

無線を利用した列車制御システムの 世界の動向

長岡技術科学大学 大学院技術経営研究科 システム安全系 系長 教授
平尾 裕司

1. はじめに

海外においてもERTMS/ETCS、CBTC、PTCなど、無線を利用した列車制御システムの開発、展開が進められています。無線を利用した列車制御システムは、信号・車両制御・輸送システムの革新技術の中心にあり、これらの開発状況について背景を含めて把握しておくことが重要です。

ここでは、これら海外における無線を利用した列車制御システムの現状と課題について、今後の日本における列車制御システムへの期待を含め、以下に述べます。

2. 無線を利用した列車制御システム

2.1 ERTMS/ETCS の展開

ETCS (European Train Control System) は、ヨーロッパにおいて国ごとに異なる列車制御システムを統一して国境でのスムーズな列車運行、すなわちインターオペラビリティを実現するために1990年代の初めに開発が開始されたシステムです。1996年には、インタオペラビリティ指令が制定され、その指令において列車制御システムとしてのETCSに運行管理を含むERTMS (European Railway Traffic and Management System) が規定されました。

ERTMS/ETCSは、段階的な導入を容易にするために、アプリケーションレベル1~3に分類されています。レベル1は、ATSの機能を実現するためのもので、ユーロバリスといわれるトランスポンダ地上子と車上装置によってATSに相当する機能を実現します。レベル2は、携帯電話無線に鉄道専用周波数を割り当てたGSM-R無線によって車内信号方式の列車制御システムを実現します。両者とも、列車の検知のために軌道回路を使用します。レベル3は、軌道回路を用いずにGSM-R無線のみでレベル2の機能を実現するシステムで、2011年にスウェーデンのローカル線に導入されましたが、主要幹線を対象としたシステム開発はこれからの段階です。

なお、ETCSは列車制御システムを対象とし、ERTMSは列車制御システムと列車運行管理システムを含めたものを意味しますが、実際には、まだ運行管理の部分については、まだ実態がないのが実情です。



Profile

略歴

博士(工学)	東京大学
1953年	北海道出身
1973年	函館工業高等専門学校 電気工学科卒業
1973年	日本国有鉄道入社
1998年	財団法人鉄道総合技術研究所 列車制御研究室長
2003年	同 信号通信技術研究部長
2007年	長岡技術科学大学 大学院技術経営研究科 システム安全系 教授

これまでにレベル2のERTMS/ETCSは、イタリア（2005）、スイス（2007）、スペイン（2006）やオランダ（2006）などに導入されています。イタリアでは直流電方式から交流方式への変更に合わせて既存の軌道回路、列車制御システムについても改良が必要であったこと、スイスではBahn2000計画によって主要拠点駅での接続を可能とするために高速化と時隔短縮が可能な列車制御方式が必要であったことがERTMS/ETCSを早期に導入した理由です。しかし、自国内での高速鉄道網に交差誘導線による列車制御システムLZBを有するドイツや、軌道回路による列車制御システムTVM430を有するフランスでは、それらシステムの寿命もあるため、ERTMS/ETCSの導入には積極的になれないのが実情です。今後、インタオペラビリティ指令による導入義務があるため、順次ヨーロッパ内にERTMS/ETCSが導入されると考えられます。イギリス・ロンドン近郊においては、後述しますように、ERTMS/ETCSレベル2の導入が計画されています。

新線以外でのERTMS/ETCSの導入では、車上および地上の既存システムを一斉には交換できないため、移行するための対策が必要とされます。そのようなことからある期間、既存の列車制御システムとの混在運転が必要となるため、既存システムの地上設備からの情報を車上のERTMS/ETCSで読み換えるSTMを設けています。さらに、スイスの例にみられるように、地上の新たなケーブル敷設を避けて低コスト化とするために、分岐を含む箇所だけに連続速度照査パターンを発生させ、分岐がない箇所については、停止のための速度照査パターンを発生させない方法（LS）をとるなど個々の国の要求も多岐にわたるため、ソフトウェア管理が複雑になっています。また、使用開始されたスイスで、重大なソフトウェアのエラーも報告されています。

ERTMS/ETCSのソフトウェアのバージョン管理として、システム要求仕様書SRSのこれまでの2.2.2dバージョンと互換性を持たせ、新たな追加修正を行うベースライン3の準備が進められています。ベースライン3では、スイス提案のLS機能および踏切制御機能の追加、ブレーキパターンの改修、STM仕様の改修などが行われます。また、ERTMS/ETCSの車上装置ソフトウェアについて、オープンソースとして共同開発による低コスト化を目指すプロジェクトが昨年ドイツ鉄道によって始められました。

データ伝送技術として旧世代と位置付けられるGSM-Rについては、データパケット交換方式GPRSによる回線容量の改善などの検討が進められています。また、さらに、非常通

知によってGSM-RでのERTMS/ETCSのデータ伝送に与える影響についても、それを低減させるための検討が進められています。

中国においては、トランスポンダによる閉そく境界への停止パターン発生と軌道回路による緊急停止信号伝送によるCTCSレベル2で天津-北京間に導入されましたが、現在ではERTMS/ETCSレベル2と機能的には同様のCTCSレベル3が展開されています。

2.2 CBTC の展開

CBTC（Communications-Based Train Control）は、地下鉄や新交通システム、空港連絡システムなど、広く都市交通システムを対象とする列車制御システムです。CBTCの規格にはIEEE Std 1474.1:2004がありますが、その定義として

- ・車上での列車位置検知
- ・地上・車上間での連続双方向データ伝送
- ・フェールセーフな車上・地上装置による走行許可限界の決定と防護

を要件としています。また、構成要素として、ATP（列車防護）、ATO（自動運転）、ATS（運行管理）、データ伝送の4つのシステムを含みます。

ERTMS/ETCSはヨーロッパ内のインタオペラビリティを目的とし、また構成コンポーネントについてはどのメーカーのものでも共通に運用できるようにするために、インタフェース仕様まで詳細に決めています。これに対して、CBTCでは、推奨設計の規格はあるものの、各メーカーによってシステムの機能と構成、データ伝送方式も異なります。運転密度を含め、各線区の要求条件に適合するシステム構成が可能となりますが、システム間での共通性がないため、線区を越えて列車の乗入れなどが必要な場合には個別に対応が必要になります。

最初のCBTCは、1980年代に実現され、現在では無人運転を含む多くのシステムが海外で稼働しています。

2.3 PTC の開発

アメリカでは、2005年に発生した3件とその前後での数件の重大鉄道事故を受けて、2008年に連邦議会が鉄道安全改革法（RSIA）を成立させました。この鉄道改革法では、列車の衝突や速度超過を防止する列車制御システムPTC（Positive Train Control System）を主要線区に2015年末までの導入を義務付けているとともに、このPTCには、他線

区への乗り入れ等がある場合には対応できること、すなわちインタオペラビリティを要求しています。アメリカでは、貨物列車を中心に乗り入れが多く行われています。

PTCとしては、現在、従来からの軌道回路コード式ATCおよびトランスポンダによる方式(ACSES)と、GPSによる位置検出と220MHz帯の無線伝送による方式(I-ETMS)の2種類のシステムの開発が行われています。

このような状況のなかで、アメリカにおけるPTCの開発、展開は必ずしも順調に進展しているわけではありません。その理由として、導入期限が2015年と短いなかで鉄道改革法が求めるインタオペラビリティが可能なPTC導入を行うために、主要な鉄道会社はそれぞれ自社の線区全体のPTCについてメーカーのみと契約することから、インタオペラビリティ実現のための仕様開示が十分ではないことが指摘されています。

ヨーロッパにおけるERTMS/ETCSの場合には、1996年のインタオペラビリティ指令によって導入が義務付けられましたが、技術開発は1990年代の初めに開始し、各国の既存システムからの移行の検討を含めERTMS/ETCS導入には長い期間と多くのマンパワーを要しています。

列車制御システムには、適当なシステム規模と寿命時間があります。インタオペラビリティに重点を置くあまり融通性が小さく、鉄道経営に有効な機能を付加することができなければ新システムの魅力は乏しいものとなります。

3. 都市高密度運転区間での対応

以上のように、ERTMS/ETCSはインタオペラビリティ指令によってEU内での主要な線区への導入が義務付けられています。これまでは主に高速幹線でのレベル2の導入、あるいは準幹線でのレベル1の導入でしたが、最近では、大都市高密度運転区間にも幹線からのERTMS/ETCS搭載列車を乗り入れるプロジェクトがいくつかあります。ERTMS/ETCSはインタオペラビリティを第1の目的としていますので、ERTMS/ETCSの場合には都市高密度運転区間で24～30列車/時の運転が可能なのか、あるいは可能でなければどのような対応をとる必要があるのかが現在の重要な課題となっています。

ロンドンでは、ともに2018年の使用開始を目指すThameslinkとCrossrailの2つのプロジェクトがあります。Thameslinkでは、ロンドン中心部の4km・4駅の区間でロンドン北部と南部を結ぶ複数線区からのERTMS/ETCSレベル2搭載列車が合流し、24本/時の高密度運転が行われます

(設備上は27本/時)。Crossrailでは、同様にロンドンの東部と西部からの複数の線区からの列車によって10km・6駅区間において24本/時の高密度運転が行われます(設備上は30本/時)。

ロンドン中心部の合流区間における高密度運転のための方策は、ThameslinkとCrossrailで異なる方式が選択されました。Thameslinkでは、運転士の手動運転による走行時間の変動を抑えて時隔短縮を可能とするためにERTMS/ETCSに自動運転ATOを付加します。一方、Crossrailでは、車上にERTMS/ETCとCBTCの2つのシステムを搭載し、合流区間では車上装置をCBTCに切替えかつ自動運転を行って高密度運転に対応します。

Crossrailが車上切替えによるCBTC運転とした理由は、

- ・CBTCは高密度運転の実績が多くあるのに対し、ERTMS/ETCSに新たにATOの機能を追加するにはGSM-Rへの伝送情報追加とERTMS/ETCSの保安パターンとATO制御パターンの整合性などの開発リスクがある
- ・将来計画のために設備上は30本/時の列車運転密度を確保しなければならない
- ・Crossrailの合流区間(地下)にはフルサイズのホームドア設置が必要であり、自動運転の列車に合わせて適切なタイミングでホームドア開閉制御を行うは、現行のGSM-Rでは最大12秒以上の時間遅れがあるため無理がある

などのリスクがあるためです。また、これら2つのプロジェクトでインフラ管理組織がそれぞれ異なるほか、運行管理センタについても、Crossrailでは新設するのに対してThameslinkでは既設での対応など、状況は異なります。なお、Thameslinkでは、高密度運転のためのGSM-Rの対策として、セルサイズを1km～2km、低いアンテナ配置とします。また、閉そく境界を軌道回路境界を越えて設定する対策もとられます。

同様な、課題がイスタンブールボスポラス海峡、マドリッド地下鉄などでも生じています。イスタンブールの場合には、海峡トンネル14km・4駅の区間にERTMS/ETCSレベル1とCBTCの2つのシステムを重複して設備することで対応します。

このようなERTMS/ETCSの高密度運転区間での対応については、現時点でそれぞれの条件を考慮して決定しているのが実情です。GSM-Rの切換時間遅れと容量の弱点が指摘されてきましたが、このような高密度運転区間においては重要なキーフアクタとなっています。ERTMS/ETCSのレベ

ル3では移動閉そくとなり、高密度運転区間での対応方法も現時点とは異なったものとなると考えられますが、無線システムの情報伝送容量、速度の向上はより重要になります。

また、運行管理システムについては、ERTMS/ETCSではまだ十分な検討が行われていませんが、レベル3で得られる各列車の位置と速度情報を適用すれば、これまでのCBTCの運行管理システムとは異なる幹線、都市近郊線や都市中心部の合流区間の新たな運行管理システム実現も考えられます。特に、日本のATACSはレベル3に相当し、高度な運行管理システムの早期の構築が期待されます。

4. 列車制御システム開発と関連研究 - INESSプロジェクト

ヨーロッパでは、ERTMS/ETCSのプロジェクトと並行して、INESS (Integrated European Signalling System) のプロジェクトが2008年から3年間、欧州委員会の支援を受けて、UIC、ヨーロッパ内の鉄道事業者、メーカ、大学などが参加して実施されました。このプロジェクトでは、ERTMS/ETCSを効果的に展開するために、ERTMS/ETCSと整合する新たな連動装置の仕様の明確化、調達コストの低減を目的として、(a) ヨーロッパ共通となる連動中核機能と、RBC (無線基地局) や運行管理システムを含むサブシステムとの機能分担 (b) 連動装置展開のためのビジネスモデル、(c) 認証のための試験、セーフティケース (安全立証ドキュメント) が検討されました。具体的には、プロジェクトマネジメント、ビジネスモデル、システム設計、機能要件、機能アーキテクチャ、試験と運用開始、セーフティケース、普及展開を扱う8つの分科会において詳細な検討が行われました。

このような基本的なプロジェクトは重要な意味を持っています。特に、セーフティケースについては、安全認証に必要で重要なものですが、その内容については必ずしも明確ではなく、多くの労力とコストを要しているのが実情です。認証を得るために要するコストは、システム開発コストの10%を要するともいわれます。このようなセーフティケースによる安全立証のための方法として、図1のようなGSN (Goal-structuring Notation) による安全要求事項の記述と展開について検討しています。

GSNでは、Arg 0は最上位の安全要求事項で、その要求事項が実現されていることを示すために、方策や評価基準、証拠などC~Stの要素によって説明を加えながらより具体的な下位の要求事項に分解します。最終的には、Refよ

て下位の安全要求の正当性を示し、結果として最上位の正当性を示そうというものです。

なお、INESSプロジェクトでは、セーフティケースの検討のほか、連動装置サブシステム間のインタフェースの記述法と共通化についても検討が行われています。ドイツなどでは、引き続いてそれらの検討が行われています。

このように、ERTMS/ETCSについての検討だけに留まらず、さらにより大きな枠組みで列車制御システムに共通となる基礎部分の体系化に共同で取り組むことは非常に大事なことで、日本においても必要なことです。

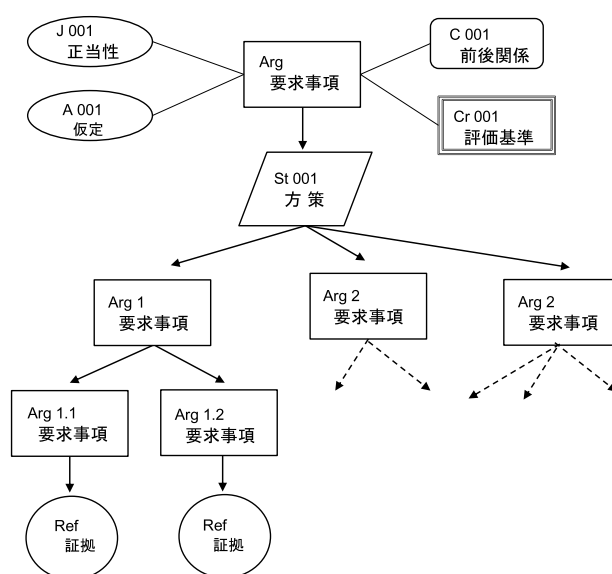


図1 GSNによる安全要求事項の展開

5. おわりに

列車制御システムは、経営戦略をすすめるうえでも重要なシステムです。列車制御システムに無線を適用することにより、低コスト化とともに、経営戦略として有効な新たな機能を実現することが期待されています。特に、各列車の位置と速度が連続的に把握できることにより、これまでとは異なる高機能な輸送システムが可能になると考えられます。そのためには、海外での無線を利用した列車制御システムの開発状況を把握し、置かれている条件、目指そうとしている結果と方策について理解し、日本の状況を反映した考察が必要です。

また、ヨーロッパにおける INESS プロジェクトに見られるような、列車制御システムに共通となる基礎部分の体系化は日本においても必要かつ重要です。