

# 列車制御用無線通信 ネットワークシミュレータ

菅原 宏之  
信号通信技術研究部  
(列車制御 副主任研究員)

中村 一城  
同  
(通信 副主任研究員)



すがはら ひろゆき



なかむら かずき

## はじめに

情報通信技術の進歩とその応用は確実に広がっており、鉄道分野においてもこの技術を使って革新的なシステムを実現しようとする試みが進んでいます。列車の運転制御では、システムの信頼度を向上させること、システムをより柔軟に運用すること、そして、システムの保守コストを低減させることを目指して、無線伝送技術を用いたシステムの開発と実用化が進んでいます。<sup>1)</sup>

このような新しいシステムの開発を支援するため、無線を利用した列車制御システムにおける通信ネットワークの信頼性と安定性を評価することが可能なシミュレータの開発を進めています。本稿では、このシミュレータについて紹介します。

## 無線を利用した列車制御システム

鉄道総研では、CARAT (Computer And Radio Aided Train control system) と呼ばれる無線を利用した列車制御システムを開発してきました。

図1にCARATの動作イメージを示します。このシステムでは、各列車が自分の位置を自分で検知し、その位置情報を地上装置に無線で伝送します。地上装置は、各列車から送られてきた位置情報を受信して、それぞれの列車を追跡します。また、地上装置は、沿線にあるポイントや踏切などの設備と情報をやり取りして、それら設備の状態の監視や制御を行います。地上装置は、各列車の位置や、沿線に存在する設備の状態をもとにして、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えます。各列車は、受信した停止目標の位置を自分が持っている線路データ(速度制限、勾配などの情報)とブレーキ性能にもとづいて、その位置までに安全に走行するための連続的な保安速度パターンを設定します。もし、走行速度が設定した保安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。

CARATは1985年頃から要素技術の開発が開始され、現地実験システムの構築と走行試験を実施したのち、1998年には基本的な技術開発を終了しました。現在は、この開発で得られた成果をもとに、多様な情報をベースとする新たな列車制御システムの開発を進めています。

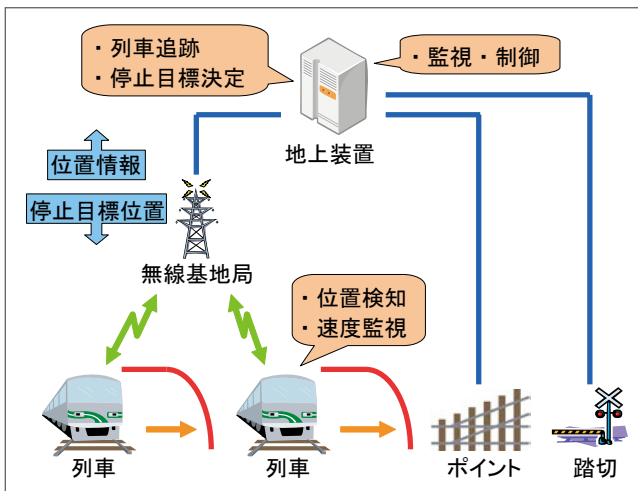


図1 CARATの動作イメージ

## シミュレータの必要性

このように、無線を利用した列車制御システムは、地上と列車との間で無線を用いて安全にかかわる制御情報をやり取りすることによって列車が走行するしくみになっています。そのため、この部分には信頼性の高い無線通信システムを構築する必要があります。これは無線回線設計と呼ばれ、無線通信を効率的に、かつ安定的に機能させるようにするために、送信電力、通信距離、雑音、空間の伝搬損失などを考慮しながら、採用する技術や方式など無線のシステムに関するさまざまな仕様を決めていきます。

無線回線設計で決まる仕様は、無線回線を利用するシステムの目的や用途によって違いがあるうえに、同じシステ

ムであっても導入する場所や線区の規模などによって違いがあります。また、まったく新しいシステムを開発する場合や、利用する無線周波数や環境の条件を変えてシステムの導入を図る場合などは、過去の経験や類似の事例などを参考にして決定することもあります。このような設計には多大な労力を必要とするだけでなく、精度の高い設計が行えないこともあるという問題点があります。

一方、地上装置は沿線にあるポイントや踏切などのさまざまな設備ともつながり相互に情報を交換し、さらに、地上装置は他の地上装置ともつながり情報を交換して線区全体を管理します。図2のようなネットワークが構成され、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ネットワークの規模も変わります。このようなネットワークを構成してシステムを運用する場合、使用する機器の処理能力、情報の転送量やエラーの発生率はどのくらいか、また、それらによるボトルネックとなる箇所はないかなど、そのネットワークの性能を調べる必要があります。実際にシステムを構築して調べるのは大変な負担となります。そこで、少しでも負担を軽減させて効果的なシステム設計を支援できるようにするため、シミュレータを開発することとしました。

### シミュレータのイメージ

開発を進めているシミュレータのイメージを図3に示します。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、また、沿線に存在する建造物などの環境条件を初期設定として入力します。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情報がやり取りされます。また、地上装置と沿線に存在する設備との間でも情報がやり取りされ、シミュレータはこれら一連のやり取りの内容を記録します。この記録から、仮想的な列車の走行区間における情報の伝送エラー発生位置や、それに伴いシステムが機能停止してしまう位置などを確認して、ネットワークの問題点を検証できるようにします。

このシミュレータの重要な部分として、地上装置と列車との間の無線伝送があります。これは、実際の列車走行に伴う電波伝搬環境を考慮して、その特性を正確に再現することが必要です。そのために無線伝送回線モデルの構築を行いました。

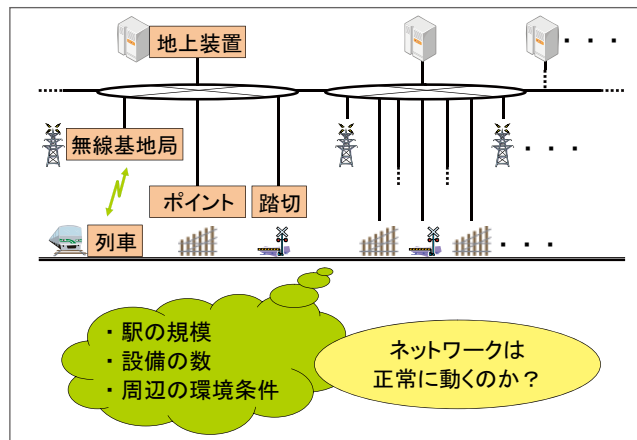


図2 システムのネットワーク構成

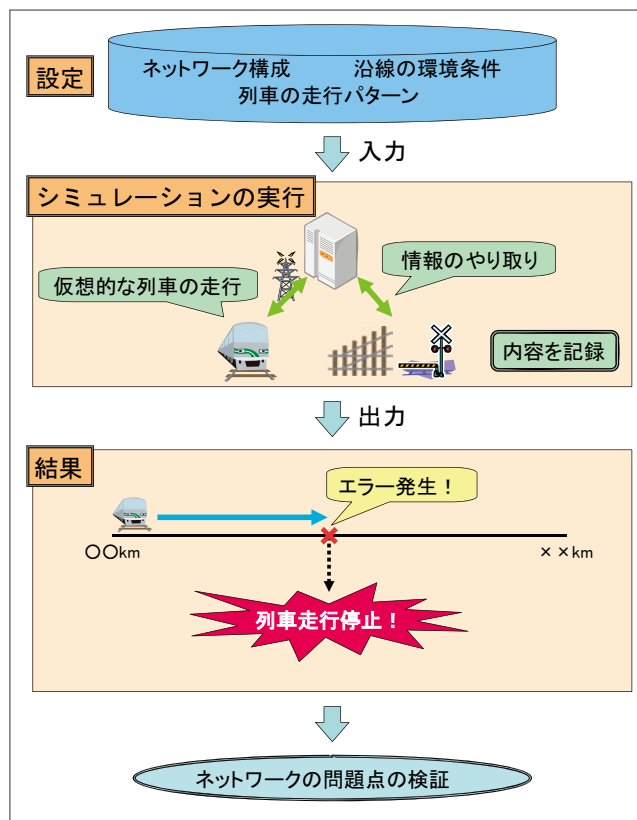


図3 シミュレータのイメージ

### 無線伝送回線モデル

無線伝送回線モデルは、無線を利用した列車制御システムを対象とする以外にも鉄道の沿線で使用されるシステム全般に対応できるように構築し、汎用的な方式になるように留意しています。通信機能を階層構造に分割したOSI基本参照モデルに準じた構成になっており、物理媒体にあたる無線伝送路サブモデル、物理層にあたる無線伝送回線サ

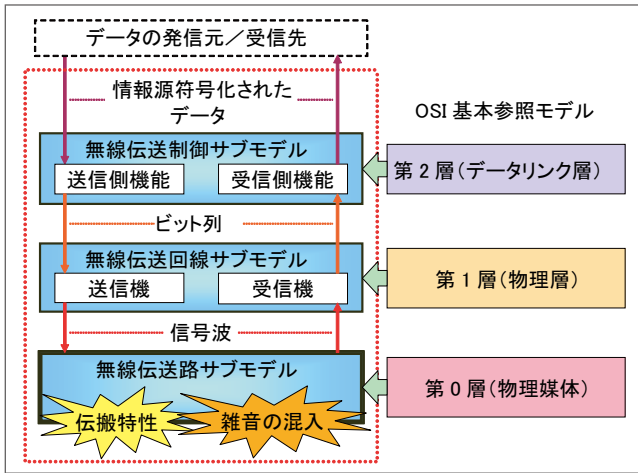


図4 無線伝送回線モデルの構造

ブモデル、そして、データリンク層にあたる無線伝送制御サブモデルの3階層構造でモデルを構築しています。図4に無線伝送回線モデルの構造を示します。

無線伝送制御サブモデルと無線伝送回線サブモデルは、評価したいシステムに応じた技術をプログラム化することで、その動作をおおむね再現することができます。一方、無線伝送路サブモデルは、無線の伝搬特性と雑音の混入を表現するものであり、その構成要素は自然現象になります。このサブモデルでは鉄道固有の環境に関する条件を反映することになり、そのような条件として、電波伝搬に関しては線路構造や駅舎などによる影響があり、雑音に関しては列車の走行に伴う放射の影響があります。特に鉄道沿線における雑音は、列車の運転状態によって雑音の強度と発生頻度が大きく変動します。このため、列車の走行に伴い発生する雑音を実測することにより、鉄道において特有の雑音が発生する頻度を模擬できるようにしました。

なお、電波伝搬については、現行の回線設計で用いられている経験式にもとづく伝搬損の推定方法に加えて、実測値や他の電波伝搬シミュレーションソフトウェアの計算結果も反映できるようにして伝搬損を算出し、信号波強度の減衰を模擬します。また、搬送波周波数と走行速度から、走行に伴う伝搬損の時間的な変動を考慮することも可能です。

列車の走行に伴い発生する雑音は、①建造物や雑音源が多い都市部、そして、②建造物や雑音源が少ない郊外部に分類し、①と②の両方を走行する線区と②だけを走行する線区の2つの線区で雑音強度の測定を実施しました。

図5に地上での測定結果を示します。測定した雑音の強度は、雑音電力密度となります。雑音電力密度は、受信機に入力される単位ヘルツあたりの雑音電力を表す値であり、雑音の振幅分布が正規分布にしたがう場合、雑音振幅の分散が雑音電力密度に相当します。

測定の結果、地上では、列車の通過に伴って無線基地局

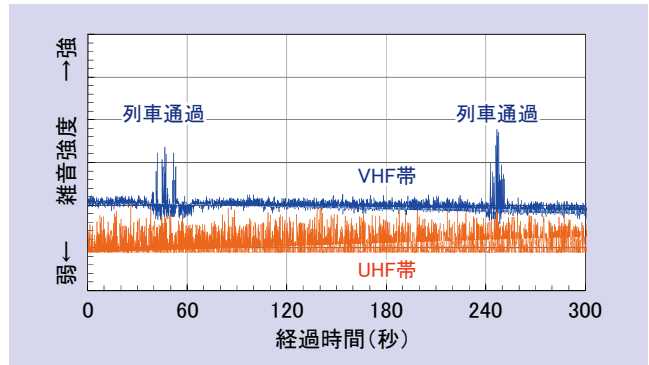


図5 測定結果

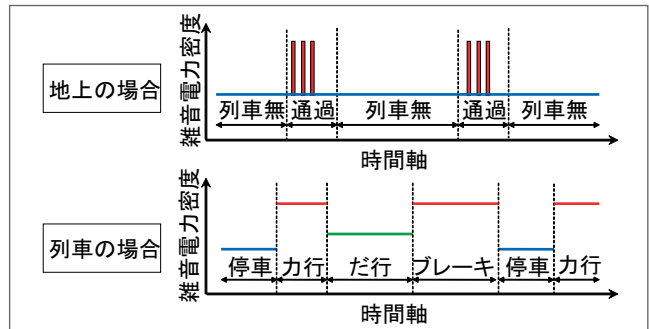


図6 雑音の発生モデル

側で受信される雑音電力密度、および発生時間間隔と発生継続時間長が変化することが分かりました。そして、列車では、「停車」「だ行」「力行・ブレーキ」の3状態において雑音強度の変動があることが分かりました。この測定結果に基づいて、図6のように雑音の発生モデルを作成しました。これをパラメータ化してシミュレータへ組み込むことにより、鉄道環境における雑音を模擬します。

### シミュレータの構成

シミュレータの構成を図7に示します。初期設定入力部ではネットワーク構成、列車走行パターン、沿線環境条件などのシミュレーション実行に必要なパラメータを設定します。装置動作模擬部では、ポイントや踏切などの沿線設

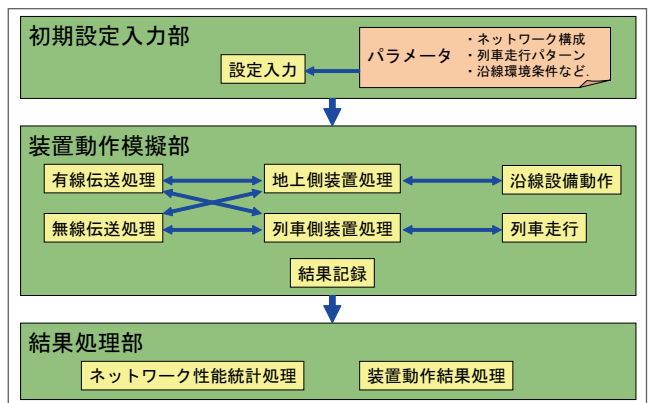


図7 シミュレータ構成

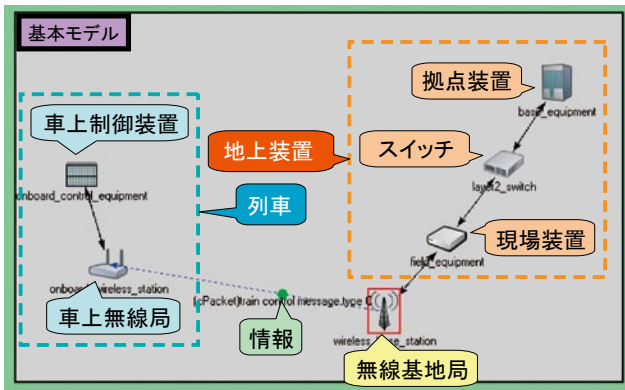


図8 開発中のシミュレータ実行画面

備の動作と列車の走行を模擬します。列車の走行は、走行パターンにもとづいた「停車」「だ行」「力行・ブレーキ」の状態と位置・速度が出力され、この情報に基づいて地上や列車に設備されている各装置固有の動作を行います。これら各装置間の情報の送受信は、データ転送速度、その遅延時間やエラー率などを考慮して有線伝送処理と無線伝送処理で行われます。特に無線伝送の部分は無線伝送回線モデルによる伝搬特性や雑音の発生を模擬し、鉄道固有の環境を再現します。そして、情報の転送量、誤り発生数や送受信数などのネットワークの性能を評価するための項目や各装置の動作結果を記録します。これらの記録は、結果処理部で整理されます。

シミュレータの開発は、OMNeT++/OMNESTを利用して行っています。このソフトウェアは、オブジェクト指向の分散型イベントネットワークシミュレーションフレームワークと呼ばれるもので、ネットワークシミュレーションを実施するための基礎構造となるネットワークモデルが用意されています。このモデルを活用して無線を利用した列車制御システムのネットワーク構成を定義し、シミュレーションを実施するために必要な各装置の具体的な動作をプログラム化しています。なお、OMNeT++は学術・研究用途向けのフリーソフトウェアの名称であり、OMNESTは商用版の名称となります。

### シミュレータの動作

現在開発中のシミュレータでは、無線を利用した列車制御システムの地上装置から列車までに存在する装置の動作をプログラム化しています。図8にその実行画面を示します。無線を利用した列車制御システムの地上装置は拠点装置と現場装置から構成されており、拠点装置と現場装置の間はスイッチを介してつながっています。現場装置から先は、無線基地局がつながっています。列車に搭載されている装置として、車上無線局と車上制御装置があります。

シミュレータを実行すると、拠点装置から車上制御装置

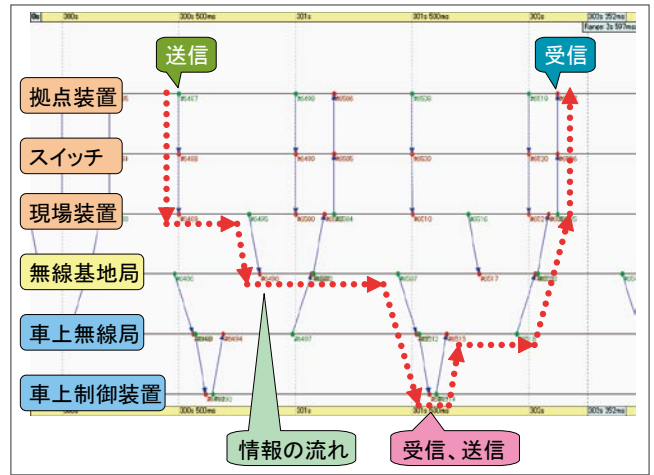


図9 実行結果の例

へ向けて情報が伝送されます。車上制御装置はその情報を受信して、決められた処理を行い、その後、拠点装置へ向けて応答を返します。図8では、無線基地局から車上無線局へ向けて情報が伝送されている様子が示されています。

仮想的な列車が設定した区間を走行するとシミュレーションは終了し、実行結果が記録されます。図9に、このシミュレーション実行後の結果の一例を示します。拠点装置から車上制御装置へと情報が伝送されて、車上制御装置から拠点装置へと情報が戻ってくる一連のやりとりの様子を把握できるとともに、各装置がどのようなタイミングで情報を受け取り、また、情報を送り出しているのかを確認することができます。

### おわりに

現在開発を進めているシミュレータについて紹介しました。今後は、より正確にシステムを再現できるように作業を進めるとともに、実際のシステムの動作と比較し、検証を行うことでシミュレータとして十分な実用性を持つものに上げていく予定です。このシミュレータによって、無線を用いた列車制御システムの通信ネットワークにおける信頼性や安定性を評価し、システム開発段階における効果的なネットワーク設計やインフラの構築に役立てることを目標としています。

また、将来は無線を利用した列車制御システムだけでなく、運行管理システムやその他の通信ネットワークを持つさまざまなシステムに対して、より良い通信インフラの構築を支援するツールへと発展させていく予定です。[RRR]

### 文献

- 1) 社団法人 日本鉄道電気技術協会：無線利用の列車制御システム規格化検討委員会，2007