

無線列車制御システムの最新技術と今後の展望

明日香 昌* 小崎元嗣**
 小篠大輔* 田原一浩**
 河野博行**

Latest Technologies and Future Prospects of CBTC System

Masashi Asuka, Daisuke Koshino, Hiroyuki Kono, Mototsugu Kozaki, Kazuhiro Tahara

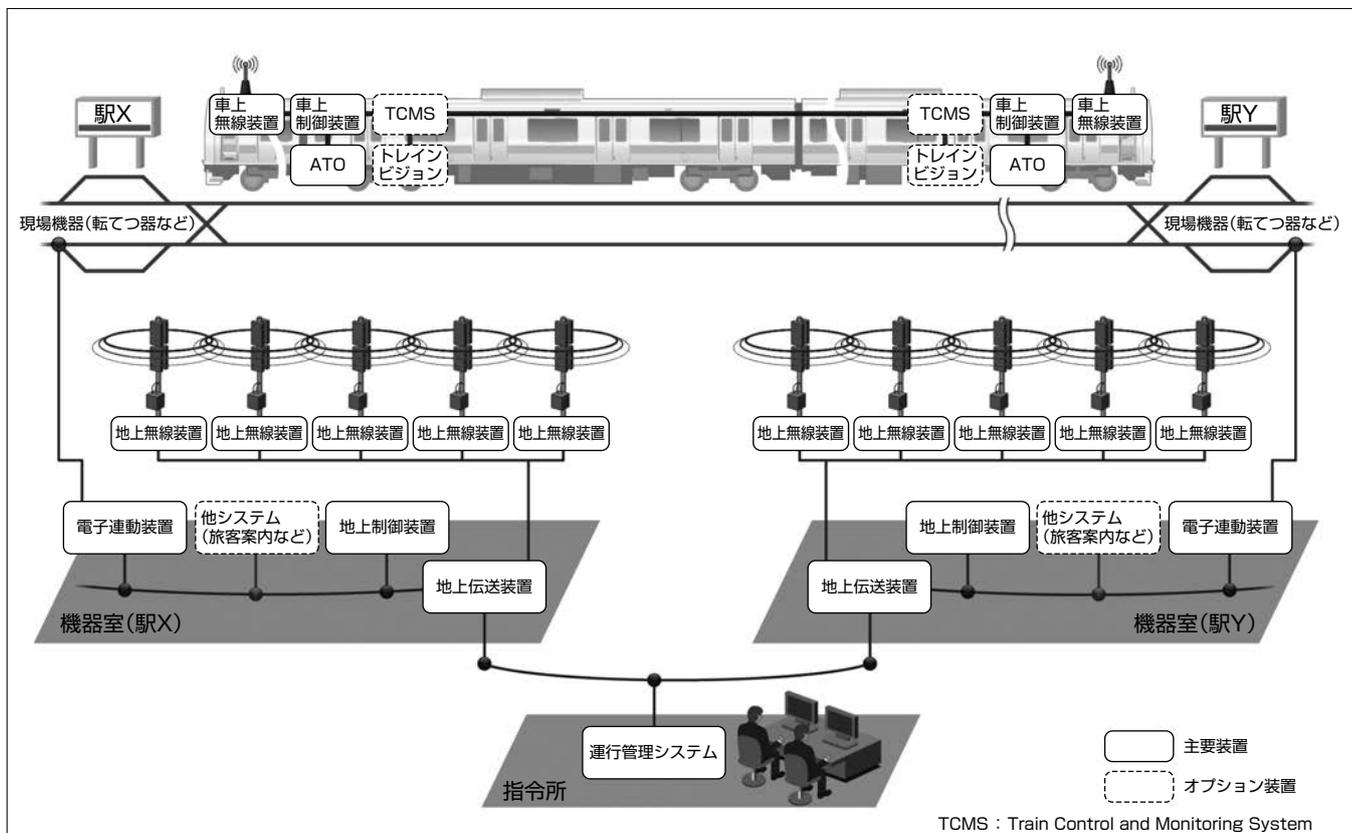
要 旨

地上設備が主体であった従来の列車制御システムに代わり、無線伝送によって地上と車上を連携させて保安機能を実現する無線列車制御システムの実用化が進んでいる。無線列車制御システムでは、車上で在線位置を検知して地上へ無線で伝送するため、これまで地上にあった列車在線検知器(軌道回路)が不要となる。このため、地上設備が削減でき、メンテナンスの効率化やライフサイクルコストの削減が見込める。さらに、従来システムに比べ列車の詳細な位置が管理できるため、列車間隔短縮によって運行高密度化を実現する移動閉そくと呼ばれる列車制御方式を導入できる。

無線列車制御システムは海外ではCBTC(Communications-Based Train Control)と呼ばれ、保安機能に加え、自動列車運転装置(Automatic Train Operation : ATO)や運行管理

システムを統合したシステムとして、IEEEで規格化⁽¹⁾されている。三菱電機はIEEE規格に準拠し、さらに、様々な事業者からの要求に柔軟に対応できるCBTCシステムを開発して市場展開を進めている。当社CBTCシステムの制御装置は、鉄道システム設計で最も高い安全レベルを意味するSIL4(Safety Integrity Level 4)の安全認証を取得済みである。無線装置については、2.4GHz帯における耐干渉性を向上させる独自技術を適用し、都市部の劣悪な電波環境でも、地上・車上制御装置間の伝送品質を確保している。

当社CBTCシステムの市場展開事例として、ニューヨーク市交通局が管理するニューヨーク地下鉄向けのシステムがあるが、現在、その地上制御装置、車上制御装置、電子連動装置の開発を行っている。



CBTCシステムの標準構成

CBTCシステムの基本構成要素である保安装置(地上制御装置、車上制御装置、電子連動装置)、無線装置、ATO、運行管理システム、地上伝送装置の全てで、当社は実績とノウハウを持っている。これらの融合によって、高機能・高品質なCBTCシステムを提供する。

*伊丹製作所(博士(工学)) **同製作所

1. ま え が き

CBTCシステムは、ロンドンや北京など世界中で約60システムが稼働中である⁽²⁾。メンテナンス効率化、ライフサイクルコスト削減や運転高密度化の観点から、今後CBTCシステムが世界的に主要な列車制御システムになっていくと考えられる。

本稿では、2章でCBTCシステムの列車制御方式と導入効果を述べる。無線によって列車の状態が確認できると地上設備による制約が少なくなることから、従来に比べ柔軟で効率的な列車運行が実現できる。3章では、地上・車上制御装置等の保安装置に採用した安全設計について述べる。当社は鉄道安全規格⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾に準拠して保安装置を開発し、海外の第三者機関から安全認証を取得した。4章では、CBTC無線装置について述べる。当社CBTC無線装置は、免許不要で運用でき、利便性が高いISM(Industry Science Medical)帯の中でも、2.4GHz帯を採用した。2.4GHz帯は、広い周波数帯域幅と十分な伝搬距離を確保できる一方で、同周波数帯を用いる無線LAN等による列車制御への影響が課題である。そこで、当社独自の技術で情報伝送の信頼性と安定性を確保した。5章では、製品展開の一例を述べる。当社は、3章で述べる保安装置を利用し、ニューヨーク市交通局向けの開発を行っている。

2. CBTCシステム

2.1 CBTCシステムの列車制御方式

CBTCシステムでの列車制御の基本的考え方を図1に示す。

- ①列車位置検知：位置補正地上子からの位置情報と速度センサによる走行速度測定によって、車上制御装置が自列車位置を計算する。
- ②データ伝送(列車位置)：車上無線装置が列車位置情報を地上に伝送する。
- ③列車在線管理・停止限界作成：車上からの列車位置情報に基づき、地上制御装置が列車位置を管理し、後続列車の停止限界(列車が走行できる限界位置)を作成する。
- ④データ伝送(停止限界)：地上無線装置が停止限界を車上無線装置に伝送する。
- ⑤速度照査パターン作成：車上制御装置が停止限界を起点に速度照査パターン(停止限界までに停止可能な速度の上限値を列車位置ごとに示した曲線)を作成する。
- ⑥ブレーキ制御：列車速度が速度照査パターンを超えたことを車上制御装置が検知すれば、ブレーキ制御を行う。

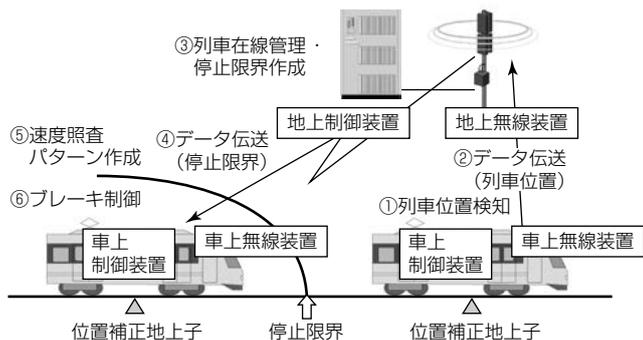


図1. CBTCシステムでの列車制御

- ⑤速度照査パターン作成：車上制御装置が停止限界を起点に速度照査パターン(停止限界までに停止可能な速度の上限値を列車位置ごとに示した曲線)を作成する。
- ⑥ブレーキ制御：列車速度が速度照査パターンを超えたことを車上制御装置が検知すれば、ブレーキ制御を行う。

2.2 CBTCシステム導入の効果

(1) 地上設備の削減

従来の列車制御システムは、列車在線検知のために線路に設置した軌道回路を維持管理する必要があったが、CBTCシステム導入で軌道回路が不要になり、メンテナンスの効率化を図ることができる。

(2) 列車運行の高密度化

従来の列車制御システムでは、停止限界を列車在線検知の単位である軌道回路の境界にしか設定できなかった。これに対し、CBTCシステムでは停止限界を先行列車の後方に設定できるので、従来に比べ列車間隔を短縮できる(移動閉そく方式)。

(3) 進路設定・解除の効率化

従来の列車制御システムでは、列車接近時に進路の引き戻しを行った場合、列車が停止するまでの十分な時間は進路の解除を待つ必要があった(接近鎖錠)。これに対し、CBTCシステムでは、車上制御装置からの情報によって列車が停止していることを地上制御装置が検知できるので、短時間で進路の解除が可能となる。

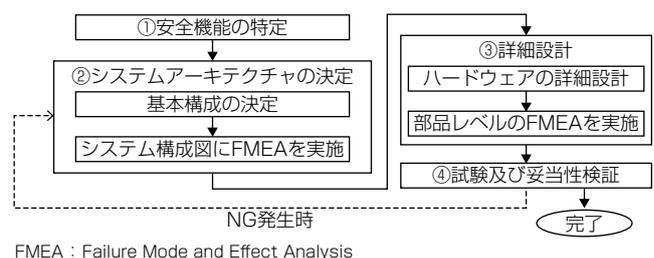
(4) 障害発生時の縮退運転の充実

従来の列車制御システムでは、列車の進行方向ごとに、ATC(Automatic Train Control)信号送信機やトランスポンダ等の列車制御用のハードウェアを軌道内に設置する必要があった。これに対し、CBTCシステムでは地上設備の制約がない。したがって、複線区間の一方の線路で障害が発生した場合、他方の線路のみを利用して上り・下りの列車運行を続行する単線運転が容易に実現可能となる。

3. 保安装置の安全設計

3.1 設計手順

当社保安装置は、2014年に海外の第三者機関から鉄道システム設計で最も高い安全レベルを意味するSIL4の安全認証を取得した。その際に適用した、鉄道安全規格に基づく保安装置の設計手順を図2に示す。



FMEA : Failure Mode and Effect Analysis

図2. 保安装置の設計手順

- ①安全機能の特定：システムに要求される機能を分類し、安全に関わる機能を特定する。
- ②システムアーキテクチャの決定：鉄道安全規格の手法に基づいて基本構成を決定し、機能ブロックレベルのシステム構成図を作成する。システム構成図に対してFMEAを実施する。
- ③詳細設計：システム構成図をハードウェアの詳細設計に展開し、部品レベルのFMEAを実施する。
- ④試験及び妥当性検証：FMEAで特定した故障に対する診断機能が設計通りに動作することを検証する。

3.2 システムアーキテクチャ

当社で採用した保安装置のシステムアーキテクチャの概念を図3に示す。このアーキテクチャでは、A系とB系で並行して同一の安全機能を実行し、最終出力部で両系の制御出力を統合する。各系の処理状態は診断部で比較しており、両系での同時故障が起こる前に、出力を安全側に固定することができる。

3.3 情報伝送の安全設計

地上・車上制御装置と無線装置の情報伝送に関わる機能配置を図4に示す。図で、保安装置(地上・車上制御装置)は、無線装置を含む通信路で接続されており、伝送する情報の安全性確保のため、制御装置は保安伝送機能、無線装置はアクセス保護機能を持っている。これらは、鉄道保安伝送規格⁽⁶⁾に規定された機能である。保安伝送機能は伝送異常(情報の重複、削除、挿入、順序誤り、破損、遅延)に対する防護機能であり、これを実施する装置には安全性が要求される。一方、アクセス保護機能は不正な情報操作に対する防護機能であり、安全性は必ずしも要求されない。

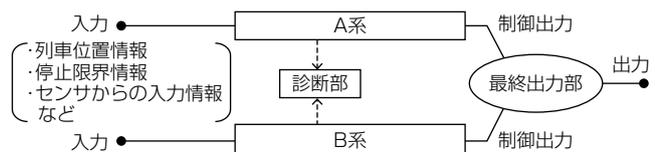


図3. 保安装置のシステムアーキテクチャ

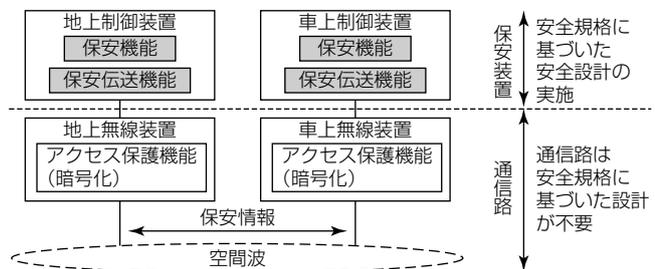


図4. 情報伝送の機能配置



図5. 地上制御装置



図6. 車上制御装置

そこで当社は規格に基づき、保安伝送機能を制御装置で、アクセス保護機能を無線装置で実現した。これによって保安装置の処理負荷を軽減し、保安機能を充実させた。

3.4 保安装置

3.4.1 地上制御装置

偶発故障発生時に、システム稼働状態で故障が発生した系の基板交換が可能である。また、他機器とのインタフェースにはEthernet^(注1)を採用し、汎用性を高めている。地上制御装置の外観を図5に示す。

(注1) Ethernetは、富士ゼロックス㈱の登録商標である。

3.4.2 車上制御装置

車両への搭載スペースを削減できるコンパクト標準3Uラックを採用した。さらに、相互直通運転やシステムチェンジを容易に実現するため、CBTCシステムに加えて既存列車制御システムにも対応可能なアーキテクチャとした。車上制御装置の外観を図6に示す。

4. CBTC無線装置

CBTC無線装置で利用する2.4GHz帯は、免許不要で運用できるため利便性が高い。一方、無線LANやBluetooth^(注2)といった様々な干渉波の影響が課題である。また、新たな設備の設置、無線サービスの開始、一般無線機器の増加によって変化する電波環境への対処も重要である。当社は、これらの課題に対処するため、耐干渉性を向上させた通信方式を開発するとともに、無線装置に電波環境監視機能を搭載した。

(注2) Bluetoothは、Bluetooth SGI Inc.の登録商標である。

4.1 耐干渉性を向上させた通信方式

4.1.1 干渉回避機能

従来方式と、当社干渉回避機能の概念を図7に示す。従来方式では、送信すべき信号(希望信号)の時間や周波数帯の占有範囲が広いと、干渉信号との衝突が発生する。そこで当社は、占有時間を短く、占有周波数帯を狭くした信号を、周波数を変えながら複数回送信し、受信側で干渉波と衝突していない信号を選択することで、安定したデータ伝送を行う方式を開発した。

4.1.2 干渉抑圧機能

干渉源が多数存在する電波環境の場合、4.1.1項で述べた干渉回避機能だけでは全ての信号を正常に受信できない可能性がある。そのような環境下でも安定した伝送品質を維持するため、図8に示す干渉抑圧機能を開発した。干渉抑圧機能では、始めに干渉波電力レベルの測定を行う(図の①)。次に、測定した干渉波電力レベルに応じた係数を算出する(図の②)。この係数は、干渉波電力が小さい程大きくなるように重み付けを行う。その後、受信信号に係数を掛け合わせて合成することで、受信信号のS/N比を改善する(図の③)。

4.2 電波環境監視機能

当社のCBTC無線装置では、電波環境監視機能を搭載し

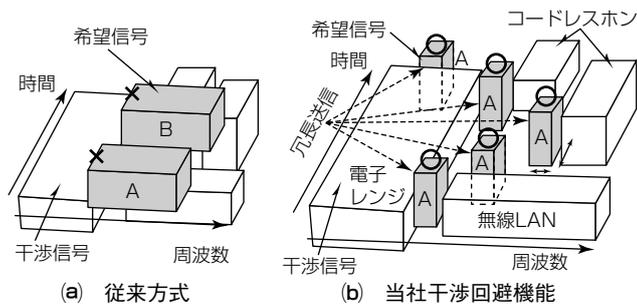


図7. 干渉回避機能の概念図

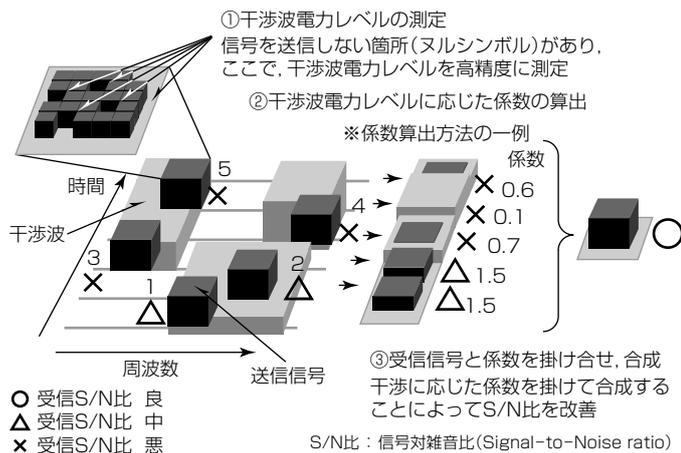


図8. 干渉抑圧機能の概念図

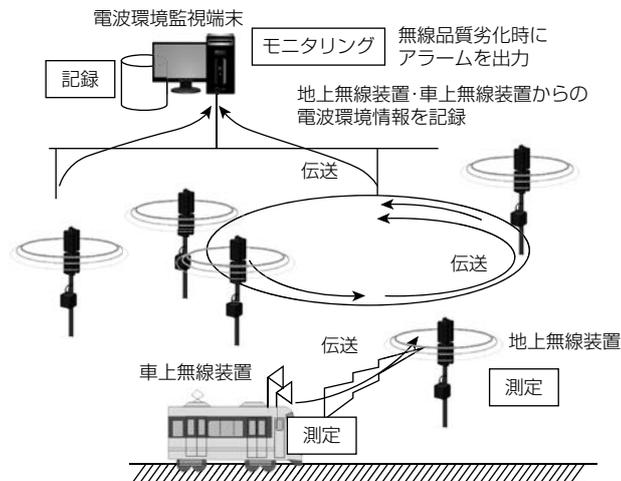


図9. 電波環境監視機能

ており、地上無線装置と車上無線装置の双方で干渉波レベルや無線信号の受信レベルの測定を行う。これらを地上に設置する電波環境監視端末でモニタリングすることによって、列車運行に影響が出る前に無線品質の劣化を検出し、事前対策を可能とする(図9)。

5. ニューヨーク市交通局向けCBTCシステムの開発

ニューヨーク市交通局(New York City Transit Authority: NYCTA)が管理するニューヨーク地下鉄は路線長375km規模の路線であり、今後35年間で全線にCBTCシステムを導入することが計画されている。NYCTAでは、競争

促進・長期安定調達を目的として、複数メーカーからのCBTCシステム調達を目指している。調達先として現在2社を認定済みであり、2015年に第3のメーカー候補として当社を選定した。現在、3章で述べた保安装置を適用して、地上制御装置及び車上制御装置を開発中であり、NYCTAの試験設備で要求仕様や安全性への適合性を実証する予定である。また、NYCTAは、CBTCシステムの導入と並行して信号設備の更新を進めており、その中には電子連動装置が含まれている。当社は電子連動装置を2013年に受注し、この製品についても3章で述べた保安装置を適用して開発を進めている。

6. むすび

今後の主要な列車制御システムになっていくと考えられるCBTCシステムの最新技術について述べた。さらに、CBTCシステムは、本稿で述べた機能向上以外にも、無線による地上・車上間情報伝送を利用した様々な機能を向上させることができる。例えば、地上から各列車のATOに先行列車の運行状況を送信することによって、状況に応じた省エネルギー運転を実現できる⁷⁾。また、海外ではCBTCシステムを利用した無人運転(Unattended Train Operation: UTO)列車の導入が進んでいくことが予想される。今後もCBTCシステムによる高機能かつ事業者のニーズに合わせたソリューションを提供していくために開発を進める。

参考文献

- (1) IEEE STANDARDS ASSOCIATION: 1474.1-2004-IEEE Standard for Communications-Based Train Control(CBTC) Performance and Functional Requirements (2009)
- (2) UNIFE: WORLD RAIL MARKET study forecast 2014 to 2019, Eurailpress (2014)
- (3) EN 50126: Railway applications-The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety(RAMS) (1999)
- (4) EN 50128: Railway applications-Communication, signalling and processing systems-Software for railway control and protection systems (2001)
- (5) EN 50129: Railway applications-Communication, signalling and processing systems-Safety related electronic systems for signalling (2003)
- (6) EN 50159: Railway applications-Communication, signalling and processing systems-Safety-related communication in transmission systems (2010)
- (7) 山本 律, ほか: 省エネルギー化に取り組む列車運転制御システムの最新動向, 三菱電機技報, 86, No.9, 520~523 (2012)