

地点検知に無線 IC タグを用いた 列車制御システム

佐々木 達也*

Development of Train Control System by Using Information of Train Position
with Wireless IC-tag

Tatsuya SASAKI

We have considered a basic conception of train control system, which can reduce the number of equipment of signalling system and interlocking device of a station by using train positioning equipment with wireless IC-tag on a vehicle. If receiving IC-tag information is abnormal, the train positioning equipment needs to be output on a safe side. Therefore we made a formation of the train control system, which has a function detecting abnormal information by transmission loop to connect the center equipment with the vehicle equipment. This paper reports the train control system and IC-tag test results.

キーワード：進路制御，運転保安，IC タグ，車上連動，車上地点検知

1. はじめに

近年，小型で安価な無線 IC タグ（以下「IC タグ」という。）が多分野に普及し，Suica に代表される電子乗車券，食堂の料金精算，および商品の盗難防止警報など毎日の生活の必需品となりつつある。一方，鉄道分野では，上記の電子乗車券のほか，コンテナ，コンテナ貨車，およびコンテナを輸送するトラックに IC タグを設備したコンテナ輸送管理システムが運用されている¹⁾。また，運転保安設備においても ATS の地上子・車上子を IC タグシステムに置き換える提案がなされている²⁾。鉄道総研でも，IC タグを利用した地域鉄道向け列車制御システムの検討を進めており，IC タグを地点検知手段として用いることとしている。本稿では，IC タグを用いた列車制御システムの構成および地点検知の安全性確保ならびに適用にあたり実施した IC タグの性能調査結果について述べる。

2. IC タグを用いた列車制御システム

2.1 開発のコンセプト

IC タグを用いた列車制御システムでは，地上の IC タグ情報により車上で地点検知を行う。IC タグは小型で安価であることから，複数設置し易く車上に細かな情報を提供できる，多情報が装備可能である，IC タグの近傍でのみの限定した地点で受信できるなどの利点を享受できる。

中央の装置が，この地点検知情報を無線伝送路を介し

て集中管理し，中央から進路の制御，車上から転てつ機の転換鎖錠の制御を行う。これにより地上設備の多くを省略することで導入コスト，運用コスト，およびメンテナンスコストの低減を実現する。

従来は，駅部に設備した連動・閉そく装置が現場機器の制御，信号現示を行っており，実績のある軌道回路による在線情報が制御条件の要となっている。これらと同等の安全性を確保するためには，IC タグを用いた車上地点検知情報が，転てつ機の鎖錠・解錠，閉そくの設定・解除，および進路の鎖錠・解錠などの条件として適用可能で，故障時には在線側の出力となる論理を装備する必要がある。鎖錠・解錠条件への適用では，前述の特徴のとおり IC タグの近傍に在線する列車のみが受信可能な固有情報を用いて列車位置を検知し列車を特定することにより閉そく・転てつ機等の鎖錠・解錠条件とすることが可能であると考えられる。

なお，提案する列車制御システムでは中央に進路の制御論理を集中する中央連動方式，中央に閉そく論理のみを装備し各列車の車上装置に連動論理を搭載する車上連動方式が考えられるが，在線論理および連動に用いる論理の安全性確保の手法では，中央連動方式と車上連動方式は，基本思想が同様であると考え，本稿では中央連動方式について述べる。

2.2 機器構成

機器構成を図 1 に示す。

(a) 車上には IC タグ情報を受信する車上アンテナ・受信器，および受信情報を処理する処理装置を設置する

* 信号通信技術研究部（列車制御）

特集：信号通信技術

(以下「車上装置」という。)。なお、車上装置は、車上で連続した位置検知を可能とするため速度発電機から速度パルスを入力する。

- (b) 地上にはICタグ、転てつ機を制御する制御端末、および中央に線区を走行する全列車の在線情報の検知と連動・閉そく機能を装備する管理装置を設備する。
- (c) 車上装置と管理装置間、および車上装置と制御端末間は、無線伝送路を介して進路情報および転てつ機制御情報を伝送する。

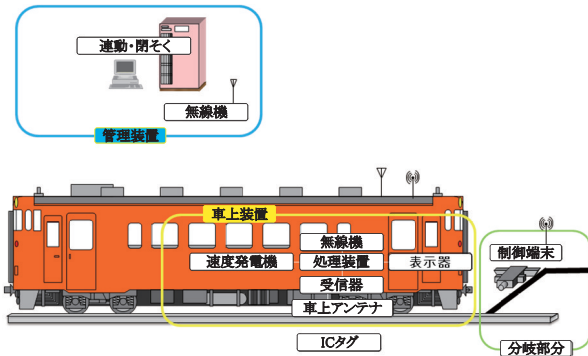


図1 機器構成

3. ICタグによる地点検知

3.1 設置位置

ICタグは、従来の軌道回路境界、閉そく境界、分岐器を含む区間の境界、およびシステム境界など各境界のまくらぎ上の左右レールの中心位置で境界の両側に設置する。車上アンテナの設置位置は、上下の列車で共用可能とすることを考慮して、車両床下で左右レールの中心位置とするが、後述する仕組みのため1つのICタグを必ず編成の先頭と後尾で読み取れるように設備する。そのため、両運転台車では先頭と後尾の2箇所設備し、複数車両からなる場合は、車両間の引き通しの伝送路を設備する必要がある。

3.2 ICタグの情報

ICタグに装備する情報は、ICタグ固有の情報（UIDコード）、隣接するICタグに挟まれた区間（以下「ブロック」という。）の識別情報（8ビット）、隣接ICタグとの離隔距離情報（28ビット）、勾配・曲線および分岐器等の種別情報（4ビット）、およびCRC（16ビット）を考えている。また、システム境界および分割・併合のある区間では、車上装置が編成の先頭側の車上アンテナ（以下「先頭側」という。）と後尾側の車上アンテナ（以下「後尾側」という。）でのICタグの上記に示す識別情報の受信と、受信時の速度パルスの積算距離により列車の編成長をプリセットする。

3.3 ブロックの在線処理

鉄道総研が2002年に開発したパリス式列車検知形閉そく装置³⁾の進入・進出の在線検知論理を適用し、ブロック境界に設置した2個のICタグにより進入方向および進出方向を特定した地点検知が可能である（図2）。

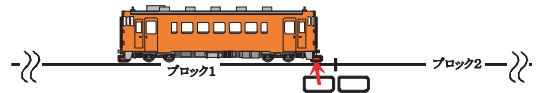
(1) 進入検知

編成の先頭側でブロック1の終端部のICタグ情報を受信することにより編成先頭がブロック1の進出を検知し、ブロック2の始端部のICタグ情報を受信することによりブロック2の進入を検知する。ICタグ情報の受信順序により進行方向を特定し、ブロック2の進入を確定する。なお、ブロック1は在線のままである。

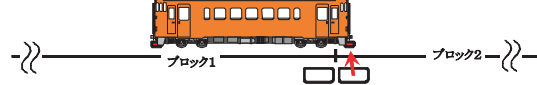
(2) 進出検知

進出の場合は、編成の後尾側でICタグ情報を受信したとき上記(1)の処理を行うことで後尾側でのブロック2の完全進入とブロック1の完全進出を確定する。

ブロック1を進出中



ブロック2へ進入



ブロック1を進出中



ブロック1を進出



図2 進入・進出検知

3.4 ICタグによる地点検知の安全性の確保

軌道回路は、左右レールで構成した電気回路を車軸で短絡することで在線を検知する方式であることから、検知区間への進入を即座に地上において検出することが可能で、故障時には電気回路が開放されるので検知側となる。一方、ICタグによる車上地点検知では、車上で地上のICタグ情報を受信し地点検知する方式であるため、受信により即座に地点検知可能であるが、受信できない場合には地点検知不能となる。さらに、閉そく制御・連動制御のため、車上における地点検知情報を管理装置に伝送する必要があり、伝送不良を含む故障時には地上側で列車位置が不明となる。そこで、フェールセーフな処理装置により、車上装置、管理装置、および車上装置・管理装置・ICタグの情報伝送の健全性の照査を行う。一方、地点情報に固有な情報を用いて車上・地上間での照合により情報をフィードバックする情報のループを構成し、

ループのいずれかに異常が発生した場合にはループを開放させて在線検知側とするとともに異常を検知可能とする論理上の閉回路を構成（以下「クローズドループ」という。）する（図3）。

(1) 第一のクローズドループ

管理装置は、構成した進路のICタグの固有情報を車上装置に送信し、車上装置が同情報を受信したのち返信することで、管理装置～車上装置～管理装置の情報伝送による第一のクローズドループを構成し、確実に情報が伝送されたことをチェックする。照合の一致により着点までの区間を在線状態とする。

(2) 第二のクローズドループ

車上装置は、管理装置からの進路構成完了情報の受信で内方へ進入許可の処理を行い、内方進入により地上のICタグと結合して情報を受信する。車上アンテナから受信したICタグの固有情報を第一のクローズドループにおいて管理装置から受信したICタグの固有情報と照合することにより、正常な情報の受信、受信アンテナおよび受信器の健全性を照査する。さらに、ICタグには隣接ICタグまでの離隔距離情報を装備し、許容する走行距離内で次のICタグ情報の受信を照査することで設置位置の妥当性についてもチェックする。当該手法により車上装置（ICタグ読み出しの情報）～ICタグ情報～車上装置（管理装置から受信したICタグ情報）の情報伝送による第二のクローズドループを構成する。

(3) 第三のクローズドループ

車上装置は、進路の着点までに受信したICタグ情報を記憶しておき、着点進入完了後に管理装置へ当該情報を送信する。管理装置は、当該情報の受信により在線としていた区間を非在線とする。当該処理により管理装置～車上装置～ICタグ情報～管理装置の情報伝送による第三のクローズドループを構成し、安全に進路の復位が可能である。なお、構成した進路の途中で閉そくを分割しておき、その位置までのICタグ情報を管理装置に送信し非在線とすれば続行運転も可能である。

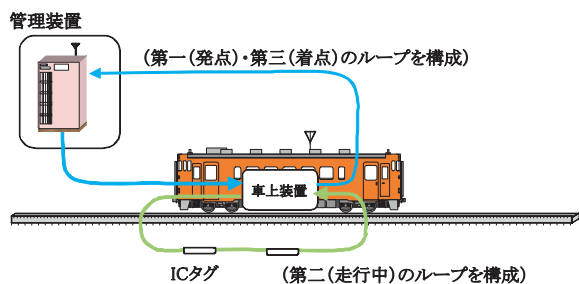


図3 クローズドループによる安全性確保

3.5 異常検出の考え方

異常検出のための方法として以下の手法が考えられる。

(1) 処理装置

車上装置および管理装置の処理装置が上記のクローズドループの異常検出を担保する。処理装置自体の異常については信号保安装置で実績のあるフェールセーフな処理装置を用いることで検出可能とする。

(2) ICタグシステム

(a) ICタグ

上記クローズドループにより異常検出が可能である。ICタグシステムは、鉄道用の専用設計のものではなく、汎用の機器を利用できると考える。

(b) 車上アンテナ

検知ループによる送信レベルのチェックで異常の検出が可能である。

(c) 受信器

先頭側と後尾側での受信順序およびその間の走行距離と3.2節で記述したアンテナ間の距離情報を用いた編成長分の走行距離で受信診断が可能である。

(3) 無線伝送路

本システムでは、フェールセーフな処理装置で情報の作成および受信、伝送情報にシーケンス番号・誤り訂正符号・複数回の冗長伝送、および3.4節で記述したクローズドループによる照合などで、無線機器ならびに情報の異常検出が可能である。なお、進路設定・復位を駅近傍での無線伝送により行うことで異常時には、設定・復位を抑止とする論理であり安全側であることから、これまでのような駅間を含めた周期的な連続伝送による異常検出が不要であり無線圏外を許容している。

4. 列車制御

3章で記述したようにICタグを用いて車上において地点検知が可能である。そこで、従来の地上検知方式で行っていた連動・閉そく機能を当該車上検知方式で実現するための考え方について鎖錠、進路の構成、および閉そくの観点から以下に述べる。

(1) ICタグ位置検知情報の列車制御への適用

ICタグの位置検知情報には、ICタグの固有情報と3.3節で記述したブロック単位の在線位置情報がある（図4）。ICタグによる地点検知情報は、3.4節に記述したように駅間などの閉そく区間の在線状況の特定が可能であり閉そくの確保および解除に適用する。一方、ブロック単位の位置情報は、従来の軌道回路情報と同等の扱いが可能であり進路の鎖錠・解錠条件として適用する。さらに、踏切の警報制御のための警報始動点および警報終止点の情報として適用することもできるが、転てつ機の制御端末と同等の踏切用の制御端末が必要である。

また、種別情報と隣接ICタグまでの距離情報をもとにした位置・速度パターンを作成し、速度制御に用いるこ

特集：信号通信技術

とも可能である。

(2) てっ査鎖錠と進路鎖錠

車上装置は、管理装置から転てつ機の開通方向の情報を受信し、転てつ機の制御端末に開通方向の転換指示を行う。てっ査鎖錠は、軌道回路方式では制御回路に在線条件を挿入することで電氣的に動作できない構成で実現されているが、本方式では、制御端末の制御論理に鎖錠IDを用いることで転換を抑止する。鎖錠IDは管理装置から車上装置を介して制御端末へ情報伝送する。また、車上制御装置は、ICタグ情報の分岐区間情報の受信で、当該ブロック在線中には転換制御を抑止する(図5)。なお、進路鎖錠、接近鎖錠は、管理装置における進路構成の連動論理とする。

(3) 進路の構成

管理装置は、車上装置からICタグ情報で作成したブロック情報による進路の在線状態を受信し、全列車の在線検知情報を記録しており、同記録をもとに進路を構成する。さらに、車上装置から転てつ機の制御端末に制御情報を伝送し、4章(2)で記述した鎖錠IDで解錠し分岐器を転換して再び同IDで鎖錠することで進路を開通する。

(4) 閉そくの確保

3.4節で記述したように管理装置が閉そく管理を行っており、車上装置に対し発点から着点までの進路上のIC

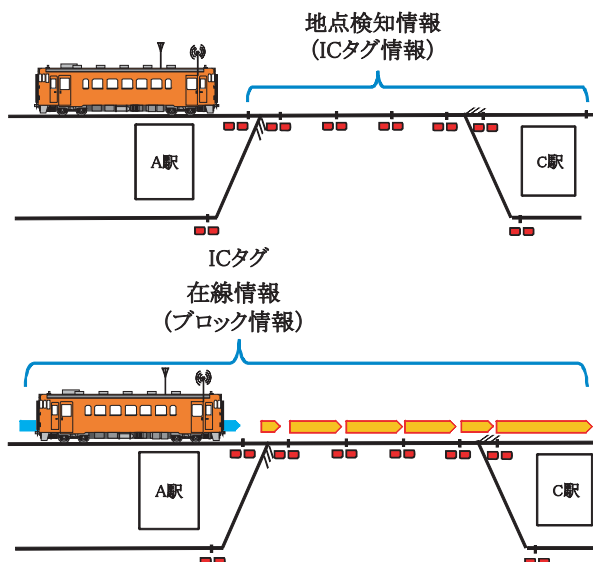


図4 ICタグの位置検知情報

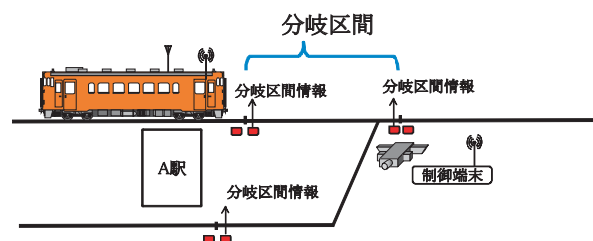


図5 てっ査鎖錠

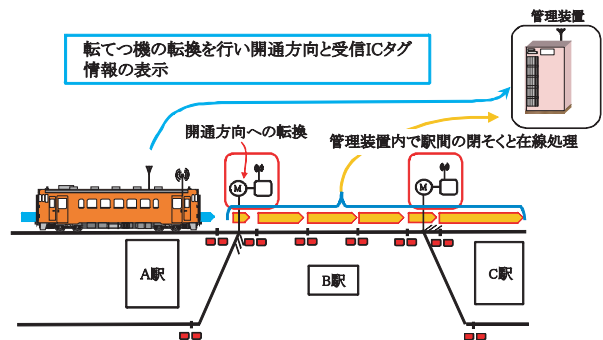


図6 進路の構成と閉そく確保

タグ固有情報を送信する。第一のクローズドループにより車上装置が当該情報を受信し、受信情報を管理装置に返信応答することで進路情報の転送を完了する。管理装置が着点までの閉そくを確保したうえで当該進路の着点までの区間を在線状態として確定させ、競合進路の構成を抑止する(図6)。当該処理により在線を確定することで車上での地点検知に異常が発生しても在線を維持でき閉そく区間の不正解除を抑止可能である。

(5) 駅間閉そくの解錠と進路の復旧

伝送に対する負荷を軽減すること、通信コストを低減すること、通信が圏外となることの影響を排除することなどから、本システムの地点検知方式ではリアルタイムに管理装置・車上装置間で在線情報を表示する構成とされていない。在線区間の復位は、着駅到着後に駅間の在線の復位および進路鎖錠を解錠する方法が最も簡易である。しかし、着駅到着まで続行列車が上記列車の発駅に進入できないため、線区によっては、運用上支障することが考えられる。そこで、駅部では圏外となる可能性が低いことから、発駅のホームトラック部分の区間についてはブロックの進出時に車上装置から管理装置へ同区間の進出を表示し復位可能とする。閉そくの解錠については、管理装置が、3.4節で記述したように列車が着点に完全進入したのち、車上装置から第三のクローズドループによる当該閉そく区間を走行した列車のみが受信可能であるICタグ情報を受信することで、在線を復位するとともに閉そくを解除する(図7)。

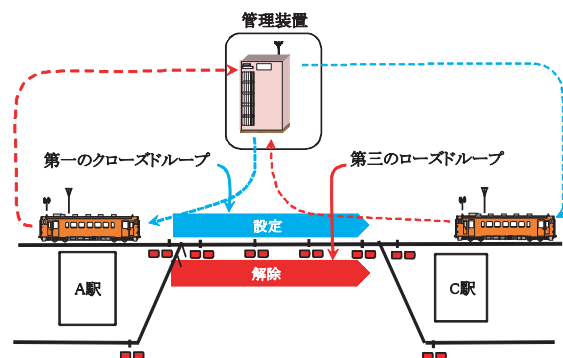


図7 閉そくの解錠と進路の復旧

5. 本システムに適した IC タグ

5.1 種別・特徴

ICタグにはアクティブ形（電源内蔵形）および外部から電力波を受信して起動するパッシブ形（電源非内蔵形）があり、パッシブ形の無線周波数の種類には、135kHz以下、13.56MHz、953MHz、および2.45GHzがある。135kHz以下と13.56MHzは電磁誘導により通信を行うもので、1m以下の近距離通信に適している。953MHzと2.45GHzは電波によるもので、953MHzが10m、2.45GHzが2mでの通信が可能である（表1）。列車制御システムに適用する場合、長期にわたって使用することが考えられ、安定した部品供給が求められる。上記4種類のICタグはISOにより標準化されており、今後、長期にわたり供給されることが期待できる。

表1 パッシブ形 IC タグの主な周波数帯と特徴

周波数	～135 kHz	13.56 MHz	953 MHz	2.45 GHz
通信方式	電磁誘導	電磁誘導	電波	電波
通信距離	～1m	～1m	～10m 特定小電力： ～70cm	～2m
通信速度	4kbps	38kbps	640kbps	40kbps
水分の影響	受けにくい	受けにくい	やや受けやすい	受けやすい
指向性	広い	広い	広い	狭い
電波法上の規程	免許等不要	型式の指定を受けたものは不要	特定小電力：免許不要 構内無線局：必要	特定小電力：免許不要 構内無線局：必要

5.2 適用可能な IC タグ

現行の軌道回路では、調整や電源設備の解消が望まれていることから、ICタグの適用にあたってはメンテナンスフリー、あるいは安価で交換が容易なことが期待される。また、無線システムであることから免許などの法的な申請が不要であることなども要件と考えられる。

以上より電源が不要なパッシブ形で免許が不要な近距離無線通信である13.56MHz帯が適していると考え、定置における基本性能試験および環境性能試験、ならびに実車による受信性能試験を行った。

6. 性能確認試験

6.1 試験項目

市販のRFIDリーダライタおよびICタグにより、以下の性能確認試験を実施した。リーダライタ、アンテナ、ICタグの仕様および外形を表2に示す。

(1) 基本性能試験：鉄道総研のXYZステージでの受信範

表2 リーダライタ・アンテナ・ICタグの仕様

伝送の仕様	
項目	内容
周波数	13.56MHz ± 7kHz
伝送速度	25.6kbps
符号化方式	マンチェスター
送受信情報	4byte
変調方式	ASK
形状	
アンテナ外形	295mm × 370mm × 35mm
ICタグ外形	54mm × 86mm × 0.6mm

囲および回転試験台での速度特性の確認

- (2) 環境性能試験：鉄道総研の塩沢雪害防止実験所における降雨・降雪時の受信性能の確認
- (3) 実車性能試験：鉄道総研の所内試験線での実車による受信性能の確認

6.2 定置試験

(1) 受信可能範囲

上下・前後・左右に位置調整可能なXYZステージに車上アンテナとICタグを対面させ、受信可能範囲が最も広がる離隔300mmで測定した（図8）。測定の結果、前後方向が513mm、左右方向が460mmで通信できることを確認した。

(2) 受信可能速度

ICタグを回転翼として回転させ、車上アンテナを地上に固定した回転試験台において、受信可能速度を測定した（図9）。車上アンテナとICタグの上下離隔は、XYZステージと同じ300mmで回転方向の左右中心離隔を0mmとした。

測定の結果、回転速度100km/hで1ページ（4byte）の受信が可能であることを確認した。なお、ISO15693に非準拠なICODE1と呼ばれるICタグでは160km/hで1ページの受信が可能であった。



図8 XYZステージ



図9 回転試験台

(3) 環境性能

ICタグは、屋外の設置であり雨・雪の影響が考えられることから、低温試験室において影響試験を行った。試験では、車上アンテナとICタグ間に雪塊をはさんだ状態および雨水を貯めたトレイに水没した状態で受信範囲の変化を測定した（図10、図11）。ICタグは、防水で内部

特集：信号通信技術

に空隙を有した構造のケースに封入した。なお、車上アンテナとICタグの隔離はXYZステージおよび回転試験台と同じく300mmとした。

(a) 雪

含水率0%・密度0.25kg/m³および0.4kg/m³で外形800mm×500mm×150mmの雪塊をはさんだ状態でも、雪のない状態と同じ受信範囲が得られた。

(b) 雨水

水深40mmにICタグを水没した状態でも、水のない状態と同じ受信範囲が得られた。

上記の結果から雪・雨の影響は無いと考えられる。

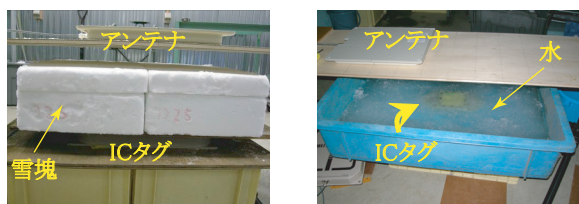


図10 環境性能試験（雪） 図11 環境性能試験（雨）



図12 実車試験の様子

6.3 実車による速度特性

(1) 実車走行試験

速度が45km/hまでの受信特性および受信環境影響について確認を行った（図12）。また、実験線には受信状態に影響を及ぼす恐れのある鉄筋を含む構造のPCまくらぎがあり、このまくらぎ上にICタグを設置した場合の影響についても確認した。

(2) 結果

回転試験台における受信フレーム数よりわずかに減少した（図13）。

6.4 試験結果のまとめ

(1) 受信性能

環境性能については、雨・雪に対して問題なく受信可能であり天候の影響は無いものと考えられる。一方、実車試験については、受信フレームの減少がみられたが、PCまくらぎおよび受信アンテナの背面付近に金属が存

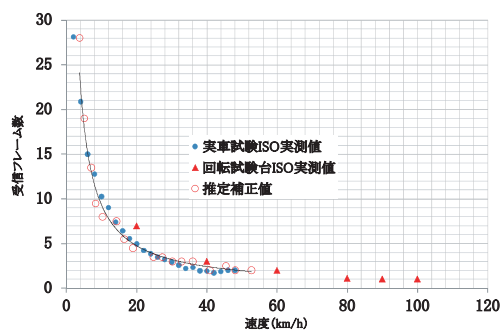


図13 実車による速度特性

在したことによるものと考えられる。

(2) 速度特性

無線通信の伝送速度および測定した受信範囲により計算から得られる受信フレーム数を期待したが、ICタグの受信処理に時間を要しており、高速域で複数フレームの受信が得られなかった。

6.5 列車制御に使用するにあたっての課題

列車制御の地点検知に使用するためには、高速走行時にも必要フレーム数を受信する性能が必要となる。対策として、受信処理の簡素化などの受信器の改良およびアンテナ形状の見直しによる受信範囲の拡大、ならびにICタグの複数設置により系統的に受信フレーム数を確保する方法が考えられる。受信フレーム数は、現行のトランスポンダで行われている₄C₂と同等の性能を実現する必要がある。

7. まとめ

- ①ICタグを用いた列車制御システムの概要を説明した。
- ②上記システムに用いるICタグの環境性能試験を行い適用可能な性能を確認した。
- ③ICタグ受信の高速化により複数フレームの受信を目指し、踏切制御、駅構内の転てつ機の遠隔制御を含めた車上主体の列車制御システムを開発中である。

文献

- 1) 宮口：IT-FRENS & TRACEにおける駅構内ロケーション管理の実現，鉄道と電気技術，2007.9
- 2) 進藤ほか：13.56MHz帯RFIDのATSへの応用—試作地上子の読み取り試験—，2009年電気学会全国大会
- 3) 国土交通省鉄道局監修，電気関係技術基準調査研究会編：解説 鉄道に関する技術基準（電気編）（第二版）