

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 25 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500184

研究課題名(和文)談合の影響を受け難い組合せ調達メカニズムとその調整技術の開発

研究課題名(英文) Toward designing collusion-proof combinatorial procurement mechanisms

研究代表者

岩崎 敦 (Iwasaki, Atsushi)

電気通信大学・大学院情報システム学研究科・准教授

研究者番号：30380679

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、談合を考慮した入札方式(メカニズム)をモデル化し、その影響を受け難い組合せ調達メカニズムとその調整技術を開発することを目的とする。まず、従来モデルをもとに談合を内包した単一財調達メカニズムを複数同一財調達へ拡張した。その結果、談合に頑健なメカニズムが財の買い手の費用の期待値を最小化する(費用最小化)メカニズムと同値になることがわかった。一方で、限量記号消去法を用いた自動メカニズム設計(最適化)手法を提案し、調達費用を平均的に最小化するよう調整可能なメカニズムのクラスを発見した。さらに参加者が予算制約に直面する場合に、その社会的余剰を最大化するメカニズムの発見に成功した。

研究成果の概要(英文)：This research project aims to model procurement auction mechanisms (rules or protocols) in the presence of a buyer and several (potentially) collusive bidders, propose a novel mechanism whose outcome is not affected through collusion (collusion-proof), and develop a technique for adjusting its performance. First, we extend a single-item auction mechanism to a multi-unit one where multiple identical items are sold and bidders may collude. This reveals that a collusion-proof mechanism is equivalent to the one that minimizes buyer's payments in expectation. Second, we propose an alternative technology that automatically designs a mechanism via quantifier elimination and successfully construct a novel class of such a payment-minimizing mechanism for a restricted environment where a buyer is required to buy an item for sale. We further explore another case where sellers face the budget limits and find another class of desirable mechanisms.

研究分野：ゲーム理論・マルチエージェント

科研費の分科・細目：情報学・知能情報学

キーワード：ゲーム理論 最適化 メカニズムデザイン オークション 談合

1. 研究開始当初の背景

組合せ調達メカニズムとは1人の買い手が複数の商品やサービスの組合せを複数の売り手から同時に調達する入札方式のことを言う。近年、公共事業の入札などで談合が多発していることが指摘されている。談合とは、競争入札において複数の入札者が前もって落札者や入札額などを協定し、入札者の利益を不正に増加させる行為である。実際、平成21年度に公正取引委員会が独占禁止法にもとづいて法的措置を採った22件のうちでも、入札談合に関するものが17件とその大半を占めている[1]。これらは氷山の一角に過ぎず、実際にはもっと多くの血税が失われていると考えられる。逆に、以降の調達で有利になるように一円で入札する、採算を度外視した一円入札も問題となっている。例えば、コピー機の入札において、それ以降の消耗品やメンテナンスで利益を得ることを見越して、コピー機本体は一円で入札するといった事例も生じている。

このような社会的に不適切な談合や一円入札を従来の入札方式が防ぐことができない原因として、談合の存在を考慮した入札方式の構造を正しく解析・評価するための理論的基盤が極めて脆弱であることが挙げられる。談合に関するこれまでの理論的研究では、オークション理論の枠組みを用いて入札者が談合する際の行動を分析している。談合がなぜ、どのように起こるかはある程度明らかになっている。しかし、ただ1つの商品やサービスを調達する単純な調達(単一財調達)でしか具体的な入札方式は提案されていない[2]。そこで、談合を入札者同士がある種の事前調整を行う仕組みと捉えて、談合にいたる合意を含めたモデルを構築した上で、談合の影響を受け難い組合せ調達メカニズムの基盤を設計する必要がある。

2. 研究の目的

本研究は、談合の存在を考慮した入札方式(メカニズム)をモデル化し、これまでの架空名義操作に関する一連の研究の蓄積と最適化を基礎とするメカニズム設計手法を相互に利用しながら、談合の影響を受け難い組合せ調達メカニズムとその調整技術を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

本応募課題では談合の影響を受け難い単一財調達メカニズムを複数の同じ商品(財)を調達するケース(複数同一財調達)および1つの財が複数の異なる属性を持つケース(多属性単一財調達)へと順に拡張していき、最終的には組合せ調達メカニズムへの一般化をすすめ、得られる基盤メカニズムの調整技術の確立を目指す。この目標を実現するために、以下の2点に着目する。

(1) 架空名義操作と談合の類似性

架空名義操作(入札)とは、1人の入札者が複数のメールアドレス等を用いて複数の入札者のふりをして入札する one-to-many 型の不正行為である。一方で、談合は複数の入札者が共通の目的のために、1つまたは複数の入札者を用いる many-to-one 型の不正行為となっている(図1)。架空名義操作と談合は働く作用の向きは逆であるが、本当の人数を偽り、見かけ上の人数を操作する点で共通している。そこで、架空名義操作に関する一連の研究の蓄積を利用して談合による人数の操作の影響を受けないようメカニズムの設計をすすめる。

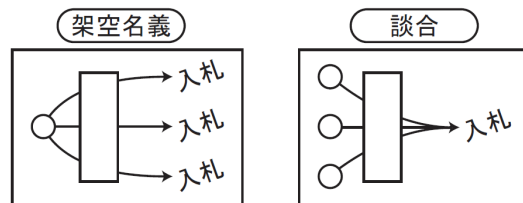


図1：架空名義操作と談合

(2) 最適化を基礎とするメカニズム設計手法

従来は理論的なメカニズムは人手で設計されてきたが、近年、メカニズム設計の問題自体を最適化問題に帰着し、最適化手法(整数計画法)を用いてメカニズムを設計する手法(自動メカニズムデザイン, Automated mechanism design, AMD)が提案されている[3]。具体的には、メカニズムを入力(参加者のもちうる費用の分布)と出力(落札者と支払額)の関係を表す表であると考えられる。さらに表の各項目を整数計画法の変数とし、談合の影響を受け難いなどの制約条件のもとで、買い手の支払額の最小化を目的関数として最適解を求める。これにより、限定された入力に対してなら談合の影響を受けないよう落札者と支払額を決定するメカニズムを提案できる。これは限定されない入力に対するメカニズムの設計に重要な方針/ヒントを与えるだけでなく、多様な属性を扱うメカニズムを調整する技術のコアとなる。

[1] 公正取引委員会. 平成 21 年度年次報告, 2009.

[2] Y. Che and J. Kim. Optimal collusion-proof auctions. *Journal of Economic Theory*, 144(2):565–603, 2009.

[3] T. Sandholm. Automated mechanism design: A new application area for search algorithms. In *Proceedings of the International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP-2003)*, 2003.

4. 研究成果

従来の談合を内包したメカニズムのモデルをもとに、従来の単一財調達メカニズムを複

数同一財調達へ拡張した。その結果、談合に頑健なメカニズムが、財の買い手の費用の期待値を最小化するメカニズムとほぼ同値になることがわかった。さらに組合せ調達メカニズムにおける費用最小化は、メカニズムデザイン理論における収入最大化オークション (optimal auctions) と同値な問題であることがわかった。この問題は、多次元選好をもつ主体を前提とする場合、長年の未解決課題となっている。多次元選好とは例えば、ある参加者が2種類の異なる商品に対して評価値をもつとき、一方の商品の評価値がもう一方の商品の評価値に相関するようなケースを指す。

そこで、一般的な状況における費用最小化メカニズムを考える代わりに、自動メカニズム設計 (最適化) の観点から、いくつか状況に特化した費用最小化メカニズムを探索することを考えた。

このために、限量記号消去法 (Quantifier Elimination, QE) という算法を用いたメカニズムデザインを自動化する手法 (QE-AMD) を設計、提案した。QE は多項式等式・不等式・限量記号・ブール演算からなる一階述語論理式を入力とし、等価で限量記号を含まない式を導く算法である。出力される式は入力式が真となる限量記号のない変数の領域となる。QE-AMD は、参加者のタイプを限量記号で表現し、候補となるメカニズムの集合を多項式集合により表すことで、評価値の連続性を保持したまま AMD を実行できるようになる。QE-AMD は入力式から限量記号を消去し、入力式が真となる多項式集合のパラメータの実行可能な式を出力する。出力式の示す領域上の全ての点が制約条件を満たすメカニズムのパラメータの集合となるため、改めて結果を解析しなくても一般的なルールが抽出しやすくなっている。その結果、従来より優れたメカニズムの設計だけでなく、従来は複雑すぎて扱えなかった状況において望ましいメカニズムの設計においても、有用な指針を与えることができると考えた (学会発表(1)および(2))。

具体的には、無残品性と予算制約に着目してオークションメカニズムを設計した。無残品性 (mandatory sales constraints) とはどんな評価値の組が申告されてもメカニズムは必ず全ての財を割り当てなければならないことをいう。これはパレート効率性を弱くした制約であるが、電力や周波数帯域のように使用されなければ意味がないような財を配分したいといった状況を想定した制約である。もし、戦略的操作不可能性とパレート効率性を要求すると、よく知られている Vickrey-Clarke-Groves メカニズム (VCG) が主催者収入を最大化させる。そこでパレート効率性を無残品性にまで緩めたとき、VCG

より主催者収入を改善できるメカニズムのクラスを QE-AMD で探索した。その結果、無残品性を満たすメカニズムのクラスを表現し、そこから主催者収入を増加させるパラメータを推定することに成功した。

次に、オークションの参加者の予算に制約がある場合を考える。この予算制約は全ての参加者 (含むオークション主催者) が事前に観察可能な公的情報 (public information) であるとする。これは多次元選好を単純化した設定になっている。つまり、参加者は商品への評価値と自身もつ予算という2つの異なる基準から、その商品を獲得した際の効用が決定されるようになっている。この設定において、戦略的操作不可能性とパレート効率性を同時に満たすメカニズムは存在しないことが知られている。そこで、QE-AMD を用いて、無残品性を満たすメカニズムを探索した結果、新しいメカニズムのクラスとなる $VCG-b^*(\delta)$ を発見した。さらに、無残品性を満たさないメカニズムを含めても、 δ を適切に選ぶことで、 $VCG-b^*(\delta)$ が与えるメカニズムが社会的余剰の期待値を最大化することを理論的に証明した。これは QE-AMD の出力が人間にとって理解しやすく、発見したメカニズムの一般化がかなり容易になっていることを示唆している。

今後の課題として、現状の QE-AMD のシステムでは適用可能な問題の大きさが限られているため、そのスケーラビリティを改善することがあげられる。加えて、 $VCG-b^*(\delta)$ を複数同一財オークションなどへの一般化が考えられる。本研究課題で当初計画していた多属性オークションおよび組合せオークションへの拡張までには至らなかったが、談合を含むモデルにおける問題点を明らかにした。一方で、メカニズム調整技術として、多項式集合で表現したメカニズムの実現可能な空間を限量記号消去法を用いて探索する手法である QE-AMD を提案し、その有効性を示すことができた。

最後に、本研究に関連する成果として雑誌論文 10 件 (含む難関国際会議 5 件)、国内会議 3 件の論文を発表している。先に述べた船井ベストペーパー賞を含め 2 件の受賞があるなど国内外で高く評価される研究成果をあげられたと考えている。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

(1) A. Iwasaki, E. Fujita, T. Todo, Y. Miao, M. Yokoo, VCG-equivalent Mechanism in Expectation: General Framework for Constructing Iterative

Combinatorial Auction Mechanisms," the proceedings of the 12th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-2013), 699-706, 査読有.

- (2) 藤田悦誌, 岩崎敦, 東藤大樹, 横尾真, VCG-equivalent in Expectation メカニズム: 公開型組合せオークションメカニズム構築のための一般的なフレームワーク, コンピュータソフトウェア, 採録決定, 2014, 査読有.
- (3) T. Todo, T. Mouri, A. Iwasaki and M. Yokoo, False-name-proofness in Online Mechanisms, the proceedings of 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-2012), 753-762, 査読有.
- (4) 毛利貴之, 杉町勇和, 東藤大樹, 岩崎敦, 横尾真, 自動メカニズムデザインを利用した組合せオークションのルール抽出アルゴリズムの提案, 情報処理学会論文誌, 53(8), 1882-7764, 2012, 査読有 (第10回情報科学技術フォーラム FIT2011 船井ベストペーパー賞).
- (5) T. Todo, R. Li, X.Hu, T. Mouri, A. Iwasaki and M. Yokoo, Generalizing Envy-Freeness toward Group of Agents, the proceedings of 22nd International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2011), 386-392, 査読有.
- (6) T. Todo, A. Iwasaki and M. Yokoo, False-name-proof Mechanism Design without Money, the proceedings of 10th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent System (AAMAS-2011), 651-658, 査読有.
- (7) A. Iwasaki, A. Katsuragi and M. Yokoo, False-name bidding in first-price combinatorial auctions with incomplete information, the proceedings of 10th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent System (AAMAS-2011), 541-548, 査読有.
- (8) 東藤大樹, 岩崎敦, 横尾真, 架空名義操作不可能な施設配置メカニズムの特徴付け, 情報処理学会論文誌 52(4), 1657-1666, 2011, 査読有 (2011年度情報処理学会論文賞).
- (9) 東藤大樹, 岩崎敦, 横尾真, 収入単調性を満たすオークションメカニズムの特性及びその架空名義操作不可能性との関係, 人工知能学会論文誌, 26 巻(1), 2011, 86-96, 査読有, DOI:10.1527/tjsai.26.86.
- (10) 桂木敦史, 櫻井祐子, 岩崎敦, 横尾真,

第一価格入札における架空名義入札の影響の解析, 人工知能学会論文誌, 26(1) 巻, 2011, 199-207, 査読有, DOI:10.1527/tjsai.26.199.

〔学会発表〕(計3件)

- (1) 岩崎敦, 多項式表現と限量記号消去によるメカニズム設計の自動化, 計測自動制御学会 第13回制御部門大会, 2013年3月8日, 福岡.
- (2) 杉町勇和, 岩崎敦, 横尾真, 穴井宏和, オークションメカニズムの多項式表現と限量記号消去法を用いたメカニズム設計の自動化, 日本オペレーションズ/リサーチ学会 2012年秋季研究発表会, 2012年9月16日, 神戸.
- (3) 毛利貴之, 杉町勇和, 東藤大樹, 岩崎敦, 横尾真, 自動メカニズムデザインを利用した組合せオークションのルール抽出アルゴリズムの提案 第10回情報科学技術フォーラム (FIT2011), 2011年9月7日, 函館.

〔その他〕

<https://sites.google.com/site/a2ciwasaki/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩崎 敦 (IWASAKI ATSUSHI)

電気通信大学・大学院情報システム学研究科・准教授

研究者番号: 30380679

(2) 研究分担者

横尾 真 (YOKOO MAKOTO)

九州大学・システム情報科学研究所・教授

研究者番号: 20380678