

# 選好誘出を考慮した 通行権取引制度の効率性に関する研究

原 祐輔<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 東北大学助教 未来科学技術共同研究センター (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3-09)  
E-mail: hara@plan.civil.tohoku.ac.jp

本研究は通行権取引制度の効率性と正直表明性を達成する VCG メカニズムに対し、利用者の選好誘出プロセスを導入することで、問題が発生することを単純なモデルにより示す。利用者の選好誘出プロセスのモデル化のために、本稿では各個人が希望到着時刻に対する不確実性を持つと仮定した確率分布として定義する。そして、不確実性を各個人が選択的に減少させられる状況を想定する。この状況下においては、各個人の希望到着時刻の不確実性の減少が必ずしも、社会的費用の改善に繋がらないことを示し、また、それらの観測方法が供給者側には存在しないことを示す。

**Key Words** : *preference elicitation, bottleneck tradable permits system, mechanism design*

## 1. はじめに

交通システムの最適な割当メカニズムの研究として、渋滞解消のための新たなメカニズムである通行権取引制度<sup>1)</sup>や利用権取引制度が提案されている。これらのメカニズムは利用者とサービス供給者間の情報の非対称性を解消する。それにより、これらの制度は社会的余剰を最大化する効率性と選好の正直表明性を満たすことが示されている。

一方で、これらのオークションメカニズムについては、選好表明コストの問題が指摘されてきた<sup>2)</sup>。これに対して、agent system による解決<sup>1)</sup>や day-to-day メカニズムによるアプローチ<sup>3)</sup>が提案されているが、計算機科学分野の既往研究<sup>2)</sup>で示されているように、組み合わせオークションにおける選好表明を実現することは容易ではない。

本研究では選好表明コストに関わるプロセスを選好誘出 (preference elicitation) として定義する。そして、選好誘出の存在を考慮した通行権取引制度では、容易には社会的余剰の最大化を達成できないことを簡単な数値計算例で示す。通行権取引制度の実社会への適用の際には選好誘出プロセスの必要性を示す。

## 2. 選好誘出

選好誘出はオークションや意思決定支援、自動エージェントソフトウェアにとって本質的な問題である。オークションでは利用者と供給者間の情報の非対称性を解消するために、オークション、特に Vickrey-Clarke-

Groves (VCG) メカニズムのもつ正直表明性を用いた入札値を利用する。しかし、多くのオークション理論に基づく解析では入札者が自身の入札値を決定するための認知コストは明示的には取り扱われていない。

本来、意思決定には選好誘出のための認知コストとその結果得られる効用との間のトレードオフが存在するはずである。このようなトレードオフを捉えた研究として、Chajewska et al. <sup>4)</sup>や Boutilier <sup>5)</sup>が存在する。彼らは効用関数上の確率分布を仮定し、その確率分布をベイズ更新するプロセスとして選好誘出の問題をモデル化した。上記の既往研究<sup>4),5)</sup>のアプローチに沿って、本稿では出発時刻選択における希望到着時刻の効用表現を行おう。

### (1) 分析対象とする交通空間条件

本稿が分析対象とする交通現象はボトルネックの上流 (例えば住宅地) から下流 (例えば CBD) へ向かう定常的な交通である。上流から下流に向かう道路には容量  $\mu$  の単一ボトルネックが存在し、全ての道路利用者はこのボトルネックを通過する。

### (2) 選好誘出下における希望到着時刻の効用表現

離散単位時間による  $m$  個の到着時刻  $\{t_1, \dots, t_m\}$  の集合を  $T$  とする。各個人はそれぞれ異なる単一の希望到着時刻  $t_w \in T$  をもつ。全個人は共通のスケジュール費用関数  $s(t, t_w)$  をもつとし、実際の到着時刻  $t$  と  $t_w$  の時間差  $|t - t_w|$  から金銭換算した費用への写像として定義される。スケジュール費用関数は一般に希望到着時刻  $t_w$  で最小値をとる凸関数とされ、同じ時間差  $|t - t_w|$

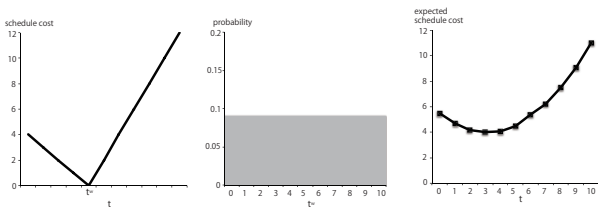


図-1 希望到着時刻分布と期待スケジュール費用の関係

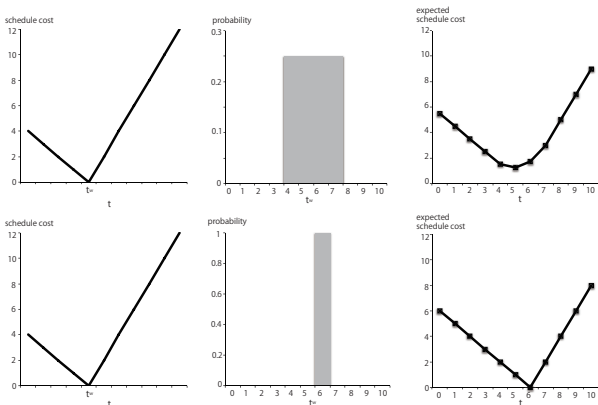


図-2 希望到着時刻の更新による期待スケジュール費用の更新

であっても、早着と遅着では遅着の方がスケジュール費用が大きいと仮定される。

次に、各個人の希望到着時刻の決定のための認知プロセスを定義する。各個人は自身の希望到着時刻  $t_w$  に対する確率分布を集合  $T$  上に持っているとして仮定し、この確率密度関数を  $p(t_w)$  と定義する。そのため、任意の実際の到着時刻  $t$  に対する期待スケジュール費用  $E[s(t)]$  は

$$E[s(t)] = \sum_{t_w \in T} s(t, t_w) \cdot p(t_w) \quad (1)$$

で表現される。図-1 にスケジュール費用関数、一様分布を仮定した希望到着時刻分布  $p(t_w)$ 、期待スケジュール費用  $E[s(t)]$  の関係を示す。

### (3) 選好誘出プロセス

本節では、各個人の選好プロセスについて記述する。自身の希望到着時刻分布の不確実性を減らすために、各個人は質問  $q$  を行うことにより確率分布を更新していくことを考えよう。ここで、質問の集合を  $Q$  とする。既往研究では standard gamble approach (von Neumann and Morgenstern) と response model を用いて質問への誤回答の可能性も考慮しているが、本稿では簡単のため誤回答は考慮しないものとする。

質問内容は「真の希望到着時刻は時刻  $l \in T$  よりも遅いか? ( $l \leq t_w$ )」とし、それに対する回答は  $R(q(l)) = \{yes, no\}$  の二値空間とする。誤回答はないため、 $\Pr(yes|q, l \leq t_w) = 1$ ,  $\Pr(yes|q, l > t_w) = 0$ ,  $\Pr(no|q, l > t_w) = 1$ ,  $\Pr(no|q, l \leq t_w) = 0$  である。質

問  $q(l)$  とその回答  $r \in R(q(l))$  が与えられたとき、ベイズの定理より、希望到着時刻分布は以下のように更新される。

$$p_r(t_w) = p(t_w|r) = \frac{\Pr(r|q, t_w)p(t_w)}{\sum_{t_w \in T} \Pr(r|q, t_w)p(t_w)} \quad (2)$$

このように、希望到着時刻の分布が更新されていくに従って、期待スケジュール費用  $E[s(t)]$  が更新される様子を図-2 に示す。

このような希望到着時刻の分布の不確実性を減少させるための質問に対する認知コストを  $c(q)$  とする。これは認知プロセス上の認知的負荷を反映している。本稿では  $c(q)$  は  $q$  の内容にかかわらず一定の  $c$  と仮定する。

### (4) 質問戦略

希望到着時刻の不確実性を減少させるために、多くの質問を行えば不確実性は減少するが、その分質問に対する認知コストは増加する。そのため、このトレードオフに対する最適停止問題が定式化できる。Boutilier<sup>5)</sup> は部分観測マルコフ決定過程 (Partially observable Markov decision process; POMDP) による定式化を行っているが、本稿では簡易的に二分探索による質問戦略を考えよう。連続する  $k$  個の質問を  $q_k$ 、連続する反応を  $r_k$  とすると、 $k+1$  番目の質問から得られる利得は

$$\pi_{k+1} = \min_t [E[s(t|q, r)]] - \min_t [E[s(t|q_{k+1}, r_{k+1})]] \quad (3)$$

で定義できる。そのため、 $\pi_{k+1} > c(q)$  を満たすまで質問を行い、満たさなくなったところで質問を停止するという戦略で人々が意思決定を行っているとして仮定する。

$k$  回の質問を行って停止した個人  $i$  の時刻  $t$  に到着する際の期待費用  $v_i(t)$  は

$$v_i(t) \equiv k \cdot c + E[s(t|q_k, r_k)] \quad (4)$$

として得られる。

## 3. ボトルネック通行権取引制度

### (1) 行動主体

本稿で解析するモデルの行動主体は道路管理者と利用者である。道路管理者は発生しうる交通渋滞を抑制し、社会的な交通費用の最小化を目指す主体である。そのため、道路管理者は後述の時刻別ボトルネック通行権を設定・発行する。

利用者は単一ボトルネックの上流から下流へボトルネックを通過して1回のトリップを行う主体である。利用者はボトルネックを通過するためには対応した時間帯別通行権を購入する必要がある。利用者は自分の不効用が最小となるように到着時刻を選択するが、前述の通り、通行権購入時点では自身の希望到着時刻に対して認知の不確実性が存在するため、期待費用を最小

とるように希望到着時刻の分布を更新し、各到着時刻への期待スケジュール費用を得る。

## (2) ボトルネック通行権の設定

時刻別ボトルネック通行権は、あらかじめ指定された時刻にボトルネックを通行できる権利である。本稿では道路管理者がこの時刻別ボトルネック通行権を設定できる状況を想定する。

道路管理者は当該ボトルネックの交通容量  $\mu$  に等しい枚数 (単位時間あたり) まで発行できるものとする。時刻別通行権の定義より、ボトルネックの流入率は交通容量以下となるため、渋滞は原理的に発生しない。道路管理者は通行権市場でのオークションを通じて、利用者に対して通行権を販売する。

## 4. 定式化

### (1) VCG メカニズム

通行権取引制度のオークションメカニズムは既往研究<sup>3)</sup>で述べられているように、VCG メカニズムによって、各利用者が正直な評価値を入札するインセンティブを与えつつ、最適な割当を達成することができる。交通システムに対する VCG メカニズムの適用の詳細については既往研究に譲るが、1) 社会的交通費用を最小化 (利用者の評価値の最大化) を達成するような割当を求める勝者決定問題を解くことで利用権の割当を求め、2) 各利用者が支払うことになる利用権価格を次式で求めることで達成される。

$$p_{VCG}^i = SC^{-i} - [SC - v^i] \quad (5)$$

ここで、 $SC$  は通行権割当時の社会的総費用、 $SC^{-i}$  は個人  $i$  がオークションに参加しなかった場合の社会的総費用、 $v^i$  は個人  $i$  の評価値である。この利用者  $i$  が支払う価格は Vickrey payments と呼ばれ、利用者  $i$  が交通システム全体に与える外部性を表している。

### (2) 勝者決定問題

各利用者の各到着時間  $t$  に対する評価値  $v^i(t)$  は前述の質問戦略より、ボトルネックに対する他者の需要とは独立で決定される。そのため、道路管理者 (オークション管理者) は提示された評価値に対して、勝者決定問題を解けば良い。勝者決定問題は以下の式で定式化される。

$$\min_x \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} v^i(t) x^i(t) \quad (6)$$

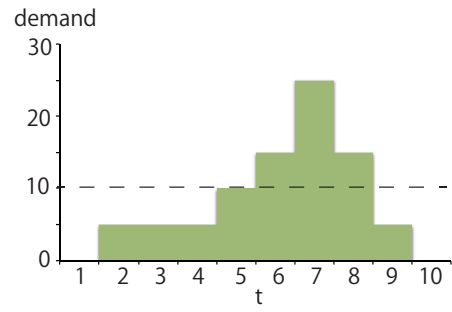


図-3 希望到着時刻分布と期待スケジュール費用の更新

subject to

$$\sum_{i \in I} x^i(t) \leq \mu \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{t \in T} x^i(t) \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (8)$$

$$x^i(t) \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (9)$$

この問題は各時間帯で容量  $\mu$  以下の割当、各個人は1枚以下の通行権の割当という条件下で各個人の期待費用の総和を最小化するような割当を行う問題である。

## 5. 具体的数値例

これまでの設定下におけるボトルネック通行権取引制度の効率性について検討するために、通行権の割当結果と各到着時刻の通行権価格について具体例を用いて議論しよう。

状況設定を以下に述べる。到着時刻が10単位時間存在し、各時刻の希望到着時刻の需要が図-3で表される状況を考えよう。各時刻のボトルネック容量は  $\mu = 10$  である。ボトルネック通行権取引制度が存在しなければ待ち行列による時間損失が発生するが、前述の通りボトルネック通行権制度のもとでは、渋滞は発生しないため待ち行列による時間損失は無視できる。全個人のスケジュール費用関数は

$$s(t|t_w) = |t - t_w| \quad \text{if } t \leq t_w \quad (10)$$

$$s(t|t_w) = 5|t - t_w| \quad \text{otherwise} \quad (11)$$

で共通とする。

各利用者は自身の効用に対し、認知の不確実性をもっている。そのため、初期の確率分布を一様分布と仮定する。このとき、前述の選好誘出プロセスと質問戦略の状況下においては、質問コスト  $c$  に応じて質問回数と更新された分布が決定する。

その結果を図-4に示す。1番上は1回目の質問で終了した場合の利用権の割当結果と通行権価格、真ん中は2回目の質問で終了した場合の利用権の割当結果と通行権価格、4回の質問を行い、完全に自身の期待到着時刻を特定した場合の割当結果と通行権価格を一番下に示す。

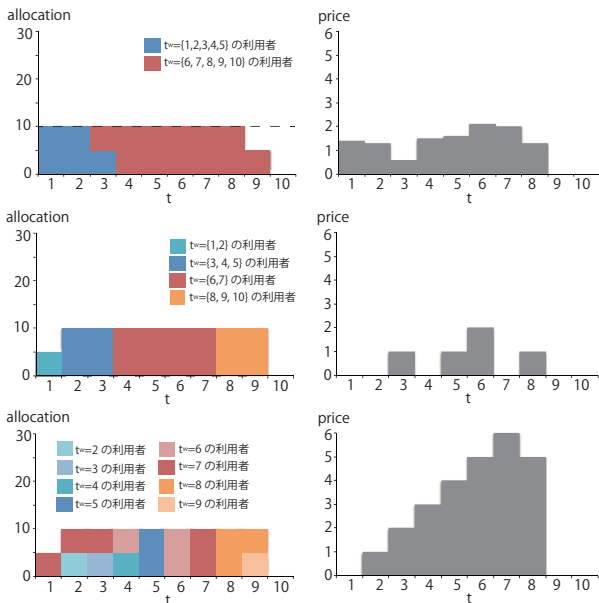


図-4 希望到着時刻分布と期待スケジュール費用の更新

それぞれボトルネックでの渋滞は発生しないが、割当結果や通行権価格に違いがあることが見て取れる。

それぞれのケースにおける全個人の総期待スケジュール費用は順に 129, 132.5, 110 であり、道路管理者の利用権収入は 108, 50, 260 である。当然、完全に期待到着時刻が特定されている場合、スケジュール費用は最小になる。しかし、必ずしも不確実性が段階的に減少するにつれて、総期待スケジュール費用が減少するわけではないことが 1 回目と 2 回目の結果から示されている。加えて、利用者は不確実性を減少させるために 1 回の質問ごとに  $c$  の認知コストを支払っているが、それらは社会的には回収されない（道路管理者収入は両者の所得移転であるため、社会的総費用には含まれない）。また、認知コストが大きい場合、真の希望到着時刻が特定されないまま利用者はオークションに入札するため、VCG メカニズムが採用されたとしても、効率性や（真の希望到着時刻が表明されないという意味での）正直表明性が満たされない。

## 6. おわりに

本稿では、出発時刻選択を行う利用者が自身の希望到着時刻に対して、認知の不確実性が存在する場合に、ボトルネック通行権取引制度の VCG メカニズムが正しく機能しないことを示した。これは不確実性の減少（質問数の増加）に対して、必ずしも総期待スケジュール費用（社会的費用）は改善されないことを示しており、利用者の不確実性の減少度合いがサービス供給者には観測できない問題に起因する。そのため、選好誘出のための認知コストの低減やメカニズム内への組み込みを行わない限り、効率的な資源配分が達成されないことを本稿の数値例を示している。

今後の課題として、不確実性の減少と総期待スケジュール費用、時間帯別需要、スケジュール費用関数の形の関連性を分析する必要がある。

### 謝辞:

本研究は JSPS 科研費 若手 B(課題番号: 25820236, 課題名: 交通需要誘出を内生化するメカニズムデザインの理論的・実験的アプローチ) の助成を受けたものです。

### 参考文献

- 1) 赤松隆・佐藤慎太郎・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, Vol.62, No.4, pp.605-620, 2006.
- 2) Sandholm, T., Boutilier, C.: Preference Elicitation in Combinatorial Auctions, In *Combinatorial Auctions* Chapter 10, pp.233-263, 2005.
- 3) 和田健太郎・赤松隆: ネットワーク通行権取引市場のオークション・メカニズム, 土木学会論文集 D3, Vol.67, No.3, pp.376-389, 2011.
- 4) Chajewska, U., Koller, D., Parr, R.: Making Rational Decisions using Adaptive Utility Elicitation, *Proceedings of the Seventeenth National Conference on Artificial Intelligence*, pp.363-369, 2000.
- 5) Boutilier, C.: A POMDP Formulation of Preference Elicitation Problems, *Proceedings of the Nineteenth National Conference on Artificial Intelligence*, pp.363-369, 2002.

(2014. 8. 1 受付)

## A STUDY OF THE EFFICIENCY OF BOTTLENECK TRADABLE PERMITS SYSTEM CONSIDERING PREFERENCE ELICITATION

Yusuke HARA