

閑散線区に適した拠点無線式列車制御システム

平栗 滋人* 福田 光芳**
 藤田 浩由** 小野 雄人**

Train Control System for Secondary Lines using Radio Communications in Specific Area

Shigeto HIRAGURI Mistuyoshi FUKUDA
 Hiroyuki FUJITA Yuto ONO

The block system applying electronic token has been used in secondary lines since 1980s, and it has contributed to efficient administration. However, it is required to develop an alternative system at present due to termination of supply of spare equipment. Therefore, we have developed a new train control system applying 2.4GHz band radio, for which the license is not required. The system does not require replacement of the whole system, and has an excellent performance in system migration, because conventional equipment is used as much as possible. Simultaneously, it is easily able to introduce extended function and improve problems of conventional system. We performed a field test of the system, and confirmed that the system performed basic functions without any problems.

キーワード：列車制御，閑散線，閉そく，踏切防護，拠点無線式

1. はじめに

現在、主に閑散線区で使用されている列車制御システムに、国鉄からJRへの移行期に開発、導入された電子閉そく装置¹⁾と呼ばれるものがある。電子閉そく装置は、閑散線区の運営の効率化、省力化に効果を発揮したが、近年、設備が老朽化していること、交換部品の入手が困難になってきていることなど、その維持に課題があることが指摘されている。このような状況から、電子閉そくに代わって導入可能なシステムを早期に開発することに對する要求が高まっている。

そこで、筆者らは汎用無線技術を使用した「拠点無線式列車制御システム」の開発を行った。本稿では、このシステム開発の基本方針、基本構成、機能検証結果について述べる。

2. 列車制御システムにおける無線利用

無線を利用した列車制御システムの研究開発は、1990年前後から国内外で活発に行われるようになった。具体的には、地上と車上の間の連続的な通信や、軌道回路によらない列車位置検知などを特徴とする CARAT²⁾ や ATACS³⁾、あるいは欧州における ERTMS/ETCS⁴⁾ が良く知られている。一方、鉄道総研で開発したバリス式列車検知形閉そく装置 (COMBAT)⁵⁾ や、ERTMS/ETCS

* 信号通信技術研究部 (列車制御)

** 信号通信技術研究部 (信号)

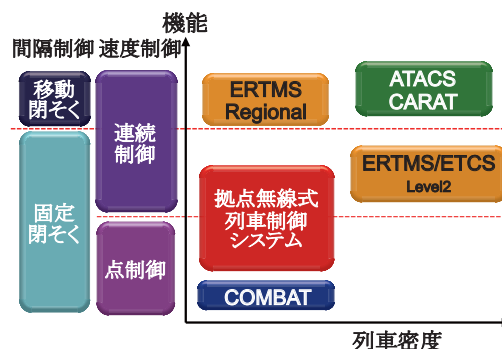


図1 無線列車制御システムの関係

における GSM-R による無線伝送などの基本技術を利用した、ERTMS Regional⁶⁾ など、閑散線区を主な対象とするものも存在する。

図1は、これらのシステムの関係的概念的に示したものである。拠点無線式列車制御システムは、後述するように、電子閉そくの置換えの他、速度照査式ATSとの連携による速度制御機能の実現などの発展性を持つため、機能的にはCOMBATよりやや上位に位置付けられる。

3. システム開発の基本方針

新規に列車制御システムを検討する際、CARATやATACSなどのように車上主体型のシステムとすることで、地上設備をできるだけ削減する方向性が考えられる。この場合には、車上で位置検知を基本として、車内信号を採用することが主体となる。しかし、このようなシステム構成とした場合、導入する線区全般に亘って全面的な

特集：信号通信技術

設備更新が必要となるため、導入のタイミングで相応のコストが必要となる。また、システムの取扱いに関しても導入前とは異なる点が多くなることも想定される。これに対し、実際にはまとまった設備投資が困難であり、段階的に機能を向上させていくことへの要求も存在する。

これらを考慮して、本システムの開発においては、以下の3点を基本方針とした。

- ① 現行設備をできるだけ活用し、システムの移行を容易にする。
- ② 連続的な速度制御など、拡張性を持たせる。
- ③ 電子閉そくのシステム運用上の課題解決を図る。

以下に、これらの内容について述べる。

3.1 システムの移行性

システムの基本機能である閉そく機能を実現するために、無線通信機能を持つ車載器を車両に搭載し、駅構内で駅制御装置との間で無線通信を行う。無線には、免許が不要な2.4GHz帯の汎用無線を使用することとした。

また、駅構内の列車検知には軌道回路を使用し、列車走行の安全については、地上信号機とATSの機能によって確保するものとした。また、信号機や転てつ機の保安制御についても、各駅に従来と同等の連動機能を持たせ、必要によって既設の継電連動装置を利用することも可能な構成とした。

3.2 機能の拡張性

ATSを速度照査機能付きのタイプとし、車載器と接続することで、5.2で述べる踏切防護機能の実現など機能向上の可能性を確保する。特に、ATSとして鉄道総研で開発したATS-X⁷⁾を使用する場合にはハードウェアを改修することなく、ソフトウェアの一部改修だけで対応することができる。

3.3 システム運用上の課題解決

電子閉そくでは、各駅で出発時に乗務員が出発進路設定要求の押ボタン操作を行い、駅装置に車載器の識別符号(ID)が送信されることをトリガとして閉そく処理が行われるが、閑散線区ではワンマン運転の導入が進んでいることもあり、乗務員の負担軽減が望まれている。また、車載器IDと運用行路、およびダイヤ上の列車番号との対応付けをあらかじめ固定的に設定しておき、出発進路設定や運行状況の表示などに使用している。このため、車載器故障時に代わりに充当できる車載器が限られるため、運用上の制約となる場合があることが指摘されている。

これらに対して、本システムでは列車が始発駅を出発するときに、車載器IDを検出し、列車番号との対応付けなどを中央装置で自動的に行うことで、乗務員の進路設定要求操作や車載器運用の制約の解消などが可能になる。

4. システムの基本構成

拠点無線式列車制御システムの地上設備の基本システム構成を図2に、車上設備の基本システム構成を図3に示す。

地上設備は、中央装置、駅制御装置、駅無線機から構成される。

中央装置は、電子閉そくの運行表示装置に相当するものであり、運行状況の表示、進路設定機能、簡易なダイヤ管理などの機能を有する。なお、中央装置には非フェールセーフなPCレベルの装置を使用する。

駅制御装置は閉そくと駅構内の連動機能、駅無線機とのインタフェースを持つ。なお、連動機能については、図2のA駅のように、外部に設けた既設の継電連動装置で行う構成も可能である。なお、同図中のB駅は連動論理も含む駅制御装置を導入し、現場機器とのインタフェースは既設リレー架を使用する構成、C駅は全ての設備を新規に導入する構成の例である。

無線装置には、列車位置検知を無線測距(地上-車上間での無線到達時間の計測を利用)により行う列車制御システム⁸⁾で使用されている技術を利用する。駅無線機は少なくとも駅発車および到着時の閉そく処理を行う際に列車との通信が可能なエリアを確保するように配置する。始発駅などで、5.1で述べる車載器IDと列車番号の対応付けを無線測距機能により、自動的に行う場合には、2台の無線機を設置する。中間駅など、閉そく処理などに必要な情報通信だけを行う場合には、無線機を1台とする構成も可能である。無線が使用する周波数は2.4GHz帯であり、使用に際しての免許などは不要である。また、耐ノイズ性や耐妨害性を考慮して、スペクトラム拡散方式を使用する他、接続方式としてTDMA(時分割多元接続)、FDMA(周波数分割多元接続)、CDMA(符号分割多元接続)の3方式を併用している。

沿線制御装置と沿線無線機は、5.2で述べる踏切防護

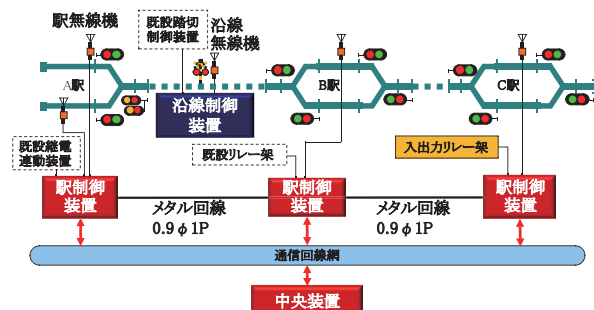


図2 地上設備の基本システム構成



図3 車上設備の基本システム構成

機能などを実現する場合に設ける装置であるが、基本的なハードウェアは駅制御装置のものと同じである。

駅制御装置間の伝送には、既設の閉そく回線を使用する。また、中央装置と駅制御装置間の伝送については、汎用の通信網などの利用にも対応できることを考えている。なお、電子閉そくの場合と同様に、中央装置を拠点となる駅の制御装置と接続し、中央-駅間の情報も駅間回線を通じて伝送する構成とすることも可能である。

車上設備は、無線アンテナと車載器から構成される。車載器は車上側の無線伝送機能を持つほか、速度照査機能を持つATSとのインタフェースを持つ。なお、車載器とATSを接続しない場合には、閉そく機能のみが実現可能である。

5. システムの機能

5.1 閉そく機能

閉そく制御の基本的な考え方は、電子閉そく¹⁾と同じである。閉そく設定時に両側の駅で車載器IDを記憶し、列車到着時に到着駅で受信したIDが、これと一致した場合に閉そくを解錠する。ただし、電子閉そくでは、車載器IDをキーとする進路設定の判断を、中央装置から必要な情報を事前に受信した駅制御装置で行っていた。しかし、駅制御装置はダイヤの時刻データを持たないため、乗務員が所定より早期に進路設定要求を行った場合に、保安上は問題ないものの、列車が早く出発してしまう事象が発生し、輸送障害に至る可能性があった。これに対し、本システムでは、出発駅で車載器IDを受信したときに、中央装置においてダイヤとの照合を行い、適切なタイミングになった場合に進路設定の許可情報を駅制御装置に送信する。これによって、列車の早期出発を防止することができる。

3.3で述べたように、本システムでは電子閉そくが必要であった、駅出発時の乗務員による進路設定要求操作を省略することを開発時の目的の1つとしている。これを実現するためには、列車始発時にシステムが車載器IDを何らかの自動的な手段で認識する必要がある。そこで、本システムで使用する無線が有する、地上無線局と移動する車上無線局との間の測距機能を利用することとした。具体的には、始発駅において発車した列車の車載器IDの移動方向を検知し、これに基づいて中央装置で車載器IDと列車番号との関連付けを行い、列車が終着駅に到着するまで追跡を行う。

始発駅で車載器IDと列車番号の対応付けを自動的に行う場合の閉そく制御の手順を図4および以下に示す。

①この状態では、車載器の電源が投入されており、かつ駅無線機の通信エリア内に在線している車両の車載器IDは駅制御装置で受信されている。ただし、この時点では各IDがいずれの列車番号に対応するかは確定していない。

②中央装置は駅制御装置からの列車在線情報(軌道リレーの復旧条件)とダイヤデータを基に、各番線に在線する列車に列車番号を割当てる。

③中央装置は、ダイヤで定められた出発時刻が近付いた時点で、駅制御装置に対して出発進路の設定情報を送信する。このとき、両側の駅制御装置は仮IDを使用して閉そく処理を行い、閉そくが確保されたことによって、出発信号機を進行に制御する。なお、仮IDには事前に定めた特定の値を使用する。

④列車は所定の時刻に駅を出発する。地上側では、車上との間での電波の到達時間計測に基づいた測距を行い、車載器IDの移動方向(駅からどちらの方面へ出発したか)を検知し、出発した列車の車載器IDを特定する。その後、両側の駅で仮IDを出発した列車に搭載される車載器IDに置換える。また、この情報は中央装置に送信され、中央装置では列車番号と車

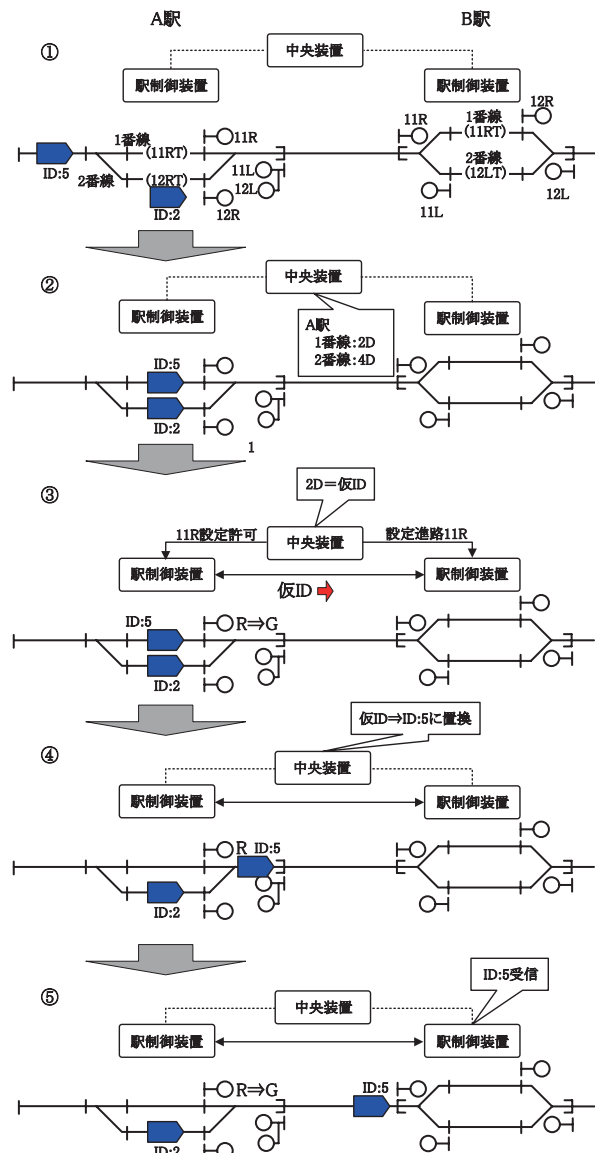


図4 列車始発時の車載器ID検知

特集：信号通信技術

載器 ID との対応付けを行う。

⑤列車が到着側の駅に接近すると、駅無線機との通信が確立し、駅制御装置は車載器 ID を受信する。その後、軌道回路条件によって、列車の到着を検知したことにより、出発側の駅制御装置との間で閉そくを解錠する処理を行う。

ここで、列車運行の安全、つまり閉そくと駅構内の連動制御は駅制御装置で担保している。中央装置における車載器 ID と列車番号との関連付けや追跡などの管理機能は、運行状況表示と設定進路の判断のために使用するものであり、保安制御に直接関与しない。

このように始発時に車載器 ID と列車番号の関連付けを行い、中央装置で記憶することで、中間の駅では無線による測距を行うことなく、列車から受信した車載器 ID を使用して、次の駅までの閉そく制御を自動的に行う。線区によっては、中間の駅で列車の始発、終着がある場合、列車番号が変更される場合、分割や併合がある場合の他、他システムとの境界駅となっている場合があり得る。このような駅では、始発駅と同様に無線測距を利用した車載器 ID 検知と列車番号の関連付けを行う。

終着駅において列車到着を検知すると、中央装置では車載器 ID と列車番号との関連付けを解除し、折返し出発時には図 4 と同様の手順の制御を行う。

また、列車の運行途中で車載器に故障が発生し、車載器の交換が必要な場合には、列車番号に関連付けた車載器 ID を置換える処理が必要になる。この場合の処理は、中央装置での係員の扱いによるものとした。この際、電子閉そくでは車載器 ID に対して各駅で設定する進路情報が固定的に割当てられていたため、充当できる車載器に制約があったが、本システムでは上記のように、列車が始発する都度、列車番号との関連付けを行う方式としているため、任意の車載器を充当することができる。

以上のような機能によって、本システムでは、列車の早発防止、乗務員による進路設定要求操作の省略、車載器運用の制約解消が実現できる。

一方、鉄道事業者の事情により、従来どおり、乗務員による進路設定要求の操作を行い、無線測距機能を使用しない構成とすることも可能である。この際、車載器の扱い順序を誤っても危険側になることはない。例えば、図 5 を例とすると、ID:2 の列車が先に要求操作を行うと、列車番号 2D には ID:2 が関連付けられる一方、ダイヤに従って出発進路 11R が構成され、誤って要求操作を行った列車に対する出発進路 12R は構成されない。万一、11R にしたがって ID:5 の列車が出発しても、関係設備は安全側に制御され、到着時に ID が不一致となり、閉そく解錠ができないことによって異常を検知できる。

なお、乗務員の進路設定要求操作を行うシステムでは、進路数の多い駅や、相反する方向への始発列車が存在す

るような駅では、電子閉そくでの番線指定でここに相当する機能を設けなければいけない場合もある。

5.2 踏切防護機能

本システムでは、車載器と速度照査機能付き ATS との連携により、列車の速度制御機能を実現できる。本節では、図 5 に概念を示す踏切防護機能を例として述べる。

閑散線区では、環境条件や車両の軽量化などによって、踏切制御子の短絡不良のため、踏切の警報制御が不安定になる場合がある。本機能は、万一踏切での警報制御が行われていない場合に、踏切手前に列車を停止させるものである。なお、踏切の警報制御自体は、現行の踏切制御子や制御装置を使用することを前提とする。この機能を実現するために、沿線制御装置と沿線無線機を設置する。沿線制御装置は、踏切制御装置から警報制御が行われている条件を受け取り、これを無線で送信する。基本的な制御手順は以下のとおりである。

- ①列車は踏切に接近すると、踏切手前に停止する速度照査パターン（踏切防護パターン）を発生する。踏切位置の情報は、あらかじめ ATS-X の車上データベースに登録しておく。
- ②踏切制御が開始されると沿線制御装置は、この条件と踏切を特定できる ID を無線で送信する。
- ③列車は②の情報を受信した場合、自身が当該踏切の始動点（点制御踏切の場合）内方に在線していること、かつ踏切防護パターンの外方に他のパターンが発生していないこと、の条件が成立した場合に、踏切防護パターンを消去する。

このような速度機能は、必要によって段階的に導入することも可能である。例えば、図 6 に示すように列車に車載器と無線アンテナを搭載し、ATS とは機能的な関連を持たせない構成として閉そくや連動機能を実現し、次の段階で車載器と ATS との接続を行うことも可能である。

ここで、3.2 で述べたように、ATS として鉄道総研で開発した ATS-X を使用する場合には、ソフトウェア改修

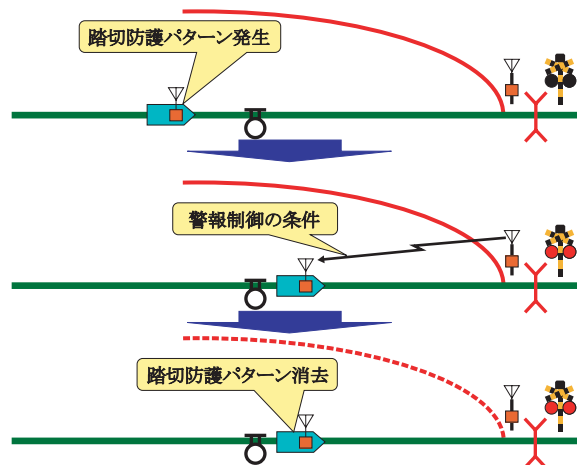


図 5 踏切防護機能

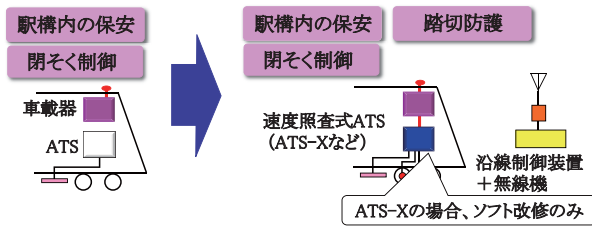


図6 段階的な機能向上の例

のみで対応可能な構成となっており、移行が比較的容易である。なお、その他のATSでも、車載器とのインタフェースを設け、踏切に対する速度照査パターンを発生する機能を持たせることで、本機能が実現できる。

ここでは、本システムでの速度制御機能として、踏切防護を例としたが、これを信号機に応用することによる停止信号の冒進防護、さらには沿線の落石など災害検知の情報が得られる場合の緊急停止制御など、より高度な列車制御への発展の可能性も併せ持っていると考えている。

6. 現地試験による機能検証

6.1 試験条件

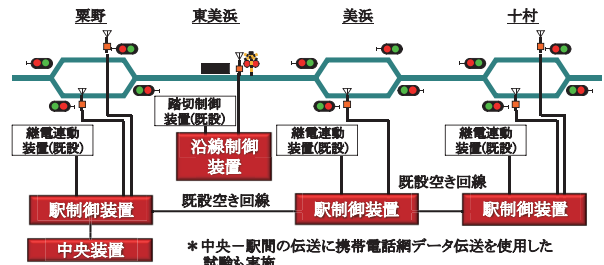
本システムの基本機能の検証を目的として、西日本旅客鉄道株式会社小浜線で試作システムによる現地試験を実施した。図7に示すように3箇所の連動駅と1箇所の踏切に地上装置を仮設した。また、試験用の車両には、図8に示すように車載器、無線アンテナ、ATS-X車上装置を仮設した。なお、試験に際しては軌道回路状態など、必要な条件を入力し、各装置の動作検証を行ったが、現場機器を実際に制御することは行っていない。

6.2 試験結果

延べ40走行の試験を通じて、表1に示すような項目についての動作確認を行った結果、所定のとおり動作することを確認した。

始発駅で無線測距機能を利用した車載器ID検知を行い、列車番号と関連付ける機能の試験時の中央装置の画面表示を図9に示す。駅構内に複数の車載器が存在しているが、列車出発により移動した車載器IDを検知し、正しく列車番号と関連付けている様子を示している。

図10には、時間経過に対する無線測距値の変化の様子の一例を示す。列車の移動に伴い、地上と車上のアンテナ間の距離が適切に計測されていることが分る。40秒を経過した辺りでデータが得られていない箇所(測距値：L1=0)があるが、500msごとに得られる測距値の内、単独のデータにおいて発生しているものであり、連続的に発生している訳ではない。なお、位置判定処理においては、値の変化量に対する合理性チェックなどを行うことで誤検知の回避を図っている。



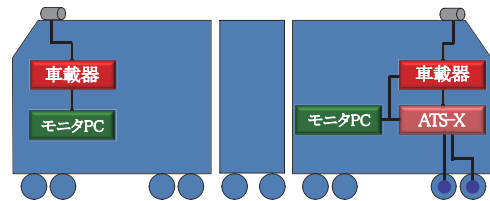
(a) 試験装置の構成



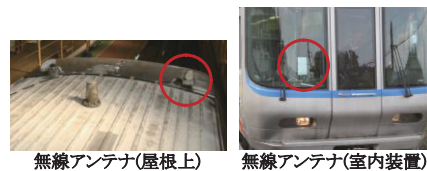
中央装置(表示画面) 無線アンテナ

(b) 試験設備の設置例

図7 地上試験装置の構成



(a) 試験装置の構成



無線アンテナ(屋根上) 無線アンテナ(室内装置)

(b) 試験設備の設置例

図8 車上試験装置の構成

図11には、踏切防護機能試験の例を示す。この試験では、踏切手前の駅に対する誤通過防止パターンを設定した。このパターンは、踏切防護パターンの内方にあり、列車の速度が5km/hとなったことを検知したときに消去される。したがって、この場合には、5.2の手順③で示した条件によって、誤通過防止パターンが消去されるまでは、踏切防護パターンが保持されるが、このとおりに動作していることがわかる。

この他、中央装置と駅制御装置間の伝送については、携帯電話回線によるデータ伝送を利用する構成についても試験を実施し、問題なく機能することを確認している。中央と駅との間の伝送にこのような汎用回線を適用した場合、一般的には既存のメタル回線の場合に比較して伝送容量の増加が見込まれるため、例えば、駅への

特集：信号通信技術

表1 現地試験での主な確認項目

| 分類 | 内容 |
|-------------------|---|
| 列車管理機能 (中央装置) | <ul style="list-style-type: none"> 進路設定タイミング判断 車載器 ID-列車番号関連付け (無線測距) 車載器 ID-列車番号関連付け (車上での扱い) 複数の車載器ID存在時の列車番号との関連付け 車載器ID-列車番号の再関連付け (車載器故障を想定。中央での扱い) |
| 閉そく機能 (駅制御装置) | <ul style="list-style-type: none"> 中央装置への進路設定要求の自動送信 隣接駅との閉そく処理 通過進路の制御 閉そく設定の取消し、再設定 |
| 踏切防護機能 (沿線・車上) | <ul style="list-style-type: none"> 車上データベースによる防護パターン発生 踏切警報条件伝送 (無線) による防護パターン消去 |
| 無線伝送 (地上・車上) | <ul style="list-style-type: none"> 無線伝送特性 室内アンテナの情報伝送 |
| 地上通信 | <ul style="list-style-type: none"> 中央-駅間の伝送 (既設メタル回線) 中央-駅間の伝送 (携帯電話データ通信) |

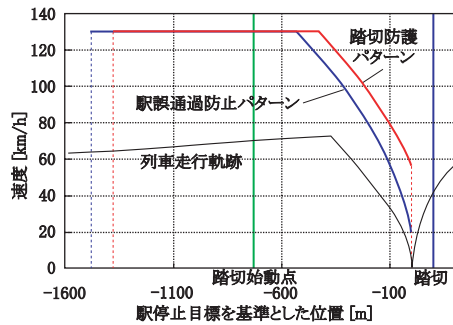


図11 踏切防護機能試験結果の例

7. まとめ

汎用無線技術を使用するとともに、既存の設備を活用した拠点無線式列車制御システムの開発を行った。電子閉そくの置換えを容易に実現するとともに、機能の拡張性を持つシステムを提案し、現地試験によって基本機能が正しく動作することを確認した。拠点無線式列車制御システムは、電子閉そくのこれまでの課題を解決するとともに、踏切防護機能などの付加によって保安度を向上させることも可能である。また、本システムは電子閉そくの置換えだけでなく、軌道回路式の特種自動閉そく線区にも適用可能であり、閑散線区に適した列車制御システムとして、有力な方式となり得るものと考えられる。

最後に、現地試験の実施に際し、多大なご協力をいただいた西日本旅客鉄道株式会社の関係各位に深く感謝申し上げます。

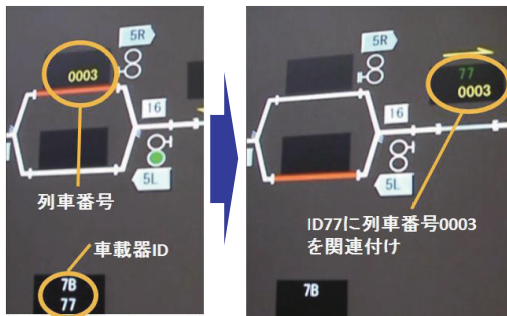


図9 車載器IDの移動検知と列車番号との関連付け (中央装置の表示)

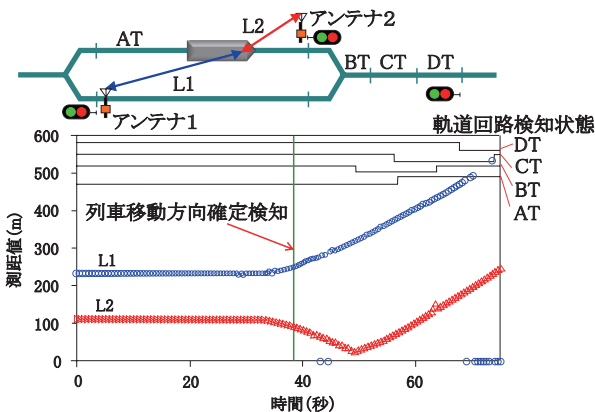


図10 無線測距結果の例

サービス情報提供なども含めた多様な機能を低コストで実現できることが期待される。

また、図8 (b) に示すような、車上の無線アンテナについては室内設置タイプのもも一部の試験に使用した。通信範囲が列車前方に限定される制約があるが、駅構内での閉そく制御を行う上では、十分な性能を確認できることが確認でき、簡易な用途であれば適用できる見通しを得た。

文献

- 1) (社)日本鉄道電気技術協会: 鉄道技術者のための電気概論 信号シリーズ2 閉そく装置, 1993
- 2) 長谷川豊: 列車運転制御の新しい方向とCARATシステム, 鉄道総研報告, vol.7, No.5, pp.1-9, 1993
- 3) 武内浩一: 無線による列車制御システム (ATACS), 鉄道と電気技術, vol.17, No.4, pp.24-27, 2006
- 4) UIC, Compendium on ERTMS, Eurail press, 2009.
- 5) 佐々木達也, 西堀典幸, 平栗滋人, 岩田浩司, 平尾裕司: 列車検知に無線を用いた閉そく装置 (COMBAT) の開発, vol.16, No.7, pp.9-14, 2002
- 6) 菅原宏之, 伊藤聡, 石瀬裕之: 閑散線区向けのERTMS (ERTMS-Regional), 鉄道と電気技術, vol.21, No.7, pp.27-33, 2010
- 7) 藤田浩由, 新井英樹, 佐藤和敏, 門脇雅明, 貞苅路也: 車上データベースを使用したATS-Dxの開発, 鉄道総研報告, vol.24, No.3, pp.5-10, 2010
- 8) 三枝秀隆: 無線列車制御システム (SPARCS) 概要, 鉄道と電気技術, vol.17, No.7, pp.19-23, 2006