

# 無線列車制御システム向け通信ネットワークの評価手法

信号通信技術研究部 列車制御研究室  
副主任研究員 菅原宏之

## 1. はじめに

近年の情報通信技術の進歩は目覚ましく、情報通信技術を用いて革新的なシステムを実現しようとする試みが鉄道分野の各方面でも進められている。列車の運転制御においては、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、保守コストを低減させることを目指し、無線を用いた列車制御システムの開発と実用化が進められている<sup>(1)(2)</sup>。

無線列車制御システム構築時において、無線基地局の配置や地上の情報伝送路などの通信ネットワークの設計を支援するシミュレータの開発を行っている。本シミュレータによって、構築した通信ネットワークの信頼性や安定性を評価することが可能になり、大規模な現地試験を実施することなく、列車制御システムの動作状況を故障状態も含めて確認できるため、設計を効率的に行うことが可能になる。本発表では、開発したシミュレータの構成と評価の実施例を紹介し、今後の展開について述べる。

## 2. 通信ネットワークの設計

無線列車制御システムの構成は概ね図1のように表すことができるが、拠点装置を中心とする地上の通信ネットワークは、連動駅の数や沿線に存在する設備の数など、線区の規模によって種々の形態が存在しうる。拠点装置と各列車との間で安全に関わる制御電文を無線によって伝送するため、地上～車上間を結ぶ無線通信システムには高い伝送品質（サービスエリア、誤り率、伝送遅延など）が要求される。このような無線データ伝送回線を含む通信ネットワークの性能が劣化した場合、列車を即時停止させることによって安全性を確保することはできるが、それはアベイラビリティの低下をもたらすことになる。

したがって、所定の通信性能が確保できるように無線データ伝送回線を含む通信ネットワークを適切に設計する必要がある。特に、無線部分については、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、また基地局配置など無線システムに関するさまざまな仕様を決定する無線回線設計を行う。また、まったく新しい無線システムを開発する場合、あるいは利用する無線周波数や環境の条件を変えてその導入を図る場合には、電波伝搬特性やデータ伝送品質の特性など基礎的なデータを収集したうえで無線回線設計を行う必要があり、無線システムの構築に至るまでには試作や試験に多くの時間とコストがかかる。

そこで、これらの無線データ伝送回線の設計に関わる負担を軽減し、かつ効率的な通信ネットワークの設計を支援することを目的として、鉄道沿線における無線データ伝送品質を考慮しながら構築した通信ネットワークの信頼性や安定性を評価することが可能なシミュレータを開発することとした。

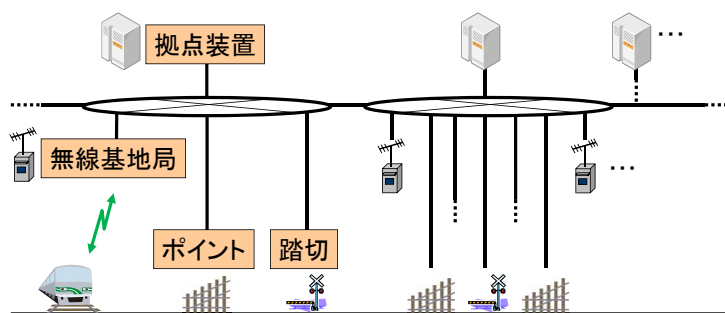


図1 無線列車制御システムの構成イメージ

### 3. 通信ネットワークのモデルとシミュレータの構成

#### 3.1 無線を含む通信ネットワークのモデル

本シミュレータに適用する通信ネットワークのモデルを図2に示す。無線列車制御システム用の通信ネットワークモデルには、拠点装置、拠点LAN、現場端末、無線基地局、車上無線局、車上制御装置を用意し、1つの拠点装置と複数の無線基地局とを接続する構成とした。この構成が最も基本的な通信ネットワークであり、この単位で接続していくことで、大規模なネットワークへと発展させるのも容易になるためである。

鉄道沿線用の無線データ伝送回線モデルは、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、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て構成した<sup>(3)</sup>。このモデルは、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階層で構成されている。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符号化方式や変復調方式などをプログラム化することで、その動作を再現することができる。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部分であり、このサブモデルにおいて鉄道固有の環境に関する条件を反映する。

通信ネットワークモデルと無線データ伝送回線モデルは、それぞれを独立して扱い、モデル間でパラメータを共有させる構成にした。無線基地局～車上無線局間は無線データ伝送回線モデルを利用して制御電文を伝送しつつ、拠点装置～車上制御装置間は通信ネットワークモデルで制御電文を伝送することによって、鉄道沿線の環境を考慮した伝送品質を評価する。

#### 3.2 シミュレータの構成

##### (1) 無線データ伝送回線シミュレータ

無線データ伝送回線シミュレータは、通信回線モデルに実績のあるScilabと呼ばれる行列計算ソフトウェアを使用し、図2の右側に示した各サブモデルの機能を関数として記述することによって構築した。シミュレータの実装にあたっては、鉄道特有の伝送環境条件として、列車走行に伴う電波伝搬への影響と、列車から放射される雑音の影響を考慮した。特に列車から放射される雑音は、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する。このため、シミュレータ上の雑音発生源(加法性白色ガウス雑音の発生関数)から出力される雑音の強度が、与えられたパラメータに応じて確率的に変化するモデルを考え、シミュレータに与える雑音に関するパラメータは実測によって把握した。

電波伝搬損については、現行の回線設計で用いられている経験式による計算方法に加え、実測値や市販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実装した。また、搬送波周波数と走行速度から、走行に伴う電波伝搬損の時間的な変動(フェージング)を考慮できるようにした。さらに、複数基地局が存在する場合には、通信相手となる基地局の切り替えや、無線基地局から車上無線局における基地局間干渉も考慮できるようになっている。

このシミュレータでは、使用する無線通信方式(符号化方式、変調方式、搬送波周波数など)、基地局の条件(基地局位置、アンテナ高さなど)、列車走行条件(列車位置、走行速度など)を設定してシミュレーションを実行すると、伝送遅延時間の平均・分散、フレームロス率、ビット

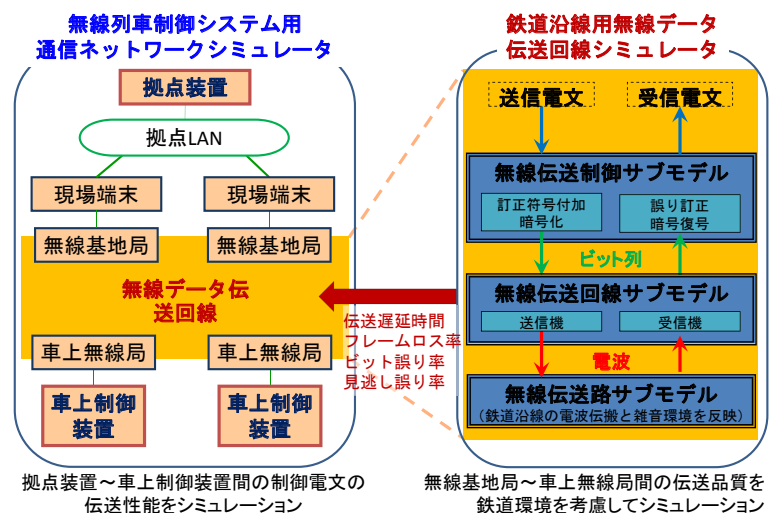


図2 通信ネットワークのモデルとシミュレータの構成

ト誤り率、見逃し誤り率などの統計値を列車の位置や速度ごとに出力する。

## (2) 通信ネットワークシミュレータ

通信ネットワークシミュレータは OMNeT++/OMNEST (以下、OMNeT と呼ぶ。) を使用して開発した。OMNeT は、離散事象型ネットワークシミュレータと呼ばれる汎用のシミュレーションソフトウェア環境である。図 2 の左側に示した各モデルを、OMNeT において具体的な機能を実現させるための部品であるモジュールとして定義しており、無線列車制御システムの情報伝送に関わる機能を実装している。これは、地上・車上間でやり取りされる制御電文を生成する通信トラフィックの発生源、またはその中継装置としての機能であり、また、列車の走行パターンを与えて列車走行を模擬する処理や、無線基地局間を跨いで列車が走行する際に無線基地局を切り替えるハンドオーバーの処理も用意した。

シミュレーションは、制御電文の伝送順序、伝送エラーの有無、伝送のタイミングや遅延などの状況を記録する。そして、シミュレーション終了時には、記録結果を出力する。

この結果を解析することで、鉄道に関わる伝送システムの国際規格 IEC 62280 に定義されている 7 つのスレットのうち「なりすまし」を除く、「繰り返し」、「削除」、「挿入」、「順序入れ替え」、「書き換え」、「遅延」の 6 つのスレット発生の可能性を評価することができる。また、制御電文をシーケンスチャートに表して各装置がどのようなタイミングで送受信しているのかを確認することも可能である。これをもとにして無線列車制御システムにおける制御遅延の状況を確認することも可能である。

## 4. シミュレーションの実施と評価例

### 4.1 シミュレーション条件の設定

開発したシミュレータにおいて、図 3 に示すような線区を設定してシミュレーションを実施した結果について述べる。これは、都市部として 4.7km の仮想的な線区を設定し、設定区間において A 駅 (0m) と B 駅 (2100m) 間を対象とした通信ネットワークを構築したもので、A 駅～B 駅間を 1 列車が 60km/h の等速で 1 万回走行する内容である。

### 4.2 シミュレーション結果の評価例

このシミュレーションにより得られる結果の例として、システムの伝送遅延時間 (図 4)、また、列車制御への影響を見るための無線基地局～車上

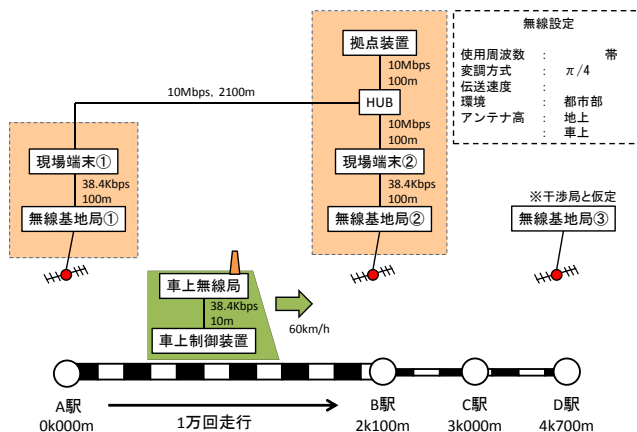


図 3 シミュレーション線区

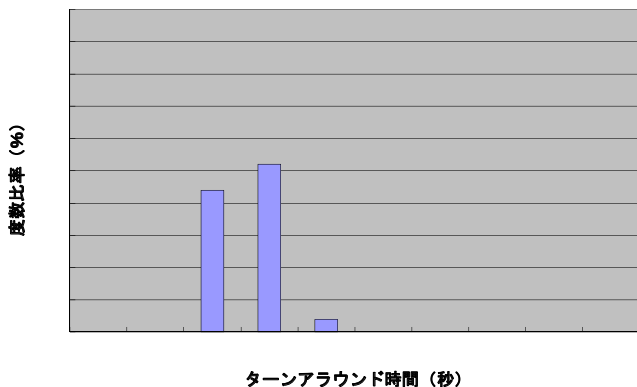


図 4 伝送遅延時間の評価例

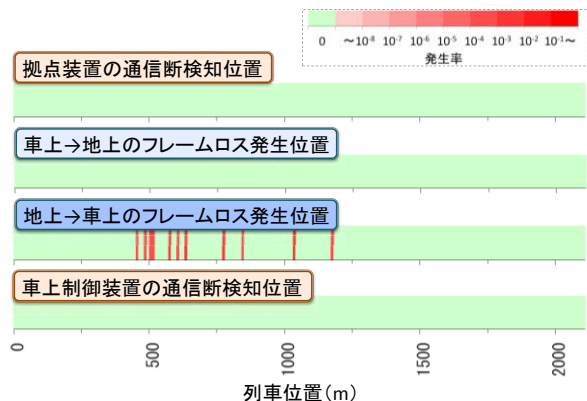


図 5 列車制御への影響の評価例

無線局間のフレームロス発生率および拠点装置と車上制御装置における通信断発生率（図 5）がある。図 4 では、拠点装置→列車→拠点装置と伝送される制御電文の伝送遅延時間がシステム全体に渡ってどのような傾向になるかを見ることができる。これにより、仕様で定める制御の許容時間に対して遅れが発生しないことを評価することができる。また、図 5 では、無線伝送において制御電文の損失が発生するか、その結果として拠点装置や列車で制御電文を受信できなくなり、通信断として列車を停止するような状況にならないかを評価することができる。この例では、駅間約 500m～1200m の区間で地上から車上への伝送におけるフレームロスが発生する状況が見られるが、拠点装置および車上制御装置においては、通信断の検知がなく、システムは安定して動作することがわかる。なお、このシミュレーションではフレームロスが連続 3 回発生するまで通信断として検知しないこととしている。

## 5. まとめと今後の展開

本発表で紹介したシミュレーションとその評価例は 1 つの拠点装置によるシンプルな通信ネットワーク構成であるが、実際の無線列車制御システムでは複数の拠点装置が存在し、これら拠点装置間を結ぶ大規模な通信ネットワークが構築される。現在、本シミュレータを発展させて複数拠点装置間の通信ネットワークをモデル化して、大規模な無線列車制御システムのシミュレーションを実施できるように改修を進めている（図 6）。これは、独立している無線データ伝送回線シミュレータと通信ネットワークシミュレータとを統合し、さらには、IP ネットワーク技術などの汎用的な通信技術も適用できるようにシミュレータを構築して、無線列車制御以外の通信ネットワークシミュレーションにも活用可能とする通信ネットワーク評価システムへと発展させるものである。

今後、情報通信技術を列車制御システムに導入することが活発になり、構築したい通信ネットワークの性能とそのシステムの挙動を予測することの重要性が増してくるものと考えられる。本シミュレータによって、鉄道事業者自身が導入したい線区全体の通信ネットワークの状況を確認できるようになり、システム開発における設計作業や試験にかかる負担の軽減に役立てたい。

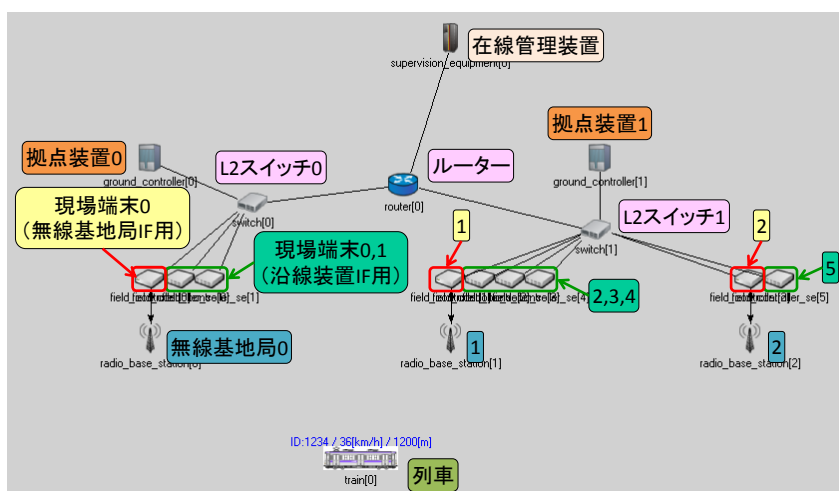


図 6 IP ネットワーク技術を適用した大規模通信ネットワークの構成例

## 参考文献

- (1) JIS E 3801-1 「無線式列車制御システム—第 1 部：一般要求事項及び機能要求事項」
- (2) JIS E 3801-2 「無線式列車制御システム—第 2 部：システム要求事項」
- (3) 関、川崎、加藤、立石、高荷、宮木：回線設計を指向した対列車無線データ伝送回線のモデル化と実装、第 15 回 鉄道技術連合シンポジウム演論文集、論文番号 044-S7、pp.201～204、2008