

無線式列車制御の動向

渡辺 郁夫*

Trends of Radio Based Train Control Systems

Ikuo WATANABE

This paper outlines radio based train control systems in Japan, Europe, North America, and China. The systems aim at realization of flexible train control systems and reducing wayside equipment. It describes the main functions and components of these train control systems. In addition, some subjects for realizing communication based train control systems are discussed.

キーワード：CARAT, ATACS, AATC, GMS-R, ETCS, ERTMS, ATCS, PTC

1. はじめに

新幹線や通勤線において導入されている列車制御システムでは、制御の基本となる列車の位置検知と列車への制御情報（他列車の位置や駅の進路構成）の伝達に軌道回路が広く使用されている。この方式は、信頼性、経済性の観点から極めて優れたシステム構成法といえる。しかし、軌道回路による位置検知ではその長さである数十メートルから数百メートルの単位での列車制御となるために更にきめ細かい制御を行うことが難しいこと、車両の駆動システムから発生する帰線電流の高調波が列車制御システムに対して問題ないことを確認しなければならないなど、軌道回路の使用に起因する課題もある。最近では、それらの課題を解決すべく無線を使った様々な列車制御システムの開発が進められている。無線式列車制御を採用して地上と車上でいろいろな情報の発信を行うことで、移動閉そくや踏切警報の定時間警報制御などの高度な機能を実現できるほか、軌道回路などの地上設備を大幅に省略することでメンテナンスの低減にも大いに役立つことが期待される。本稿ではこれら無線式列車制御システムの国内外の開発動向を概説する。

2. 無線式列車制御システムの開発状況

2.1 国内の無線式列車制御システム

1985年ごろ鉄道総研において、列車制御システムの機器構成がどうあるべきかをゼロベースから検討し、地上設備の少ない無線を利用した列車制御システムCARAT (Computer And Radio Aided Train control system) の提案がなされた¹⁾。システムの基本構成、列車の位置検知、列車追跡、ブレーキ制御、無線の伝送品質等に関する検

討を行い、基本性能が得られることを確認し研究開発を終えている。1995年、東日本旅客鉄道(株)においてこのCARATをベースにした無線式列車制御システムATACS (Advanced Train Administration and Communications System) の開発に着手し、仙石線で使用開始の準備を進めている²⁾。これらのシステムでは、列車が車上の速度発電機と、車上データベースを基に列車の位置を算出し、それらの情報が一定間隔で配置した無線基地局を介して車上から地上に送信される。地上では受信した情報を基に、列車走行に必要な進路を構成し、列車が走行できる停止限界を列車に返信する。停止限界を受信した車上装置は、現在位置までの速度照査パターンを作成し、停止限界や速度照査パターンを超えないように列車速度を制御する。その結果、究極の間隔制御である移動閉そくを実現できるほか、踏切の警報時間を一定に制御する踏切定時間警報制御を実現できる。

一方、駅構内の列車検知には軌道回路を使うが、制御情報の伝送には無線を使うシステムが実用化されている³⁾。新幹線における常用のATCが故障したときに使用する代用保安用のATCで、列車無線を使って地上と車上で必要なデータの発信が行われる。東北・上越新幹線で下り線のみを使用して双方向運転を実施した際に、この無線式のATCが使用された報告がされている⁴⁾。

閑散線区用列車制御システムでは、地上装置と車上装置の情報伝送が、駅構内や踏切近傍等の限定された場所でのみ構成できればよいとの条件からコストを抑えた列車制御の検討がなされている^{5) 6)}。国鉄の末期に導入された電子閉そく装置の置き換え用に開発されているものであるが、曲線の速度制限に対する防護機能や、踏切が制御不良の時は踏切手前までに停止する機能などの安全性の向上が実現可能な構成となっている。400MHzの列車無線を利用するもの、2.45GHzの汎用無線の周波数

* 前 信号通信技術研究部 部長

特集：信号通信技術

帯を利用するものが開発されている。

この他に後述するアメリカで開発された AATC (Advanced Automatic Train Control) をベースに開発された電波の伝搬遅延時間を計測することで2つの無線機間の距離を計測して列車の位置を地上で把握して列車を制御するシステム⁷⁾、各列車から地上装置に送信される列車位置情報に基づいて仮想的に設けた閉そく区間の在線判定を行うことで軌道回路を用いない固定閉そくを実現するシステム⁸⁾、ブロードバンド無線システムにより高速大容量の情報伝達を使用して列車制御するシステム⁹⁾、などの研究開発が報告されている。

また、最近では日本の無線式列車制御システムを JIS 化し、さらには国際規格化する活動もなされている¹⁰⁾。JIS 化については、規格を第1部「一般要求事項及び機能要求事項」、第2部「システム要求事項」、第3部「インタフェース要求事項」の3部構成とし、現在第2部までが JIS 化の作業を終了している。

2.2 海外の無線式列車制御システム

ヨーロッパでは、鉄道用列車無線 GSM-R (Global System for Mobile Communications for Railways) を使用する信号システム ETCS (European Train Control System) をベースとしたヨーロッパ統一の列車制御システム ERTMS (European Railway Traffic and Management System) の導入が進められている¹¹⁾。ETCS は、国境を越えて列車が相互直通運転するためには、ヨーロッパ共通の列車制御システムが導入されるべきとの方針に沿って1989年ごろから検討されてきた信号システムである。導入を容易にするため3つのレベルが用意されている。レベル1は、列車検知は従来の軌道回路等で行い、信号機などの設備もそのまま残る。ユーロバリスと呼ばれる地上子で信号機の現示に対応した速度照査を行う。レベル2では、列車検知は従来の軌道回路等で行うが、信号現示に関する情報は GSM-R を使って地上から車上に伝送される。レベル3は地上信号機、軌道回路などはなくなり、列車の位置検知は車上の速度発電機により行われ、GSM-R で地上にその情報が伝送され、それらの情報に基づき列車制御が行われる。地上設備が省略でき、また、移動閉そくが実現できる。1996年に高速線、2001年に在来線に対する EU のインタオペラビリティ (相互直通運転) に関する指令が出され、パリ-ストラスブール、マドリッド-バルセロナ、ローマ-ナポリなどの高速線や、ヨーロッパ各国の在来線に ETCS が導入されている。また、閑散線区向けには、ERTMS のコストを抑えた無線式列車制御システム ERTMS - Regional の開発も進められている¹²⁾。地上信号機や軌道回路を削減し、GSM-R を利用してポイントや踏切などの沿線に存在する現場機器をセンタから集中制御するシステムである。

2003年に共通仕様が策定され、スウェーデンにおいて2010年10月から導入予定との報告がなされている。

北米における無線式列車制御の本格的な検討は、1984年カナダとアメリカで、航空機や宇宙開発で使用されている無線通信技術を鉄道へも応用してスマートな列車制御システムを実現する目的で組織した ATCS (Advanced Train Control System) プロジェクトに始まる。その後、ニューヨーク地下鉄やサンフランシスコ湾岸高速鉄道 (BART) などに無線利用の列車制御システムが導入され、それらのシステムを指す用語として CBTC (Communication Based Train Control) が使用されてきた。AATC は1998年に導入されたが、地上主体で列車位置検知や速度制御を行う点が他のシステムとは大きく異なる。位置検知には軍事用の位置捕捉技術を応用している。車上と地上間の無線通信の伝搬時間を測定することで列車位置を特定する。沿線に無線機を一定間隔で設置し、地上の制御装置と車上の間の通信は、地上の無線機をバケツリレー式に経由して行う。列車の走行制御の判断は地上側で行い、その制御情報を無線により各列車に送信する。2008年10月に鉄道安全改善法 RSIA (Rail Safety Improvement Act) に大統領が署名してからは、列車同士の衝突防止、速度超過による脱線防止、線路沿線作業員の障害防止を目的とした PTC (Positive Train Control) を2015年12月まで導入することが義務付けられ、無線式列車制御システムの開発・導入が活発化している¹³⁾。

中国においては、2008年に開業したチベット鉄道や、最近建設の進む高速鉄道で無線式列車制御が導入されている。チベットの青蔵鉄道は高度が5000mを超えるため、気候変動により軌道回路の漏れコンダクタンスが大きく変動し軌道回路の構成が困難であること、駅間距離が50km以上となる箇所があることなどから、駅構内3km以内は無線式列車制御方式、駅間は車軸検知器によるチェックイン・チェックアウトで閉そく制御を行い、GPS と車上データベースによる速度制御を実施している¹⁴⁾。また、武漢-広州などの300km/h以上の高速鉄道においては、CTCS レベル3と呼ばれるヨーロッパの ERTMS/ETCS レベル2に相当するシステムが導入されている¹⁵⁾。

3. 無線式列車制御で実現される主な機能の実現手法

3.1 基本機能

列車制御を機能から分類すると以下ようになる。これらの機能は無線式列車制御においても特に変わるものではない。

- ・列車の位置を検知する
- ・駅構内の進路を制御する

- ・制御情報を列車に伝達する
- ・制御情報を基に列車を制御する
- ・列車の位置速度に応じて踏切警報を制御する

しかし、例えば地上装置と車上装置が無線を使って列車の位置や速度などの情報を高頻度で発信することで移動閉そくが実現できたり、列車の運転速度に関係なく踏切の警報時間を一定にする制御を可能としたりし、高機能化や制御の柔軟性の向上を可能にする。

3.2 列車の位置検知

列車の位置を列車自身が検知してその情報を地上に伝える車上位置検知と、地上で位置検知するタイプに分けられる。

(1) 車上位置検知

距離積算と、適当な間隔で配置した地上マーカ等での絶対位置補正により、連続的な位置検知精度を確保する方式が開発されている^{1) 2)}。

距離積算には車輪の回転（速度発電機のパルス）や、ドップラレーダなどが利用される。速度発電機を利用する場合には、車輪の滑走や空転に対する対策が必要となる。滑走空転の補正論理の利用、速度発電機を遊輪に設置する、速度発電機の配置した車軸のブレーキ力を弱める、ドップラレーダや慣性センサなどの非接触センサと併用する等の対策があげられる。また、列車後部の正確な位置検知のため、滑走空転対策のほか、列車長の確実な把握や列車分離の検知なども必要となる。

絶対位置補正には、ATS等で用いられる地上子が使用される。列車制御に必要な位置検知精度を確保するため、想定される距離積算の誤差に応じて、絶対位置補正間隔を設定する必要がある。また、GPSやICタグなどの汎用無線技術の利用も検討されている。

(2) 地上位置検知

前述のAATCのように地上装置と車上装置間の無線通信による測距により、地上装置が車上無線機までの距離を連続的に把握し、制御するシステムが開発されている⁷⁾。

3.3 進路制御

駅構内の進路を制御する連動機能やその構成法は、無線式列車制御においても従来の列車制御と基本的に従来と変わりはない。ただし、地上装置が列車位置や速度に関する情報を無線により連続的に把握できれば、設定した進路を取り消した時に列車の停止を検知することにより直ちに接近鎖錠を解錠でき、90秒や120秒に設定されている接近鎖錠の解錠時素分をすべて待つ必要がなくなり進路設定の効率が向上する。また、列車の通過本数が少ない進路に設けられる軌道回路の短絡不良のための時素の設定も必要なくなる。なお、入換え作業や保守用車の進路設定要求に関しては、早くから無線を使用した携

帯端末を利用している鉄道事業者もあり、作業の効率向上に役立っている。

3.4 制御情報の伝達

従来は進路条件や先行列車の位置等から決定される許容速度等の制御情報が、信号機あるいはATC信号として軌道回路を使用して運転士や車上制御装置に伝達されてきた。この情報が無線を利用して伝達される。

日本においては、電波は鉄道事業者が列車無線用として免許を取得している400MHz帯を利用するが、免許不要の2.45GHz帯の汎用無線の使用についても検討されている。

ヨーロッパでは、列車無線GSM-Rが広く使用されている。GSM-Rは900MHz帯の鉄道専用の移動体通信システムで、信号制御のためのデータ伝送やオペレーションに必要な音声通話だけでなく、入換無線、車両位置や設備の診断情報の伝送、旅客に関する情報伝送などにも使用される。ヨーロッパの周波数を割り当てる組織CEPT (the European frequency allocation body) の勧告によりこの周波数帯を使用することとなった。実際の通信に関する様々な要求は1992年に立ち上げられたEIRENE (European Integrated Radio Enhanced Network) プロジェクトで検討された。1995年には機能要求仕様FRSとFRSに基づくシステム要求仕様SRSが作成され、その後MORANE (Mobile Oriented Radio Network) プロジェクトで改良が検討され、2000年にFRSとSRSが作成された。本格的な設備は1999年スウェーデンでなされ、その後ヨーロッパ全域、さらには中国、オーストラリアなどでも普及している。

3.5 制御情報に基づく列車の制御

受信した制御情報と列車の位置情報からブレーキパターンを発生させ、速度照査を行い、必要によりブレーキ動作させる構成は、車上制御主体のATC（例えばデジタルATC）と基本的には変わらない。

3.6 踏切制御

地上と車上の無線による通信機能を利用すれば、列車の位置と速度が連続的に把握できるため、様々な列車走行に対して踏切の警報時間をできるだけ一定に制御する踏切定時間警報制御が可能となる。また、踏切設備に何らかの不具合が生じて列車が踏切に接近しているにもかかわらず警報や踏切の遮断が不完全な場合には、列車にその状況を無線で伝達し、列車を踏切手前に停止させるなどの安全性向上対策が可能となる。

3.7 その他

軌道回路を使用することで、基本的にレール破断を検

特集：信号通信技術

知できる。レール破断検知の必要性については議論があるが、無線式列車制御においてもレール破断検知能が必要となれば別途対策を講じる必要がある。

4. 無線式列車制御の課題

4.1 無線利用時の信頼性確保

無線を列車制御に利用することで、安全性や信頼性が低下することは避けなければならない。安全性の確保については、セキュリティ確保のための暗号化やデータの健全性チェックのための技術を組み込まれる。鉄道における安全に関わる伝送に関する IEC 国際規格 (IEC62280) では、無線のようなオープンな伝送では、「繰返し」、「削除」、「挿入」、「再順序」、「訂正」、「遅延」、「なりすまし」などへの対応が必要とされている⁽¹⁶⁾。

信頼性確保に関しては、必要となるチャンネル数や伝送容量、許容される伝送誤りや遅延、移動局となる列車速度などを考慮して、使用周波数の選定、基地局配置やゾーン切換えなどの検討を行う必要がある。また、4.2節で述べる列車制御専用の電波の確保も列車制御の信頼性確保のためには極めて重要である。

4.2 周波数の確保

日本においては鉄道専用の無線周波数は確保されておらず、列車無線、作業連絡用無線など鉄道事業者が利用目的によって必要となる周波数帯域の使用を申請し、鉄道事業で使用可能な150MHz帯や400MHz帯の無線の免許を受けて利用している。列車制御に使用する無線についても鉄道が使用できるこれらの周波数を利用することになる。列車制御に使用することから、必要な場所で、必要な時に確実に地上装置と車上装置間で通信が行えることが重要である。そのためには、他の目的で使用される電波との干渉を抑えられ、一定以上の伝送品質の確保が可能な鉄道専用の電波の確保が重要になると考える。

4.3 列車長の管理

軌道回路を使用しないで列車の位置検知を行い列車の間隔を安全に制御するためには、3.2節で述べたように列車長の把握や車両分離の検知など、列車の最後部位置の把握も重要である。列車編成数が固定でない場合、例えばERTMS/ETCSでは列車長は運転士による編成長の手動入力などによるようだが、入力ミスをした場合の対策などが必要になる。貨物列車のように編成数が様々に変わる車両については特に注意が必要である。

5. おわりに

無線式列車制御の国内外の開発状況と、それらを導入した際の列車制御における機能向上、および導入にあたっての課題について概説した。無線通信技術、情報処理技術の進歩はめざましく、それらを有効に利用することで、さらに安全で、便利で、低コストで、さらに保安全性に優れた列車制御システムを実現できる可能性がある。そのような列車制御システムの実現に向けて、関係者が力を合わせて緒課題の解決に向けて取り組んでいく必要がある。

文献

- 1) 長谷川豊：次世代運転制御システムの構想, RRR, pp.9-14, 1988
- 2) 今野信三：無線式列車制御の導入, 電学誌, p.549-552, 130巻8号, 2010
- 3) 松木孝仁, 青柳宗之: デジタル列車無線を使用した代用保安用のATCの開発, JREA, Vol.48, No.5, pp.12-16, 2005
- 4) 葛西隆也: RS-ATC(東北・上越新幹線の無線ATC), 鉄道と電気技術, Vol.22, No.1, pp.19-24, 2011
- 5) 安西理也: 地方交通線向け列車制御システムの開発, J-rail2010 論文集, S7-1-5 pp.61-64, 2010
- 6) 平栗滋人他: 閑散線区向け“拠点無線式列車制御システム”の開発, J-rail2010 論文集, S7-1-4 pp.57-60, 2010
- 7) 新井衛他: 無線測距式CBTCシステム 車上装置の開発, 第42回鉄道サイバネ・シンポジウム, 論文523, 2005
- 8) 高梨健他: IT-ATPシステムの試験報告, 第47回鉄道サイバネ・シンポジウム, 論文616, 2010
- 9) 鈴木光彰他: 無線式情報指向型列車制御システムの開発, 第47回鉄道サイバネ・シンポジウム, 論文611, 2010
- 10) 松本雅行: 無線利用の列車制御システム(JRTC)の規格化, 鉄道と電気技術, Vol.18, No.7, pp.46-50, 2007
- 11) UIC Report for ERTMS Annual Conference, 11-13, 2007
- 12) 菅原宏之他: 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
- 13) <http://www.fra.dot.gov/Pages/1265.shtml>
- 14) 王俊峰他: 青蔵鐵路無線列車信号系統研究, Journal of the China railway society, Vol.24, No.3, 2002
- 15) Ji Xuesheng, Liu Dawei, Proceedings of 7th world Congress on High Speed Rail, pp.451-457, 2010.
- 16) IEC 62280-2: Railway applications - Communications, signalling and processing systems - Part2: Safety related communication in open transmission systems.