

軌道回路や地上信号機を不要とした 地方交通線向け列車制御システム

寺田 夏樹* 野村 拓也* 中村 一城**
志賀 豊*** 山中 浩司***

Train Control Systems for Secondary Lines without Track Circuits or Wayside Signals

Natsuki TERADA Takuya NOMURA Kazuki NAKAMURA
Yutaka SHIGA Kouji YAMANAKA

To reduce the maintenance cost, we develop a new train control system for secondary lines without track circuits or wayside signals. In this system, each of the train position is obtained from absolute position information given by beacons and accumulation of tachometer output. The central train control unit collects all of the train positions via radio equipped only at stations, manages the routes and blocks between stations, and gives the movement authorities to the trains via radio. We installed the prototype system at a commercial line and executed the test run to verify the system functions.

キーワード：地方交通線向け列車制御システム、無線式、ATS-Dx、車上位置検知、車内表示

1. はじめに

列車を安全に運行するために列車制御システムは欠くことはできない設備である。地方交通線においては、少ない設備で安全を確保できるシステムが求められる。現在、列車密度の低い地方交通線において広く採用されている列車制御の方法として、特殊自動閉そく方式がある。この方式のうち、連動駅の地上装置と車載器との間で無線通信を行うことによって信号機を制御する電子符号照査式（電子閉そく）については、開発から30年以上が経過し、一部装置の保守が困難という状況となっている。

鉄道総研では過去に、電子閉そくシステムと同等の機能を持ち、置き換えが可能な「拠点無線式列車制御システム」を開発した¹⁾。このシステムは、駅ごとに設置されている連動装置、軌道回路、地上信号機等の既存の設備をできるだけ活用することで、移行が容易である長所があり、既にJR西日本の境線で実用化されている。

これに対し、システム全体の更なるコスト低減を図るため、軌道回路や地上信号機などの地上設備を省略し、設備の維持管理にかかるコストを削減することを目標とした新しい地方交通線向け列車制御システムの開発を行っている。本報告では、本システムの機能・概要について述べたのち、工場内および実線区での検証試験の結果を報告する。

* 信号・情報技術研究部 信号システム研究室

** 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室

*** 九州旅客鉄道株式会社

2. 新しい地方交通線向けシステムの概要

2.1 システム構成

本地方交通線向け列車制御システムは、以下に示す方針で開発を行った。

- ①地上信号機を省略し、車内に開通情報を表示する。
 - ②軌道回路を省略する。代わりに地上子による列車位置確定および速度発電機による距離積算を行う機能を持つATS-Dxを活用する。
 - ③地上と車上間の無線通信は従来の連動駅に相当する駅の構内においてのみ行う。
 - ④列車在線位置の区分は、駅のホームトラックおよび駅間とする。
 - ⑤進路制御は中央装置からダイヤに従って自動的に行う。また、各駅に連動装置は設けず、中央管理装置からの指令により進路制御を行う集中連動方式とする。
- なお、地上信号機・軌道回路を省略することから、システムを簡素化するため、駅における列車の分割・併合は行わず、駅構内での入換も行わない前提とした。これらを実施する必要がある場合は、実施する箇所をシステム範囲外とし、従来の連動装置、地上信号機、軌道回路等を併用することで対応が可能である。

これを実現するためのシステム構成を検討した。地上設備の概要を図1に示す。また、車上設備の概要を図2に示す。システムを構成する各装置の機能概要は下記のとおりである。

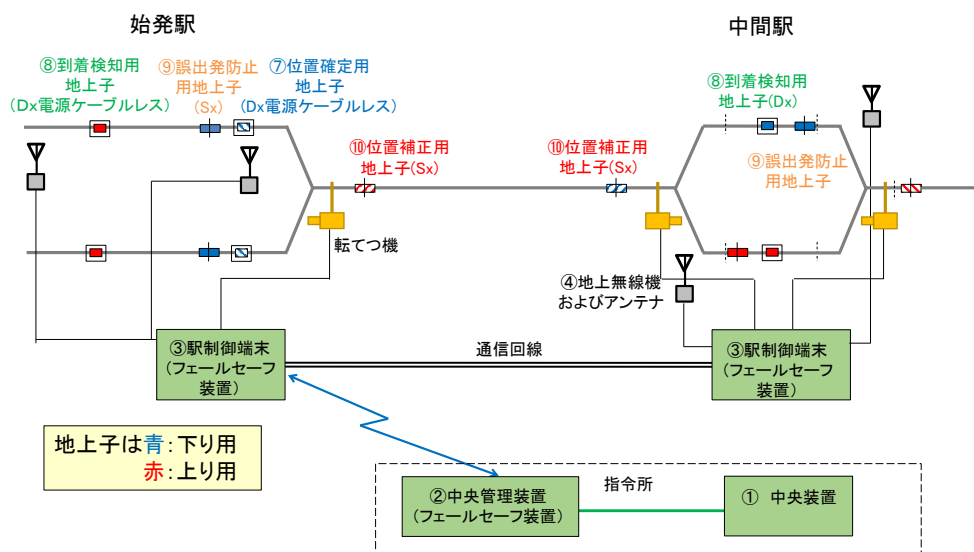


図1 システム構成（地上）

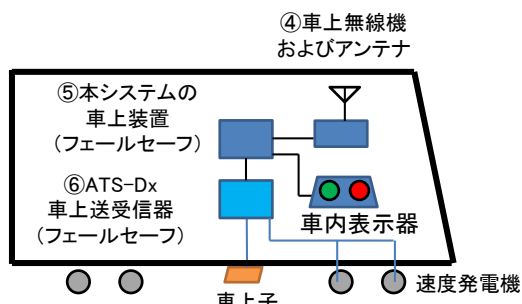


図2 システム構成（車上）

- ①中央装置：ダイヤ情報や異常時の確認情報を入力する。また、各列車の在線位置を表示する。
- ②中央管理装置：中央装置からの進路要求や線区内の各列車の状況に基づいて、進路制御に関する判断を行い、制御情報を各駅制御端末に送信する。
- ③駅制御端末：制御情報に基づき、転てつ機等の制御を行う。また、中央管理装置－車上装置間の情報の中継を行う。
- ④無線機：中央管理装置から駅制御端末経由で送られてくる進路に関する情報を、車上装置に伝送する。また車上装置から列車位置や車上装置 ID を駅制御端末経由で中央管理装置へ伝送する。
- ⑤本システムの車上装置：車上無線機・地上無線機・駅制御端末を介して、中央管理装置に列車番号、車上装置 ID、ATS-Dx 地上子を通じた情報等を送信する。また、開通情報の表示を行う。
- ⑥ATS-Dx 車上送受信器：既存の ATS-Dx と同様に地上子からの情報に基づく保安制御を行う。また、ATS-Dx 地上子からの位置情報や速度発電機による距離積算から自列車の位置を把握し、装置が持つ線路データベースに基づき、分岐の制限速度超過の防護、駅の誤

通過の防護等をパターン制御によって行う。

- ⑦位置確定用地上子：始発駅とする列車が存在する駅において、その列車が出発していく進路に設置する。ATS-Dx 電源ケーブルレス地上子を用いる。これを通過する際に車上装置が現在位置を得ることができる。
- ⑧到着検知用地上子：駅の停車位置付近に設置する。ATS-Dx 電源ケーブルレス地上子を用いる。列車がこの地上子を通じた際に、車上装置から地上へ通信を行うことによって、地上側で列車の到着検知が行われる。この地上子も、車上装置に現在位置を与える。
- ⑨誤出発防止用地上子：従来の出発信号機の直下地上子に相当する ATS-Sx 地上子を設置する。既設の直下地上子を転用することを基本とし、列車が駅を出発するための進路が確保されていない状態で地上子を通じた際に非常停止させる。
- ⑩位置補正用地上子：ATS-Sx 地上子を使用する。列車がこの地上子を通じた際、自列車位置を補正し（補正值は線路データベースに持たせる）、分岐の制限速度超過の防護等適切に行う。

本システムに適用する無線システムは、駅構内をカバーする必要がある（全線をカバーする必要はない）こと、無線機器の新規開発が不要もしくは軽微な改修で利用可能であること、免許不要であることが望ましいなどの条件を考慮した上で選定する必要がある。ここで述べる試験システムでは比較的干渉波が少なく、かつ直線性のより強い 5.6GHz の無線 LAN (IEEE802.11a) を採用する方針で基本構成の検討を実施した。なお、無線 LAN を採用することにより、本システムの通信回線を利用して IP 電話による音声通信が可能となる。

2.2 動作概要

システムの基本的な動作を以下に示す。

- ①始発駅に止まっている車両の車上において、車上装置を立ち上げ列番を入力する。この時点では車上装置は位置未確定状態である。車上装置は車上装置 ID と列車番号を地上へ送信する。中央管理装置は、列車番号とダイヤに基づき列車のための進路を要求し、進路の設定を駅制御端末に指示する。
- ②進路設定が行われた後、中央管理装置から車上に開通区間を送信すると、車上装置は進路開通を表示する。乗務員は表示にしたがい列車を出発させる。
- ③位置確定用地上子通過時に、車上送受信器が位置確定状態となり、ATS-Dx の機能に基づいたパターン防護が行えるようになる。同時に、車上装置 ID と列車番号を再度地上に送信する。中央管理装置は、①の時点で受信した車上装置 ID および列車番号との照合を行い、正当な列車が出発したことを確認する。
- ④列車が現在占有している閉そくの終端（従来の出発信号機相当の位置）から一定距離外方に到達したときに、車上装置は停止パターンを発生し、駅を誤って通過することを防止する。同時に、停車位置が近付いていることを乗務員に示す。
- ⑤到着駅の到着検知用地上子を通じた際に、車上装置は地上子を通じた情報、車上装置 ID、列車番号を、中央管理装置に伝達する。中央管理装置は、受信した車上装置 ID が、③の時点で受信した車上装置 ID、列車番号と一致していることを条件に、出発駅のホームトラックおよび駅間の閉そくを解錠する。到着検知用地上子の通過から一定時間経過後に、車上装置が進路未開通を表示する。

なお、本システムにおいては、列車が出発する前の進路設定の時点で、出発駅のホームトラックから次に停車する駅のホームトラック（従来の出発信号機相当の位置）までの閉そく区間を一括で確保することとした。途中駅を運転停車せずに通過する場合は、出発駅のホームトラックから次の停車駅のホームトラックまでを一括で確保する。電子閉そくシステム等の既存のシステムでは、列車の出発後に停車駅の場内進路を確保することが一般的であるので、この点は大きな相違点となる。

本システムにおいては軌道回路や連動装置が省略されるため、これらの条件を使用して制御を行う踏切（半自動制御の踏切）については、制御方法を変更する必要がある（踏切制御子の条件のみで制御を行う自動踏切には影響しない）。しかし、列車のホームトラック在線情報や、進路確保の状態に基づき、中央管理装置からの指令のもとに駅制御端末から従来の軌道回路や連動装置の条件に相当する条件をリレーで出力させることで、踏切制御理

論を極力変更しないこととしている。

2.3 折り返し時の処理

ATS-Dx 車上送受信器では折り返し時に運転台を交換するときや留置する場合には一旦電源を切るが、これに伴い、位置情報が失われる。再度電源を投入した時点では位置情報は失われたままであり、在線している番線も認識できない。さらに車上装置をそれぞれの運転台に設置した場合、運転台を入れ替えることにより同じ列車であっても車上装置の ID が変わることになる。

これに対して本システムでは、中央管理装置で列車が到着した情報を在線状態として記憶するとともに、あらかじめ列番と対応する車上 ID をダイヤ情報に含めて登録しておくことで、車上装置が位置情報を失った場合でも地上側で在線する列車の車上 ID を把握できるようにしている。

2.4 システム境界での制御について

地方交通線においても、隣接する他線区への乗り入れなどを想定すると、システム境界における制御について検討する必要がある。

他のシステムとの境界となる駅を「システム境界駅」と定義する。システム境界駅構内については、既存の連動装置の管理下とし、構内の進路については本システムでの制御対象外とする。

ただし、システム境界駅から本システム制御区間の間における閉そく制御や車内表示のため、駅制御端末にインタフェースを設けて、連動装置と本システムの中央管理装置との間で閉そくの設定状態や進路制御状態、進路開通情報などの情報伝送を行う。

また、本システム制御区間内からシステム境界駅への進入においては、本システムと既存システムが同時に動作するオーバーラップ区間を設け、本システムの制御、既存連動装置と ATS-Dx による制御の両方の制御を受け付ける。これにより、いずれかの装置が故障した場合でも、システム境界駅への進入における安全側の制御が可能となる。

3. システム故障時の安全性の考え方

前章にて示したとおり、本システムでは、出発駅のホームトラック相当から到着駅のホームトラック相当までの区間にある転てつ機を鎖錠し、さらに当該区間の閉そくを一括で確保するものであることから、装置故障発生時の閉そくの状態を保持し続けるという条件で、車上もしくは地上の装置が故障した場合でも着駅まで走行できることが特徴となっている。

各装置の故障・異常発生時については以下のような動

特集：信号通信技術

作になる。

(a) 無線伝送異常

車上装置と中央管理装置間に伝送異常が発生すると、閉そく状態の更新ができないため、車上装置と中央管理装置で関係する閉そく状態を保持する。伝送異常となった列車が関わる閉そくの状態を保持することで、当該列車が確保した閉そく区間に限って走行を継続することができる。伝送が復旧すると、閉そくの確保・解錠と閉そく状態の更新が可能となり、システムが回復する。

(b) 車上装置

本システムの車上装置あるいは ATS-Dx 車上送受信器の故障が考えられるが、いずれの装置が故障した場合でも非常停止するため直ちに危険側とはならない。

しかし、ATS-Dx 車上送受信器が故障する場合には自列車の位置を失うこと、本システムの車上装置が故障する場合には到着検知できないことなどから、通常と同じ列車走行を継続するために必要となる信号パターンが発生しないこととなり、次駅まで走行するには頭打ち速度を定めるなどの取扱いが必要となる。

(c) 中央管理装置

中央管理装置が故障した場合は、新たな進路設定ができなくなるだけでなく、全ての列車の位置が失われる。そのため、全ての列車を駅に収容して在線の確認を行い、全ての列車の位置と列車番号を関連付けて初めて復旧した状態となる。この関連付けの方法については、手入力する方法や、各列車の車上装置が健全であれば、位置と列車番号を無線通信により伝達する方法が考えられる。

(d) 駅制御端末

駅制御端末が故障する場合は、進路設定時の転てつ機制御ができなくなることに加えて、車上-地上間で伝送断となる。閉そくが確保され転てつ機が鎖錠されているという条件下であれば、(b)の無線伝送異常と同様、確保した閉そく区間に限って走行を継続することが可能である。

以上より、取扱いを定めて運用することで、システムの故障が直ちに危険事象となることはないと考えられる。

4. システム検証試験の概要

これまでのシステムの基本機能や、付加機能について検討した結果を、「システム基本」としてまとめた。このシステム基本に従って、装置を試作し、メーカー工場での機能試験、および車両工場試運転線および営業線での走行試験を実施した。

メーカー工場での試験では、通常時の機能、異常時の機能等を検証したが、特に進路制御の競合時や異常時の挙動について重点的に実施した。

4.1 工場内試運転線試験

まずは3駅2区間分の装置、無線機、地上子を400mの長さの試運転線に設置し、車上装置を車両に仮設して現車による走行試験を行った。駅間の通信回線については、光ファイバを敷設して対応した。ここでは1駅毎の走行を通じた基本機能の確認、すなわち駅間の閉そく制御および進路制御が正しく行われるか、その時に車内の表示が正しく行われるかを中心に実施した。その結果、想定したとおりのシステムの動作を確認することができた。また、誤出発防護、列番入力誤り時などの動作についても確認した。

ただし、仮想駅の無線エリアがオーバーラップしていたため、実運用に近い無線環境が構築できず、列車が駅間に進出した際の無線機の接続断、列車が駅構内に進入した際の再接続といった動作の検証ができなかった。

また、ダイヤ管理機能を実装しなかったため、留置時や折返し時の車上装置のIDを管理する機能がなく、折返し時に運転台を交換して車上装置IDが変わり列車の位置が未確定状態となったタイミングで、正しい番線に在線していることを確認する機能の検証ができなかった。

4.2 本線試験

試運転線試験時の課題であった実際の沿線環境における無線環境の構築とその下での制御の確認、さらに実用時に必要な折返し機能やシステム境界での制御の検証を行うことを目的として、営業線に装置を仮設して機能検証のための現車走行試験を実施した。試験においては、無線環境だけでなく、駅間の通信についても既設通信回線をデジタル化して試験に臨み、本システムの基本となる各拠点での駅制御端末～車上装置間の無線通信および駅制御端末～中央管理装置間の通信機能の確認を行った。

4.2.1 試験設備概要

試験区間は25kmにわたる4駅3区間であり、このうち1駅が他線区との接続駅である。システムの全体構成を図3に示す。うち1駅に中央管理装置および中央装置、各駅に駅制御端末およびIP電話機を設置した。

また、2.1節で示した4種類の地上子を設置した。ただし、仮設規模を小さくするため、位置確定用地上子については、両端駅の出発を1線に限定して、両端駅に1箇所ずつの設置とし、誤出発防止用地上子については、機能検証に最低限必要な数として1箇所へのみの設置としている。

4.2.2 通信環境の構築

本稿の試験システムでは地上-車上間の伝送にIEEE802.11a準拠の無線機を用いる。車上無線機は、試験車両の両方向の運転台に1台ずつ搭載し、進行方向側の無線機を使用した。また、地上無線機は、以下の条件を満足できるように6Mbps、200m程度の通信が可能と

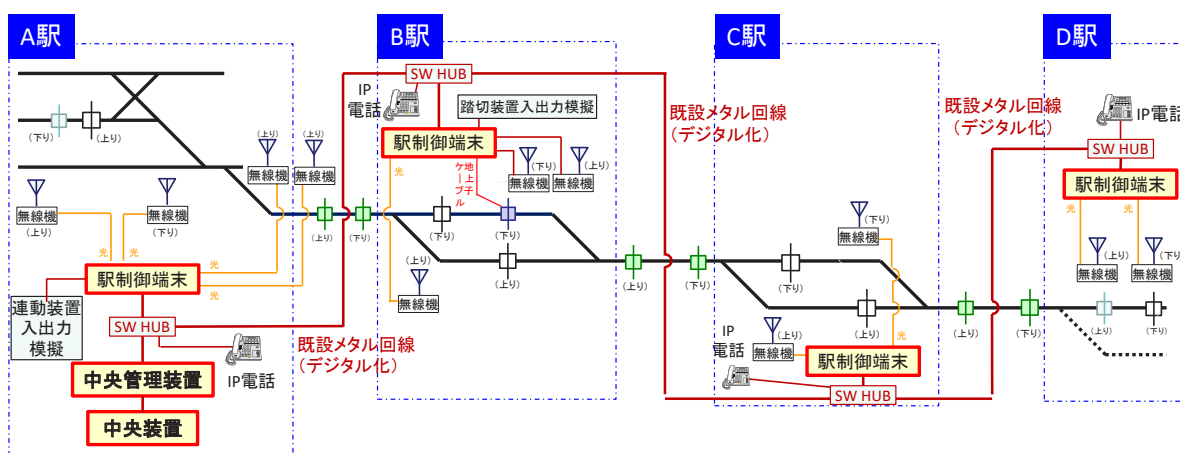


図3 現地試験システム構成（地上）

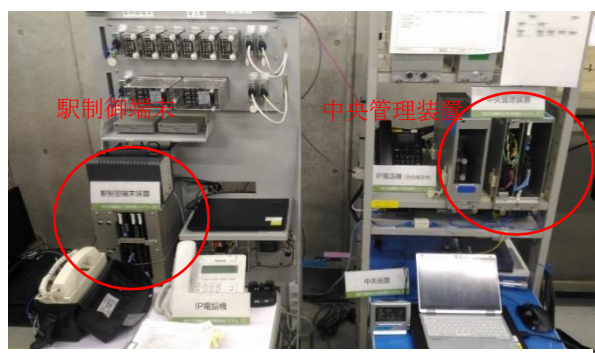


図4 駅制御端末および中央管理装置

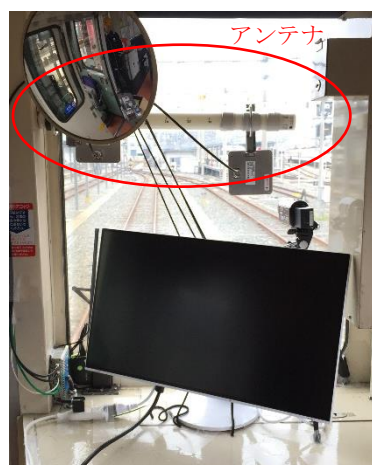


図5 車内アンテナおよび表示器

なるよう設置した。

- ・ 車上装置が到着検知を行った際に、その情報を無線で地上に伝送できること
- ・ 車上装置が停目位置で停止中に、進路開通等の情報を無線で車上に伝送できること

アンテナについては、通信可能なサービスエリアを確保するため、車上・地上共に指向性アンテナを使用することとした。また、下り列車と上り列車で異なるサービスエリアを確保する方法として、今回の試験では車上無線機・地上無線機とも下り列車用と上り列車用を分け、異なるSSIDを設定した。

本システムの中央管理装置、駅制御端末、車上装置や、地上一車間間の音声通話に用いる SIP (Session Initiation Protocol) サーバ (IP 電話サービスの管理・制御を行うサーバ)、IP 電話機は、IP ネットワークを構成して相互に接続する。本試験を実施した区間では、既設のメタル回線を用いて中央管理装置と各駅の駅制御端末間のネットワークを構成するため、連動駅間にデジタル伝送用の xDSL モデムを用いて接続する。車上装置と車上無線機間、駅制御端末と地上無線機間は、LAN ケーブル (ツイストペアケーブル) を用いて接続する。ただし、駅制御端末と地上無線機間の距離が長い箇所については、メディアコンバータを介して光ケーブルにより接続する。



図6 車内表示器の表示例

なお、必要な箇所にはスイッチングハブを用いている。また、連動駅間の通信に使用した xDSL モデムについては、1 対の心線を必要とする SHDSL モデムを使用し、伝送帯域を 1.5Mbps とした。

なお、制御に必要なデータは 15 駅、30 列車を制御する場合、中央管理装置→各駅→各列車、各列車→各駅→中央管理装置とも 60～80kbps であり、1Mbps の帯域が確保できれば実用上問題ない。今回の試験の規模は 4 駅、2 列車と小さいため、制御情報量はさらに小さいが、地上一車間間の通話機能を試験するため、前述の伝送帯域を設定した。

特集：信号通信技術

4.2.3 車上設備

車上の設備については、ATS-Dx 車上送受信器、本システムの車上装置、無線機という構成である。ATS-Dx 車上送受信器は試験用のものを既設の装置と繋ぎ替え、本システムの車上装置と接続した。車上アンテナは、両運転台の助手側窓の内側に水平ならびに垂直偏波の2種類を仮設した(図5)。なお、車内表示器の表示例を図6に示す。

4.2.4 検証結果

試験での検証項目を表1に示す。試験試番は7往復14試番を実施した。現車走行試験の試番を通して、閉そくや進路の制御、車内表示といったシステムの基本機能、システム境界駅や駅通過に伴う現示の制御、取扱いを誤った場合や、一部の装置が故障したときのシステムの挙動について、仕様書通りの動作であることを確認した。また、通信についても、若干の安定性に関する課題が発生しているものの、今回構築した構成で、おおよその制御を行うことができ、予定していた検証項目については問題ないことを確認した。

通信範囲についてはアンテナを設置した箇所の見通しによるため、値に幅がみられるが、おおむね300m以上の距離が得られた。1箇所のみ曲線で見通しが悪いため180m程度であった。なお、直線で見通しが確保できる場合には、1km以上の通信範囲が得られた。

表1 走行試験検証項目一覧

確認事項	結果
車上DBの検証	○(整合性を確認)
1駅間の走行制御	○(一連の制御を確認)
通過制御(現示アップ有無)	○(一連の制御を確認)
車内表示	○
システム境界駅での挙動	○
進路競合時の制御	○(進路が確保されない)
列車交換時の制御 (1列車は模擬車上装置で実施)	○(両列車が制御される)
折り返し時におけるID管理	○
異常時の制御(地上装置停止)	○(安全側の制御)
異常時の制御 (無線機停止・通信回線断)	○(安全側の制御)
異常時の制御(車上装置故障)	○(安全側の制御)
列番誤入力時の動作	○(進行が現示されない)
誤出発防護機能の確認	○(非常ブレーキがかかる)
緊急停止情報送受信機能	○(送受信可能)
無線伝送距離	300m以上 ※最大800~1.2km
位置検知精度	○(距離誤差0.2%)

4.3 今後の課題

検証試験を通じて、想定した通常時および異常時の挙動については全て問題がないことを確認した。しかしながら、いくつかの課題があることがわかった。

①復旧時の取扱いの整理が必要な事項

システムの挙動としては安全側であるものの、その後の復旧の取扱いの整理が必要な事項が発生した。例えば、無線通信断あるいは通信回線断が発生している状態で列車が到着したのち、そのまま運転台を交換してしまうと、閉そくが解錠できなくなる。

②仕様の作りこみが必要な事項

ダイヤ管理については、仕様の作りこみが必要である。

③安定性の確保のための検証が必要な事項

今回汎用の無線機器を使用したため、干渉発生時の無線チャンネルの自動選択、地上無線機の切替について、安定性を確保するための構築法の整理が必要である。

4.4 まとめ

「システム基本」に従い、実車による検証試験を実施し、機能の確認を実施した。また、構築した無線環境で、システムを制御できることを確認した。一方で異常時の復旧取扱い、実用化に向けた新たな課題等が見つかり、これらを解決して最終的な仕様として取りまとめる必要がある。

5. おわりに

軌道回路や地上信号機といった地上設備を省略し、設備の維持管理にかかるコストを削減することを目標とした新しい地方交通線向け列車制御システムの試験を実施した。今後本システムの実用導入に向けて、試験等で抽出された課題等については2019年度中に解決案を提案して最終仕様にまとめる方針である。また、本システムの導入による投資効果についても、将来性を含めて提示していきたいと考えている。

謝辞

本研究における検証試験の実施にあたり、関係者には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

文献

1) 平栗滋人, 福田光芳, 藤田浩由, 小野雄人: 閑散線区に適した拠点無線式列車制御システム, 鉄道総研報告, Vol.25, No.5, pp.5-11, 2011