

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 列車制御に使われる無線通信システム

無線を活用してデータ伝送を行う技術の急速な進歩と普及により、スマートフォンや無線LANなどのように、いつでもどこでも気軽に情報の送受信ができる環境が整ってきました。鉄道分野でも、最新の無線通信技術を駆使してより安全で快適な鉄道を実現するための取り組みが進められています。今月の特集号でもその取り組みの一部が紹介されていますが、ここでは、無線通信システムの一般的な構成と、列車を制御するために使われている無線通信システムの概要を紹介し、無線システムを設計するときの課題と設計作業を支援するために開発したシミュレーターを紹介します。



川崎 邦弘  
Kunihiko Kawasaki  
信号・情報技術研究部  
ネットワーク・通信研究室  
室長  
【専門分野】 対列車通信システム、電波環境

## 列車制御と無線通信システム

無線式列車制御システム<sup>1)</sup>では、列車が走行している位置や、列車が停止すべき位置などの安全にかかわる制御情報を、無線を使って伝送しています。無線で情報を伝送するためには、送信したい情報を電波に乗せるための送信機と、電波から情報を取り出すための受信機、そして電波を空間中に放射したり、空間中の電波を受けたりするためのアンテナが必要です(図1)。送信機では、制御情報を電波に載せるための信号処理が行われ、受信機では、届いた電波から制御情報を取り出すための処理をします。送信機に入力した情報が受信機から出力されるようにするためには、送信機と受信機との間

で、使用する電波の周波数や、信号処理の方法、伝送の手順などを決めておく必要があります。このような通信をするための約束ごとを、専門用語で「通信規約(通信プロトコル)」と呼びます。たとえば、変調方式やデータの伝送する速度や周期、あるいは誤ったデータが届いた時の処理の仕方などは、通信プロトコルで決められている要素の一つです。列車制御に使われる無線に限らず、世の中で広く使用されている通信システムには、全てこのような“約束ごと”が決められています。

## 列車制御用無線通信システム

現在、国内外で実用化されている主な列車制御用の無線通信システムには、

大きく分けて3つのタイプがあります(表1)。

ATACS (Advanced Train Administration and Communications System)<sup>2)</sup>は、JR東日本が開発し、2011年に仙石線で実用化されたシステムです。このシステムでは、列

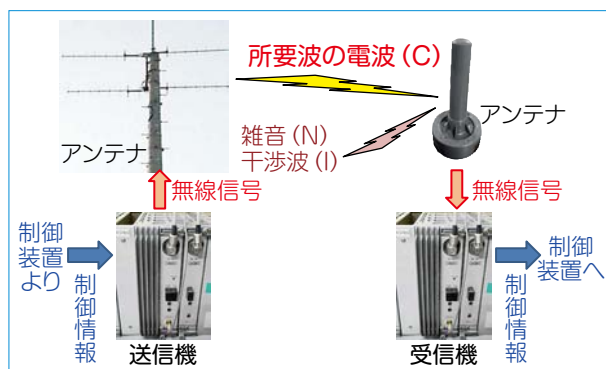


図1 無線通信システムの基本構成

表1 列車制御用の無線通信システムの比較

	ATACS (日本生まれ)	ETCS (欧州生まれ)	CBTC (北米生まれ)
種類	専用の狭帯域無線	鉄道専用の携帯電話網(GSM-R)	汎用の広帯域無線(旧式では誘導無線を使用)
通信方式 (伝送手順、暗号化など)	独自方式	GSM-Rに安全対策を施した方式(EuroRadio)	IEEE802.11系など、IPベースが主(独自方式もある)
周波数帯	300MHz帯 列車制御用の免許波を確保	900MHz帯 鉄道業務用の周波数を確保	2.45GHz帯、5GHz帯など 免許不要の周波数を利用する事例が多い。 列車制御用の周波数を確保する場合もある。
伝送速度	9600bps	9600bps	数十kbps～数Mbps
制御情報の伝送周期	約1s	最大1s	数十ms～数百ms
1基地局がカバーする範囲	約2～3km	数km～16km	数十m～数百m (誘導無線では数km)

車制御用に割り当てられた免許波を利用し、独自の通信方式による無線通信システムを開発することによって、極めて信頼性の高い伝送を実現しています。このシステムの大きな特徴としては「ゆっくりでも確実に伝送する」ことがあげられます。

ETCS (European Train Control System) は、欧州で開発された運行管理システムERTMS (European Railway Traffic Management System) 用の列車制御システムです<sup>3)</sup>。ETCSでは、GSM-R (鉄道用に構築された第2世代の携帯電話網) と呼ばれる方式を情報伝送に使用しています。ATACSと同様に、鉄道専用の周波数帯を使い、信頼性を高めるための通信方式を導入することによって、高信頼の伝送を実現しています。通信方式などが標準化され、公開されているのが特徴です。ETCSは、欧州地域だけでなく、アジア地域でも導入されています。

CBTC (Communication Based Train Control system) は、北米で開発され、IEEE 1474<sup>4)</sup>として標準化されているシステムです。広帯域で大容量の無線通信システムを利用しており、伝送品質が多少劣化していても、伝送容量が大きいことを活かして制御電文を高頻度で伝送することによって、列車制御への影響を回避するという考え方で構築されています。CBTCは、北米だけでなく欧州やアジアの地下鉄、空港内交通、LRTなどといった都市圏の鉄道に導入が進んでいます。日本でも、CBTCの導入に向けた検討が進められています。

### 無線通信システムの伝送品質

受信機で受信した電波には、ほかの電気・電子機器や自然界などからの雑音のほか、さらに無線機からの干渉波が加わるため(☞参照)、受信機で受信した情報には、欠落や誤り、時間遅

れが含まれる可能性があります。この無線による伝送の過程で発生する情報の欠落や誤り、遅延などによって事故が起きないように、地上と車上の制御装置には何重もの安全対策が組み込まれています。たとえば、伝送された制御情報に含まれる誤りの数や、伝送にかかった時間が許容できる基準を超えると、制御装置が伝送異常を検知して列車を緊急停止させることで、安全性を確保しています。逆にいえば、無線の品質が安定していないと、頻繁に列車が停止してしまい、安定運行を阻害することになります。このため、列車制御に使用する無線通信システムに対しては、許容できる無線の伝送品質の基準が設定されます。無線の伝送品質とは、受信情報(受け取った情報)が送信情報(送り出された情報)に対してどのくらい正確か、またどのくらい遅れて届くのかを表す指標です。伝送品質の基準の例としては、「列車が走行する全区間において、無線の伝送過程で制御情報が欠落する確率(電文損失率)が

0.1%以下(1000回送ったうち1回までは無くなってよい)であること」などがあります。この例以外にも、制御情報に含まれる誤りの確率(ビット誤り率)や、伝送にかかる時間などに対して基準を設定する場合があります。

なお、列車制御用の無線通信システムに関しては、安全に関わる情報を伝送するため、設計にあたって考慮すべき脅威や対策の考え方、また設計手順などが国際規格(IEC 62280, IEC/TS 62773)として定められています。

### 伝送品質を決める要因

必要な伝送品質が安定して得られる無線通信システムを作り上げるためには、無線機の性能とアンテナの性能を定め、アンテナの配置を適切に設計する必要があります。この設計作業を無線回線設計と呼びます。無線通信システムの伝送品質は、①使用する無線機の性能と、②電波が伝搬する過程で起きる強度の変動や雑音・干渉の程度による二つの要因によって大きく決まります。

#### ☞ 雑音と干渉波

ここでいう「雑音」は、情報がなにも載っていない電波を指します。代表的なもの、スイッチングなどによって発生する不要な電波です。これに対し、「干渉波」は、情報が載っている電波で、自分が必要とする電波以外のものを差します。

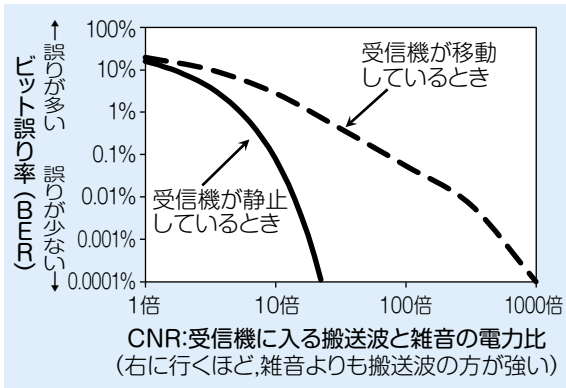


図2 無線機の性能を表す指標の例 (CNRに対するビット誤り率)

無線機は送信機と受信機によって構成されています。送信機の性能は、送信する電波の出力や周波数の安定性、高調波などの不要な電波の出にくさなどがあり、電波法によって基準が定められています。受信機の性能は、入力される無線信号のCNR（もしくはCINR）と受信機が出力する情報の品質（欠落、誤り、遅延）との関係によって表されます。CNRとは、送信機から送信されて受信機に届く電波の強さ（C：搬送波を意味する“Carrier”の頭文字）と、伝搬過程で混入する雑音（N：雑音を意味する“Noise”の頭文字）との強さの比（R：比率を意味する“Ratio”の頭文字）を表す値です。例として、ある無線機について、CNRと伝送品質のひとつであるビット誤り率との関係を図2に示します。この図より、無線の伝送品質を高く保つ（ビット誤りを小さくする）ためには、CNRを大きくする必要があります。たとえば誤り率を0.1% (10<sup>-3</sup>)より小さくするためには、受信機が止まっているときは雑音よりも搬送波の電力が約10倍以上大きくなければならないことがわかります。なお、CINRは、雑音だけではなく干渉波（I：干渉波を意味する“Interference wave”の頭文字）の強さも考慮して評価するための指標です。CINRを使う場合は、搬送波と雑音+干渉波との電力比と伝送品質との関係を評価します。

### 無線回線設計の課題

必要な伝送品質で通信を行うためには、使う受信機に入る電波が十分な大きさのCNR（もしくはCINR）となるように、基地局やアンテナを配置しなければなりません。このためには、送信機から送信された電波がどのくらい減衰や変動するのかと、受信機に入る雑音や干渉波の強さを見積もらなければなりません。電波の減衰と雑音や干渉波の強さは、使う周波数や周囲の状況、列車の移動速度など、多くの要因が組み合わさって大きく変化するため、正確に見積もることは難しい作業です。さらに、列車と地上との間のような移動体通信の場合には、「フェージング」と呼ばれる電波の受信レベルが激しく変動する現象を考慮する必要もあります（図3）<sup>5)</sup>。このような変動が起きた場合の伝送品質がどの程度低下するかも無線機の性能を評価するうえで重要です（図2中の点線）。

電波の減衰を小さくするためには、基地局の設置間隔を小さくして列車と地上基地局の距離を長くしすぎないことが、雑音の影響を小さくするために

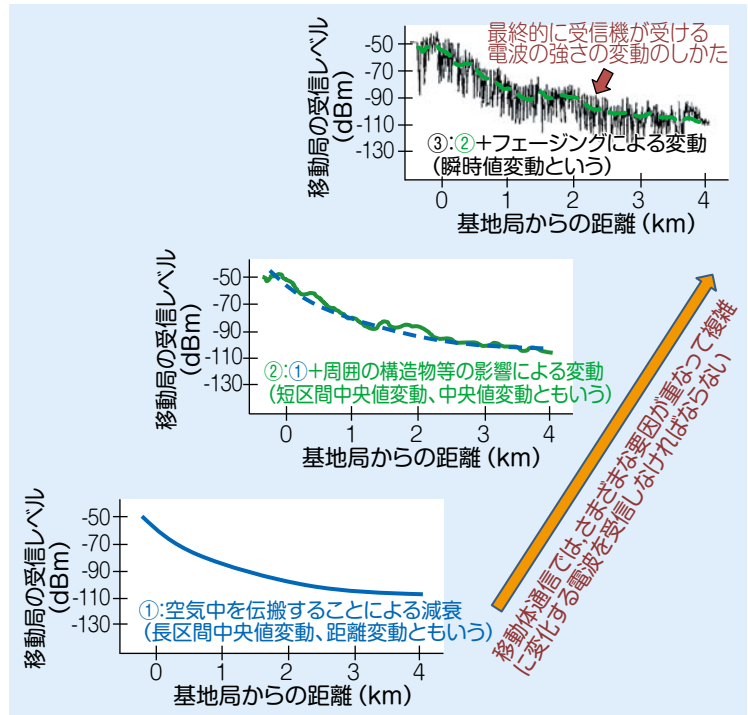


図3 受信機に届く電波の強度の変化

は送信レベルを上げて大きなCNRもしくはCINRを確保することが重要です。一方、干渉波に対しては、大きなCNRもしくはCINRの確保だけでなく、無線機間で伝送するタイミングの制御によっても影響を小さくすることができます。これは、電波は使う周波数と使う時間が重なると干渉して使えなくなりますが、どちらかが重ならないようにすれば、干渉を避けることができるためです（☞参照）。

### 無線回線設計用シミュレーター

雑音や干渉波による影響を考慮しながら無線回線設計を行うには、無線に関する実務経験やノウハウが必要です。さらに、設計した回線で安定した通信が行えることの確認のため、現場での伝送実験が必要であり、時間とコストがかかります。そこで、誰でも無線回線設計を効率的に行えるよう、無線の伝送品質を計算することにより予測できるシミュレーターを開発しました（図4）<sup>6)</sup>。このシミュレーターは、無線機の仕様、地形、路線の線形、無線基地局の位置、雑音や干渉波などの電波



図4 無線回線設計用シミュレーター (RADTRACE) のスクリーンショット

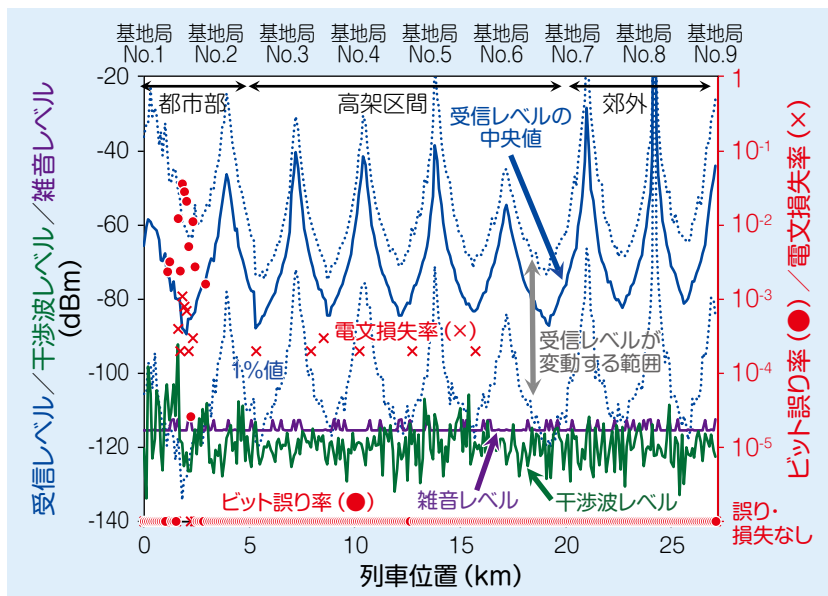


図5 シミュレーターで再現した電波の強さと伝送品質の例

の伝搬環境と、列車の走行速度パターンなどを入力することにより、電文損失率やビット誤り率などの伝送品質が出力されます(図5)。このシミュレーターの最大の特徴は、列車が走行するときの無線基地局と車上無線局との位置関係を3次元的に求めて、フェージングによる受信レベルの変動や雑音・干渉波の影響を再現できることです。

さらに、このシミュレーターを發展させて、地上と車上の制御装置や地上の通信ネットワークも含めた列車制御システム全体の情報伝送をシミュレーションにより算出し、伝送品質の劣化によって列車が非常停止してしまう確率を評価するシステムを開発しました<sup>7)</sup>。この評価システムを活用すれば、電波法やコスト、安全面などの制約に

#### 無線通信と電波の干渉

電波は空間を伝わる電気の“波”なので、音や水の波と同じように、複数の波が混じるとお互いに干渉しあい、それぞれの強度を強めあったり打ち消しあったりします。電波の干渉は無線通信の大敵でしたが、最新のデジタル無線の技術では、干渉を積極的に利用することにより、大容量のデータ伝送が可能になっています。

よって実験では実施が困難な条件でも、列車の安定運行への影響を容易にかつ短時間で評価でき、設計の効率化だけでなく、試作や実験の規模を必要最小限にできるなどの効果が期待できます。

#### おわりに

今後、無線式列車制御システムは、より多くの箇所に導入されることが想定されます。また、運転指令と列車乗務員との間の列車運行业務や乗客サービスなどにおいては、無線の利用範囲の拡大や、通信のより高速で大容量になることへの要求が強まることも考えられます。

今後は、開発した評価システムを実際の設計や評価に活用しながら、機能の向上とともに精度の検証や向上を行い、鉄道における無線通信ネットワーク全般を扱える総合的なシミュレーションシステムに發展させたいと考えています。[RRR]

#### 文献

- 1) 渡辺郁夫：無線式列車制御システムの動向，鉄道総研報告，Vol.25，No.5，pp.1-4，2011
- 2) 馬場裕一，立石幸也，森健司，青柳繁晴，武子淳，齊藤信哉，鈴木康明，渡邊貴志：無線による列車制御システム(ATACS)，JR EAST Technical Review，No.5，pp.31-38，2003
- 3) UIC：ERTMS/ETCSの概要，日本鉄道電気技術協会，2003
- 4) IEEE：Std 1474.1：IEEE Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements，IEEE，2004
- 5) 唐沢好男：デジタル移動通信の電波伝搬基礎，コロナ社，pp.1-4，2003
- 6) 川崎邦弘，関清隆：鉄道向け無線データ伝送回線シミュレータの開発，鉄道総研報告，Vol.28，No.4，pp.23-28，2014
- 7) 菅原宏之，北野隆康，川崎邦弘：無線式列車制御用通信ネットワークの性能評価システム，鉄道総研報告，Vol.28，No.11，pp.31-36，2014