

令和元年6月3日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04313

研究課題名(和文) 無線通信と自動運転による知的エネルギー管理を備えた軌道系先進都市交通の研究

研究課題名(英文) Advanced rail-guided urban public transportation based on intelligent energy management based on communication-based automatic train operation

研究代表者

古関 隆章 (KOSEKI, Takafumi)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：20211899

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,800,000円

研究成果の概要(和文)：現在特に発展の著しい国際競争力ある都市軌道交通システム技術の提案を目指し、留学生等と議論しインド、中国、ベトナム等の都市交通への技術的要求を調査し、最終的にタイ、バンコク市へ適用に絞り込み、蓄電装置と連続列車位置情報に基づく自動運転を前提に、蓄電装置の合理的配置と省エネルギー運転法を統合設計する最適化手法をまとめた。これに伴う駆動用電力変換技術、無線列車制御運転システムの電磁両立性と安全評価を分担研究者がまとめた。

上記と並行して、将来の先進都市交通駆動基盤技術の一提案として、永久磁石式リニア同期モータと3自由度磁気浮上制御を組み合わせる机上小型実験装置を設計・試作し、基本性能を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電気エネルギー有効活用と情報技術に基づく安全かつ省エネルギーな都市交通は、日本が先導する技術分野だが、安定成長と高齢社会となった日本での新線建設は少ない。その発展のフィールドは周辺アジア市場に移っている。このアジア市場での技術的要求を整理し、我が国が得意な省エネルギー安定運行、そして高い安全性を実現するシステム設計と運転制御技術の一例を、先端的情報通信技術を応用する形で具体化した。また、将来技術として、静かで先端技術としての魅力を持つ磁気浮上の新たな形態を提案した。これらは周辺諸国の期待に答えるとともに、日本の軌道交通システムの国際競争力を高める意味で、社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：We surveyed technical requirements for urban rail-guided public transportation in major Asian cities, e.g., in India, China, Vietnam etc. in order to propose globally competitive technical proposals useful for Asian urban transportation market. We decided to focus our case study to an urban application at Bangkok in Thailand: An integrated optimal design of distribution of energy storage and energy-saving train operation profiles were concretely studied by assuming the application of communication-based fully automatic train operation with continuous real-time information on train position. Other members simultaneously studied traction power-conversions, electromagnetic compatibility, and safety assessment for such systems.

A new type of the maglev traction combined with permanent magnet linear synchronous motor (LSM) was proposed as an advanced future technology: A reduced scale test bench of the combination of a PM-type LSM and 3 degree-of-freedom maglev was designed and built.

研究分野：電気機器工学 応用電気機器制御

キーワード：電気鉄道 都市交通 運転曲線 省エネルギー運転 自動運転 運行管理 電磁両立性 磁気浮上

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

日本の電気鉄道の強みであり、本プロジェクトに関係する研究者が中心となって進めてきた電気鉄道の省エネルギー運転およびパワーマネージメント技術に、近年特に海外で進展の著しい無線信号に基づく運転制御(CBTC)とドライバレス自動運転(ATO)技術を融合することが、国際協力のある魅力的な都市公共交通システムの実現のために重要である。すなわち、人件費・電力費からなる運転費が低廉で、安全かつ運転の信頼性が高い先進的な軌道系都市交通の設計法、制御法の検討が求められている。

### 2. 研究の目的

上記の情勢分析を基本に、具体的には、1時間あたりの輸送需要2万人~3万人程度のアジアの都市における応用をケーススタディとして選択し都市交通システムとしての性能を評価する。その作業を通じ、H23年度に政府が発表した第4期科学技術基本計画が謳う「安全かつ質の高い国民生活を実現」を交通・電気技術の分野から支援するとともに、「わが国の(電気鉄道関連の)産業国際競争力の強化」、急成長と高齢化が進む「アジア共通の問題解決」に貢献する無線信号に基づく運転制御(CBTC)とドライバレス自動運転(ATO)技術を融合する都市交通設計と運転の制御技術を提案することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究チームは、東京大学、千葉大学(近藤教授の異動に伴い後半は早稲田大学)、交通安全環境研究所から構成され、定期的な共同研究打ち合わせ、情報交換を通じて以下のように検討を進めた。

#### 【2016年度概要】

<東京大>本研究チームにはベトナム、中国、タイ、パキスタン出身の大学院生、客員研究員がおり、これらの研究者との意見交換、彼らの協力を得て文献調査を行い、タイにおける都市交通市場の技術的要求事項を整理した。回生ブレーキ積極活用とエネルギーマネージメント方法、省エネ観点からの運転計画設計をそれらにどう整合させるかを数値計算で検討した。また、駆動技術に関して、リニアモータや電磁吸引形磁気浮上システムの活用を想定するため、その基本実験を行うための実験環境整備を進めた。7ヶ月の延長期間の中で、リニア同期モータの推力向上と脈動低減策の検討、磁気浮上実験準備作業としての磁気回路の系統的設計検討を効果的に進めた。

<千葉大>欧米の車両駆動技術、車上電力測定技術、駆動用モータ(回転形同期機、回転形誘導機、リニア形誘導機など)の種類に対応した駆動制御用変換機的设计やその制御の考え方を調査した。また、新たな電力用半導体素子として注目を集めているSiCによるインバータの採用が、駆動装置の小型化、静穏化、高効率化に具体的にどのようなインパクトをもたらすかを、机上モータ/発電機の駆動実験を通じ、整理し<sup>[1]</sup>、次年度以降のシステム設計の基礎データを準備した。

<上智大>アジアやアフリカの都市交通市場の特徴と問題点を調査した。これまで進めてきた数値計算に基づく、省エネルギー運転と運行最適化の研究成果<sup>[2]</sup>を拡張する形で、地上エネルギー蓄積装置を用いたパワーマネージメントと地上設備設計法を検討した。

<交通研>これまでのシステム安全評価や国際標準化に関わる業務の経験を活かし、国内外のCBTC、ATO技術の動向を調査した。研究グループ共同の会合を4回開催し、研究チーム間の初期的な情報交換を丁寧に行った。

#### 【2017年度概要】

<東京大>前年度に引き続き外国からの大学院生、研究者との意見交換、彼らの協力を得て文献調査を行い、また、数理的な最適化の手法を検討しつつ<sup>[3][4]</sup>、タイにおける都市交通市場の技術的要求事項を整理した。回生ブレーキ積極活用とエネルギーマネージメント方法、省エネ観点からの運転計画設計をそれらにどう整合させるかを数値計算で検討した。また、駆動技術に関して、リニアモータや電磁吸引形磁気浮上システムの活用を想定するため、その基本実験を行うための実験環境整備を進めた。

<千葉大>欧米の車両駆動技術、車上電力測定技術、駆動用モータ(回転形同期機、回転形誘導機、リニア形誘導機など)の種類に対応した駆動制御用変換機的设计やその制御の考え方を調査した。また、新たな電力用半導体素子として注目を集めているSiCによるインバータの採用が、駆動装置の小型化、静穏化、高効率化に具体的にどのようなインパクトをもたらすかを、机上モータ/発電機の駆動実験を通じ、整理し、次年度以降のシステム設計の基礎データを準備した。

<上智大>アジアやアフリカの都市交通市場の特徴と問題点を調査した。これまで進めてきた数値計算に基づく、省エネルギー運転と運行最適化の研究成果を拡張する形で、地上エネルギー蓄積装置を用いたパワーマネージメントと地上設備設計法を検討した。

<交通研>これまでのシステム安全評価や国際標準化に関わる業務の経験を活かし、国内外のCBTC、ATO技術の動向調査を継続した。駆動系と無線信号に基づく列車制御系の電磁両立性評価法、特に列車保安システムの電磁的な防護の一般的方策を検討した。

研究グループ共同の会合を4回開催し、研究チーム間の情報交換を丁寧に行った。

#### 【2018年度概要】

<東京大>

本研究チームに属するベトナム、中国、タイ、パキスタン出身の大学院生、客員研究員らとの意見交換、彼らの協力を得て、タイバンコク市における都市交通路線をケーススタディに、回生ブレーキ積極活用とエネルギーマネージメント方法、省エネルギーの観点からの運転計画と、地上および車上のエネルギー蓄積装置のシステム設計を数値計算で具体化した。また、駆動技術に関して、リニアモータや電磁吸引形磁気浮上システムの活用を想定して基本実験を行うための試験機を組み立て、リニアモータおよび磁気浮上の性能を実験的に検証することができた。

<早稲田大>欧米の車両駆動技術、車上電力測定技術、駆動用モータ(回転形同期機、回転形誘導機、リニア形誘導機など)の種類に対応した駆動制御用変換機的设计やその制御の考え方<sup>[5]</sup>を整理した。また、新たな電力用半導体素子として注目を集めているSiCによるインバータの採用が、駆動装置の小型化、静穏化、高効率化にもたらす影響を、机上モータ/発電機の駆動実験を通じて検証した。

<上智大>アジアやアフリカの都市交通市場の特徴と問題点に留意しつつ数値計算を進め、省エネルギー運転と運行最適化の数値検討を通じ、地上エネルギー蓄積装置を用いたパワーマネージメントと地上設備設計の方法論を東京大における計算と比較しつつ多角的検討した<sup>[6]</sup>。

<交通研>都市交通システム安全評価・認証や国際標準化関係の業務経験を活かし、自動運転、無線信号に基づく列車連続位置検知技術の検討を進め、それらのシステムに関して電磁的防護方策の知見をまとめた。

最終年度は、下記の研究チーム間の情報交換を電子的手段と別会合の会談機会を利用して効率的に進めた。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 タイ国バンコク市の自動運転都市交通を例とした、列車連続位置検知に基づく自動運転とエネルギー・ストレージを積極活用するエネルギーマネージメントの統合最適設計

ここでは、省エネルギー運転と地上・車上のエネルギー蓄積装置の最適配置と運用を統合的に計画する手法をタイ国バンコク市の自動運転都市交通をケースとして検討した<sup>[6]</sup>の東京大学を中心とした検討結果の重要部分を簡単に紹介する。図1に示す上下方向の列車の運転曲線と車上蓄勢装置を図2の(b)のような直列的な検討ではなく(a)のように、(c)に示すGAのフローチャートに基づき統合的に最適化をし、図3に示すような上下線で異なる、省エネルギー運転曲線を得る。この統合設計法では、評価関数内の蓄勢装置導入のコストへの重みとエネルギーコストへの重みを変化させることで、列車運行の形態と省エネルギー性能の連続的な変化を見ることができ、実務的設計の良い見通しを与えられる。

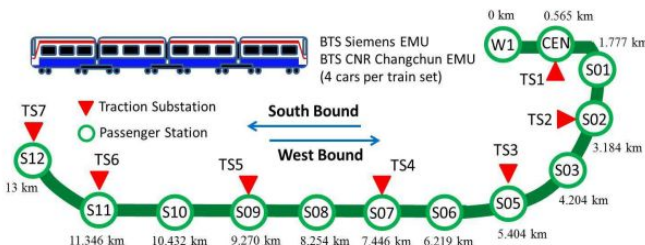
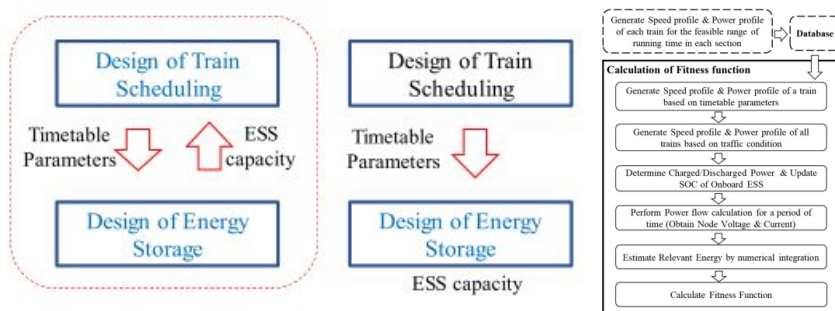
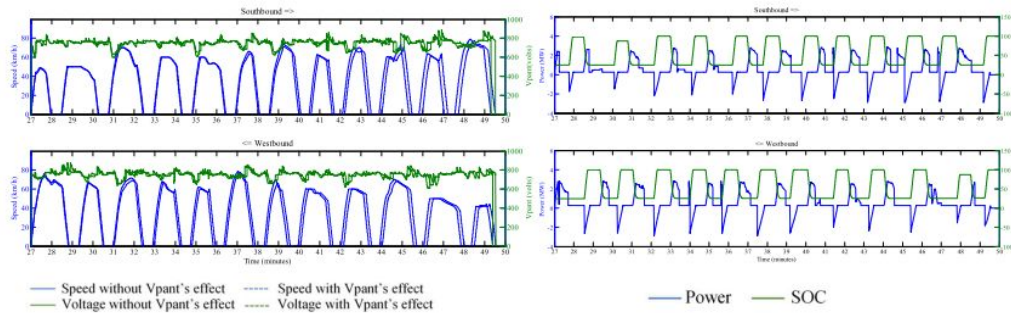


図1 ケーススタディとして取り上げたバンコク市 BTS Silom 線の路線図



(a) 統合的最適化 (b)直列的に2つの最適化を行う方法 (c) GA による列車運転曲線最適化

図2 車上蓄勢装置容量決定と省エネルギー運転最適設計の考え方と列車運転曲線最適化



(a) 各駅間の運転曲線とパンタグラフ電圧の時間変化 (b) 電力流と車上蓄勢装置の充電状態の時間変化  
上は南方面行き 下は西方面行き 横軸は時間(分)

実線はパンタ点電圧一定として最適化した結果、破線は実際の電圧変化を考慮し再計算した結果

図 3.3 ピーク時のデータに基づき車上蓄勢装置容量と運転曲線を統合最適化した結果例

#### 4.2 将来の都市交通駆動に応用可能な横磁束式永久磁石式リニア同期モータ (PM-TFLSM) 駆動吸引磁気浮上システムの提案と原理実証試験

次に、上記と並行して進めた、将来の都市交通駆動に応用可能な横磁束式永久磁石式リニア同期モータ (PM-TFLSM) 駆動吸引磁気浮上システムの提案およびこの科研費の予算を投じて製作した原理実証のための試験機 について簡単に紹介する。スペースの関係で詳細は省略するが、実験計画および応答局面法に基づく賢い設計最適化により重い三次元電磁界数値計算を用いながらも推力が大きく浮上系への垂直力の外乱が小さく支持系への負担の小さな永久磁石式リニア同期モータを設計し、図 4 のような提案機の原理実証のための試験機を組み立て駆動および浮上試験を行うことができた。

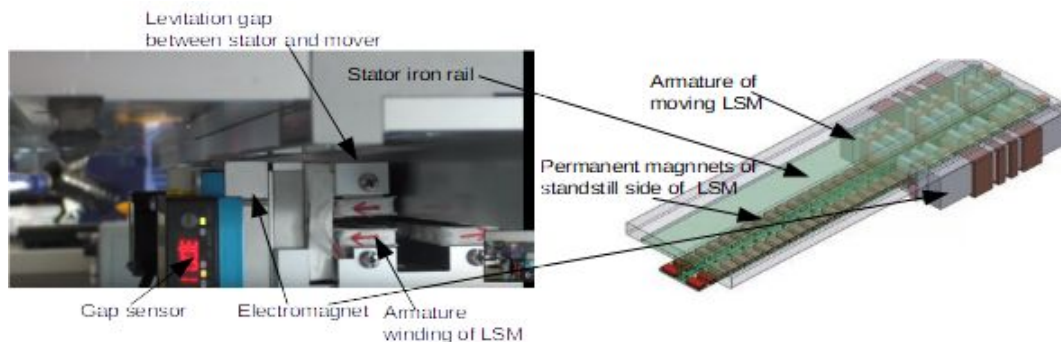


図 4 最適設計した原理実証のための永久磁石式横磁束 PM-LSM と磁気浮上試験装置

上記の、リニア同期モータ (PM-TLSM) の基本動作の様子は[ここに](#)、成功した初期の浮上試験の様子は、動画として[ここに](#)一般公開されている。

#### 4.3 成果の総括

以上から、日本が国内の都市鉄道で培ってきた運転の考え方に加え、回生制動最大活用、電力ピークの抑制や省エネルギーを目的とした列車の自動運転の、およびそのためにできるだけ小容量の地上蓄勢装置、車上蓄勢装置を導入してパワーマネージメントを総合的に行うための設備設計と電力管理のため、設備の最適な配置と容量配分、列車運行曲線の最適化を動的計画法や GA を組み合わせる統合的に行う手法を考案し、バンコク市の自動列車運転都市交通をケーススタディとしてその有効性を例示した。また、無線通信に基づく連続列車位置情報に基づく運転システムの安全性や電磁両立性に関する実務的な視点からの考慮も行った。

さらに、このような自動運転を前提に、将来の静粛でメンテナンスの楽な列車駆動の可能性を与える基礎技術として、永久磁石形大推力リニア同期モータを吸引制御型磁気浮上と組み合わせる技術の基礎検討を行い、研究室の実験でその動作の検証実験を並行して行った。これらの研究成果が日本発の先進的都市交通軌道交通のアジア市場への展開につながる技術的基礎として活用されることを希望する。

### 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 6 件)

1. 松尾健太郎、齋藤達仁、栗田壮一郎、近藤圭一郎：「突極形永久磁石同期電動機のトルクフィードバック制御系における設計と電圧余裕の検討」, 電気学会論文誌 D Vol.136, No.12, pp.925-936, 2016 年, 10.1541/ieejias.136.925

2. 大場 直樹, 宮武 昌史: 「固定閉塞式信号システムの影響を考慮した列車の省エネルギー運転曲線導出」, 電気学会論文誌 D 6, pp.282-290, 2018 年, 10.1541/ieejias.138.282
3. Doan Van Duc, Fujimoto Hiroshi, Koseki Takafumi, Yasuda Tomio, Kishi Hiroyuki, Fujita Toshiyuki: "Iterative Dynamic Programming for Optimal Control Problem with Isoperimetric Constraint and Its Application to Optimal Eco driving Control of Electric Vehicle, IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 7, pp.80-92, 2018, <https://doi.org/10.1541/ieejjia.7.80>
4. Doan Van Duc, Fujimoto Hiroshi, Koseki Takafumi, Yasuda Tomio, Kishi Hiroyuki, Fujita Toshiyuki: "Simultaneous Optimization of Speed Profile and Allocation of Wireless Power Transfer System for Autonomous Driving Electric Vehicles," IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 7, pp. 189-201, <https://doi.org/10.1541/ieejjia.7.189>
5. Kawagoe Natsuki, Kobayashi Hiroyasu, Kondo Keiichiro, Iwasaki Tetsuya, Tsumura Akihiro: 「直流電気鉄道における回生負荷遮断時のシミュレーションを用いた軽負荷回生制御系設計」 "Numerical Simulation to Design Light load Regenerative Brake Control System at Load Shutdown for DC electrified Railway Systems," IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol. 38, No.6, pp. 513-521, 2018, <https://doi.org/10.1541/ieejias.138.513>
6. S. Ichikawa, M. Miyatake: "Energy Efficient Train Trajectory in the Railway with Moving Block Signaling System," IEEJ Journal on Industry Applications, Vol. 8, No. 4, 2019

[学会発表](計 19 件)

市川 駿, 宮武 昌史: "Energy Efficient Train Trajectory in High Frequency Line with Moving Block Signaling System", 電気学会 交通・電気鉄道研究会

宮武 昌史: 『省エネルギー列車ダイヤに関する研究動向調査と考察』, 電気学会 ITS/交通・電気鉄道 合同研究会, 2017 年

Salman Ahmed and Takafumi Koseki: "Smart combination of sensorless electromagnetic levitation and zero power control: A complimentary pair enhancing mutual strengths," 2017 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), 2017

Salman Ahmed, Takafumi Koseki, Houng Joong Kim: "Investigation on armature core structure for increasing thrust of a double sided permanent magnet transverse flux linear synchronous motor by considering winding assembly," 電気学会 リニアドライブ研究会, 2017 年

W. Kampeerawat, T. Koseki: "Integrated Design of Train Scheduling and Wayside Energy Storage for Energy Saving Urban Railway Operation A Case Study of Bangkok Rapid Transit System," 電気学会 ITS 交通・電気鉄道合同研究会 鉄道、ITS 交通一般, ITS 17 043, TER 17 069, 2017

W. Kampeerawat, T. Koseki: "A strategy for utilization of regenerative energy in urban railway system by application of smart train scheduling and wayside energy storage system," 2017 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies (AEDCEE 2017), 2017

Salman Ahmed, Takafumi Koseki, Houng Joong Kim: "Investigation on armature core structure for increasing thrust of a double sided permanent magnet transverse flux linear synchronous motor by considering winding assemble," 電気学会リニアドライブ研究会 LD 18 023, 2018

大場 直樹, 宮武 昌史: 「短時隔時の省エネルギー運転に関する検討」 鉄道技術連合シンポジウム J Rail2018, 2018 年

市川 駿, 宮武 昌史: 「移動閉塞信号システム導入路線における省エネルギー運転曲線」, 平成 30 年電気学会産業応用部門大会, 2018 年

三好正太, 古関隆章, 渡邊翔一郎, 磯部栄介: 「電気鉄道の省エネルギー運転手法の評価に有用な駅間走行時分と消費電力量の実測値の可視化」, 電気学会 交通・電気鉄道研究会, 2018

渡邊翔一郎, 竹内俊裕, 長谷川智紀, 押立貴志: 「列車運転シミュレータを活用した手動運転の電力量評価とリアルタイム運転曲線計算」, 電気学会 交通・電気鉄道研究会, 2018

古関隆章, 篠田憲幸, 水間毅: 「鉄軌道のドライバレス自動運転技術の内外情勢と日本での積極的導入に向けた課題」 電気学会 交通・電気鉄道研究会, 2018

清水 龍, 古関隆章, 渡邊翔一郎: 「列車出発時間の調整による電力ピークカット手法の饋電回路を考慮した傾向分析」, 電気学会 交通・電気鉄道研究会, 2018

渡邊翔一郎, 竹内俊裕, 長谷川智紀, 山口大助, 押立貴志: 「列車運転シミュレータを活用した運転支援装置の評価に向けた基礎検討」, 電気学会 交通・電気鉄道研究会, 2018

W. Kampeerawat, F. Zhou, and T. Koseki: "Efficient Urban Railway Design integrating Train Scheduling, Onboard Energy Storage, and Traction Power Management," 2018 International Power Electronics Conference (IPEC), 2018 年

S. Ahmed, T. Koseki, and H. J. Kim: "Proposal of a compact magnetically levitated transverse flux permanent magnet linear synchronous motor as a 6 DOF transport carrier," The 9th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2018), 2018

大場 直樹, 宮武 昌史: 「遅延の波及を考慮した列車の省エネルギー運転に関する研究」, H31 年電気学会全国大会, 2019

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・電気鉄道研究会, 2019

清水 龍, 古関隆章: 「き電回路計算を用いたリアルタイムな列車力行電力の制限による鉄道用変電所の電力ピークカット手法」, 電気学会 交通・電気鉄道研究会, 2019

〔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

東京大 古関研究室研究レポート <http://koseki.t.u-tokyo.ac.jp/report.html>

早稲田大 近藤研究室 <http://www.kondolab.eb.waseda.ac.jp/>

上智大 宮武研究室 <http://miyatake.main.jp/>

交通安全環境研究所 <https://www.ntsel.go.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

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

部局名: 理工学術院

職名: 教授

研究者番号(8桁): 10425895

研究分担者氏名: 宮武昌史

ローマ字氏名: Miyatake Masafumi

所属研究機関名: 上智大学

部局名: 理工学部

職名: 教授

研究者番号(8桁): 30318216

研究分担者氏名: 長谷川智紀

ローマ字氏名: Hasegawa Tomonori

所属研究機関名: 独立行政法人交通安全環境研究所

部局名: その他部局

職名: 主席研究員

研究者番号(8桁): 20419112

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名:

ワラユット・カンピーラワット, アーメッド・サルマン, ドウク・バン・ドアン

ローマ字氏名: Warayut Kampeerawat, Ahmed Salman, Duc Van Doan

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。