

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

松原 康博, 武内 陽子, 川崎 邦弘

鉄道事業者としての最重要事項は安全性の確保であり、西日本旅客鉄道株式会社もこれを確保する活動を最優先に行っている。また、安全性を確保したうえで、高品質な輸送サービスを、適正なコストで提供する活動も実施している。本稿では、無線技術を活用して、列車と地上設備との通信を確保する新しい信号保安システム「無線式 ATC」を導入するにあたり、合理的、すなわち、適正なコストでのシステム設計を目指すためのアルゴリズムについて述べ、ケーススタディ結果を紹介する。また、無線式 ATC を前提とした場合の、将来の鉄道の利便性向上や省エネのための最適化問題への展開について述べる。

キーワード：鉄道，列車運行，無線式 ATC，シミュレーション，システム設計

1. はじめに

鉄道事業者としての最重要事項は安全性の確保であり、西日本旅客鉄道株式会社もこれを確保する活動を最優先に行っている。また、安全性を確保したうえで、高品質な輸送サービスを、適正なコストで提供する活動も実施している。

鉄道事業において安全性を確保する取り組みは各種ある中で、本稿では無線技術を活用して、列車と地上設備との通信を確保する新しい鉄道の信号保安システム「無線式 ATC」について、求められる輸送サービス品質を満たしたうえで、いかに合理的な設計（＝適正なコスト）で導入を目指したかについて紹介する。

構成としては、鉄道の信号保安システムの考え方、無線式 ATC の概要について触れ、この無線式 ATC を導入するにあたって検討した事柄について述べる。さらに、この無線式 ATC という枠組みの中で将来取り組みたいことについて言及したい。

2. 鉄道の信号保安システムの基本的な考え方

鉄道の安全性を確保するために、鉄道には信号保安システムが導入されている [1]。鉄道信号は「鉄道において、列車、車両を防護し、運行の安全確保を図るために、鉄道線路の一定区域に、列車、車両などが進入することの是非、速度などの条件を知らせるとともに、

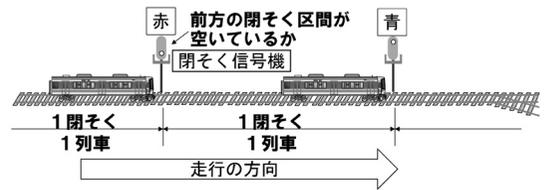


図 1 閉そくの考え方

さらに積極的に輸送能率の向上を目指すために設けられる信号」¹と定義されている。

鉄道には、大量輸送やダイヤ上の利便性が求められており、一つの線路に複数の列車が走行するようになると、その衝突のリスクが発生したり、駅において番線を振り分けたり、行き先を選ぶような必要性が生じたため、以下の閉そくや進路制御の技術が発展したと考えられる。

2.1 閉そく

安全に一つの線路に複数の列車を走行させるために、閉そくという考え方がある。これは、列車間の衝突・追突を防ぐため、線路をある区間ごとに区切って、一つの区間に一つの列車しか入れないようにすることで、安全を確保するものである。

図 1 の例では、左の列車から見てすぐ前の閉そく区間に列車がいれば停止現示（赤信号）となり、進入することができないため、列車間の衝突・追突を防ぐことができる。

2.2 進路制御

安全に進路を確保するために進路制御という考え方

まつばら やすひろ
西日本旅客鉄道株式会社
〒 530-8341 大阪府大阪市北区芝田 2-4-24
たけうち ようこ、かわさき くにひろ
公益財団法人鉄道総合技術研究所
〒 185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38

¹ 日本大百科全書（ニッポニカ）の解説より抜粋

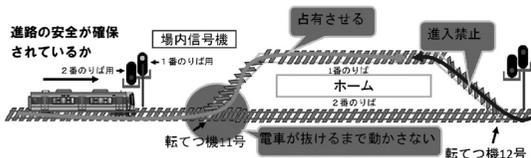


図2 進路制御の考え方

がある。これは、駅などの停車場構内での脱線・衝突を防ぐため、自列車の進行できる線路（進路）を確保し、他列車があとからその進路を支障することのないようにするものである。

図2の例では、列車は1番のりばまでの線路（進路）を確保し、転てつ機11号を左方向に固定することにより、他列車が後からその進路を支障することのないようにする。この列車が信号機の内方（図2では「場内信号機」の右側）に進入すると、1番のりば用の信号機は停止現示（赤信号）となり1番のりばまで列車が到着すると、初めて転てつ機11号の固定は解除される。その結果、たとえばこの列車に衝突しない2番のりばへの進路を確保することが可能になる（反対方向については進入禁止となる）。このようにして脱線・衝突を防いでいる。

3. 無線式 ATC について

ここでは、信号保安システムの一つである ATC の概要について述べ、次に無線式 ATC の概要について述べる。

3.1 ATC の概要

ATC (Automatic Train Control: 自動列車制御装置) は、先行列車との間隔および進路の条件に応じて、レールに列車の許容運転速度を示す信号を送信し、それを車上で検知する。車内では列車の許容運転速度を示す信号を現示し、その信号の現示に従って、列車の速度を自動作用により低下させる機能をもった装置である。

このシステムはさまざまな機能をもつが、一般的に導入されている軌道回路式 ATC は、列車を検知する仕組みや列車に情報を送るための仕組みに多くの機器や情報伝送のためのケーブルが必要となる。

3.2 無線式 ATC の概要

無線式 ATC は、位置検知を列車で行うことや情報伝送を無線で行うため、多くの機器やケーブルが不要となる。

このように無線式 ATC は、地上保安設備の簡素化によるコスト削減などの利点がある。

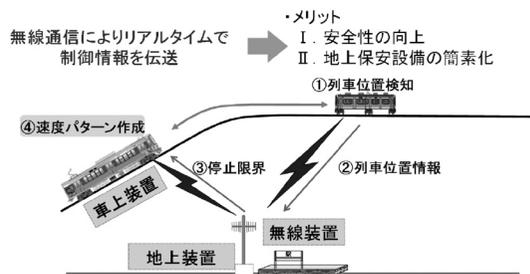


図3 無線式 ATC の概要 [2]

周波数, 変調方式, 伝送速度
・周波数 : 300MHz 帯
・変調方式 : π/4シフトQPSK
・伝送速度 : 9600bps
多重化方式
・TDMA/FDD (時分割多重アクセス、周波数分割双方向通信)
ゾーン構成
・1基地局当たりのゾーン半径: 1~1.5km
・1線区内で、列車→地上・地上→列車それぞれ4波を繰り返し使用
ハンドオーバ
・ゾーン境界で基地局を切り替え (ハンドオーバ点は固定)
誤り訂正方式
・リードソロモン符号

図4 無線通信の諸元および仕様

3.2.1 無線式 ATC のシステム構成と動作概要

無線式 ATC のシステムは、大きく地上装置・無線装置・車上装置からなり、地上のネットワークは IP ネットワークで構成される。地上～車上間の列車を制御するための情報の授受には無線通信を用いる（図3）。無線式 ATC の動作概要を示す [2]。

- ①それぞれの列車が自列車位置を検知する。
- ②検知した位置情報を列車位置情報として無線を使って地上に送信する。
- ③地上では、進路の開通状況と受信した列車位置情報をもとに停止限界を計算して、無線を使って各列車に伝える。
- ④各列車はこの停止限界やあらかじめ搭載しているデータベースをもとに速度パターンを作成し、列車を制御する。

3.2.2 無線式 ATC での電波の諸元・仕様について

無線式 ATC では、300 MHz 帯の専用周波数による無線を利用している。無線機の主な仕様を図4に示す。本システムでは、多数の列車を制御しながらも、電波の干渉を防ぎながら電波を有効利用するために、時分割多重 (TDM) と周波数繰り返しとしている（図5）。960 ms を一周期として、地上から車上では、16 個のタ

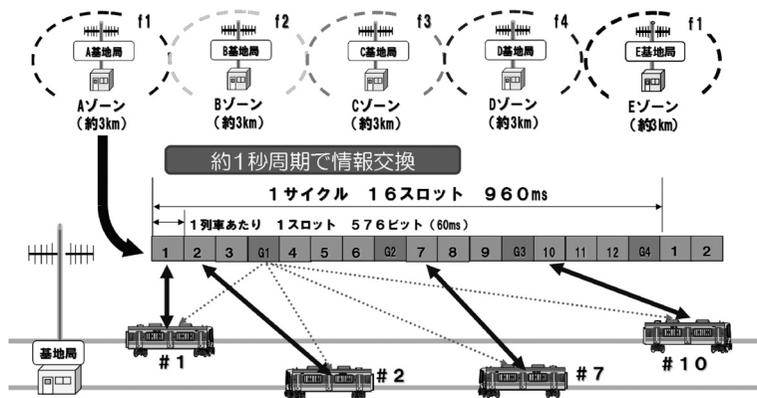


図5 電波の利用方法

ムスロット (以下、「スロット」と呼ぶ) に分割 (1 スロットは 60 ms) し、このうち 12 スロットを個別の列車制御に割当て、4 スロットを同報通信 (G1~G4) に割当てている。また、車上から地上では 12 分割 (1 スロットは 80 ms) としている。このため 1 ゾーンで制御可能な列車は 12 列車となり、これを基本的に 4 周波繰り返しとして列車を制御している。

なお、列車のハンドオーバは、あらかじめデータベースに定められた位置で基地局を切り替える。また、次のゾーンの約 1 km 手前で、次ゾーンのスロット確保を行う。この地点をハンドオーバ準備点と呼んでいる。ここで、次ゾーンのスロット 12 個すべて予約・使用中であると、この列車は、ハンドオーバ点手前で停止することとなり、スロットが割当てられるまで、次ゾーンに進入することができない。

4. 無線式 ATC の設計における評価項目 (目的関数) と制約

無線式 ATC の設計にあたって考慮すべき事項として、一般的なシステム設計の課題と新しいシステム設計の課題がある。一般的なシステム設計の課題としては、求められる性能に対して過大なマージンを見て、設備が過剰となる可能性がある。さらに、新しいシステムにおける課題としては、4.2 節で後述するような、従来にない制約の存在がある。

そこで、本稿の目的である合理的なシステム設計を達成するために、まずは評価項目 (目的関数) を定め、さらにそれを実現するうえでの制約を示す。

4.1 目的関数

本稿での無線式 ATC の合理的な設計とは、無線式 ATC の利点を活かす観点から、低コストで保守が容易であるような設計と定義する。このように考えると、

具体的に達成すべき評価項目 (目的関数) は、「最小の基地局数」を満たすシステム設計となる。

4.2 本システムの設計における制約

前節の評価項目を達成するうえでの制約を述べる。

4.2.1 無線通信の安定性

信号保安システムでは、現在の状況が把握できない場合、速やかに安全側に制御することが求められる。そのため、本システムでも無線通信が 3 周期不通になった際に、列車を停止制御とすることとしている。なお、図 5 に示すように 1 サイクルは 960 ms であるため、約 3 秒間の不達が列車を停止制御する条件となる。

このように、このシステムでは、安定した無線通信を実現しなければならないが、これが想定したシステム設計 (システム構成や無線基地局配置) で成り立っているかどうかの検証が必要となる。

4.2.2 地上ネットワークの安定性

無線式 ATC では、地上ネットワークは IP ネットワークからなる。従来の信号保安システムでは独自プロトコルによる通信が主流であったが、これが高コストの一因となっていた。そこで、現在、そして将来にも標準であることが期待される汎用プロトコルである IP を用いたネットワークを採用した。

しかしながら、IP ネットワークでは、従来の独自プロトコルのように、伝送遅延を発生させないことや消失の検知 (十分長い伝送遅延を消失と考えるもよい) が難しい。システムが許容できる範囲を超える情報の遅延・不達は、列車の停止制御につながり、無線通信と同様に、お客様へのサービスの提供という観点からは、これを許容できない。

そこで、事前に伝送遅延の原因となる通信ネットワーク機器や通信線路での遅延をシミュレートして、システムの許容値内に入ることの確認が必要になる。

4.2.3 制御列車数の上限

無線式 ATC のような信号保安システムにおいては、専有的にシステムをコントロールできることは重要であるため、無線免許の必要な専用周波数を用いている。

ただし、これは狭帯域（帯域幅が狭い）デジタル無線を採用しているため、3.2.2 節で述べたとおり、制御できる列車が 12 列車までという上限がある。

このため、現状のダイヤや、ダイヤ乱れ時に、この制御できる本数の上限により列車遅延が生じないように、無線基地局を配置することが必要となる。

4.2.4 デッドロックの発生

各閉そくにおいて、いつ、どの列車がどの向きで走行するかスケジュールは、列車ダイヤに応じて決まっている。この閉そく使用スケジュールと列車ダイヤとに矛盾がある場合には、ある列車の進路をほかの列車がブロックしてしまうような状況が起こりえる。このように、列車が走行するために必要な進路などのリソースが競合して、列車走行ができなくなる状況を、「デッドロック」と呼ぶ。

3.2.2 節とも関係して、無線式 ATC では、列車が走行するためにはスロットを必要とすることから、スロットも列車運行に必要なリソースとなる。スロットが割当たらないうちに起因するデッドロックも発生することがある。

デッドロックの例を図 6 に示す。列車①は、ゾーン 2 の空き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 6 では、現在のスロット割当てが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。

デッドロックが発生すると、現在のスロット割当てを開放し、スロットを再割当てするか、列車順序を変更する必要がある。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。たとえば、設計段階においては、デッドロックになる条件、デッドロック発生可能性の検知方法などを検討する必要がある。無線式 ATC の運用段階においては、デッドロックが発生した場合にどのようなアル

ゴリズムでスロットを再割当てするか、その結果、列車運行がどのように収束していくかなどを検討する必要がある。

5. 最適解の考え方とアルゴリズム

4 節で述べた制約と目的関数を考慮したシステム設計を、数理最適化問題の形で定式化することは困難であった。なぜならば、無線通信品質、地上ネットワークの伝送遅延、スロット割当ては、列車運行状況と相互に影響を及ぼし合う現象だからである。

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」を活用する。シミュレータの詳細については、5.4 節で後述する。

無線式列車制御用通信・運行シミュレータは、列車ダイヤや当該線区の条件を考慮し、無線通信と列車運行とを可能な限り忠実に模擬するための有効な手段ではあるが、さまざまな入力データを作成する必要がある。一方で、シミュレーションをしなくとも、無線基地局配置などをもとに、各ゾーンに在線可能な最大列車本数は、机上検討で求めることもできる。

また、システムの安定稼働のため、これらの制約を満たす基準値をどのように設定するかは、導入線区の運行管理装置²がどのような機能をもっているかにも依存する。

したがって、シミュレーションと机上検討とを組み合わせ、制約を満たすかどうかを評価・検討する手法を構築した。あるシステム設計に対して、制約を満たしているかを一つずつ確かめ、満たしていない場合にはシステム設計を修正しながら、解を探索するアプローチを採用した。

以下、評価検討手法（5.1～5.5 節）、および、探索アプローチとして提案するシステム設計フロー（5.6 節）について述べる。

5.1 無線通信品質基準を満たす無線設計

無線通信品質を評価するためには、鉄道特有の電波伝搬や干渉・雑音などを考慮し、列車を模擬的に繰り返し走行させ、ビット誤り率 (BER) や、データを伝送している過程でフレーム (= 電文) が消失する確率であるフレームロス率 (FLR) などの伝送品質を計算する必要がある。そのため、無線データ伝送回線シミュレータ「RADTRACE」を活用した [3, 4]。

² システムに設定された列車運行計画をもとに、進路や分岐器や信号を自動的に制御するシステム。

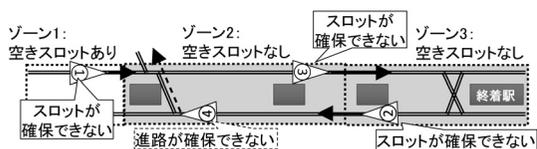


図6 デッドロックの例 [6]

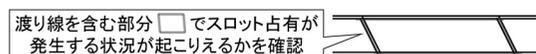


図7 デッドロックの発生可能性の検討 [6]

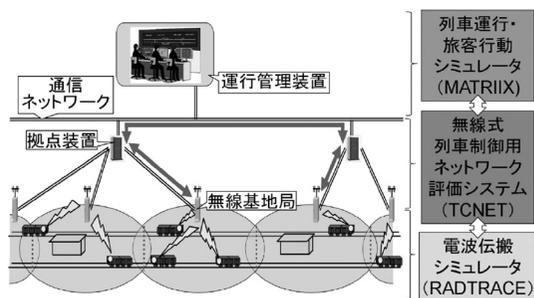


図8 無線式列車制御用通信・運行シミュレータ [6]

5.2 デッドロックの発生可能性評価

4.2.4 節の制約のために、無線基地局配置をもとに、デッドロックの発生可能性を机上検討した [5]。図 6 で説明したように、スロットが割当たらなことに起因するデッドロックは、先に進路を確保する列車がスロット不足によって進行できず、後から進路を確保する列車をブロックする状況である。このような状況が起こりえるかを確認するためには、「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一つ、あるいは、連続したゾーンにおいて、スロット占有が発生する状況が起こりえるか (図 7)」を確認すればよい。

5.3 スロット不足発生可能性評価

無線基地局配置などをもとに、各ゾーンで、閉そく (相当) 数などから最大在線可能列車数の理論値を計算することができる [5]。この理論値が、12 列車以下であれば、どのような列車運行状況になったとしても、スロット不足は発生しない。

また、12 列車以上であっても、各ゾーンでスロット不足が発生しないようにするためには、どの程度の列車間隔を保てばよいかの目安がわかる指標となる。たとえば、運行管理装置で、二つの閉そくに 1 列車しか在線できないような列車間隔調整を実施するという前提が成り立つならば、最大在線可能列車数の理論値が 24 列車以下であれば、どのような列車運行状況になったとしても、スロット不足は発生しない。

5.4 シミュレーションによる列車運行評価

スロット不足による列車運行乱れの起こりやすさを評価するため、4.2.1 節、4.2.2 節、4.2.3 節の制約を考慮し、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」を活用した [5]。5.1 節で述べた RADTRACE と組み合わせることにより、無線式列車制御用通信・運行シミュレータを構築している。その構成を図 8 に示す。本シ

ミュレータにより、無線式 ATC における列車運行と無線通信品質と伝送遅延とを定量的に評価可能となった。また、平常時だけでなく、列車遅延時、および、無線基地局が故障して延長ハンドオーバー³を実施するときにおいても、システム設計が基準を満たすかどうかの評価も可能となった。

5.5 シミュレーションによる伝送遅延の評価

4.2.2 節で述べたように、IP ネットワークでは、伝送遅延を発生させないことや、電文消失の検知が難しい。

通信ネットワークを構成する機器 (ルータやハブなど) 数が少なく、スループットが高いほど、電文の最初のビット列が受信先に届くまでにかかる時間は短くなる。また、電文の最後のビット列が届くまでにかかる時間は、ネットワークの回線速度に依存する。したがって、無線通信品質を表す FLR、通信ネットワーク設計を考慮したうえで、伝送遅延が許容範囲となるかを確かめるために、無線式列車制御用通信・運行シミュレータを活用した。

伝送遅延が許容範囲を超える場合には、より伝送速度の速いネットワーク機器構成を設定して、再度、シミュレーションを実施する。

5.6 システム設計フロー

これらの評価検討手法を用いて、図 9 のシステム設計フローを提案した [5]。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。次に、最も無線基地局数が少なく、かつ、規格で定められている機器性能をもつネットワーク設計を、システム設計の初期解として、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、システム設計の修正が難しく、条件が厳しいと考えられる順番とした。このことで、基準を満たし、かつ、オーバースペックでないシステム設計を可能とした。

³ 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、ハンドオーバー準備点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。

表 1 指標に対する基準 [6]

	指標 I	指標 II	指標 III	指標 IV	指標 V
基準	$FLR < 1.0 \times 10^{-3}$	検知箇所なし	最大在線可能列車数 < 24 本	最大遅延 < 60 秒	$RTT^* < 3.0$ 秒

*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。

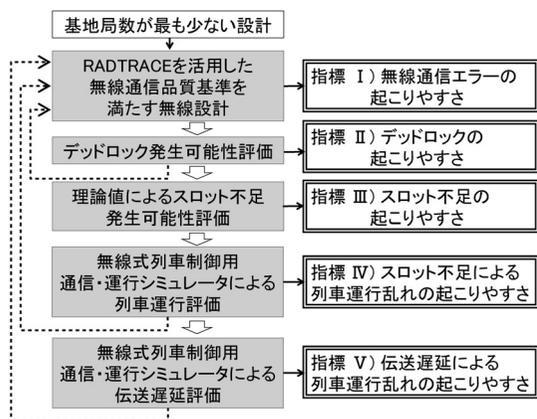


図 9 システム設計フロー [5]

6. ケーススタディ

図 9 のシステム設計フローを用いて、実路線を対象として、最も無線基地局数が少ない設計を求めた。列車本数は 741 本 / 1 日、最大同時在線列車本数は 25 本、駅数は 19 駅、路線長は約 22 km である。システム導入路線の特性を考慮して、図 9 の各指標に対する基準は、表 1 のとおり定めた。

6.1 無線通信品質基準を満たす無線設計

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 [3] の手法を用いて、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ながら、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 局とした結果、 $FLR < 1.5 \times 10^{-3}$ となり、表 1 の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 9 局に増やしたが、延長ハンドオーバを実施した場合には $FLR < 5.0 \times 10^{-2}$ となり、表 1 の基準を満たすことができなかった。そこで、10 局に増やし、表 1 の基準を満たす $FLR < 1.0 \times 10^{-3}$ となる無線基地局配置を見つけたため、このシステム設計を初期解とした。無線基地局配置と通信ネットワーク設計を図 10 に示す。

6.2 デッドロック発生可能性評価

渡り線を含むクローズした配線部分に着目し、スロット占有が可能なかどうかを確認した。ゾーン 2～ゾ

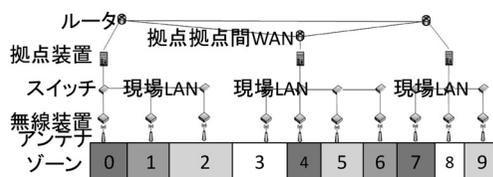


図 10 無線基地局配置と通信ネットワーク設計 [5]

ン 4 にかけて、クローズした配線が存在するが (図 11)、ゾーン 2～ゾーン 4 までの 3 ゾーン的全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。一方、対象線区での最大同時在線列車本数は 25 本であるため、渡り線を含む線路のデッドロック検知箇所はなく、表 1 の基準を満たすことを確認した。

6.3 スロット不足発生可能性評価

各無線基地局に対して、スロットを確保する範囲にある信号の数を数え、各ゾーンでの最大在線可能列車数の理論値を計算すると、22 本となり、表 1 の基準を満たすことを確認した。一方で、1 無線基地局当たりが制御できる列車本数の上限値 12 を超えるため、特別に列車間隔を制御するような運行管理装置を導入しない場合には、スロット不足が発生する可能性がある。そのためシミュレーションによる列車運行評価を実施した。

6.4 シミュレーションによる列車運行評価

スロット不足による列車遅延を定量的に評価するためには、無線式 ATC にとっての過酷状況を評価シナリオとして準備し、無線式列車制御用通信・運行シミュレータを活用した列車運行評価を実施する必要がある。そこで、外乱として、列車運行乱れと機器故障を設定した。また、評価シナリオとして、列車運行乱れと機器故障があり/なしの 4 パターンを設定した。無線式列車制御用運行シミュレータを活用して、試行を実施した結果、列車運行乱れは発生しなかった。したがって、表 1 の指標 IV である最大遅延 = 0 秒 < 60 秒であり、基準を満たすことを確認した。

6.5 シミュレーションによる伝送遅延の評価

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、FLR の最悪値と平常時の列車運行状況を想定してネットワークの伝送遅延を推定し、RTT を計算した。その結果、RTT は 0.5～1.1 秒 (図 12) となり、表 1 の指標 V である $RTT < 3.0$ 秒

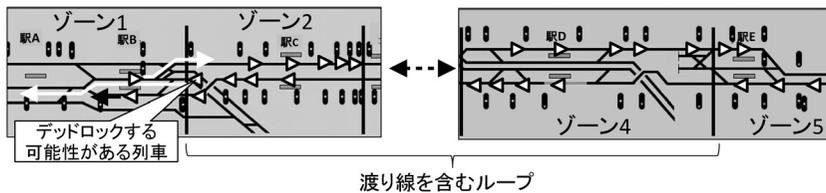


図 11 ゾーン 2～ゾーン 4 の配線図 [5]

表 2 ケーススタディ結果のまとめ [6]

	指標 I	指標 II	指標 III	指標 IV	指標 V
基準	$FLR < 1.0 \times 10^{-3}$	検知箇所なし	最大在線可能列車数 < 24 本	最大遅延 < 60 秒	RTT < 3.0 秒
8 局	$FLR < 1.5 \times 10^{-3}$	—	—	—	—
9 局	$FLR < 5.0 \times 10^{-2}$	—	—	—	—
10 局	$FLR < 1.0 \times 10^{-3}$	検知箇所なし	最大在線可能列車数 = 22 本	最大遅延 = 0 秒	RTT < 1.2 秒

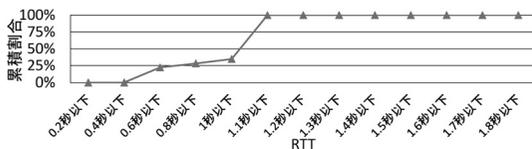


図 12 RTT の累積割合 [6]

を満たすことを確認した。仮に、本ケーススタディでこの基準を満たせなかった場合には、規格で定められた以上の機器性能をもつ通信ネットワークを設定し、再度、シミュレーションを実施する必要があったが、規格どおりの機器性能をもつ通信ネットワークで十分であることが確認できた。

6.6 ケーススタディ結果のまとめ

本節の試行結果を表 2 にまとめる。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、無線基地局数を 8 局から始めたが、指標 I の無線通信品質の基準を満たすことができたのは 10 局であった。この 10 局の設計は、指標 II～V も満たした。したがって、本試行においては、最小の無線基地局数は 10 局と考えられる。

7. 将来への展望

本節では、無線式 ATC 稼働後を見据えた検討内容のうち、オペレーションズ・リサーチに関わる事項について紹介する。

無線式 ATC では、列車がどこをどのような速度で走行しているか、この先どこまで走行可能かなど、従来は知得できなかった情報を得ることができる。また、線路のプロフィールなどの外的要因もデータベースとして有している。さらに、将来的なこととして、高速

大容量データ通信を仮定すれば、ほぼリアルタイムなデータのやり取りを想定でき、自動運転 (ATO) を仮定すれば、状況に応じて、時々刻々と運転操作を変えることも可能となる。

したがって、複数列車の運転状況を取得して相互に加減速のタイミングを調整するといった、列車群の柔軟な制御が可能という前提に立ち、「列車ダイヤを守る」「乗り心地を悪化させない (急な制動や加速がない)」ことを制約条件として、ある目的を設定して、その目的を最適化するような列車群制御アルゴリズムを構築することが可能ではないかと考えている。以下、いくつかの最適化対象を紹介する。

7.1 列車運行エネルギーの最小化

車などの他交通機関と比べると、鉄道はエコな乗り物であるが、省エネルギー対策は、今後、ますます重要となってくる。省エネルギー対策としては、省エネ車両や蓄電装置などの機器の導入、省エネ運転の取り組みなどが挙げられるが、無線式 ATC を前提とすれば、列車群制御による回生電力活用の最大化、および、蓄電装置の最適制御が検討できるのではないかと考えている。

7.1.1 列車群制御による回生電力活用の最大化

近年、ブレーキ時にモーターを発電機として動作させて発電することが可能な回生ブレーキを保有している車両が多く導入されている。ブレーキ時には、回生電力を電車線に返すが、その時刻に回生電力を使用するほかの列車が存在しない場合には、その回生電力は熱として逸散される。すなわち、回生電力が発生するタイミングで、後で加速操作 (「力行」と呼ぶ) する予定であったほかの列車のうち、先行して力行が可能な列車を探して、力行させることができれば、より多く

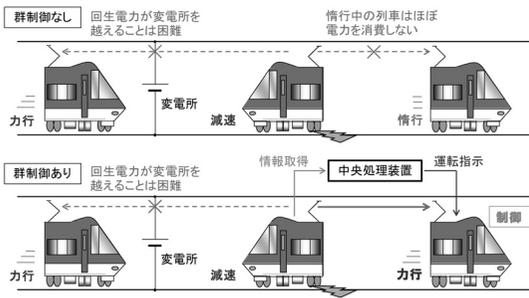


図 13 列車群制御による回生電力の活用

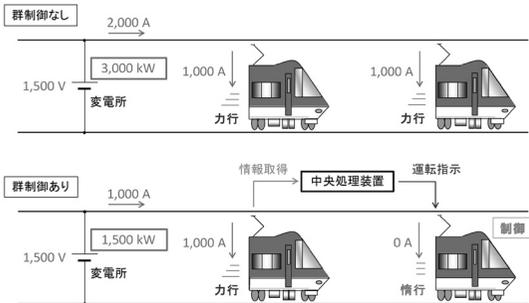


図 14 列車群制御によるピーク電力の抑制

の回生電力が活用できると考えられる (図 13)。

7.1.2 蓄電装置の最適制御

列車本数が少ない時刻では、列車群制御による回生電力活用ができない状況もある。そこで、地上に蓄電装置を設置し、列車群と蓄電装置とを協調させることで、さらなる省エネを行える可能性がある。

7.2 変電所のピーク電力の最小化

変電所の近くで複数の列車が同時に力行する場合の列車運行電力は非常に大きくなるため、そのピークを考慮して、変電所設備は設計されている。そこで、列車群制御を行い、複数列車の同時力行を、可能な限り防止することで、変電所のピーク電力を最小化することが可能ではないかと考えられる (図 14)。

7.3 遅延回復の最速化

車の運転をしているとき、次の信号が赤信号の場合、信号の近くで停車して待つよりも、ゆっくりした速度で

信号に近づき、青信号になった瞬間に加速したほうが、その信号を通過するまでの時間は短くてすむ。鉄道も同様で、列車遅延が発生してだんご運転状態になる場合、先行列車に近づきすぎて駅間に停車するよりも、ある程度の距離を保ちつつ、低い速度で走行していたほうが、最終的に次の駅まで早く到達できる可能性がある。

このように、列車遅延時には、先行列車の位置や速度の予測データを基に、より短い走行時間となるような運転操縦を実施することで、より迅速な遅延回復が可能になると考えられる。

8. まとめ

本稿では無線式 ATC という新しい鉄道保安システムを導入する際に、合理的、かつ、適正なコストでのシステム設計を目指した取り組みについて紹介した。無線式 ATC 特有の制約を考慮し、無線基地局数を最も少なくするため、システム設計を評価する指標を五つ提案し、システム設計フローを構築した。

無線式 ATC の導入により、地上保安設備の簡素化によるコスト削減だけでなく、さらなる利便性の向上や省エネへの応用へと繋がっていくよう、これからも検討を進めていきたい。そのために、本誌の読者の方々のお知恵をお借りできれば、大変幸いである。

参考文献

- [1] 日本鉄道電気技術協会, 『鉄道信号一般』, 改訂二版, 2014.
- [2] 森崇, 矢田部俊介, “鉄道のセキュリティと安全性—無線を活用した列車制御におけるセキュリティと安全—,” 情報処理, **57**, pp. 638–643, 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, **28**(11), pp. 31–37, 2014.
- [4] 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, **135**, pp. 420–425, 2015.
- [5] 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.
- [6] 武内陽子, “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,” 第 321 回鉄道総研月例発表会, <https://bunken.rtri.or.jp/PDF/cdroms1/0040/2018/0040002737.pdf> (2018 年 9 月 9 日閲覧)