

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04660

研究課題名（和文）AIによりシステム最適挙動を学習する自動走行車両の交通流と運転挙動への影響分析

研究課題名（英文）Influence of autonomous vehicles learning system optimum movement with AI on traffic flows and driving behavior

研究代表者

松本 幸正（MATSUMOTO, YUKIMASA）

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：30239123

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：信号交差点を円滑に通過するように学習させた自動走行車両は、その混在率が上がるほど交通流の円滑化に寄与できることを明らかにした。また、自動走行車両と信号制御を協調させることにより、その効果は増大することもわかった。自動走行車両の混在は周りを走る一般のドライバーの運転挙動にも影響を及ぼし、特に、安全性重視の自動走行の場合には、運転挙動の滑らかさにつながる可能性があることが示唆された。本研究の成果から、自動走行車両が一般車両に混在することによってエリア全体の交通状況の改善につなげられる可能性も示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

情報通信技術や観測技術の進展に伴い、リアルタイムで交通ビッグデータが入手可能になりつつあり、これらの情報を活用した交通運用策が期待されている。本研究で得られた成果からは、交通観測データによって個々の自動走行車両の円滑化や最短経路の予測が可能であることが示された。近い将来に予想される自動走行車両が走行する環境において、本研究の成果に基づいた走行制御を行うことによって、交通混雑の緩和につなげられる。エネルギー消費を減少させ二酸化炭素排出量も削減可能になる。また、自動走行車両が一般車両に混在する状態においても、交通状況の改善につなげられる可能性も示された。

研究成果の概要（英文）：This study found that autonomous vehicles trained to pass smoothly through signalized intersections can contribute to smoother traffic flow as their mixing ratio increases. It was also found that such effect is increased by coordinating the autonomous vehicles with the traffic signal control. The mixture of autonomous vehicles also has an effect on the surrounding human driven drivers. In particular, it was suggested that the driving behavior of a human driven vehicle may be smoothed in the case of a mixture of autonomous vehicles that emphasize safety. The results of this study show that the mixture of autonomous vehicles with human driven vehicles can lead to an improvement of the traffic conditions in the entire area.

研究分野：交通工学

キーワード：自動運転 深層学習 AI マルチエージェント シミュレーション ドライビングシミュレータ 信号制御 走行挙動

## 1. 研究開始当初の背景

センサー技術や車両制御技術の発展に伴い、車両の自動走行が実現しつつある。自動走行のレベル 5 では、ドライバーがいないことを前提とした様々な環境下での完全自動走行となるが、目的地までの走行経路の選択や最適な走行速度をどのように決めるかについての議論ははまだ十分になされていない。理想的には、個々の車両走行の最適化(利用者最適)ではなく、エリア全体としての最適化(システム最適)が求められる。加えて、ドア・トゥー・ドアの自動走行が実現した際には、バスや鉄道から多くの人々が自動走行車両に転換するとも考えられ、特に都市部においては、集中する自動走行車両による交通渋滞の発生も懸念され、エリア全体としてのネットワーク交通流の最適化がいつそう求められることになる。

現在では、機械学習やディープラーニングなどの AI 技術が進化し、膨大なデータに基づく学習を可能としている。交通分野においては、エリア全体の各道路区間における交通量、速度、オキュパンシー、右左折率などの交通状態の観測データを用いて、各車両が選択すべき経路や加減速度といった走行挙動を決めることができると考えられる。2016 年頃からは信号情報活用運転支援システムの運用も始まり、信号切り替わりなどの信号情報の入手も可能になりつつあり、この信号情報も活用したエリア全体の交通流の最適化に期待が寄せられている。

信号情報の提供は交通流の改善に有効と考えられ、推奨速度に関する研究<sup>1)・2)</sup>、アクセルオフ情報に関する研究<sup>3)</sup>、信号残時間の提供などに関する研究<sup>4)・5)</sup>などが行われており、情報提供の効果が様々な面から示されている。交通状況に応じた信号制御に関する研究も行われ、車両の位置情報を用いた信号制御手法<sup>6)・7)</sup>の開発も見られる。しかしながらこれらの研究では、車両はシステム最適挙動を取らず、また、車両走行と信号制御の連携も十分に図られていない。したがって、信号情報に基づいた走行挙動の最適化に加え、エリア全体の交通状態に関する情報に基づいてシステム最適に近くなる経路の選択行動を記述する必要がある。また、車両が信号制御と連携して走行挙動を決め、さらには、その走行挙動を反映した信号制御ができる車両と信号の協調型の制御手法も求められる。

自動運転に関する研究としては、自立型走行に関する研究も多く見られる。自動運転のシステム開発・制御等を除けば、社会的受容性や自動運転活用による生活の変化に関する研究は多いが、交通流への影響を検討した研究<sup>8)</sup>などはまだわずかであった。自動走行車両が普及する状況を想定し、自動走行車両が一般交通流に混在した場合の交通流への影響の把握は不可欠であり、また、ドライバー視点での影響把握も必要と考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、上述の研究開始当初の背景を受け、自動走行車両が混在して走行する近未来の道路交通環境を想定し、大きく分けて下記の 2 つの研究目的を設定する。

自動走行車両の混在が、交通流や他のドライバーの運転挙動に及ぼす影響の把握

自動走行車両が一般車両に混在することによって交通流にどのような影響をもたらすのかを、その混在率の違いに着目してミクロ交通流シミュレーションを用いて明らかにする。さらに、3D ドライビングシミュレータを用いた運転実験を通じて、自動走行車両が一般ドライバーの運転挙動にどのような影響を及ぼすのかを捉える。

観測される周辺交通環境に基づくシステム最適経路選択行動のモデル化

オンラインで提供される信号情報やリアルタイムで観測される周辺道路ネットワークの交通量、走行速度、オキュパンシーなどの交通状況に基づいて、エリア全体の総走行時間を最小化するようなシステム最適挙動を AI によって学習させる手法を開発する。

このようなシステム最適行動を取る自動走行車両が実現すれば、エリア全体として、交通混雑や信号待ちなどによる損失時間を最小化することができ、生産性の向上にも寄与する。また、エネルギー消費量の低減も可能となり、エリア全体として安全で円滑、かつ、地球環境負荷の小さい道路交通の実現につながるようになる。

## 3. 研究の方法

### (1) 車両と信号が協調学習する幹線道路でのマルチエージェントシミュレーション(MAS)の構築

はじめに、右左折挙動や信号交差点での滞留車両を考慮可能な自動走行車両のモデル化を行う。手法としては強化学習を用い、自車の現在位置・速度、信号現示の残時間、前方車両台数、停留台数、右左折台数などを時々刻々と認識し、円滑に信号交差点を通過可能な走行挙動を学習させる。車両の走行挙動は MAS で表現する。これにより、複数交差点を有する幹線道路において、前方の信号が青の場合には制限速度以下のできるだけ高い速度で交差点を通過し、赤信号で停止する場合にはできるだけ停止時間が短くなるような走行挙動を学習させる。

つづいて、交差点に設置される信号もエージェント化し、車両エージェントと信号エージェントが協調して学習するシステムを構築する。信号は、最適挙動を取る車両の走行状況を認識しながら現点灯色の切り替えタイミングを決定するが、相互に情報交換をさせることによって協調させる。これにより、できるだけ滞留車両が少なくなるような信号制御と、その信号に合わせた

最適な走行挙動が実現できる。この際、一般車両への混在を想定し、自動走行車両の混在率を 0% から 100%まで段階的に変化させ、混在率と各指標の関係を分析する。

#### (2) AI による経路選択行動のモデル化

経路選択が可能な道路ネットワークを対象とし、OD 交通量、時間変動パターンなどが異なる様々な交通状態でのシミュレーションを実施し、エリア全体を対象とした単位時間ごとの交通量、オキュパンシー、平均速度、交差点の右左折率などを生成する。生成した多数パターンの学習用データセットを用いてディープラーニングを行い、時々刻々と変化する交通状況に応じて最短経路を選択するモデルを構築する。

#### (3) ドライビングシミュレータによる運転挙動への影響計測

交通流シミュレーション内の自動走行車両の走行ログを記録し、3D ドライビングシミュレータ内で、自動走行車両の走行状況を再現し、自動走行車両が一般車両に混在して走行する環境の中を実際に運転体験してもらうシミュレーション実験を行う。この実験では、自動走行車両の挙動が不快・不自然ではないか、危険は感じないかなどの官能評価を行ってもらうとともに、被験者の運転操作を記録して、運転挙動への影響を定量的に把握する。

### 4. 研究成果

#### (1) 車両と信号が協調学習する幹線道路でのマルチエージェントシミュレーション(MAS)の構築

本研究では、車両と信号機をマルチエージェントで表現し、強化学習として Q-learning を用いた。信号機は、環境状態として、「流入路上に存在する車両数」の情報をもとに最適な通行権の決定を目指すこととした。図 1 は本研究で対象とした幹線道路の概略である。車両は目的地 A から G へ向かう車両を発生させ右左折、直進挙動を行いながら目的地へ向かう。交通量はそれぞれ 400[台/h]、始点から終点まで 3 つの信号交差点が連続した全長 1,200m となっている。対象区間の制限速度は 60km/h と設定した。

自動走行車両の混在率をそれぞれ 20%、40%、50%、60%、80%に設定し、自動走行車両と一般車両を混在させてシミュレーションを行い、それぞれの平均停止時間(s)と平均旅行時間(s)を比較した。図 2 は、横軸に自動走行車両の混在率、縦軸には一般車両も含めた全車両の平均停止時間(s)を示したグラフである。全体的に自動走行車両の混在率が増加するに従って平均停止時間が減少する傾向が見られる。できるだけ赤信号で停まらないようにする自動走行車両の走行挙動が反映された結果と考えられる。混在率が 20%と 80%の場合を比較すると、約 6 秒の停止時間の短縮がみられ、率にして 12%の減少となっている。図 3 は、縦軸に平均旅行時間(s)を示したグラフであるが、この場合も自動走行車両の混在率の増加に伴って平均旅行時間も減少する傾向が見られる。ただし、混在率が 50%を超えたところで大きく減少しており、今回設定した交通量においては 40%~50%の間にその効果を飛躍させる閾値が存在すると考えられる。混在率が 20%と 80%の結果を比較すると、約 13 秒の短縮がみられ、約 11%の減少効果となっている。

以上から、信号と協調して走行する自動走行車両によって停止時間や旅行時間の短縮といった交通流の円滑化は可能であり、また、その混在率が大きくなるほど交通流の円滑化への効果が大きくなることわかった。

#### (2) AI による経路選択行動のモデル化

本研究ではミクロ交通流シミュレーションの結果から得られる交通観測データを用いて、それぞれの時間帯ごとの車両が走行すべき最適経路の判定を行った。判定手法は、時系列データの予測に適した深層学習である再帰型ニューラルネットワークの進化版である Long Short-Term Memory (LSTM)を用いた。

本研究のシミュレーションに用いるネットワークを図 4 に示す。4 つの信号交差点が存在し、車線数は片側 2 車線となっている。交通量が 1,000 台

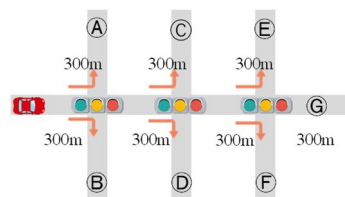


図 1 シミュレーション対象路線

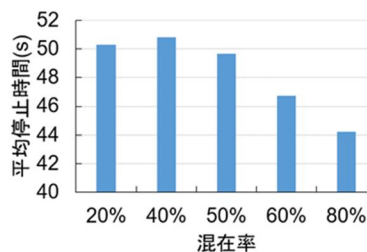


図 2 混在率別平均停止時間

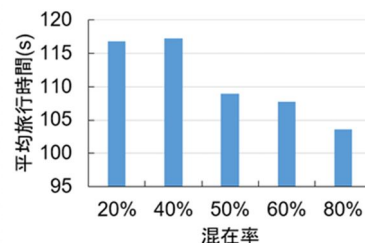


図 3 混在率別平均旅行時間

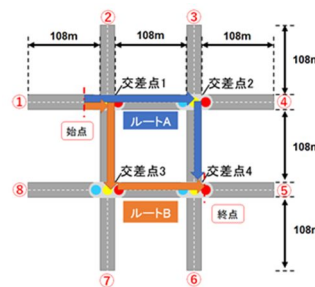


図 4 シミュレーションで用いたネットワーク

1/h で一定の場合と、約 2 時間ごとに交通量を変化させた場合の 2 つのケースを発生させた。各信号サイクルは青時間が 30 秒、右折専用時間が 4 秒、黄時間が 3 秒、赤時間が 46 秒となっている。図 4 の始点を通り、ルート A もしくはルート B を走行して終点に到達した車両のみを対象とする。交差点周辺や信号間の中間地点等に計 48 箇所の車両感知器を設置した。最適経路の事前判定における入力データには、車両感知器による通過台数、調和平均速度、占有率の 5 分間観測値を用いた。

図 5、図 6、図 7 は、横軸に反復回数、縦軸に LSTM の学習状況を判定精度として取ったものであるが、発生させた OD 交通量を変化させた場合で、それぞれ現在時刻の観測データのみを用いた場合、現在時刻と 5 分前の観測データを用いた場合、現在時刻、5 分前、10 分前の観測データを用いた場合の結果となっている。入力データによって学習の進捗は異なり、用いる入力データの種別が多くなるほど収束までに時間を要していることがわかる。全ての場合において、反復回数が 200 回ぐらいから学習の精度は一定となり、約 80% となっていることが読み取れる。

図 8 は、学習に用いなかったデータを用いて、最適経路を予測した結果の内、発生させた OD 交通量を変化させ、現在時刻、5 分前、10 分前の観測データを用いた場合の結果となっている。この図から、全体の予測精度は 60% 程度に留まっていることがわかる。ルートごとに予測精度に大きな差異は無いが、ルート A の判定の方がわずかながら正確に予測できている。入力データが少ない場合は、この場合よりもわずかに判定精度は劣ったことから、最適経路の予測には時系列の観測データを用いた方が良く考えられる。入力した OD 交通量を一定とした場合には、予測精度は約 80% となり、OD 交通量を変動させた場合よりも予測精度が高くなった。交通状況が変化する場合に、交通状況の変化を的確に表現可能な入力データの追加が必要と思われる。

本研究では、エリア全体をシステム最適状態にするための自動走行車両の経路選択行動のモデル化を目指し、簡単なネットワークを対象として最短経路を LSTM によって予測することを試みたが、その精度は十分に高くはならなかった。また、実現象に近い、交通状況が変化する場合においては、その精度はさらに低下してしまった。モデル構造の改良や入力データの追加などによって、精度向上を目指す必要がある。

### (3) ドライビングシミュレータによる運転挙動への影響計測

本研究の対象道路は、滋賀県の彦根駅前にあるアル・プラザ彦根前の道路から護国神社前の T 字路までの駅前お城通り約 420m の道路とし、過去の社会実験で観測されたデータを基にミクロ交通流シミュレーションにて交通流を再現した。この交通流内を走行する車両を安全



図 9 実空間(左)とモデルで作成した仮想空間(右)

性重視の自動走行車両が 30%、60%、90% の場合、自動走行車両の割合が 0% の場合で作成した。また、左車線をバス専用レーンなどに活用することを想定し、1 車線規制されたパターンも作成した。図 9 は、実空間とドライビングシミュレータ上で作成した仮想空間(アル・プラザ彦根前)を示した図である。

実験は、免許を保有した 20 歳代の 3 名に行ってもらった。被験者には、まず、ドライビングシミュレータの運転に慣れてもらうため、対象道路の反対車線を練習として走行してもらった後、各自動走行車両割合別に計 7 回走行してもらい、その後 1 車線規制された道路で各自動走行車両割合別に計 7 回走行してもらった。この際、各自動走行車両割合の順番は順序効果が出ないよう、ランダムに設定して実験を行った。1 回の走行ごとに被験者の交通流に対する評価を見るために 6 項目の運転意識について 5 段階で評価してもらった。アンケートの結果から、被験者は

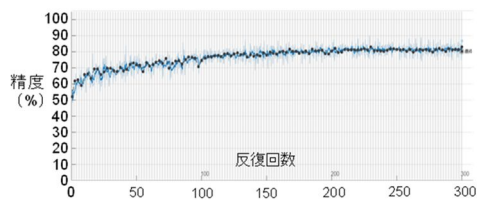


図 5 学習進行状況(交通量変化, 現在時刻の利用)

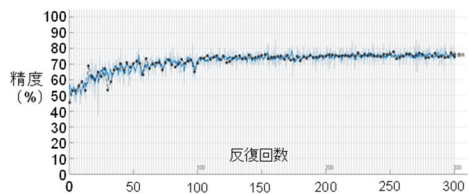


図 6 学習進行状況(交通量変化, 現在時刻, 5 分前の利用)

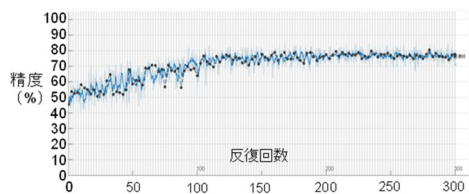


図 7 学習進行状況(交通量変化, 現在時刻, 5 分前, 10 分前の利用)

実際の 経路 結果	ルートA	24	63.6%
	ルートB	40	58.0%
	ルートA	59.2%	60.7%
	ルートB	62.5%	
		予測最適経路	

図 8 最適経路の予測結果(交通量変化, 現在時刻, 5 分前, 10 分前の利用)

2車線時よりも1車線時の方がブレーキを踏み込んだと認識しており、1車線の場合に自動走行車両の影響を大きく受けていたと思われる。

図10は、2車線道路下でのブレーキ踏み込み量と平均速度を、それぞれの特性を持った自動走行車両の混在率ごとに示したものである。自動走行車両の混在率が0%の場合と比較すると、自動走行車両が混在することによって、ブレーキ踏み込み量は下がり、平均速度は上がっていることがわかる。図11の加減速度割合を見てみると、自動走行車両が混在することによってピークが目立つようになり、走行挙動のバラつきが抑えられた交通流になったと考えられる。特に、安全性重視の自動走行車両割合が大きくなることにより、ブレーキ踏み込み量が小さくなる傾向が見られることから、いっそう円滑な交通流につながる可能性があると考えられる。

1車線規制される前と後の各自動走行車両の混在率別のPICUDの値を図12に示す。PICUDは値が大きいほど安全性が高くなる。1車線規制前後のPICUDの平均値を比較すると、安全性重視の混在率60と90%の場合を除くと、1車線規制した場合の方がPICUDの平均値が小さくなっていることがわかる。このことから、1車線を規制することにより、走行の危険性は高まると考えられる。人とは異なる走行挙動を取る自動走行車両が混在し、かつ、1車線という限られた空間で追従走行することによって、ドライバーは影響を受けることが多くなったためと考えられる。

以上から、自動走行車両の安全性重視か効率性重視かといった走行特性によって、その混在が一般ドライバーへ及ぼす影響は異なり、安全性重視の自動走行車両の混在は交通流の円滑化に寄与する可能性が示唆された。また、その混在率や車線数によってもその影響の大きさが異なることがわかり、走行が制約を受ける1車線においては、自動走行車両の混在は走行安全性を低下させる可能性があることもわかった。

#### <引用文献>

- 1) Kinoshita, Y., Inoue, S., Fujimaki, T., Simulation of the speed recommendation system for green signal passage. Proceedings of 19th Intelligent Transport Systems, CD-ROM, 2011
- 2) Asadi, B., Vahidi, A., Predictive cruise control: Utilizing upcoming traffic signal information for improving fuel economy and reducing trip time. IEEE Transactions on Control Systems Technology 19, 3, 707-714, 2010
- 3) Iwata, Y., Otake, H. and Takagi, M., Results from simulation evaluation of green wave advisory system. Proceeding of 19th ITS world Congress, CD-ROM, 2012
- 4) 塚田悟之: 信号灯色残秒時間を活用したジレンマ軽減支援方策, 交通工学, Vol.48, No.4, pp.42-51, 2013
- 5) Rakha, H., Kamalanathsharma, R. K., Eco-driving at signalized intersections using V2I communication. 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. 341-346, 2011
- 6) Kobayashi, M., Suzuki, K. and Nishimura, S., Utilization of probe data for traffic flow control. Proceedings of 19th Intelligent Transport Systems, CD-ROM, 2011
- 7) 麻生敏正, 長谷川孝明: 遅れ時間と平均アイドリング時間の関係と高度デマンド信号制御II方式の改善, 第9回ITSシンポジウム2010, pp.120-125, 2010
- 8) 工保淳也, 藤生慎, 高山純一, 中山晶一郎: 交通流シミュレータを用いた自律型自動運転自動車の交通流への影響分析, 土木計画学研究・講演集, Vol.55, CD-ROM, 2017

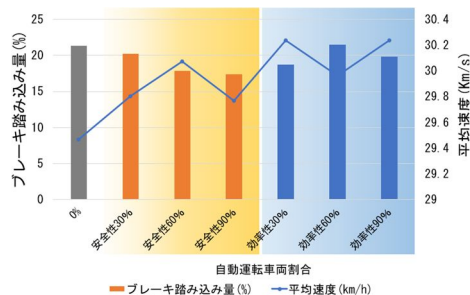


図10 2車線でのブレーキ踏み込み量と平均速度

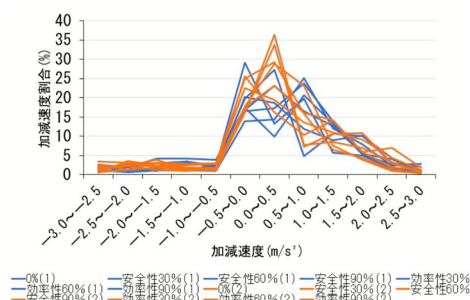


図11 自動走行車両別の加減速度割合

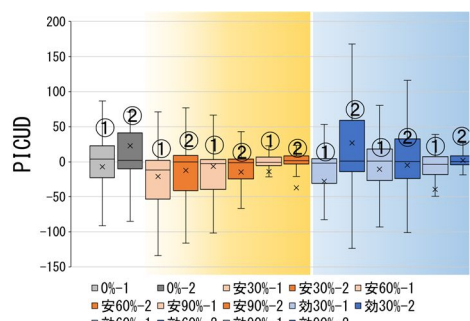


図12 車線規制前後のPICUD

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shogo Ishiguro, Yukimasa Matsumoto	4. 巻 13
2. 論文標題 Evaluation of Traffic Collision Risk and CO2 Emission Reduction under Providing Accelerator-off Indication to Multiple Vehicles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies	6. 最初と最後の頁 1679-1694
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11175/easts.13.1679	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 和田拓巳・松本幸正
2. 発表標題 複数交差点を対象とした信号制御と協調学習する自動運転車両による交通流への影響分析
3. 学会等名 令和2年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石黒祥梧・葛西裕介・松本幸正
2. 発表標題 深層学習を用いた複数交差点における車両停止状況の判定手法の検討
3. 学会等名 令和元年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋竜平・石黒祥梧・松本幸正・西尾和也
2. 発表標題 マルチエージェントによる自動運転車両が信号制御システムと協調した時の効果の把握
3. 学会等名 令和元年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shogo Ishiguro, Yukimasa Matsumoto
2. 発表標題 Evaluation of Traffic Collision Risk and CO2 Emission Reduction under Providing Accelerator-off Indication to Multiple Vehicles
3. 学会等名 13th International Conference of the Eastern Asia Society for Transportation Studies (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関