

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

無線式列車制御システムの 通信ネットワークを評価する

近年、無線通信技術の発展と、情報処理技術の向上、フェールセーフ技術の進歩により、無線を使って列車を制御するシステム（無線式列車制御システム）の実用化が進んでいます。無線式列車制御システムでは、無線を含む通信ネットワークの性能がシステム全体の信頼性に影響しますので、無線通信ネットワークを適切に設計し、所定の性能が得られているか否かを評価する必要があります。ここでは、無線式列車制御システムの概要と、鉄道総研が開発している無線通信ネットワークの評価手法を紹介します。

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、無線通信を利用して列車を制御するシステムです。鉄道総研では、1980年代後半から1990年代にかけて、CARAT（Computer And Radio Aided Train control system）と呼ばれる新幹線向けのシステムを開発しました。実際に新幹線を使って行われたCARATの実証試験では、LCX（☞参照）による無線システムが制御情報の伝送に利用され、安全かつ柔軟な列車制御が実現できることが示されました。CARATで開発された要素技術をベースに、JR東日本が在来線向けに新たに開発したシステムがATACS（Advanced Train Administration and Communications System）です。ATACSは、日本初の空間波無線による列車制御システム

として2011年10月に仙石線で実用化されました。これらの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JIS¹⁾として制定されています。

JRTCでは、列車が自分で位置を検知し、その位置情報を地上の拠点装置に無線で伝送します。拠点装置は、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います。そして、拠点装置は、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無線で各列車に伝送します。各列車



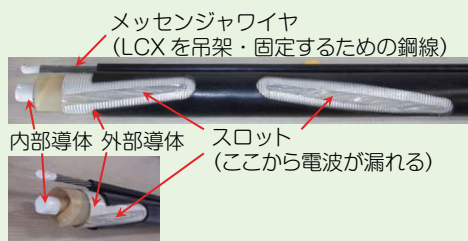
川崎 邦弘
Kunihiro Kawasaki
信号・情報技術研究部
ネットワーク・通信研究室
室長
【専門分野】 鉄道用無線
通信システム、EMC



菅原 宏之
Hiroyuki Sugahara
信号・情報技術研究部
列車制御研究室
副主任研究員
【専門分野】 列車制御シ
ステム、安全性評価

☞ LCX（Leaky Coaxial cable：漏えい同軸ケーブル）

電波が少しずつ漏れるように、外部導体にスロット（隙間）が一定間隔で設けられている特殊な同軸ケーブル。新幹線の全線で列車～地上間の通信に利用されているほか、地下鉄やトンネル内などでも利用されている。



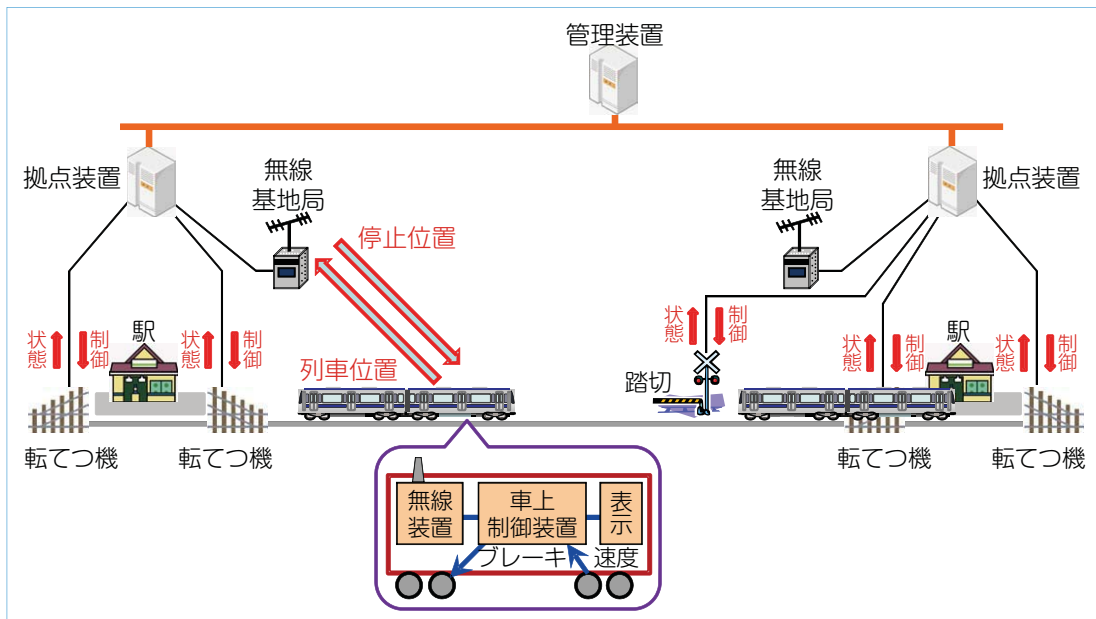


図1 無線式列車制御システムの概要

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、受信した停止目標位置まで安全に走行するための速度パターンを設定し、走行速度が設定した速度パターンを超過した場合は、自動的に減速を行います（図1）。

無線による列車制御システムは世界各国でも開発、導入が進められています。欧州の鉄道では、ETCS (European Train Control System) が開発され、一部で導入されています。地下鉄・都市交通向けには、CBTC (Communication Based Train Control) と呼ばれるシステムが開発されており、欧州のほか、アメリカ、アジアなどで導入されています。

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されています。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ています。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、列車は緊急停止しますので、安全性が損なわれることはありません。しかし、列車の安定運行には支障をきたすことになりますので、このようなことがないように、地上と車上を結ぶ無線通信ネットワークシステムには高い伝送品質が要求されます。

無線システムでは、要求される伝送品質が確実に確保できるよう、沿線の電波伝搬環境とノイズ環境を考慮しながら、無線機の仕様（周波数、変調方式、出力など）や伝送方式（誤り制御方式など）、基地局の配置などが決定されます。この作業を無線回線設計と呼び、無線システムを構築する際に必ず実施されます。無線回線設計では多くのパラメーターを考慮しながら適切に設計値を決めなければならず、多くの知識とノウハウが必要になります。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ます。無線システムを構築するまでには多くの労力とコストがかかります。さらに、無線システム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

証はとても難しい問題です。

また、地上のネットワークは、線路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、その規模が変わります。このようなネットワークを安定して運用するためには、使用するネットワーク機器の処理能力、情報の転送量やエラーの発生率、伝送遅延時間などの性能を評価する必要があります。しかし、これらの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ります。

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の設計・運用の支援を目的として、無線を含む通信ネットワークの性能が列車制御システムに与える影響をシミュレーションによって予測評価する手法を開発しています。

シミュレーションによる評価の流れ

無線を含む通信ネットワークのシミュレーションを行う場合、列車走行に伴う電波強度の変動やノイズの影響

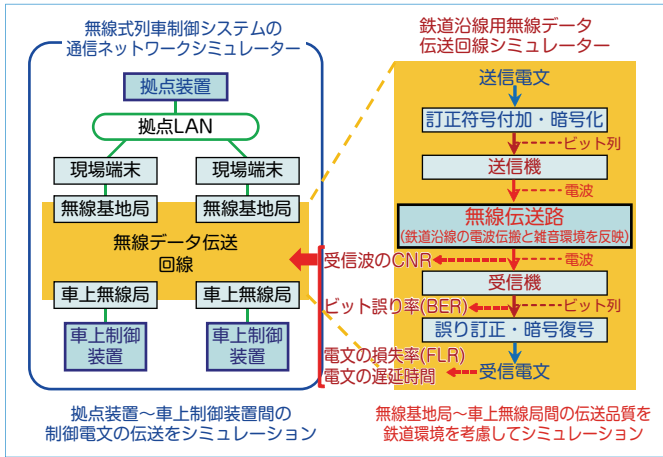


図2 2種類のシミュレーターの構成と連携

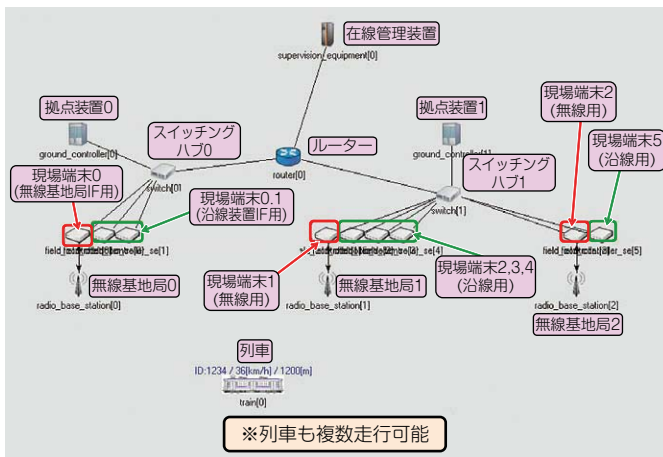


図3 通信ネットワークシミュレーターの画面例

を考慮し、地上装置と列車の間でやりとりされる制御情報がどのような状態になるかをできるだけ正確に計算機上で再現することが必要になります。そこで、鉄道総研では、鉄道沿線用に特化した無線データ伝送回線シミュレーターと、無線式列車制御システム用の通信ネットワークシミュレーターを開発し、これらの2つのシミュレーターを連携させて、無線通信ネットワークの性能が列車運行の安定性に与える影響を予測する手法を開発しました(図2)。

まず、無線データ伝送回線シミュレーターでは、鉄道沿線における電波伝搬環境や列車から発生するノイズ環境を模擬的に発生させ、列車の走行位置に応じたデータ伝送品質(ビット誤り率、電文損失率、伝送遅延など)を

シミュレーターには、拠点装置と現場装置、ネットワークを構成するためのスイッチ、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が実装されています(図3)。無線データ伝送回線シミュレーターの計算結果を用いて、拠点装置～車上制御装置間での制御情報の伝送をシミュレーションし、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します(列車追跡と基地局間ハンドオーバーの処理も模擬)。通信ネットワークシミュレーター上では、制御情報が失われる状態だけでなく、挿入、重複、遅延、破壊、書換といった障害²⁾を模擬的に発生させ、その影響を評価することもできます。

通信ネットワークシミュレーターによる評価の流れを図4に示します。通

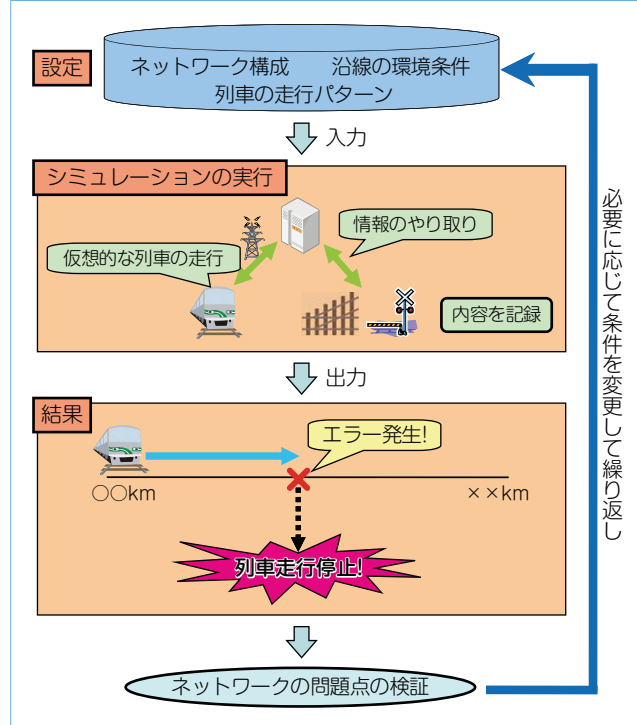


図4 通信ネットワークシミュレーターによる評価の流れ

算し、通信ネットワークシミュレーターには、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、結果を渡します。

通信ネットワークシミュレーションを実行すると、仮想的な列車が走行パターンにしたがって設定した区間を走行し、地上装置とその列車との間で制御情報の伝送が行われます。また、地上装置と沿線に存在する設備の間でも情報伝送が行われ、通信ネットワークシミュレーターではこれらの全ての情報伝送の状況(情報の伝送エラーの有無、伝送のタイミング、遅延など)を記録していきます(図5)。この記録から、仮想的な列車の走行区間における制御情報の伝送エラー発生位置や、それに伴い列車制御システムが機能停止してしまう位置などを確認し、無線通信ネットワークの問題点を検証します。

開発したシミュレーターによる評価例

開発した2つのシミュレーターによ

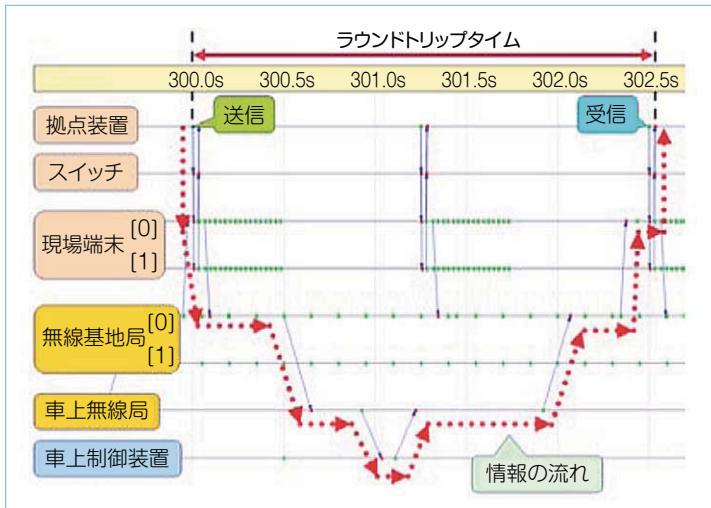


図5 通信ネットワークシミュレーションの様子

り、仮想的なJR-TCシステムを評価した例を図6に示します。図6は、全長2kmの区間を想定し、区間の両端に無線の基地局があるものとして、1本の列車が60km/hの等速で走行したときのシステムの安定性を予測した結果です。図6(a)は基地局が正常な場合、図6(b)は基地局が故障した場合の結果です。

図6(a)(b)とも、(イ)の部分では無線基地局～車上無線局間で制御情報が失われる確率を、(ロ)の部分では制御情報がある回数以上連続して失われて地上拠点装置や車上制御装置が「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(赤が濃いほど確率が高い)で示しています。(イ)の部分からは、列車が基地局から離れる位置では無線伝送途中で制御情報が失われる確率が上がり、基地局が故障した場合はその確率がさらに高くなる様子がわかります。しかし、図6中の(ロ)の部分から、無線伝送の途中で制御情報が失われる確率が上がっても、拠点装置や車上制御装置が「通信断」と判断するに至らない程度の確率であり、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ります。なお、図6の結果は、列車を100,000回走行させて得られた結果ですが、一般

的なノート型PCでシミュレーションを実行したところ、無線データ伝送回線シミュレーターでの計算時間は約14時間、通信ネットワークシミュレーターでの計算時間は約30分でした。

このように、開発した2つのシミュレーターを利用することにより、実際の走行試験では実施が困難な試験条件でも容易に、かつ短時間で無線通信ネットワークの性能を評価できます。

おわりに

ここでは、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鉄道総研が開発しているシミュレーションによる評価手法を紹介しました。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ことは間違いありません。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です。現在、ここで紹介した無線データ伝送回線シミュレーターと通信ネットワークシミュレーターの機能拡張と精度向上に取り組ん

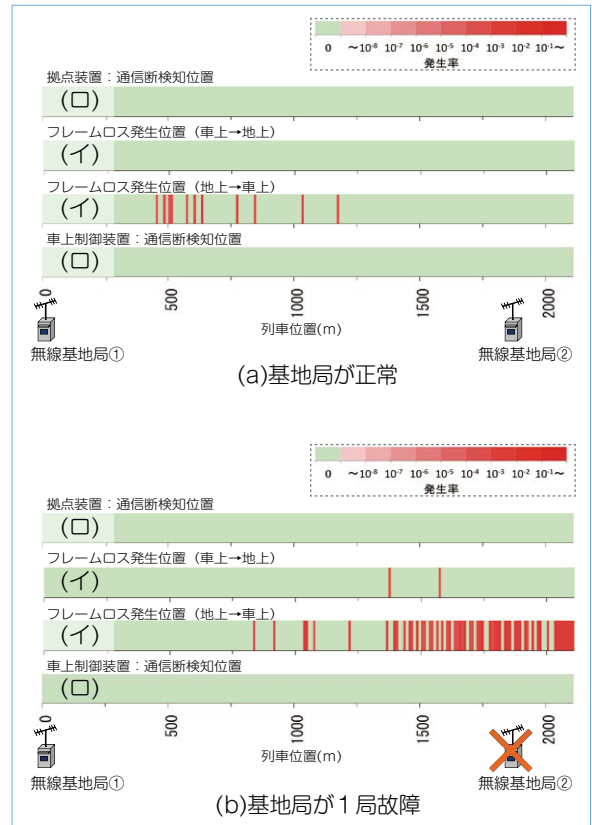


図6 シミュレーションによる評価の例

でおり、今後の無線式列車制御システム用通信ネットワークの設計・構築に活用していく予定です。将来的には、無線式列車制御システムだけでなく、鉄道における無線通信システム全般を扱えるシミュレーターに発展させたいと考えています。RRR

文献

- 1) 日本工業標準調査会：JIS E 3801, 無線式列車制御システム, 日本規格協会, 2009
- 2) 国際電気標準会議：IEC 62280-2 Edition 1.0, Railway Applications-Communication, signalling and processing systems-Part 2: Safety related communication in open transmission systems, IEC, 2002
- 3) 中村, 川崎, 関：鉄道沿線における無線伝送回線シミュレータの開発, 鉄道総研報告, Vol. 24, No. 3, 2010
- 4) 菅原, 川崎, 中村, 祇園：無線式列車制御システム用通信ネットワーク性能シミュレータの開発, 鉄道総研報告, Vol. 26, No. 7, 2012