

架空名義入札に頑健な再配分メカニズムの提案

False-name-proof redistribution mechanism

櫻井 祐子*¹
Yuko Sakuraiビンセント・コニッツァー*²
Vincent Conitzer齋藤 恭昌*³
Yasumasa Saito岩崎 敦*³
Atsushi Iwasaki横尾 真*³
Makoto Yokoo*¹ヤフー株式会社
Yahoo! JAPAN Research*²デューク大学
Duke University*³九州大学
Kyushu University

Recently, studies on redistribution mechanisms have attracted increased attention in the research area of mechanism design to achieve a desirable social decision among self-interested agents. However, there exist no false-name-proof redistribution mechanisms. Here, false-name-proofness means that no bidder increases her utility by submitting multiple bids. In this paper, we develop a new false-name-proof redistribution mechanism by utilizing a reserve price. The reserve price depends on the number of bidders, i.e., the price is increasing according to the number of bidders.

1. はじめに

インターネットオークションは、多数の企業や消費者による様々な財の取引に利用されており、電子商取引の主要な分野となっている。また、インターネットオークションは、エージェント技術の有望な適用領域として人工知能やマルチエージェントシステムなどの研究分野で活発に研究が行われている [横尾 06]。

一般的なオークションでは、財を販売する売手が存在しているため、集めた支払額は売手に与えられる。しかしながら、例えば、共同で車を所有し、週末に誰が車を使用するかを決定するためにオークションを行うとする。このとき、車は共同所有であるため、売手に値する者が存在せず、集めた支払額をどうするかが問題となる。このように、通常の割当て方法 (落札者、支払額) だけでなく、支払額の配分方法も決定するメカニズムを再配分メカニズムと呼ぶ。再配分メカニズムの設計は、最近、メカニズムデザインの研究において、注目されている研究トピックスである [Faltings 04, Cavallo 06, Moulin 07, Guo 08]。ここで、真の評価値を申告することが最適となる、戦略的操作不可能性を満たすメカニズムとしてよく知られている Vickrey オークションを適用した場合を考える。Vickrey オークションでは 2 番目に高い入札額が支払額となる。この支払額を全員に均等に再配分した場合、2 番目に高い入札者は過大申し支払額を高くすることで、再配分額を大きくすることができるため、戦略的操作不可能性が保証されなくなる。

再配分メカニズムでは、再配分額の決定においても、評価値を過大/過少申告することで効果がない、真の評価値を申告することが最適な戦略となる必要がある。つまり、各入札者の再配分は自分の入札額に依存せずに決定されなければならない。これまで、数多くの戦略的操作不可能性を満たす、再配分メカニズムの提案が行われている [Bailey 97, Parkes 01, Faltings 04]。

一方、インターネットオークションでは、ネットワークの匿名性を利用した、入札者による新たな不正行為の可能性が指摘されている。そのような不正行為の一つに架空名義入札がある。架空名義入札とは、一人の入札者が複数の名義を用

いて複数の入札を行うことである。一般的なオークションに対しては架空名義入札の影響の解析が行われている。具体的には、複数の商品を対象とする組合せオークションにおいて、理論的に望ましい性質を満たすと考えられていたオークションメカニズムが、架空名義入札を行うことで効用が増加する、すなわち、架空名義入札に脆弱であることが指摘されている [Sakurai 99, Yokoo 01]。さらに、架空名義入札に頑健なメカニズムの提案が行われている。しかしながら、再配分メカニズムにおける架空名義入札に対する解析は行われていない。例えば、ネットワーク環境で何らかのリソースを共同所有している状況を考える。このとき、メンバーの ID は把握しているが、ネットワーク上での ID と実世界での人との対応付けができていない可能性が生じる。そのような状況で、再配分メカニズムを適用した場合、架空名義入札の問題は深刻になりえる。

そこで、本論文では、既存の再配分メカニズムが架空名義入札に脆弱であることを示し、さらに、架空名義入札に頑健な再配分メカニズムの提案を行う。

2. 問題設定

本章では、架空名義入札への頑健性も含め、再配分オークションのメカニズムデザインに望まれる性質について述べる。

オークションメカニズムは、単一財や組合せオークションなど様々な状況を対象可能であるが、本論文では財が 1 つの単一財を対象とする。

一般的なオークション理論の研究では、理論的な解析の単純化のため、入札者に関して、財に対する評価値は個人価値であり、効用は準線形効用で表現されると仮定している。本論文でもこの仮定を適用する。入札者の評価値が個人価値であるとは、各入札者は自身の評価値を十分に知っており、他の入札者の評価値に依存せずに決定されることである。入札者 i の準線形効用は得られた財に対する真の評価値 v_i と支払額 p_i の差分 $v_i - p_i$ で求められる。一方、再配分メカニズムでは再配分額 p'_i を考慮する必要があり、財が割り当てられた場合の効用は $v_i - (p_i - p'_i)$ とする。財が割り当てられず、再配分のみを受け取った場合は効用は $0 - (0 - p'_i) = p'_i$ となり、再配分額と一致する。

次に、再配分メカニズムの望ましい性質として、パレート効率性、個人合理性、戦略的操作不可能性、非損失および架空名義入札への頑健性について述べる。

連絡先: 櫻井 祐子, ヤフー株式会社, 東京都港区赤坂 9-7-1, yuusakur@yahoo-corp.jp

本研究は櫻井が日本学術振興会特別研究員 (RPD), 九州大学所属時に行った研究成果である。

戦略的操作不可能性 (strategy-proofness) : 再配分オークションメカニズムが支配戦略 (効用を最大化する戦略) において戦略的操作不可能であるとは、各入札者にとって、真の評価値を申告することが支配戦略、すなわち他の入札者の行動に関わらず最適な戦略となることである。

個人合理性 (individual rationality) : 各入札者が支配戦略を用いた場合、オークションに参加したことにより、参加しない場合と比較して効用が減少することがないことである。

パレート効率性 (Pareto efficiency) : パレート効率的な再配分メカニズムでは、全ての参加者の効用の和、すなわち、社会的余剰が最大化される割当てを実現する。入札者は金銭により効用を譲渡でき、入札者の効用は準線形であると仮定する場合、パレート効率的な割当てでは社会的余剰は常に最大化される。

非損失 (non-deficit) : 再配分額の総和が支払額の総和を超えることはない、すなわち、再配分額が足りなくなることはない。

架空名義入札への頑健性 (false-name-proofness) : 再配分オークションメカニズムが架空名義入札に対して頑健であるとは、各入札者が複数の名義を用いて複数の入札を行ったとしても効果がないことを意味する。すなわち、1つの名義を用いて真の評価値を申告することが支配戦略となる。

戦略的操作不可能性、パレート効率性、かつ、強予算均衡を同時に満たすメカニズムは存在しないことが証明されている [Hurwicz 75, Green 77, Myerson 83]。そのため、いずれかの条件を諦めることで再配分メカニズムが提案されている。

3. 既存のメカニズム

既存の再配分メカニズムで代表的なものを紹介し、架空名義入札に対して脆弱であることを例で示す。

3.1 Cavallo メカニズム

Cavallo メカニズムは以下の通りである [Cavallo 06]。

1. Vickrey オークションを適用して勝者支払額を決定する。
2. 各入札者への再配分額は、その入札者が存在しなかったときの Vickrey オークションの支払額を入札者数 n で割った値で決定される。つまり、最高入札額者と 2 番目に高い入札額は 3 番目に高い入札額、他の入札者は 2 番目に高い入札額の $1/n$ を受け取ることになる。

従って、支払額は余るが、パレート効率的な割当てを実現し、自分の入札額に依存せずに支払額、再配分額が決定されるため戦略的操作不可能性を満たす。

以下に例を示す。

例 1 何人かで共有する 1つのリソースの割当てを決定とする。3人の入札者が入札を行うとする。入札者 1 が \$100、入札者 2 が \$54、入札者 3 が \$36 を入札したとする。このとき、入札者 1 が落札でき、その支払額は \$54 である。さらに、支払額の再配分が行われ、入札者 1 は $\$36/3 = \12 、入札者 2 も同様に \$12、入札者 3 は $\$54/3 = \18 を受け取ることとなる。従って、 $\$54 - \$42 = \$12$ が再配分されずに残る。

ここで、入札者 3 が入札者 4 という名義を使って \$1 の入札をしたとする。結果、再配分額が変更され、入札者 3 と入札者 4 はそれぞれ $\$54/4 = \13.5 を受け取ることとなる。入札者 3 は再配分額の合計が \$27 となり、架空名義入札によって \$18 から \$27 に再配分額が増加した。

3.2 Faltings メカニズム

Faltings メカニズムは以下の通りである [Faltings 04]。

1. 1 人の入札者を無作為に選んで除外する。
2. $n - 1$ 人に対して Vickrey メカニズムを適用して割当てを決定する。
3. 除外された入札者は集めた支払額を受け取る。

このメカニズムは常に強予算均衡を満たすが、パレート効率性を満たさない。

例 2 例 1 と同様の問題設定とする。まず、入札者が 3 人の場合を考える。除外入札者として入札者 1 が選ばれたとする。このとき、入札者 2 と 3 に Vickrey メカニズムを適用する。入札者 2 が財を得て \$36 を支払う。入札者 1 がこの支払額を受け取る。

次に、入札者 3 が架空名義入札を使う場合を考える。入札者 3 には複数名義で入札した方が 1つの名義で入札するときよりも除外入札者に選ばれる確率が高くなる。例えば、2つの名義を使って入札し、入札者 3 が除外されたとき、入札者 3 は \$54 を受け取る事が可能である。従って、架空名義入札の効果がある。

また、文献 [Guo 08] では、再配分を考慮しない支払額が入札額による線形方程式で表現されるメカニズムのクラスを線形メカニズムと定義している。Cavallo, Faltings メカニズムは線形メカニズムのインスタンスである。

4. 架空名義入札に頑健な再配分メカニズム

4.1 不存定理

3.章で示したように、既存メカニズムは架空名義入札に対して頑健ではない。そこで、本章では架空名義入札に頑健なメカニズムの提案を行う。

最初に、戦略操作不可能な線形メカニズムにおいて、パレート効率性と架空名義入札への頑健性を同時に満たす再配分メカニズムは存在しないことを示す。

定理 1 戦略操作不可能な線形メカニズムにおいて、パレート効率性を満たす任意の再配分メカニズムにおいて、架空名義入札に頑健なメカニズムは存在しない。

証明 1 反例を示すことで証明を行う。 n 人の入札者が存在し、 $b_1 > b_2 \geq \dots > b_n = 0$ の入札が行われたとする。このとき、パレート効率性より入札者 1 に財を割り当てられる。支払額は、戦略的操作不可能性より、 b_2 が支払われる。よって、入札者 n はなんらかの再配分を受けることが可能となる。

一方、2 人の入札者が存在し、 $b_1 > b_n = 0$ のとき、支払額はゼロであり、入札者 n は再配分を受けることができない。従って、入札者 n は架空名義入札をする誘因がある。

以上より、支払額が入札額に依存して決定される線形メカニズムで、パレート効率性を満たす任意の再配分メカニズムにおいて、架空名義入札に頑健なメカニズムは存在しない。

4.2 新しいメカニズムの提案

支払額の再配分を行う場合、架空名義入札への頑健性を保証するためにパレート効率性を諦めなければならない。そこで、我々は留保価格 (reserve price) の導入を行う。留保価格は落札できる権利が得られる最低入札額を意味する。

提案メカニズムのメインアイデアは入札者数 n に対して留保価格 r_n と再配分額 c_n を設定することである。また、本メカニズムは PORF メカニズム [Yokoo 03] に基づく。PORF メカニズムでは、主催者が入札額から各入札者の支払額を算出し、各入札者にその額を提示する。入札者が額に応じて財の割当てを受けるかどうかを判断する。PORF メカニズムは戦略的操作不可能性を満たすことが保証されている。

各入札者の入札額を b_i 、 j 番目に高い入札額を $b_{(j)}$ 、入札者 i を除いて j 番目に高い入札額を $b_{(j)}^{-i}$ とする。

1. 主催者は入札者から入札額 b_i の申告を受ける。
2. 主催者は、入札額 b_i を降順に並べる。

$$b_{(1)} \geq b_{(2)} \geq b_{(3)} \geq \dots \geq r_n \geq \dots$$

更に、各入札者 i を除いた他の入札額を降順に並べる。

$$b_{(1)}^{-i} \geq b_{(2)}^{-i} \geq b_{(3)}^{-i} \geq \dots \geq r_n \geq \dots$$

3. 入札者 i の価格は以下のように設定する。

(a) $b_{(1)}^{-i} \geq r_n$ のとき、

- i. $b_i = b_{(1)}$ (財を落札する) ならば、財に対して支払額 $p_i = b_{(1)}^{-i} - c_n$ を提示する。
- ii. $b_i \neq b_{(1)}$ ならば、再配分額として支払額 $p_i = -c_n$ を提示する。支払額が負であるとき、その額が与えられることを意味する。

(b) $b_{(1)}^{-i} < r_n$ のとき、

- i. $b_i = b_{(1)}$ ならば、入札者 i に財に対して支払額 $p_i = r_n$ を提示する。
- ii. $b_i \neq b_{(1)}$ ならば、支払額 (再配分額) はゼロである。

なお、留保価格 r_n と再配分額 c_n は以下の条件を満たすように設定する。

$$r_n \geq nc_n \quad (1)$$

$$c_{n-1} \geq 2c_n \quad (2)$$

$$r_n - r_{n-1} \geq 2c_n \quad (3)$$

式 (1) は再配分額が留保価格を超えないこと、式 (2) は 2 つの名義を使って入札しても再配分額が増えないこと、式 (3) は人数の増加に伴う留保価格の増分が追加される再配分額以上になることを保証するための条件式である。

次に、具体的な r_n 、 c_n について算出する。式 (1)-(3) より、

$$\begin{cases} r_n = (2 - 1/2^{n-2})r_2 \\ c_n = r_2/2^{n-1} \end{cases}$$

が得られ、 r_n 、 c_n は r_2 に依存して決定できることが分かる。

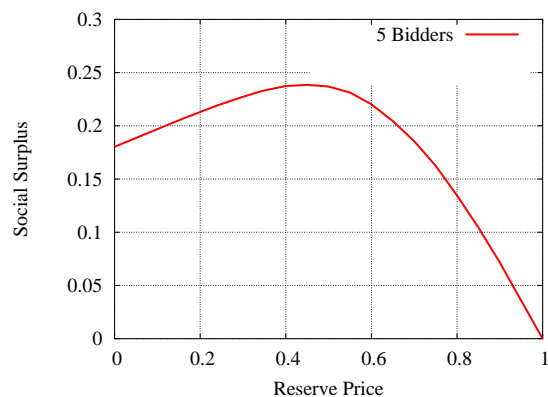


図 1: 社会的余剰の比較

例 3 例 1 と同様の問題設定とする。主催者は 2 人の入札者が存在したときの留保価格を $r_2 = 40$ とする。このとき、3 人、4 人の場合の留保価格は $r_3 = 60$ 、 $r_4 = 70$ となり、一方、再配分額は $c_2 = 20$ 、 $c_3 = 5$ 、 $c_4 = 2.5$ となる。例えば、入札者が例 1 での 3 人の場合、\$100 の入札者は \$60 を支払い、再配分額はゼロである。他の入札者は \$5 の再配分を受ける。

ここで、\$100 の入札者が留保価格以上の入札額で架空名義入札をして入札者が 4 人になったとしても、再配分を含めた支払額は、 $70 - 2 \times 2.5 = 65$ となり、支払額が増加することになる。他の入札者の再配分額は \$2.5 に減少する。

定理 2 本提案プロトコルは架空名義入札に対して頑健である。

証明 2 架空名義入札を利用して 2 つの名義を用いた場合を考える。入札者数は n 人で、1 つの名義で真の評価値を申告している入札者に着目する。このとき、財が割当てられずに再配分だけを受けているならば、架空名義入札をしても、式 (2) より再配分額は増加しない。次に、財が割当てられている場合、架空名義入札をすることで、式 (3) より留保価格が r_n から r_{n+1} へ大きくなり、架空名義入札によって再配分を受けても支払額は減少しない。さらに、財も再配分も行われていない場合、他の入札者の入札額は r_n よりも低く、さらに、自分の真の評価値は r_n よりも低いことを意味する。このとき、架空名義入札をして財を割当てられても、真の評価値よりも大きい r_{n+1} を支払わなければならない。よって、再配分を受けても真の評価値よりも大きい値を支払うこととなり、効用は負となる。以上より、架空名義入札に対して頑健であることが保証できる。

5. 評価実験

提案メカニズムでは、留保価格の設定によって得られる社会的余剰が変わることが予想される。そこで、本章では社会的余剰の評価実験を行う。

入札者数は 5 人、各入札者の入札額は $[0, 1]$ の一様分布で与えられるとする。このとき、留保価格 r_n を $[0, 1]$ において変化させたときに得られる社会的余剰を比較する。再配分額は留保価格 r_n に対して $c_n = r_n/5$ とする。図 1 に 1,000 回の試行に対する社会的余剰の平均値の結果を示す。

結果、留保価格が低い方が得られる社会的余剰が比較的大きく、0.45 のときに最大平均値を取る。すなわち、留保価格が低くければ、財が割当てられる可能性が高く、留保価格以上

の入札者も複数人いる状況が起こりやすい。一方、留保価格が高ければ、財が割当てられる可能性が低くなるため、得られる社会的余剰が減少する。

6. おわりに

本論文では、通常の割当て方法(落札者, 支払額)だけでなく、入札者らに支払額の配分方法も決定するメカニズムである再配分メカニズムを対象に議論を行った。まず、既存のメカニズムは、一人の人が複数名義で入札を行う、架空名義入札に対して頑健ではないことを示した。そこで、留保価格を導入することで、架空名義入札に頑健な再配分メカニズムの提案を行った。さらに、計算機実験によって、留保価格に対して得られる社会的余剰の変化を検証した。

本論文では単一財の場合しか考慮していない。そこで、今後の研究として、財に関して拡張を行うことが考えられる。例えば、複数同一財オークションや複数種類の財が存在する組合せオークションなどを対象とした、架空名義入札に頑健なメカニズムの設計を行うことである。

参考文献

- [Bailey 97] Bailey, M. J.: The Demand Revealing Process: To Distribute the Surplus, *Public Choice*, Vol. 91, No. 2, pp. 107–26 (1997)
- [Cavallo 06] Cavallo, R.: Optimal Decision-Making With Minimal Waste: Strategyproof Redistribution of VCG Payments, in *Proceedings of the 5th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems (AAMAS'06)*, pp. 882–889 (2006)
- [Faltings 04] Faltings, B.: A Budget-Balanced, Incentive-Compatible Scheme for Social Choice, in *Proceedings of the Agent-Mediated Electronic Commerce and Trading Agent Design and Analysis (AMEC 2004)*, pp. 30–43 (2004)
- [Green 77] Green, J. and Laffont, J.-J.: Characterization of Satisfactory Mechanisms for the Revelation of Preferences for Public Goods, *Econometrica*, Vol. 45, No. 2, pp. 427–38 (1977)
- [Guo 08] Guo, M. and Conitzer, V.: Better Redistribution with Inefficient Allocation in Multi-Unit Auctions with Unit Demand, in *Proceedings of the 9th ACM conference on Electronic commerce (EC'08)*, pp. 210–219 (2008)
- [Hurwicz 75] Hurwicz, L.: On the existence of allocation systems whose manipulative Nash equilibria are Pareto-optimal: the case of one public good and one private good (1975), Presented at the 3rd World Congress-Econometric Society meetings
- [Moulin 07] Moulin, H.: Efficient, strategy-proof and almost budget-balanced assignment (2007), Working Paper
- [Myerson 83] Myerson, R. B. and Satterthwaite, M. A.: Efficient mechanisms for bilateral trading, *Journal of Economic Theory*, Vol. 29, No. 2, pp. 265–281 (1983)
- [Parkes 01] Parkes, D. C., Kalagnanam, J. R., and Eso, M.: Achieving Budget-Balance with Vickrey-Based Payment Schemes in Exchanges, in *Proceedings of the 17th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-01)*, pp. 1161–1168 (2001)
- [Sakurai 99] Sakurai, Y., Yokoo, M., and Matsubara, S.: A Limitation of the Generalized Vickrey Auction in Electronic Commerce: Robustness against False-name Bids, in *Proceedings of the 16th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-99)*, pp. 86–92 (1999)
- [Yokoo 01] Yokoo, M., Sakurai, Y., and Matsubara, S.: Robust Combinatorial Auction Protocol against False-name Bids, *Artificial Intelligence*, Vol. 130, No. 2, pp. 167–181 (2001)
- [Yokoo 03] Yokoo, M.: The characterization of strategy/false-name proof combinatorial auction protocols: Price-oriented, rationing-free protocol, in *Proceedings of the 18th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-03)*, pp. 733–742 (2003)
- [横尾 06] 横尾 真: オークション理論の基礎, 東京電機大学出版会 (2006)