

令和元年6月3日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06428

研究課題名(和文) 災害，機器故障にレジリエントな電気鉄道システム構築に向けた方法論

研究課題名(英文) Methodology for Resilient Electric Railway Systems against Disaster and Power Failure

研究代表者

宮武 昌史 (Miyatake, Masafumi)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：30318216

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：近年，災害や機器故障に起因する鉄道の輸送障害は，路線や運行の複雑化等に伴って広範囲に及ぶケースが増えている。そこで，本研究では，主に電気工学と情報工学の分野横断的アプローチにより，電源喪失時に蓄電装置を用いて安全な場所に列車を移動させる方法，運転継続性の高い車両の構成法，広域的輸送障害を回避する乗客迂回や運転整理方法などについて成果を得て，鉄道のレジリエンスを高める方法論を構築できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電源喪失時や電力制限時の鉄道運行は，電気工学や情報工学を生かした工夫により，その影響を小さく抑え込めることが明らかになった。学術的には，蓄電装置の効率的利用や，ピーク電力制限といった電気工学面での新たな知見と，大規模な乱れ時の運行の効率化を数理モデルの深度化により検討した情報工学面での新たな知見を得た。社会的には，公共交通のレジリエンスは国土強靱化に不可欠であり，まさに今必要とされる研究と言える。

研究成果の概要(英文)：Recently, wide area transport disorders caused by disasters and apparatus failure has been increased due to complicated railway network and operations. This research has established the methodology to increase the resilience of railway systems by interdisciplinary approach from electrical engineering and informatics; evacuation of trains toward safe places by energy storage in electricity failure, configuration of trains with higher continuation ability and passenger detour and rescheduling method to avoid wide area transport disorders.

研究分野：電力変換，システム制御

キーワード：電気鉄道 レジリエンス 電力 運輸 車両

1. 研究開始当初の背景

近年の鉄道では、震災や水害などの広域的な災害における公共輸送機関の麻痺はもちろん、サービス向上のために輸送形態が複雑化していることもあり、機器故障などに起因する局地的なトラブルでも広域的な輸送障害に至る例が散見される。近年、地球温暖化や地殻変動により災害自体が増えており、また、首都直下地震や南海トラフ地震の発生が懸念される中、都市の循環器といえる公共交通の強靱化は、都市の生命の要であり、これらへの対応は喫緊の課題である。

このような課題に対し、学術的な見地からは、故障や災害に強い車両と車両への電力供給法だけでなく、輸送障害区間の適切な列車救済、さらには健全区間の運行を確保する運行管理が重要である。また、被災により電力供給が制限された場合は、適切な節電ダイヤや省エネ運転により、少ないエネルギーで輸送力と輸送の質を確保する必要がある。

研究開始当初、個別の学術的成果としては、例えば

- ◆ 永久磁石同期機や SiC デバイスなどの新技術を使った省エネ車両システム
- ◆ 蓄電装置を用いたエネルギーマネジメントによる省エネ・ピーク電力カット
- ◆ 最適制御的アプローチによる最小エネルギー運転手法
- ◆ 輸送品質だけでなくエネルギー消費にも配慮した列車運行ダイヤの最適化手法
- ◆ 数理的手法を用いて乱れた列車運行を正常化する運転整理

などが既にあった。しかし、これらの検討では、基本的に上記の単一の技術について個別に検討を行っているだけであった。今回のような困難な課題に対しては、分野横断的なアプローチが必須であるが、未だそのような研究が学術的かつ体系的に行われている事例は研究代表者以外わずかに見られるのみであった。鉄道事業者になかなか存在する部門間の縦割りがこの原因の一つであるが、それを打破できるのは大学の研究者しかいないと確信し、本課題の立案に至った。

2. 研究の目的

今回の対象は都市鉄道とするが、短期間での復旧が難しい土木構造物は対象外とし、工夫次第で短時間で動かせる所のレジリエンス向上のための方法論を明らかにし、我が国の国家的課題である国土強靱化に貢献することを目的とする。そのために、各研究者が持つ車両(電気機器学、機械工学)、電力(電気機器学・電力系統)、運輸(情報通信・数理工学)の知識を集約し、分野横断的に活用する。

一つの議論の方法として、図1のように、都市のエリアを「構造物損壊エリア」「停電エリア」「電力供給制限エリア」の3つに分け、それぞれについて必要な対策メニューを明らかにする。

「構造物損壊エリア」は直接対象とはしないが、「停電エリア」と合わせ、列車や旅客の迂回を考え、影響の少ない運転方法及び旅客案内方法を明らかにする。「停電エリア」では、駅間で停止してしまった列車の救済が重要であり、地上や車上の蓄電装置を活用して架線レス運転を行い、最寄り駅まで速やかかつ安全に移動する列車救済(車内の旅客救済)計画方法を明らかにする。「電力供給制限エリア」では、極めて限られたエネルギーをどう配分し、いかに効率的に使用するかという鉄道向けエネルギーマネジメント技術の確立を目指す。また、瞬時電力にも着目し、電力系統の停電リスクを真に軽減するパワーマネジメント技術についても明らかにする。

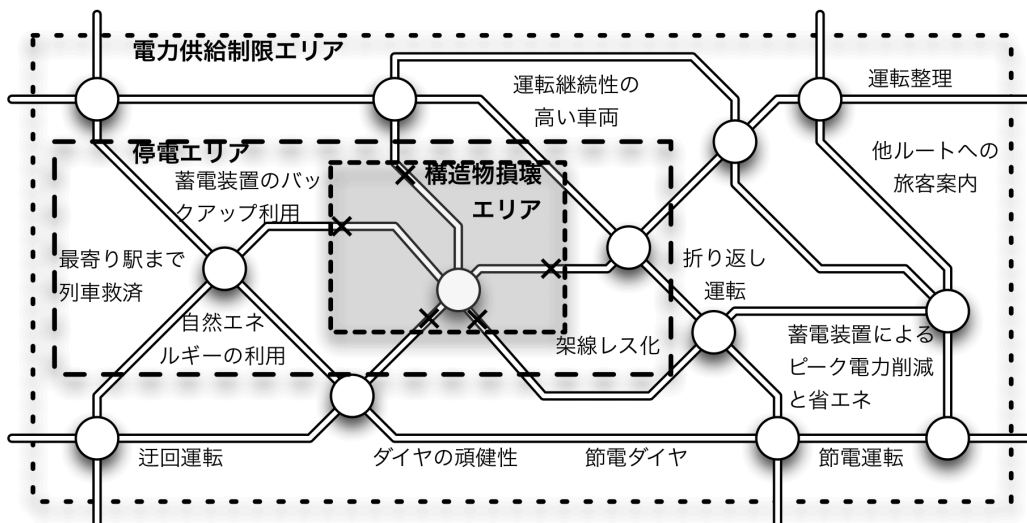


図1 都市の路線網における輸送障害と各エリアに対する諸対策のイメージ

### 3. 研究の方法

研究代表者と2名の研究分担者が中心となり、1名の研究協力者（連携研究者）の助言のもとに研究を遂行した。まず、各研究者が持つ車両（電気機器学、機械工学）、電力（電気機器学・電力系統）、運輸（情報通信・数理工学）に関する多様な知見を持ち寄り、レジリエンスに重要となる技術を精査する。次に、「停電エリア」「電力供給制限エリア」での対策に加え「構造物破壊エリア」を含めた列車・旅客の迂回策について個別の具体案を検討した。さらに、個別の技術を統合する際に、都市広域への適用の観点から対策の整合性について検討する。検討に際しては、各研究者が個別に持つ、国内外の鉄道事業者や研究所等の協力体制をも利用し、学術的な観点だけでなく実用性の観点も加えた。

H28年度は、図1に示した各技術について本研究課題の中でブラッシュアップすべき課題を挙げ、予備検討を行ったうえで、主に「停電エリア」「構造物破壊エリア」に焦点を当てて検討を行った。H29年度は、「電力供給制限エリア」での対策に主に焦点を当て、エネルギーだけでなく、ピーク電力の削減をも含め、検討を深めた。H30年度は、これまでの検討をさらに深度化し、レジリエンスを総合的に評価し向上させる方法論の構築を行った。

### 4. 研究成果

本研究で得られた成果は年度ごとにまとめて記述する。これら3年間に渡る研究の実施により、研究目的を概ね満たす成果が得られた。

#### 【H28年度】

「停電エリア」に焦点を当て、駅間に停車した列車を地上蓄電装置の電力を利用して駅などの安全な場所に移動させる救済運転について方法論を開発した。特に、列車を通常と逆方向に走らせる利点と必要な手順を整理し、救済に必要な蓄電装置の電力量を計算した。その結果、図2に示すように、逆走を1列車ずつ行うために救済時間は長くなるが、現実的な地上蓄電装置の容量で救済が可能であることを明らかにした。

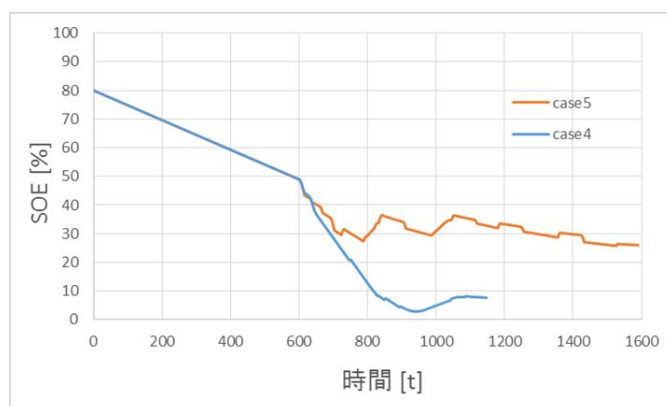


図2 逆走しない場合(case 4)とする場合(case5)の地上蓄電装置の充電エネルギー(SOE)変化

次に、長時間にわたる運転支障が発生した時を想定し、旅客の所要時間の増加を抑える運転整理案作成を作成するアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムは、混合数理計画法に基づいており、(1)複数の路線を対象とした運転整理を行う (2)旅客が迂回経路を使用することを考慮する (3)必要に応じて臨時列車を運転する、の3点を実装している。

また、普段は回生電力を車上に蓄えて有効利用する蓄電装置を停電時に利用する可能性を、実際に提案された主回路方式を前提に考察し、車両重量(乗車人数)の不確定性を考慮した列車の省エネ運転計画方法についても議論を行った。これにより、運転継続性のより高い車両システムの実現が期待できる。

これらを合わせることで、構造物破壊エリアを迂回して輸送サービスを極力継続すること、停電エリアで地上や車載の蓄電装置を利用して列車を安全な場所に移動させることの可能性や新たな方法論を示すことができた。

#### 【H29年度】

「電力供給制限エリア」に焦点を当て、検討を行った。具体的には、回生ブレーキの特性も考慮し、電力量の削減だけではなく、ピーク電力の削減をも考慮することで列車を間引く必要性の低い運転方法や列車運行ダイヤ作成方法について議論した。列車単体のピーク電力を抑制するモードを車両に追加することを提案し、複数駅からなる都市鉄道路線モデルにおいて回路計算部を実装した鉄道運行シミュレータにより電力と電力量を評価した。その結果、図3に示

すように、変電所全体でのピーク電力を効果的に削減できることに加え、路線条件によっては回生電力の融通が図られて電力量の削減も達成される可能性があることを明らかにした。このような結論は、非線形な特性を含む回路を正確に計算する機能を有するシミュレータでなくては出てこないものであり、本研究グループの持つ知見を利用することでそれが明らかにできたことは大きな成果と考える。

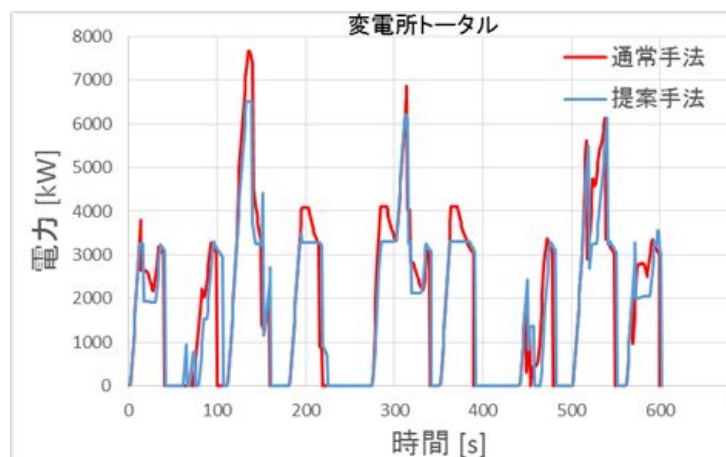


図3 列車のピーク電力を下げることによる変電所電力の変化

また、H28年度に得られた研究実績のさらなるブラッシュアップとも位置付けられる内容として、運休路線の途中折り返しや迂回路線の増発を行うレジリエントな運転整理法の検討や、損傷を受けやすい架線をなくした架線レス蓄電池電車用非接触給電装置の特性改善の検討も行った。前者では大規模な運行乱れが発生した場合の対処方法がより網羅的に検討され、後者ではコイルの位置ずれに対する伝送電力の安定化のための制御やコイル設計について一定の改善がなされた。これらにより、運転整理の高機能化による大規模な運行乱れや、地上設備簡素化による自然災害へのレジリエンス向上に寄与できる。

#### 【H30年度】

これまでの検討をさらに深度化し、及びレジリエンスを総合的に評価して向上させることにより、次の成果が得られた。

大規模な運行乱れが発生する場面において、輸送力が十分でない時間帯に乗客が集中しないように利用者を誘導するための経路を生成して配信するアルゴリズムを提案し、列車等の混雑が大きく緩和され、レジリエンスの向上が図られることを示した。

遅延、接続、走行時間や列車頻度等における利用者の不満を評価項目とし、利用者一人ひとりのモデル化をせずに運転整理案を簡易に評価し、混合整数計画法で最適化する方法論を開発した。

停電時の架線・蓄電装置ハイブリッド鉄道車両の非常運転について考察を深めた。この中で、補機電力が重要な指標となり、それにより非常運転に適した運転速度が変わることを示した。また、非電化区間や停電区間を長く走る車両の検討も行い、列車タイヤの最適化によって航続距離を伸ばせることを示した。

地震や水害等の災害時に損傷を受けやすい架線をなくす将来的な技術として、ワイヤレス給電技術の検討も引き続き行った。静止給電において位置ずれの悪影響を受けにくいコイル形状の提案や、移動給電のコイル形状や電力制御の工夫による車載蓄電装置の削減を図った。また、急速充電時の蓄電装置の発熱を抑え、寿命を延伸する充電方法についても検討を行った。

地上の駅設備への電力供給確保もレジリエンス向上の要件である。このため、回生電力と再生可能エネルギーを利用し、系統からの電力が限られた場合にも利用できる地上設備エネルギーマネジメントの数値モデルを提唱した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- [1] J. V. Pinon Pereira Dias, M. Miyatake, "Increase in Robustness against Effects of Coil Misalignment on Electrical Parameters Using Magnetic Material Layer in Planar Coils of Wireless Power Transfer Transformer," *Energies*, Vol.11, pp.1-25, 2018. 査読有  
<https://doi.org/10.3390/en11081970>
- [2] F. Pandu Wijaya, T. Shimotsu, T. Saito, K. Kondo, "A Simple Active Power Control for High Power Wireless Power Transmission System Considering Coil Misalignment and Its Design Method," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.33, pp.1-10, 2018. 査読有

<https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2799679>

- [3] 今田 京介, 富井 規雄 「途中折り返し運転を考慮した混合整数計画法による運転整理アルゴリズム」電気学会論文誌 D, 137(6), pp.484-491, 2017. 査読有  
<https://doi.org/10.1541/ieejias.137.484>

〔学会発表〕(計 27 件)

- [1] T. Sato, M. Miyatake, “A Method of Generating Energy-efficient Train Timetable Including Charging Strategy for Catenary-free Railways with Battery Trains,” 8th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (RailNorrköping), 2019. (オーラル発表決定済)
- [2] 赤井 秀行, 宮武 昌史 「回生電力と再生可能エネルギーを併用した鉄道沿線施設の最適運用計画」 H31 年電気学会全国大会, 2019.
- [3] 富井 規雄 「運転整理は Holy Grail か?」 NU-Rail2019: 鉄道分野の新技术に関するシンポジウム, 2019. [招待講演]
- [4] 市川 真由, 富井 規雄 「間引き運転, 計画運休を考慮した利用者への行動案内」 NU-Rail2019: 鉄道分野の新技术に関するシンポジウム, 2019.
- [5] 佐藤 拓哉, 宮武 昌史 「蓄電池駆動列車における電力制限ブレーキの省エネルギー効果検討」 NU-Rail2019: 鉄道分野の新技术に関するシンポジウム, 2019.
- [6] 赤井 秀行, 宮武 昌史 「回生電力, 太陽光発電, 蓄電池を併用する鉄道沿線施設を想定した最適運用計画の導出」 NU-Rail2019: 鉄道分野の新技术に関するシンポジウム, 2019.
- [7] 小林 宏泰, 近藤 圭一郎, 古関 隆章, 宮武 昌史 「架線・蓄電装置ハイブリッド鉄道車両における非常運転時の所要エネルギー容量とパワー容量に関する基礎検討」 電気学会 交通・電気鉄道 / マイクロマシン・センサシステム 合同研究会, 2019.
- [8] T. Uehara, K. Kondo, “Energy Saving and Peak Power Cut Effect by High Power Wireless Transmission in Railway Vehicle Traction Application,” The 31st International Electric Vehicles Symposium & Exhibition & International Electric Vehicle Technology Conference 2018 (EVS 31 & EVTeC 2018), 2019.
- [9] 佐藤 拓哉, 宮武 昌史 「蓄電池駆動列車を用いた架線レス鉄道における省エネルギーダイヤ生成法」 第 25 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2018), 2018.
- [10] 鴫 爽, 鯉沼 慶太, 富井 規雄 「混合整数計画法による利用者の苦情を最小にする運転整理アルゴリズム」 第 25 回鉄道技術連合シンポジウム (J-Rail2018), 2018.
- [11] 佐藤 拓哉, 宮武 昌史 「放熱を考慮したリチウムイオン蓄電池モデルによる発熱量を低減する充電電流パターンの効果検討」 平成 30 年電気学会産業応用部門大会, 2018.
- [12] K. Sato, K. Koinuma, N. Tomij, “A train rescheduling algorithm which minimizes passengers’ dissatisfaction based on MLIP formulation,” CASPT2018 - Conference on Advanced Systems in Public Transport and TransitData, 2018.
- [13] Y. Lan, M. Miyatake, “Core Design of EE-shaped Dynamic Wireless Power Transfer Device with Optimal Circuit Topology for Railway Vehicles,” International Conference on Electrical Engineering (ICEE 2018), 2018.
- [14] D. Igarashi, M. Miyatake, “Control of Peak Power and Energy by Means of Tractive Power Restriction in DC Electrified Railways,” IEEJ Technical Meeting on Transportation and Electric Railway (電気学会 交通・電気鉄道研究会), 2018.
- [15] J. V. Pinon Pereira Dias, M. Miyatake, “Misalignment Based Electric Circuit of a Wireless Power Transfer Transformer for Light Rail Transit,” 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2017), 2017.
- [16] K. Imada, N. Tomij, “An algorithm to make a resilient timetable,” RailLille2017; 7th International Conference on Railway Operations Research, 2017.
- [17] A. Kono, N. Tomij, “Identifying the Cause and the Propagation Route of Delays of Trains using Association Rules,” IRSA2017; International Railway Symposium Aachen, 2017.
- [18] N. Tomij, “Application of Data Mining Technique to Improve Railway System Efficiency,” RESOT; Rail Engineering Society of Taiwan, 2018. [招待講演]
- [19] 野田 慶親, 宮武 昌史 「動的計画法を用いた列車の消費電力量と走行時間の関係の求解」 鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2016), 2016.
- [20] 五十嵐 大輔, 宮武 昌史 「停電時での地上蓄電装置の電力供給による列車救済運転法の提案」 鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2016), 2016.
- [21] 今田 京介, 富井 規雄 「旅行時間総和を最小にする混合整数計画法による計画ダイヤ作成アルゴリズム」 鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2016), 2016.
- [22] T. Mineyoshi, H. Kobayashi, K. Natori, K. Kondo, “A Method of Making Energy-Saving Train Schedule Considering Uncertainty,” International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2016), 2016.
- [23] A. Kono, H. Yabuki, N. Tomij, “Identifying the cause of delays in urban railways using datamining technique,” 1st Asian Conference on Railway Infrastructure and Transportation (ART2016), 2016.
- [24] 五十嵐 大輔, 宮武 昌史 「停電時における地上蓄電装置を用いた列車救済運転法の検討」 H28 年電気学会産業応用部門大会, 2016.

- [25] 吉澤 岳人, 宮武 昌史 「列車の運動エネルギー情報を用いた地上設置型蓄電装置の充放電手法の検討」 H28 年電気学会産業応用部門大会, 2016.
- [26] 今田 京介, 富井 規雄 「途中折り返し運転を考慮した混合整数計画法による運転整理アルゴリズム」 H28 年電気学会産業応用部門大会, 2016.
- [27] 今田 京介, 富井 規雄 「列車運行計画の強靱性評価手法の開発」 電気学会 交通・電気鉄道研究会, 2016.  
英語標題のものは全て国際学会

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

上智大学 宮武研究室 <http://miyatake.main.jp>  
千葉工業大学 富井研究室 <http://www.tomii.cs.it-chiba.ac.jp>  
早稲田大学 近藤研究室 <http://www.kondolab.eb.waseda.ac.jp>

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：富井 規雄

ローマ字氏名： TOMII, Norio

所属研究機関名：千葉工業大学 (2019 年 3 月まで)

部局名：情報科学部

職名： 教授

研究者番号 (8 桁): 50426029

研究分担者氏名：近藤 圭一郎

ローマ字氏名： KONDO, Keiichiro

所属研究機関名：早稲田大学 (2018 年 3 月まで千葉大学)

部局名：理工学術院

職名： 教授

研究者番号 (8 桁): 10425895

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：古関 隆章

ローマ字氏名： KOSEKI, Takafumi

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。