

# 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

信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室  
室長 川崎 邦弘

## 1. はじめに

無線式列車制御システムで使用される無線通信ネットワークは、その伝送品質がシステム全体の安全性や安定性に大きく影響する。鉄道沿線の環境を考慮しつつ、所要の伝送品質を確保できるように無線通信ネットワークを設計・構築するためには、多くの労力が必要となる。そこで、これらの設計作業や性能の評価作業を効率的に行えるよう、伝送品質をシミュレーションして列車制御に与える影響を予測する評価システムを開発した。本発表では、開発の背景と経緯について述べたのち、評価システムの機能と実行例を紹介する。また、今後の展望についても述べる。

## 2. 無線式列車制御システムの概要

無線式列車制御システムは、列車の走行位置や停止すべき位置といった列車の安全運行に関する情報を、無線通信を利用して伝送することによって列車を制御するシステムである。国内では、JR東日本が開発したATACS (Advanced Train Administration and Communications System) と呼ばれるシステムが2011年10月に仙石線で実用化されている。日本で生まれた列車制御システムは、JRTC (Japan Radio Train Control system) と呼ばれ、基本的な機能やシステム構成に関する要求事項がJISとして制定されている。無線を利用した列車制御システムの開発は海外でも進められている。欧州ではERTMS/ETCS (European Railway Traffic Management System / European Train Control System) と呼ばれるGSM-R (鉄道用GSM) を利用したシステムが開発されており、一部の国で実用化されている。北米地域では、CBTC (Communication Based Train Control System) と呼ばれるシステムが開発され、IEEE規格として制定されている (IEEE 1474)。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などといった主に都市圏の鉄道に導入が進んでおり、日本においても導入に向けた検討が進められている。

図1は、JRTCのシステム構成を例に、無線式列車制御システムにおける制御情報の流れを示したものである。

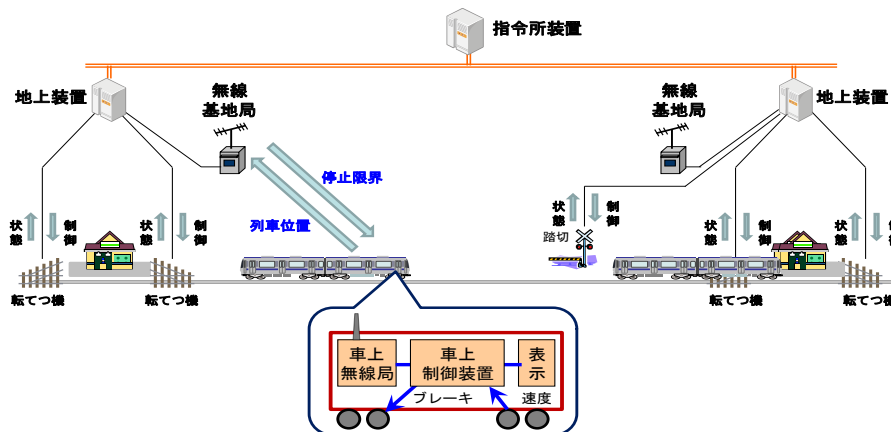


図1 無線式列車制御システムの概要

JRTC では、列車が自分で位置を検知し、その位置情報を地上装置に無線で伝送する。地上装置は、各列車から送られてきた位置情報を受信し、各列車を追跡するとともに、転てつ機や踏切などの沿線設備との情報伝送により、各設備の状態監視と制御を行う。そして、地上装置は、各列車の位置や沿線設備の状態をもとに、それぞれの列車が安全に走行できる区間を判断し、停止目標となる位置を各列車に無線で伝送する。各列車は、自列車のブレーキ性能や線路データ（速度制限、勾配、カーブなどの情報）に基づき、受信した停止限界まで安全に走行できる速度パターンを設定し、走行速度が速度パターンを超過した場合は、自動的に減速を行う。

### 3. 無線通信ネットワークの設計と課題

無線式列車制御システムの安全性は、フェールセーフ装置によって構成される地上・車上の制御システムが確保している。この制御システムには、無線通信では伝送誤りや損失、遅延が発生することを想定して、何重もの対策が組み込まれる。無線通信ネットワークでの伝送品質（制御情報の損失率、伝送遅延など）が所定の品質以下に劣化すると、制御システムが伝送の異常を検知して列車を緊急停止させるため、安全性が損なわれることはない。しかし、列車の安定運行には支障をきたすことになることから、無線式列車制御システムに適用される無線通信ネットワークには高い伝送品質が要求される。この無線通信ネットワークを構築する際には、地上～列車間を結ぶ無線データ伝送回線と、複数の無線データ伝送回線を含む伝送装置と各種の制御装置とを結ぶ通信ネットワークシステムに分けて（専門的には“階層”と呼ばれる概念に従って）設計・評価を行う方法が効率が良いと考えられる。以降では、無線データ伝送回線・通信ネットワークシステムにおけるそれぞれの設計上の課題を整理して述べることにする。

まず、無線データ伝送回線については、列車制御を行うために必要となる伝送品質が確実に確保できるよう、沿線の電波伝播環境とノイズ環境を考慮しながら、無線局の仕様（周波数、変調方式、出力、アンテナの性能など）や伝送方式（誤り制御方式など）、基地局の配置を決めなければならない。このような無線局の仕様や基地局配置を決定する作業を無線回線設計と呼び、無線データ伝送回線を構築するうえで非常に重要な作業である。無線回線設計では多くのパラメータを考慮しながら適切に設計値を決めなければならない、無線通信に関わる多くの知識とノウハウが必要となる。また、設計の妥当性の確認や、設計に必要なデータを得るための実験を行う場合があり、無線データ伝送回線を構築するまでには多くの労力とコストがかかる。さらに、無線データ伝送回線としては最良の設計であったとしても、列車制御システム全体から見て最適とは限らず、性能過多になっていないかどうかの検証は非常に難しい問題である。

また、通信ネットワークシステム全体については、線区上に存在する駅の規模、また、沿線各所に存在する設備の数の大小によって、その規模が変わる。このような通信ネットワークを安定して運用するためには、包含される無線データ伝送回線の性能のほかに、使用するネットワーク機器の処理能力、情報の伝送量やエラーの発生率、伝送遅延時間などの性能を定量的に評価する必要がある。しかし、これらの通信ネットワークを実際に構築して性能を評価するためには多くの時間と手間がかかり、開発期間とコストの両面で大きな負担となっている。

そこで、鉄道総研では、これらの無線データ伝送回線の設計に関わる負担の軽減と、効率的な通信ネットワークシステムの設計・運用の支援を目的として、無線データ伝送回線を含む通信ネットワークの伝送品質（制御電文の誤り率、遅延等）を計算し、列車運行の安定性に与える影響を評価するためのシミュレータの開発に 2007 年度から取り組んできた。

#### 4. シミュレーションによる性能評価システムの構成

列車制御用の無線通信ネットワークのシミュレーションを行うにあたっては、列車走行に伴う電波強度の変動や電波雑音、干渉波等の影響を考慮し、地上装置と列車の間で伝送される制御電文に発生する誤りや損失をできるだけ正確に計算機上で再現することが必要となる。そこで、3章でも述べた無線通信ネットワークを構成する無線データ伝送回線と通信ネットワークシステムとの関係を考慮して、まず無線データ伝送回線における伝送品質を計算するシミュレータを開発したのち、無線データ伝送回線シミュレータの計算結果を使って無線式列車制御用の通信ネットワークシステム全体の伝送品質を計算するネットワークシミュレータを開発し、伝送品質の劣化によって列車が緊急停止する確率を予測するシステムとして統合した(図2)。

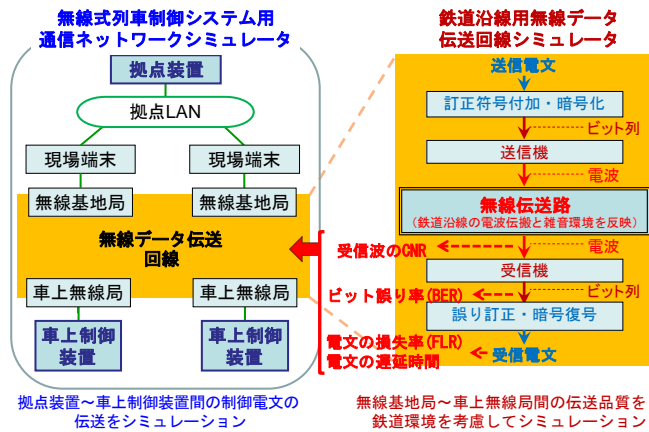


図2 評価システムを構成する2つのシミュレータ

無線データ伝送回線シミュレータでは、通信ネットワークシミュレータから列車の位置と走行速度、制御電文を受け取り、鉄道沿線における電波伝播環境や列車から発生するノイズ環境を模倣的に発生させて列車の走行位置に応じたビット誤り率、電文損失率、伝送遅延時間を計算し、伝送後の制御電文と伝送品質の統計値等の計算結果を通信ネットワークシミュレータに渡す。この無線データ伝送回線シミュレータでは、線形、伝搬環境と雑音環境、車上局の条件、無線局の仕様等を細かく指定できるようになっており、単独で無線伝送品質を計算するシミュレータとしても使用することができる。

通信ネットワークシミュレータには、拠点装置と現場装置、ネットワークを構成するためのルータやスイッチングハブ、無線基地局、車上無線局、車上制御装置など、無線通信ネットワークを構成する装置の機能がプログラムとして実装されている(図3)。

通信ネットワークシミュレータには、対象とするシステムのネットワーク構成、線路データと列車の走行パターンを初期設定として入力する。シミュレータを実行すると、与えられた設定に従って列車の位置と速度を変えながら、拠点装置～車上制御装置間での伝送を、無線データ伝送回線シミュレータと連携しながらシミュレーションしていく。なお、列車追跡と基地局間ハンドオーバーの処理も模擬しており、地上装置と沿線に存在する設備との間での伝送もシミュレーションしている。これらの全ての伝送の状況(電文の伝送エラーの有無、伝送のタイミング、遅延など)を記録していく。この記録から、仮想的な列車の走行区間における制御電文の伝送エラー発生位置や、それに伴って列車制御システムが列車を停止させる位置などを確認することに

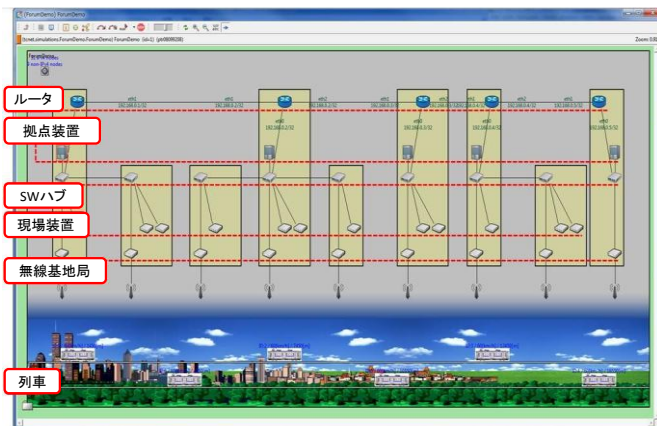


図3 通信ネットワークシミュレータの画面例

よって、制御電文の損失や伝送遅延の増大による列車制御への影響を評価する。また、通信ネットワークシミュレータ上では、制御電文が失われる状態だけでなく、保安伝送に関する国際規格 IEC 62280 が定義している挿入、重複、遅延、破壊、書換といった伝送路上で制御電文に発生する脅威<sup>2)</sup>を模擬的に発生させ、その影響を評価することも可能である。

## 5. 評価システムによる評価例

開発した評価システムにより、仮想的な JRTC システムを評価した例を図4および図5に示す。図4は、全長約33kmの仮想的な線区に基地局を20局配置した場合を想定し、列車が最大100km/hで走行したときの地上→車上および車上→地上のビット誤り率(BER)を計算した結果である。仮想した線区では、伝搬環境条件が郊外地～開放地～都市部と変化するものと仮定したが、伝搬環境が都市部の設定となる区間でBERが劣化する様子が再現されている。また、この誤りが発生している区間のうち2kmを切り出し、システムの安定性を予測した結果を図5に示す。この図は、伝送路上での誤りの発生によって電文が許容できる回数以上連続して失われ、地上もしくは車上の制御装置が「通信断」と判断して列車を停止させる確率をカラースケール(色が濃いほど確率が高い)で示している。この例からは、無線伝送の途中で電文が失われる確率が上がっても、制御装置が「通信断」と判断するに至らない範囲であり、列車制御システム全体としては安定して動作することがわかる。なお、評価システムの計算結果の妥当性については、無線機の性能の再現性、ネットワークにおける遅延時間の分布の再現性などを実験結果との比較によって確認している。

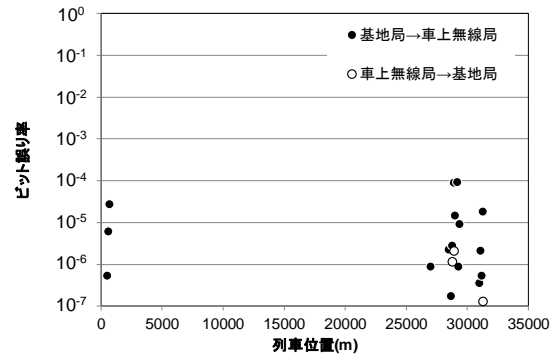


図4 無線伝送における BER の計算例

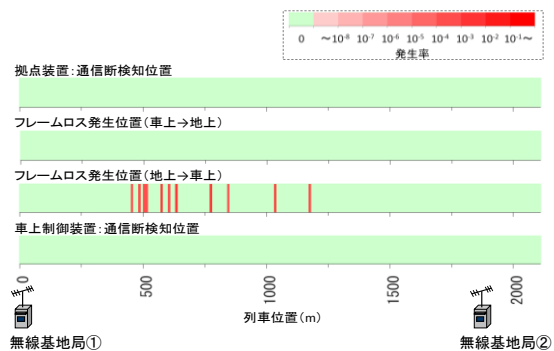


図5 列車制御システムの安定性の評価結果例

## 6. おわりに

本発表では、無線式列車制御システムを支える無線通信ネットワークの信頼性を評価するために開発したシミュレータを紹介した。今後、無線を活用した様々な列車制御システムが国内外で実用化されていくものと予想されるが、安全かつ安定した無線式列車制御システムを実現するうえで、無線通信ネットワークの信頼性の評価は大変重要な作業となる。本評価システムにより、電波法やコスト等の制約から、あるいは実車では確認が困難な条件でも、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るため、設計だけでなく、試作や実験の規模を縮小してコストを低減できることが期待される。今後は、本評価システムを実際の設計・評価に活用していきながら、さらに機能の向上と精度の検証・向上を行っていきたいと考えている。さらには、無線式列車制御システムだけでなく、列車無線や各種の業務支援用無線など、鉄道における無線通信システム全般を扱える総合的なシミュレータに発展させたいと考えている。