

鉄道向け無線データ伝送回線シミュレータの開発

川崎 邦弘* 関 清隆**

Development of an Radio Communication System Simulator for Railway Applications

Kunihiro KAWASAKI Kiyotaka SEKI

Various radio communication systems have been used in railway systems such as Communication Based Train Control (CBTC) systems, passenger information service systems, wireless sensor networks, etc. Designing or evaluating work to build up radio communication systems used in railway systems costs in terms of time and money in the present circumstances. Thus, for the purpose of helping these work, authors have been developed a simulation method to calculate transmission quality (bit errors, packet loss rates, latency, etc.) with consideration for railway-specific environment and usage. This paper outlines features of the developed simulator and some examples of simulation results.

キーワード：無線式列車制御，デジタル無線通信システム，無線回線設計，シミュレーション

1. はじめに

近年、無線式列車制御システム¹⁾を始めとして、鉄道の運行業務に積極的に無線通信技術を活用したシステムの開発・導入が急速に進んでいる。鉄道特有の沿線環境や使用条件の下で、アプリケーションが必要とする伝送品質（電文の損失率、伝送遅延など）が得られるよう、無線通信システムを設計するためには、無線通信技術に関する知識と経験が必要となえ、多くの労力が必要となる。そこで、筆者らは、無線式列車制御システム用の無線通信システムを主たる対象として、無線通信システムの設計・評価にかかる労力やコストを低減できるよう、設計評価支援用の無線データ伝送回線シミュレータを開発してきた。本稿では、開発したシミュレータの計算モデルの概要と実装方法を述べたのち、シミュレーション結果の一例を報告し、今後の展開について述べる。

2. シミュレーションモデル

2.1 無線データ伝送回線のモデル化の考え方

筆者らは、2007年から無線式列車制御システム用の無線データ伝送回線のモデル化に取り組み、図1に示すようなモデルを提案してきた^{2) 3)}。このモデルでは、OSI基本参照モデルの第2層（データリンク層）から下位の層における処理を3つのサブモデルで表現してい

る。第2層に相当する無線伝送制御サブモデルには、誤り訂正・検出符号等の符号/復号機能、暗号化機能、多重化/多重分離機能が含まれる。第1層に相当する無線伝送回線サブモデルには、変復調機能、ダイバーシチ機能等が含まれ、基地局間干渉も表現できるように考慮している。伝送媒体層（第0層）に相当する無線伝送路サブモデルは、電波伝搬に伴う信号強度の減衰とフェージング、雑音の混入を行う機能を含み、鉄道特有の伝送環境条件を反映させている（図2）。

2.2 無線伝送路における電波伝搬と雑音のモデル化

無線伝送路サブモデルでは、図2に示したように、電波伝搬に伴う搬送波強度変動と、不要波や干渉波の印加、雑音の混入を模擬している。搬送波強度は、確率モデル

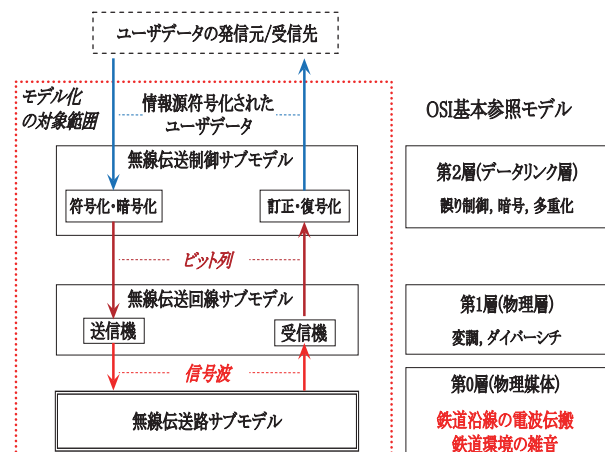


図1 無線データ伝送回線のモデル

* 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室

** 信号・情報技術研究部

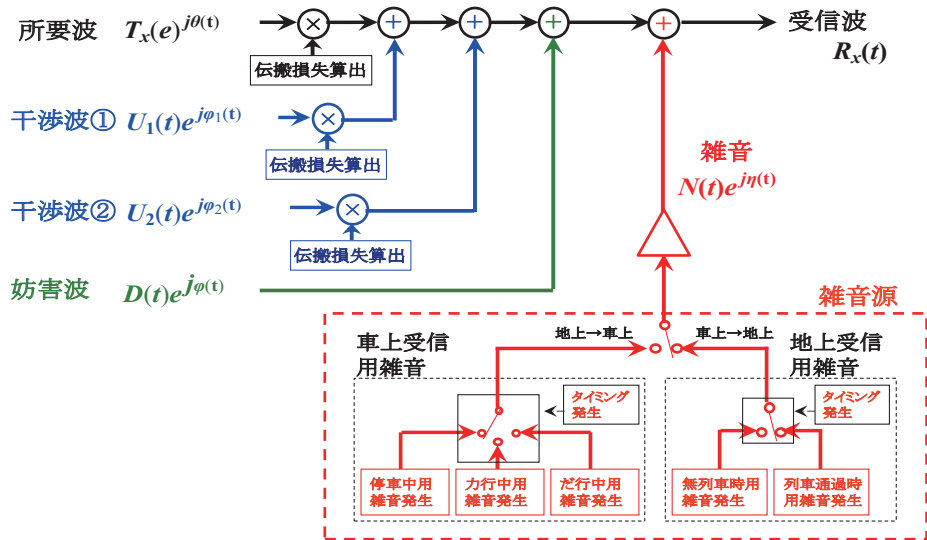


図2 無線伝送路サブモデルの概要

を用いた手法^{4) 5) 6)}で計算しており、パスロスモデルとシャドウイングモデル、フェージングモデルを組合せている。これらの確率モデルにおける強度変動の幅を決定するパラメータを線区の条件に合わせて設定することにより、列車走行に伴う搬送波強度の変動を模擬している。

雑音の混入方法は、一般的な無線通信シミュレーションと同様に、加法的白色ガウス雑音 (AWGN) を印加することによって、CINR (搬送波電力対干渉・雑音電力比) の劣化を模擬する。ただし、鉄道の場合は、沿線では列車の通過によって、車上では運転状態 (力行/だ行/ブレーキ) によって、受信機に入力される雑音強度が変動する。沿線において雑音の時間変化を実測した結果、地上側で受信する場合には、列車の通過に伴って無線基地局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わかっている。また、列車上での実測試験の結果からは、車上側で受信する雑音強度が「停車」「だ行」「力行・ブレーキ」の3状態ごとに変動することが分かっている。このような測定試験の結果から、雑音の発生を図3のようにモデル化し、各状態における雑音電力密度の値と、各状態の発生確率を

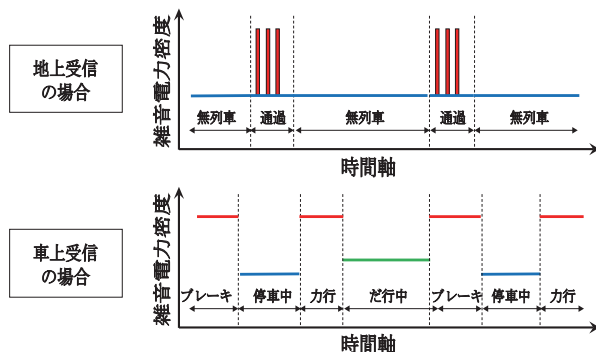


図3 雑音モデル

無線伝送路サブモデル内の雑音発生源にパラメータとして与えている。この列車の状態に応じて雑音強度の発生確率を変える鉄道モデルを導入している点が、今回開発したシミュレータの最も大きな特徴である。

3. シミュレータの実装

3.1 実装方針

本シミュレータの機能を実装するにあたっては、図2に示した無線伝送路サブモデルを、図4に示すように、①送受信点間の位置関係を計算する関数、②位置関係から受信電力の短区間中央値 (実験等で測定される値) を計算する関数、③受信電力値を与えることによってフェージングによる瞬時値変動と雑音印加を行う関数、の3つの関数に分割して記述した。そして、③の関数と、図2に示した上位2層の機能を実行する関数とを組み合わせることでコアとなるシミュレータを構成した。この実装方法によれば、送受信点間の位置関係を変えずに雑音の条件だけを変えてシミュレーションする場合や、測定値を使用したシミュレーションも可能となる。

また、本シミュレータの開発を始めた当初は、MATLAB 互換の行列計算ソフトウェアである Scilab を使用し、図2に示した各サブモデルの機能を Scilab の関数として記述していた^{2) 3)}。しかし、Scilab は汎用ソフトであるため、機能の実装がしやすい反面、シミュレーション規模 (計算対象区間長や、伝搬計算時の時間分解能) に制約があった。さらに、上で述べたような計算手順の分割と、多種多様な無線通信システムに対応させるためにシミュレータの機能を拡張した結果、実行速度が大幅に低下してしまった。

そこで、シミュレータを構成する全ての関数を標準的

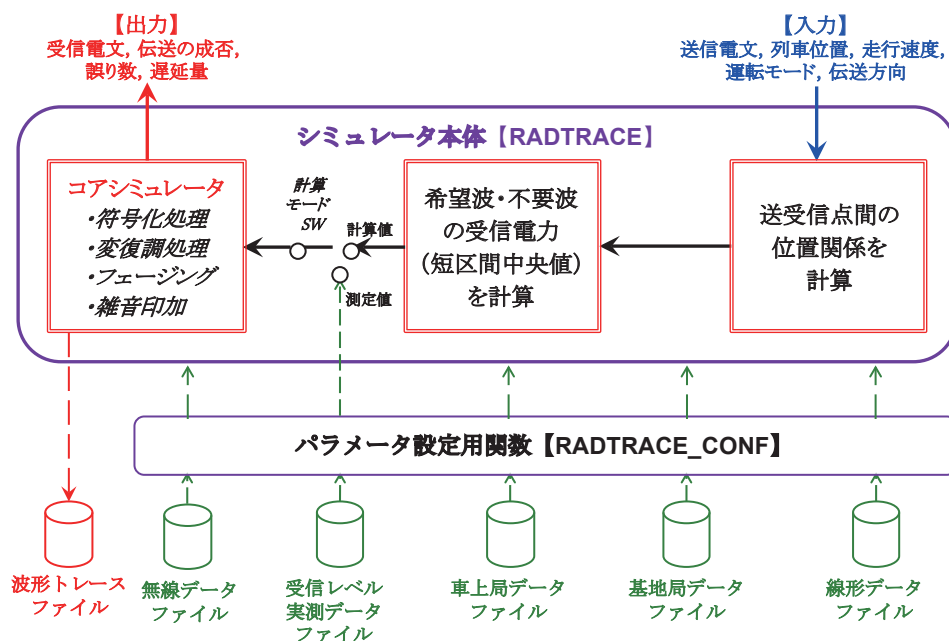


図4 実装したシミュレータの構成

なC言語で記述しなおし、シミュレーション規模に対する制約をなくすとともに、実行速度の向上を図った。

3.2 シミュレータへの入力パラメータ

シミュレーションを実行する際に与える入力パラメータは、全てのパラメータをCSV形式のテキストファイルから読み込む方法とした。図2に示した各サブモデルにおいて設定できるパラメータを表1～3および図5に示す。

図5に示したように、本シミュレータでは、線路の形状や基地局の位置をGPSの基準座標系であるWGS84

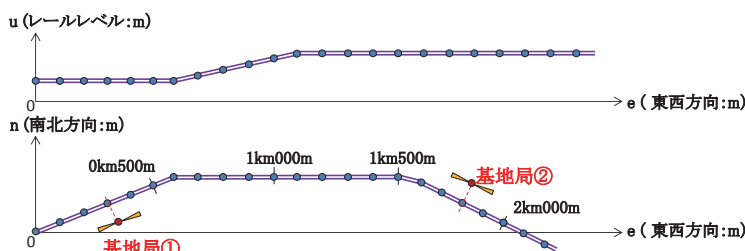
表1 無線伝送制御サブモデルの設定パラメータ

項目	設定内容
フレームフォーマット	・フレーム構成を自由にカスタマイズ設定可能 ・同期フレームの損失も考慮
誤り制御方式	FCS, リードソロモン符号の組合せ
暗号化方式	DES, 3DES 等から選択。任意の方式を外部関数で与えることも可。

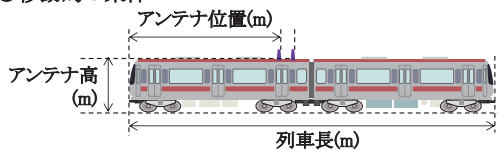
表2 無線伝送回線サブモデルの設定パラメータ

項目	設定内容
変復調方式	BPSK, QPSK, TT/4DQPSK, 16QAM から選択
変調速度・帯域制限	任意の速度、ロールオフレートを設定可(オーバーサンプリングは最大10倍)
ダイバシティ方式	選択合成, 最大比合成から選択

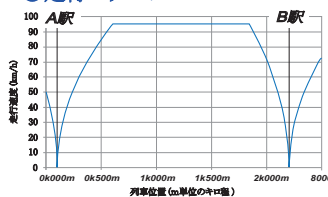
○線形と基地局の位置:WGS84系の直行座標系を使用。(測地座標系での指定も可)



○移動局の条件



○走行パターン



○基地局の条件

- ・アンテナの条件(指向性, 向き)
- ・各基地局のカバーゾーンと電波伝搬環境

○無線機の仕様

- ・周波数, 送信出力
- ・変復調方式, 符号化方式
- ・伝送速度

図5 無線伝送路サブモデルの設定パラメータ

表3 無線伝送路サブモデルの設定パラメータ

項目	設定内容
周波数	150MHz以上の任意の値を設定可。
周波数繰り返し	1波～6波(同一周波数の基地局間での干渉を考慮可)
送信出力	任意の値を設定可。
伝播モデル	長区間変動(パスロス):自由空間,2波干渉モデル,泰式,EGLI式から選択 短区間変動(シャドウイング):対数正規分布(変動幅を0dB～任意に設定可) 瞬時値変動(フェージング):仲上ライズ(直接波・散乱波の電力比を任意に設定可)
雑音モデル	AWGN(常時一定の雑音):雑音電力密度(W/MHz)を設定 または 鉄道モデル(あらかじめ設定した時間率で雑音電力密度が変動するモデル) :時間率と雑音電力密度との関係を外部ファイルで指定
符号間干渉	遅延プロファイルを設定することにより符号間干渉を計算

系の測地座標(緯度・経度・標高)で設定することにより、3次元空間上で位置関係を計算する。内部で位置計算を行う際には、WGS84系の緯度・経度・標高を、地球中心・地球固定直行座標系(ECEF)に換算している。沿線の地物による遮へい損(シャドウイング)や、走行に伴うフェージングの変動幅といった伝搬条件についても、線形を指定する際の座標位置ごとにパラメータを設定することができる。また、基地局・車上局ともアンテナの指向性を指定できる。なお、電波伝搬特性の実測データや、市販のレイトレーシング法による電波伝搬シミュレーションソフトウェアの計算結果等も活用できるよう、受信電力のデータを外部からファイルで読み込む機能も実装した。

3.3 シミュレータからの出力

シミュレータは、与えられた線区全線にわたって指定された回数シミュレーションを行い、計算結果として、全伝送ビット、誤りビット数、訂正ビット数、全伝送電文数、正しく受信できた電文数(誤り訂正符号を採用している場合は、訂正できた電文数も含む)、誤りを検出した電文数(=破棄する電文数)、誤りを検出して訂正できた電文数(誤り訂正符号を採用している場合)、誤りを検出できなかった電文数(見逃し誤り)、電文の伝送遅延時間を出力する。また、伝送路での特性も把握できるよう、搬送波強度の統計量(中央値,1%値,99%値)、雑音強度の平均値、干渉波強度の中央値も出力する。なお、計算の過程でシミュレータの内部で生成する複素信号波形を必要に応じて外部ファイルとして保存できる機能も実装している。この複素信号波形の出力をIQ変調機能付きの標準信号発生機に入力すれば、実際に変調信号波や受信波を再生することができ、実際の無線機とシミュレータとを組み合わせたシミュレーション実験も可能である(無線通信版の”HILS”といえる)。

4. シミュレータの動作検証

開発したシミュレータの検証については、シミュレータに実装した関数における処理の妥当性と、最終的にシミュレータから出力される結果と実際の値との整合性の確認の双方について行う必要がある。そこで、本シミュレータの開発にあたっては、以下の4つのステップに分けてシミュレータの検証を行うこととした。

- ①各階層ごとの処理が妥当であり、所定の入力を与えることにより出力が得られること
- ②実際に使われている無線機の性能を再現できること
- ③実線区相当の規模のシミュレーションが実行できること
- ④最終的に得られたシミュレーション結果が実際の無線通信回線の特性とほぼ合致すること

これまでに、①～③についての検証が完了しており、①のうちの第2層の機能と②の検証については既に文献7)で述べているので、本稿では①のうちの第1層以下の機能の確認結果と、③について報告する。

4.1 第1層と第0層における処理の検証

ここでは、変復調と帯域制限の処理を行う第1層と、搬送波強度と干渉波・雑音混入の処理を行う第0層を対象として、実装した関数が正常に機能していることを確認した結果について述べる。

デジタル無線のビット誤り率は、搬送波電力対雑音電力比(CNR)によって決定され、補完誤差関数を用いることによって算出することができる。QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)、 $\pi/4$ シフトQPSK、16QAM(Quadrature Amplitude Modulation)の各変調方式に対して解析的に求められているCNRとビット誤り率との関係を(1)～(3)式に示す。

QPSK

$$P_{e,QPSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \sqrt{\frac{\gamma_{CNR}}{2}} \right\} \quad (1)$$

$\pi/4$ シフトQPSK

$$P_{e,\pi/4QPSK} = \operatorname{erfc} \left\{ \sqrt{\frac{\gamma_{CNR}}{2}} \right\} \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \sqrt{\frac{\gamma_{CNR}}{2}} \right\} \right] \quad (2)$$

16QAM

$$P_{e,16QAM} = \frac{3}{8} \operatorname{erfc} \left\{ \sqrt{\frac{\gamma_{CNR}}{10}} \right\} - \frac{9}{64} \operatorname{erfc}^2 \left\{ \sqrt{\frac{\gamma_{CNR}}{10}} \right\} \quad (3)$$

なお、(1)～(3)式中の γ_{CNR} はCNRの平均値、 erfc は(4)式に示す相補誤差関数である。

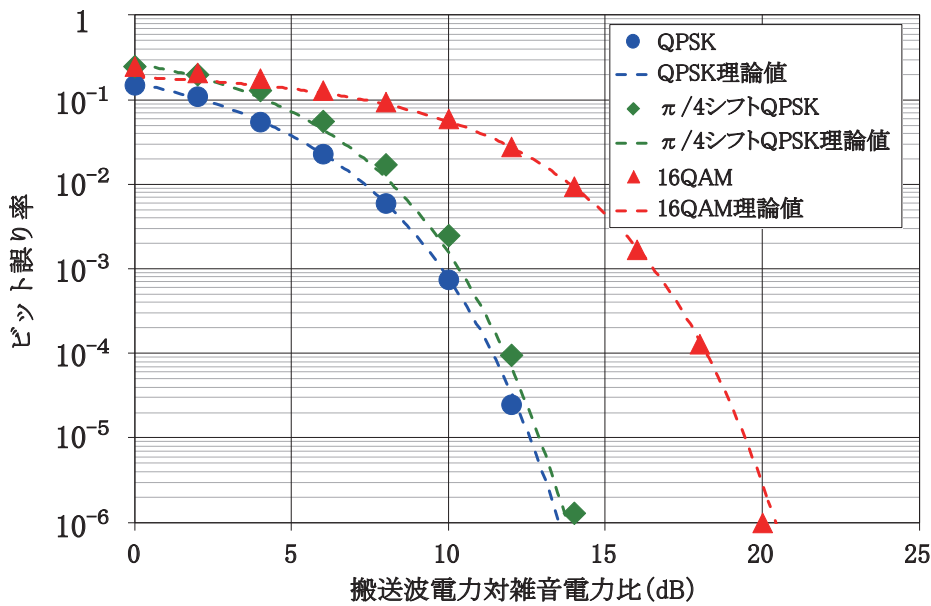


図6 理論式との比較検証結果

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dx \quad (4)$$

実装したシミュレータを用いて、上に示した3種類の変復調方式を第1層のパラメータとして設定し、第0層のパラメータによってCNRを変化させ、ビット誤り率を計算した結果を図6に示す。図6中には、(1)~(3)式で計算した結果を破線で示したが、シミュレータの出力と理論式から求めた値とが一致しており、第1層におけるビット単位の変復調処理と、第0層における搬送波強度と雑音強度の計算処理が正常に動作していることが確認できた。

4.2 実線区規模の計算の試行と計算時間の確認

次に、開発したシミュレータによって数十km長の線区全線にわたる計算が実行可能であることを確認するとともに、計算所要時間を把握するため、実線区に相当する規模のモデルを対象としてシミュレーションを試行した。ここでは、表4に示すように、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、地上→車上および車上→地上のビット誤り率を計算した。計算結果を図7に示す。仮想した線区では、伝搬環境条件が郊外地～開放地～都市部と変化し、列車が最大100km/hで走行するものとした。図7より、実際の線区全線にわたる規模のシミュレーションが実行できると、伝搬条件の変化に応じて伝送品質の変化が計算できていることが確認できた。

また、図7に示した結果を得るために要した計算時間は、Intel Xeon E5620 プロセッサ搭載機（クロック

2.4GHz, メモリ 64GB) で約 460 時間 (1 電文の伝送処理に約 0.2 ~ 0.4 秒: 誤りの量に依存) であった。Scilab で実装したシミュレータでは実行できなかった規模のシミュレーションが、現実的な計算時間内で実行可能であることが確認できた。

5. 今後の展開

本稿では、鉄道における無線データ伝送の回線品質を予測するシミュレータの概要と検証結果の一例を報告した。本シミュレータは、日本で開発・実用化された無線式列車制御システム用の無線通信システムの設計支援へ

表4 動作検証時のシミュレーション条件

項目	設定値
線区長	33km
無線基地局数	20 (+干渉局 1)
列車数	1
列車位置の計算ステップ	100m ごと
列車位置 1 か所あたりの送信電文数	2 × 10 ⁴ 電文 (地上→車上+車上→地上) (伝送ビット数: 約 1.3 × 10 ⁷)
誤り制御方式	FCS-16 および RS
変調方式	π/4シフト QPSK
変調速度	9600bps
ダイバーシチ方式	最大比合成
搬送波周波数	350MHz 帯 4 波繰り返し × 2 (FDD)
アンテナ高さ	地上: 10m, 車上: 5m
電波伝搬モデル	フェージングモデル: 仰上ライス分布 (k=3dB, 6dB, 12dB を位置ごとに設定) シャドウイングモデル: 対数正規分布 (σ = 0dB, 3dB, 6dB を位置ごとに設定) パスロスモデル: EGLI 式

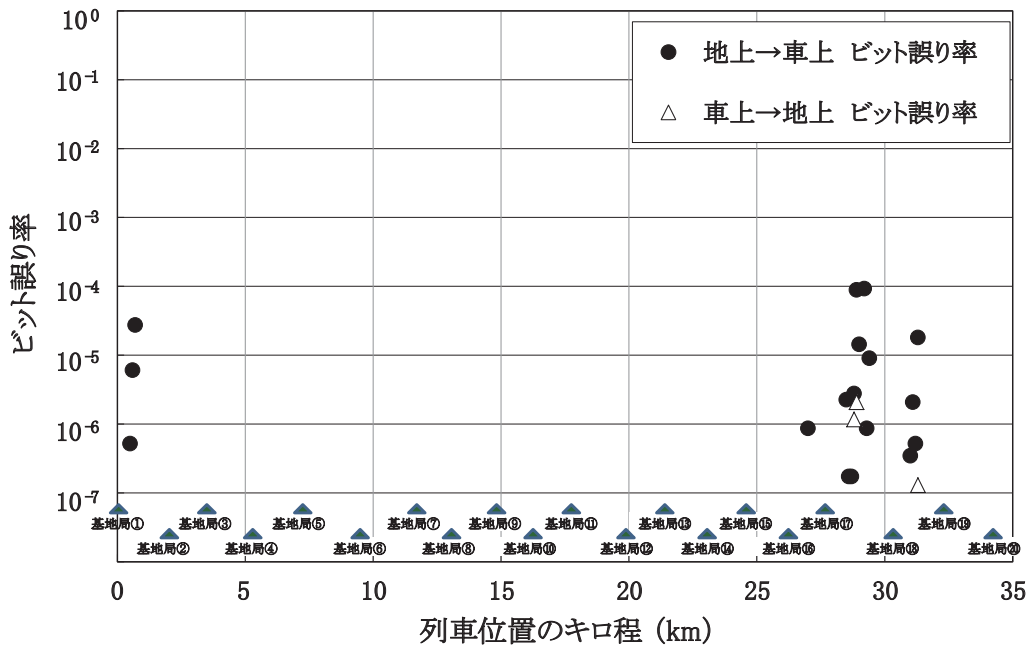


図7 ビット誤り率の計算結果例

の適用を目的として開発を始めたものである。4章で述べたように、各サブモデルごとの計算処理の妥当性と、実線区規模のシミュレーションが実行できることは確認できている。また、パラメータを調整することによって実際の無線通信システムの特性に近づけることができることも確認している。しかし、様々な現実の環境下で正しい結果が全線にわたって得られているか否かの検証についてはまだ途中の段階である。今後は、実システムの設計に試験的に活用しながら、計算精度の検証と向上を行っていく予定である。

一方、無線式列車制御に利用される無線システムは、鉄道専用に割り当てられた電波を使って狭帯域で小容量の伝送を行うものだけではなく、CBTCのように広帯域で大容量の伝送を行うシステムも多い。このため、周波数拡散方式やOFDM変調を模擬するためのモジュールの開発も進めており、無線LAN(802.11a/b/g)を簡易的に模擬したシミュレーションも部分的に可能となっている。さらに、無線式列車制御以外の鉄道用の無線通信システムにも汎用的に利用できるよう、パラメータ設定の自由度を高めるための改良を行っている。将来的には、複数の無線通信システムが混在するような、より現実的な環境条件の下でのシミュレーションが行える総合的な鉄道用無線通信回線シミュレータに発展させたいと考えている。

文献

- 1) 渡辺郁夫：無線式列車制御の動向，鉄道総研報告，Vol.25，No.5，pp.1-4，2011
- 2) 関清隆，川崎邦弘，加藤佳仁，立石幸也，高荷洸，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講演論文集，pp.201-204，2008
- 3) 菅原宏之，川崎邦弘，立石幸也，鈴木祐輔，森崇，松原康博：無線式列車制御用通信ネットワークのシミュレーションによる安定性評価手法，第18回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp.451-454，2011
- 4) 岡秀一（編）：移動通信，オーム社，1998
- 5) 唐澤好男：デジタル移動通信の電波伝搬基礎，コロナ社，2003
- 6) 神谷幸宏：MATLABによる無線通信技術，コロナ社，2008
- 7) 川崎邦弘，菅原宏之，立石幸也，服部鉄範，大森裕明：鉄道沿線向け無線データ伝送回線シミュレータの実装と検証，第20回鉄道技術連合シンポジウム，S4-3，2013