

無線式列車制御用通信・運行シミュレータの開発

武内 陽子* 川崎 邦弘** 杉山 陽一***

Development of a Telecommunication and Train Operation Simulator for Radio Communication Train Control

Yoko TAKEUCHI Kunihiro KAWASAKI Yoichi SUGIYAMA

When putting the radio communication train control system to use, it is important not only to establish a stable radio communication condition between trains and ground facilities but also to consider train operation conditions. Then, we develop a Telecommunication and Train Operation Simulator for Radio Communication Train Control under which we can estimate train operation in consideration of radio wave propagation and communication networks. In addition, a system design flow contrived so as to fulfill given criteria is also suggested using this simulator. In this paper, we explain the summary of this simulator and the design flow and introduce the results of some case studies.

キーワード：無線式列車制御，シミュレーション，列車運行，無線回線設計，ネットワーク設計，デッドロック

1. はじめに

無線式列車制御システムは、列車制御情報の伝達に無線通信を用いる列車制御システムであり、世界各国で実装に差異はあるものの既に実用化されている。日本では、2011年に、JR東日本のATACS¹⁾が仙石線に導入された。その後、JR東日本の埼京線へも導入されるとともに、JR西日本の和歌山線への導入も公表されており、今後のさらなる拡大が期待されている。

無線式列車制御システムを導入するにあたっては、車上と地上との間の無線通信路、および、伝送品質を確保することが前提であり、従来、地上設備をできるだけ少なくするため、必要な伝送品質を満たすことができる最小限の無線基地局数で設計をしてきた。一方で、1つの無線基地局で制御可能な列車数には限りがあるため、高頻度な列車運行を実施する線区では、無線基地局数が少なすぎると、輸送サービスそのものが提供できなくなる可能性がある。すなわち、無線通信ネットワーク設計においては、列車ダイヤを考慮することが必要である。

設計作業を支援するため、鉄道総研では、複雑な伝搬環境や干渉を考慮しながら、無線回線設計を適切に行うためのシミュレータを開発してきた^{2) 3)}。しかし、列車密度が時間帯毎に異なるような列車運行状況を模擬した無線通信ネットワーク評価は実施されていなかった。前述した通り、高頻度な列車運行を実施している線区に無線式列車制御システムを導入する際には、無線通信ネットワークに起因する列車遅延を発生させないような設計が必要となる。そこで、無線の電波伝搬や通信ネットワー

クの伝送遅延などの物理現象を模擬し、列車運行状況を推定するための「無線式列車制御用通信・運行シミュレータ」の開発を進めてきた^{4) 5)}。さらに、無線式列車制御用通信・運行シミュレータを活用した無線通信ネットワーク設計フローを提案した^{6) 7)}。

以下、2章は、本研究で対象とする無線式列車制御システムの概要、3章は無線式列車制御用通信・運行シミュレータ、4章は無線通信ネットワーク設計フロー、5章はケーススタディ、6章はまとめと今後の展開について、それぞれ述べる。

2. 対象とする無線式列車制御システムの概要

本研究で対象とする無線式列車制御システムの構成を図1に示す。各編成に無線装置と車上装置を搭載し、沿線に無線基地局を配置する。ある列車との無線通信において、データ送信過程でのフレームの消失（「フレーム損失」と呼ぶ）が、決められた回数以上、連続して発生した場合には、安全のため、当該列車を緊急停止させる必要がある。安定輸送のためには、安定した無線通信が必要であることから、使用可能な周波数チャンネルを複数用意し、各無線基地局に周波数チャンネルを適切に割当てることで、電波干渉を避けている。

各連動駅の進路の開通状況、および、各列車の位置を受信して把握し、各列車がどこまで安全に進むことができるかという情報である停止限界を計算する地上設備を、拠点装置という。無線基地局同士は拠点装置に接続されており、拠点装置間は通信ネットワークで接続される。無線基地局と拠点装置、拠点装置同士は、ある一定周期でデータを送受信して、地上、および、車上の制御に必要な情報を共有している。

* 信号・情報技術研究部 運転システム研究室

** 信号・情報技術研究部

*** 信号・情報技術研究部 列車制御研究室

特集：輸送・交通計画技術

各無線基地局は、担当する範囲（「ゾーン」と呼ぶ）が決まっており、無線通信を用いてゾーン内の列車と制御に必要な情報を相互に送受信している。具体的には、車上装置は自列車の位置を拠点装置に送信し、停止限界を車上装置へ送信する。車上装置はあらかじめ搭載した線路形状等のデータベースと地上装置から送信される停止限界とをあわせて、列車の速度を許容範囲内に保つための運転曲線（「速度照査パターン」と呼ぶ）を発生させ、それに基づいて速度制限を行う。

1つの無線基地局で複数の列車を同時に通信するための方式として、本稿では、TDMA 伝送方式^Aを想定する。TDMA 伝送方式では、1つの周波数の電波を時間軸上で等間隔に分割した単位である「タイムスロット」を各列車に割当てる。時刻に応じて、タイムスロットを切替えることにより、制御対象列車と順番に通信を行う。

列車は、進行するにつれて、通信する無線基地局を切替える必要がある。このため、無線基地局を切替えるゾーン境界（「ハンドオーバー点」と呼ぶ）と、次の無線基地局への切替に向けた準備を開始する地点（「ハンドオーバー準備点」と呼ぶ）を設定する。列車がハンドオーバー準備点まで到達したことを検知すると、次の無線基地局は、当該列車に割当てるためのタイムスロットをあらかじめ準備しておく。そして、ハンドオーバー点で通信する無線基地局を切替えることにより、円滑な列車運行制御を実現している。

このように、無線式列車制御システムでは、周波数チャンネルとタイムスロットという無線に関するリソースが、適切に割当てられていることが、安定した列車運行に必要な条件となる。

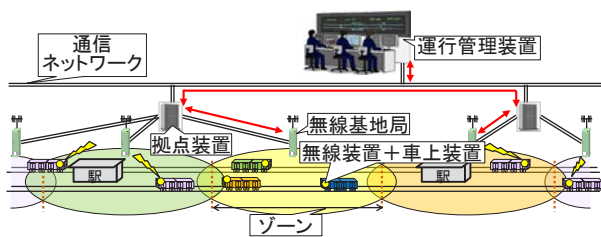


図1 対象とする無線式列車制御システムの構成⁷⁾

3. 無線式列車制御用通信・運行シミュレータ

高頻度な列車運行を実施している線区に無線式列車制御システムを導入する際には、無線通信ネットワークに起因する列車遅延を発生させないような設計が特に必要となる。そのため、無線を含む通信ネットワークと列車

運行を模擬する「無線式列車制御用通信・運行シミュレータ」を開発した。これにより、無線式列車制御システム導入時における列車運行、無線通信品質、伝送遅延を定量的に評価可能となった。

無線通信の模擬は無線データ伝送回線シミュレータ「RADTRACE」²⁾を、通信ネットワークの模擬は無線式列車制御用ネットワーク評価シミュレータ「TCNET」³⁾を、列車運行の模擬は列車運行・旅客行動シミュレータ「MATRIIX」⁸⁾を活用し、これらを連成させて、無線式列車制御用通信・運行シミュレータを構築した。構成と入出力データを図2に示す。

3.1 基本動作

TCNET がシミュレーション時刻を管理し、微小計算単位時間ごとに、以下の計算、および、RADTRACE や MATRIIX とのやり取りを実施する。(1)～(6)は、図2の(1)～(6)と、それぞれ対応している。

- (1) RADTRACE は、無線通信を模擬し、フレーム損失が発生するかどうかを計算する。
- (2) TCNET は、タイムスロットを割当てる。また、通信ネットワークのラウンドトリップタイム^B(以下「RTT」)を計算する。
- (3) TCNET は、シミュレーション時刻を、微小計算単位時間だけ進める。
- (4) TCNET は、MATRIIX に対して、シミュレーション時刻、タイムスロット割当て情報、フレーム損失に起因する列車の緊急停止の必要性の有無、緊急停止していた列車との無線通信の回復の有無を送信する。
- (5) MATRIIX は、受信した情報をもとに、シミュレーション時刻までの計算を進める。
- (6) MATRIIX は、TCNET に対して、各列車の在線位置、向き、速度情報を送信する。(1)に戻る。

3.2 タイムスロット割当て情報更新時の動作

MATRIIX は、計算単位時刻毎に、各列車のタイムスロット割当て情報を受信している。ある列車のタイムスロット割当て情報が更新されている場合には、当該列車は次のゾーンに進入するためのタイムスロットが割当てられたことを意味する。したがって、MATRIIX で当該列車の停止限界を計算し、速度照査パターンを更新する。

3.3 連続したフレーム損失発生時の動作

ある列車間との無線通信において、決められた回数以上

^A 1つの周波数の電波を複数のユーザーやアプリケーションで共有するために、時間軸上で等間隔に分割してアクセスする方式。

^B 拠点装置が列車制御情報を送信開始してから、列車応答情報を受信するまでの時間。

上の連続したフレーム損失が発生した場合には、安全のため、当該列車を緊急停止させる必要がある。フレーム損失はRADTRACEで計算し、その結果をもとに、フレーム損失に起因する列車の緊急停止の必要性の有無、緊急停止していた列車との無線通信の回復の有無をTCNETが判断する。これらの判断結果を、計算単位時刻毎に、TCNETからMATRIIXに送信する。緊急停止が必要になった場合には、MATRIIXは、通知された時刻から、当該列車に非常ブレーキをかけ、緊急停止させる。緊急停止させた列車の無線通信が回復した場合には、緊急停止した位置から、列車走行を再開させる。

3.4 無線通信の簡易模擬機能

RADTRACEは無線の伝搬経路や干渉を細かく模擬するため、計算時間がかかる。そこで、無線通信の簡易模擬として、一律のフレーム損失率（以下「FLR」）を設定する、あるいは「通信ネットワークの伝送遅延が列車運行に影響を及ぼさない」と仮定する設定も可能である。これらの機能により、一部の計算を省略でき、高速な列車運行推定が可能となる。

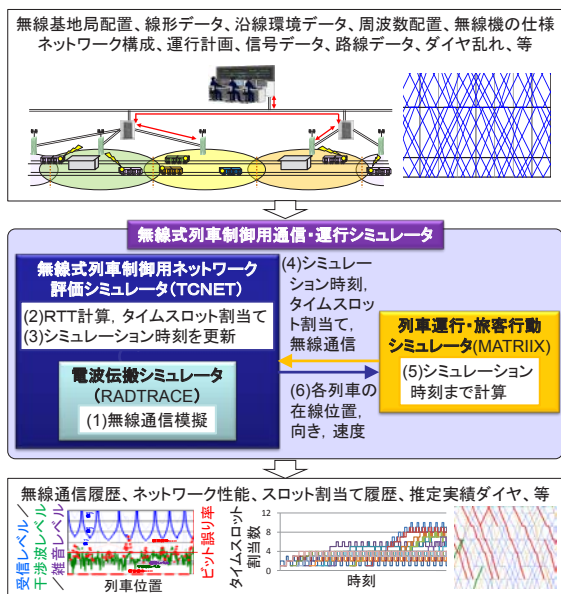


図2 無線式列車制御用通信・運行シミュレータの構成と入出力データ⁶⁾

4. 無線通信ネットワーク設計フロー

2章で述べたように、本研究で対象とする無線式列車制御システムでは、無線通信を行うため、TDMAを利用して列車を制御しているため、表1の制約を考慮する必要がある。表1のうち、無線通信の安定性、通信ネットワークの伝送遅延、制御列車本数の上限については、3章で述べた無線式列車制御用通信・運行シミュレータ

を活用することで定量的な評価が可能であるが、これに加えて、タイムスロットが割当てられないことに起因するデッドロックの発生可能性を評価しておくことも重要である。

そこで、本研究では、表1の制約を考慮した無線通信ネットワーク設計フローを提案した(図3)。まず、鉄道事業者がシステムの安定稼働を定める基準値を設定する。導入線区の特徴を考慮した結果として、これらの基準値のうちの一部のみを設定する場合があってもよい。次に、最も無線基地局数が少ない設計を初期解として、図3中に示した指標I~Vが設定した基準を満たすまでフローを繰り返す。指標I~Vを評価する順番は、無線通信ネットワーク設計修正の難しさ、条件の厳しさに基づく。このことで、基準を満たし、かつ、無線基地局数が最小となる無線通信ネットワーク設計を可能とした。

指標Iの詳細は文献2)を、指標Vの詳細は文献3)を参照されたい。指標IIは4.1節で述べる。指標III, IVは、3章で述べた無線式列車制御用通信・運行シミュレータを活用する。本フローの実施例は、5章で述べる。

表1 無線式列車制御システムの制約⁶⁾

制約	詳細
無線通信の安定性	無線基地局同士が遠すぎると電波が届かず、近すぎると干渉が発生する 規定回数以上、連続でフレーム損失が発生すると、列車は緊急停止する
通信ネットワークの伝送遅延	伝送遅延が大きいとフレーム損失が規定回数以上になると判断する可能性がある
制御列車数の上限	1無線基地局あたり同時に制御できる列車数が決まっている
デッドロック	タイムスロットが割り当たらないことに起因するデッドロックが発生する可能性がある

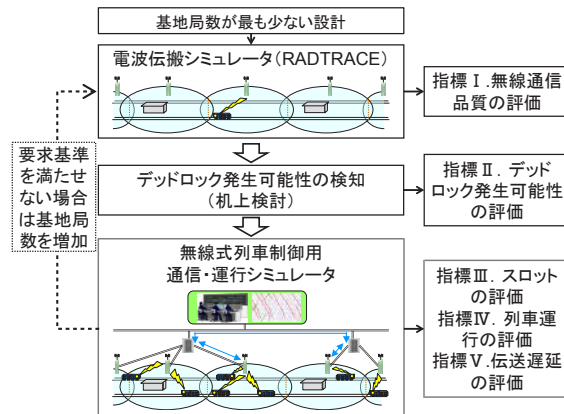


図3 無線通信ネットワーク設計フロー⁷⁾

4.1 デッドロック発生可能性の検知

無線式列車制御システムでは、列車が走行するために、タイムスロットを割当てて必要がある。列車運行にともなって、通信する無線基地局を切替えるために、ハンドオーバを実施するが、次の無線基地局のタイムスロットが全て占有されている場合には、ハンドオーバができず、次のゾーンに進入することができない。よって、ある列車が次の無線基地局のタイムスロットを確保できないことに起因して、進路を確保している列車をブロックする状況が発生し得る。このような状況では、現在のタイムスロット割当てを開放し、タイムスロットを再割当てするか、列車順序を変更しない限りは、列車が永久に進行できない。本稿では、この状況のことを「デッドロック」と定義する。

デッドロックになると、列車運行に大きな影響を及ぼすことから、デッドロックを避けるための方法は重要である。そのため、列車順序を変えないという前提のもと、閉区切り、最大列車在線数、進路情報から、デッドロックが起こる可能性がある場所を事前に検知する手法を提案した。

4.1.1 渡り線を含まない線路のデッドロック検知

図4にデッドロックの例を示す。ゾーン1のタイムスロットも、ゾーン2のタイムスロットも、すべて占有されており、各ゾーンの先頭列車である列車①も列車②も、次のゾーンに進入できないため、デッドロックが生じている。このような状況が起こる可能性の有無は、単一運転方向の列車のみで隣接し合うゾーンのタイムスロット占有が可能かどうかを確認すればよい。

4.1.2 渡り線を含む線路のデッドロック検知

図5に、渡り線を含む線路における順序制御から生じるデッドロックの例を示す。列車①は、ゾーン2の空きタイムスロットがないため、進むことができない。ゾーン2に空きタイムスロットができるためには、ゾーン2の列車がゾーン1、ゾーン3、あるいは、その他の線区へ進むことが必要である。しかしながら、ゾーン3にも空きタイムスロットがないため、列車③は進むことができない。また、列車①と列車④の順序は、列車ダイヤで決まっており、仮に、列車①が列車④よりも順番が早い場合、列車④は進路を確保することができず、進むことができない。すなわち、図5では、現在のスロット割当てか列車順序を変更しない限りは、列車が進むことができないデッドロックの状況となっている。

このようなデッドロックは「線路の配線が渡り線を含み、クローズした状態になる場所を含むような1つ、あるいは、連続したゾーンにおいて、空きタイムスロットがない状況」で、発生する可能性がある。すなわち、図6の太枠を含むゾーンでのタイムスロット数の合計が、当該線区での最大同時在線列車数以上であれば、図6の

ようなデッドロックが起こることはない。

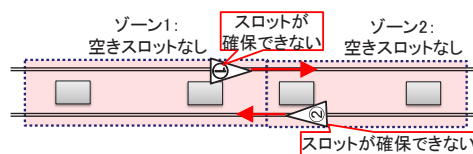


図4 渡り線を含まない線路でのデッドロックの例 (列車①と列車②がデッドロック)

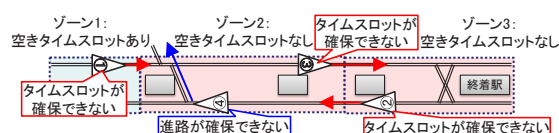


図5 渡り線を含む線路でのデッドロックの例 (列車①と列車④がデッドロック)⁷⁾

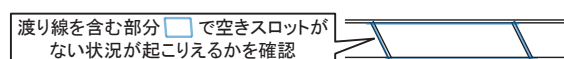


図6 デッドロック検知で確認すべき箇所(太枠)⁹⁾

5. ケーススタディ

図3のフローを用いたケーススタディを実施した。5.1節に高頻度線区でのサンプルデータを用いた事例を、5.2節に実路線データを用いた事例を、それぞれ示す。

5.1 高密度線区での無線通信ネットワーク設計事例

駅数29駅、路線長約35kmの实在路線を元にして、1.5分間隔の高頻度な列車運行を実施するサンプルデータを作成し、鉄道事業者が図3の指標Ⅰ、Ⅲのみに表2のような基準を設けた場合のケーススタディを実施した。

まず、指標Ⅰの無線通信品質基準を満たす最小の無線基地局数は13局であった。次に、指標Ⅲのため、無線式列車制御用通信・運行シミュレータで計算した結果、ある駅間でタイムスロット不足が発生することを確認した。そこで、タイムスロット不足が発生した付近に無線基地局を1局増やして、再度、シミュレーションをした結果、タイムスロット不足が発生しないことを確認した。これらの評価結果も表2に示す。

本サンプルデータにおいては、無線通信品質基準を満たすために必要な無線基地局数(13局)よりも、タイムスロット不足が発生しないような列車運行に必要な無線基地局数(14局)の方が多かった。すなわち、図3のフローを用いて導出した無線通信品質基準と輸送サービス品質基準を満たす最も基地局数が少ない無線通信ネットワーク設計は、14局となった。

表2 評価指標の基準と評価結果
(下線部は基準を満たさなかった指標)

		指標Ⅰ	指標Ⅲ
基準		FLR1.0×10^{-3}	タイムスロット不足が発生しない
評価結果	13局	FLR1.0×10^{-3}	タイムスロット不足が <u>発生</u>
	14局	FLR1.0×10^{-3}	タイムスロット不足が発生しない

5.2 列車遅延・機器故障を想定した場合における無線通信ネットワーク設計事例

駅数19駅、路線長約22km、最大同時在線列車数25本の実在路線データを用いて、鉄道事業者が図3の指標Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ、Ⅴに対して、表4のような基準を設けた場合のケーススタディを実施した。列車ダイヤを図7に示す。

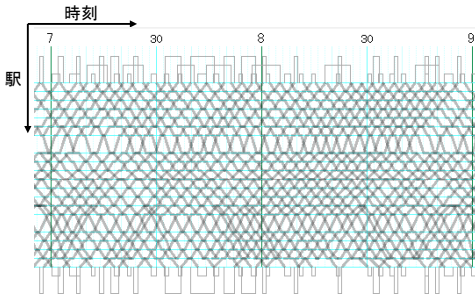


図7 列車ダイヤ(一部抜粋)⁶⁾

5.2.1 指標Ⅰ：無線通信品質の評価

沿線の地理的な条件を考慮し、実際に無線基地局を設置できることを前提に、文献2)の手法を用いて、電波伝搬に雑音、干渉を考慮した無線通信品質の評価を実施した。まず、無線基地局数を8局とし、アンテナの位置と高さ、周波数チャネルの割当てなどを調整して、FLRを算出した結果、FLR1.5×10^{-3}となり、表4の基準を満たすことができなかった。無線基地局数を9局に増やした場合でも、延長ハンドオーバー^cを実施した場合にはFLR5.0×10^{-2}となり、基準を満たすことができなかった。そこで、無線基地局数を10局に増やしてパラメータ調整を実施し、延長ハンドオーバーを実施した場合にも、表4の基準を満たすFLR1.0×10^{-3}となる無線基地局配置を設定した。

5.2.2 指標Ⅱ：デッドロック発生可能性の評価

4.1.1項で述べた渡り線を含まない線路のデッドロック検知のため、単一運転方向の列車のみで、隣接し合う

^c 無線機が故障した場合に、故障した無線基地局が存在しないものとして、ゾーン、ハンドオーバー点などを設定し直して正常な無線基地局のゾーンを延長すること。

ゾーンの閉そく数を確認した。その結果、列車が集中すると、デッドロックが発生する可能性が2箇所あることを確認した。

4.1.2項で述べた渡り線を含む線路のデッドロック検知を実施した。本ケーススタディでは、図8のように、渡り線が含まれるゾーン2～ゾーン4までの3ゾーンの全タイムスロットを占有するには、 $12 \times 3 = 36$ 本の列車を必要とするが、前提条件より、最大同時在線列車本数は25本である。すなわち、渡り線を含む線路のデッドロック検知箇所はなく、表4の基準を満たすことを確認した。

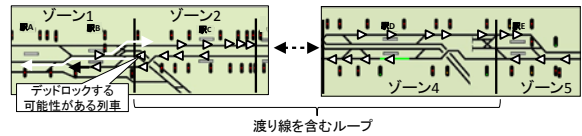


図8 ゾーン2～ゾーン4の配線図⁶⁾

5.2.3 指標Ⅳ：列車運行の評価

平常時だけでなく、あるゾーンに列車が集中するような状況において、無線通信ネットワークに起因する列車遅延が発生するかどうかを評価した。そのため、表3のような列車運行乱れと機器故障を想定し、列車運行乱れと機器故障があり/なしの4パターンの評価シナリオを設定し、無線式列車制御用通信・運行シミュレータを活用して、試行を繰り返した。その結果、タイムスロット不足に起因する列車遅延は発生しなかった。従って、表4の基準を満たすことを確認した。

表3 列車運行の評価シナリオ⁶⁾

想定	具体的な状況	対応方法
列車運行乱れ	最も列車本数が多い朝ラッシュ1時間あたり、ある1つのゾーンに多くの列車が在線するだんご運転を想定した支障を設定	支障が発生した5分後に、在線中の全列車を最寄り駅に抑止させる運転整理手配を実施
機器故障	1日中、ある無線基地局が使用できない	延長ハンドオーバーを実施し、隣接基地局で故障したゾーンの担当範囲を半分ずつ受け持つ

5.2.4 指標Ⅴ：伝送遅延の評価

伝送遅延を評価するため、無線式列車制御用通信・運行シミュレータを用いて、ネットワークの伝送遅延を推定し、RTTを計算した。設定した通信ネットワーク設計を図9に示す。機器の性能は、JRTCの規格で定められている値を設定した。FLRは、指標Ⅰでの最悪値1.0

特集：輸送・交通計画技術

× 10⁻³を設定し、列車運行は平常時を想定した。その結果、RTTは0.4～1.2秒(図10)となり、表4の基準を満たした。

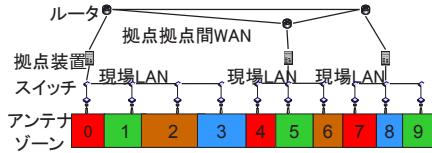


図9 通信ネットワーク設計⁶⁾

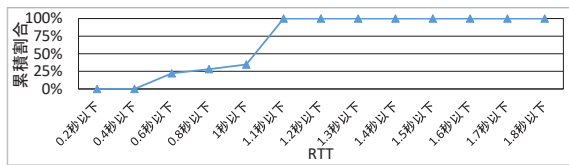


図10 RTTの累積割合⁷⁾

5.2.5 ケーススタディ結果のまとめ

本節の試行結果を表4にまとめる。無線通信品質基準を満たす無線基地局数は10局であり、この設計においては、他の全ての基準も満たすことができた。従って、最も基地局数が少ない無線通信ネットワーク設計は、10局と考えられる。

表4 評価指標の基準と評価結果⁷⁾
(下線部は基準を満たさなかった指標)

		指標Ⅰ	指標Ⅱ	指標Ⅳ	指標Ⅴ
基準		FLR <1.0 × 10 ⁻³	渡り線での 検知なし	遅延 なし	RTT <3.0 秒
評価 結果	8 局	<u>FLR</u> <1.5 × 10 ⁻³	—	—	—
	9 局	<u>FLR</u> <5.0 × 10 ⁻²	—	—	—
	10 局	FLR <1.0 × 10 ⁻³	渡り線での 検知なし	遅延 なし	RTT <1.2 秒

6. おわりに

本研究では、無線を含む通信ネットワークを模擬し、列車運行を推定する「無線式列車制御用通信・運行シミュレータ」を開発した。また、無線式列車制御システムの導入に起因するデッドロックを検知する手法を構築した。そして、これらを活用し、基準を満たした上で、最も基地局数が少ない設計を提案するための無線通信ネットワーク設計フローを構築した。更に、実規模データに

よるケーススタディを実施し、本手法の活用例を示した。

なお、本シミュレータは、日本で開発・導入されているJR-TC型の無線式列車制御システムを主たる対象として開発したが、カスタマイズすることで、海外で導入されている2.45G帯や5G帯を利用したCBTCにも、応用が可能である。今後は、本成果を活用し、無線式列車制御システム導入時の無線通信ネットワーク設計を支援していく。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、多くのご支援を賜りました東日本旅客鉄道株式会社殿、西日本旅客鉄道株式会社殿に、心より感謝申し上げます。

文 献

- 1) 今野信三：無線式列車制御の導入，電気学会誌，Vol.130，No.8，2010
- 2) 川崎邦弘・菅原宏之・立石幸也・服部鉄範：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，電気学会論文誌D，Vol.135，No.4，pp.420-425，2015
- 3) 菅原宏之・北野隆康・川崎邦弘：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，鉄道総研報告，Vol.28，No.11，pp.31-36，2014
- 4) 武内陽子・川崎邦弘・菅原宏之：無線式列車制御システム設計のための連成シミュレーション，電気学会，交通・電気鉄道／リニアドライブ合同研究会，TER-16-063／LD-16-056，2016
- 5) 武内陽子・川崎邦弘：シミュレータを活用した無線式列車制御システム設計のための評価フロー，J-Rail2016，2016
- 6) 武内陽子・川崎邦弘・杉山陽一・坂口隆，無線式列車制御用通信・運行シミュレータの開発とシステム設計フロー，電気学会，交通・電気鉄道研究会，TER-18-059，2018
- 7) 無線式列車制御システム評価のための列車運行シミュレーション
<https://bunken.rtri.or.jp/PDF/cdroms1/0040/2018/0040002737.pdf>，第321回鉄道総研月例発表会，2018
(参照日：2018年9月9日)
- 8) 武内陽子・坂口隆・熊澤一将・國松武俊，佐藤圭介：運転曲線レベルで再現可能な列車運行シミュレーション，鉄道総研報告，Vol.28，No.4，pp.41-46，2014
- 9) 松原康博・武内陽子・川崎邦弘：OR学会誌無線式ATCにおける合理的なシステム設計のためのアルゴリズム，オペレーションズ・リサーチ第63巻，第11号，2018