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

伊藤 孝行　横尾 真　松原 繁夫

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．もし買い手が，偽物の骨董品を高い値段で購入してしまった場合，買い手は，このオークションによって損害を被る．一方，損害を被ることを避けようとして，消極的な入札を行うと，本来ならば落札できていた骨董品が得られなくなる可能性が生じる．これは，オークションプロトコルが，財の効率的な配分に失敗していることを意味する．そこで，本論文では，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，パレート効率的な配分を実現し，かつ，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を設計する．本論文で提案するオークションプロトコルは以下の 4 つの特長を持つ．(1) 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) 専門家の人数に関する仮定の下で，素人にとっても，真の申告をすることが最適反応戦略である．(3) パレート効率的な配分を実現する．(4) 非合理的なプレイヤが存在しても，その数がある閾値以下なら，合理的なプレイヤの効用が負になることはない．

The Design of an Auction Protocol under Asymmetric Information on Nature's Selection

Takayuki Ito, 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, Center for Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology.

Makoto Yokoo, Shigeo Matsubara, 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, NTT Communication Science Laboratories, NTT Corporation.

1 はじめに

オークションプロトコルは，エージェント間のタスク/資源割り当ての手法として，マルチエージェントの分野で用いられてきた [1] [3]．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 [2](eMediator [9]，GroupBuyAuction [11] など) 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．そこで本論文では，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する．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 [8]．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．

問題は，自然の選択に関する情報に非対称性が存在する状況でのオークションでは，上述の条件付き入札を認める場合でも，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，骨董品のオークションでは，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．これは，オークションプロトコルが，財の効率的な配分に失敗していることを意味する．

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，パレート効率的な配分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．その理由と詳細は第 3 章で示す．

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，社会的に望ましい配分，すなわちパレート効率的な配分を実現し，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．

プロトコルを詳述すれば，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．

提案する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) パレート効率的な配分を実現する．(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ることはない．

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 [4] 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．詳細は第 6.1 節で示す．

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ドメインをモデル化し，クラークメカニズムをこのドメインに適用することが困難であることを示す．第 4 章では，まず，コンセプトを明確に示すために，単純な仮定の下でのオークションプロトコルを提案する．第 5 章では自然の選択に関する情報に非対称性がある状況における一般化オークションプロトコルを示す．第 6 章では，本プロトコルの興味深い特長の一つとして，専門家が囚人のジレンマの状況下にあることを示し，関連研究との比較を示す．第 7 章で結論を示す．

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とする．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は知っており，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ことになる．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配分は**パレート効率的**であると言う．一般的に，パレート効率的な配分が，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，パレート効率な配分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 [10]．

3 モデル

3.1 定義

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．

- 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．
- 財の数は 1 つで，単一財オークションとする．
- プレイヤ i の自然の選択 q に対する財の評価値を $b_{i,q}$ と表す．すなわち，財の評価値は，自然の選択に依存する．
- プレイヤ i の効用は，$u_i = b_{i,q} - t_i$ と表す．t_i は財の販売価格 (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．主催者の効用は $u_i = t_i$ とする．
- プレイヤ i のタイプ θ_i を，ベクトル $\theta_i = (b_{i,q_1}, b_{i,q_2}, \ldots, b_{i,q_m})$ で表す．
- 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．$\mid E \mid \geq 1$ 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，オークションプ

ロトコルを設計する．

仮定 1すべての i, q, q' について，$q < q'$ の時，$b_{i,q} \leq b_{i,q'}$ 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．

3.2 クラークメカニズムを適用する場合の問題点

クラークメカニズム[5] は，各プレイヤにとって真の申告をすることが支配戦略で，かつ，パレート効率的な配分が得られるメカニズムとして広く知られている．しかし，本論文の問題設定では，クラークメカニズムを適用できないことを以下に示す．

クラークメカニズムでは，社会的余剰を最大化する割り当てが選択され，プレイヤ i は，プレイヤ i が参加したことによって減少した社会的余剰に等しい額を支払う．本論文の設定では，オークションにおいて，主催者は自然の選択を知ることができないので，社会的余剰を計算することもできない．そこで,「申告された最大の自然の選択が真である」と主催者が判断すると仮定した上で，クラークメカニズムを適用することを考える．この時，以下の 2 つの問題があることを示す．

【問題 1】主催者が代償金を支払わないと，専門家に自然の選択を過小申告する誘因が働く．

【問題 2】主催者が代償金を支払うと，主催者にとって支払額による収入よりも多くの代償金が必要になる可能性があり，さらに専門家が自然の選択を過大申告する誘因が働く．

表 1 クラークメカニズムの適用

	q_I:偽物	q_R:本物
θ_1	300 円	30,000 円
θ_2	600 円	<u>20,000 円</u>
θ_3	<u>500 円</u>	25,000 円

表 1 では，θ_1 が素人，θ_2 と θ_3 が専門家であるとする．専門家 θ_2 は入札 (θ_2, q_R) を申告し，$20,000$ 円までなら支払えると申告したとする．専門家 θ_3 は入札 (θ_3, q_I) を申告し，500 円までなら支払えると申告したとする．とする．素人 θ_1 は，財が偽物と判定されれば $30,000$ 円，本物と判定されれば 300 円となる．

この時，クラークメカニズムを単純に適用しようとすると，まず【問題 1】が生じることを示す．例えば，表 1 において，財は本物であるとする．すなわち，θ_2 が真の申告をしており，θ_3 が虚偽の申告をしている．主催者は，申告された自然の選択の内で最大のレベルが，本物であるから，財が本物であると仮定し，社会的余剰が最大になる割り当てを選択する．すなわち，財を θ_1 に割り当てる．θ_1 の支払額は，クラークメカニズムに基づき，2 番目に大きい評価値であるから，$20,000$ 円になる．この結果は，成功しているかに見える．しかし，専門家 θ_2 にとって，(θ_2, q_I)，600 円までなら支払えると虚偽の申告した場合の方が支払額が 500 円となり，利益がある．すなわち，専門家 θ_2 に，自然の選択を過小申告しようとする誘因が働く．

【問題 1】を解決する方法として，クラークメカニズムに基づいて，専門家が社会的余剰を増加していると解釈し，代償金を支払うことが考えられる．代償金は以下のように計算できる．もし θ_2 が参加していないとすると，主催者は，自然の選択が，偽物であると判断し，財を θ_3 に割り当てていただろう．この場合の社会的余剰は 500 円と考えられる．一方，専門家である θ_2 が参加することにより，財が本物であることが認知され，その結果，社会的余剰が $30,000$ 円 (θ_1 の本物の財に対する評価値) まで増加させてたと考えると，クラークメカニズムでは専門家 θ_2 に代償金として社会的余剰の増加分 $30,000 - 500 = 29,500$ 円を支払うことになる．財は θ_1 が落札し，支払額は $20,000$ 円となる．

代償金を支払うことにより,【問題 1】は解決する．しかし，代償金を支払うことによって,【問題 2】が生じる．上記の例では，代償金 $29,500$ 円は収入 $20,000$ 円より大きい．

また，上記の例で，実際には財が偽物であったと仮定すると，θ_2 は財が偽物であると真の申告をすれば，財は落札できるが支払額は 500 円であり，効用は $600 - 500 = 100$ 円に過ぎない．θ_2 は財が本物であると虚偽の申告をすることにより，多額の代償金を

得ることが可能となる．以上より，クラークメカニズムを単純に修正しただけでは，真の申告が支配戦略とはならない．

4 オークションプロトコルの設計

4.1 プロトコル:自然の選択のレベル数が 2

本節では，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を示す．まず，本プロトコルの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．そして第 5 章で，一般化したプロトコルを示す．

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 の場合のオークションプロトコルを示す．各ケースにおいて，財の質を判定するのは主催者である．

(ケース 1) 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 2) 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 3) 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[†1]．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．

具体的な上界値の設定方法の例として，類似の財がある時は，過去の取り引き価格の分布から推定する方法などがある．主催者が誤って，上界値を大きく設定する分には，プロトコルへの影響はない．専門家が一人の場合や，専門家が複数存在するが，本物に対する評価値の分布が低い方に偏っている時は，上界値を大きく設定すると，財を売れない可能性はある．しかし，本物に対する評価値の分布が，一様分布に近いと考えられる場合，深刻な影響はない．

---

†1 α が最大値になるという場合は，極めて例外的な場合である．これは，主催者が適切な上界値を設定することに失敗し, 非常に高い値を設定してしまった結果, どの参加者にとっても, 本物の評価値が α を越えないという場合である．α が最大値になる場合はパレート効率的な配分ではない．

4.2 例

以下に，本プロトコルの手続きを明らかにするために，3 つの例を示す．参加者のタイプとして表 2 に示す 3 種類のタイプがあると仮定する．α は上界値を示す．ただし，例 1 と例 2 では異なるレベルの自然の選択において評価値に重なりがないので，α は使わない．

表 2 単純な例

	q_I:偽物	q_R:本物
θ_1	30 円	11,000 円
θ_2	40 円	12,000 円
θ_3	50 円	15,000 円
α	100 円	

例 1:二人の素人 θ_1 と θ_2，および一人の専門家 θ_3 が存在するとする．この場合，素人はそれぞれ，入札 $(\theta_1, 0)$ および $(\theta_2, 0)$ を申告する．各入札の二つ目の要素 0 は，自分が素人であることを示している．ここで，専門家は，財が本物であると申告し，(θ_3, q_R) を入札したとする．この場合，専門家は一人だけなので，ケース 2 が適用され，落札者はこの専門家となる．支払額は 40 円となる．

例 2:一人の素人 θ_1，および二人の専門家 θ_2 と θ_3 がいるとする．素人は $(\theta_1, 0)$ を入札する．専門家は二人とも財を本物であると申告する．すなわち，(θ_2, q_R) および (θ_3, q_R) を入札する．本物と申告した専門家が二人いるので，ケース 3 が適用される．この場合，(θ_3, q_R) を申告した専門家が財を落札し，支払額は 12,000 円となる．

表 3 に上限値を用いる例を示す．上界値は，オークションが開始される前に与えられているものとする．上界値を設けることによって，評価値に重なりがあっても，専門家にとって，真の申告をすることが支配戦略であるようなプロトコルを実現できる．

例 3: ここでは，上界値が必要となる例を示す．θ_1，θ_2 及び θ_3 の専門家が存在するとする．財は偽物であるとする．θ_3 は合理的な専門家で，財は偽物と申告するとする．すなわち (θ_3, q_I) で 800 円を申告する．θ_1 と θ_2 は，(非合理的に) 虚偽の申告をし，財は本物であると申告するとする．すなわち (θ_1, q_R) で 450 円，および，(θ_2, q_R) で 850 円を申告したとする．

表 3 上界値を設けた例

	q_I: 偽物	q_R: 本物
θ_1	300 円	450 円
θ_2	500 円	850 円
θ_3	800 円	1000 円
α	800 円	

まず，上界値を用いたプロトコルを用いた場合の，落札者と支払額を示す．二人の専門家が財が本物であると申告していることから，ケース 3 が適用される．本物と申告した専門家の評価値，本物と申告した素人の評価値，および偽物の上界値の中の最大の評価値を申告したプレイヤが落札者，および，2 番目の評価値が支払額だから，落札者は θ_2 となり，支払額は 800 円となる．

ここで，上界値を使わずにプロトコルを設計したとする．すなわち，ケース 3 の落札者は，B_{E,q_R} と B_{N,q_R} の中で最大の評価値を申告した入札者となる，とする．θ_2 が落札者となり，支払額は B_{E,q_R} と B_{N,q_R} の中の 2 番目に大きい評価値，450 円となる．つまり，財は偽物であるにも関わらず，本物と判定される．

ここでは，θ_2 にとって，真の申告をすれば，ケース 2 に当てはまり，財を落札するチャンスはなくなり，効用は 0 となる．一方，θ_2 が虚偽の申告をする場合，偽物に対する評価値は 500 円にも関わらず,「本物である」と虚偽の申告をすることによって，落札額は 450 円となり，利益を得るという問題点がある．すなわち非合理的な入札者が存在する場合に，虚偽の申告によって付加的な利益が得られる場合が生じ，真の申告が支配戦略ではなくなってしまう．

上の問題点を解決するために，上界値 $\alpha = 800$ を導入する．上界値を導入することによって，ケース 3 より，落札者は θ_2 となり，支払額は 800 円となる．すなわち，800 円が上界値であることによって，θ_2 が本物と申告しても利益がない．

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定理 1，定理 2，定理 3 および定理 4 に示す．

定理 1 本プロトコルでは，専門家にとって，真の申告が支配戦略である．

証明 1 (Outline) 証明では，専門家にとって，虚偽の申告による支払額は，真の申告の支払額として増加しないことを示す．詳細は付録.A に示す．

仮定 2 複数の専門家が存在し，これらの専門家が確実に支配戦略を選択する．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 *2* 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．

証明 2 (Outline) 仮定 *2* の下で，以下の *2* つの戦略を持つ．一つは，自分は素人であると真の申告することである．もう一つは，自分は専門家であると虚偽の申告することである．証明では，まず素人が自然の選択について真の申告をした時，虚偽の評価値を申告しても明らかに利益がないことを示す．次に，素人が虚偽の自然の選択を申告しても，利益がないことを示す．*(1)* 素人 i を除いて，ケース *1* かケース *3* が成立する場合，素人 i が専門家と偽って，真の自然の選択よりも大きな自然の選択を申告しても，付加的な効用が得られないことを示す．*(2)* 素人 i を除いて，ケース *2* が成立する場合，素人 i に対して利益はないことを示す．この場合，明らかに自分は専門家であると虚偽の申告している素人が一人いる．詳細は省略するが，プロトコルを一般化した場合の証明を付録 B に示す．

定理 3 仮定 *2* の下で，パレート効率的な配分が実現できる．

証明 3 仮定 *2* の下では，定理 *1* と定理 *2* よりケース *2* の条件は満足されない．従って，ケース *1* とケース *3* のみを考える．この場合，財は，最大の評価値を申告したプレイヤに落札されるので，本プロトコルはパレート効率的な配分を実現できる．

定理 4 仮定 *2* 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．

証明 4 (Outline) 証明では，本プロトコルにおいて，合理的なプレイヤが財を落札したとき，その支払額は，正しい自然の選択に基づいて判定され，かつ，合理的なプレイヤが財を落札できなかった時，効用は *0* で非負であることを示す．すなわち非合理的なプレイヤが一人存在する場合，合理的プレイヤの効用が非負であることを示す．詳細は紙面の制限から省略するが，一般化した場合の証明を付録 C に示す．

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．

5 プロトコルの一般化

5.1 プロトコル:自然の選択のレベル数が複数

本章では，一般化プロトコルを示す．レベル x の自然の選択を q_x とする．すべてのプレイヤの申告の中で最大の自然の選択を $q_{\max}$ とする．すべてのプレイヤの申告の中で 2 番目に大きい自然の選択を q_{second} とする．$q_{\max}$ を申告した専門家の数を p とする．q_x に対して申告した専門家の評価値の集合を B_{E,q_x} とする．q_x に対して申告した素人の評価値の集合を B_{N,q_x} とする．自然の選択 q_x に対する上界値を α_{q_x} とする．k を閾値とする．基本的なアイデアとして，ある自然の選択 q を申告した専門家の数が k より大きければ，自然の選択は q であると判定する．

以下に一般化したオークションプロトコルを示す．$q_{\max}$ を申告した専門家の数 p で場合分けされる．

(ケース 1) $q_{\max} = q_1$ の時，q_1 は最小のレベルであるから，自然の選択を q_1 であると判定する．勝者は，$B_{N,q_{\max}}$ と $B_{E,q_{\max}}$ の中で最大の評価値を申告した入札者とする．支払額は，$B_{N,q_{\max}}$ と $B_{E,q_{\max}}$ の中の 2 番目に大きい評価値とする．

(ケース 2) $p = 1$ の時，自然の選択を判定せず，保留する．$q_{\max}$ と申告した専門家 e の評価値 $b_{e,q_{\max}}$ が，$B_{E,q_{second}}$，$B_{N,q_{second}}$，および $\alpha_{q_{second-1}}$ の最大値より大きい場合，e を落札者とする．支払額は，$B_{E,q_{second}}$，$B_{N,q_{second}}$，および $\alpha_{q_{second-1}}$ の最大値とする．そうでない場合，取引を行わない．

(ケース 3) $2 \le p \le k - 1$ なら，自然の選択を判定せず保留する．$q_{\max}$ と申告した専門家 e の評価値

$b_{e,q_{\max}}$ が，$B_{E,q_{\max}}$，$B_{N,q_{\max}}$，および $\alpha_{q_{\max}-1}$ の最大の評価値なら，専門家 e を落札者とする．$\alpha_{q_{\max}-1}$ が最大なら，取引を行わない．支払額は，$B_{E,q_{\max}}$，$B_{N,q_{\max}}$，および $\alpha_{q_{\max}-1}$ の中で 2 番目に大きい評価値とする．そうでない場合，取引を行わない．

(ケース 4) $p \geq k$ なら，自然の選択を $q_{\max}$ と判定する．$B_{E,q_{\max}}$，$B_{N,q_{\max}}$，および $\alpha_{q_{\max}-1}$ の中で最大の評価値を申告した入札者を落札者とする．$\alpha_{q_{\max}-1}$ が最大なら，取引を行わない．支払額は，$B_{E,q_{\max}}$，$B_{N,q_{\max}}$，および $\alpha_{q_{\max}-1}$ の中で 2 番目に大きい評価値とする．

5.2 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定理 5，定理 6，定理 7，および定理 8 に示す．

定理 5 本プロトコルでは，専門家にとって，真の申告が支配戦略である．

証明 5 (Outline) 証明では，専門家にとって虚偽の申告をした場合の支払額は，真の申告をした場合の支払額と比較して増加しないことを確認する．主なアイデアは，証明 *1* と同じである．詳細は，紙面の制限の都合から省略する．

仮定 3 閾値 k が与えられた時，k 人以上の専門家が存在し，専門家は確実に支配戦略を選択する．さらに $k-1$ 以下の非合理的プレイヤが存在する．

定理 6 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．

証明 6 (Outline) 証明は，$k=2$ かつ自然の選択が *2* レベルの場合の証明 *2* とほぼ同様である．一般化した場合の証明の詳細は付録 B に示す．

定理 7 仮定 *2* の下で，パレート効率的な配分が実現できる．

証明 7 証明は証明 *3* に同じ．

定理 8 仮定 *3* の下で，非合理的なプレイヤの数が閾値 k より小さいなら，合理的なプレイヤの効用は負にならない．

証明 8 (Outline) 証明は，証明 *4* の場合とほぼ同様である．詳細は付録 C に示す．

6 議論

6.1 囚人のジレンマ的状況の専門家

本オークションプロトコルの特長の一つとして，専門家が囚人のジレンマ的状況[4] に直面している点が挙げられる．ここで，骨董品のオークションで，**本物**の壷が出品されているとする．専門家は，壷は本物 (q_R) であると真の申告をするか，壷は偽物 (q_I) であると虚偽の申告をするという二つの戦略を持つ．これは第 4.1 節で述べた自然の選択のレベルが二つの状況である．今，専門家が二人いて，それぞれ，本物に対する評価値を 10,100 円とする．また，素人が複数人存在し，本物に対する評価値を 6,000 円，偽物に対する評価値を 0 円とする．表 4 に本例の効用行列を示す．

本例では，二人の専門家が協力し，二人とも「壷は偽物である」と申告すれば，壷を安価で (より高い効用で) 購入するチャンスがある．つまり，二人の専門家が協調し，虚偽の入札 (100 円，q_I) を申告すれば，どちらかが，100 円で壷を購入できる．引き分けの場合は，効用を確率 $\frac{1}{2}$ で割り当てるとすると，二人で 10,000 円なので，期待効用は (5,000 円, 5,000 円) となる．もし，二人のうち一人の専門家が裏切り，(10,100 円，q_R) を申告した場合，この専門家は 100 円で壷を購入でき効用は 10,000 円となる．両方の専門家が裏切って，真の入札 (10,100 円,q_R) を申告した場合，専門家は 10,100 円で壷を購入することになり，効用は (0 円, 0 円) となる．本プロトコルを用いた場合，専門家にとっては，協調すれば，(5,000 円, 5,000 円) の効用が得られるにも関わらず，支配戦略である真の申告をせざるを得ないという囚人のジレンマ的な状況に陥っている．

6.2 関連研究

関連研究として，筆者の一人は文献[6] で，競り上げ型オークションにおける情報顕示の問題を論じた．インターネットオークションでは，多くの入札が入札終了時刻直前に行われてしまうという現象がある．この現象により，公開入札オークションであるにも関わらず，財に関する情報顕示の失敗が引き起こされる．

表 4 囚人のジレンマ的な状況

		専門家 1	
		q_I:偽物	q_R:本物
専門家 2	q_I:偽物	(5,000 円, 5,000 円)	(0 円, 10,000 円)
	q_R:本物	(10,000 円, 0 円)	(0 円, 0 円)

すなわち，入札者が他者の入札行動を観察できないため，財の評価値に関する情報を得るのが困難になる．以上の問題を解決するために，文献[6] では情報を持つ入札者に補償金を支払うことによって，情報を明かす誘因を与えるプロトコルを提案した．

本論文で提案したプロトコルと，文献[6] で提案されたプロトコルとの相違点として，以下の 3 点を挙げる．一点目として，文献[6] で提案されたプロトコルは，公開型の入札，かつ，間接顕示メカニズムに基づいている．また，専門家 (情報を持つプレイヤ) に補償金を支払う必要があった．一方，本論文で提案したプロトコルは，直接顕示メカニズムであり，かつ，補償金を支払う必要はない．

二点目として，文献[6] では単純な状況を想定していたが，本論文ではより複雑な状況を想定している．具体的には，文献[6] では，自然の選択に関して，高品質と低品質という二つのレベルしか想定しておらず，かつ，異なるレベル間での評価値の重なりを想定していない．一方，本論文では，自然の選択について，任意のレベル数を想定し，かつ，異なるレベル間の評価値の重なりも想定している．

三点目として，文献[6] では，プレイヤの効用を特殊な仮定の下で定義し，その上で真の申告によるナッシュ均衡を証明している．一方，本論文ではプレイヤの効用が準線形効用であることを仮定している．準線形効用は一般的な仮定であり広く使われている．そして，専門家にとっては真の申告が支配戦略，素人にとっては真の申告が最適反応戦略であることを示した．

一般に，自然の選択に関する情報に非対称性がある状況では，オークションの主催者や財の売り手が，財の質を保証するという方法が広く使われている．ここで，連携価値モデル[7] における議論では，オークションの主催者や財の売り手にとって，その財の質を正直に申告することが支配戦略となる．しかし，以下の理由から，品質保証というやり方を実際に運用するにはいくつかの問題が生じる．まず，財の質を保証することは質をどのように測定するかという問題に関わるため困難である．さらに，一般の消費者間のオークションでは，売り手は財の質に関して，必ずしも専門家ではない．

7 おわりに

本論文では，自然の選択に関する情報に非対称性がある場合のオークションプロトコルを提案した．本論文の目的は，財の効率的な割り当てを実現するために，専門家の持つ自然の選択に関する情報を正しく申告させることができるプロトコルの設計である．情報を正しく申告させるための機構の一つとして，クラークメカニズムが広く使われている．しかし，主催者が，財の質を判断できないため，単にクラークメカニズムを適用することは困難である．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した．

提案したオークションプロトコルは，以下の 4 つの特長を持つ．第 1 に，専門家にとって真の申告をすることが支配戦略である．第 2 に，専門家の数がある与えられた閾値以上，かつ，虚偽の自然の選択を申告する非合理的なプレイヤの数が閾値より小さい場合，素人にとって，真の申告をすることが最適反応戦略となる．第 3 に，本プロトコルはパレート効率的な配分を実現する．第 4 に，非合理的なプレイヤが存在したとしても，その非合理的なプレイヤの数が閾値より小さければ，合理的なプレイヤの効用は負にならない．

参考文献

[1] C. Boutilier, M. Goldszmidt, and B. Sabata. Sequential auctions for the allocation of resources with complementarities. In *Proceedings of the sixteenth International Joint Conference on Artificial Intel-*

ligence, pages 524–534, 1999.
[2] R. H. Guttman, A. G. Moukas, and P. Maes. Agent-mediated electronic commerce: A survey. *The Knowledge Engineering Review*, 13(2):147–159, 1998.
[3] L. Hunsberger and B. J. Grosz. A combinatorial auction for collaborative planning. In *Proceedings of the 4th International Conference on Multi-Agent Systems*, pages 151–158, 2000.
[4] R. D. Luce and H. Raiffa. *Games and Decisions.* Dover Publications, 1989.
[5] A. Mas-Colell, M. D. Whinston, and J. R. Green. *Microeconomic Theory.* Oxford University Press, 2nd edition, 1995.
[6] S. Matsubara. Accelerating information revelation in ascending-bid auctions - avoiding last minute bidding -. In *Proceedings of the Third ACM Conference on Electronic Commerce (EC2001)*, 2001.
[7] P. R. Milgrom and R. J. Weber. A theory of auctions and competitive bidding. *Econometrica*, 50(5):1089–1122, 1982.
[8] E. Rasmusen. *Games and Information.* Blackwell Publishers Ltd, 2nd edition, 1994.
[9] T. Sandholm. eMediator: A next generation electronic commerce server. In *Proceedings of the International Conference on Autonomous Agents (AGENTS00)*, pages 341–438, 2000.
[10] 鈴木光男. **ゲーム理論**. 勁草書房, 1994.
[11] J. Yamamoto and K. Sycara. A stable and efficient buyer coalition formation scheme for e-marketplaces. In *Proceedings of the 5th International Conference on Autonomous Agents (AGENTS01)*, 2001.

A 専門家の支配戦略に関する証明

自然の選択のレベル数が 2 の場合，専門家 i にとって虚偽の申告による支払額が真の申告をした時の支払額と比較して増加しない，または虚偽の申告による支払額が，真の申告をした時の支払額と同じになることを確認する．q_i は専門家 i によって観測された自然の選択を表す．q'_i は専門家 i の虚偽の自然の選択を表す．$q_{\max'}$ は i 以外の参加者から申告された最大の自然の選択を表す．q_I は偽物，q_R は本物を意味する．以下，i が q'_i を申告しても利益がないことを，【I】,【II】, および【III】の場合に分けて示す．

【I】$q_i < q_{\max'}$ の場合， $q_i = q_I$ および，$q_{\max'} = q_R$ となり,【a】と【b】の場合がある.【a】i が真の自然の選択を申告した時，ケース 2 またはケース 3 が適用され，i は財を落札できるチャンスがない.【b】i が虚偽の自然の選択を申告をした時，$q'_i = q'_{\max'}$ となりケース 3 が適用される．i が勝つなら，支払額 t_i は $B_{E,R}$，$B_{N,R}$，および α の中の最大値である．$\alpha \geq b_{i,q_I}$ より，$t_i > b_{i,q_I}$．すなわち i の効用は $u_i = b_{i,q_I} - t_i \leq 0$. i は虚偽の入札を申告しても効用は正にならない．

【II】$q_i = q_{\max'}$ の場合，【c】と【d】の場合がある.【c】$q_i = q_{\max'} = q_R$ の時【c-1】と【c-2】の場合がある.【c-1】i が真の自然の選択を申告する時，$q_{\max'}$ の申告の数が 2 以上になるので，ケース 3 が適用される．i が勝てば，支払額は，$B_{E,R}$，$B_{N,R}$，および α の最大値となる．明らかに虚偽の評価値を申告しても利益がない.【c-2】i が虚偽の自然の選択を申告する時，$q_{i'} = q_I < q_{\max'} = q_R$ なので，ケース 2 かケース 3 が適用される．i は $q_{\max'}$ を申告しないので，i は勝つチャンスがない．明らかに虚偽の評価値を申告しても利益はない.【d】$q_i = q_{\max'} = q_I$ の時,【d-1】と【d-2】の場合がある.【d-1】i が真の自然の選択を申告し，i が勝てば，支払額は $B_{E,I}$ と $B_{N,I}$ の最大値となる．明らかに虚偽の評価値を申告しても利益がない.【d-2】i が虚偽の自然の選択を申告する場合，$q'_i = q_R > q_{\max'} = q_I$ なので，ケース 2 が適用される．i が勝てば支払額は $B_{E,I}$ と $B_{N,I}$ の最大値となり，i が真の自然の選択を申告した場合と同じ．明らかに虚偽の評価値を申告しても利益はない．

【III】$q_i > q_{\max'}$ の時， $q_i = q_R$ かつ $q_{\max'} = q_I$ となり【e】と【f】の場合がある.【e】i が真の自然の選択を申告した時，ケース 2 が適用される．i が勝てば，支払額は，支払額は $B_{E,I}$ と $B_{N,I}$ の最大値となる.【f】i が虚偽の自然の選択を申告した時，ケース 1 が適用される．i が勝てば，支払額は $B_{E,I}$ と $B_{N,I}$ の最大値となり，i が真の自然の選択を申告した時と同じ．明らかに虚偽の評価値を申告しても利益はない．

B 素人の最適反応戦略の証明

仮定 2 の下で，素人 j にとって真の申告をすることが最適反応戦略であることを証明する．素人 j は【I】と【II】の二つの戦略を持つ.【I】自分が素人であると真の申告をする戦略と【II】自分が専門家であると虚偽の申告をする戦略である．

【I】素人 j が自分が素人であると真の申告をした時，明らかに j が真の評価値より大きい (または小

さい) 虚偽の評価値を申告しても利益はない．これはケース 4 であるから以下の式が成立する時 j は勝つ．$b_{j,q_{\max'}} > \max\{B_{E,q_{\max'}}, B_{N,q_{\max'}}, \alpha_{q_{\max'}-1}\}$ 支払額は，$t_j = \max\{B_{E,q_{\max'}}, B_{N,q_{\max'}}, \alpha_{q_{\max'}-1}\}$(1) となる．

【II】素人 j が自分は専門家であると虚偽の申告をした場合,【a】と【b】の場合がある.【a】j を除いてケース 1 かケース 4 が満たされる場合：素人 j が，真の自然の選択よりも大きい自然の選択を申告しても支払額は同じになることを示す.【a-1】と【a-2】の場合がある.【a-1】j を除いてケース 1 が満足する場合，j が勝つなら支払額は式 (1) と同じ.【a-2】j を除いてケース 4 が満足する場合，j が $q_{i'} = q_{\max'}$ を申告した時，$q_{\max'}$ を申告した入札者の数が $k+1$ の時，ケース 4 が適用される．j が勝つ時の支払額は式 (1) と同じ．j が $q_{i'} > q_{\max'}$ を申告した時，ケース 2 が適用される．j が勝つ時の支払額は式 (1) と同じ.【b】j を除いてケース 2 かケース 3 が満たされる場合：明らかに虚偽の申告をしている (自分は専門家であると申告する) 素人が存在する．この場合も j に利益がないことを示す.【b-1】と【b-2】の場合がある.【b-1】j を除いてケース 2 が満たされる場合，j が $q_{i'} = q_{\max'}$ を申告した時，$q_{\max'}$ の申告の数が 2 となる．$k > 2$ ならケース 3，$k = 2$ ならケース 4 が適用される．どちらの場合も，j が勝った時の支払額は式 (1) と同じ．j が $q_{i'} > q_{\max'}$ を申告した時，j だけが $q_{\max}$ を申告するので，ケース 2 が適用される．j が勝つ時の支払額は式 (1) と同じ.【b-2】j を除いてケース 3 が満たされる場合，j が $q_{i'} = q_{\max'}$ を申告した時，$q_{\max'}$ の申告の数は k になり，ケース 4 が適用される．j が勝つ時の支払額は式 (1) と同じ．j が $q_{i'} > q_{\max'}$ を申告した時，j だけが $q_{\max}$ を申告するので，ケース 2 が適用される．j が勝つ時の支払額は式 (1) と同じ．

C 非合理的プレイヤに対する頑健性

専門家は支配戦略を取るので，専門家は確実に $q_{\max}$ を申告する.【I】,【II】，および【III】の場合がある．

【I】$q_{\max'} > q_{\max}$ の時，合理的なプレイヤには勝つチャンスがない．つまり合理的なプレイヤの効用は 0 より小さくならない.【II】$q_{\max'} = q_{\max}$ の時，非合理的なプレイヤも支配戦略を取るということだから，合理的なプレイヤの効用は 0 より小さくならない.【III】$q_{\max'} > q_{\max}$ の時,【a】,【b】，および【c】の場合がある.【a】ケース 2 の時，合理的プレイヤが勝つなら，支払額は $B_{E,q_{\max}-1}$，$B_{N,q_{\max}-1}$，および $\alpha_{q_{\max}-2}$ の中の最大値となる.【b】ケース 3 の時，合理的プレイヤが勝つなら，支払いは $B_{E,q_{\max}}$，$B_{N,q_{\max}}$，および $\alpha_{q_{\max}-1}$ の最大値となる.【c】ケース 4 の時，合理的プレイヤが勝つなら，支払いは，$B_{E,q_{\max}}$，$B_{N,q_{\max}}$，および $\alpha_{q_{\max}-1}$ の中の最大値となる．以上の場合で，支払額は真の自然の選択 $q_{\max}$ に基づくので，合理的なプレイヤの効用は 0 より小さくならない．