知能と複雑系　131－13
(2003. 1. 30)

専門家と素人が存在する場合の組合せオークション
-専門家が単一財にのみ専門知識を持つ場合-

伊藤　孝行[†]　横尾　真[††]　松原　繁夫[††]

† 北陸先端科学技術大学院大学知識科学教育研究センター，石川県
†† 日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所，京都府

あらまし　インターネット上のオークションでは，不特定多数の人間が商品 (財) を販売しており，商品の質を正確に見極めるのは困難である．例えば，骨董品が売られていたとしても，その骨董品が本物であるか偽物であるかを見極めることは難しい．そこで筆者らは過去に，買い手が財の質 (例えば本物か偽物か) について正確に判断ができない場合，条件付きの入札が可能なオークションプロトコルを提案した．ここでは，専門家に，自然の選択に関する情報を正しく申告させることによって，合理的な参加者が損害を被らないようなオークションプロトコルの設計に成功した．本論文では，上のような状況において，複数財の組合せに対して入札が可能なオークションを設計する．ここで，専門家が単一の財に関して専門知識を持つ場合と複数の財に専門知識を持つ場合が考えられる．前者の場合でも複雑な問題であるが，後者はより複雑な問題になっている．そこで，本論文では，まず前者の場合のオークションプロトコルを設計する．すなわち，単一の財に関して専門知識と興味を持つ専門家に自然の選択に関する情報を正しく申告させ，素人にとって，真の申告をすることが最適反応戦略になるプロトコルを設計する．

キーワード　組合せオークション，メカニズムデザイン，非対称情報，マルチエージェント

A Combinatorial Auction among Experts and Amateurs
- The Case of Single-Skilled Experts -

Takayuki ITO[†], Makoto YOKOO[††], and Shigeo MATSUBARA[††]

† Center for Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology, 1-1 Asahidai, Tatsunokuchi-machi, Nomi-gun, Ishikawa, 923–1292 Japan
†† NTT Communication Science Laboratories, NTT Corporation, 2–4 Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto, 619–0237 Japan

Abstract　Auctions have recently commanded a great deal of attention in the field of multi-agent systems. Correctly judging the quality of auctioned goods is often difficult for amateurs, in particular, on the Internet auctions. We have formalized such a situation so that *Nature* selects the quality of the auctioned good. Experts can observe Nature's selection (i.e., the quality of the good) correctly, while amateurs, including the auctioneer, cannot. In other words, the information on Nature's selection is asymmetric between experts and amateurs. In this situation, it is difficult to attain an efficient allocation, since experts have a clear advantage over amateurs, and they would not reveal their valuable information without some reward. Thus, we have succeeded in developing a single unit auction protocol in which truth-telling is a dominant strategy for each expert. In this paper, we focus on a combinatorial auction protocol under asymmetric information on Nature's selection. Experts may have an interest in, and expert knowledge on, Nature's selection for several goods, i.e., experts are versatile. However, the case of versatile experts is very complicated. Thus, as a first step, we assume experts to have an interest in, and expert knowledge on, a single good. That is, experts are single-skilled. Under these assumptions, we develop an auction protocol in which the dominant strategy for experts is truth-telling. Also, for amateurs, truth-telling is the best response when experts tell the truth. By making experts to elicit their information on the quality of the goods, the protocol can achieve a socially desirable, i.e., Pareto efficient allocation, if certain assumptions are satisfied.

Key words　Combinatorial Auction, Mechanism Design, Asymmetric Information, and Multiagents

1. はじめに

オークションは，エージェント間のタスク/資源割当ての手法として，マルチエージェントの分野で用いられている．近年，実世界の電子商取引サイト (eBay.com や Yahoo.com 等) やエージェントに基づく電子マーケット [1] で，様々なオークションプロトコルが用いられており，オークションはインターネット経済の中心的役割を担っている．

一般に，取引されている商品の質を見極めるのは困難である．特にインターネットオークションでは，不特定多数の人間が商品を販売しており，商品の質を正確に見極めるのは困難である．例えば，壷が売られていたとしても，その壷が本物であるか偽物であるかを見極めることは難しい．もし買い手は，偽物を高い値段で購入してしまった場合，取引によって損害を被る．

そこで筆者らは過去に，買い手が財の質 (例えば本物か偽物か) について正確に判断ができない場合，条件付きの入札が可能なオークションプロトコルを提案した [3] [4]．例えば，買い手は「もし，その財が高品質ならば，50 万円支払う．もし，その財が低品質なら，4,000 円までなら支払える」という条件付きの入札を行う．一方，買い手が財の質について正確な判断ができるなら，条件のない入札も可能にする．例えば，「その財は高品質である．だから，60 万円支払う」という入札である．以上の条件付きの入札に基づいて，オークションプロトコルは財の質を判定し，落札者とその支払額を決定する．本オークションプロトコルでは，参加者は，財の質に関して正確に判断できない場合でも，リーズナブルな価格で財を購入することができる．すなわち，参加者は低品質の財を高額で購入してしまうことによる損害を防ぐことができる．

上で述べた状況は，ゲーム理論における，自然の選択 (Nature's Selection) および，非対称情報 (Asymmetric Information) という概念を用いてモデル化できる．例えば，骨董品のオークションで出品されている壷は，本物か偽物かのどちらかであると言える．この壷が本物であるか偽物であるかは参加者の意思とは独立な要素である．ゲーム理論では，このような参加者の意思とは独立に決定される要素を，**自然の選択**と呼ぶ．ゲーム理論において，**自然**とは，ある特定の確率でランダムに行動を選択する疑似プレイヤである [6]．上の骨董品のオークションの例では，財の質 (壷が本物か偽物か) は，自然の選択と言える．

一般に**非対称情報**とは，ある参加者が，自然の選択や他の参加者の評価値などについて異なる情報や知識を持つことを意味する．本論文では，自然の選択の情報に非対称性が存在することを仮定する．すなわち，自然の選択を正しく観測できる**専門家**と，自然の選択を観測できない**素人**が存在する，と仮定する．例えば，上の骨董品のオークションでは，専門家は，壷が本物か偽物かを正確に知ることができる．一方，素人は壷が本物か偽物か判別できない．

文献 [3] [4] では，以上の状況で，専門家に，自然の選択に関する情報を正しく申告させることによって，合理的な参加者が損害を被らないような，単一財に対するオークションプロトコルを設計した．本論文では，さらに，複数財を取引できるオークションプロトコルに注目する．複数財のオークションは，多くの応用が想定できる技術であり，近年，多数の研究成果が報告されており注目されている [7] [8]．ただし，インターネットオークションでは，文献 [3] [4] で，指摘した単一財のオークションの場合と同様の，財の質 (自然の選択) の判断に関する問題が生じる．そこで，本論文では，専門家に自然の選択の情報を正しく申告させることにより，合理的な参加者が損害を被らない，複数財に対するオークションプロトコルを設計する．

ここで，専門家が単一の財についてのみ専門知識を持つ場合と，種類の異なる財について専門知識を持つ場合が考えられる．後者は，前者を一般化した場合であり，より問題が複雑になる．そこで，まず，本論文では前者の，専門家が単一の財についてのみ専門知識を持つ場合のオークションプロトコルを設計する．

本論文の構成を以下に示す．第 2 章では本論文で用いる基本的な用語の定義を行う．第 3 章では自然の選択に関する情報に非対称性がある場合の単一財オークションの概要を示す．第 4 章では，本論文で提案する複数財のオークションを示す．まず，対象とする領域のモデルを示す．次に，提案するオークションのプロトコルを提案し，その具体例を示す．第 5 章では，本論文での仮定を緩和した場合に起こるただ乗り問題を示す．第 6 章では，結論と今後の課題を示す．

2. 用語の定義

本章では，基本的な用語を定義する．

【参加者】本論文では，**専門家**と**素人**の 2 種類の参加者を仮定する．専門家は，自然の選択について正確な情報を持つプレイヤである．専門家は自然の選択について不正確な情報を観測することはない．素人は自然の選択について情報を持たないプレイヤである．本論文では，支配戦略があるにも関わらず，支配戦略を選択しないプレイヤを**非合理的なプレイヤ**と定義する．

【個人価値オークション】本論文で扱うオークションは個人価値オークションである [5]．本論文では，プレイヤ i の効用 u_i を，自然の選択が q と判定された時に割り当てられた財の真の評価値 $b_{i,q}$ とその販売価格 (支払額)t_i の差として定義する．すなわち，$u_i = b_{i,q} - t_i$ である．以上のような効用は，**準線形効用**と呼ばれる．伝統的な定義 [5] では，個人価値オークションで，各プレイヤは，自分の財に対する評価値を知っており，その評価値は他のプレイヤの財に対する評価値とは独立である．本論文では，自然の選択を観測できる専門家の評価値は，他のプレイヤの評価値に依存しない．一方，自然の選択を観測できない素人の評価値は他のプレイヤの評価値に依存する．すなわち，q は専門家の評価値によって判定されるため，素人の評価値は専門家の評価値に依存する．q が判定された後では，素人の評価値は他のプレイヤの評価値には依存しない．

【パレート効率的】主催者を含むすべての参加者の効用の合計 (社会的余剰) が，支配戦略均衡において最大化されるなら，そのオークションプロトコルによって得られる割当ては**パレート効率的**であると言う．一般的に，パレート効率的な割当てが，必ずしも社会的余剰を最大化する必要はない．しかしオークションでは，プレイヤは互いにお金を受渡しでき，かつ，各プ

レイヤの効用は準線形であるから，効用の合計は，パレート効率な割当てにおいて必ず最大化される．

【支配戦略】 あるプレイヤにとって，ある戦略が支配戦略であることの定義は，このプレイヤにとって，他の参加者の行動に関わらず，この戦略を用いることが最適である．すなわち効用を最大化できることを意味する．

【最適反応戦略】 他のプレイヤがある戦略を取った時に，その戦略のもとで自分の効用が最大になる戦略である [6]．

3. 単一財オークション

3.1 オークションプロトコル

本節では，単一財の取り引きのための，自然の選択に関する情報に非対称性がある状況で，真の申告が支配戦略となるオークションプロトコルの概要を示す [3] [4]．基本的なアイデアを簡潔に示すために，骨董品オークションという簡単な例を題材としてプロトコルを示す．すなわち，自然の選択のレベル数が 2 の場合のプロトコルを示す．自然の選択のレベル数を一般化し n とした，プロトコルは文献 [3] [4] に譲る．

本オークションプロトコルは，一人の主催者と複数の入札者で構成される．主催者が一つの財を出品し，入札者は財の落札を試みる．本オークションプロトコルは 1 回秘密入札である．入札において，専門家は観測した自然の選択と財に対する評価値のペアを申告する．素人は，自然の選択を観測できないため，各自然の選択に対する評価値を申告する．申告された評価値に基づいて財の質を決定し，落札者と支払額を決定する．

問題は，専門家が結果を操作できてしまうという点である．例えば，専門家は，本物の壷に対して「偽物である」と虚偽の申告をすれば，偽物に対する値段で本物の壷を落札できる場合がある．このとき，より高い評価値を持つ素人がいた場合に，その素人が勝者とならないため，オークションプロトコルは，財の効率的な割当てに失敗する．

クラークメカニズム [5] は，各プレイヤが真の評価値を申告することが支配戦略で，かつ，パレート効率的な割当てが得られるメカニズムとして知られている．しかし，自然の選択に関する情報に非対称性が存在するという状況下では，クラークメカニズムを単純に適用できない．詳細は文献 [3] [4] に譲る．

そこで，本論文では，新たなオークションプロトコルを提案する．提案するプロトコルでは，専門家に，自然の選択に関する情報を正しく申告させることによって，社会的に望ましい割当て，すなわちパレート効率的な割当てを実現し，かつ，合理的な参加者が損害を被らない結果を得ることができる．

骨董品オークションで，自然の選択とは，財の質のことを意味する．ここでは，財の質として，本物，と，偽物という二つの質を仮定する．本物を q_R とし，偽物を q_I とする．すなわち，骨董品オークションでは，自然の選択のレベルが，2 つである．自然の選択 q_R と q_I に対して，専門家が申告した評価値集合をそれぞれ，$B_{E,R}$ および $B_{E,I}$ とする．自然の選択 q_R と q_I に対して，素人が申告した評価値集合をそれぞれ，$B_{N,R}$ および $B_{N,I}$ とする．

自然の選択 q_I に対する評価値の上界値を α とする．自然の選択に対するすべての評価値は，上界値を越えることはないとする．上界値は前もって与えられているものとする．上界値は，プレイヤに対して公開されてもされなくても良いが，上界値が存在することは保証されている．

以下に自然の選択のレベルが 2 の場合のプロトコルを示す．各ケースで財の質を判定するのは主催者である．

(ケース a) もし，q_R(本物) を申告する参加者がいない場合，財の質が q_I(偽物) であると判定する．落札者は，$B_{E,I}$ および $B_{N,I}$ の中で最大の評価値を申告した入札者 i とする．i の支払額は，$B_{E,I}$ および $B_{N,I}$ の中で 2 番目に大きい評価値とする．

(ケース b) もし，q_R(本物) を申告した専門家が一人だけの場合，その財の質に関して判定せず，保留する．q_R を申告した専門家 i の評価値 b_{i,q_R} が，$B_{E,I}$ と $B_{N,I}$ の中の最大値より大きければ，i を落札者とする．支払額は，$B_{E,I}$ と $B_{N,I}$ の最大値とする．q_R を申告した専門家 i の評価値 b_{i,q_R} が，$B_{E,I}$ と $B_{N,I}$ の中の最大値より大きくなければ，取引は行わない．

(ケース c) 二人以上の専門家が q_R(本物) を申告した場合，その財の質を q_R(本物) であると判定する．落札者は，$B_{E,R}$，$B_{N,R}$，および α の中の最大値を申告した入札者 i とする．α が最大値になった場合は，取引を行わない i の支払額は，$B_{E,R}$，$B_{N,R}$，および α の中で 2 番目に高い評価値とする．

上界値を使う理由は，評価値に重なりがある場合に，偽物を本物と偽って落札しても利益がないことを保証するためである．真の申告が支配戦略となるというのは厳しい条件であり，他にどんな非合理的なプレイヤがいても，真の申告の方が効用を大きくする必要がある．実際は財が偽物で，(非合理的に) 本物と申告する他のプレイヤが存在する時，上記の上界値を使わないと，偽物と知っている専門家が，偽物と言うと落札できなくなる．そのため，本物と虚偽の申告をする方が勝つ可能性があるので偽の申告をする誘因が働く．

また，上界値をプレイヤの入札値から決定するというアルゴリズムを使わず，オークションが開始される前に与える理由は，上界値が入札値に依存するとオークションの結果を操作するという不適切な状況が起こり得るからである．

本オークションプロトコルの特長は以下の 4 つである．(1) 各専門家にとって真の申告をすることが支配戦略である．(2) 専門家の数がある閾値以上，かつ虚偽の自然の選択を申告した非合理的なプレイヤの数が閾値より少ないという仮定の下で，真の申告をすることが最適反応戦略である．つまり，各素人にとって，他の素人がどのような申告をするかに関わらず，専門家が支配戦略を取ると仮定した上で真の申告をすることが最良の戦略となる．(3) パレート効率的な割当てを実現する．(4) 非合理的なプレイヤが存在したとしてもその数が閾値より少ないなら，合理的なプレイヤの効用が負にならない．

本オークションプロトコルの興味深い特長の一つとして，専門家を囚人のジレンマ [6] 的な状況に導くことにより，真の自然の選択を申告させている点が挙げられる．例えば，出品された壷が本物であるとする．もし，専門家同士が協調して，壷が偽物であると虚偽の申告すれば，壷を低価格で手にいれることが可能になる．しかし，本オークションプロトコルでは，真の

申告をすることが支配戦略となり，専門家は，(他の専門家を裏切って) 必ず真の申告をする．詳細は文献 [3] [4] に譲る．

4. 複数財オークション

4.1 モデル

本節では，自然の選択に関する情報に非対称性が存在する場合のドメインのモデルを定義する．単一財の場合の定義を，財の組み合わせを扱うことができるように拡張する．

- プレイヤの集合を $I = \{1, \ldots, n\}$ で表す．
- 自然の選択の集合を $Q = \{q_1, \ldots, q_m\}$ で表す．Q の各要素間には，順序が存在する．
- 財の集合を $G = \{g_1, \ldots, g_l\}$ で表す．すなわち，複数財オークションとする．
- 財 g_j の取り売る自然の選択の集合を $Q_{g_j} \subset Q$ とする．
- 財 g_j と自然の選択 q_k のペアを $g_j : q_k$ とする．
- 財と自然の選択のペアの任意の組み合わせの集合を $C = \{C_0, C_1, \ldots, C_{2^{lm}}\}$ とする．ここで，$C_x \subseteqq P$ である．
- プレイヤ i の，財と自然の選択のペアの組み合わせ C_x の評価値を $b_i(C_x)$ と表す．すなわち，財の評価値は，自然の選択と，財の組み合わせに依存する．
- プレイヤ i の効用は，$u_i = \sum_{C_x \in W} b_i(C_x) - t_i(C_x)$ と表す．W は，オークションプロトコルにより，勝者が決定され，落札の対象となった入札 (財とその自然の選択のペアの組み合わせ) の集合である．$t_i(C_x)$ は，組合せ C_x の販売価格 (支払額) である．プレイヤが財を得られなかった場合の効用は 0 と仮定する．主催者 i の効用は $u_i = \sum_{C_x \in W} t_i(C_x)$ とする．
- 専門家の集合を $E \subset I$ で表す．専門家は自然の選択を正確に観測できる．財 g_j に興味のある専門家の集合を $E_{g_j} \subset E$ とする．ここで，$\mid E_{g_j} \mid \geqq 1$ と仮定する．
- 素人の集合を $N \subset I$ で表す．$I - N = E$ である．素人は，自然の選択を観測できない．
- メカニズムの設計者は自然の選択を観測できず，かつ，専門家と素人の区別もできないとする．

本論文では，以下の仮定のもとでプロトコルを設計する．

[仮定 1]　すべての i, q, q', g_j について，$(g_j, q) \in C_x$，$(g_j, q') \in C'_x$，かつ $q < q'$ の時，$b_i(C_x) \leqq b_i(C'_x)$ が成り立つ．

本仮定は，プレイヤにとって，自然の選択が大きいほど評価値が高いことを意味している．例えば，すべてのプレイヤにとって，骨董品に関して，本物の方が偽物よりも評価値が高い．

[仮定 2]　専門家 i は，ある一つの財に関してのみ専門知識を持ち，かつ，ある一つの財に関してのみ興味を持つものとする．すなわち，$i \in E$ に関して，ある財 g_j を含む組み合わせ C_y に関して $b_i(C_y) > 0$．g_j を含まない組み合わせ C'_y に関しては $b_i(C_y) = 0$ とする．

例えば，二つの財として，壷と掛け軸が販売されているとき，専門家は，壷のみ，または掛け軸のみの質を申告する．その他の財に関して入札を行わない．

以下に，複数財の組合せに対する入札の例を示す．単純な例として，財 a と財 b，および，各財の取り得る質 (自然の選択) は，質 q_R(本物) と質 q_I(偽物) とする．このとき，可能な入札は表 1 の 8 つになる．例えば，$a : q_R$ は財 a が本物 (q_R) であることを示している．

表 1　入札の例

$\{a : q_R\}$	$\{b : q_R\}$	$\{a : q_R, b : q_R\}$	$\{a : q_I, b : q_R\}$
$\{a : q_I\}$	$\{b : q_I\}$	$\{a : q_I, b : q_I\}$	$\{a : q_R, b : q_I\}$

入札者は，各組み合わせに対して入札を行うことができる．素人は，すべての組み合わせに関して入札できる．ただし，その入札は，条件付きの入札で，「もし，財の質が本物なら，いくらまでなら支払える．もし財の質が偽物なら，いくらまでなら支払える」と申告する．表 2 に例を示す．

表 2　素人の入札の例

入札	$\{a : q_R\}$	$\{b : q_R\}$	$\{a : q_R, b : q_R\}$	$\{a : q_I, b : q_R\}$
素人 i	100	90	200	100
入札	$\{a : q_I\}$	$\{b : q_I\}$	$\{a : q_R, b : q_I\}$	$\{a : q_I, b : q_I\}$
素人 i	10	6	20	16

専門家は，自分が申告する質とその価格を入札する．仮定 2 より，一つの財の質に関してのみ質を申告できる．例えば，ある専門家が財 a が q_R(本物) であることを申告する場合を表 3 に示す．

表 3　専門家の入札の例

入札	$\{a : q_R\}$	$\{b : q_R\}$	$\{a : q_R, b : q_R\}$	$\{a : q_I, b : q_R\}$
専門家 i	100	-	100	-
入札	$\{a : q_I\}$	$\{b : q_I\}$	$\{a : q_R, b : q_I\}$	$\{a : q_I, b : q_I\}$
専門家 i	-	-	100	-

4.2 オークションプロトコル

本オークションプロトコルでは，以上の入札をもとに，質と価格，落札者を決定する．基本的には，まず各財の質を決定し，その後，落札者と各入札者の支払い額を決定する．

(1)　各財に関して，自然の選択 (ここでは本物か偽物か) を判定する．本物と申告した専門家の数を n とすると，

- ケース 1 : $n \geqq 2$ の時，その財は，本物 (q_R) と判定する．
- ケース 2 : $n = 1$ の時，その財の質の判定は保留する．
- ケース 3 : $n = 0$ の時，その財は，偽物 (q_I) と判定する．

(2)　質の判定が保留された財に関しては以下の方法で落札者と支払額を決定する．$g_j : q_R$ を申告した専門家を e_1 とする．専門家 e_1 が $g_j : q_R$ に対して申告した評価値が式 (1) の支払額 p_{e_1} より大きければ，専門家 e_1 が落札者となる．

$$p_{e_1} = \sum_{y \neq e_1} v_y(G_{\sim e_1}) - \sum_{y \neq e_1} v_y(G) \tag{1}$$

ここで，G は，評価値の総和を最大化するような割り当てである．$G_{\sim e_1}$ は，プレイヤ e_1 が入札しなかった場合の他のプレイヤが申告した評価値の総和を最大化する割当てである．$g_j : q_R$ 申告値が p_{e_1} 未満であれば取り引きしない．

(3)　質が判定された財とその組み合わせに基づいて，以下の方法で落札者と支払額を決定する．

まず，勝者決定の対象とする組合せを選択する．質が決定し

た財に関しては，判定された質に関する組合せを選択する．選択された評価値の中で，評価値の総和を最大化するような割り当て G，すなわち，どの財をどのプレイヤに落札するかを求める．各プレイヤの割り当て G に対する評価値を $v(G)$ で表す．

ここで，プレイヤ x の支払額 p_x は式 (2) で求める．

$$p_x = \sum_{y \neq x} v_y(G_{\sim x}) - \sum_{y \neq x} v_y(G) \qquad (2)$$

ここで，$G_{\sim x}$ は，プレイヤ x が入札しなかった場合の他のプレイヤが申告した評価値の総和を最大化する割当てである．また，式 2 の第一項を計算する際に，質が本物 q_R と判定された財に関して，偽物 q_I に対する上界値を評価値として持つダミープレイヤがいると仮定する．ダミープレイヤを仮定することによって，質が本物と判定された財に関する支払額を上界値以上であることを保証する．第一項にダミープレイヤの評価値があると仮定しても，第一項は，プレイヤ x の入札とは関係しないため，誘引両立性には影響しない．

本手法で，(2) において支払い額を決定する方法は G.V.A.(Generalized Vickrey Auction) [9] に基づいている．相違点は (2)(a) において評価値を，自然の選択に基づいて選択する点である．基本的な G.V.A. では自然の選択は取り扱われない．

4.3 本プロトコルの特長

本節では，本プロトコルにおいて成立する定理を示す．

［定理 1］ 本プロトコルでは，専門家にとって，財の評価値および自然の選択に関して，真の申告が支配戦略である．

［仮定 3］ 各財に専門知識と興味を持つ専門家が複数存在し，これらの専門家が確実に真の申告を行う．さらに，一人以下の非合理的なプレイヤが存在する．

［定理 2］ 仮定 3 の下で，素人にとって，真の申告をすることが最適反応戦略である．

［定理 3］ 仮定 3 の下で，素人が最適反応戦略を取り，かつケース 3 でダミープレイヤに財が落札されず，取引が行われる時，本プロトコルはパレート効率的な配分を実現する．

［定理 4］ 仮定 3 の下で，非合理的なプレイヤの数が 1 ならば，合理的なプレイヤの効用は非負である．

自然の選択を間違って観測したり，観測した自然の選択を間違って申告する専門家は，非合理的な専門家の一種と考えることができる．提案する手法では，そのような専門家に対しても，その数が 1(一般化した場合，閾値以下) であれば，頑健である．

4.4 例

a） 財の質が判定できる場合の例

表 4 に，財の質が判定できる場合の例を示す．本例では，専門家 e_1，e_2，e_3，e_4 と素人 n_1，および，財 a，b が存在するとする．専門家 e_1 と専門家 e_2 は，財 b が本物 q_r である $(b : q_R)$ と申告する．専門家 e_3 と専門家 e_4 は、財 a が本物 q_r である $(a : q_R)$ と申告する．各財について q_I の上界値は，100 とする．すなわち $\alpha_{q_I}(a) = 100$ かつ，$\alpha_{q_I}(b) = 100$ である．

このとき，財 a は二人以上の専門家が本物と申告しているので本物 (q_R)，財 b も二人以上の専門家が本物と申告しているので本物 (q_R) と判定される．表 a) に，質が判定された後の財の組み合わせとその評価値を示す．

表 4　例 1：財の質が判定できる例

	$\{a : q_R\}$	$\{b : q_R\}$	$\{a : q_R, b : q_R\}$	$\{a : q_I, b : q_R\}$
e_1	-	500	500	400
e_2	-	450	450	450
e_3	400	-	400	-
e_4	350	-	350	-
n_1	100	200	300	210
	$\{a : q_I\}$	$\{b : q_I\}$	$\{a : q_R, b : q_I\}$	$\{a : q_I, b : q_I\}$
e_1	-	-	-	-
e_2	-	-	-	-
e_3	-	-	400	-
e_4	-	-	350	-
n_1	10	20	120	30

表 5　質の判定された後の財の組み合わせと評価値

	$\{a : q_R\}$	$\{b : q_R\}$	$\{a : q_R, b : q_R\}$
e_1	-	500*	500
e_2	-	450	450
e_3	400*	-	400
e_4	350	-	350
n_1	100	200	300

主催者は，申告された評価値の総和を最大にするような割り当て G を求める．その結果，$G = \{\{a : q_R\}, \{b : q_R\}\}$ であることが分かる．G に基づき，式 2 に従って，各参加者の支払額を決定する．e_1 の支払額は

$$p_{e_1} = \sum_{y \neq e_1} v_y(G_{\sim e_1}) - \sum_{y \neq e_1} v_y(G) = 850 - 400 = 450$$

となる．同様に，e_3 の支払額は，

$$p_{e_3} = 850 - 500 = 350$$

e_2，e_4，および n_1 の支払額は，財を割り当てられないので (式 (2) によって計算したとしても)，0 となる．

b） 財の質の判定が保留されるときの例

表 4 に，財の質の判定が保留される場合の例を示す．本例では，専門家 e_1，e_2，e_3，e_4 と素人 n_1，および，財 a，b が存在するとする．専門家 e_1 は，財 a が本物 q_R である $(a : q_R)$ と申告する専門家 e_2，e_3，および e_4 は、財 b が本物 q_R である $(b : q_R)$ と申告する．$\alpha_{q_I}(a) = 10$ かつ，$\alpha_{q_I}(b) = 10$ である．

このとき，財 a を本物 q_R と申告している専門家が，e_1 のみなので，財 a の質の判定は保留される．a の質の判定が保留されることにより，組み合わせ $\{a : q_R, b : q_R\}$，$\{a : q_I, b : q_R\}$，$\{a : q_R, b : q_I\}$，および $\{a : q_I, b : q_I\}$ が落札候補集合から削除される．一方財 b は二人の専門家 e_3 と e_4 が本物 (q_R) と申告しているので，本物 q_R と判定される．表 7 に，質が判定された後の組み合わせとその評価値を示す．

財 a に関しては q_R と申告した専門家 e_1 が落札者となり，支払額は 20 となる．組み合わせ $\{b : q_R\}$ すなわち財 b に関しては，Vickrey オークションとなり，専門家 e_3 が落札者で，支払額は 105 となる．

表6 例2：財の質の判定に保留がある例

	$\{a:q_R\}$	$\{b:q_R\}$	$\{a:q_R,b:q_R\}$	$\{a:q_I,b:q_R\}$
e_1	100	-	100	-
e_2	-	50	50	50
e_3	-	115	115	115
e_4	-	105	105	105
n_1	50	80	130	100
	$\{a:q_I\}$	$\{b:q_I\}$	$\{a:q_R,b:q_I\}$	$\{a:q_I,b:q_I\}$
e_1	-	-	100	-
e_2	-	-	-	-
e_3	-	-	-	-
e_4	-	-	-	-
n_1	20	30	80	50

表7 質の判定の後の財の組み合わせとその評価値

	$\{a:q_R\}$	$\{b:q_R\}$	$\{a:q_I,b:q_R\}$	$\{a:q_I\}$
e_1	100*	-	-	-
e_2	-	50	50	50
e_3	-	115*	115	-
e_4	-	105	105	-
n_1	50	80	100	20

5. 議　　論

本論文では，仮定2によって，専門家の戦略範囲を限定している．もし，仮定2がない場合，すなわち，専門家が，複数の財に対して，自然の選択を申告できる場合，表8のような，ただ乗り問題に類似した問題が発生する．ここで，素人 a_1 と専門家 e_1 と専門家 e_2 が存在するとする．表8の e'_1 は専門家 e_1 の虚偽の申告を表す．

表8 ただ乗り問題の例

	$\{a:q_R\}$	$\{b:q_R\}$	$\{a:q_R,b:q_R\}$	$\{a:q_I,b:q_R\}$
n_1	500	-	-	-
e'_1	10	400	410	-
(e_1	-	400	-	401)
e_2	200	100	600	-
	$\{a:q_I\}$	$\{b:q_I\}$	$\{a:q_I,b:q_I\}$	$\{a:q_R,b:q_I\}$
n_1	200	-	-	-
e'_1	-	-	-	-
(e_1	1	-	-	-)
e_2	-	-	-	-

専門家 e_1 が正直に申告したとすると，財 a,b は600の評価値を入札した専門家 e_2 に落札される．もし，専門家 e_1 が嘘を付いて (e'_1)，財 a が本物であると申告し ($a:q_r$)，評価値を10と申告したとすると，素人 n_1 に財 a，専門家 e_1 に財 b が落札される．すなわち，専門家 e_1 は虚偽の申告をすることによって，財を不当に落札している．本論文では，一つの財のみを申告すると仮定することによって，ただ乗りの問題を回避している．複数の財に専門知識と興味を持つような専門家を仮定する場合，以上の問題点を解決必要があり，今後の課題である．

6. おわりに

複数財のオークションは，多くの応用が想定できる技術である．ただし，インターネットオークションでは，文献[3][4]で，指摘した単一財のオークションの場合と同様の，財の質(自然の選択)の判断に関する問題が生じる．そこで，本論文では，財に質の判断に関して，専門家にとって真の申告をすることが支配戦略であり，素人にっとても真の申告をすることが最適反応戦略になるような組合せオークションプロトコルを提案した．本論文では，専門家は単一の財についてのみ専門知識と興味を持つ，と仮定した．専門家が種類の異なる財について専門知識を持つ場合も考えられるが，問題が大変複雑になっている．そこで，まず，本論文では，専門家が単一の財についてのみ専門知識を持つ場合のオークションプロトコルを設計した．

提案したオークションプロトコルの特長は，以下の4つである．(1) 各専門家にとって，真の申告が支配戦略である．(2) 専門家の数がある閾値以上，かつ，虚偽の自然の選択を申告した非合理的なプレイヤの数が閾値より少ないという仮定の下で，真の申告が最適反応戦略である．つまり，各素人にとって，他の素人がどのような申告をするかに関わらず，専門家が支配戦略を取ると仮定した上で真の申告が最良の戦略となる．(3) パレート効率的な割当てを実現する．(4) 非合理的なプレイヤが存在したとしても，その数が閾値より少ないなら，合理的なプレイヤの効用が負にならない．

今後の課題として，複数の財について専門知識と興味を持つ専門家を仮定した場合の組合せオークションプロトコルの設計がある．この場合，本論文の5章で示したような専門家のただ乗りという問題がある．また，本プロトコルでは，質が判定された後に，各プレイヤーの支払額に関して，G.V.A. を改良したプロトコルを用いている．一般に G.V.A に関しては，各プレイヤーが自分の好みを表明すること自体が困難であるという問題が指摘されている．本問題に対する研究も現在盛んに行われおり[2]，今後の課題の一つである．

文　　献

[1] R. H. Guttman, A. G. Moukas, and P. Maes. Agent-mediated electronic commerce: A survey. *The Knowledge Engineering Review*, 13(2):147–159, 1998.

[2] Benoît Hudson and Tumas Sandholm, "Effectiveness of preference elicitation in combinatorial auctions", In the Proc. of AMEC IV, pp.15-19, 2002.

[3] T. Ito, M. Yokoo, and S. Matsubara, "Designing an Auction Protocol under Asymmetric Information on Nature's Selection," In the Proc. of AAMAS2002, pp.61-68, 2002.

[4] 伊藤孝行, 横尾真, 松原繁夫 "自然の選択の情報に非対称性が存在する場合のオークションプロトコルの設計", コンピュータソフトウェア，日本ソフトウェア科学会，2003 (採録済).

[5] A. Mas-Colell, M. D. Whinston, and J. R. Green. *Microeconomic Theory*. Oxford University Press, 2nd edition, 1995.

[6] E. Rasmusen. *Games and Information*. Blackwell Publishers Ltd, 2nd edition, 1994.

[7] T. Sandholm: An Algorithm for Optimal Winner Determination in Combinatorial Auctions, in the Proc. of IJCAI'99, pp. 542–547 (1999).

[8] T. Sandholm, S. Suri, A. Gilpin, and D. Levine. Winner Determination in Combinatorial Auction Generalizations In the Proc. of AA-MAS2002, pp.69-76, 2002.

[9] H.R. Varian. Economic Mechanism Design for Computerized Agents, in the Proc. of the 1st Usenix Workshop on Electronic Commerce, 1995.