

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

高野 壮稀¹・原 祐輔²

¹学生非会員 東北大学 大学院情報科学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
E-mail: soki.takano.p3@dc.tohoku.ac.jp

²正会員 東北大学准教授 大学院情報科学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
E-mail: hara@tohoku.ac.jp

本研究は、利用者が1人1つ持つトークンを消費することで対象の道路リンクが通行できるという仕組みにおいて、トークン消費者に対してトークンの再配布までの期間を調整することで、道路空間を効率的に利用するための利用者間の協調を促進するメカニズムについての提案と解析を行なった。まず、協調促進トークンメカニズムの概要や既存のメカニズムとの違いを示した。次に、本メカニズムの解(割り当て結果)や最適再配布タイミングの性質や求解アルゴリズムについて検討した。さらに、通行権オークションメカニズムと早い者勝ちの二者と本メカニズムのいくつかの条件における社会的厚生を比較し、本メカニズムの利用に適する条件について数値実験による解析を行なった。

Key Words: mechanism design, traffic assignment, cooperative token

1. はじめに

我が国日本は災害の多い国であり、近年も毎年のように豪雨や地震によって大規模な災害が起こっている。そのような災害からの復旧期には、高速道路などにおいて緊急車両やその他標章が交付された車両を除く一般車両が通行止めになる。これは、災害関係車両が迅速に移動するためにはやむを得ないが、この時災害関係車両の数は道路容量に対して過小であり、その一方で迂回路となる一般道では連日渋滞が発生してしまうという問題が生じる。この問題を緩和させる方法として、高速道路の通行に対して何らかのメカニズムを利用し制限をつけて、災害関係車両だけでなく一般車両も通行ができるようにする事が考えられる。

現在、技術の進展により、リアルタイムでの交通状態や利用状況のモニタリングができることで、管理者が道路の需要の変化を即時に知る事が可能となっている。加えて、スマートフォンなどの個人端末が普及していることにより、管理者から個人へのコンタクトが可能となっている。このような背景によって、従来よりきめ細かな、そしてさまざまな形でのメカニズムが実装できる社会となっている。

そこで本研究では、災害復旧期に適した、新たなメカニズムを提案し、そのメカニズムを作用させたときの挙動を解析する。ここで災害復旧時に適するというのは下記の2つの性質を満たすことをいう。

(a) 金銭の授受がない。

(b) 認知負荷や選好表明の負担が小さい。

(a) の金銭の授受に関して、平常時では時間価値の高い人が利用しやすい仕組みは合理的だが、被災した方や復旧に尽力する方から料金を収受することは公平性の面から適当ではないと考えた。また、被災地域の老若男女がメカニズムを利用することを考えると (b) の認知負荷や選好表明の負担というのは、面倒さや難しさを感じさせて管理者の想定以上にサービスの利用を遠ざけてしまい、理論上の社会厚生よりも小さくなってしまいう可能性があると考えた。

本研究の貢献は以下の3点である。

- 協調促進トークンメカニズム下での利用者行動をモデル化し、均衡解を算出した。
- 最適再配布タイミングの解法を提案した。
- 数値実験により、協調促進トークンメカニズムが他のメカニズムと比較して効率的なメカニズムとなりうる条件や傾向を示した。

2. 既往研究のレビュー

本研究で扱う道路容量の需要調整をはじめとした交通システムの最適な割当メカニズムについて、ロードプライシング(RP)制度¹⁾や通行権取引制度²⁾、利用権取引制度³⁾などいくつかのメカニズムを挙げることができる。ここでは、まずそれらのメカニズムのメリッ

トやデメリット、また災害復旧時における課題について整理する。

Vickrey¹⁾ は単一ボトルネックによる混雑緩和のため混雑税の導入を提案した。そのような実通貨を用いたロードプライシング制度は、動的料金を用いてある程度の効率的割り当てを達成する事ができる。また、現在高速道路で料金を払うのと同じような方法でも実装できるため、認知負荷はかなり小さい。一方でデメリットとして金銭のやり取りがあるため災害復旧時には適当ではない。

赤松²⁾ が提案した実通貨を用いる通行権取引制度 (TBP,TNP) は、社会的最適状態を達成できる事が最大のメリットである。ただし、これはオークションの原理を用いたメカニズムであり、オークションには選好表明コストが存在し⁵⁾、入札の結果オークション割当てと支払額から得られる効用と選好表明コストの間のトレードオフが存在すると言う問題がある。またこちらも金銭の授受を伴うためこちらも災害復旧時には適当であるとは言い難い。

上記の両者に共通な金銭の授受を伴うという問題を解決する、仮想通貨を用いたメカニズムは Verhoef⁶⁾ らや Viegas⁷⁾ により考案され、Yang et al.⁸⁾、Wu et al.⁹⁾、Nie et al.¹⁰⁾ に詳しい。これら tradable credit scheme では利用者の金銭の支払いが不要であるため、災害復旧時に適切な性質を持っており、利用者の収入に関わらず公平性があることから平常時でも市民に受け入れられやすいと考えられる。しかし、仮想通貨に慣れて価値を理解するにはある程度の期間を要するため、短期間である災害復旧時には結局あまり向かないと言えるだろう。

金銭の授受を伴わない別の方法としてはマッチング理論が挙げられるが、表明が必要で負担になるというデメリットがあり、供給側からの順位付けが困難である点からそもそも道路の需要調整には向かない。最後に、早い者勝ちは最も馴染みがあり認知負荷が低いメカニズムであるが、これはそもそも効率的な割り当てをする事ができないという問題がある。

本研究で扱う支払いなしメカニズムデザインは計算機科学の分野を中心に研究され、Dekel et al.¹¹⁾、Ariel et al.¹²⁾ の研究をもとに、Guo et al.¹³⁾ は、支払いありの単発割り当てメカニズムに基づいて支払いなし繰り返し割り当てメカニズムを可能とした、artificial payment システムを導入した。

本研究は、道路の需要調整メカニズムをはじめとする交通システムの最適な割当てメカニズムの分野の視点から、新しいメカニズムの提案を行う。提案メカニズムは、金銭の支払いが不要である点や、時間の価値を利用することで他の仮想通貨よりも認知負荷が小さい

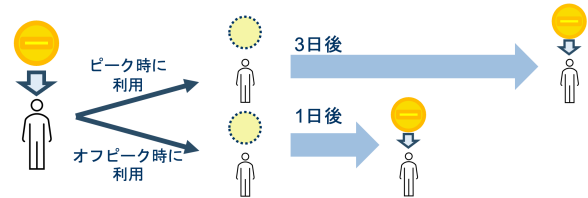


図-1 協調促進トークンの概要

と考えられる点から、災害復旧時のみならず他の場面においても優れたメカニズムとなりうると考える。また、支払いなしメカニズムデザインの分野の視点から、artificial payment システムを道路交通制御に用いるという新たな提案を行う。

3. 問題提起と基本モデル

(1) 状況設定

本研究では、災害発生により、通常時と比較して道路の供給容量の小さな状態となった、災害復旧期の1つの高速道路を対象とする。対象となる道路リンクは緊急車両等の通行のため一般車両に完全に開放することは困難であるが、一方で緊急車両のみでは交通容量に余剰が存在する状況とする。また、道路の供給交通容量は時間によって変化しないものとする。

管理者は、対象とする道路リンクの交通容量を適切に割り当てることにより道路の渋滞を防ぎ、社会的厚生が最大になることを目指す。

道路の利用者は自動車を1人1台運転し、同じ方向へは1日1回のみ通行するとする。各利用者は日々自身の選好に応じて効用を最大化しようと行動する。本研究では簡単のため、各利用者は同質で、今期の自身の選好は知覚しているとする。また自身の来期以降の選好や他人の選好について、各選好を持つ確率・割合は既知とする。

(2) 文字の定義

利用者数を N 、供給交通容量を c とする。管理者の設定する時間帯枠については、各時間帯枠を $i \in I = \{1, 2, \dots\}$ とする。利用者が道路を通行した際に知覚する効用を示す効用タイプは、 $u \in U = \{H, L\}$ とする。各時間帯に対する効用の組み合わせである選好タイプは、各要素を $k = (u_{k,1}, u_{k,2}) \in K = U \times U$ とする。利用者の今期の選択肢は、 $i' \in I' = I \cup \{0\} = \{0, 1, 2, \dots\}$ とする。この時 $i'=0$ は、いずれの時間帯枠でもサービスを利用しないことを示す。利用者が各選好タイプとなる確率を r_k と表す。各選好タイプの利用者が、期待効用に応じて自身で選択肢 i' を選ぶ確率を $p_{k,i'}$ と表す。

(3) 協調促進トークンの概要

実通貨のやりとりをせず、認知負荷が小さく、早いもの勝ちと比較して高い効率性を達成できるメカニズムとして、協調促進トークンメカニズムを提案する(図-1)。メカニズムは以下の3点の特徴を持つ。

- トークンは供給者から各想定利用者に最大1つ電子的に無料で配布される。
- 利用者はサービス利用時にトークンを消費する。
- トークンは一定期間後に再配布され、再配布タイミングは利用した時間帯に応じて変化する。

このメカニズムで管理者は、料金を動的に調整するように再配布のタイミングを調整することで交通需要をコントロールする。金銭ではなく再配布期間という時間軸を用いることが本メカニズムの特徴である。

協調促進トークンメカニズムにはいくつかのバリエーションが考えられるが、本研究ではその中から、供給量と需要量を一致させる方針とした。利用希望者は今期の効用を知覚した上でサービスを利用したい場合にトークンを消費して申告をする。その申告を受け、供給者は供給量に応じて利用の可否を確率的に割り当てる。そして割り当てられた者のみがサービスを利用できるといった方針である。この方針のメリットは、供給者が割り当て数を完全に管理することができるため、渋滞が発生せず、適切な再配布タイミングによってシステム最適配分が達成できうる点である。デメリットは、トークンを消費してもサービス利用が保証されない点である。

(4) 利用者行動のモデル化と均衡解

協調促進トークンの特徴を明らかにするため、まず $i \in I = \{1(\text{peak}), 2(\text{off peak})\}$ の2つの時間帯枠, $u \in U = \{H, L\}$ の2種類の効用タイプとした基本モデルを例にモデル化を行う。

再配布までの期間とトークンの消費について記述する。初めにそれらに関する文字の定義をする。今期を $t=0$ とし、来期以降は、 $t=1, 2, 3, \dots$ と表す。また、時間帯枠 i の再配布タイミングを T_i , 全時間帯枠の再配布タイミングの組合せを $T = (T_1, T_2, \dots, T_i, \dots)$ と表す。

次に、トークンの消費の意味について記述する。トークンを保持することのオプション価値を v_{token} とすると、 T 期目にトークンが再付与される場合の今期から見た将来期待効用は、各期の利用価値に不確実性が存在するとき、表1のように示される。

表-1より、今期にトークンを使用しなかった場合と使用した場合の差は、 $(\sum_{t=1}^{T-1} \beta^t) v_{token}$ と表せる。これが、トークン使用によるオプション価値の支払いを表し、artificial payments と呼ぶ。すなわち、トークンの使用は $(\sum_{t=1}^{T-1} \beta^t) v_{token}$ を支払うことと等しい。したがって、

表-1 各期の期待効用 (時間割引率 $0 < \beta < 1$)

今期の行動	t=1	t=2	...	t=T-1	t=T	...
トークン保持	βv_{token}	$\beta^2 v_{token}$...	$\beta^{T-1} v_{token}$	$\beta^T v_{token}$...
トークン消費	0	0	...	0	$\beta^T v_{token}$...

このことは再配布タイミング T の調整により需要のマネジメントが可能であることを意味する。

利用者行動のモデル化に必要な式を整理する。トークンを持っていることで得られるオプション価値を式(1)で表す。ここで式(2)はクロネッカーのデルタである。

$$v_{token} = \sum_{i \in I} p'_{get,i} \sum_{u \in U} \left(u \cdot \sum_{k \in K} r_k p_{k,i} \delta_{u_k,i,u} \right) \quad (1)$$

$$\delta_{u_k,i,u} = \begin{cases} 1 & \text{if } u_{k,i} = u \quad \forall k \in K \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

他者の行動を与件とした条件下で時間帯 i でトークンを利用した際に道路を使用できる確率 $p'_{get,i}$ は次の式(3)で表される。

$$p'_{get,i} = \begin{cases} \frac{c}{(N-1) \sum_k r_k p_{k,i} + 1} & \text{if } c \leq (N-1) \sum_k r_k p_{k,i} + 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

上述のトークンのオプション価値の下で各利用者の行動を記述する。利用者は自身の効用を最大化するように選択確率を決定する。選択枝の期待効用は $i'=i$ のとき、式(4)で表せる。($i'=0$ のときの効用は0に標準化)

$$EU_{k,i} = u_{k,i} * p_{get,i} - \left(\sum_{t=1}^{T_i-1} \beta^t \right) \cdot v_{token} \quad (4)$$

そのため、利用者の選択行動は式(5)で表される。

$$\begin{aligned} \max_{p_{k,i'}} \quad & EU_k = \sum_{i'} p_{k,i'} \cdot EU_{k,i} \\ & = p_{k,0} \cdot 0 + \sum_i p_{k,i} \left\{ u_{k,i} \cdot p_{get,i} - \left(\sum_{t=1}^{T_i-1} \beta^t \right) \cdot v_{token} \right\} \\ \text{s.t.} \quad & 0 \leq p_{k,i'} \leq 1, \quad \sum_{i'} p_{k,i'} = 1, \\ & i \in I = \{1, 2\}, \quad u \in U = \{H, L\}, \\ & k \in U \times U = \{HH, HL, LH, LL\} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで各選択確率に応じた時間帯 i の道路利用確率は式(6)で表される。

$$p_{get,i} = \begin{cases} \frac{c}{N \sum_k r_k p_{k,i}} & \text{if } c \leq N \sum_k r_k p_{k,i} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

均衡状態時の性質を満たすように、利用者の選択行動を算出する。その結果、式(7)のような均衡解が求め

られる。

$$P = \begin{bmatrix} p_{HH} \\ p_{HL} \\ p_{LH} \\ p_{LL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{HH,0} & p_{HH,1} & p_{HH,2} \\ p_{HL,0} & p_{HL,1} & p_{HL,2} \\ p_{LH,0} & p_{LH,1} & p_{LH,2} \\ p_{LL,0} & p_{LL,1} & p_{LL,2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

アルゴリズムは次の通りである。アルゴリズム中の行列 P は式 (7) に示す。

1. 任意の選好タイプの割合 r_k , 再配布タイミング T を設定する。
2. 任意の初期点行列 P_0 を設定する。
3. $k \in K$ に対して P を代入した (5) 式を Frank-Wolfe 法で解く。
4. 求めた p_k で P を更新する。
5. 未更新の k があれば, 3. に戻る。なければ収束判定を行う。
6. 収束していればそれが求める解である。していなければ 3. に戻る。

(5) 最適再配布タイミング

本研究では, メカニズムの効率性の評価基準として社会的厚生 (Social Welfare, SW) を用いる。SW は各個人が得られる効用の総和であり, この場合 artificial payments は考慮しないものとする。すなわち基本モデルの場合, SW は式 (8) のように表記できる。

$$SW = N \cdot \sum_i p_{get,i} \sum_u \left(u \cdot \sum_{k \in K} r_k p_{k,i} \delta_{u_{k,i},u} \right) \quad (8)$$

ここで最適な再配布タイミング T^* とは, SW が最大である再配布タイミング T を指し, SW が他の再配布タイミングとも同じ場合は各選好タイプの EU の総和 $\sum_k EU_k$ が最大である再配布タイミング T を指すとす。アルゴリズムは次の通りである。

1. $T_i = 0 : \forall i$ の初期値 T_0 を与える。
2. 与えられた T の 1 つの時間帯枠の T を 1 つ大きくした T を時間帯枠の数作る。
3. 前ステップで作った中で最良の T を T_0 とする。
4. T_0 がひとつ前の T_0 より良ければ 2. に戻る。悪ければひとつ前の T_0 が T^* 。

4. 数値実験

(1) 本研究で比較するメカニズム

本研究では協調促進トークンメカニズムの効率性を, 利用権オークション (通行権オークション) メカニズムと早い者勝ちの 2 者と比較する。

利用権オークションは, ある時間帯にそのサービスを利用する権利をオークションの仕組みを用いて買い取るメカニズムである。最も大きな特徴として, オークションの仕組みを用いるために最適割り当てが達成できるメカニズムであることを挙げる。利用権オーク

表-2 set1

$u_1 \backslash u_2$	H	M	L
H	0.075	0.1	0.1
M	0.05	0.075	0.1
L	0.05	0.05	0.6

ションのその特性から, SW を計算するには最適割り当てを求めれば良い。(9) 式より線形計画問題として表せるのでソルバー (gurobi) を用いて解ける。

$$\begin{aligned} \max_{p_k} SW &= N \cdot \sum_{i \in I} p_{get,i} \sum_{u \in U} \left(u \cdot \sum_{k \in K} r_{k,i} p_{k,i} \delta_{u_{k,i},u} \right) \\ \text{s.t.} \quad & 0 \leq p_{k,i} \leq 1, \quad p_{k,0} + \sum_i p_{k,i} = 1, \\ & i \in I = \{1, 2\}, \quad u \in U = \{H, L\}, \\ & k \in U \times U = \{HH, HL, LH, LL\}, \\ & \delta_{u_i,u} = \begin{cases} 1 & \text{if } u_{k,i} = u \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

早い者勝ちの行動原理は, 各利用者がより高い効用を知覚する選択肢を供給交通容量と関係なく選ぶというものである。複数の時間帯枠で同じ効用を知覚する場合, それらの時間帯枠を等しい確率で選択する (式 (10))。各利用者が高い効用を知覚する選択肢を選んだ状態の P から SW を求める。

$$\begin{aligned} \delta_{u_i,u_{\max}} &= \begin{cases} 1 & \text{if } u_i = u_{\max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\ p_{k,i} &= \begin{cases} \frac{1}{\sum_{i \in I} \delta_{u_i,u_{\max}}} & \text{if } u_i = u_{\max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

(2) 供給側を变化

数値実験により, トークンメカニズムと利用権オークション (=最適割り当て), 早い者勝ちの効率性を比較し, 本メカニズムが優位な条件を明らかにする。利用者数 $N=1000$ とした。はじめに, $r_k \in R$ を表-2 とした set1 について, 供給交通容量 c を 0 から 1000 まで 20 刻みで変化させ, そのときの 3 者の社会的厚生を比較する。なおトークンメカニズムの再配布タイミングは $T = (T_1, T_2)$ は (2,2), (3,2), (3,3) の 3 種類と比較した。この条件で数値実験を行なった結果を図-2 に示す。結果から, この条件では再配布タイミング $T=(2,2)$ が $0 \leq c \leq 260$ において最適割り当てを達成し, $260 \leq c \leq 480$ においても最適割り当てこそ達成されないものの, 最適再配布タイミングが変わりながら早い者勝ちに対して効率的で優位なメカニズムとなっている。

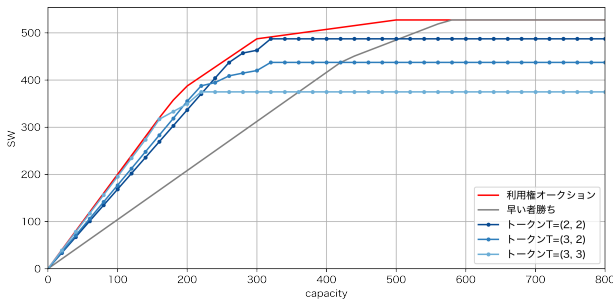


図-2 set1 のときの 3 者 SW 比較

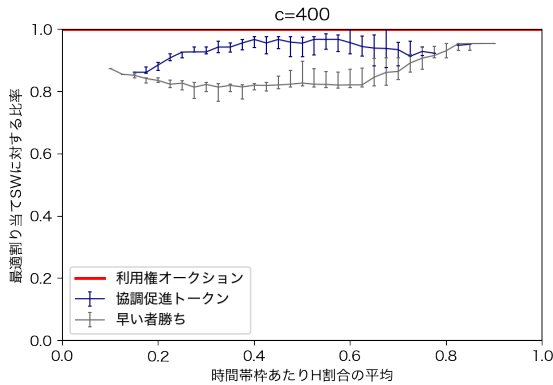


図-3 c=400 のときの 3 者 SW 比較

(3) 需要側を変化

次に $c=400$ として、時間帯枠数 2、効用タイプ数 2 の各 $r_k \in R$ を 0.05 から 0.85 まで 0.05 刻みで変化させた需要パターンにおける 3 者の社会的厚生を比較する。なおトークンメカニズムの社会的厚生は最適再配布タイミングのものとした。この条件で数値実験を行なった結果を図-3 に示す。横軸は $\frac{1}{2}\{(r_{HH} + r_{HL}) + (r_{HH} + r_{LH})\}$ とした。結果から、効用の高い選好の割合に偏りがある場合には本メカニズムは効率性が低下することがわかった。すなわち、早い者勝ちが不得意な、偏りなくさまざまな効用を持つ需要パターンにおいて本メカニズムはうまく作用すると言える。

5. おわりに

本研究の成果をまとめる。まず本研究では、災害復旧時に適した、金銭の支払いを必要とせず認知負荷の小さいメカニズムと考えられる、協調促進トークンメカニズムを提案した。

次に、本メカニズムを用いた際の簡易的なケースにおける解(割り当て結果)を求めるために、満たすべき条件や解法アルゴリズムを示した。トークンを再配布する最適なタイミングを求めるアルゴリズムも示した。

最後に、数値実験を行った。本メカニズムを利用権オークションメカニズム(最適配分)と早い者勝ちと比較した結果、条件次第では最適配分を達成し、最適配分が達成できなくても早い者勝ちと比較して効率的で

優位な場合が多くあることを示した。供給側の条件を変化させた結果、利用者数に対し供給容量の比較的小さい条件において、供給容量や需要に応じて適切に再配布タイミングを調整する事で、高い効用を知覚する利用者を優先的に通行できるようにメカニズムが作用し、最適割り当てやそれに近い効率的な割り当てを達成できることがわかった。需要側の条件を変化させた結果、早い者勝ちが不得意とする選好の偏りが無い場合において、協調促進トークンメカニズムは最適割り当てやそれに近い効率的な割り当てを達成できることがわかった。この条件は設定した状況に合致しているため、数値実験レベルでは本メカニズムが有効であるという結果が得られた。

このように、協調促進トークンメカニズムは、再配布タイミングを適切に設定することで、利用者を効率的に割り当てられる事が明らかとなったが、メカニズムを実装していくためにはまだまださまざまな課題が存在する。

一つ目に、本メカニズムでは、需要管理の方法として再配布タイミングを用いたが、金銭や他の仮想通貨と比較して時間軸方向の方が価値を判断しやすく認知負荷が低いというのは仮定にすぎず、実際に示されたわけではない。そのため今後、実験経済学に基づいた実験室実験により他のメカニズムとの認知負荷の違いについて明らかにする必要がある。二つ目に、割り当て結果の求解において、目的関数の形状を正確には把握していないために割り当て結果が正確に求められていないまたは求められないと考えられる時に原因が明確にはわかっていないという問題がある。今後は目的関数の形状を解析的に把握し、解法アルゴリズムの改良を検討する必要がある。三つ目にはそもそも本研究のメカニズムは繰り返し割り当ての問題であるため、今期だけの割り当てを考えるのだけでは不十分である。day-to-day ダイナミクスによる再配布タイミング調整過程の分析も今後の課題である。

REFERENCES

- 1) Vickrey, W. S.: Congestion theory and transport investment, *The American Economic Review*, Vol.59, No.2, pp.251-260, 1969.
- 2) 赤松 隆 and 佐藤 慎太郎 and Nguyen Xuan Long: 時間帯別ボトルネック通行権取引制度に関する研究, *土木学会論文集D*, Vol.62, No.4, pp.605-620, 2006.
- 3) 原 祐輔 and 羽藤 英二: 乗捨て型共同利用交通システムに対する利用権取引制度の設計とその解法の提案, *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, Vol.70, No.4, pp.198-210, 2014.
- 4) 赤松 隆: 一般ネットワークにおけるボトルネック通行権取引制度, *土木学会論文集D*, Vol.63, No.3, pp.287-301, 2007.
- 5) Conen, W. and Sandholm, T.: Preference elicitation in combinatorial auctions, *Proceedings of the 3rd ACM Confer-*

- ence on Electronic Commerce, EC '01, p. 256–259, New York, NY, USA, 2001, Association for Computing Machinery.
- 6) Verhoef, E., Nijkamp, P., and Rietveld, P.: Tradeable permits: Their potential in the regulation of road transport externalities, *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol.24, No.4, pp.527–548, 1997.
 - 7) Viegas, J. M.: Making urban road pricing acceptable and effective: searching for quality and equity in urban mobility, *Transport Policy*, Vol.8, No.4, pp.289–294, 2001.
 - 8) Yang, H. and Wang, X.: Managing network mobility with tradable credits, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.45, No.3, pp.580–594, 2011.
 - 9) Wu, D., Yin, Y., Lawphongpanich, S., and Yang, H.: Design of more equitable congestion pricing and tradable credit schemes for multimodal transportation networks, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.46, No.9, pp.1273–1287, 2012.
 - 10) Nie, Y. M. and Yin, Y.: Managing rush hour travel choices with tradable credit scheme, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.50, pp.1–19, 2013.
 - 11) Dekel, O., Fischer, F., and Procaccia, A. D.: Incentive compatible regression learning, Proceedings of the Nineteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, SODA '08, p. 884–893, USA, 2008, Society for Industrial and Applied Mathematics.
 - 12) Procaccia, A. D. and Tennenholtz, M.: Approximate mechanism design without money, Proceedings of the 10th ACM Conference on Electronic Commerce, EC '09, p. 177–186, New York, NY, USA, 2009, Association for Computing Machinery.
 - 13) Guo, M., Conitzer, V., and Reeves, D. M.: Competitive repeated allocation without payments, Internet and Network Economics, (Ed. by S. Leonardi), pp. 244–255, Berlin, Heidelberg, 2009, Springer Berlin Heidelberg.

(Received 2022. 3. 6)

(Accepted 2022. 3. 6)

A Proposal and Analysis of a Cooperative Token Mechanism
that Contributes to Efficient Use of Road Space

Soki TAKANO and Yusuke HARA