

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

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

近年、ICT (Information and Communication Technology) の利活用が促進されており、鉄道でも、無線を活用した列車制御システム(無線式列車制御システム)がすでに実用化されています。無線式列車制御システムを導入するためには、円滑な列車運行が可能となるよう、無線基地局、通信ネットワークなどを適切に設定することが必要です。そのため、無線通信状況、通信ネットワーク性能、列車運行を模擬するシミュレーターを開発しています。ここでは、シミュレーターの概要と、平常時や遅延が起こった場合を想定した試算結果を紹介します。



武内 陽子
Yoko Takeuchi
信号・情報技術研究部
運転システム研究室
主任研究員
【専門分野】 列車運行シミュレーション、運行実績分析



川崎 邦弘
Kunihiko Kawasaki
信号・情報技術研究部
ネットワーク・通信研究室
室長
【専門分野】 対列車通信システム、電波環境

無線式列車制御システムとは

安全な列車運行サービスを提供するため、鉄道では、列車同士が衝突しないための仕組みを導入しています。たとえば、線路を「閉そく」と呼ばれる区間で区切り、1つの閉そくには、1本の列車しか入れないようにすれば、列車間の距離を保つことができます(図1)。このような方法を「固定閉そく式」と呼びます。固定閉そく式を実現する方法のうちの1つとして、区切りの境界に信号機を建て、信号機の色で、前方の列車がどれくらい先の閉そくに在線しているかを表す方式があります。図1では、列車が在線している閉そくのすぐ手前の信号機は「赤」を表示し、1つ先の閉そくに列車が在線している信号機は「黄」を表示しています。黄信号を確認した運転士は、制

限速度を守って運転し、赤信号を確認した運転士は、その信号機の手前に停まるように運転します。

図1の方式では、地上に多くの設備が必要となり、建設とメンテナンスに、大きな費用がかかります。また、閉そくを短くすることにより、列車間隔を詰めることは可能ですが、詰められる列車間隔には限界があります。

一方、近年、ICTの利活用が促進されており、鉄道でも、無線式列車制御システムがすでに実用化されています¹⁾。一般的な無線式列車制御システムの構成イメージを図2に示します。地上には、複数の無線基地局と列車を制御する地上制御装置が配置され、通信ネットワークでつながっています。各無線基地局が担当する範囲(「ゾーン」と呼びます)が、あらかじめ設定

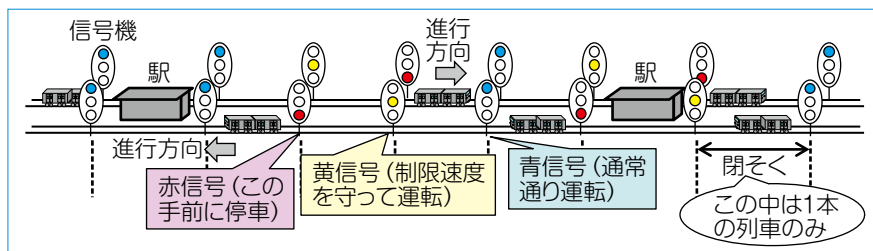


図1 閉そくと地上信号固定閉そく式

されており、各無線基地局は、ゾーン内に在線する列車と無線で通信をします。各列車は、自分の在線位置情報を送信し、地上制御装置は、各列車の停止限界位置（どこまで進めるかという進行可能位置）を計算して、列車へ送信します。

無線式列車制御システムを導入することにより、信号機の位置で閉そくが固定的に決まることはなくなり、先行列車と後続列車の速度と位置に従って、連続的に列車の間隔を制御する仕組みを実現できます。この仕組みのメリットは、短い列車間隔での運行が可能なことや、ダイヤ乱れからの回復が早いことなどです。さらに、信号機や軌道回路など地上設備が削減できるので、列車運行の柔軟性が向上することなども期待されます。そのため、今後は、無線式列車制御システムの導入が拡大していくと考えられます。

無線基地局の配置

図2に示すような構成の無線式列車制御システムの設計において、無線基地局の配置、ゾーン、無線チャネル(☞参照)の設定は、重要な手順のうちの1つです。

無線通信の制約上、1つの無線基地局が同時に通信できる列車本数には、上限があります。ある時刻において、ゾーン内に在線している列車本数が、上限値と等しい場合には、後続の列車は、当該ゾーンに進入することができず、ゾーンの手前で停止します(図3(1))。このような状況が発生すると、列車が遅延してしまいます。

一方で、列車密度が高い線区であっても、単純にたくさんの無線基地局を配置すればよいというわけでもありません。使用できる無線チャネルの数には限りがあり、同じ無線チャネルの無線基地局が近接する場合には、電

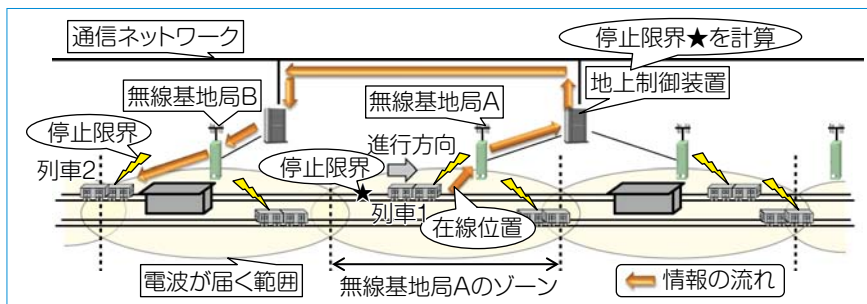


図2 一般的な無線式列車制御システムの構成イメージ

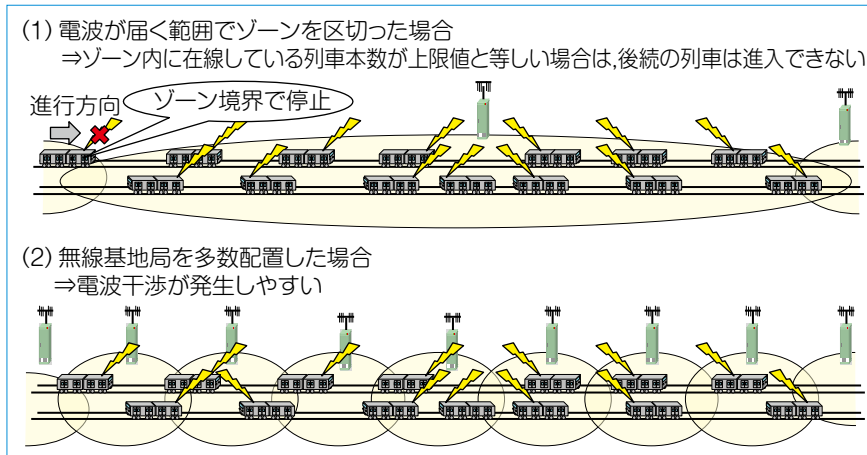


図3 無線基地局とゾーン設定の例²⁾

波干渉が発生して無線通信が正常に行えなくなる可能性があるためです(図3(2))。無線通信に異常が発生した場合は、安全のため、列車を停止させますので、列車が遅延してしまいます。そこで、各無線基地局が送信した電波が相互に干渉しないよう、適切な距離を保ったゾーン設定も重要です。

このように、無線基地局の配置は、単に電波が届く範囲だけを考慮すればよい、というものではなく、列車の密度や運転の仕方も考慮して設計することが重要です。

通信ネットワークの設定

無線基地局をつなぐ通信ネットワークの設定も、無線式列車制御システムにとって重要です。たとえば、図2の列車2が先行列車である列車1に衝突しないための停止限界位置情報(図2★)は、列車1の走行にともなって更新されながら、列車2に送信されています。この停止限界位置情報は、列車1から無線基地局Aを経由して送

信される在線位置情報をもとに、地上制御装置が計算します。計算結果は、通信ネットワークを経由して、無線基地局Bから列車2に送信されます。

このほかにも、列車の走行にともなって、ゾーン境界で無線基地局を切り替えて通信を継続させるための情報のやりとりなど、列車運行に必要なさまざまな通信が発生しており、列車本数が増えれば増えるほど、通信の量も増加します。情報を送信してから、受信が完了するまでにかかる時間を「伝送遅延時間」と呼びます。通信ネットワークの構成や使用される伝送手順(プロトコル)によっては、通信量が増えると伝送遅延時間が大きくなる場合があります。列車の安全運行に支障

☞ 無線チャネル

無線通信のために使用する周波数を意味します。無線基地局と列車の間でデータを送受信するためには、無線基地局に設定されている無線チャネルに列車側で切り替えていきます。

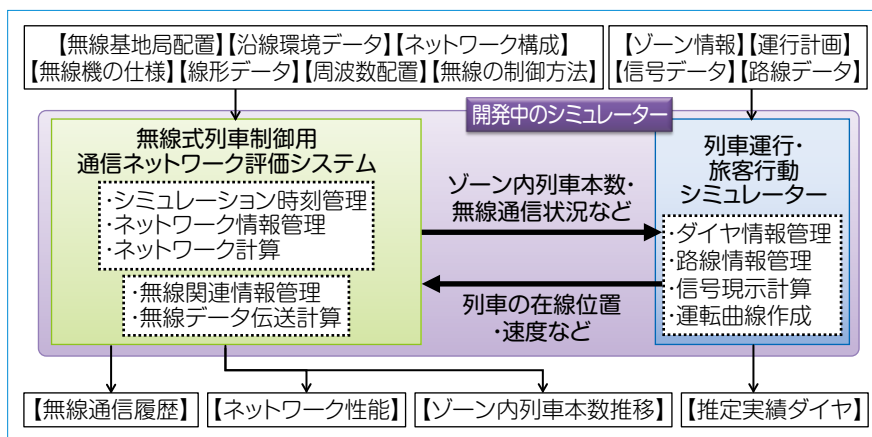


図4 シミュレーターの構成²⁾

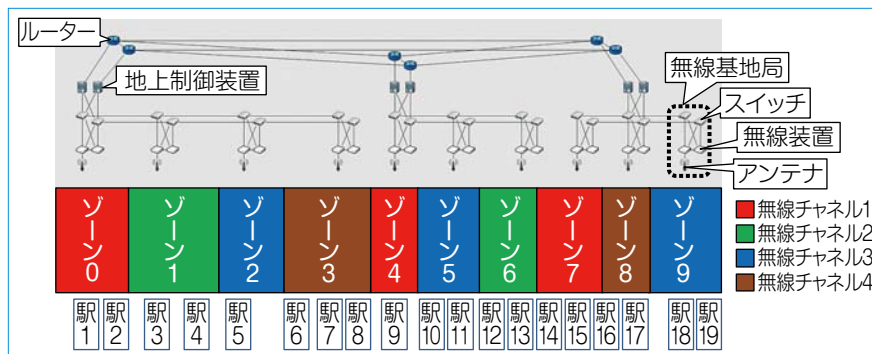


図5 無線基地局、ゾーン、無線チャンネル、通信ネットワーク構成²⁾

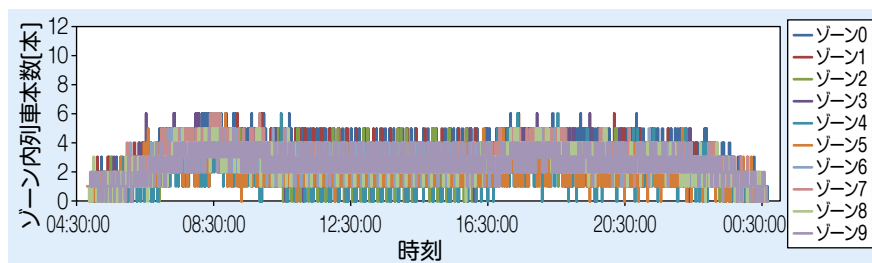


図6 ①平常時の結果²⁾

するほど伝送遅延時間が大きくなった場合には列車を停止させますので、伝送遅延時間が許容できる範囲内になるよう、通信ネットワークを設計することも重要です。

シミュレーターの開発

基地局配置や通信ネットワーク設定を支援するため、無線通信状況、通信ネットワーク性能、列車運行を模擬するシミュレーターを開発しています。開発したシミュレーターを活用して、平常時だけでなく、遅延が起こった場合、機器故障が発生した場合など、さまざまな状況を想定したシミュレ

ーションを実施し、設定したシステムでスムーズな運行が確保できるかどうかを検証可能とし、システムの仕様検討段階などで活用することを目標としています。

シミュレーターの構成を図4に示します。具体的には、既存の2つのプログラムを活用して、連成シミュレーターを開発しています。1つめは「無

線式列車制御用通信ネットワーク評価システム³⁾、もう1つは「列車運行・旅客行動シミュレーター⁴⁾」(☞参照)です。列車運行・旅客行動シミュレーターで計算する各列車の各時刻での在線位置をもとにして、無線式列車制御用通信ネットワーク評価システムで、無線通信状況や通信ネットワーク性能を評価します。また、無線式列車制御用通信ネットワーク評価システムで計算した各ゾーン内の列車本数や、無線通信状況をもとに、列車運行・旅客行動シミュレーターでは、各列車の駅間での走行を計算します。

シミュレーション結果例の紹介

開発中のシミュレーターを用いて、実規模のサンプル線区に対して、無線式列車制御システムを導入することを想定した試算結果を紹介します。まず、無線基地局の配置やゾーンなどを、無線通信品質が許容範囲となるように設定し、無線基地局を10局、使用する無線チャンネルを4つとしました。つぎに、無線基地局同士をつなぐ通信ネットワークを設定し、列車を制御する装置は3カ所、通信ネットワークは2重系構成、1つの無線基地局あたりの列車本数の上限値は12本としました。無線基地局、ゾーン、無線チャンネル、通信ネットワーク構成を図5に示します。そのうえで、①平常時、②だんご運転が発生した場合、③だんご運転発生時に駅間に列車を停車させないような手配を実施した場合の、3パターンのシミュレーションを実施しました。そして、各ゾーン内の列車本数の時間的

☞ 列車運行・旅客行動シミュレーター

数十駅、数十万人程度の旅客数を想定した実規模の路線を対象とし、列車運行と旅客行動を推定します。自動改札機で取得されるICカードなどの旅客データ、列車ダイヤデータを入力とし、旅客行動履歴、各列車の在線位置・速度の時間的推移、各列車の各駅での着発時刻などを出力します。

推移を計算し、列車本数の上限値と比較しました。

①平常時

列車遅延を発生させない場合のシミュレーション結果から計算した各ゾーン内の列車本数の推移を図6に示します。朝ラッシュ時でも最大で6本の在線となっており、平常時には、一定の余裕があることが確認できます。

②だんご運転の場合

無線式列車制御システムにおいて、過酷な状況とは、ある1つのゾーンに多くの列車が集中するような、だんご運転状態です。そこで、図7のような状況を仮定し、ゾーン0がだんご運転となるような想定をしました。列車運行推定結果、ゾーン内の列車本数の推移を図8に示します。たとえば、ゾーン0では、運転見合わせから20分ほどで、在線可能な列車本数の上限値まで到達しており、ゾーン0に進入できずに停車する列車が発生してしまっています。

③だんご運転時に駅間に列車を停車させない手配を実施した場合

②は、無線式列車制御システムにおける過酷状況であるものの、駅間に多数の列車が停車しており、旅客利便性の観点からも、現実的ではありません。そこで、運転見合わせ中は、列車を駅に停車させたままにして出発させず、駅間で停車したままの列車が極力少なくなるような手配⁵⁾を想定しました。列車運行推定結果、ゾーン内の列車本数の推移を図9に示します。運転再開から30分ほどで、最大で10本の列車がゾーン内に在線していますが、上限値を超えることはありませんでした。

以上により、だんご運転となっても、駅に列車を停車させたままにするような手配を実施すれば、ゾーン内の列車本数の上限を越えることなく、列車運行を維持することができるという見込みが立ちました。

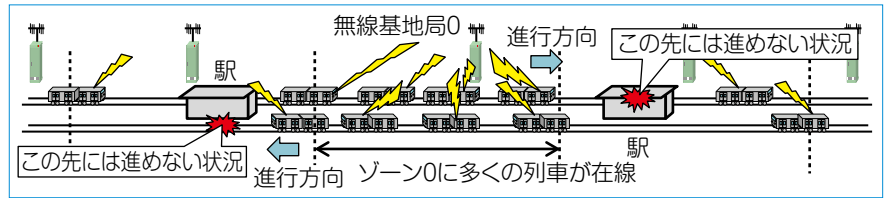


図7 だんご運転²⁾

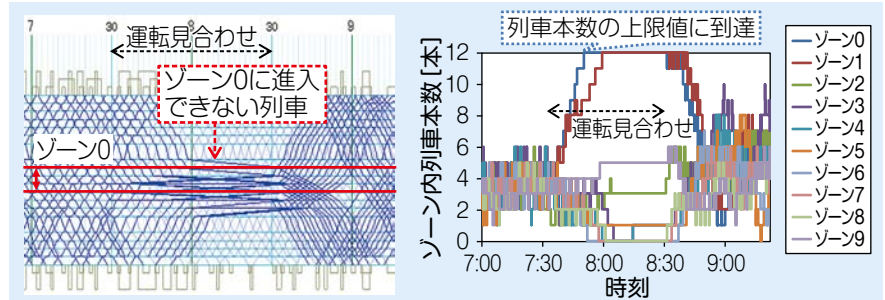


図8 ②だんご運転の場合の結果

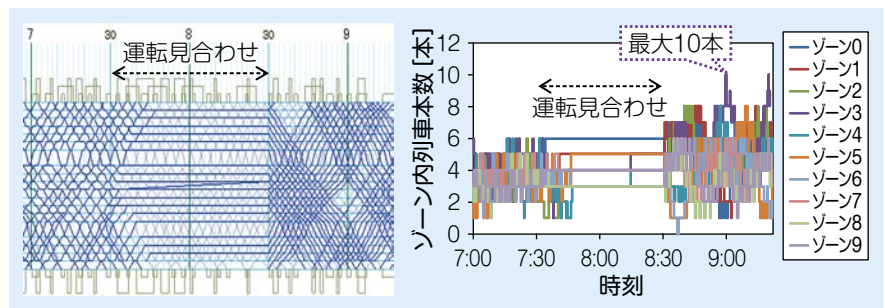


図9 ③駅間に列車を停車させない手配を実施した場合の結果

おわりに

無線基地局配置や通信ネットワーク設定などの無線式列車制御システム設計を支援するため、無線通信状況、通信ネットワーク性能、列車運行を模擬するシミュレーターを開発しています。

今回は3パターンの試算結果を紹介しましたが、スムーズな運行が確保できるかどうかを検証するためには、

もっとさまざまな想定でのシミュレーションを実施する必要があります。今後は、どのような想定が必要かをさらに検討し、無線式列車制御システム設計を支援する枠組みを提案することを目指します。

本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施しました。**RRR**

文献

- 1) 北野隆康：無線を用いた列車制御，RRR，Vol.73，No.4，pp.28-31，2016
- 2) 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，電気学会リニアドライブ/交通・電気鉄道合同研究会，LD-16-063/TER16-056，pp.101-106，2016
- 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，坂口崇，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
- 5) 平井力，國松武俊，近藤繁樹，富井規雄，高場基司：列車抑止計画作成アルゴリズムの開発，鉄道総研報告，Vol.22，No.6，2008