

# 地点検知と連動機能を車上搭載した 列車制御システム

佐々木 達也\* 北野 隆康\*\*

Development of a Train Control System by Using the On-board Interlocking

Tatsuya SASAKI Takayasu KITANO

We have considered a basic concept of a train control system which can reduce the equipment for the signal system belonging to the station. In this system, an on-board train positioning device detects the train position by using wireless IC-tags on the sleeper. Furthermore, the on-board interlocking device controls the point machines belonging to the reserved route at this detecting position. This control is using the radio-communication. Therefore, this system can omit the equipment of the station, such as the signal device, the interlocking device, and the track circuits. In this paper, the author reports the specifications of the system and the results of the receiving test of the wireless IC-tag.

キーワード：車上連動，IC タグ，進路制御，運転保安，車上地点検知

## 1. はじめに

地方交通線のような、列車間隔が大きな線区では、駅部、駅間、および進行方向といった大きな区分の条件で在線管理ができれば筆者らはよいと考えている。このような大きな区分の範囲を排他的に特定の列車に占有させるならば、同列車の車上から、区間内の転てつ機を直接安全に転換することが可能となる。大きな区分で一括して鎖錠するので、現行のように細かい区分での列車検知が不要になり地上設備の削減が可能である。ただし、車上に連動機能を搭載し進路制御を行うには、列車間の進路構成情報の共有が必要である。この機能は、必要な情報通信インフラを用意することで様々な形態で実現できるが地方交通線に適用することから、中央に在線管理装置を設置して走行区間の登録を各列車から行うことで実現する。なお、中央との通信は、駅および駅近傍で進路の制御を行う際のみであり、車上地上間の無線通信は、圏外を許容する。

構成済み進路の防護、および着点到着後の進路の復旧は、続行列車および対向列車間の進路確保のため、安全に行う必要がある。上記のとおり車上で検知した位置情報<sup>1)</sup>をもとに走行予定の閉そく区間の登録を中央で行うことで、列車間で直接情報交換することなく、進路の確保および復旧が可能である<sup>2)</sup>。本稿では、開発した車上地点検知型列車制御システムの進路制御の基本論理および安全性手法<sup>3)</sup>について述べ、本システムの要である車上地点検知デバイスの受信特性試験結果について報告する。

\* 前 信号・情報技術研究部 列車制御研究室  
(現 株式会社ジェイアール総研電気システム)

\*\* 信号・情報技術研究部 列車制御研究室

## 2. 開発コンセプト

### 2.1 連動論理

既存の連動論理は、PRC (Programmed Route Control) による進路制御やてつ操作などの進路要求で、転てつ器を開通方向へ転換して鎖錠を行い、転換表示および鎖錠表示により信号現示を行う。連動機は、進路構成したのち、仮にこの復位操作を行っても、接近鎖錠、進路鎖錠、およびてつ鎖錠、などの鎖錠により構成した進路を維持し安全を確保する。さらに、当該進路を列車が進出したこと、着点に到着したことを確実に検知して、後続列車の進路構成のために、安全な解錠を行うことが必要である (図1)。

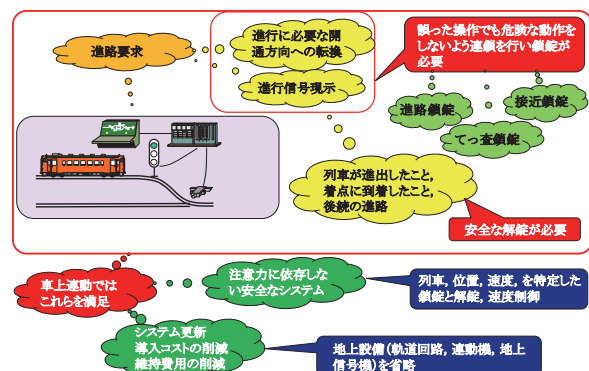


図1 連動論理の考え方と本研究の取組み

開発システムでは、上記の考え方を満足する必要があるが、絶対的な位置、速度を特定した制御により時間鎖錠や保留鎖錠が不要となるなど、論理の簡易化が可能で

特集：信号通信・運輸

ある。また、地方交通線では、更新システムに対して導入コストの削減、維持費用の削減が求められ、軌道回路、連動機、などの地上インフラの削減を実現する。さらに、設備を削減しても運転士の注意力に依存しないシステムとすることが必要であり、列車間の排他的制御と車上で列車位置および速度情報を用いた走行範囲内の設備の車上から直接制御と走行範囲内で確実な停止を可能とする速度制御を行うことで安全性の確保を実現する。

2.2 地点検知と位置検知

列車の在線情報は、2.1節で記述したように接近鎖錠、進路鎖錠、てっさ鎖錠、などの鎖錠により列車の進路を区分した小さな区間で保持していたことから、列車の車軸で直接軌道短絡した軌道回路情報が必要であった。開発システムの連動機能は、1章で記述したように、大きな区分の範囲を占有して、車上から転てつ機の制御などを行うことから、区間内に在線していることが確実に検知できれば、細かい位置情報は不要である。開発システムでは、すでに開発している車上地点検知の方法により、絶対位置を特定することにより、占有する区間に確実に在線することを検知する。なお、間隔制御、速度制御には、上記の絶対位置からの移動距離となる位置検知と速度を用いる。

2.3 車上地点検知を用いた進路制御の安全性と手法

車上地点検知は、無線を用いた地点検知デバイスによる車上での地点検知方式である。地上子情報が受信できない故障モードでは車上地点検知が不能となり、その結果、在線する閉そく区間が不明となり、近傍に在線する列車間で進路を競合する恐れがあることから、中央で走行する区間として閉そく区間の確保（以下「閉そくの鎖錠」という）を記憶することで在線区間として扱い、故障時にも当該情報により在線位置情報を保証する。

車上での在線位置は、地上に設備したICタグ地上子を車上で受信して絶対位置を特定する。ICタグ地上子の設備順序は、①車上に受信順序として記憶しており、②受信順序を車上でチェックしながら走行する。さらに、③閉そく内のICタグ地上子全てを受信したことのチェックで閉そく解錠の条件とする、などのチェックを行う。車上に搭載した装置の故障時には、非常ブレーキ

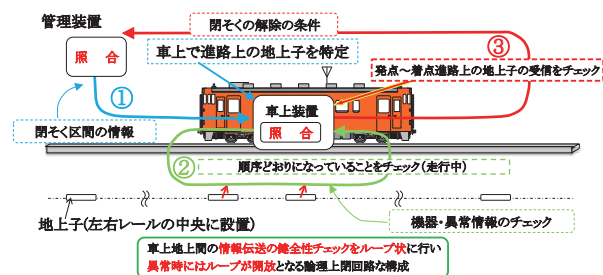


図2 車上地点検知の安全性

により停止処理を行う。

当該処理により、車上装置がダウンした場合でも、上記在線区間の考え方により、在線側の処理となること、即時停止することで当該列車を防護する（図2）。

2.4 制御・表示情報の無線伝送

(1) 伝送システム

開発システムの車上、地上間の情報伝送は、無線通信を用いる。専用の新たな周波数導入、新たな無線機の開発を行うことはコスト増につながるため、専用の回線ではなく、一般が利用可能な開伝送システムの回線（以下「オープン回線」という）の利用が考えられる。

(2) 暗号化の必要性

オープン回線を用いた場合には、制御、表示情報が部外者にも受信可能となり、悪意を持ったなりすましによる妨害が考えられ、危険側となり制御、表示情報が送信される恐れがある。情報の傍受については、問題ないが、なりすましによる情報については、検出し破棄できる性能を装備する必要がある。

(3) 規格

鉄道信号における安全関連伝送の規格は、IEC62280の-1および-2があり、IEC62280-1は、開伝送システムを対象としてフェールセーフ伝送を行うための必要な技術要件が規定されている。IEC62280-2は、開伝送システムを対象としてセキュリティ上の危険について解析することの要求、必要なセキュリティ対策の実施を規定している。開発システムは、IEC62280-2が該当しており、対策が必要である（図3）。

IEC62280-2は、伝送システムがクラス5段階に区分されている。それぞれのクラスに対応する伝送システムの例として①専用網、②LAN、③鉄道事業者のWAN、④公衆電話網、⑤インターネットなどがある。

開発システムで用いる無線は、免許不要な汎用無線周波数帯を想定しており、上記の④に該当すると考えている。また、規格では7つの情報の脅威と対策例がある。

- ①重複受信：順序番号、タイムスタンプ
- ②紛失：順序番号
- ③挿入：順序番号、発信元、宛先識別子、フィードバックメッセージ、識別手続き
- ④順序誤り：順序番号、タイムスタンプ
- ⑤改変：安全符号、暗号化技術
- ⑥遅延：タイムスタンプ、タイムアウト
- ⑦なりすまし：フィードバックメッセージ、識別手続き、暗号化技術

また、暗号化については、伝送路の性質に応じて以下の4つの方法が示されている。

- (a) 暗号化されていない安全符号が付加されたメッセージ (A0)

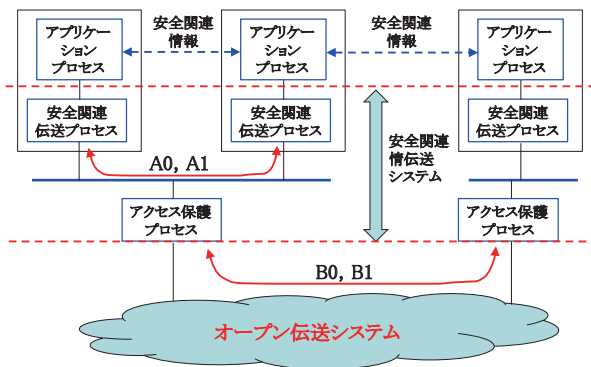


図3 IECで示された情報の種別

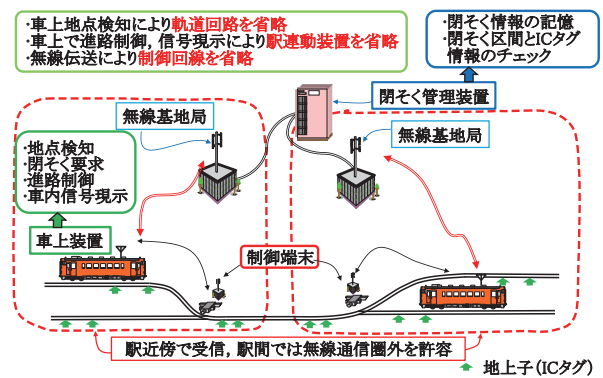


図4 車上地点検知型列車制御システム

- (b) 暗号化された安全符号が付加されたメッセージ (A1)
- (c) (a) を暗号化したメッセージ (B0)
- (d) (a) に暗号符号を付加したメッセージ (B1)
- (4) 開発システムの暗号化案

2.4 節 (3) 項に記述したように、規定された防護手段を考慮した伝送方式を用いる。なりすまし対策は、情報の発信元が明らかであること、情報が改変されていないこと、コピー電文ではないこと、などのチェックを安全関連伝送のプロセスが行う。また、車上の装置の複製・盗難を考慮すると、これだけでは不正なアクセスを防ぐことはできない。このような不正なアクセスを防ぐため、アクセス保護プロセスなどで、アクセス者の正当性をチェックする必要がある。たとえば、中央の閉そく管理装置と転てつ機を転換制御する制御端末（以下「制御端末」という）間で、証明書を発行してコピーされた場合でもチェック可能な情報を用いる必要がある。チェック方法の例としてインターネットなどで利用されている電子証明書の仕組みの応用などが考えられる。

### 3. 開発システム

#### 3.1 構成

車上地点検知型列車制御システムは、車上に連動論理を司る連動処理部、速度発電機による速度制御情報を作成する速度制御部、信号現示および操作入力表示を行う信号表示入力操作部、地上子の情報を受信する車上受信機、地上の装置と無線通信する車上無線機、これら情報の処理と地点検知処理を行う車上処理部がある（以下「車上装置」という）。地上には、中央に閉そく区間の鎖錠・解錠処理を行う閉そく管理装置および中央の無線機（以下「閉そく管理装置」という）、駅部には、転てつ機の転換制御を行う制御端末および無線機（以下「制御端末」という）がある（図4）。

#### 3.2 車上に搭載する連動機能

車上に搭載した連動機能（以下「車上連動」という）は、駅ごとのダイヤ、連動論理、および駅設備情報を搭載しており、地点情報で駅を特定して、地上の転てつ機および車内信号の制御を行う。また、転てつ機の制御は、車上装置からの転換指示により転てつ機近傍に設備した制御端末が行う。2.2 節で記述したように、車上連動は、閉そく管理装置で鎖錠された閉そく情報を在線区間として、進路構成を行い、当該閉そくの鎖錠情報で列車間の進路を制御する。

#### 3.3 車上連動機能に必要な地点情報

##### (1) 異常時の在線側出力

当該車上地点検知は、無線を用いた非接触な地点検知方式であり、軌道回路のように故障時に電流の遮断によりリレーが落下して在線情報が出力される構成では無いため、異常時には在線側出力となる論理を構築する必要がある。そこで、当該方式では、閉そく管理装置に在線する区間を閉そく鎖錠区間として登録することにより、車上装置がダウンしても在線情報を維持する方式とした。

##### (2) 線区内を走行するための初期位置登録

他線区から当該線区に乗り入れる列車は、システム境界において、自列車の車上装置の識別番号（以下「車上ID」という）と検知した絶対位置を基に、閉そく管理装置に対して閉そくの鎖錠要求を行い、鎖錠登録することで線区内の列車が進路構成時に必要な在線情報表示を可能とする。

##### (3) 駅間閉そくの鎖錠による駅間在線情報の作成

当該方式では、方向でこの論理を用いることなく、閉そくの鎖錠情報を在線情報として処理することで、駅構内を含めた対向となる競合進路の抑止および後方の防護を行うことが可能である。

##### (4) リアルタイムな在線情報が不要な制御

走行中に車上で受信した地点検知情報は、受信した時点での地点を示しており、そのままの情報を車々間で送受信したのでは、受信した情報が過去の地点情報となる

特集：信号通信・運輸

恐れがあり、進路構成条件として用いるには移動時間に対する配慮が必要となる。閉そく管理装置に登録した閉そくの鎖錠を在線情報とすることで、当該区間内の在線が確定しており、詳細位置を表示することを不要とする。

(5) 近隣列車への在線情報の表示

上記3.3節(2)項で記述したように、新たに走行予定の閉そく区間を要求する列車側では、閉そく区間の鎖錠登録を行うことで在線表示を行う。当該登録情報により線区内を走行する列車は、閉そく管理装置の閉そく区間の鎖錠要求時に登録状況を参照することで近隣列車の在線位置情報が得られ、車々間で直接地点情報を交換することなく、進路構成を行うことを可能とする。

4. 車上連動

4.1 進路の構成

車上装置は、絶対位置情報をもとに走行予定の閉そくの鎖錠を行い、鎖錠条件で当該閉そく内の転てつ機を車上からの指示により転換する。閉そくの鎖錠は、2.3節で記述したように地上のICタグの固有情報により車上のデータベースで絶対位置および当該位置を含む閉そく区間を特定して要求する。閉そくの鎖錠要求は、中央の閉そく管理装置で車上から無線を用いて行うため、受信情報に誤りを生じる恐れがある。誤りの検出は、本方式では、ICタグの情報のUIDと呼ばれる複製できない固有情報を用いること、ICタグ情報が近傍でのみ受信できる情報であること、ICタグ情報の受信順序を車上でチェックしていること、誤りチェック情報を装備すること、などから誤りが検知可能と考えられる。また、閉そくの鎖錠要求および解錠要求をICタグ情報と関連づけて行うことで、その地点に在線する列車のみが要求できる情報として用いることができる。

4.2 確保する閉そく区間

(1) 閉そく区間の区分の仕方

単線区間で線形が2線4進路の駅では、閉そく区間は、出発信号現示位置内方から次駅場内信号現示位置外方(①、以下「駅間閉そく」という)、および次駅場内信号現示位置内方から同出発信号現示位置外方の区間(②以下「場内閉そく」という)があり、上り方向、下り方向を区別して鎖錠する(図5)。

(2) 閉そくの状態

列車が駅到着時に、駅での上下列車の交換がある場合には、上下列車ともこれから進入する上記①の駅間閉そく区間の鎖錠要求時には、分岐部分が対向列車の上記②の場内閉そく区間に含まれており、自列車の鎖錠により対向列車の①の閉そく区間の鎖錠ができないため、相互に②の場内閉そく区間を解錠する必要がある。そこ

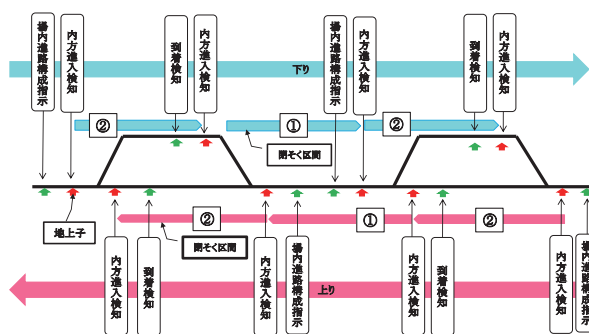


図5 閉そく区間

で、閉そくに3つの状態を設定することで上記の課題を解消する(図6)。3つの状態を以下に示す。

- (a) 閉そく鎖錠: 列車が在線、またはこれから進入予定の区間で、競合する閉そく区間の鎖錠を抑止する。
- (b) 閉そく仮解錠: 当該状態となる閉そく区間は、場内閉そく区間で分岐部分とホームトラックを含む区間である。仮解錠の処理は、ホームトラックに到着し、地上子情報の受信により到着範囲に完全進入して分岐区間を進入したことが判断できるため、閉そくの鎖錠は維持するが当該分岐を含む反対方向の閉そくの鎖錠を可能な状態とする。
- (c) 閉そく解錠: 列車が次閉そく区間に完全に進入して、同区間を鎖錠した車上IDにより解錠され、当該閉そく区間を進入したことが確認できた状態である。

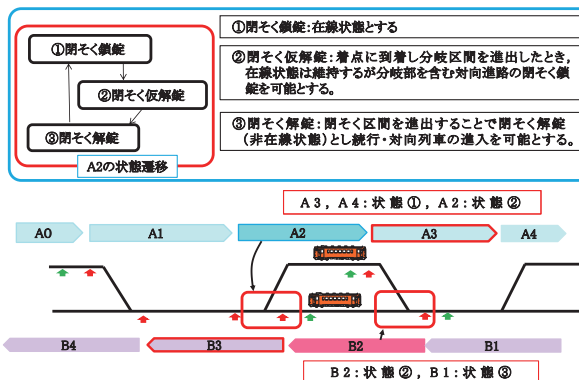


図6 閉そく区間鎖錠の状態遷移

4.3 進路の鎖錠と解錠

(1) 鎖錠

車上連動では、車上で絶対位置および列車速度が特定できるため、直接当該情報を連動論理の制御に用いることが可能である。車上連動では、車上装置が着点となる場内閉そくまでの閉そくの鎖錠を維持しており、車上で一旦進路を構成して内方に進入したときは、途中で復位する操作を行うことはない。既存の連動装置のように、進路構成に人が介入することなく、車上から地上設備を直接制御していることから、着点に到着して閉そくを解錠するまで走行進路の確保を可能とする(図7)。

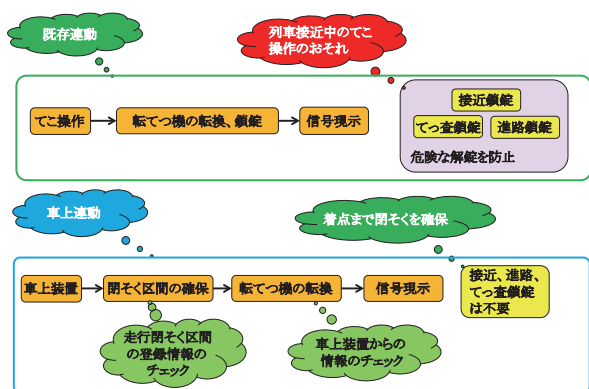


図7 鎖錠論理

(2) 解錠

既存の連動では、接近、進路、てっ査、などの鎖錠があり、列車が制御区間を通過した後、それぞれ解錠する。車上連動では、4.2節で記述したように、走行する閉そくの鎖錠を行い、当該区間の安全を確保していることから、閉そくが鎖錠された区間の転てつ機の制御を可能として、転てつ機の制御端末側では、閉そくの鎖錠を条件に転換制御を行う(図8)。閉そく区間の解錠が進路の解錠となる。

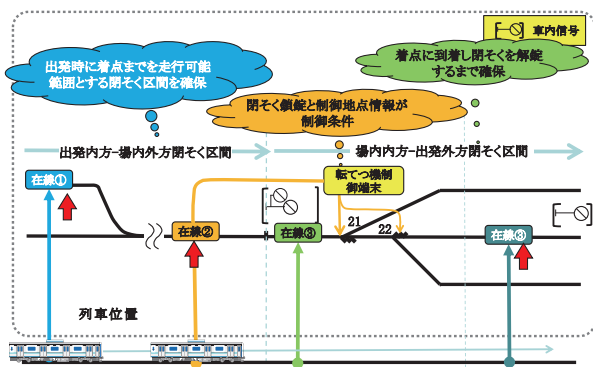


図8 鎖錠の考え方

(3) 転てつ機の鎖錠の考え方

仮に車上からの制御によって転てつ機の論理的な鎖錠を制御端末側で行った場合には、通過後の解錠処理が必要となるが、車上から解錠の制御を確実にを行うためには、制御端末の通信範囲の拡大や詳細な列車位置の判別が必要になる。このため、走行予定区間として転てつ機を含む上記の閉そく区間の鎖錠を前提とすることで、制御端末側で論理的な転てつ機の鎖錠を不要とする。さらに、開発システムでは、閉そくの鎖錠区間内の進路制御を行い、着点に到着したのち、転てつ機を解錠して定位に戻す、などの処理も不要である(図9)。なお、2.3節および4.2節で記述したように、着点での閉そく区間は、在来線で仮解錠の状態では安全を確保する。

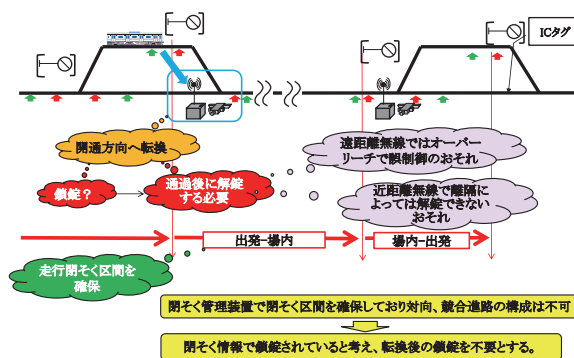


図9 転てつ機の鎖錠

4.4 その他の鎖錠

(1) 保留鎖錠

保留鎖錠は、2.1節で記述したように、車上で構成した進路へ接近していることを絶対位置および速度情報で確認できることから、不要になる鎖錠である。

(2) 時間鎖錠

過走余裕距離内の転てつ機について鎖錠を行い、対向の信号機を定位にする鎖錠である。パターン制御による速度制御を行っており過走を防護することから不要としている。

(3) 表示鎖錠

出力に異常がないことのチェック、継電連動ではリレー、電子連動ではユニットがほかの進路で使用されていないこと、などのチェックを行うものである。車上連動では、進行信号を現示する条件のチェック、信号現示出力のチェックを行いフィードバックチェックにより出力の異常、出力の競合チェックを行っており、当該鎖錠機能を網羅する。

4.5 速度制御

2.2節で記述したように、車上地点検知情報を用いて、車上に装備した速度パターンによりブレーキ制御情報を出力する。速度パターンは、閉そく境界外方の場内信号停止位置外方および出発信号停止位置外方を起点とする(図10)。転てつ機の開通方向表示の受信によりクリアする。なお、ICタグ地上子間の地点および速度は速度発電機のパルス情報を用いる。

4.6 信号制御

4.3節で記述したように転てつ機を転換し開通方向の表示情報の受信により進行信号を現示する。4.3節で記述したように単線区間では、車上装置は、出発進路である駅間閉そくおよび次駅場内進路の場内閉そくを確保する。閉そくを鎖錠したのち、駅間閉そく内の転てつ機は車上から無線により制御可能であるが、次駅場内閉そく内の転てつ機は、無線の圏外となっており、駅接近時に制御することとなる。場内信号は、停止定位であり転てつ機の開通方向の転換情報表示の受信により進行信号を現示する。

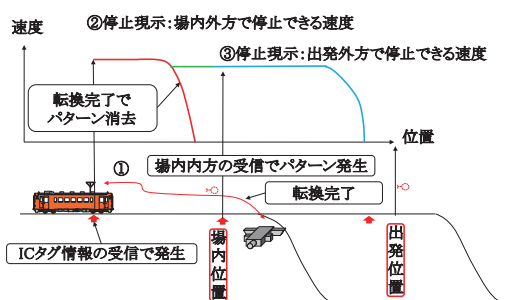


図 10 速度制御パターン

### 5. 地点検知に用いる IC タグの特性試験

本システムでは絶対位置の検知が重要であり、絶対位置の検知に既開発の IC タグを用いた車上地点検知装置を用いる。この IC タグ地点検知の実車に設備した場合の周辺環境による影響を調査するため、基本特性試験を鉄道総研の XYZ ステージとよばれる定置試験装置で高さを 260mm, 280mm, 300mm について前後左右位置での磁界強度の測定を行い (図 11), 鉄道総研内の実験線において R291 の車両床下で、高さ 205mm, 300mm について磁界強度を測定した (図 12)。また、周辺金属の影響がない環境下で高さ 300mm の離隔での受信フレーム数を測定した。

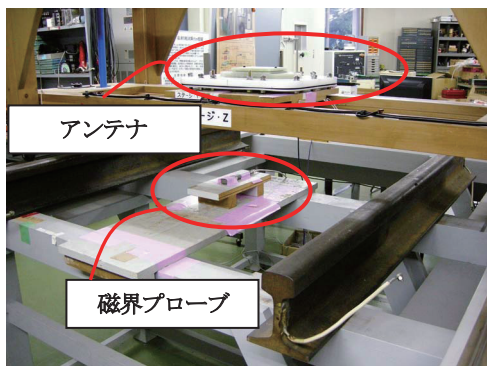


図 11 XYZ ステージでの磁界強度測定の様子

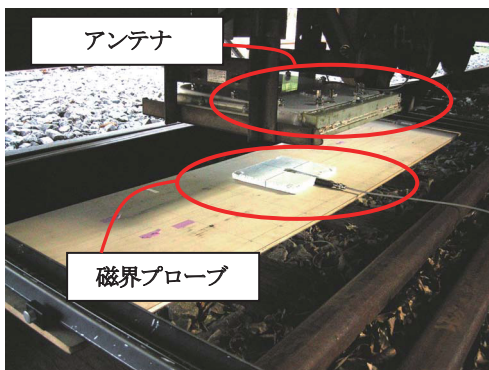


図 12 実験線・実車での磁界強度測定の様子

#### (1) 磁界強度試験結果

周辺に金属がない状態では、107.95dB  $\mu$  V/m (高さ 300mm) であるが、XYZ ステージでは 12.10dB, 実験

線では 6.80dB, 磁界強度が小さかった (図 13)。図 13 の①が周辺の影響を受けない磁界強度, ②が実車での磁界強度, および③が XYZ ステージでの磁界強度である。

実車での影響については、車上アンテナの取付枠がループ状になっていた。さらに別途実施したアンテナ周囲に 1 ターンの電線を配置したところ 6.44dB 減衰したことから、当該枠を絶縁することで上記ロスの削減が可能である。

#### (2) 受信フレーム試験結果

高さ 300mm での横軸の前後方向に離隔した場合の正常と異常の受信フレーム数の合計から平均で 1 回正常受信となる時間を示した。真正面では 6ms, 中心から 250mm の位置では 12.7ms であった。130km/h では 600mm の通過に 18ms で真正面 + 上記離隔位置で複数のフレームとなる。過去に実施した試験結果での回転試験台での高速試験では、2 ~ 3 フレームであった。

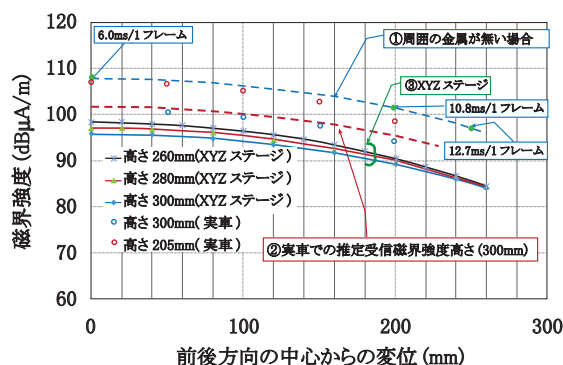


図 13 車上アンテナの前後方向での磁界強度

### 6. まとめ

- (1) 車上で位置、速度を特定可能であり進路・接近・てっ查などの既存鎖錠論理の簡易化が可能である。
- (2) 軌道回路、連動機など鎖錠に必要な地上設備を省略可能である。

### 7. おわりに

平成 25 年度より国土交通省の補助金により「車上連動による列車制御システムの開発」を行っており、平成 25 年度に車上地点検知装置、平成 26 年度に閉そく管理装置、車上連動装置、制御端末、などの試作を行い性能の確認を行う予定である。

### 文献

- 1) 佐々木, 菅原: 車上主体の列車制御システム, 第 48 回鉄道サイバネシンポジウム, 2010 年 11 月
- 2) 佐々木, 北野: 車上連動による進路制御の基礎検討, 第 49 回鉄道サイバネシンポジウム, 2011 年 11 月
- 3) 佐々木, 北野: 既存連動装置に車上地点検知を用いた列車制御システムの安全性の基礎分析, 平成 25 年電気学会全国大会, 2013 年 3 月