

実験的アプローチに基づく選好表明負荷の推定 と選好誘出メカニズムの影響分析

原 祐輔¹

¹正会員 東北大学大学院助教 情報科学研究科・JST さきがけ (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
E-mail: hara@plan.civil.tohoku.ac.jp

通行権・利用権取引制度などの交通サービスのオークションシステムや予約システムにおいて、利用者がもつ顕在化していない移動需要を把握することは重要である。しかしながら、オークションや予約システムなどにおいて、利用者にどのように需要を表明してもらうかの方法やユーザーインターフェイスの違いによって、利用者が表明する移動需要は異なるのではないかという仮説を持っている。そこで、本研究では、実験的アプローチに基づき、インターフェイスの違いが利用者の選好表明に与える影響を分析するとともに、1回の選好表明が利用者にとってどれくらいの認知的負荷をもつのかを構造推定によって明らかにする。また、選好誘出メカニズムの導入が、選好表明数や表明された支払い意思額に正の影響を与えることを実証的に示す。

Key Words : *preference elicitation, mechanism design, transportation service auction*

1. はじめに

交通システムは道路ネットワークであれ、公共交通システムであれ、単位時間あたりの供給量制約が存在する。これらの交通システム上で提供される交通サービスにとって、限りある容量を適切に利用者に割り当てる仕組みは重要である。そのための一つの方策として、オークションメカニズムを用いることに近年、注目が集まっている。たとえば、交通システム・サービスに対するオークションを用いたスキームの研究として、tradable credit scheme (Viegas²), Yang and Wang³), Wu et al.⁴), Nie and Yin⁵) や tradable permit system (Verhoef et al.¹), 赤松⁶), Wada and Akamatsu⁷), 原・羽藤⁸) を挙げることができる。

オークションメカニズム、特に正直表明と最適割当を実現することが理論的に示されている VCG メカニズムに関する研究は経済学や計算機科学等の多様な分野で多くの既往研究が存在する。しかし、交通サービスという観点からオークションメカニズムの問題点を一つ指摘するならば、選好表明コストの問題を挙げることができる。一般的な財と異なり、交通サービスは代替材（出発時間帯の変更、ODの変更）が多く存在する。それらすべての財に対して、入札を行うことは現実的ではなく、その結果として、真の選好と表明される選好の間に差異が発生してしまう。その差異によって、オークション自体の効率性が低下する危惧がある。原⁹) は選好の表明コストが存在すると仮定した場合のオークションの効率性の低下について、理論解析と数値シ

ミュレーションを用いて検証している。

このオークションにおける選好表明の認知コストに関して、次の3つの問題を設定することができる。

- 現実選好表明の認知コストは存在するの
- 存在するのであれば、その認知コストはどの程度と算出可能な
- そのような認知コストを低減するような選好誘出メカニズムを設計することは可能な

本研究では、この3つの問いに対して、表明メカニズム間の違いを考慮できる実験データを用いた実証分析を通して、答えを出すことを目的とする。

本研究の貢献は以下の6つである。

- 表明メカニズムの違いを分析するための実験システムを構築した (3.)
- ベイジアン自白剤に基づき、被験者の回答精度の向上を促す調査システムを導入した (4.)
- 実験的アプローチに基づき、選好表明の仕組みに応じて、人々の表明額や表明件数が異なることを実証的に示した (4.)
- 表明件数の違いが薄い市場をもたらし、オークション結果の効率性を低下させることを示した (5.)
- 選好誘出メカニズムを用いた表明メカニズムを利用することで、選好表明数を大幅に増加させ、その結果として薄い市場を予防することでオークションの効率性を改善できることを示した (4,5.)
- 選好表明の仕組みの違いから、1回の表明に繋がる認知的コストを推定した (6.)

2. 関連研究

(1) 交通オークションに関する既往研究

交通分野におけるオークション研究は既に述べた tradable permit system 以外にも、物流分野における調達オークションの研究として Xu and Huang¹⁰⁾、Huang and Xu¹¹⁾を挙げることができる。交通オークションでは一般的に物流の調達や空港の発着枠割当に関するオークション研究が多く、一般利用者にオークションを実施する研究はそれほど多くない。この理由として、一般利用者がオークションへの入札を行うことは負担が大きいためと考えられる。このような負担に対して、agent system による解決¹²⁾や day-to-day メカニズムによるアプローチ⁷⁾が提案されているが、計算機科学分野の既往研究¹³⁾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。

このような一般利用者のオークション参加を促し、最適な割当を実施するためには、選好表明は本質的な問題である。選好表明を促す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関する研究分野において研究されている。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、主に 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し、オークション管理者に対して入札値を表明する際に生じる選好表明コストは明示的には取り扱われていない。

(2) 選好誘出に関する既往研究

本来、利用者の入札行動に関わる意思決定には、入札の結果オークション割当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。このようなトレードオフを捉えた研究として、Chajewska et al.¹⁶⁾や Boutilier¹⁷⁾が存在する。Chajewska et al.¹⁶⁾は利用者の効用関数上の確率分布を仮定し、その確率分布をシステム（管理者）が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。各利用者はシステムに対して自身の評価値に関する情報を含むクエリを提示し、システムによる選好誘出メカニズムはそのクエリの情報を用いて利用者の評価値分布の更新を行う。この研究では逐次的に情報価値が最大となるようなクエリ選択を行うことを仮定しており、Boutilier¹⁷⁾は上記のベイズ更新過程を POMDP (部分観測マルコフ意思決定過程; partially observable Markov decision process) を用いてモデル化している。

本研究が扱う財は時間帯別交通サービス利用権である。時間帯別交通サービス利用権という財は各時間帯

の評価値の間に一定の関係性が存在すると仮定することが合理的である。具体的には、既存の出発時刻選択問題で用いられる希望到着時刻に対する早着コストと遅着コストを用いたスケジュール費用関数は各時間帯別の交通サービス利用権の間関係性を表している。財の評価値の間にこのような関係性が存在する時間帯別交通サービス利用権のオークションは、一般的な財に対するオークションを比べて、この関係性を用いた利用者の選好誘出が行いやすいという特徴がある。原⁹⁾は利用者のスケジュール費用に着目した選好誘出メカニズムを提案し、理論解析と数値シミュレーションによる実験を行っている。本研究では原⁹⁾によって提案された選好誘出メカニズムが実際に機能することを実データを用いて実証的に示すことを目的としている。

(3) WTP に関する既往研究

選好表明やオークションにおける入札値の精度に対する問題は、支払い意思額 (Willingness to pay; WTP) 調査の精度向上と同種の問題と考えることもできる。支払い意思額は仮想評価法 (contingent valuation method; CVM) において多くの研究蓄積が存在するが、支払い意思額の取り扱いには議論が存在する。たとえば、主観性によるバイアスやスコープ無反応性、未知の対象に対する正しい価値判断の困難性などが指摘されている。

このような主観性や未知の対象に対する価値判断を含む調査に対する精度を向上させるためのメカニズムデザインとして、Prelec¹⁴⁾が提案したベイジアン自白剤 (Bayesian Truth Serum) はインセンティブ整合的な調査手法として、有望されている。これはカテゴリカル質問への回答に対する一種のスコアリング・ルールであり、ある計算ルールによって算出される BTS スコアは回答への真実性を表している。このスコアをインセンティブに連動させることで、真実性の高い回答を引き出すことができると示されている。

これらの流れを組むものとして、マーケティング・サイエンスの分野では、Ding¹⁵⁾によるインセンティブ整合的コンジョイント分析 (Incentive-Aligned Mechanism for Conjoint Analysis) が提案されており、サーベイデザインの中にインセンティブ整合性を組み込むことが心理学やマーケティング・サイエンスなどの分野で広がっている。特に、これまで紙ベースの調査では難しかったインセンティブ整合性の導入が、Web 調査などの計算機ベースの調査によって、容易に導入されていることは一つの流れであろう。本研究では、調査サンプルの精度を一定に保つために、BTS スコアを用いたスコアリングを各被験者に対して行い、上位の被験者のみを分析に用いることで、調査精度の向上に利用した。

3. 実験設計

(1) 実験目的

本研究で実施した実験の目的は、個人が交通財・サービスに対して、選好または支払い意思額 (WTP) を表明する際に表明の認知コストが存在することを実証的に示すことである。そのため、同一条件下の被験者群に対して、異なる表明メカニズム下での表明行動を観測する。これにより、表明メカニズムの違いが表明行動 (表明件数や最大支払い意思額) に与える影響を分析できる。これにより、次の 2 つの仮説を検証する。

- 表明メカニズムの違いは表明件数に影響を与える (表明には認知コストが存在する)
- 表明メカニズムの違いはオークションの効率性に影響を与える (表明件数の低下が薄い市場を導き、割当の効率性を悪化させる)

(2) 実験概要

本研究で実施した実験の概要を示す。調査会社を通じて、Web スクリーニング調査により、首都圏での 20-59 歳の有職者を 1647 名集め、年齢構成が等しくなるようにランダムに 3 つのグループ (550 名, 547 名, 550 名) に振り分けた。次に、実験用 Web サイト内において、各被験者は 3 つの状況における交通サービスへの利用権や航空券への支払い意思額を表明してもらった。実験の最後に、被験者は各状況において、他の被験者の平均支払い意思額を予想してもらった。以上が本実験の流れである。

次に、想定した 3 つの状況の説明を行う。各状況設定の意図として、状況 1 は未知のサービスや快適性への支払い意思額、状況 2 は義務的トリップかつ自己負担が発生しない場合の支払い意思額、状況 3 は余暇トリップかつ自己負担が発生する場合の支払い意思額の調査となっている。

状況 1 は満員の通勤鉄道で必ず着席できる権利 (着席券) への支払い意思額である。仮想的な設定条件として、被験者には以下の条件が提示される。

- 被験者の会社の始業開始時刻は 9 時
- 被験者の自宅から自宅の最寄り駅までは徒歩 10 分
- 会社の最寄り駅から被験者の会社までは徒歩 5 分
- 被験者の家の最寄り駅から会社の最寄り駅までの乗車時間は 45 分間で乗り換えはなし
- 鉄道の乗車料金は片道 360 円
- 非常に混雑する鉄道のため、着席券なしでは座ることができない可能性は低い。2 週間に 1 回程度の頻度で偶然座ることが可能
- 該当路線の鉄道は 15 分おきに運行
- 乗車予定の鉄道は 5:15 発-6:00 着から 10:00 発-

10:45 着までの 20 種の着席券。15 分おき。

この条件の下で、被験者は 20 種の時間帯別着席券に対する支払い意思額を表明した。

状況 2 は出張で羽田から福岡に行く航空券への支払い意思額である。仮想的な設定条件として、被験者には以下の条件が提示される。

- 被験者は業務で福岡にある会社との打ち合わせをする必要があるため、福岡出張を命じられた
- 打ち合わせの場所は福岡空港から 15 分の場所
- 打ち合わせは 13:00 開始
- 羽田空港からの飛行機に乗って、福岡空港へ移動
- 被験者は午前中は会社に出勤する必要はなく、自宅から直接羽田空港へ向かうことが可能
- 出張の交通費は被験者の会社が支払う
- 参考として、羽田-福岡便の正規料金は 41390 円 (JAL), 50390 円 (ANA), 21900 円 (スカイマーク)
- 6:30 発-8:30 着から 11:00 発-13:00 着の 10 種、30 分おき。

この条件の下で、被験者は 10 種の航空券に対する支払い意思額を表明した。

状況 3 は余暇で羽田から沖縄に行く航空券への支払い意思額である。仮想的な設定条件として、被験者には以下の条件が提示される。

- 被験者は週末の休暇に一泊二日で沖縄 (那覇) に行くことになった
- 復路 (帰り) の飛行機は、同行者の都合のために、日曜日の 18 時に那覇空港発の便で決定済
- 土曜日に出発する往路 (行き) の飛行機の時間は、あなたの都合で決めて良い
- 往復の交通費はあなた自身が支払い
- 参考として、羽田-那覇便の正規料金は 48390 円 (JAL), 48390 円 (ANA), 24190 円 (スカイマーク)
- 6:00 発-9:00 着から 18:00 発-21:00 着の 13 種、1 時間おき。

この条件の下で、被験者は 13 種の航空券に対する支払い意思額を表明した。

(3) 表明メカニズムの違い

最後に、3 つの表明メカニズムの違いを説明する。一つ目は step-by-step 表明である。step-by-step 表明は最も単純な表明メカニズムであり、まず被験者はすべての交通サービス権の一覧上で最も望ましいものを選択する、または必要なものがなければ表明を終える。選択をした場合は、次にその利用権に対する支払い意思額を入力する。この一連のステップが終われば、選択した交通サービス権を除くすべての交通サービス権の一覧に戻り、次に望ましいものを選択するか表明を終了する。このように、選択と支払い意思額の表明を交

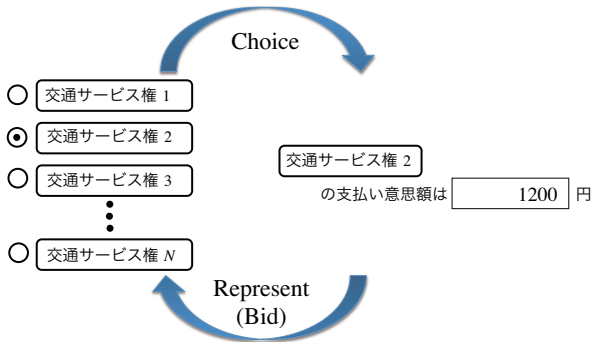


図-1 状況 1 の時間帯別支払い意思額の平均値

交通サービス権 1	の支払い意思額は	700	円
交通サービス権 2	の支払い意思額は	1200	円
交通サービス権 3	の支払い意思額は	300	円
⋮			
交通サービス権 N	の支払い意思額は	0	円

図-2 状況 1 の時間帯別支払い意思額の平均値

互に行いながら、望ましい順に交通サービス権と WTP をシステムに提示を行う。図-1 は step-by-step 表明の流れを示している。

二つ目は all-in-one 表明である。all-in-one 表明では、すべての交通サービス権の一覧に対して、最初から支払い意思額を入力するカラムが準備されている。すべてのカラムにはデフォルト値として 0 円が入力されており、被験者は自由に支払い意思額を記入することが可能である。すべての交通サービス権への表明が終わったと被験者が感じたら、終了することができる。図-2 には all-in-one 表明のイメージを示している。ste-by-step 表明と異なり、明示的に選択やランク付けは行わない。

三つ目は preference-elicitation 表明である。この表明メカニズムではまず最初に step-by-step 表明の第 1 ステップを行い、最も望ましい交通サービス権の選択とその支払い意思額の表明を行う。次に、メカニズム側が他の時間帯の交通サービス権の支払い意思額の予測を行い、その予測された価格を被験者に図示して提示する。被験者はその価格を許容する場合は終了し、修正を行いたい場合は 1 つの時間帯を選択して支払い意思額を修正する。被験者による修正に応じて、メカニズム側が他の利用権の支払い意思額の予測も修正する。このステップを終了するまで繰り返す。図-3 には preference-elicitation 表明の流れを示している。メカニズムによる予測と図示による提示を行うことが本メカニズムの特徴である。preference-elicitation 表明の具体的な手続きは原⁹⁾で提案された手法を用いた。

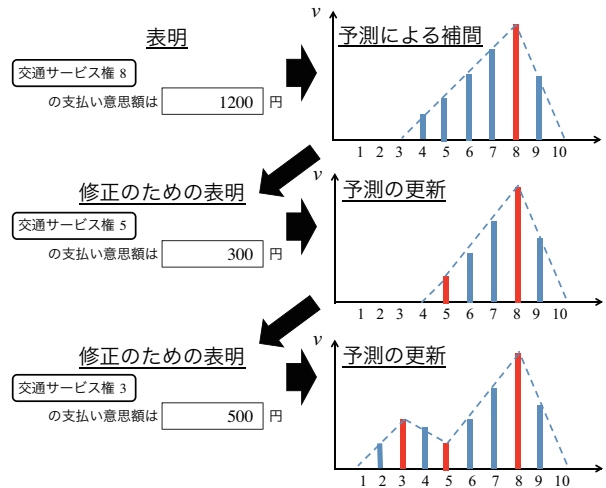


図-3 状況 1 の時間帯別支払い意思額の平均値

4. 実験結果

(1) 実験データの信頼性向上のための前処理

表明メカニズムごとに 550, 547, 550 名のサンプルが得られているが、Web 調査であるため、得られた実験データの信頼性に問題がある可能性がある。そこで、データの前処理として、ベイジアン自白剤のアプローチを用いて、信頼度の高い回答者のみ以降の分析に用いることとする。具体的には、実験の最後の設問である他者の最大支払い意思額の予測値を用いて、各サンプルの信頼度である BTS スコアを次のように計算することができる。

$$BTSScore_i = x_i \cdot \log \frac{\bar{x}}{\bar{y}} + \alpha \cdot \bar{x} \cdot \log \frac{y_i}{\bar{x}} \quad (1)$$

ここで、 $\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i/n$, $\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i/n$ である。この値は各被験者の回答の真実性をスコアしたものであり、インセンティブ整合的な回答を引き出すためのスコアである。Prelec はカテゴリカル質問に関するスコアを BTS として表現していたが、本研究では、支払い意思額とその予想値に対するスコアを BTS として表現したため、次のように拡張する。

$$BTSScore_i = P(x_i; \mu_x, \sigma_x^2) \cdot \log \frac{P(\mu_x; \mu_x, \sigma_x^2)}{P(\mu_y; \mu_y, \sigma_y^2)} + \alpha \cdot P(\mu_x; \mu_x, \sigma_x^2) \cdot \log \frac{P(y_i; \mu_y, \sigma_y^2)}{P(\mu_x; \mu_x, \sigma_x^2)} \quad (2)$$

ここで、 $P(\cdot; \mu, \sigma^2)$ は平均 μ 、分散 σ^2 の正規分布である。本実験では、回答結果と報酬の間にインセンティブ関係は設計していないが、本スコアを用いて被験者のフィルタをすることは、Web 調査の回答信頼性を高めるために有用である。そこで、表明メカニズムごとに BTS スコアの上位 400 名を抽出し、全 1200 名の回答を以降の分析対象とする。

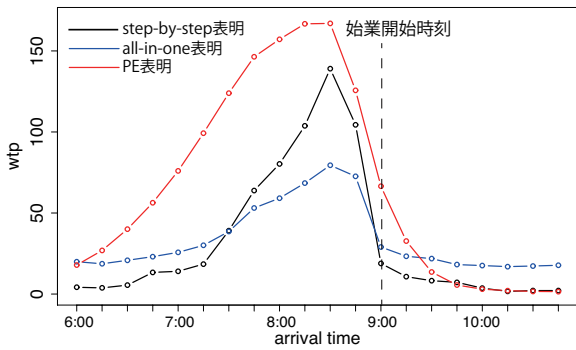


図-4 状況 1 の時間帯別支払い意思額の平均値

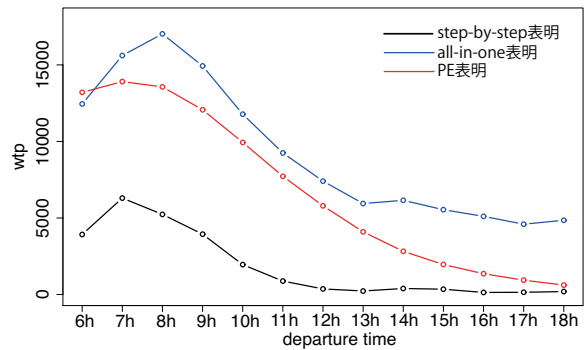


図-6 状況 3 の時間帯別支払い意思額の平均値

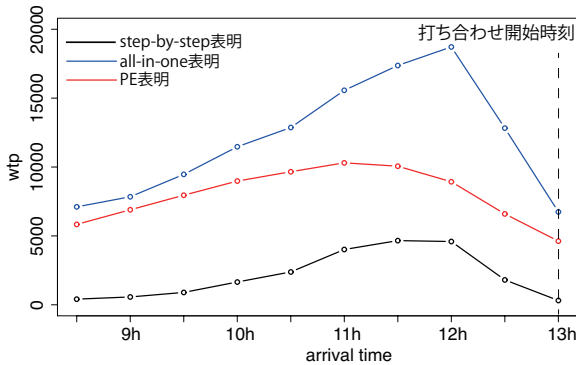


図-5 状況 2 の時間帯別支払い意思額の平均値

(2) 実験結果の分析

評価値の表明に認知コストや表明コストがないとすれば、3つの表明メカニズムの結果は同傾向を示すはずである。そこで、各表明メカニズム下において、着席券や航空券の時間帯別表明評価値の結果を最初に分析する。表明メカニズムの違いが着席券や航空券の時間帯別価格にどのような影響を与えたのかについて、各時間帯の価格を状況設定ごとに図-4、図-5、図-6に示す。状況1(鉄道着席券)では、どの表明メカニズムでも8:30に到着する着席券が最も高い評価値を回答されている。一方で、step-by-step 表明は尖ったピークの評価値分布を、all-in-one 表明は緩やかなピークをもつものに対し、preference-elicitation 表明は最も高いピークをもつとともに裾の広い分布を持っている。これらの結果から、どの表明メカニズムでも早着リスクと遅刻リスクを考慮した表明が行われているとともに、preference-elicitation 表明は時間帯に関して裾の広い分布をもつことを示している。

状況2(自己負担なしの航空券)では、step-by-step 表明は11:30に到着する航空券が最も評価値が高い時間帯であり、一方で早い時間帯の航空券の価格はほぼ0と表明されている。all-in-one 表明は12:00に到着する航空券が最も評価値が高い時間帯であり、全時間帯にわたって一定の評価値が表明されている。preference-elicitation 表明は11:00に到着する航空券が最も評価値が高い時間帯であり、全時間帯にわたって一定の評価

値が表明されている。状況2は義務的トリップかつ自己負担なしの状況設定であるため、時間帯に関して裾が厚いことが期待される。しかし、step-by-step 表明では、表明件数が少ないため、最も評価値の高い時間帯周辺にのみ表明が行われているという特徴がある。

状況3(自己負担ありの航空券)では、step-by-step 表明は7:00出発の航空券が最も評価値が高い時間帯である一方で、12時以降の航空券の価格はほぼ0と表明されている。all-in-one 表明は8:00出発の航空券が最も評価値が高い時間帯であるが、午後以降の航空券に対しても平均5000円程度の表明が行われている。preference-elicitation 表明は7:00出発の航空券が最も評価値が高い時間帯であり、時間帯が遅くなるにつれて表明評価値の平均値が低減していくことがわかる。

この3つの状況設定の結果から、表明メカニズムが異なっても最も高い評価値が表明される時間帯(以降、これらを高ランク時間帯と呼ぶ)は類似した傾向をもつ。一方で、評価値が低い時間帯(以降、低ランク時間帯と呼ぶ)の裾の厚さは表明メカニズムによって大きく異なることがわかる。この結果から、表明メカニズムは表明件数に大きな影響を与えていることが示される。そのため、次に表明メカニズム下における表明件数の分析を行う。

図-7は各状況、各表明メカニズム下における表明件数を示している。この結果が示すように、step-by-step 表明ではすべての状況設定において平均2件程度の表明しか行われぬのに対し、all-in-one 表明では2件、4件、4件、preference-elicitation 表明では4件、7件、8件と表明メカニズムによって、表明件数が異なることがわかる。特に preference-elicitation 表明は他の表明メカニズムと異なり、表明件数を大幅に増加させている。同一条件でランダムに割り振られた被験者であるため、これは preference-elicitation 表明によって表明数が増加しているというよりは、むしろ step-by-step 表明や all-in-one 表明では表明の認知コストによって、低ランク時間帯については被験者が積極的に表明しないことを表している。

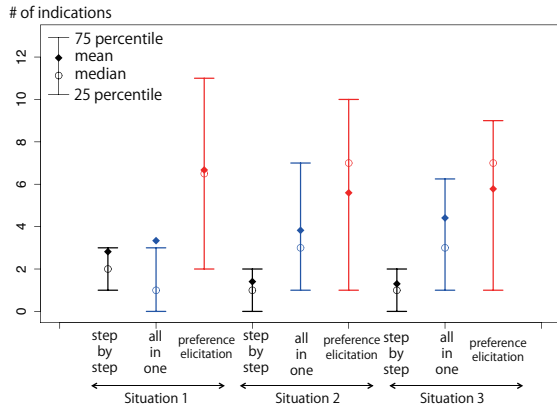


図-7 各状況，各表明メカニズム下における表明件数の分布

以上より、「表明メカニズムの違いは表明件数に影響を与える」という仮説が支持され、preference-elicitation 表明によって表明されている評価値を真とすると、単純な表明メカニズムでは表明の認知コストによって、表明件数が減少するということが実証的に示された。

5. 選好誘出メカニズムがオークション結果に与える影響

選好誘出メカニズムの存在によって、選好表明数が異なること、そしてその影響を受けて、低ランク時間帯の交通サービス権には表明されないため、その支払い意思額の平均値が低下することが示された。この傾向が、交通サービス権の割当（オークションの結果）に与える影響について分析する。

利用者は各設定において、ただ1つの交通サービス権のみを入手したいと考えていると仮定する。これは実験設定と同様である。次に、交通サービスオークションの管理者は社会的厚生を最大化するような交通サービス利用権の割当を行う主体とする。ここで、社会的厚生とは、各利用者がもつ各交通サービス権への評価値の総和として定義する。この定義はオークション理論における一般的な研究の定義と同様である。このとき、この割当問題は次のように記述できる。

$$W(\mathbf{v}) = \max_{\mathbf{x}} \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} v^i(t) \cdot x^i(t) \quad (3)$$

subject to

$$\begin{aligned} \sum_{t \in T} x^i(t) &\leq 1 && \forall i \in I \\ \sum_{i \in I} x^i(t) &\leq \mu && \forall t \in T \\ x^i(t) &\in \{0, 1\} && \forall i \in I, \forall t \in T \end{aligned}$$

ここで、 $\mathbf{v}^i = (v^i(1), \dots, v^i(t), \dots, v^i(|T|))$ は利用者 $i \in I$ の私的評価値ベクトル、 $x^i(t) \in \{0, 1\}$ は利用者 i の時間帯 t の交通サービス利用権の割当結果を示す離散変数である。私的評価値ベクトルは非負 ($\mathbf{v}^i \geq \mathbf{0}$) で

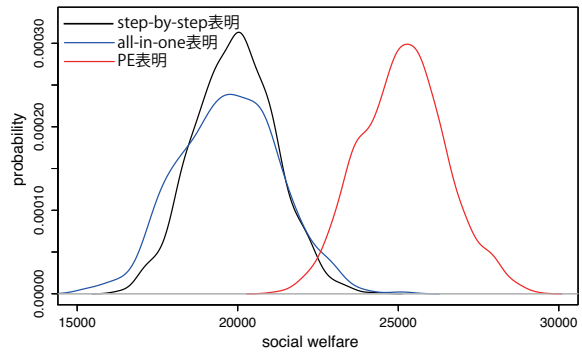


図-8 状況 1 における社会的厚生 of 表明ごとの分布

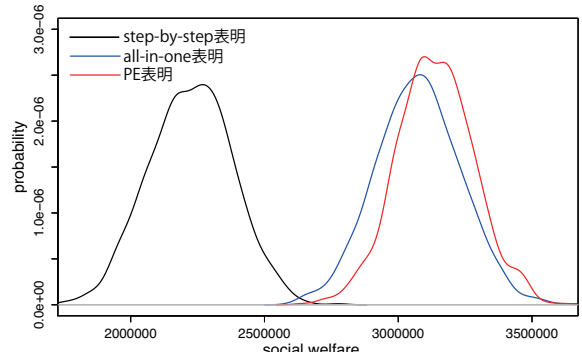


図-9 状況 2 における社会的厚生 of 表明ごとの分布

あると仮定する。制約条件は各利用者はただ一つの利用権のみ需要することと時間帯 t の割当者の総和は供給量制約 μ 以下であることを表している。

望ましい性質をもつオークションメカニズムである VCG メカニズム下においては、個人 i の支払額は Vickrey payments と呼ばれ、次の式で計算される。

$$P^i(\mathbf{v}) = W(0, \mathbf{v}^{-i}) - W^{-i}(\mathbf{v}) \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{v}^{-i} は個人 i 以外の利用者の評価値ベクトル、 $W(\cdot)$ は式 (3) で定義された評価値ベクトル \mathbf{v} の下での割当結果の評価値の総和である。この価格 $P^i(\mathbf{v})$ は個人 i が入札しなかった場合の割当者の評価値の総和 $W(0, \mathbf{v}^{-i})$ と割当結果の評価値の総和から個人 i の評価値を除いた値 $W^{-i}(\cdot)$ の差分として表される。

ここで、明らかにしたいのは、表明メカニズムの違いがオークションの効率性を表す社会的厚生（落札者の総入札値の和）に与える影響と各利用権の価格 (Vickrey payments) に与える影響の 2 点である。そこで、3 つの表明メカニズムごとに 200 名のオークション入札者をリサンプリングし、状況 1 では各時間帯の利用権数 5 (計 100 名が利用可能)、状況 2 では各時間帯の利用権数 10 (計 100 名が利用可能)、状況 3 では各時間帯の利用権数 8 (計 104 名が利用可能) という約半数が利用可能な供給量制約を行って、社会的厚生や各時間帯の利用権の平均値の解析を行った。リサンプリングは 1000 回行っており、各表明メカニズム下における表明数の構成割合に依存してリサンプリングしている。

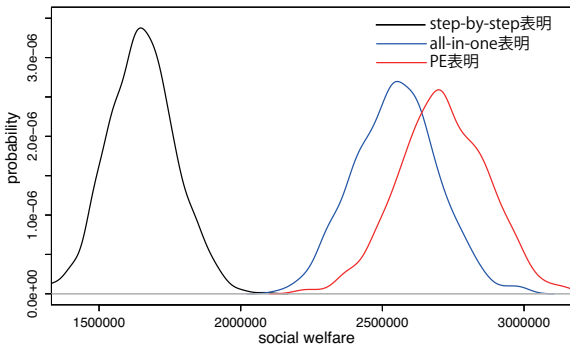


図-10 状況 3 における社会的厚生 of 表明ごとの分布

その結果として、1000 回分の社会的厚生の分布を図-8、図-9、図-10 に示す。見やすくするためにカーネル密度推定の結果を示しているが、元のデータも同形状のヒストグラムである。まず、状況 1 を示す図-8 では、preference-elicitation メカニズムが大幅に社会的厚生を増加させていることを示している。これは図-7 が示すように、step-by-step 表明や all-in-one 表明では平均 3 件程度の表明件数しかなかったのに対し、preference-elicitation 表明では平均 6 件以上の表明を行っていることに起因している。表明件数が少ない場合、高ランク時間帯にのみ表明・需要が集中する一方で、低ランク時間帯には表明がなされないため、低ランク時間帯に対する被験者間の異質性が差別化されない。一方で、preference-elicitation 表明では多くの時間帯に対して表明が行われるため、時間価値の構造が明らかになる。その結果として、大きく社会的厚生が改善されている。

状況 2、状況 3 でも preference-elicitation 表明が最も社会的厚生が高い傾向があるが、all-in-one 表明の社会的厚生も同様に高いことがわかる。この原因は、状況 1 と比べて all-in-one 表明の表明件数が増加したこと起因している。状況 2、3 では参照点となる価格が提示されていたため、all-in-one 表明の被験者はその価格をすべての時間帯に表明したことにある。一方で、step-by-step 表明の表明数は減少傾向にある。このように、状況設定や参照価格の存在と表明メカニズムの組み合わせによって影響が異なることもこれらの結果から示唆されている点は本実験結果の興味深い点である。また、これらの影響にもかかわらず、選好誘出メカニズム下における社会的厚生は 3 つの中で最も高くなる傾向にあり、人々の内なる選好をオークションメカニズム下へと提示させることこそが社会的厚生を高める一つの手段であることが示されている。

図-11、図-12、図-13 は 1000 回の計算結果から得られた各時間帯利用権価格の平均値を表している。図-4、図-5、図-6 に示した表明値の平均値と異なり、Vickrey payments の平均値は選好表明メカニズムごとの違いは小さいと言える。特に注目したい点は、preference-

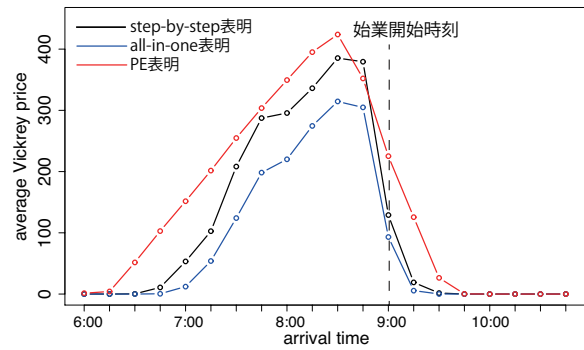


図-11 状況 1 の時間帯別 Vickrey payments の平均値

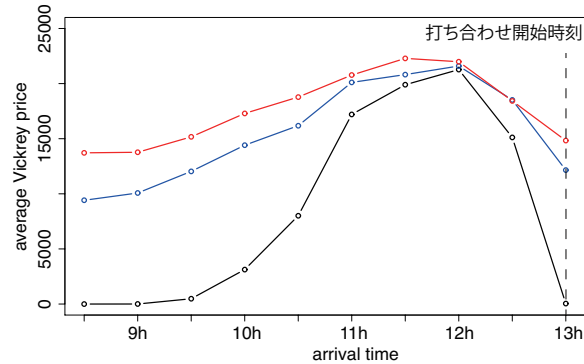


図-12 状況 2 の時間帯別 Vickrey payments の平均値

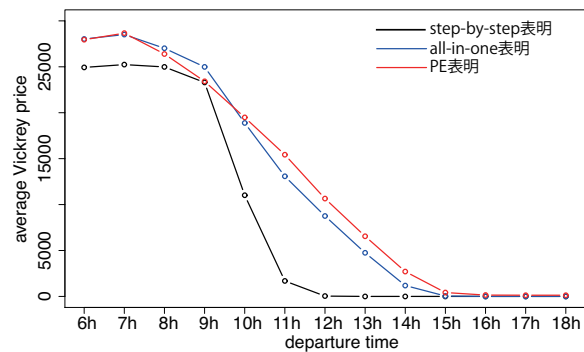


図-13 状況 3 の時間帯別 Vickrey payments の平均値

elicitation 表明は社会的厚生を大きく改善したが、高ランク時間帯の利用権価格が他の表明メカニズムと比べて、大幅に高いわけではない点である。preference-elicitation 表明は step-by-step 表明や all-in-one 表明で表明されにくい低ランク時間帯の表明を促すことで、適切な財の割当を促進し、社会的厚生を高めていると評価することができる。

上記の結果より、2 つ目の仮説「表明メカニズムの違いはオークションの効率性に影響を与える」が支持された。特に、単純な表明メカニズムは低ランク時間帯の表明を減少させる傾向があり、社会的厚生を本来よりも減少させている可能性があることが示された。その問題に対して、preference-elicitation 表明は低ランク時間帯の表明を促すことで、最適な財の割当と社会的厚生の改善を実現している。

6. 認知コストの構造推定

選好誘出メカニズムが示す通り、優先順位が低い時間帯の利用権であっても 0 よりも大きい評価値をもっている被験者は多い。そして、上記で示した通り、優先順位の低い時間帯の表明値が存在することで、全体の社会的厚生を高められることが示されている。にもかかわらず、他の表明メカニズムでは優先順位が低い時間帯の利用権には評価値の表明を行わないのは何故であろうか？本研究ではその原因が 1 回の表明に存在する認知コストに起因すると考え、その認知コストの推定を行うこととする。

そこで、次のような最適停止問題の一種として、選好表明問題を考える。各利用者は各時間帯の利用権に対する自身の評価値を表明したいと考えている。その行動原理の理由は、VCG メカニズムに従うオークションメカニズムでは自身の評価値を正直に表明することが自身にとって最も合理的であるためである。しかし、一つの時間帯の利用権の評価値を表明するたびに、利用者には認知コストが発生する。これは各時間帯の利用権の価値を数値として変換する際に必要となることに起因すると考える。そのため、優先順位の低い利用権の表明の段階になると、表明から得られる効用よりも認知コストの方が大きくなるため、表明行動を停止する。

上記のような意思決定行動を仮定した上で、step-by-step 表明の実験データから 1 回の表明を行うことの認知コストの推定を行う。step-by-step 表明では、被験者は逐次的に表明を行うか、表明を終了するかの意思決定を行っている。個人の効用関数として、以下のような動学的な意思決定の状態を設定する。

$$V_0 = a_1 \tag{5}$$

$$V_{i \text{ times}} = \sum_{j=1}^i x_j - i \cdot c_1 \tag{6}$$

ここで、 x_i は i 番目に表明された評価値であり、実験から示されるように x_i は i の増加に伴い逓減する。実験データからは最終的に表明された評価値のみが入手されており、それ以降の評価値データは得られていないため、最後に表明された評価値に対して、1 回の表明ごとに割引因子 δ を乗算したものを以降の評価値と仮定する。つまり、 k 番目の x_k まで表明した個人の場合は、 $k+1$ 番目の $x_{k+1} = \delta \cdot x_k$ 、 $k+2$ 番目の $x_{k+2} = \delta^2 \cdot x_k$ という構造を仮定し、 $\delta = 0.1$ と設定する。パラメータ a_1 は最初の段階から一つも表明しないことに対する選択肢固有定数、 c_1 は認知コストを表す。

このような効用関数の設定のもとでの離散選択モデルの推定を行う。パラメータは認知コスト c_1 、ゼロ表明効用を表す a_1 の 2 つである。各選択肢には i.i.d. extreme

表-1 推定結果

変数	パラメータ	t 値
ゼロ表明効用	-120.36	-4.97
認知コスト	137.01	22.11
観測数	400	
初期対数尤度	-1250.72	
最終対数尤度	-322.10	
調整済み尤度比	0.74	

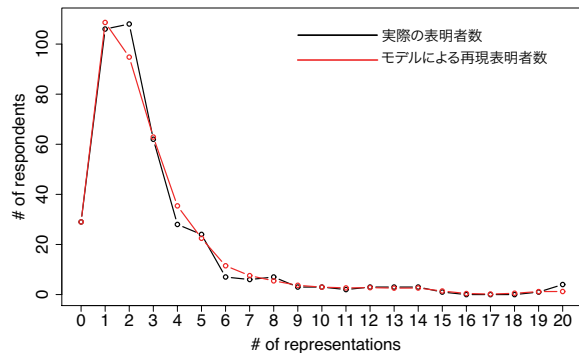


図-14 選択結果のシェアとモデルの再現

value 分布に従う誤差項 ε が含まれるとし、パラメータは最尤推定法にて推定する。

推定結果は表-1 の通りである。21 肢選択のモデルであるが、2 つのパラメータで調整済み尤度比が 0.74 と十分な説明力のあるモデルを構築することができた。この結果から、表明に対する認知コストが 1 回につき、137 円程度の表明評価値と同様の重みがあることがわかる。ゼロ表明効用が -120 円という値は、1 件も表明しなかった被験者の行動を説明している。これは 137 円と 120 円の差分である 17 円以下の評価値しかもたない被験者にとっては、0 件表明と 1 件表明が当確率で発生することを示している。以上のように、被験者は各表明状況において、正の評価値をもっていたとしても、認知コストの存在によって、表明が行われないまたは表明件数が減少することを実証的に示すことができた。

最後に、実際の表明数の選択結果とモデルによる再現結果を図-14 に示す。表明件数が増加するにつれて、対応する被験者数が減少するという実データの傾向をモデルが十分に再現できていることがわかる。この結果より、最適停止問題として定義した選好表明問題における認知コストの推定を行うことができた。

7. おわりに

本研究は、交通サービスオークションの選好表明における認知コストに着目し、実験的アプローチに基づき、認知コストの推定と認知コストを低減するための選好

誘出メカニズムの提案を行った。実験では、3つの状況における交通サービス権の支払い意思額を step-by-step 表明, all-in-one 表明, preference-elicitation 表明の3つの表明メカニズム下での違いを分析した。これらの結果、表明メカニズムの違いが表明件数に影響を与えること、その結果として低ランク時間帯に対する表明の減少が薄い市場を招き、社会的厚生が低下すること、preference-elicitation 表明を用いることで上記の問題を解決できることを示した。また、これらの低ランク時間帯への表明の減少の原因である表明の認知コストを実データから推定し、交通サービスオークションの選好表明における認知コストの存在を実証的に示した。

今後の課題として、3つの表明メカニズムにおける認知コストをそれぞれ実験データから推定し、preference-elicitation 表明の認知コスト低減の影響を定量的に示すこと、利用時間帯のみならず類似する交通サービス間での preference-elicitation 表明メカニズムを提案することが必要と考える。

謝辞： 本研究の一部は 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), JST さきがけの助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Verhoef, E., Nijkamp, P., Rietveld, P.: Tradable permits: their potential in the regulation of road transport externalities, *Environment and Planning*, Vol.24, No.4, pp.527-548, 1997.
- 2) 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.
- 3) Yang, H., Wang, X.: Managing network mobility with tradable credits, *Transportation Research Part B*, Vol.45, No.3, pp.580-594, 2011.
- 4) Wu, D., Yin, Y., Lawphongpanich, S., Yang, H.: Design of more equitable congestion pricing and tradable credit schemes for multimodal transportation networks, *Transportation Research Part B*, Vol.46, pp.1273-1287, 2012.
- 5) Nie, Y., Yin, Y.: Managing rush hour travel choices with tradable credits scheme, *Transportation Research Part B* Vol.50, pp.1-19, 2013.
- 6) 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.
- 7) Wada, K., Akamatsu, T.: A hybrid implementation mechanism of tradable network permits system which obviates path enumeration: an auction mechanism with day-to-day capacity control. *Transportation Research Part E* Vol.60, pp.94-112, 2013.
- 8) 原祐輔, 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, Vol.70, No.4, pp.198-210, 2014.
- 9) 原祐輔: 時間帯別交通利用権オークションに対する選好誘出の効率性に関する研究, 土木学会論文集 D3, Vol.71, No.5, pp.L951-L959, 2015.
- 10) Xu, S. X. and Huang, G. Q.: Efficient auctions for distributed transportation procurement, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 65, pp. 47-64, 2014.
- 11) Huang, G. Q. and Xu, S. X.: Truthful multi-unit transportation procurement auctions for logistics e-marketplaces, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 47, pp. 127-148, 2013.
- 12) 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.
- 13) Sandholm, T. and Boutilier, C.: Preference Elicitation in Combinatorial Auctions, In *Combinatorial Auctions*, Chapter 10, pp.233-263, 2005.
- 14) Prelec, D.: A Bayesian truth serum for subjective data, *Science*, Vol.306, No.5695, pp.462-466, 2004.
- 15) Ding, M.: An Incentive-Aligned Mechanism for Conjoint Analysis, *Journal of Marketing Research*, Vol.44, No.2, pp.214-223, 2007.
- 16) Chajewska, U., Koller, D. and Parr, R.: Making rational decisions using adaptive utility elicitation, *Proceedings of the Seventeenth National Conference on Artificial Intelligence*, pp.363-369, 2000.
- 17) Boutilier, C.: A POMDP formulation of preference elicitation problems, *Proceedings of the Nineteenth National Conference on Artificial Intelligence*, pp.363-369, 2002.

(2016. 4. 22 受付)

THE ESTIMATION AND THE ANALYSIS OF PREFERENCE REPRESENTATION COST AND THE EFFECT OF PREFERENCE ELICITATION MECHANISM BASED ON EXPERIMENTAL APPROACH

Yusuke HARA