

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01450

研究課題名(和文) 協調促進トークンによる行動論的メカニズムデザインの展開

研究課題名(英文) Deployment of Behavioral Mechanism Design using Cooperative Token

研究代表者

原 祐輔 (Hara, Yusuke)

東北大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：50647683

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は都市交通インフラの適切な利用を促す仕組みとして、(1)資源の効率的利用、(2)金銭のやり取り不要、(3)小さな認知負荷という性質が満たされることを目指した協調促進トークンメカニズムを提案した。協調促進トークンメカニズムは金銭支払いを行わない代わりに、トークンの再配布タイミングを変化させることで、利用者にartificial paymentsを支払わせる。このメカニズムを通して、利用者の自己選択を促す仕組みである。均衡時の解析により、最適割当を近似した効率性を達成するだけでなく、動学的学習過程を通して少ない観測情報で最適再配布タイミングを決定できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

交通インフラの適切な利用や効率的な割当を実現するためには、ロードプライシング等の金銭支払いを通じたメカニズムが一般的に想定される。しかし、金銭的支払いが社会的に受容されない状況下においても、効率的割当は引き続き重要である。本研究課題は、害復旧期の道路インフラの割当や都市交通インフラのサブスクリプション方式による割当といった適用先を想定した上で、ある日の利用価値の高い利用者の利用を促進する一方で、ある日の利用価値が低い利用者には他者へ利用権を譲ることを意図したトークンメカニズムの理論解析を行った。この結果、金銭的支払いを通じた最適割当を近似する割当結果を実現できることを示した。

研究成果の概要(英文)：This research project proposes a cooperative token mechanism to promote the appropriate use of urban transportation infrastructure, aiming to satisfy the following characteristics: (1) efficient use of resources, (2) no monetary exchange, and (3) small cognitive load. Instead of making monetary payments, the cooperative token mechanism allows users to pay artificial payments by changing the timing of token redistribution. Through this mechanism, users are encouraged to self-select. We show that the equilibrium analysis not only achieves an efficiency that approximates the optimal allocation, but also determines the optimal timing of redistribution with little observable information through a dynamic learning process.

研究分野：土木計画学・交通工学

キーワード：メカニズムデザイン 交通制御

### 1. 研究開始当初の背景

都市交通インフラの適切な利用を促す仕組みには大きく、1) ロードプライシング等の価格メカニズムを通じた金銭支払いが発生する仕組み、2) モビリティマネジメント (MM) のようなコミュニケーションを通じた行動変容を促す仕組みが考えられる。一般には、どちらのアプローチであっても、社会の構成員全体に対して同一の規制・メッセージを適用するポピュレーションアプローチが取られている。しかし、同一の利用ルールを求めるポピュレーションアプローチは特定の状況下ではうまく機能しない可能性がある。ポピュレーションアプローチと異なり、メカニズムデザインの分野ではシステム管理者には観測できない各個人の選好や移動需要を表明させることで需要を把握することで、最適な資源配分を実現することを目指す。その一例として、通行権取引制度や利用権取引制度では、供給量に合わせた通行権・利用権の発行により、交通インフラの効率的な利用を達成し、その価格はオークション市場を用いて自律的に決定される。私的情報の表明と市場に与える外部性から決定される価格を用いて、各個人に個別のアプローチを取ることで、多様な選好を持つ社会の構成員にとって望ましい割当を達成するのがメカニズムデザインの考え方である。

しかしながら、ポピュレーションアプローチも既存のメカニズムデザインの適用も望ましくない状況が存在する。例えば、災害復旧期の道路インフラの割当や都市交通インフラのサブスクリプション方式による割当では、金銭的支払いや過大な取引費用・認知負荷を利用者・管理者に求めるメカニズムが社会的に受容されないケース、歴史的に社会に既に実装されている定額サービスの中に、渋滞・混雑を防ぐメカニズムを新たに付与したいケースなど、金銭的支払いとは異なる枠組みで問題に対処したいケースが存在すると考えられる。本研究では上記のようなケースにおいて、都市交通インフラの効率的な利用を実現するメカニズムを提案する。

### 2. 研究の目的

災害復旧期の道路インフラの割当や都市交通インフラのサブスクリプション方式による割当では、金銭的支払いを通じた割当とは異なる利用ルールが必要とされる。具体的には (1) 資源の効率的利用、(2) 金銭のやり取り不要、(3) 小さな認知負荷という性質が満たされることが望ましい。本研究では、これらの性質を満たす協調促進トークンメカニズムを新たに提案し、その理論的特性を明らかにする。利用者の潜在的な移動需要に関する情報の非対称性を解消し、かつ利用者にとって認知負荷の低いメカニズムを設計することで、実効力の高いインフラ利用ルールを実現できることを示すことを目的とする。

本研究が提案する協調促進トークンメカニズムの概要を説明する (図 1)。

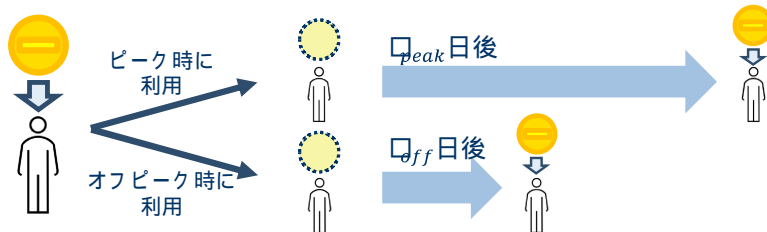


図 1 協調促進トークンメカニズムの概要

- (1) 道路管理者は、対象となる道路リンク (ボトルネック) を通行するのに必要なトークンを 1 つ、利用者全体に無料で電子的に付与する。
- (2) 利用者はその道路リンクを通過する際にはトークンを使用する必要がある。使用するとトークンは消費され、所有数は 0 となる。トークンを所有していない利用者は迂回路を利用するか、トリップ自体を取りやめる。
- (3) トークンを消費した利用者には一定期間後にトークンが再配布される。再配布までの期間は、利用者がボトルネックを通過した時の道路需要に依存し、需要の高い時間帯に利用した場合、再配布までの期間が長く (たとえば数日後)、需要の低い時間帯に利用した場合は再配布までの期間が短い (たとえば数時間後)。再配布までの期間は道路管理者によって day-to-day に調整される。
- (4) このメカニズム下において、トークンをもつ利用者は自身の選好 (希望到着時刻やその日の時間価値、トリップ後に行う活動の価値、明日以降の予定など) に従い、今日トークンを使用するかどうか、もし使うならどの時間帯に通過するかを決定する。たとえば、毎日この道路リンクを通過したい利用者は需要の低い時間帯を選択し、今日だけこの道路リンクを通過したい利用者は需要の高い時間帯を選択する。
- (5) 利用者によるトークン使用タイミングと道路管理者によるトークン再配布タイミングの調整のみによって、3 つの望ましい性質を満たした資源配分を実現する。

このメカニズムは道路管理者と利用者、および利用者間に存在するお互いの選好情報の非対

称性を明示的に開示することなく、電子的に付与されたトークンの使用タイミングと再配布タイミングのみで、望ましい資源配分を達成することを目指している。加えて、利用者にトークン使用タイミングを検討させることを通して、限られた道路容量を利用者同士での協調を促進することを期待している。

### 3. 研究の方法

#### (1) 状況設定

本研究では、単一ボトルネックと迂回路が存在するネットワークを考える。単一ボトルネックでは、ボトルネック容量以上の交通需要が集中した際には渋滞が発生する。一方で、迂回路は、旅行時間は大きい十分な容量が存在する状況を考える。

道路管理者は、対象ボトルネックの容量を適切に利用者に割り当てることにより、ボトルネックでの渋滞発生を防ぎ、社会的厚生 (= 利用者効用の総和) が最大になることを目指す。対象ボトルネックの容量は  $c$  とする。通過可能な時間帯枠を離散化し、時間帯枠の数を  $\kappa$ 、各時間帯枠を  $k$  とする。また、道路管理者は利用者に無料でトークンを電子的に配布する。時間帯枠  $k$  の再配布タイミングを  $T_k$ 、全時間帯枠の再配布タイミングの組合せを  $T = (T_1, T_2, \dots)$  と表す。

本研究が対象とする利用者は車両を 1 人 1 台運転し、簡単のため 1 日 1 回のみ上記のボトルネックまたは迂回路を通行するものとする。このような日常的な利用者を対象とし、非日常利用に関しては想定しない。利用者数は  $N$  である。これはボトルネック容量  $c$  とともに既知である。利用者がトークンを消費せず、迂回路を選択することを選択肢  $k=0$  とすると、利用者の行動の選択肢は  $k$  と表記できる。

各利用者は日々自身の選好に応じて期待効用を最大化しようと行動する。利用者の当日の効用や翌日以降の効用は離散的なタイプ  $\theta$  と呼ばれる利用者異質性により決定し、そのタイプは日々確率的に決定する。ただし、タイプを規定する確率密度関数  $f(\theta)$  は利用者全体で共通かつ既知とする。タイプ  $\theta$  の利用者が時間帯枠  $k$  を利用した際に得られる効用  $u_{\theta,k}$  とし、迂回路を通行する選択肢  $k=0$  の効用は任意のタイプで 0 と基準化する。選択肢  $k$  を選んだタイプ  $\theta$  の利用者数を  $x_{\theta,k}$  で表す。タイプ  $\theta$  の利用者総数を  $N_{\theta}$  とする。これらが本研究で考える状況設定である。

#### (2) 再配布タイミングを予見とした利用者が異質かつ不確実性がある場合の均衡状態

協調促進トークンメカニズム下における均衡状態を数理モデルとして表現し、提案メカニズムの理論解析を行う。ここでは、各個人のタイプ  $\theta$  が日々、確率的に変化する、異質性と不確実性がある状況を考える。

トークン保有のオプション価値は、トークン保有により選べる選択肢ごとの期待効用の期待値を計算し全タイプで平均したものである。利用者異質性とタイプの不確実性により、トークン保有のオプション価値  $v_{token}$  を算出する。これにより、利用者のタイプごとに、トークン使用による artificial payments を含めた、各選択肢の期待効用が記述できる。時間帯枠  $k$  の利用可能確率はトークン消費者数がボトルネック容量を上回る場合、道路管理者はボトルネック容量に合うように申請した利用者に確率的に割り当てる。一方で、トークン消費者数がボトルネック容量を下回る場合、トークン消費者は必ずボトルネックを通過できると仮定する。

提案する協調促進トークンメカニズムの性質を解析するために、本モデルが想定する状況下における均衡状態を考える。均衡状態では、全ての利用者が行動を変更するインセンティブを持たず、全ての利用者にとって自身の選択割合をどう変化させようと自身の期待効用を改善できない。この均衡状態を求める問題は、次の変分不等式問題として定式化できる。

#### [VIP1]

$$\text{Given } X \subset \mathbb{R}_+^{|\mathcal{K}| \times |\Theta|}, \mathbf{F} : X \rightarrow \mathbb{R}_+^{|\mathcal{K}| \times |\Theta|},$$

find  $\mathbf{x} \in X$  such that

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) \cdot (\mathbf{y} - \mathbf{x}) \geq 0, \quad \forall \mathbf{y} \in X \quad \text{holds,}$$

where

$$X = \left\{ \mathbf{x} \in \mathbb{R}_+^{|\mathcal{K}| \times |\Theta|} \mid \sum_{k \in \mathcal{K}} x_{\theta,k} = N_{\theta} \quad \forall \theta \in \Theta \right\},$$

$$F_{\theta,k}(\mathbf{x}) = EU_{\theta}^* - EU_{\theta,k}(\mathbf{x}).$$

### 4. 研究成果

数値実験を通して、協調促進トークンメカニズムの効率性を、通行権取引制度と早い者勝ちルールとの 2 つの割当ルールと比較する。通行権取引制度は、オークションを通して各時間帯枠の通行権を割り当てるメカニズムである。本メカニズムの特徴は最適割当が達成できることである。早い者勝ちルールは、各利用者が自身の利用確率を考えながら各選択肢の選択確率を自身の効用を最大化するように決定する。

(1) ボトルネック容量を変化させた際の効率性の比較

ボトルネック容量を変化させた際の社会的厚生を各メカニズムで比較した結果を図2に示す。任意のボトルネック容量において、社会的最適状態となるが最も効率性が高く、早い者勝ちの効率性が低くなることからわかる。協調促進トークンメカニズムにおいて最も効率性が高くなる最適な再配布タイミングはボトルネック容量  $c$  によって変わることが示されている。現実には協調促進トークンメカニズムを実装する際には、需要と容量の関係から最適な再配布タイミングをそれぞれ決定するため、全ての再配布タイミングにおける効率性の包絡線が協調促進トークンメカニズムの効率性となる。具体的には、ボトルネック容量が小さいときは相対的に需要が大きいため、高い artificial payments となる長い再配布タイミングと設定することで効率性を高められ、ボトルネック容量が大きいときは短い再配布タイミングとすることが望ましいことが示される。これは混雑料金において最適料金から外れた料金設計をした場合の挙動と類似している。このように、協調促進トークンメカニズムでは、対象ボトルネックの容量や需要に応じて再配布タイミングを調整することで、社会的最適状態を十分近似する割当を実現することができる。

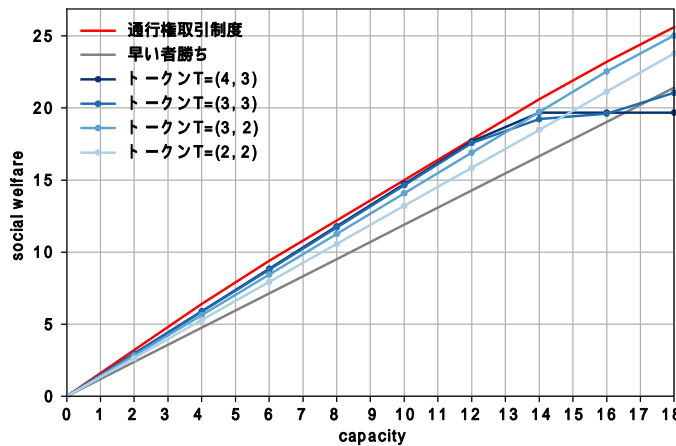


図2 キャパシティ変化時の3つのメカニズムの効率性の比較

(2) 需要パターンの違いによる比較

次に、ボトルネック容量を固定して需要パターンを変化させた際の社会的厚生を各メカニズムで比較する。トークンの再配布タイミングはそれぞれのパターンにおける最適再配布タイミングのものとして、協調促進トークンメカニズムの社会的厚生の計算を行なった。

結果を図3に示す。図3の横軸は、右にいくほど需要の分布に偏りがあることを表す。中央のあたりは3タイプのバランスが良いパターンであり、左側は需要の分布に偏りがなく、時間帯枠間での需要の差が小さいタイプに偏っているパターンである。縦軸は最適割り当てである通行権取引制度と比較した時の社会的厚生の割合を表す。また、上下のバーはそれぞれ第3, 第1四分位数である。

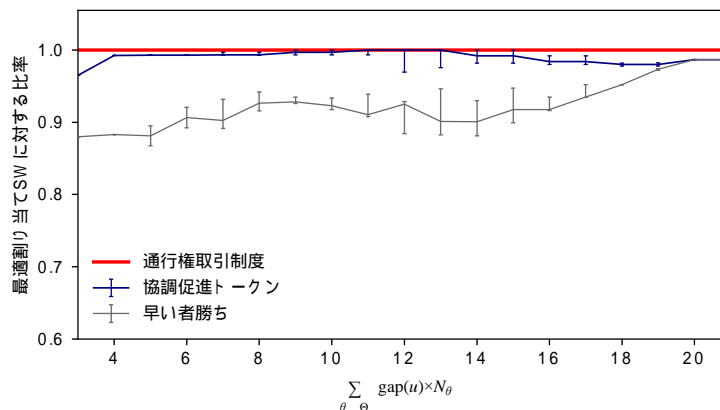


図3 需要パターン変化時の3つのメカニズムの効率性の比較

早い者勝ちでは左側や中央部の効用の高い利用者の割合が小さい場合や利用者の効用ベクトルがばらついている場合に効率性が低下する一方で、協調促進トークンメカニズムではそのような効率性の低下はほとんど起こっていないことがわかる。早い者勝ちでは、相対的に効用が低い利用者が多い状況下において、それらの利用者が利用を控えないために、相対的に効用が高い利用者への割当を阻害した結果、効率性が低下している結果を示している。

協調促進トークンメカニズムでは、各利用者が自身の効用に基づき、トークン使用・保持を選



択するため、効用の高い利用者が優先的に道路の通行ができるようになり、結果的に高い効率性を実現している。このように、特に早い者勝ちが不得意な、効用の高い利用者の割合が小さい需要パターンや、偏りなくさまざまな効用を持つ需要パターンにおいて提案メカニズムは優位性を保つことが示された。

### (3) 動学的な学習過程による定常状態への安定性

最後に、協調促進トークンの最適な再配布タイミングを動学的な学習過程を用いて解析する。利用者は他者の行動結果より学習を、供給者は利用者のトークン使用パターンから潜在的な効用を学習しながら、再配布タイミングを決定するモデルを仮定する。図4にその結果を示す。この結果から、初日に全利用者に対してトークンを配布した場合、過剰な利用が発生し、安定的なパターンになるのに数日かかるだけでなく、早い者勝ちよりも社会的厚生が低下する期間が存在することがわかる。一方で、初期トークン配布を3日間にかけて分散的に配布した場合、早い者勝ちより悪化する期間を生み出すことなく、均衡状態へ漸近的に学習できることを示した。本モデルでの学習に必要な情報は、各時間帯枠にトークンを使用した使用者数のみであり、その程度の集計的な情報のみで、利用者も供給者も均衡状態に漸近的に学習できることを示した。

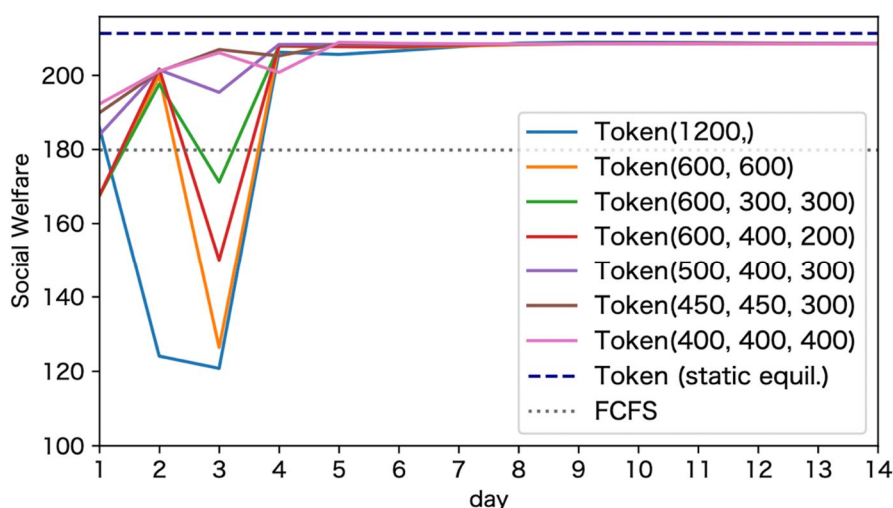


図4 動学的な学習過程における初期配布パターンが社会的厚生に与える影響

本研究の成果をまとめる。本研究はロードプライシングや通行権取引制度に代表される金銭を用いた最適割当メカニズムが用いることが適切ではない状況下において、1) 支払い不要による機会の公平性、2) 利用者自身に利用タイミングを検討させることを通した簡便な選好表明、3) インフラ容量の効率的な利用の3点を実現するための新しい割当メカニズムとして、協調促進トークンメカニズムを提案した。次に、本メカニズム下での利用者行動を異質かつ不確実性がある場合について均衡状態を定式化し、変分不等式問題によるモデル化を行なった。さらに均衡状態を求める解法アルゴリズムを提案した。効率性の観点で、均衡時の協調促進トークンメカニズムが通行権取引制度に代表される最適割当を高い精度で近似できることを示した。また、早い者勝ちと比較して、需要パターンの変化に対しても頑健であり、数値実験を通して近似メカニズムとしての実性能の高さを示した。協調促進トークンメカニズムの重要なパラメータである再配布タイミングは、動学的学習過程を用いて利用者・供給者ともに学習可能であることを示し、適切な初期配布パターンを用いることで、常に早い者勝ちよりも高い効率性を実現できることを示した。

今後の課題として、提案メカニズムの「小さな認知負荷」を検証するために実験室実験などの意思決定行動を観測可能な実験システムを実施し、提案メカニズムの性能を検証する必要がある。また、最適な再配布タイミングを決定するための供給者の学習過程において、学習速度を高めるために必要な観測情報について更なる検討が必要である。

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 0件）

1. 著者名 高野 壮稀, 原 祐輔	4. 巻 79
2. 論文標題 金銭支払いをせずに道路空間の効率的利用を実現する協調促進トークンメカニズム	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木学会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.23-20067	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 高野壮稀, 原祐輔
2. 発表標題 道路空間の効率的利用に寄与する協調促進トークンメカニズムの提案と解析
3. 学会等名 土木計画学研究・講演集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Soki Takano, Yusuke Hara
2. 発表標題 A Cooperative Token Mechanism without Payments for Efficient Road Use
3. 学会等名 26th HKSTS International Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高野壮稀, 原祐輔
2. 発表標題 協調促進トークンメカニズムのTrial-and-error制御
3. 学会等名 土木計画学研究・講演集
4. 発表年 2023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	柳沼 秀樹  (Yaginuma Hideki)  (70709485)	東京理科大学・理工学部土木工学科・准教授   (32660)	
研究 分担者	力石 真  (Chikaraishi Makoto)  (90585845)	広島大学・先進理工系科学研究科(国)・教授   (15401)	

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
---------	---------