

令和 5 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14843

研究課題名（和文）高度な動的制御のためのゲーム理論に基づくネットワーク交通流解析理論の構築

研究課題名（英文）An analysis of dynamic network traffic flow based on the game theory for advanced transport management

研究代表者

佐津川 功季（Satsukawa, Koki）

東北大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：40867347

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：近年発展が著しい新技術を交通システムに望ましい形で適用するには、技術が個別利用者の交通行動とその総体であるネットワーク交通流に与える影響を解明する必要がある。本研究は、ゲーム理論を用いて、新技術導入時の交通流を利用者の挙動から演繹的に解析する手法を構築した。解析の結果、混雑課金や信号制御スキーム導入下におけるネットワーク交通流の動学的特性（収束性や安定性）を明らかにするとともに、各制御スキームの有効性について重要な知見を得ることに成功した。この過程で、ネットワーク交通問題とゲーム理論で知見が蓄積されてきたクラスとの繋がりを明らかにし、厳密な理論・数値解析を行うための基盤を整えることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の最大の特色は、ゲーム理論を通して、個別利用者のミクロな特性（交通選択行動）とネットワーク交通流のマクロな特性（均衡特性、交通性能）を繋ぐ点にある。交通工学で長年研究が進展してきた均衡理論を活用しつつ、新技術導入（例えば個車レベルの自律分散型制御）の影響評価をネットワークで行うための理論的基礎が構築される。さらに本研究は、個別利用者を取り扱う粒子モデルの、ネットワーク交通流の特性を理論的に解析する手段としての新たな可能性を提示している。加えて、本研究はゲーム理論や計算機科学などの分野と関係しており、これらに対して理論的・実践的課題を提示する点で、学術的波及効果も高い。

研究成果の概要（英文）：In order to apply new technologies to transport systems in a desirable form, it is necessary to clarify the influence of the technology on the transport behaviour of individual users and on network traffic flows. This study developed a method to deductively analyse the traffic flow at the introduction of new technology from the user's behaviour using game theory. The results of this analysis reveal the dynamic characteristics (convergence and stability) of network traffic flows under the congestion charging and signal control schemes, and provide important insights into the effectiveness of each control scheme. Moreover, we clarified the relationship between network traffic problems and game classes where knowledge about theoretical properties of equilibrium is accumulated. This contributes to the foundations for rigorous theoretical and numerical analysis.

研究分野：交通工学

キーワード：動的交通量配分 粒子モデル ゲーム理論 交通制御 Nash均衡 安定性

1. 研究開始当初の背景

ネットワーク交通流の挙動特性をより個車のレベルから解析することの重要性が高まっている。交通流は個々の道路利用者の交通選択行動 (e.g., 経路選択) の総体であり、その本質的な特性は利用者の行動に関する学習や判断に依存するものである。加えて、近年の情報通信技術の進展は、自動運転や車両間通信などの新技術を利用した個車単位での動的な交通制御の可能性を示しつつある。今後技術が円熟すれば、利用経路の直接的な制御やリアルタイムかつ自律的な制御の導入も見込まれるだろう。ただし、技術があればそれだけで良い制御ができるというものではない。利用者の選択行動と道路の交通性能の関係は複雑であり、局所的な交通状態の改善がネットワーク全体の性能をかえって悪化させることもある。高度化していく交通システムを真に社会的に望ましい形で運用するためには「どのような制御がどのようなメカニズムでネットワーク交通流を特徴付けるのか?」という交通工学の歴史的な学問的問いに対し、個車レベルから再度問いかけていく必要があるだろう。

この問いに答えるための有力なアプローチの一つが、利用者の交通行動とネットワーク交通流を「ゲーム理論」を通して結びつける、というものである。ゲーム理論は、個別の目的を持つ複数の利用者が、交通渋滞などの相互作用を考慮しつつ自身の利得を最大化するように行動を選択する状況を記述する。従って、前述した個別利用者の交通選択行動や新技術による車両挙動の変化を直接組み入れることができる。そして、ゲームの結果実現する均衡状態や定常分布を分析することで、交通流の基本特性や交通制御の影響を演繹的に解明することができる。このアプローチはその数学的取り扱いの難しさから主流ではなかったが、近年になり定式化や数値計算法の整備が目覚ましい。代表者も収束性や安定均衡の存在性といった均衡状態の数理的性質を分析する方法論を構築することに成功しているなど、その発展可能性が示されつつある。

ただし、その理論的基盤の整備は発展途上にあり、新技術の導入評価などの応用を考えると重要な「問い」が残されている。第一に、新技術による動的制御のネットワークへの影響を表現できる理論的なモデルが未整備である。車両挙動を表すモデル (粒子交通流モデル) はリンクやノード単位で個別に提案されているが、過度に複雑化しているものも多い。そのため統合時に挙動が整合するかも不明である。交通流の基本特性を解明するための、新技術制御を簡明な原則から表現するモデルが求められる。第二に、その基本特性のゲーム理論に基づく解析は十分ではない。具体的には、均衡が一意となる条件や安定均衡に対応する交通流などの均衡特性は未だ不明な点が多い。これらは交通計画・制御の基本方針を立てるための予測を行う前提となる重要な性質であり、交通流を連続体近似する従来のモデル (流体交通流モデル) では知見が著しい。流体モデル同様、均衡概念から交通流を解析し、粒子特有の性質を解明することが必要であろう。さらに、新技術導入時の性質・交通現象についても同様に解析する必要がある。これらを解決し、既存研究の知見と新技術とを統合して交通流の解析理論を再構築できれば、交通システムを合理的に運用するための基盤理論を提供できるだろう。

2. 研究の目的

本研究は、自動運転など新技術による制御を想定した粒子交通流モデルの定式化を行い、モデル特有の均衡特性や交通現象についてゲーム理論を用いた解析を行う。そして、ケーススタディを通じた新技術導入の影響評価を行い、合理的な交通システムの基盤理論としての応用可能性を示す。

3. 研究の方法

本研究の基軸は、個別ドライバーが交通渋滞などの車両間相互作用を考慮しながら交通行動を選択する戦略型ゲーム (動的交通流ゲーム) の定式化と、その特性の理論・数値解析である。まず、自動運転や車両間通信といった新技術が導入された状況における、利用者の交通選択行動と交通流ダイナミクスを簡明に表現する需要・供給モデルを、既存研究で蓄積された行動理論・交通流に関する知見を援用しながら定式化する。需要モデルは利用経路や出発時刻といった利用者の交通に関する行動選択を表現するモデルであり、供給モデルは追従挙動などリンク上の相互作用・複数のリンクが接続するノードにおける挙動を記述するモデルである。新技術の導入はこれらのモデルの構造を変化させることで表現でき、適切に構築されたモデルを統合することで動的交通流ゲームを構築する。

次に、構築した動的交通流ゲームの特性を理論解析と数値計算を併用して解析する。より具体的には、戦略型ゲームの解概念である Nash 均衡状態を交通システム評価のベンチマーク (動的交通流ゲームの結果実現する交通状態) として位置づける。そして、この均衡状態の存在性や一意性、安定性などの数理特性や効率性の解析を通して、粒子交通流モデル特有の現象解明や、新

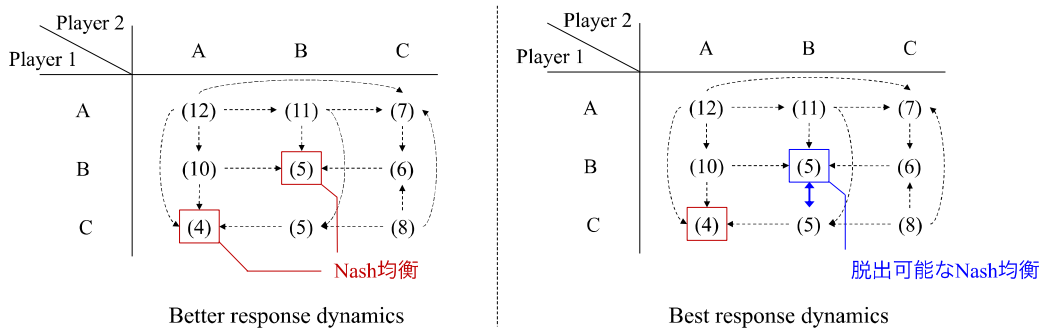


図 1：DSO ゲームの利得行列例．各要素は総旅行時間を表している．

技術評価を行う．解析にあたっては，potential game や weakly acyclic game といった，ゲーム理論の分野でその数理特性や分析手法が確立されてきたゲーム・クラスとの繋がりを明らかにすることを旨とする．これにより，動的ネットワーク交通流理論とゲーム理論との繋がりを明らかにしながら，ゲーム理論に基づくネットワーク交通流の解析理論を確立していく．

ただし，動的交通流ゲームの特性は状況設定に依存するため，中にはこうした理論解析が難しいゲームも生じる．これに対しては，交通シミュレータによる数値計算や，理論解析の手がかりを得るための伝統的な連続体近似アプローチを用いた解析などを適宜活用して解析する．

4．研究成果

(1) 進化的な混雑課金施策導入下における動的交通流ゲームの動学的性質解明

本研究では，路車間通信などの情報通信技術を活用することで各ドライバーに対して個別に混雑料金を賦課できる状況を想定する．そして，ドライバーが交通渋滞に加え課される課金額を考慮して利用経路を選択する動的交通流ゲームを定式化し，この解析を通して混雑課金施策の特性を解明する．

まず，実現した交通状態に応じて混雑料金を日々調整する進化的な課金スキームが導入された状況での動的交通流ゲーム（これを DSO ゲームと呼ぶ）を解析した．ここでは，各ドライバーが経験する交通費用関数を選択経路の社会的限界費用（経路旅行時間とその経路を走行することで増加した他車両の旅行時間）として定義している．その解析の結果，DSO ゲームは総交通費用をポテンシャルとして持つ potential game であり，かつネットワーク交通流の動的システム最適状態（全利用者の総交通費用が最小化された状態）が Nash 均衡状態の一つと対応することが示された．この結果は，進化課金スキームにおけるベンチマーク状態（=Nash 均衡）の効率性を示すとともに，ゲーム理論を活用してネットワーク交通流を解析する本アプローチの有効性を示すものでもある．すなわち，ゲーム理論の分野で均衡解に関する知見が蓄積されてきた potential game との繋がりを活用することで，既存の連続体近似アプローチでは解析できなかった動的システム最適状態の性質を理論的に明らかにすることができる．

そして実際に，本研究では上記の繋がりを活用することで，収束性や安定性といった，動的システム最適状態の動学的性質を明らかにした．より具体的には，

- ・ 各ドライバーが交通費用を改善しようと経路を日々変更していく better・best response（以降，BR・BS と略称）動学の下では，交通流は任意の状態から Nash 均衡状態（i.e. 局所最適状態）へと収束する．
- ・ さらに，BS 動学は交通費用が同じ経路間で選択変更できる，すなわち現在の交通状態の近傍をより積極的に探索するという特性を持っており，この特性ゆえに BR 動学より効率的な状態へと収束しやすい（図 1 も参考）．
- ・ 経路選択行動に揺らぎ（i.e. 交通費用を改善しない経路を誤って選択しうる）が含まれる BR 動学であるロジット動学の下では，総交通費用を大域的に最小化するシステム最適状態が，確率安定的となる．

つまり進化課金スキームでは，最適状態を事前に知らずとも，ドライバーの自律分散的かつ合理的な戦略変更により最適状態が実現・安定化することが，理論的に明らかとなった．

(2) 進化課金の特性考察のための固定的な混雑課金スキーム特性解析

続いて，前述した「進化的」な課金スキームが効率的な状態の実現・安定化にあたっていかに重要であるのかを調べる．このために，一般的に用いられている，課金額を予め設定し以降は変化させない「固定的」な課金スキームが導入された状況での動的交通流ゲーム（DUE-FCP ゲー

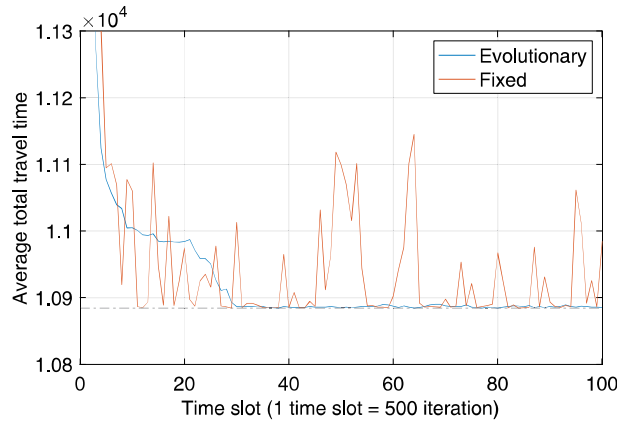


図 2：進化 (evolutionary) および固定 (fixed) 課金スキームにおける総旅行時間の挙動

ムと呼ぶ)を構築し,その動学的性質を分析するとともに進化課金スキームとの比較考察を行った.解析の結果,このゲームは,一経路にボトルネックが一つであるネットワークにおいて weakly acyclic game というゲーム・クラスに属することが明らかとなった.このゲームは potential game の拡張概念として位置付けられ,このクラスとの繋がりを通して固定課金スキームでも BR・BS 動学のような自然な進化動学による最適状態への収束性や安定性が示された.

しかしより詳細な解析の結果,進化・固定課金スキームがそれぞれ potential・weakly acyclic games であるという違いは,収束性・安定性に次のような質的な違いをもたらすことがわかった.

- ・ 固定課金スキームでは,ある既知の最適状態を達成するために固定された額が課金され,その目標状態が唯一な安定均衡となる.そのため,大域最適状態が既知でない場合は非効率的な局所状態を安定化させてしまい,揺らぎが導入されても効率的な状態へと変化できなくなる.一方,進化課金スキームでは,交通状態に応じて課金額が日々調整されることで,事前情報なしに大域最適状態を探索し,安定化することができる.
- ・ 固定課金スキームでは,車両間相互作用が非対称的であり,これは最適状態への収束にあたり,各ドライバが適切な順番で最適経路を選んでいく必要があることを意味する.しかし,日々経路を変更するドライバは通常ランダムであり,そのためスムーズに最適状態へと収束していくとは限らない.一方,進化課金スキームでは適切に調整された混雑課金を通して車両間相互作用は対称的となる.すなわち,最適状態へと向かうための特定の変更順序は存在せず,任意のドライバが自身の交通費用を改善しようと経路変更することで,交通状態も常に最適状態へと収束していく, i.e. 総交通費用が単調的に減少していく(図2も参考).

以上の成果より,最適状態を実現・安定化するにあたっての進化課金スキームの有効性が明らかになり,今後の交通制御を構築する上での重要な知見を得ることができた.

(3) 経路選択の動的交通流ゲームと確率進化ゲーム理論の関係性整理

前述した DSO・DUE-FCP ゲームに加え,交通制御が実施されず各ドライバが自身の旅行時間を最小化するように経路選択する動的交通流ゲーム(DUE ゲーム)の定式化を行い,オペレーションズ・リサーチ(OR)分野や進化ゲーム理論との関係を,既存研究のレビューも含め整理した.

体系的な整理の結果,まず,本研究課題が対象とするネットワーク交通流の特性解析は OR 分野でも(しばしば交通工学分野とは独立的に)行われているものの,その解析内容は交通流の均衡状態の静学的な特性,すなわち存在性や一意性といったものに留まっており,その状態が実際に実現するのか?実現したとしてその状態が維持されるのか?といった収束性・安定性などの動学的性質の解析は極めて限られていることが明確化された.また,これらの解析は流体交通流モデルを用いたものが主体となっている.2000年代以降になり粒子モデルに関する研究も増えており,OR 分野でも均衡解の存在性やパラドクス現象の解析といった研究が行われているが,解析対象とするネットワーク構造が限定されているなどといった限界を抱えていることも明らかとなった.以上のレビューを踏まえつつ,動的交通流ゲームと進化ゲーム理論との整理を,前述した potential・weakly acyclic games との関係性を軸に体系的に行った.解析の結果,特に DUE ゲームと DUE-FCP ゲームとの収束性・安定性に対する質的な類似性が明らかとなった.図3はこの成果をまとめたものである.

以上の成果は,粒子モデルとゲーム理論との親和性を明確な形で示したものと言える.この成果より,ゲーム理論で得られた知見を活用しての,より複雑な情報構造や学習メカニズム導入下での動学的性質の分析や,ゲーム論的な分散制御などの方向でのさらなる研究の発展が見込ま

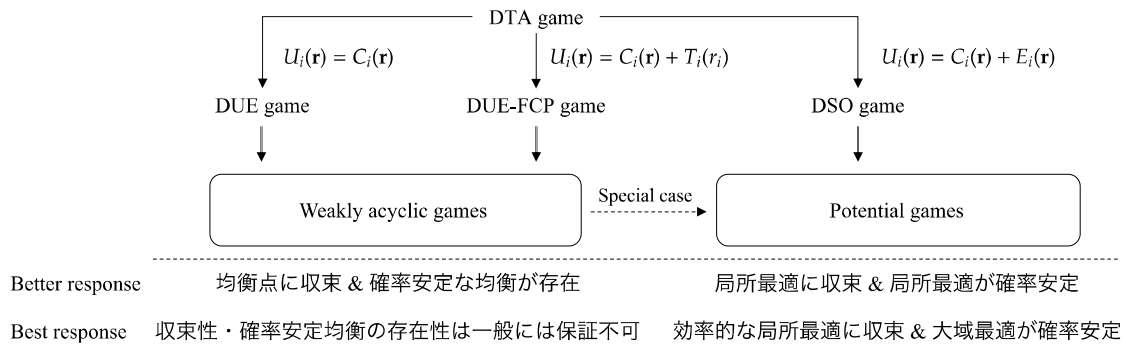


図 4：DTA ゲームとゲーム・クラスの結びつき，およびそれらの動学的性質の関係図

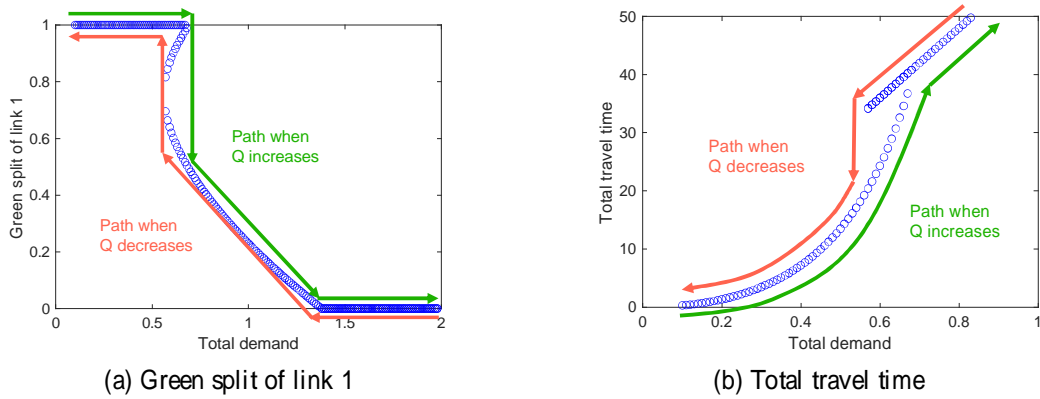


図 3：均衡状態におけるヒステリシス・ループの発生

れるなど，今後の研究の方向性に対する重要な示唆を得ることができた。

(4) 信号制御とネットワーク交通流の安定性解析

交通状況に応じて制御パラメータをリアルタイムに変化させる適応型信号制御の特性解析を行った。適応型信号制御については理論から実装まで多数の既存研究や事例があるが，ドライバの経路選択と信号制御の相互作用によっておきる現象を分析したものは必ずしも多くはない。本研究では既存研究でも特によく知られている Policy P_0 の信号制御法を対象に，その安定性や制御の動学の詳細について分析している。

簡易なネットワーク上での理論解析および数値解析の結果，まず，この信号制御により交通流は複数均衡解が存在することが確認された。特に，既存研究の多くは交通需要がネットワーク容量近くに達している近飽和状態での解析を主眼としていたのに対し，本研究は非飽和状態を解析した結果複数均衡解が存在することを見出している。そして，この複数均衡解の安定性を解析した結果，基本的には二つの安定均衡と一つの不安定均衡が存在しており，かつ安定均衡の総交通費用は異なっていることがわかった。これは，ネットワーク交通需要が増減する際に，総旅行時間が異なる状態が実現するヒステリシス・ループの発生を示唆する重要な結果である(図 4)。従って，適応型信号制御の適用時には，非飽和状態においてより望ましい交通状態・信号制御を実現するための工夫を考えることもまた重要であることが示唆された。

研究成果をまとめると，本研究は，交通流の粒子モデリングによりネットワーク交通流問題を戦略型ゲームの形式で定式化・解析することで，ネットワーク交通流理論とゲーム理論の繋がりを活用しながら交通流の特性を解明する，新たなアプローチを構築した。そして，混雑課金や信号制御スキームなどの特性や性能評価に関する新たな知見を得ることに成功した。これらはネットワーク交通流理論の分野で見ても従来にない新たな貢献と言え，査読付雑誌や会議への掲載といった形で国際的にも評価されている。今後はこのアプローチを発展させ，ネットワーク交通流解析において経路選択と並び重要な出発時刻選択問題や，シェアリング・サービスや Mobility as a Service といった新たな交通手段への適用を行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Koki Satsukawa, Kentaro Wada and David Watling	4. 巻 155
2. 論文標題 Dynamic system optimal traffic assignment with atomic users: Convergence and stability	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Transportation Research Part B: Methodological	6. 最初と最後の頁 188 ~ 209
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.trb.2021.11.001	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 該当する
1. 著者名 佐津川功季, 和田健太郎	4. 巻 62
2. 論文標題 ポテンシャル・ゲームに基づく動的システム最適配分の確率的安定性解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木計画学研究・講演集	6. 最初と最後の頁 なし
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 佐津川功季, 和田健太郎	4. 巻 33
2. 論文標題 動的ネットワーク交通流解析と確率進化ゲーム理論	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第33回RAMP数理最適化シンポジウム	6. 最初と最後の頁 15 ~ 32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 吉澤尚輝, 佐津川功季, 井料隆雅	4. 巻 66
2. 論文標題 経路選択を考慮した適応型信号制御の動学解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木計画学研究・講演集	6. 最初と最後の頁 なし
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 吉澤尚輝, 佐津川功季, 井料隆雅	4. 巻 64
2. 論文標題 経路選択と時間価値の異質性を考慮した自律分散型信号制御の評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木計画学研究・講演集	6. 最初と最後の頁 なし
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 佐津川功季, 和田健太郎
2. 発表標題 動的ネットワーク交通流解析と確率進化ゲーム理論
3. 学会等名 第33回RAMP数理最適化シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takara Sakai, Takashi Akamatsu and Koki Satsukawa
2. 発表標題 Departure time choice problems in a corridor network with heterogeneous value of schedule delay
3. 学会等名 第35回 ARSC研究発表大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takara Sakai, Takashi Akamatsu and Koki Satsukawa
2. 発表標題 Departure time choice problems in a corridor network with heterogeneous value of schedule delay
3. 学会等名 Hong Kong Society for Transportation Studies (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐津川功季, 和田健太郎
2. 発表標題 ポテンシャル・ゲームに基づく動的システム最適配分の確率的安定性解析
3. 学会等名 第62回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉澤尚輝, 佐津川功季, 井料隆雅
2. 発表標題 経路選択を考慮した適応型信号制御の動学解析
3. 学会等名 第66回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koki Satsukawa, Takamasa Iryo, Naoki Yoshizawa, Michael J. Smith and David Watling
2. 発表標題 Adjustment process of adaptive signal control strategies with route choices: a case study with Policy P_{0}
3. 学会等名 9th International Symposium on Dynamic Traffic Assignment (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Koki Satsukawa, Kentaro Wada and David Watling
2. 発表標題 Dynamic system optimal traffic assignment with atomic users: Convergence and stability
3. 学会等名 The 24th International Symposium on Transportation and Traffic Theory (ISTTT24) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉澤尚輝, 佐津川功季, 井料隆雅
2. 発表標題 経路選択と時間価値の異質性を考慮した自律分散型信号制御の評価
3. 学会等名 第64回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Koki Satsukawa (佐津川功季) Web Page https://kokisatsukawa.github.io/
--

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		
英国	University of Leeds	York University	