# 鉄道技術の研究開発に対する私の考え方

## 武内 陽子

学生の頃、自分自身が努力をすれば、大抵のことはできると思っていた、そして、社会人になったら、経済的に 自立し、一生、仕事を続けることが当たり前だと思っていた、今回、このような特集タイトルで記事を書かせて いただくことになり、就職してから約13年間の年月を振り返ってみた、女性の立場から、ということではなく、 大学ではない職場において、大学・大学院で学んだことを直接仕事で活かしている立場として、現在、取り組ん でいる研究内容を紹介し、鉄道技術の研究開発に対する自分自身の考え方について、書かせていただきたく思う、

キーワード:鉄道、シミュレータ、列車運行、旅客行動、消費電力、無線式列車制御システム

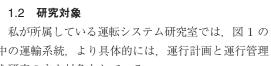
# 職場の概要と研究対象

## 1.1 職場の概要

私が勤めている公益財団法人鉄道総合技術研究所(以 下、「鉄道総研」) は、1986年12月10日に当時の運輸 大臣の許可を得て設立され、1987年4月1日に、JR 各社の発足と同時に、日本国有鉄道が行っていた研究 開発を承継する法人として本格的な事業活動を開始し. 2011年4月1日には公益財団法人に移行した組織で ある[1]. 鉄道技術は一般的には、図1に示すように、 施設,電気,車両,運輸という四つの系統に分かれてお り、これらの系統を網羅し、かつ、系統横断的な研究 を実施するため、鉄道総研には、車両構造、車両制御、 構造物, 電力, 軌道, 防災, 信号·情報, 材料, 鉄道力 学. 環境工学. 人間科学. 浮上式鉄道. 地震工学の各 研究分野に対応した部門が設置されている。理学・工 学系の分野はほぼすべて網羅していること、また、心 理・生理学の分野があることが特徴であり、鉄道とい う事業が安全・安定・快適な輸送サービスを提供する ためには、あらゆる分野の知識、技術、経験と感性が 必須であることを意味している.

中の運輸系統、より具体的には、運行計画と運行管理 を研究の主な対象としている.

運行計画というと、列車ダイヤをイメージする方が 多いと思うが、列車ダイヤを作成するためには、その ための前準備作業と、列車ダイヤ作成作業そのものと、 列車ダイヤを実施するために必要な複数の計画を矛盾



たけうち ようこ

公益財団法人鉄道総合技術研究所 信号·情報技術研究部 運 転システム

〒 185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38

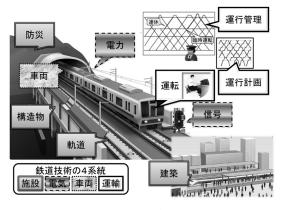


図1 鉄道技術の4系統のイメージ

なく設定する作業とが必要となる.

前準備作業は、具体的には、輸送実績と市場調査か ら輸送需要を想定し、需要を満たすための各種の施策 を検討したり、列車本数・列車種別などを決定したり、 駅間走行時分の最小値(駅間で最速走行した場合に必 要な時間)や、各種設備の性能に基づき、列車間隔の最 小値を具体的に求めたりする作業である. この前準備 作業により、「各時間帯でどの列車種別を何本設定する のか」「各駅間で最低限必要な駅間走行時分は何秒か」 「各駅で最低限必要な列車間隔は何秒か」という。 列車 ダイヤ作成時に用いる制約条件がわかる.

列車ダイヤを実施するためには、 番線や車両の使用 計画,乗務員の勤務計画といった複数の計画を矛盾な く設定する作業も必要である [2]. 列車ダイヤとこれら の計画をまとめて、運行計画と呼ぶことが多い(表 1). 駅·区所構内作業計画,車両運用計画,乗務員運用計 画については、リソースの最大活用を目的とした数理・ 最適化手法を用いたさまざまな研究が行われている.

列車ダイヤは、鉄道事業者が社会に対して提供する 商品そのものであり、輸送サービス水準を決定する.

表 1 運行計画作成

計画	内容
列車ダイヤ	列車ごとの詳細な運転時刻と運転線 路を決める
駅・区所構内作 業計画	駅または区所(車両基地)構内における番線使用計画と,車両の入換え,編成の分割・併合などの作業順序と作業時刻を決める上記作業を駅・区所要員に割り当てる
車両運用計画	すべての列車に対して使用する車両 を割り当て,折返し順序と検査計画 を決める
乗務員運用計画	すべての列車に対して乗務員(運転 士・車掌)を割り当て,勤務計画を 決める

そのため、列車ダイヤの評価に関する研究にも取り組 んでおり、詳細は 2.1 節で後述する.

運行管理とは、列車ダイヤ通りに輸送サービスを提 供すること、また、大きな遅延が発生した場合には、旅 客利便性の低下をなるべく抑えるような、列車ダイヤ の変更(「運転整理」という)をリアルタイムに実施す ることである。運転整理に関する研究も、国内外でさ まざまな研究が行われている [3].

列車ダイヤが輸送サービスの水準を決定するもので あれば、運行管理は、その水準の実現度合いを表して おり、双方ともに、鉄道にとって重要な役割を担って いる.

## 2. 研究内容紹介

運転システム研究室では、列車ダイヤを評価するこ とを目的として、「列車運行・旅客行動シミュレータ」 を開発している [4,5]. 現在. 私が主担当として携わっ ているのは、この列車運行・旅客行動シミュレータの 応用展開であり、複数分野のメンバーと協調して、研究 を進めていることが特徴である. 本節では、まず、列 車運行・旅客行動シミュレータについて述べ、二つの 応用展開事例を紹介する.

## 2.1 列車運行・旅客行動シミュレータ

列車ダイヤを評価するためには、ある列車ダイヤに 対して、どの程度の遅延が発生するのか、発生した遅 延が収束するのか、拡大してしまうのかを推定するこ とが必要である.

1.2 節で述べたように、列車ダイヤは、各駅間での走 行時分の最小値や, 各駅での列車間隔の最小値といっ た制約条件を満たしたうえで作成しているため、列車 ダイヤ通りに運行されている限りにおいては、遅延は 生じない. しかし, いったん遅延が発生すると, 高密



図2 遅延が拡大する仕組み [6]

度な列車ダイヤでは、遅延が拡大しやすい傾向にある. スケジューリングの効率性と頑健性は一般的にトレー ドオフの関係にあることを思い出していただければ. 直感的にもご理解いただけるかと思う、遅延拡大の仕 組みを図2で説明する。図2は列車ダイヤ図の形式に 準じており、縦軸が駅の位置、横軸が時刻、斜めの線 が各列車の運行を表している. まず, 列車 2 に A 駅で 遅延が発生すると(図2①), B駅で、列車1との列車 間隔が広がる (図 2 ②). その結果, B駅で列車 2 に 乗車する人数が増え(図23) 必要乗降時分が増える ことによって列車2の遅延が拡大する(図2④). さ らに、列車3へも遅延が伝播していく(図2⑤)、な お、遅延のトリガーは、旅客行動に起因することもあ り、遅延発生そのものを完全に抑制することは難しい、

このような遅延拡大と遅延伝播を再現するため、鉄 道総研では、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て、列車運行だけでなく、旅 客行動を模擬可能な「列車運行・旅客行動シミュレー タ」を開発してきた. 計算フローを図3に、計算結果 例を図4に示す. 列車運行・旅客行動シミュレータは、 自動改札機で取得される IC カードなどの旅客データ (乗車駅、降車駅、利用時間帯)、列車ダイヤデータを 入力とし, 旅客行動履歴, 各列車の各駅での着発時刻 を出力する。

駅で発生する遅延を推定するために、旅客一人ひと りがどの列車に乗車し、どこで乗換え、いつ目的地に 着いたのかを推定し、必要乗降時分を乗降人数から計 算している.この手順により、図2④のような乗降人 数の増加による駅での遅延発生を再現する.

また、駅間走行時分を推定するために、鉄道の信号 システムを模擬する機能、および、車両、線路、制限 速度、運転士の運転操作などを入力とした場合に、物 理学の運動方程式を解きながら、列車の位置・速度の 時間的推移を計算している.この機能により、図2⑤ のような後続列車への遅延を再現する.

旅客行動を含めたシミュレーションを実施したのは、 列車遅延を正確に模擬するためであったが、このこと

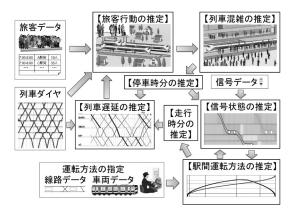


図3 列車運行・旅客行動シミュレータの計算フロー [7]

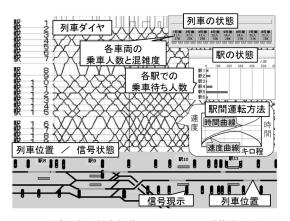


図4 列車運行・旅客行動シミュレータの計算結果例 [7]

により、鉄道利用者の利便性の観点での評価が可能となった. たとえば、列車ダイヤ作成担当者が、現行の列車ダイヤ (Aとする)に対して、急行の停車駅を1駅増やすダイヤ改正案 (Bとする)を作成したとする. ダイヤ案 Bを採用した場合、現行よりも、便利になる旅客と不便になる旅客が存在するため、ダイヤ作成担当者は、事前に、ダイヤ Aとダイヤ案 Bとを比較し、どの駅からどの駅まで行く旅客が、どの程度、便利になるのか/不便になるのかを考慮したうえで、ダイヤ案 Bを採用するかを決定することが望ましい。本シミュレータでは、旅客一人ひとりの利用列車を推定しているため、ダイヤ Aとダイヤ案 B それぞれについて、旅客の利便性を表す指標を算出し、比較することが可能である.

## 2.2 列車運行電力シミュレータ

2005年の改正省エネルギー法の施行や,2011年の東日本大震災以降の電力不足と電気料金の値上がりもあり,鉄道においても,消費電力削減に対するニーズが一層高まっている。たとえば,鉄道事業者では,電力貯蔵装置など各種省エネ地上設備の設置や,省エネ車

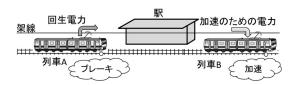


図5 回生電力が有効活用される状況

両の導入・省エネ運転の工夫などを実施している。どのような施策を実施すれば、どの程度の省エネ効果があるのかを予測するための手段は重要であり、鉄道総研では、実規模の複数路線を対象とした多数の列車の消費電力を推定することを目標として、列車運行電力シミュレータを開発している。

列車運行に関わる消費電力をより正確に推定するためには、列車の運転操作を模擬する必要がある。列車は、加速しているときは電力を消費するが、近年は、ブレーキをかけているときに発電して電力を架線に返すことができる車両が多く導入されている。この電力を回生電力という。列車は架線を通じて、周辺の列車と電気的につながっているため、ある列車 A がブレーキをかけて回生電力が発生した時刻に、近くにいるほかの列車 B が加速していれば、列車 A の回生電力は列車 B へと融通され、有効活用される(図 5)。一方で、周囲に加速している列車が存在しない場合には、列車 A は回生できなくなってしまう。すなわち、いつ、どの列車が、どの位置で、どのような運転操作をしているかが、消費電力量に大きく影響する。また、車両形式や電力供給設備にも依存して、消費電力量が決まってくる。

そのため、本シミュレータの開発は、電力・車両・運 輸の三つの分野にまたがって進めている。 列車運行電 カシミュレータの入出力データのイメージを図6に. 計算結果例を図7に示す。電力分野では、新線の電化 設計段階における電力の概算用に開発していたシミュ レータ「パワーダイヤグラム」[10] を基に、き電回路計 算部を作成した. 車両分野では, 車両単体のエネルギー 計算を行う汎用走行エネルギーシミュレータ「Hybrid-Speedy」[11] を基に、車両計算部と運転曲線計算部を 作成した. 運輸分野では、2.1 節で述べた「列車運行・ 旅客行動シミュレータ」を基に、運行管理部を作成し た. 運行管理部は、き電回路計算部、車両計算部に対し て、在線位置、電流、電圧、速度などのデータを設定し、 き電回路方程式を繰り返し解く収束計算を実施させる. また、運転曲線計算部をダイヤデータに従った順序で 呼び出し、各列車に各駅間を走行させる機能をもつ.

開発したシミュレータの計算ロジックを検証するため、実路線を活用した夜間測定試験を実施し、測定結

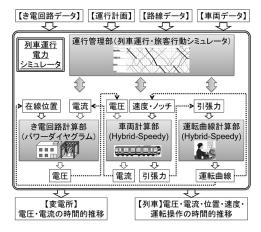


図6 列車運行電力シミュレータの入出力データ [8]

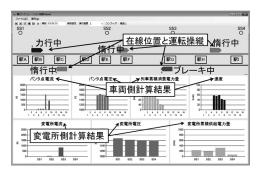


図7 列車運行電力シミュレータの計算結果例 [9]

果と計算結果とを比較して精度を確認した [8, 12, 13]. 検証結果例を図8に示す.測定データと,車両,電力 設備、運転操縦なども含めた設定試験条件に対応する 入力データのすべてが揃うという条件を満たせば、良 好な精度で測定結果とシミュレーション計算結果とが 対応することを確認した.

現在、営業路線での各種省エネ地上設備・車両の効 果予測を実施可能とするため、より現実に近い運行状 況の再現に取り組んでいる.

# 2.3 無線式列車制御システム評価のためのシミュ レータ

鉄道では、駅間線路を「閉そく」と呼ばれる区間ごと に区切り、「1つの閉そくには1列車しか在線できない」 という制約を守ることで、安全を確保している. この 仕組みを実現するため、図9のように、閉そくの区切 り位置に信号機を建て、運転士は、信号機の色に従っ て、次の閉そくを運転する決まりとなっている。 すな わち, 個々の列車は, 信号機という地上設備を介して, 周囲の列車の位置を間接的に把握している.

一方、近年の ICT の発展に伴い、車上と地上設備と

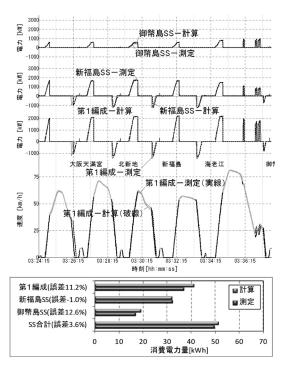


図8 測定結果と計算結果との比較 [8]

の間の情報伝達に無線伝送を用いたシステム(「無線式 列車制御システム | という) が注目されてきている。無 線式列車制御システムの機器構成イメージを図 10 に 示す. 列車は、無線基地局を介して、地上設備の制御装 置と頻繁に通信しているため、安全を確保するために 必要となる先行列車との間隔を逐次計算することがで きる. そのため. 無線式列車制御システムでは. 信号 機を必ずしも必要としない. また, 高頻度運転の実現 や、信号機や付帯する地上設備の削減によるメンテナ ンスコスト低減というメリットがある. 2011年には、 JR 東日本の ATACS [15] が営業線に導入されており、 今後の導入拡大も想定される.

安定した列車運行を実現するためには, 無線基地局の 配置が重要である。一つの無線基地局が担当する範囲で 同時に通信できる列車本数には限りがあるため、無線式 列車制御システム設計においては、列車運行を考慮する 必要がある. 一方で, 電波干渉や伝搬の観点を考慮する ことも必要であり、列車密度が高い線区には、単純に無 線基地局を多数配置すればよい、というわけでもない.

そこで、現在、通信・列車制御・運転の三つの分野が協 調して、無線式列車制御システムを導入した場合の列車 運行をシミュレーションする方法を検討している. 具 体的には、無線通信システムの設計評価支援用ツールで ある無線データ伝送回線シミュレータ「RADTRACE」

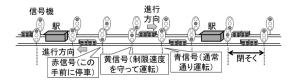


図9 閉そくと信号機による安全確保の仕組み

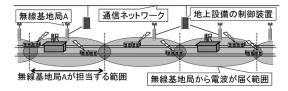


図 10 無線式列車制御システムの機器構成イメージ [14]

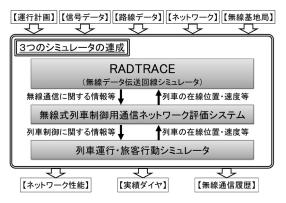


図 11 三つのシミュレータを連成した場合の入出力データ

[16] と、鉄道沿線における無線データ伝送品質を考慮 して通信ネットワークの動作を模擬する「無線式列車 制御用通信ネットワーク評価システム」[17] と, 2.1 節 で述べた「列車運行・旅客行動シミュレータ」の三つを 連成し、必要な情報を動的にやりとりする仕組みを構 築している。2.2節の列車運行電力シミュレータでは、 き電回路方程式の収束計算が必要であったため、既存 のシミュレータを基に新しい計算部を作成する必要が あったが, 本節の三つのシミュレータは, 無線式列車制 御用通信ネットワーク評価システムがシミュレーショ ンクロックを管理し、各時刻で必要な情報をやり取り するインターフェースを決定する方法での連成が可能 である. 連成が完成した場合の入出力データを図 11 に 示す. 将来的には、無線式列車制御システム設計時に、 これらのシミュレータ群を活用した事前評価が可能な 枠組みを提案することを目指している.

# 3. 鉄道技術の研究開発に対する考え方

2 節では、現在、取り組んでいる研究内容を紹介してきたが、私の仕事は、研究のみに留まらず、開発に近

い内容であり、ほかの理系の職種の方々との共通点も多いのではないかと考えている。たとえば、業務上必要な知識は、仕事をしていく中で、身につけていく努力が必要なことや、時々刻々と変化する社会情勢に応じて、変化していくニーズを把握する必要があることなどである。学生の頃から鉄道に関する知識をもっていたわけではないし、鉄道をとりまく社会情勢は、海外展開に向けた取り組み [18]、東日本大震災をきっかけとする災害対策のさらなる強化、携帯端末や SNS の普及による旅客サービスの飛躍的な進歩など、就職当時から、随分と変わってきている。

このような考えのもと、本節では、仕事を進めるう えで自分自身が大切にしていることを、経験に基づい て書くことを通して、鉄道技術の研究開発に対する自 分自身の考え方をお伝えしたく思う.

### 3.1 コミュニケーションスキル

列車運行・旅客行動シミュレータの応用展開を進めるうえで、一番重要と感じていることは、コミュニケーションスキルである。同じ理系の分野であっても、対象とする知識の範囲は大きく異なる。先方にとっては当たり前なことが、私にとっては全く未知のことであったり、その逆もある。基本的な部分は知っておく必要があるが、専門的な部分は、お互いの信頼関係を土台として、各分野が責任をもって進める体制を取ることで、すべての分野に精通していなくても、研究を進められることは面白い。そのためにも、「専門的な内容でもポイントを押さえてわかりやすく説明する」「相手の立場になって考える」というコミュニケーションスキルが、随分と訓練されたように思う。

1.2 節で述べたように、列車ダイヤは、鉄道が社会に対して提供する輸送サービス水準を決定する計画である。列車ダイヤを評価可能な列車運行・旅客行動シミュレータは、列車運行電力量推定や、無線式列車制御システム評価など、鉄道総研の研究開発において、ほかの分野と輸送サービスとをつなぐ役割を担うものである。 さまざまな可能性を秘めており、今後も、ますます重要となってくると考えている。 私も、OR をうまく活用して、鉄道事業者と研究をつなぐことができる人材になりたい.

#### 3.2 モチベーションとモットー

鉄道総研には「革新的な技術を創出し、鉄道の発展と豊かな社会の実現に貢献します」というビジョンがある [19]. ビジョンを達成するための使命がいくつか記載されているが、その中で、私が最も好きな使命は「鉄道全般に及ぶ深い知見を蓄積し、技術的良識に基づく中立な活動を行うこと」である。私自身の言葉で言

い換えると、「鉄道を通じて社会貢献する」ということであり、これは、仕事を続けるうえでの一番のモチベーションであり、迷ったときに立ち返る言葉でもある.

このように言えるようになるまでに、就職してから 10年はかかった.入社3年目には,1回目の育児休暇 を取得し、復帰直後は、慣れない家事育児をこなしな がら、出社するだけで精一杯だった、だんだんと仕事 と育児とを両立するペースがつかめてきて、入社8年 目に第2子を出産し、2回目の育児休暇から復帰した ときには、列車運行・旅客行動シミュレータの機能拡 張を担当することが決まっていた. つまり, 現在, 取 り組んでいる列車運行・旅客行動シミュレータの応用 展開の発端は、自分から発案したり、手を挙げたりし た研究課題ではなく、すでに設定されていた研究課題 だった. 当時は、その経緯や背景を必ずしも理解しき れておらず、最初は進め方がわからず少し戸惑ったが、 それでも, 目の前の課題に向き合っていった結果, 大 きな可能性が目の前に広がっていることに気がつくこ とができたのは、とても幸運だったと思っている。こ の経験から、自分で選んだことであっても、与えられ たことであっても, 「目の前の課題に真剣に取り組む」 ということは、私のモットーとなっている.

### 4. おわりに

私が学生の頃に考えていた「自分自身が努力をすればなんとかなる」ということは、大きな間違いであった。自分自身の努力と周囲の方々の支えは半々くらいではないかと思う。たとえば、大学のある科目で単位を取るために 60 点が必要だとすれば、自分自身がいくら努力したとしても 50 点であり、一方、周囲の方々がいくら支えてくださっても 50 点であり、両方揃って、初めて及第点に達する、という感覚である。周囲の方々の中には、仕事に関係する所内外の方々だけでなく、家族や友人たちも含まれている。

感謝の気持ちを忘れずに、迷ったときには社会貢献という志に立ち返り、また、頑張りすぎてつぶれないよう、それでも、目の前の課題に真剣に取り組み、自分がやるべきことをこなしていけば、10年後には、また違う景色が見えてくるのではないかと期待している。

本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助 金を受けて実施した.

## 参考文献

[1] 公益財団法人鉄道総合技術研究所,「ごあいさつ」, http:

- //www.rtri.or.jp/rtri/rtri.html (2016 年 5 月 12 日閲覧) [2] (財) 鉄道総合技術研究所 運転システム研究室, 『鉄道の スケジューリングアルゴリズム』, 株式会社エヌ・ティー・
- エス, 2005. [3] 佐藤圭介, "旅客が被る不便の増分を最小化する運転整理 の定式化," オペレーションズ・リサーチ:経営の科学, **60**,
- pp. 622-629, 2015. [4] 國松武俊, 平井力, 富井規雄, "マイクロシミュレーションを用いた利用者の視点による列車ダイヤ評価手法," 電学論 D, **130**, pp. 459-467, 2010.
- [5] 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, **28**(4), pp. 41-46, 2014.
- [6] 武内陽子, "列車運行実績ダイヤデータ分析システム @Plan," 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究 発表会アブストラクト集, pp. 10-11, 2014.
- [7] 武内陽子, "旅客利便性・経営上の観点による運行計画の 評価手法," 第 279 回鉄道総研月例発表会, http://bunken. rtri.or.jp/PDF/cdroms1/0040/2014/0040002315.pdf (2016 年 5 月 12 日閲覧)
- [8] 武内陽子, 小川知行, 森本大観, 今村洋一, 美濃部晋吾, 杉本祥一, "列車運行電力シミュレータの開発," 鉄道総研報 告, **30**(8), pp. 5–10, 2016.
- [9] 武内陽子, 小川知行, 森本大観, "複数分野の協調による 列車運行電力シミュレータの開発," 運転協会誌, 2016 年 1 月号, pp. 9-12, 2016.
- [10] 長谷伸一,伊東利勝,"列車ダイヤ入力方式による運転電力シミュレーション,"平成13年鉄道技術連合シンポジウム、S8-4-5,2001.
- [11] 小川知行,近藤稔,熊澤一将,今村洋一,美濃部晋吾,川村淳也,島田直人,添田正,杉山義一,"汎用鉄道車両走行エネルギーシミュレータの開発,"電気学会リニアドライブ/交通・電気鉄道合同研究会,LD-14-067/TER-14-030,2014.
- [12] 武内陽子, 小川知行, 森本大観, 真鍋慎一, 今村洋一, 美 濃部晋吾, 川村淳也, 宮口浩一, 林田健太郎, 島田直人, 山野 井隆, "列車運行電力シミュレータの開発と消費電力測定試験 による検証," 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-14-049, 2014.
- [13] 武内陽子,小川知行,森本大観,今村洋一,美濃部晋吾,宮口浩一,川村淳也,林田健太郎,島田直人,山野井隆,真鍋慎一,"消費電力測定試験による列車運行電力シミュレータの追加検証,"電気学会交通・電気鉄道/リニアドライブ合同研究会,TER-15-028/LD-15-019,2014.
- [14] 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.
- [15] 今野信三, "無線式列車制御の導入," 電気学会誌, **130**(8), pp. 549–552, 2010.
- [16] 川崎邦弘、関清隆, "鉄道向け無線データ伝送回線シミュレータの開発," 鉄道総研報告, **28**(4), pp. 23–28, 2014.
- [17] 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. 31–36, 2014.
- [18] 国土交通省、「各国の鉄道プロジェクトと海外展開に向けた取り組み」、http://www.mlit.go.jp/common/001067088.pdf (2016 年 5 月 12 日閲覧)
- [19] 公益財団法人鉄道総合技術研究所,「鉄道総研のビジョン」, http://www.rtri.or.jp/rtri/rtri\_J\_vision.html(2016 年 5月12日閲覧)