

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

菅原 宏之* 北野 隆康* 川崎 邦弘**

Performance Evaluation System of Communication Network
for Train Control System using Radio Communication

Hiroyuki SUGAHARA Takayasu KITANO Kunihiro KAWASAKI

In order to support designing a suitable communication network on a train control system using radio communication, we have developed a communication network simulator for evaluating a transmission quality of communication network in a railway line environment, with due consideration on a quality of radio data transmission. We outline the communication network simulator, and then introduce some examples of evaluation of a basic communication network has been constructed for the train control system.

キーワード：無線式列車制御システム，無線回線設計，ネットワーク設計，シミュレーション

1. はじめに

情報通信技術の進展に伴い鉄道においても無線を用いた列車制御システム（以下、無線式列車制御システム）の開発と実用化が進められている^{1) 2)}。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などの安全に関わる制御情報を地上と車上との間で無線によって伝送するため、無線データ伝送回線におけるデータの損失や各装置におけるデータ送信タイミングを含んだ装置間の伝送遅延分散などがシステムの信頼性に直結する。筆者らは、無線式列車制御システムにおける無線データ伝送回線の設計、および通信ネットワークの設計を効率的に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も考慮して通信ネットワークの動作を模擬し、列車制御に与える影響を予測することが可能な評価システムを開発した。本報告では、開発した評価システムの概要と通信ネットワークの性能評価例を紹介し、より詳細な地上のネットワークの特性比較を行った事例を示す。

2. 評価システムの構築

2.1 モデル対象

本評価システムでは無線式列車制御システムの規格である JIS E 3801^{3) 4)} に準じて評価対象をモデル化している。JIS E 3801-2 の附属書 E には無線式列車制御シ

ステムの全体システム構成例が示されており、概略は図1のようになる。列車運行の監視および管理を行う指令所装置、制御対象となる列車の制御および転てつ器などの制御を行う地上装置、制御対象となる列車の監視制御を行う車上制御装置の3つがあり、これらをデータ通信装置によって接続する構成になる。

無線式列車制御システムは、車上制御装置と地上装置間で制御情報を無線で授受することにより動作する。列車から送られてくる情報を地上装置で管理し、転てつ器や踏切などの沿線設備の状態も含めてそれぞれの列車が安全に走行できる区間を判断し、停止限界となる位置を各列車に伝える。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、曲線などの情報）に基づいて受信した停止限界位置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。

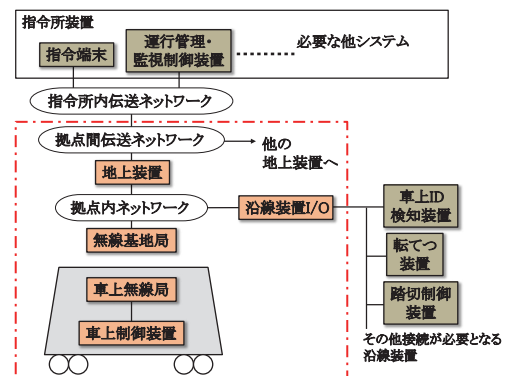


図1 無線式列車制御システム構成概略

* 信号・情報技術研究部 列車制御研究室
** 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室

特集：信号通信技術

このような動作から、図1の一点鎖線で囲った範囲が地上と車上間の制御情報の授受における安定性ならびに信頼性に関連する部分となり、本評価システムではこの範囲をモデル化した。

2.2 通信ネットワークモデルの実装

2.2.1 装置モデル

筆者らは、図1の構成を基にして、図2に示すモデルを提案し、このモデルによるネットワーク性能シミュレータを開発した⁵⁾。無線式列車制御システムの通信ネットワークの性能評価には、情報の伝送路のみでなく制御情報を授受する装置（地上装置や車上制御装置など）を含む動作を考慮に入れる必要があり、これら装置のモデル化とシミュレータへの実装によりシステムとしての評価が実現できる。評価システムの開発には離散事象型ネットワークシミュレータソフトウェアであるOMNESTを使用し、プログラム言語としてC++を用いている。今回、大規模な通信ネットワークへの対応、および、様々な通信プロトコルの適用を可能にすることを目的に既開発のシミュレータを発展させている。

通信ネットワークを構成する各装置は、OSI参照モデルに倣い通信機能を階層構造に分離し、アプリケーション層に相当する制御処理部と情報の転送を処理する転送処理部の大きく2つに分けてモデル化した。

2.2.2 制御処理部

制御処理部は、制御情報の作成タイミングの決定、送信元・宛先などのヘッダを含んだユーザデータの作成と送信、ユーザデータ受信時にその内容に基づく次処理の実行、そして、無線式列車制御システム固有の処理を行う。装置個別にその動作内容をプログラミングしており、共通しているのは制御情報を作成・送信する機能である。この機能は指定したタイミングにしたがって制御情報を出力するものであり、制御情報を授受する装置間でそのデータサイズを設定する。例えば、地上装置から無線基地局には周期 t 秒で n バイトの制御情報を送信するという具合に設定できる。

タイミングの制御はOMNESTのシミュレーション時間で管理される。出力した制御情報が相手装置に届く時間も同様に管理でき、これを装置間の距離もしくは伝送ケーブルの長さでデータの伝搬時間を設定することで算出するようにした。これにより、適用したい線区のキロ程を基にして距離を指定するなど、ユーザに分かりやすい形でパラメータを設定し、制御情報の伝送遅延時間を求めることが可能である。

2.2.3 転送処理部

転送処理部は、制御処理部から得たユーザデータの内容に基づいて相手装置へ出力する処理、また、他装置から取得したユーザデータを制御処理部へ渡す処理を行う。

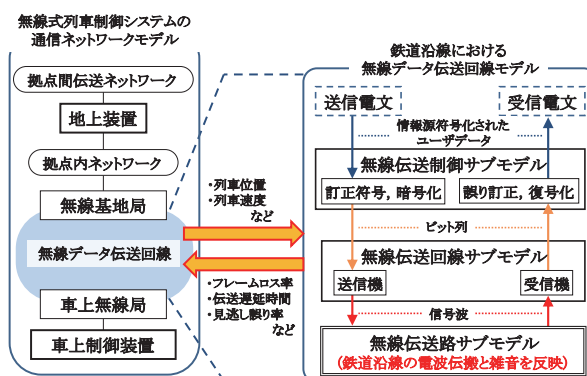


図2 シミュレータモデル

階層毎にモデルを用意して通信プロトコルを組み合わせて適用できるようにしており、適用したい通信プロトコルがあれば該当する階層のモデルを入れ換えることで対応可能としている。また、図1に示した拠点間伝送ネットワークおよび拠点内ネットワークの形態にはスター型、リング型、メッシュ型など様々なネットワーク・トポロジーが考えられるため、それらを変更してシミュレーションしたい場合にも必要なモデルに取り換えれば良いという利点がある。

2.2.4 通信プロトコル

通信プロトコルとして、ISOで標準化されてから30年以上が経過し、様々なプロトコルの原型になっているHDLC、および、産業界で汎用的に使われておりデファクトスタンダードとして広く普及しているTCP/IPプロトコル群を実装している。また、複数のネットワーク・トポロジーに対応できるようにするための経路制御プロトコルも用意した。これらTCP/IPプロトコル群と経路制御プロトコルは、OMNESTで公開されているINET Frameworkを活用しており、これらは、IEEEならびにRFC (Request for Comments: インターネットに関する技術の標準を策定する組織が発行する仕様) に沿った形式でパラメータを指定し動作させている。

物理層に相当するモデルは、次に述べる無線データ伝送回線モデルを組み込んでおり、制御情報の内容と列車の位置・速度などをパラメータとして与えることで、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、伝送遅延時間を出力する。

2.3 無線データ伝送回線モデルの実装

無線基地局と車上無線局間の無線データ伝送回線モデルは、鉄道環境特有の干渉と雑音を再現するものである。図2右側に示した無線データ伝送回線モデルもOSI参照モデルに準じて構成しており、データリンク層より下位の処理を3つのサブモデルで表現している。

無線伝送制御サブモデルは、誤り訂正・検出符号などの符号化/復号化機能、暗号化機能、多重化/多重分離

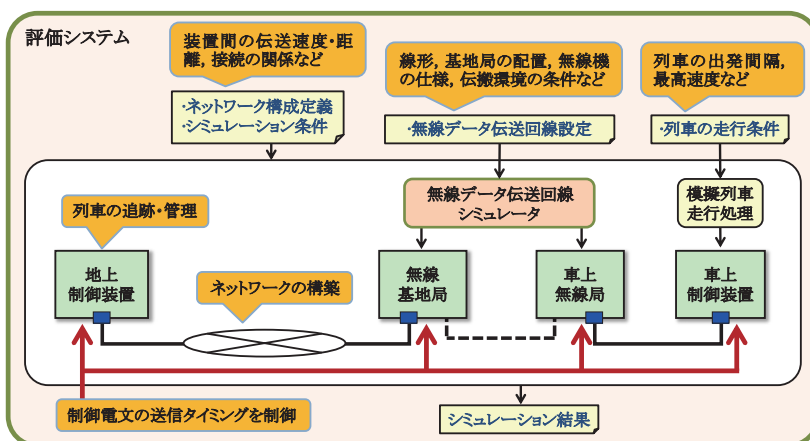


図3 評価システムの全体構成

機能が含まれたモデルである。無線伝送回線サブモデルは、変復調機能、ダイバーシチ機能などが含まれ、基地局間干渉も表現できるように考慮したモデルである。そして、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、鉄道特有の環境条件を反映させる重要なモデルである。鉄道特有の環境条件として、電波伝搬に関しては線路構造や駅舎などによる影響、雑音に関しては列車走行に伴う放射の影響を考慮できる。

これらのサブモデルは標準的なC言語の関数として記述し、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ている。また、線形、伝搬環境と雑音環境、車上局の条件、無線局の仕様などを細かく指定できるようになっており、無線伝送品質を計算するシミュレータとして単独で使用することもできる。

2.4 評価システムの構成

評価システムの全体構成を図3に示す。評価システムには、ネットワーク構成の定義、シミュレーションの条件、無線データ伝送回線の設定、列車走行の条件に関する各種のデータを与えて動作させる。これらは、装置間の伝送速度・距離、接続の関係、線形、基地局の配置、無線機の仕様、伝搬環境の条件など数多くの項目が存在するが、すべてテキスト形式のファイルとして扱い、直接編集できるよう配慮している。

シミュレーションを実行すると、読み込んだファイルの内容に沿って各装置モジュールを接続し、ネットワークを構築する。そして、シミュレーション時間の進行にしたがって各装置間で制御情報を送受信する。

列車の走行は、指定した区間を繰り返し走行する形式としており、停止状態から加速して指定速度に達すると等速で走行したのち減速して停止するパターンと、指定した速度で等速走行するパターンの2種類を用意している。なお、列車は指定した時隔で複数出発させることが可能であり、この場合、後続列車は地上装置から先行列

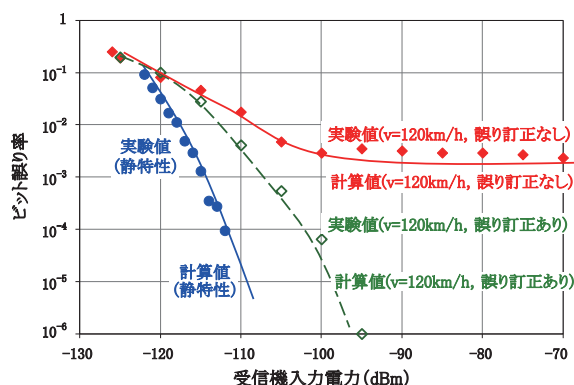


図4 受信電力対ビット誤り率特性の検証例

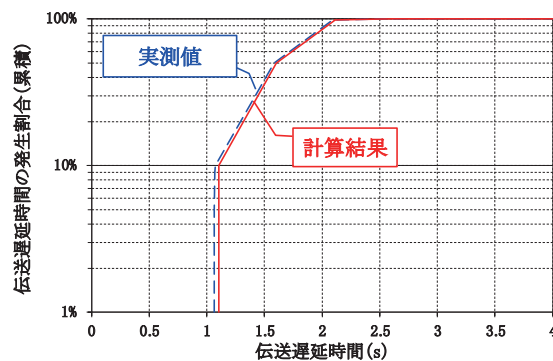


図5 IPネットワークの伝送遅延時間分布の検証例

車の後尾位置に余裕距離を加味した位置情報を受信し、そこまでのブレーキパターンを生成して走行する移動間そくによる間隔制御を行う。

指定したシミュレーション時間の経過もしくは列車の走行回数に達することでシミュレーションは終了し、シミュレーション結果を出力する。出力される結果もテキスト形式であるため、汎用のアプリケーションを用いてグラフ化するなどの整理が可能である。シミュレーション結果の妥当性については、誤り訂正効果やダイバーシチ効果が実際の無線機の性能を精度良く再現すること⁶⁾（図4）、および無線式列車制御システムの実験線に構築されたネットワークにおける遅延時間の分布も精度良く再現できること（図5）を確認している。

3. 通信ネットワークの性能評価

3.1 評価項目

通信ネットワークの性能を評価する項目として、単位時間当たりのデータ転送量であるスループットや帯域利用率などが挙げられる。筆者らは評価システムによってそれら指標を出力するとともに、無線式列車制御システムとしての動作状況を視覚的に確認できる項目も追加し、問題点の把握と改善に繋げられるようにした。それが次に述べる安定性と伝送遅延の評価である。

3.2 安定性の評価

1章でも述べたとおり、通信ネットワークの性能は無線式列車制御システムの信頼性に影響を与える。制御情報の損失や伝送遅延の増大などがシステムの想定を超えた場合、地上装置もしくは車上制御装置は伝送の異常を検知して列車を緊急停止させる。これにより安全性が損なわれることはないが、列車の安定運行には支障をきたすことになる。

図6は、そのような状況をグラフ化した例であり、無線基地局と車上無線局間の伝送路上の誤りの発生によって制御情報が許容できる回数以上連続して失われ、地上装置もしくは車上制御装置が「通信断」と判定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くなる）で示したものである。この例は、約500～1200mの区間において無線伝送による制御情報の損失があるものの、「通信断」と判定するに至らない状況であり、列車制御システム全体としては安定して動作することを示している。

3.3 伝送遅延の評価

各装置における制御情報の処理時間、および、送信タイミングによって相手装置に情報が伝達されるまでにはある程度の時間を要する。これは伝送遅延となって累積し、その増加は列車の位置に関する分解能を劣化させて無線式列車制御システムの性能に影響を与える。

図7は伝送遅延の状況を確認するために構成した通信ネットワークであり、単純な地上装置－無線基地局のネッ

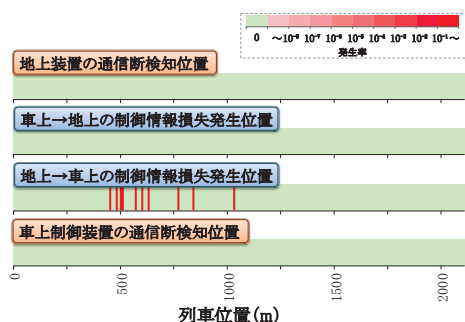


図6 列車制御システムの安定性の評価結果例

トワークを2つ持つものである。「他の地上装置」は、接続されているルーターを介して同様の構成となっている。

シミュレーションを実行すると、2列車が指定した時間隔で図7の左から右へ走行し、列車内の車上無線局は図7の中央の無線基地局切替地点で無線基地局Aから無線基地局Bへと接続を切り替えて制御情報を送受信する。

ここで、以下のようなシミュレーション動作の固定条件と可変条件を設定し、先行列車が送信する情報が後続列車の停止限界位置として反映されるまでの遅延時間を求めた（図8）。

【固定条件】

- (1) 列車の最高速度は90km/h、加速度、減速度ともに2.4km/h/sとする。
- (2) 地上の通信ネットワークにはEthernet、TCP/IPプロトコル群を使用し、伝送速度を10Mbpsとする。
- (3) スwitchングハブおよびルーターは処理遅延のない理想的な機器とする。
- (4) 拠点間伝送ネットワークであるルーター間の距離は2駅程度の距離を想定し3km、拠点内ネットワークである各装置間の距離は10Base-Tを想定したLANケーブルの最大長である100mとする。
- (5) 地上装置の伝送周期を500msとする。
- (6) 無線式列車制御システム専用の無線機を想定し、伝送速度は9600bpsとする。
- (7) 無線の制御方式は1つの周波数の電波を時間軸上で等間隔に分割（タイムスロットと呼ぶ）してアクセスするTDMAを適用し、タイムスロットを62.5msとする。タイムスロットの割り当てはランダムに決定する。
- (8) 制御情報のデータ長は1タイムスロット（約75バイト）に納まるものとする。
- (9) 情報の損失は発生させず、全装置正常動作とする。

【可変条件】

無線伝送周期を500ms～3sまで250ms毎に変化させる。（つまり、タイムスロットが4ずつ増加する。）

各装置が独自の伝送周期を持って処理していくことに加えて、車上制御装置は無線伝送周期に依存して情報が更新されていくことで、伝送遅延にはばらつきが生じ、無線伝送周期が長くなるほど増加する傾向が見られる。この伝送遅延の増加によって、後続列車には先行列車の位置が実際のそれよりも後方に存在しているように見えることになり、2列車間の運転時間隔に影響を及ぼすことになる。各々の無線伝送周期において、最小運転時間隔を求めた例が図9となるが、これは図7の構成に停車駅を設定し、駅停車時分を30秒とした場合に同様の条件を用いて求めたものである。無線伝送周期を長くするこ

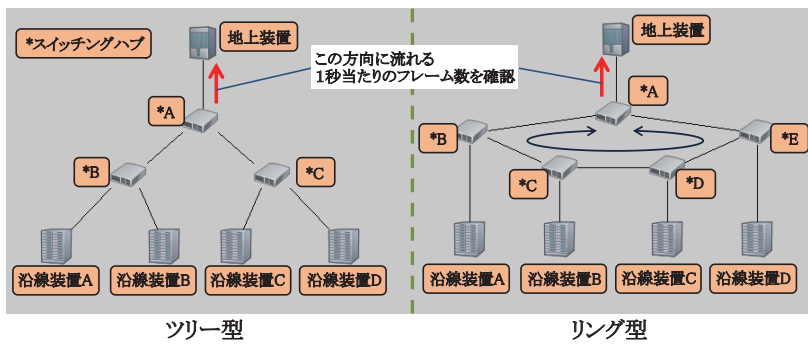


図 11 2種類のネットワーク・トポロジー

表 1 地上装置の受信フレーム数

トポロジー	フレーム数
ツリー型	80.02 frames/s
リング型	80.20 frames/s

れば通信を継続できる特徴がある。ただし、そのままではデータがループしてしまうため、通信経路の制御を行うためのデータをスイッチングハブ間で伝送する必要がある。

ここでは、経路を制御する通信プロトコルとしてイーサネット上で動作する RSTP (Rapid Spanning Tree Protocol) を適用し、以下のようなシミュレーションの動作条件のもと、RSTP を使用しないツリー型と RSTP を使用したリング型それぞれについて、スイッチングハブ A から地上装置に届く 1 秒あたりのフレーム数 (図 11 の矢印の流れのデータ) を求めた (表 1)。

- (1) 装置間の通信には Ethernet, IP, UDP を使用し、伝送速度 10Mbps, 沿線に装置が設備されることを想定してケーブル長を全て 1km とする。
- (2) スwitchingハブは処理遅延のない理想的機器。
- (3) 地上装置の伝送周期は 50ms, 沿線装置は制御情報を地上装置から受信後即座に応答を返送する。
- (4) 制御情報は Ethernet の標準最大データサイズである 1500 バイトになるように設定する。
- (5) RSTP のパラメータは IEEE 802.1D-2004 (旧 IEEE 802.1w) に規定されているデフォルト値を用いる。

表 1 から、地上装置に届くフレーム数はごくわずかではあるがリング型の方が多く、RSTP による通信経路の制御データが流れていることがわかる。もし、ここに想定を超えるようなデータが伝送されていた場合、通信経路を分散させるなど、ネットワーク構成や使用する機器の性能を見直し、再検証することとなる。このように、本評価システムでは国際規格で要求される伝送システムの特徴把握を定量的に行うことも可能である。

5. おわりに

以上、無線式列車制御システムにおける通信ネットワークの評価システムについて概要を述べ、いくつかの評価例を紹介した。評価システムによって通信ネットワークの性能を示す指標を出力するとともに、動作の安定性や伝送遅延で無線式列車制御システムとしての動作状況を確認できることを例示した。また、国際規格へ

の対応について述べるとともに、汎用通信技術を適用した場合の通信ネットワークの特性について 2 つのネットワーク・トポロジーによるシミュレーション例を示した。

本評価システムにより、コストや安全性などの制約で実際の列車を走行させるのが困難な条件でも列車の安定運行への影響を評価できるため、設計だけでなく試作や実験の規模を縮小して開発を進めることが可能である。今後、本評価システムを実際的设计・評価に活用していくとともに機能の拡充を図り、列車運行や旅客行動などのシミュレータとも連携して、列車運行への影響の視点から通信ネットワークの性能を評価することが可能なシステムへ発展させていきたいと考えている。

文献

- 1) 立石幸也ほか：ATACS の開発とプロトタイプ試験，第 11 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp.151-154，2009
- 2) 福田光芳：無線を用いた列車制御システムの現状，鉄道と電気技術，Vol.24, No.1, pp.56-59, 2013
- 3) 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」，日本規格協会，2009
- 4) 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」，日本規格協会，2010
- 5) 菅原宏之ほか：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, pp.35-40, 2012
- 6) 川崎邦弘ほか：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講演論文集，pp.647-650, 2013
- 7) IEC 62280 Ed.1, Railway applications - Communication, signaling and processing systems - Safety related communication in transmission systems, 2014.
- 8) 川崎邦弘：安全関連伝送に関する国際規格 IEC 62280，鉄道総研報告，Vol.27, No.2, pp.41-44, 2013
- 9) 鈴木博史ほか：IP ネットワークを活用した信号システムの一考察，第 48 回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集，論文番号 612, 2011