

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18916

研究課題名(和文) 渋滞のない近未来型道路交通システム設計のための理論基盤構築

研究課題名(英文) Building a theoretical foundation for designing congestion-free road transportation systems in the near future

研究代表者

赤松 隆 (Akamatsu, Takashi)

東北大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：90262964

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、将来の shared autonomous vehicles 普及を想定し、渋滞を発生させない交通システムを設計するための枠組として、ネットワーク通行権取引(TNP)市場とモビリティ・サービス(MS)市場から成る新たなシステムを提案する。まず、この新たなシステムの短期・長期均衡を表現する数理モデルを構築し、その特性(e.g., 均衡状態では、道路・デポでの渋滞が解消し、社会的余剰が最大化されること)を理論的に明らかにした。さらに、MS/TNP市場を実装するためのマイクロ・メカニズムを設計し、そのメカニズムに基づくダイナミクスが社会的に効率的な状態に収束することを証明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、Uberに代表されるモビリティ・サービス事業と自動運転車が融合した Shared Autonomous Vehicles の普及を想定した上で、渋滞を発生させない道路システムを設計するための基本的な枠組と理論を提供している。より具体的には、ネットワーク通行権取引市場とモビリティ・サービス市場からなる新たな交通システムの創設を提案し、このシステムの特性を理論的に解明した上で、市場実装のためのメカニズムを提示している。これは、道路混雑問題の抜本的解決をもたらす構想とそれを支える理論の研究であり、交通及び関連諸分野の今後の研究方向と理論体系を大きく転換させる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：This study proposes a novel market system as a framework for designing congestion-free transportation systems with shared autonomous vehicles (SAV). In the proposed system, tradable network permits (TNP) markets are introduced to allocate the capacity of each bottleneck among SAV providers, while matching the mobility services' supply and mobility demand of SAV users in mobility services (MS) markets. We first construct an equilibrium model to describe the states under the proposed system, and then prove that the equilibrium resource allocation is efficient in the sense that the social transportation cost is minimized. In the second part of the study, we establish the decentralized implementation mechanisms of the TNP/MS markets. Specifically, we design adjustment rules for agents' behaviors and trading (auction) rules for the markets, and then theoretically prove that the dynamics generated by these microscopic rules converge to the socially efficient equilibrium.

研究分野：土木計画，交通工学

キーワード：渋滞 自動運転 モビリティ・サービス 通行権取引市場 メカニズム・デザイン

1. 研究開始当初の背景

道路交通システムに根本的変革をもたらす可能性のある革新的技術が現れつつある。その一つは Uber に代表される *sharing economy* 型の *Mobility-as-a-Service* (MaaS) であり、もう一つは、自動運転車 (AVs) である。前者は、既に世界的に普及し、消費者の交通行動を、個人所有のクルマによる移動から事業者によって提供されるサービス購入にシフトさせつつある。この大きな流れから、後者の将来的普及は、これらを統合した *Shared Autonomous Vehicles* (SAVs) 普及という形をとる可能性が高い。

これらの技術は、消費者の交通利便性を高め、現在の道路交通システムが抱える様々な問題を解消すると期待されている。しかし、これら技術単独の発展のみでは、道路交通システム最大の問題である「渋滞」の根本的解決には繋がらない。将来、自動運転技術が完成し、個々の車両性能が向上しても、道路網の特定の箇所・時刻にその道路容量を上回る車両が集中すれば、渋滞は発生する。この基本原理は前者においても変わらない。例えば、Uber では、時刻・場所別の需要レベルに応じて、利用料金が差別化されている。この様な、*dynamic pricing* は、当初、道路混雑の緩和にも役立つと期待された。しかし、現実には、Uber 運転者が料金の高いエリアに集中し、かえって混雑を悪化させるという現象が報告されている。

この道路渋滞問題の解決には、システム全体での何らかの交通需要管理(TDM)方策が必要である。その代表は、交通工学・経済学分野で従来から研究されてきた混雑料金制度である。しかし、この方策は、その現実的な有効性を阻む本質的な問題を抱えている：適切な料金レベル設定のためには、道路管理者が利用者の詳細な選好情報を知る必要があるが、現実には、その正確な把握は不可能である。

この問題を抜本的に解消しうる新たな方策として、研究代表者は、ネットワーク通行権取引制度 (TNP システム)を提案し、その理論的特性の解明を分担者と共に研究してきた。ただし、それらの研究は、現在の道路システムにおいて個人所有車が通行権を売買する前提の限定的な理論であった。一方、将来的な SAVs 普及は、現時点では実現不可能と思われる様々な TDM スキームを実装可能とする潜在力を秘めている。従って、SAVs の混雑制御に TNP を活用する新たなスキームとそのための一般化された理論を構築できれば、合理性と将来的実現可能性の高い交通システムの設計基盤となることが期待できる。

2. 研究の目的

本研究は、将来のSAVs普及を想定した上で、渋滞を発生させない新たな道路交通システムを設計するための基礎となる枠組と理論を構築する。より具体的には、まず、SAV普及下でのシステム設計の基本的枠組として、従来の道路交通システムに加え、以下の2種の市場：

- (1) ネットワーク通行権取引 (TNP) 市場
- (2) モビリティ・サービス (MS) 市場

及び、それに付随する新たな制度(図1)を創設することを提案する。ここで、(1) は、道路の物理的条件と交通流特性から決まる地点・時刻別の道路容量をSAVに適切に配分 (*i.e.*, 需要が容量を超過する渋滞状態を解消)し、(2) は、SAV の台数と空間分布による制約から決まる地点・時刻別のサービス容量をSAV利用者に適切に配分 (*i.e.*, サービス需要と供給をマッチング) することを目的とする市場である。そして、(A) このシステムの特性を理論的に解明し、(B) 最適な市場構造・取引ルールを設計 (インプリメンテーション・メカニズムを構築)することが、本研究の目的である。

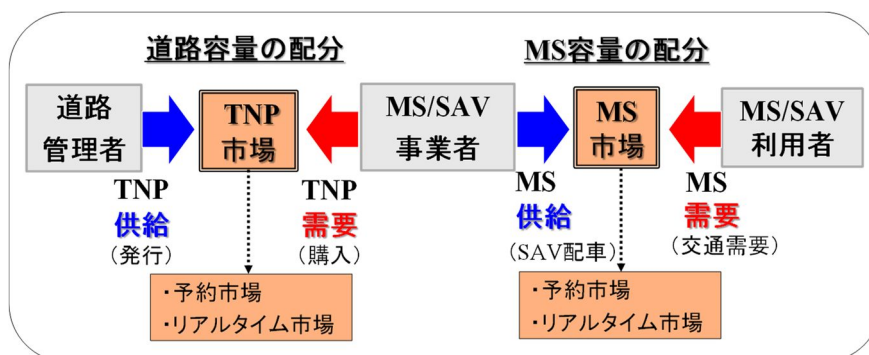


図1. 提案システムの概念的構造

3. 研究の方法

(1) の TNP市場制度とは、道路ネットワークにおいて渋滞が頻発している地点(ボトルネック)を対象として、*a)* その地点を特定の時刻のみ通行できる権利(時刻・ボトルネック別の通行権)を道路管理者が設定・発行し、*b)* その通行権を道路利用者(SAV事業者)が自由に売買できる市場を創設する、という制度である。*a)* は道路利用の予約/割当制に相当する。この制度下では、時刻別通行権の発行枚数がボトルネック到着交通流率となる。従って、通行権発行枚数をボトルネック容量以下に設定すれば、渋滞の発生を完全に抑制できる。ただし、通行権の単純な割当制では、SAV事業者の時刻・経路選択の自由を阻害し、社会経済的損失が発生しうる。その様な *a)* のみでは発生する問題を解決するために、SAV事業者の自由な通行権選択を市場取引によって担保する仕組みが *b)* である。

(2) の MS市場とは、様々な時刻・起終点間の移動を希望する SAV利用者(交通サービス需要)と SAV(交通サービス供給)を適切な価格でマッチングするための市場である。Uber 等のサービスもこの一種ではあるが、そのプラットフォームは単一企業が独占的支配力を持つ閉じた市場である。それに対して、本研究では、オープンかつ、空間的分散処理の可能な(*scalability* のある)競争市場を想定する。

本研究の (A) では、まず、SAV事業者とSAV利用者の交通選択行動、及び上記2種の市場(と道路ネットワーク)における両者の相互作用を統合的に記述したシステム・モデル(数学的には相補性問題)を定式化する。そして、そのモデルによって予測される短期均衡状態の特性を理論的に明らかにする。

より具体的には、提案システム導入状態を描く基本モデルでは、SAV利用者/事業者は、効用/利潤最大化原則に従い、各自の出発時刻・移動経路を選択する。そして、TNP・MS両市場における(動的)需給均衡条件によって、TNP・MS の価格/料金が決定される。この均衡状態は社会的余剰最大化状態と一致すると期待されるが、本研究では、その予想を数学的に証明する。

次に、この理想的状態に加え、個人所有の乗用車も混在した状態(SAV普及過程)、提案システムを導入しない状態/部分的に導入した状態等、様々なシナリオについて同様のモデルを構築する。それら状態間の経済厚生水準の比較分析によって、SAV普及政策や提案システムの導入効果を評価する。さらに、上記の短期均衡状態の解析結果をもとに、長期的な最適政策(*i.e.*,道路容量およびSAV供給台数の最適投資ルール)を理論的に明らかにする。

(B) では、道路容量とSAVサービス容量の効率的配分を保証する2種の市場のマイクロ・メカニズムを設計する。ここでは、SAV事業者の各車両とSAV利用者の携帯端末に搭載された *agent software* (AS) が経路・時刻の選択及び、市場での取引を実行するシステムを想定する。

上記システムの特性を決定する重要な要素は、(i) 自律分散的に動作する個々のASの行動ルール、及び、(ii) ASが自動実行する市場の売買取引ルール、である。本研究では、以下の特性を満たしたルール群を提示し、その理論特性を検証する: 1) 個々のASの自律性[個々のASが局所的情報と市場情報のみで行動(戦略)を決定可能]、2) AS行動ルールの簡潔性[ASの行動決定に必要な計算量が少ない]、3) AS群行動ダイナミクスの安定性[個々のAS行動の集積結果である交通流の進化ダイナミクスがシステム最適配分状態に安定的に収束する]。

この目的達成のために、本研究では、(i) のAS 行動ルール及びシステムの全体挙動を包括的に記述する枠組みとして、(集団)進化ゲーム理論に基づいたモデルを構築し、その収束性等を検証する。(ii) の市場取引ルールに関しては、組合せオークション理論の枠組を活用し、耐戦略性があり、かつ、効率的配分を達成しうる市場メカニズムを構築する。

4. 研究成果

(A) 提案システムの特性の理論的解明

(1) MS 市場システムにおける短期均衡状態の分析

モビリティ・サービスの需給を dynamic pricing によってマッチングさせる MS 市場が提供された状況を想定し、i) SAV 事業者と利用者の出発時刻選択行動、ii) SAV の乗車デポ間移動、および、iii) 道路・乗車デポでの待ち行列進展条件の動的均衡状態を相補性問題として表現するモデルを構築した。その解析の結果、均衡状態では、道路ボトルネックでの車両の待ち行列あるいは乗車デポでの利用者の待ち行列が必ず (SAV 車両数 N の多寡によらず) 発生することが示された。より具体的には、*a)* N が十分多い場合、デポでの待ち行列は発生しないものの、道路ボトルネックでの渋滞が発生し、*b)* N が減少するにつれ、道路渋滞が減少する代わりに、デポでの待ち行列が増大する(図2参照)。

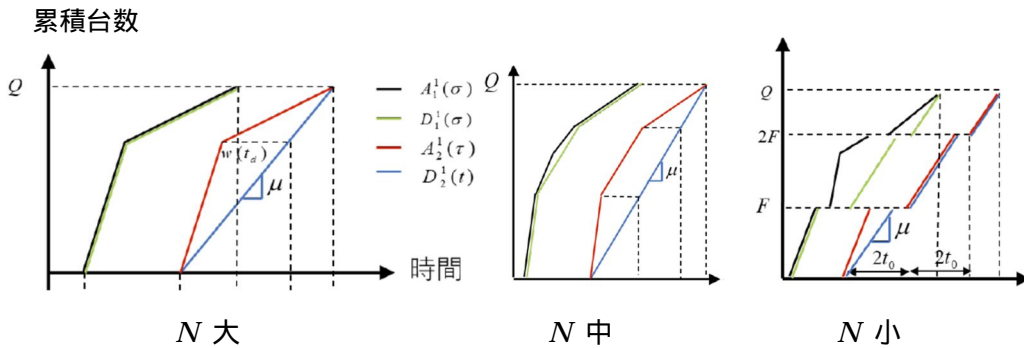


図2．MS市場のみのシステムで発生する混雑による非効率性
(単一ボトルネック・単一乗車場モデルにおける均衡累積流入・流出曲線の例示)

すなわち、MS市場における dynamic pricing のみでは、道路ボトルネックにおける混雑の外部性を解消できず、その波及的影響により、MS マッチング市場における効率的な資源配分も実現できない(乗車デポでの待ち行列発生)状態となることを理論的に明らかにした。

(2) 提案システムにおける短期均衡状態の分析

道路管理者と SAV 事業者がネットワーク通行権を取引する TNP 市場を上記の MS 市場に加えたシステム(「提案システム」)を想定し、その短期均衡状態を表現するモデルを構築した。その解析の結果、均衡状態では、社会的総交通費用(利用者のスケジュール遅れ費用、利用者の旅行費用、SAV の運航費用、SAV の維持費用の総和)を最小化するファースト・ベスト状態を達成できることが示された。また、この短期均衡状態では、道路ボトルネックにおける混雑外部性が完全に内生(渋滞は解消)され、その結果、MS マッチング市場における効率的な資源配分も実現される(乗車デポでの待ち行列も解消する)ことを理論的に証明した。

(3) 提案システムへの推移過程および長期均衡状態の分析

交通サービスが提案システムに完全に移行するまでの推移過程では、移動モード(交通機関)として、事業者により供給される SAV モードだけではなく個人所有の人力運転車(PV)モードも存在する。SAV モードには提案システム(MS+TNP 市場)が導入されており、PV モードにはいずれの市場メカニズムも導入されていない状況を想定し、その短期・長期均衡状態の特性を明らかにした。より具体的には、まず、上記状況での各モードの交通需要 Q_i ($i=1: PV, 2: SAV$) を与件とする短期均衡モデルを構築し、各モードの均衡交通費用 C_1, C_2 を SAV モードの交通需要 Q_2 の関数として導出した。次に、この均衡費用関数に基づいて長期(各モードの需要変化を考慮した)均衡を解析した結果、PV 維持費用等によって決まるパラメータ Y に応じて、複数の均衡状態(「良い均衡」と「悪い均衡」)が存在しうることが示された(図3参照)。

さらに、長期政策として、各モードに対する道路容量を増強する政策(両モード、あるいは、モード i ($i=1, 2$)のみへの投資)を比較した結果、SAV モードのみへの投資が最善であることが明らかとなった。より具体的には、この政策によって a) SAV モードが普及した「良い均衡」状態が達成され、b) TNP 収入を SAV モードの道路容量増強に全額投資することによって社会的余剰が最大化される(*i.e.*, self-financing 原則が成立する)ことが示された。

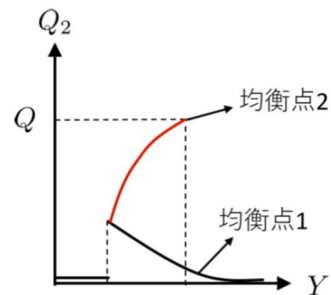


図3．複数の長期均衡状態

(B) 市場構造・取引ルール設計

(1) MS 市場と TNP 市場の取引メカニズム設計・分析

提案システムにおける短期均衡状態では、SAV 利用者の費用最小化(出発時刻選択)行動によって決まるリンク需要交通量 x と SAV 事業者の利潤最大化行動によって決まる MS リンク供給交通量 y が均衡するように MS 市場価格 p が調整され、さらに、リンク通行権需要量 (= MS リンク供給交通量 y) とリンク通行権供給量 (= リンク容量 μ) が均衡するように TNP 市場価格 e が調整される。この均衡状態は、(A) の解析で示された様に、MS 容量制約条件 ($x \leq y$) およびリンク容量制約条件 ($y \leq \mu$) のもとで社会的総交通費用 $Z(x, y)$ を最小化する線形計画問題 EP の解と等価である。

本研究では、この問題を分権(分散処理)的に解くために、(i) MS 市場における市場価格 $p(n)$ と需給 ($x(n), y(n)$) の day-to-day 調整過程モデル、および、MS 市場価格 $p(n)$ を与件とした SAV 事業者が MS を供給するために必要な TNP を購入する (ii) TNP 市場における TNP の効率的配分 y^* と均衡市場価格 e^* の決定ルール(オークション・メカニズム)から構成されるメカニズムを構築した。より具体的には、(i) では、EP の双対問題に対する劣勾配アルゴリズム (Nesterov and Shikhman (2015)) に相当する調整過程モデルを提示し、その調整ルールが需給均衡状態へ収束することを証明した。(ii) では、Wada and Akamatsu (2013) による TNP の経路バンドルに対する組合せオークション・メカニズムを改良することによって、効率的配分と耐戦略性を満たした方法を提示した。

(2) より一般的状況に対する scalability の高いマッチング・メカニズム設計・分析

上記のメカニズムでは、SAV 利用者の OD ペアを one-to-many/many-to-one パターンの場合に限定した上で、SAV のトリップ・シーケンスを単一トリップ毎に分割して扱える状況を仮定していた。この仮定を外した (many-to-many OD パターンおよび SAV のトリップ・シーケンスを明示的に扱える) モデルでは、(ii) のオークション・メカニズムにおける個々の SAV と個々の利用者の最適マッチング問題 IP の規模が (ノード数・デポ数が数百を超える規模のネットワークでは) 非常に大きくなり、そのまま解くことは困難となる。

この問題を解決するために、IP を (a) SAV 利用者を OD ペア毎に分類した集計的 (フローおよびコスト) 連続変数によって近似表現したマスター問題、および、(b) マスター問題の解を与件として OD ペア毎に分解された小規模なオークション問題 (個別 SAV と個別利用者のマッチング問題) に階層分解するアプローチを提示した。ただし、このマスター問題 (a) も、問題の規模が乗車デポ数/ノード数に関して冪乗オーダーで増加するため、通常解法では、計算可能なデポ数/ノード数には限界がある。そこで、SAV の OD ペア・シーケンスを仮想ネットワーク (VN) 上の経路として表現し、マスター問題 (a) を VN 上の容量制約付き Markov 配分モデルとして再表現する (i.e., 明示的な未知/操作変数を大幅に縮約する) 方法を考案した。そして、この縮約変換された問題を加速勾配法で解くことによって問題 (a) の解を効率的に得るアルゴリズムを開発した。理論解析及び数値実験の結果、開発したアルゴリズムは、通常定式化による解法に比べ、劇的に計算効率が向上し (図 4 参照)、現実的規模のネットワークにも十分適用可能であることが示された。

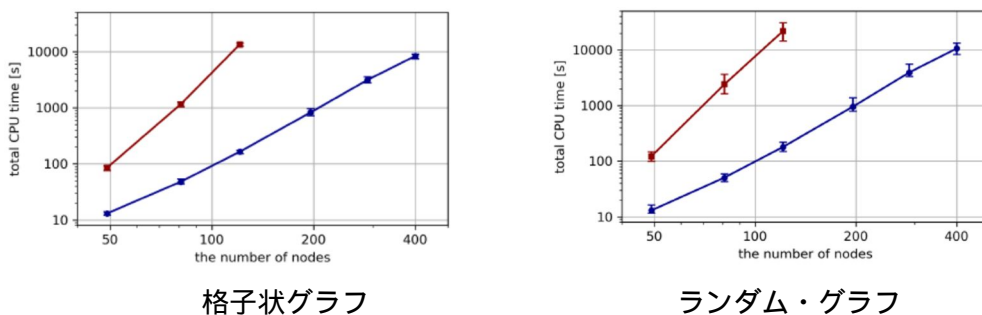


図 4 . 提案方法の計算効率性 : 従来法(赤)と提案法(青)による計算時間の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Pengfei Wang, Kentaro Wada, Takashi Akamatsu and Takeshi Nagae	4. 巻 95
2. 論文標題 Trading Mechanisms for Bottleneck Permits with Multiple Purchase Opportunities	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Transportation Research Part C: Emerging Technologies	6. 最初と最後の頁 414-430
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.07.011	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Han Gui and Takashi Akamatsu	4. 巻 16
2. 論文標題 Improving the Efficiency of Shared Mobility Service Markets using New Congestion Management Scheme	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of ITS symposium	6. 最初と最後の頁 CD-ROM
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 Haoran Fu and Takashi Akamatsu	4. 巻 7
2. 論文標題 Dynamic Traffic Assignment in a Corridor Network: Optimum vs. Equilibrium	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of International Symposium on Dynamic Traffic Assignment	6. 最初と最後の頁 CD-ROM
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 Koki Satsukawa, Kentaro Wada and Takamasa Iryo	4. 巻 125
2. 論文標題 Stochastic stability of dynamic user equilibrium in unidirectional networks: Weakly acyclic game approach	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transportation Research Part B: Methodological	6. 最初と最後の頁 229, 247
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.trb.2019.05.015	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 -

1. 著者名 Koki Satsukawa, Kentaro Wada and Takamasa Iryo	4. 巻 38
2. 論文標題 Stochastic stability of dynamic user equilibrium in unidirectional networks: Weakly acyclic game approach	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transportation Research Procedia: Journal of Transportation and Traffic Theory	6. 最初と最後の頁 401, 420
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.trpro.2019.05.022	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 -

1. 著者名 和田健太郎	4. 巻 60
2. 論文標題 動的交通均衡配分理論の近年の進展	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木計画学研究・講演集	6. 最初と最後の頁 CD-ROM
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 渡邊大樹・赤松 隆	4. 巻 60
2. 論文標題 クラウド・ソーシング配送問題における効率的マッチング	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木計画学研究・講演集	6. 最初と最後の頁 CD-ROM
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 Takashi Akamatsu, Kentaro Wada, Takamasa Iryo, Shunsuke Hayashi	4. 巻 90361
2. 論文標題 Departure time choice equilibrium and optimal transport problems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MPRA (Munich Personal RePEc Archive)	6. 最初と最後の頁 1, 35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://mpra.ub.uni-muenchen.de/90361/	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 河向隆志・酒井高良・赤松 隆	4. 巻 59
2. 論文標題 経路・出発時刻の選択を内生化した動的利用者均衡配分の効率的解法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木計画学研究・講演集	6. 最初と最後の頁 CD-ROM
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6件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Han Gui and Takashi Akamatsu
2. 発表標題 Improving the Efficiency of Shared Mobility Service Markets using New Congestion Management Scheme
3. 学会等名 ITS symposium 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Haoran Fu and Takashi Akamatsu
2. 発表標題 Dynamic Traffic Assignment in a Corridor Network: Optimum vs. Equilibrium,.
3. 学会等名 The 7th International Symposium on Dynamic Traffic Assignment (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田健太郎
2. 発表標題 動的交通均衡配分理論の近年の進展
3. 学会等名 第60回 土木計画学研究発表会 (招待講演) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桂 航・赤松 隆
2. 発表標題 Shared Mobility Service 市場の非効率性
3. 学会等名 第60回 土木計画学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡邊大樹・赤松 隆
2. 発表標題 クラウド・ソーシング配送問題における効率的マッチング
3. 学会等名 第60回 土木計画学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河向隆志・酒井高良・赤松 隆
2. 発表標題 経路・出発時刻の選択を内生化した動的利用者均衡配分の効率的解法
3. 学会等名 第59回 土木計画学研究発表会
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
研究分担者	和田 健太郎 (Wada Kentaro) (20706957)	筑波大学・システム情報系・准教授 (12102)	