性評価手法の検討

３．１．安全性評価と評価基準の考え方

安全性評価は、新しいシステムなどに対して技術的な観点から安全上の問題がないかについて評価を行うものである。これまでに当研究所が実施した安全性評価では、既存装置の置き換えを想定する場合、既存装置との機能差分、機能差分が他装置へ与える影響、及びインターフェースの差分等を評価項目として挙げ、リスク分析に基づいた定量的評価やシステムの安全管理に関わる定性的な評価などを実施してきた。

このような差分評価にあたっては、従来の装置と同等かそれ以上の安全性を有することを評価基準としてきた。とりまとめによれば「従来の一般的な路線での安全性と同等以上の性能」を求めていることから、自動運転における安全性評価の場合も、評価基準はこれまでの考え方と同様に「従来と同等かそれ以上の安全性を有すること」が適切であると考える。

３．２．装置が担う機能に変更がある場合の検討

安全性評価において既存装置との差分を検討する際に、新しい装置と既存装置が担う役割が変わる場合がある。既存の一般的な鉄道を自動運転にする場合、例えば、列車の力行や制動を行う主体は運転士から ATO（Automatic Train Operation：自動列車運転装置）に変更となる。このように、安全性評価を行う際には、既存の路線と比較して運転士の作業する項目を誰が（どの装置が）実現するかを予め決定しておく必要がある。これまでの研究では、GOA2.5 を対象に、従来の運転士の業務と GOA2.5 においてその業務を担う装置（又は係員）を挙げ、評価にあたって注意が必要な項目を整理した[4]。装置が担う機能に変更がある場合には、整理した結果を踏まえて装置の機能を明確にすることが重要であると考える。

３．３．前方支障物検知に対する検討

前述した通り、GOA3 及び 4 においては、走行路上の安全確保が課題となる。現在の鉄道法規に運転士の前方監視についての規定はなく、とりまとめにおいても、「運転士が運転中、線路内支障物を発見する法的義務は、鉄道法規には規定されていないものの、事故防止の観点から、万が一、運転士が確認できる範囲で線路内支障物を発見した場合は、乗客及び公衆の安全確保や運転士の自己防衛等の観点から、気笛吹鳴や列車を停止させるブレーキ操作を行うことにより、事故防止や被害軽減に最善を尽くしている実態がある。」と記載されている。一方で、一般的な路線における GOA3 及び 4 の検討にあたっては、「各路線の線形、列車速度、周辺環境等により、必要な対応は異なると考えられることから、鉄道事業者においては、各路線の実情を十分に評価し、従来の一般的な路線での安全性と同等以上の性能が確保できるように、安全に関する総合的な対策の視点により線路上の支障物への対応を行うことが適切である。」とされている。

近年開発が進むカメラ・センサ類は、見通しがよい等の条件において車上における走行路上の障害物検知に活用できる可能性があるものの、鉄道の自動運転において必須ではない。一方で、将来の地方鉄道における自動運転の実現を想定すると、コストを考慮して従来の地上側装置による支障物検知ではなく、中低速域において車両側装置で支障物検知を行い、可能な範囲で衝突回避することも考えられる。そのため、カメラ・センサ類の安全性評価の方法を検討する。

とりまとめにおいて車上カメラ・センサ類に対する明確な基準はなく、「装置の性能や路線の状況を踏まえ、線路内支障物を検知することが可能な場合の事故回避や被害軽減のための装置等と位置づけを明確にした上で、その他の対策を含めて、総合的にとらえて対応することが適切である。」とされているため、このカメラ・センサ類を導入する際の評価手法を検討することとした。

まず、装置の位置づけについては、これまでの研究においてカメラ・センサ類を前方監視に使用する際には安全性への位置づけとその安全水準を明確にしておく必要があることを示した[5]。

次に、「従来の一般的な路線での安全性と同等以上の性能が確保できるように、安全に関する総合的な対策」の評価基準を検討する。運転士に前方監視義務がないことから、単純に運転士の能力と比較して従来と同等の性能を有しているかの評価を行うことは適切でない。そのため、別の視点からカメラ・センサ類の性能を評価できないか検討した。

道路交通法第 33 条第３項では、自動車の「運転者は、故障その他の理由により踏切において当該車両等を運転することができなくなつたときは、直ちに非常信号を行う等踏切に故障その他の理由により停止している車両等があることを鉄道若しくは軌道の係員又は警察官に知らせるための措置」及び、「当該車両等を踏切以外の場所に移動するため必要な措置」を義務付けている。この非常信号のために、道路運送車両の保安基準第 43 条の２では、「自動車には、非常時に灯光を発することにより他の交通に警告することができ、かつ、安全な運行を妨げないものとして、灯光の色、明るさ、備付け場所等に関し告示で定める基準に適合する非常信号用具を備えなければならない」とされ、この非常信号用具の灯火は道路運送車両の保安基準の細則を定める告示第 64 条に「夜間 200m の距離から確認できる赤色の灯火」と定められている。

列車運転士は、この非常信号用具による赤色灯火を認めたときは、現実に発生している非常事態を回避するために非常停止の措置を行う必要がある。これらのことを考え合わせると、車上のカメラ・センサ類に求める性能の基準として、見通しや天候等の条件が良い場合において、少なくとも 200m の距離から確認できる能力を有することが、従来と同等の性能を有している判断の基準になり得ると考えた。

４．運転シミュレータによる試験

3.3 節に示した距離において実際に視認できるかを確認するため、シミュレータを用いた試験を行った。

４．１．列車運行システム安全性評価シミュレータ

当研究所が所有する列車運行システム安全性評価シミュレータ（以下、「シミュレータ」という）の概要を示す。運転席前方のスクリーンに投影した映像により鉄道の運転操作が可能な設備である。任意の路線と車両性能をインプットして走行を再現する機能を有する（図１）。

シミュレータを用いることにより、天候、時間帯（明るさ）、営業運行の条件（前方列車との間隔等）、及び被験者の線路の知悉度合いといった条件をそろえることができるほか、線路上に物体を配置するという営業路線では実施できない条件をつくることができる。

図１ 列車運行システム安全性評価シミュレータ

４．２．運転操作の把握試験

本試験では、動力車操縦者免許保有者がシミュレータを低速（35km/h）と高速（70km/h）で障害物のある路線を運転した走行記録及び運転中の視線計測から、運転士の運転操作の実態把握を行った。障害物は、線路中央に白色の四角形を配置した。試験には、９名の被験者が参加した。9 名は 20 代から 50 代の男性で、それぞれ別の事業者における運転経験を持つ。

試験結果を図２～図５に示す。図２及び図３は低速及び高速で走行中に障害物を発見した際の、障害物から警笛及びブレーキの開始点までの距離である。低速では 200m 程度、高速では 140m 程度であった。試験中、警笛を鳴らさない被験者が見られたが、障害物が警笛に反応する動物等ではないと認識できた場合には警笛をあえて鳴らさないとのことであった。図４及び図５は、図２及び図３のブレーキ操作をしたときのブレーキ開始時点からのブレーキの強さを表す。高速の場合はすぐに強いブレーキをかけているが、低速の場合は障害物の様子を見ながら直前で停止できるようにブレーキ操作をしていることがわかる。表２に、視線計測によって求めた障害物を視認してからブレーキ操作を行うまでの時間差を示す。低速、高速によらず平均時間は２秒程度であった。この時間と走行速度を考慮すると、本試験で被験者は障害物の 200m 程度手前で検知していることがわかる。

以上より、運転士には前方監視義務はないものの、道路運送車両の保安基準の細則を定める告示第 64 条を参考にした「200m の距離から確認できる能力をもって従来と同等の性能を有していると評価すること」

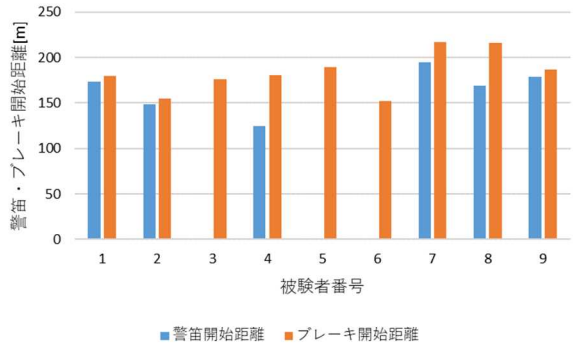

図２　警笛・ブレーキ開始距離（35km/h で走行）

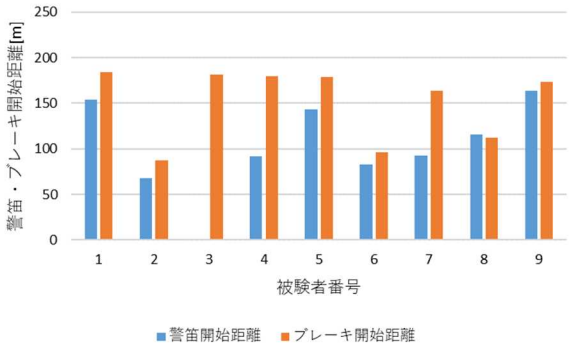

図３　警笛・ブレーキ開始距離（70km/h で走行）

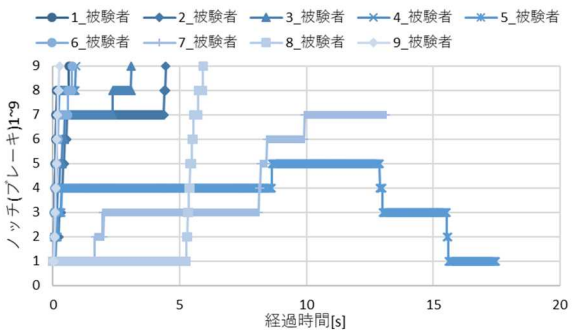

図４　ブレーキの強さ（35km/h で走行）

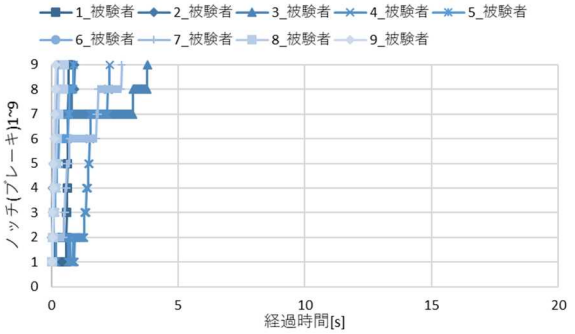

図５　ブレーキの強さ（70kkm/h で走行）

の有効性が確認できた。但し、本試験は見通しや天候等の条件が良い場合のみであること、シミュレーションであるため現実の見え方と異なる場合があることを考えると、本結果のみで従来と同等の性能を有していると判断するには注意を要する。実際に評価する際には、とりまとめにあるように、カメラ・センサ類の性能を線路の環境等を踏まえ総合的に検討する必要がある。

表２　視認とブレーキ操作の時間差

	70km/h の場合	35km/h の場合
最小時間（秒）	1.2	0.8
最大時間（秒）	4.8	3.9
平均（秒）	2.8	2.1

５．まとめ

既存の一般的な鉄道に自動運転を導入する際の安全性評価手法の検討として、装置が担う機能に変更がある場合の評価の考え方を整理した。また、今後導入が期待されるカメラ・センサ類の評価基準として、従来と同等の性能を有していることを、踏切における道路運送車両の非常信号用具の灯火の基準を参考に示し、シミュレータでの試験によりその数値の妥当性を示した。但し、見通しや天候等の条件によっては検知できない可能性もあるため、実現にあたっては、他の方策を組み合わせて総合的に検討する必要がある。

今後は、鉄道における自動運転の評価手法について引き続き検討を行いたい。

参考文献

1) 工藤ら，“新しい列車制御システムを対象とした安全解析について”，交通安全環境研究所フォーラム 2021，pp87-88
2) 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
3) 東武鉄道プレスリリース，“自動運転に必要な障害物検知システムを営業列車に仮設搭載し検証試験開始”，（2022）https://www.tobu.co.jp/cms-pdf/releases/20221031100820y5Sr1uRpVkiyGlekyo53A.pdf
4) 工藤ら，”鉄道における自動運転の安全性評価に向けた運転業務の見える化に関する取組”，交通安全環境研究所フォーラム 2022，pp.59-60
5) 工藤ら，“鉄道の自動運転 GOA3,GOA4 に使用する車上カメラ・センサ類の安全水準に関する考察”，交通安全環境研究所フォーラム 2023，pp.69-70