

## ダブルトラック・オークションの実験研究

宇都 伸之  
早稲田大学

上條 良夫  
高知工科大学

船木 由喜彦  
早稲田大学

(受理 2014 年 4 月 17 日; 再受理 2015 年 12 月 7 日)

**和文概要** ダブルトラック・オークションは、補完財を含む複数の財を適切に割り当てることを可能にするオークションメカニズムである。従来の複数財オークションメカニズムは、補完財を適切に割り当てることが出来ないという点で、ダブルトラック・オークションは画期的なオークションメカニズムである。しかし、先行研究によって、このオークションメカニズムは適切に機能しない可能性があるということが明らかになった。その原因としてピットフォールと呼ばれる価格の存在が示唆されている。本研究では、経済実験手法によりピットフォール価格の有無をコントロールして、ダブルトラック・オークションの性能を検証した。その結果、理論的に予測される価格の調整過程においてピットフォール価格が存在する場合、競争均衡の実現頻度が 60 % 程度低くなることが明らかとなった。一方で、ピットフォール価格が存在しない場合、ダブルトラック・オークションは理論通りに優れた性能を発揮していた。

**キーワード:** 経済, ゲーム理論, 経済実験

### 1. はじめに

本研究は Sun and Yang [5] が開発したダブルトラック・オークションと呼ばれる新しいオークションメカニズムの諸性能を実験によって検証するものである。

ダブルトラック・オークションとは、Sun and Yang [5] によって開発された非分割複数財オークションメカニズムである。このオークションメカニズムの新規性は、代替財に加え、補完財の適切な割り当てを可能にしたという点である。従来の非分割複数財オークションメカニズムは、代替財の適切な割り当てが可能である。例えば、Gul and Stacchetti [2] が開発した複数財英国式オークションや、アメリカ連邦通信委員会 (Federal Communication Commission :FCC) が運営する周波数オークションは、財が代替財であれば、競争均衡を実現することが可能である。しかし、このような非分割複数財オークションメカニズムは、補完財を含む代替財以外が存在するとき、適切に機能せず競争均衡も一般に存在しない [1, 3]。また、FCC による周波数オークションにおいても、代替財以外の財が存在するとき、非効率な結果が生じることが知られている [4]。このように、従来の非分割複数財オークションメカニズムは、代替財の割り当てのみに機能していた。Sun and Yang [5] は、代替財に加え、補完財についても適切な割り当てを可能にするダブルトラック・オークションを開発した。具体的には、売りに出される財の集合を  $S_1$  と  $S_2$  の 2 つのグループに分割する。グループ  $S_1(S_2)$  内の財は互いに代替財である。一方で  $S_1$  内の任意の財と  $S_2$  内の任意の財は補完財である。ダブルトラック・オークションは、このような関係にある代替財と補完財について、適切な財の割り当てを可能にするオークションメカニズムである。従来の非分割複数財オークションは、補完財の適切な割り当てが不可能であった。したがって、ダブルトラック・オークションは革新的なオークションメカニズムである。

ダブルトラック・オークションによる適切な財配分が保障されるのは、オークションの買い手(入札者)が効用最大化入札対応  $D^i(p)$  に従っているときである。しかし、現実には人々の入札行動が理論的に想定される入札行動と一致するとは限らない。実際、宇都 [6] による実験研究では、買い手である実験の被験者は理論的に想定される効用最大化入札対応  $D^i(p)$  に従っていないという現象が確認されている。オークションを実際に運用するためには、そのオークションメカニズムが現実においても理論通りの性能を発揮するか検証する必要がある。つまり、理論的な想定と異なる入札行動があったとしても、適切な財配分が可能であるか検証しなくてはならない。本研究では実験手法によってこの検証を行う<sup>1</sup>。

宇都 [6] はダブルトラック・オークションの予備的実験を行った。この研究によって、理論研究で見ることができなかった落とし穴と呼ぶべき価格ベクトルが発見されている。そして、この価格ベクトルの存在によって、競争均衡が実現しないという結果が得られた。本研究では、そのような価格ベクトルをピットフォール (pitfall) 価格と呼び、ピットフォール価格の存在がダブルトラック・オークションの性能にどのような影響を与えるか実験的に検証した。ピットフォール価格が存在する実験条件と、存在しない実験条件を設定し、実験を行った。その結果、ピットフォール価格が存在しない実験条件では、ダブルトラック・オークションは理論通りの性能を発揮していることが分かった。しかし、ピットフォール価格が存在する実験条件では、理論通りの性能を発揮することが難しいということが分かった。このことから、ピットフォール価格の存在は、ダブルトラック・オークションの性能を低下させることが明らかになった。

本論文の構成は次の通りである。第2節では、Sun and Yang [5] によって示されたダブルトラック・オークションのモデルを示す。第3節では、宇都 [6] による予備的実験研究に基づき、Sun and Yang [5] で想定されていない新しい入札対応を定義する。そして、オークションの買い手が、その新しい入札対応に従う場合、ピットフォール価格の存在によって競争均衡が実現しないことを示す。第4節では、第3節までの議論に基づき、本実験研究の仮説を提示し、実験の概要を説明する。第5節では、提示した仮説から導かれる実験結果についての予測を説明する。第6節では、実験の結果を示す。第7節では、研究のまとめと今後の展望を議論する。

## 2. ダブルトラック・オークションモデル

本節では、ダブルトラック・オークションで想定される市場、買い手の選好に関する条件、アルゴリズムを説明する<sup>2</sup>。

<sup>1</sup>Sun and Yang [5] においてはダブルトラック・オークションではなく、ダブルトラック調整プロセスと呼んでいる。しかし、本研究の目的は調整プロセスそのものを検証することではない。調整プロセスをオークションとして運用したときに、理論的想定と異なる人々の入札行動が結果に対してどのような影響を与えるのかを実験的に検証するのが本研究の目的である。したがって、本研究では一貫してダブルトラック・オークションという呼び方をしている。

<sup>2</sup>Sun and Yang [5] では、初期価格に制約を課す基本モデルである Dynamic Double-Track (DDT) Procedure と、初期価格に制約を課さない発展的モデルである Global Dynamic Double-Track (GDDT) Procedure の2つが提案されている。本研究で取り扱うモデルは、前者の DDT モデルである。本研究の目的は、ピットフォール価格の存在がダブルトラック・オークションに与える影響を検証することであった。また、実験を行うためには被験者がダブルトラック・オークションのルールを完全に理解する必要がある。しかし、GDDT モデルは DDT モデルよりも複雑であるため、被験者がルールを理解することが困難である。実際に、GDDT モデルによる予備的実験を実施したところ、ルールを理解できなかった被験者が多数いた。本研究の目的と実験実施上の問題点を踏まえ、DDT モデルを研究対象とすることが最適であると判断した。

## 2.1. オークション市場

ある1人の売り手が、 $b$ 人の買い手に $n$ 個の非分割財を売ること考えている。有限の買い手集合を  $I = \{1, 2, \dots, b\}$ 、 $n$ 個の非分割財集合を  $N = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\}$  とする。財の価格はベクトル  $p = (p_1, p_2, \dots, p_n) \in \mathbb{R}_+^n$  で与えられ、財  $\beta_h \in N$  の価格は  $p_h$  である。任意の財  $\beta_h \in N$  は必ず集合  $S_1, S_2$  のいずれかに属する。したがって、 $S_1 \cup S_2 = N$  かつ  $S_1 \cap S_2 = \emptyset$  である。買い手  $i \in I$  の消費計画に対する評価は評価関数  $u^i : 2^N \rightarrow \mathbb{R}$  によって表現され、 $u^i(\emptyset) = 0$  である。ここで、 $2^N$  は財集合  $N$  の部分集合の全体である。評価関数  $u^i$  は単調非減少関数である。

価格ベクトル  $p$  に対して、買い手  $i \in I$  の入札対応  $D^i(p)$  と効用関数  $v^i(A | p)$  を、

$$D^i(p) = \arg \max_{A \subseteq N} \{u^i(A) - \sum_{\beta_h \in A} p_h\} \quad (1)$$

$$v^i(A | p) = u^i(A) - \sum_{\beta_h \in A} p_h \quad (2)$$

により定義する。定義より、買い手  $i \in I$  の効用関数  $v^i$  は金銭に対して線形である。

配分は集合  $N$  の分割  $\pi = (\pi(i), i \in I)$  で定義し、任意の  $i, j \in I, i \neq j$  に対して  $\pi(i) \cap \pi(j) = \emptyset$ 、かつ  $\bigcup_{i \in I} \pi(i) = N$  であるものとする。ここで、 $\pi(i)$  とは買い手  $i \in I$  に対する財の割り当てである。ある配分  $\pi$  が効率的であるとは、任意の配分  $\rho$  に対して、 $\sum_{i \in I} u^i(\pi(i)) \geq \sum_{i \in I} u^i(\rho(i))$  であるときをいう。

**定義 2.1.** 競争均衡  $(p, \pi)$  は価格ベクトル  $p \in \mathbb{R}_+^n$  と配分  $\pi$  から構成され、任意の買い手  $i \in I$  に対して  $\pi(i) \in D^i(p)$  である。とくに、競争均衡における価格ベクトル  $p$  を競争均衡価格と呼ぶ。

**定義 2.2.** 買い手  $i \in I$  の評価関数  $u^i$  が粗代替補完性 (Gross Substitutes and Complements: GSC) 条件を満たすとは、任意の価格ベクトル  $p \in \mathbb{R}_+^n$ 、集合  $S_j (j = 1, 2)$  内の任意の財  $\beta_k \in S_j$ 、任意の数  $\delta \geq 0$ 、買い手  $i \in I$  の入札対応の任意の要素  $A \in D^i(p)$  に対して、 $B \in D^i(p + \delta e(k))$  が存在し、 $[A \cap S_j] \setminus \{\beta_k\} \subseteq B$  かつ  $[A^c \cap S_j^c] \subseteq B^c$  であるときをいう。ここで、任意の整数  $k (1 \leq k \leq n)$  に対して、 $e(k)$  は  $k$  番目の要素が1で、それ以外が0であるような  $\mathbb{R}^n$  のベクトルである。

買い手  $i \in I$  の入札対応の要素  $A \in D^i(p)$  に対して、集合  $S_1$  内の財  $\beta_k \in S_1$  の価格が上昇したとする。 $[A \cap S_1] \setminus \{\beta_k\} \subseteq B$  より、価格が上昇する前に需要されていた集合  $S_1$  に属する  $\beta_k$  以外の財は、 $\beta_k$  の価格が上昇した後においても、需要されている。したがって、 $\beta_k$  と集合  $S_1$  に属する財は代替財である。一方で、 $[A^c \cap S_2] \subseteq B^c$  より、 $\beta_k$  の価格が上昇する前に需要されていない集合  $S_2$  に属する財は、 $\beta_k$  の価格が上昇しても、 $B \in D^i(p + \delta e(k))$  に含まれない。したがって、 $\beta_k$  と集合  $S_2$  に属する財は補完財である。以上より、GSC 条件は、同じ集合  $S_j (j = 1, 2)$  内の財同士は代替財で、集合  $S_1$  内の任意の財と集合  $S_2$  内の任意の財は補完財である、という条件を買い手  $i \in I$  の評価関数  $u^i$  に課すものである。

**仮定 2.1.** 任意の買い手  $i \in I$  の評価関数  $u^i$  は0以上の整数値をとる。すなわち  $u^i : 2^N \rightarrow \mathbb{Z}_+$  である。

**仮定 2.2.** 任意の買い手  $i \in I$  の評価関数  $u^i$  は GSC 条件を満たす。

以上で、ダブルトラック・オークションにおけるオークション市場と買い手の選好を定義した。次に、オークション市場において競争均衡を実現するためのアルゴリズムを示す。

## 2.2. ダブルトラック・オークションのアルゴリズム

まず、アルゴリズムを示すために必要な諸概念を定義する。

$\mathbb{R}^n$  上の順序関係  $\preceq_g$  を定義する。任意の  $p \in \mathbb{R}^n$  と任意の集合  $A \in 2^N$  に対して、 $p(A) = \sum_{\beta_k \in A} p_k e(k)$  とする。ベクトル  $p, q \in \mathbb{R}^n$  に対して、 $p \preceq_g q$  であるとは、 $p(S_1) \leq q(S_1)$  かつ  $p(S_2) \geq q(S_2)$  であるときをいう。ある部分集合  $W \subseteq \mathbb{R}^n$  において、任意のベクトル  $p \in W$  に対して  $p^* \preceq_g p$  であるとき、ベクトル  $p^*$  は  $W$  において最小であるという。同様にして、ある部分集合  $W \subseteq \mathbb{R}^n$  において、任意のベクトル  $p \in W$  に対して  $p \preceq_g q^*$  であるとき、ベクトル  $q^*$  は  $W$  において最大であるという。

つぎに、価格調整のための  $n$  次元立方体  $\square$  を以下のように定義する。

$$\square = \{\delta \in \mathbb{R}^n \mid 0 \leq \delta_k \leq 1, \forall \beta_k \in S_1; -1 \leq \delta_l \leq 0, \forall \beta_l \in S_2\}$$

$n$  次元立方体  $\square$  内の要素  $\delta \in \square$  を価格調整ベクトルと呼ぶ。  $p(t)$  を  $t$  期における価格ベクトル、  $\delta(t)$  を  $t$  期における価格調整ベクトルとする。このとき  $t+1$  期の価格は  $p(t+1) = p(t) + \delta(t)$  によって得られる。  $n$  次元立方体  $\square$  の定義から、集合  $S_1$  内の財は価格が上昇し、集合  $S_2$  内の財は価格が下降するように調整が進むことが分かる。

価格調整ベクトル  $\delta$  は、全ての買い手  $i \in I$  が表明する入札情報  $D^i(p)$  を基に、オークションの売り手が以下の最大化問題を解くことで得られる。

$$\max_{\delta \in \Delta} \left\{ \sum_{i \in I} \left( \min_{C \in D^i(p)} \sum_{\beta_h \in C} \delta_h \right) - \sum_{\beta_h \in N} \delta_h \right\} \quad (3)$$

ただし  $\Delta = \square \cap \mathbb{Z}^n$  である。一般に最大化問題 (3) の解は複数あるが、順序関係  $\preceq_g$  の意味で最小となる解を、価格調整ベクトル  $\delta$  とする。

ダブルトラック・オークションのアルゴリズムは、以下のようなものである。

- Step1: 売り手は  $p(0) \preceq_g \underline{p}$  を満たす初期価格ベクトル  $p(0) \in \mathbb{Z}^n$  を全ての買い手  $i \in I$  に知らせる。ただし、価格ベクトル  $\underline{p}$  は一般に複数存在する競争均衡価格において  $\preceq_g$  の意味で最小の競争均衡価格である。とくに、 $\underline{p}$  を理論価格と呼ぶ。  $t = 0$  として Step2 へ進む。
- Step2: 買い手  $i \in I$  は、  $u^i$  と  $p(t)$  を基に入札対応  $D^i(p(t))$  を表明する。売り手は、全ての買い手  $i \in I$  の入札対応  $D^i(p(t))$  を集計し、最大化問題 (3) を計算し、価格調整ベクトル  $\delta(t)$  を求める。これによって次期の価格ベクトル  $p(t+1) := p(t) + \delta(t)$  を得る。  $p(t+1) = p(t)$  ならば、オークションは終了する。それ以外の場合は、  $t := t+1$  として Step2 を繰り返す。

$p(0) \preceq_g \underline{p}$  より、集合  $S_1$  内の財の初期価格は超過需要が起こるに十分低い価格とする。一方で、集合  $S_2$  内の財の初期価格は超過供給が起こるに十分高い価格とする。

**定理 2.1** (Sun and Yang [5]). 仮定 2.1, 仮定 2.2 をオークション市場が満たすとき、ダブルトラック・オークションは、アルゴリズムによって競争均衡価格  $\underline{p}$  を有限回の調整によって実現することができる。

## 2.3. 例

オークション市場における財集合を  $N = \{A, B\}$ ,  $S_1 = \{A\}$ ,  $S_2 = \{B\}$  とする。この2つの財を買い手1と買い手2が競う。つまり、  $I = \{1, 2\}$  である。

表 1: 買い手の評価

	$\emptyset$	$A$	$B$	$AB$
買い手 1	0	5	11	18
買い手 2	0	5	3	14

いま、2人の買い手の評価関数の値が表1の通りであるとする<sup>3</sup>。 $\emptyset$ は、何も手に入れない状態を意味し、このときの評価値は0とする。それぞれの買い手にとって、 $A$ と $B$ を同時に手に入れること( $AB$ )に対する評価は、 $A$ と $B$ それぞれに対する評価の和よりも大きい。このことより、 $A$ と $B$ は補完財であることが分かる。このような評価プロファイルのもとで、ダブルトラック・オークションは、表2のように価格を調整し、需要と供給を一致させる。2人の買い手は、理論上の入札対応 $D^i(p)$ に従うものとする。つまり、効用が最大になるような $N$ の部分集合に入札する。

表 2: 価格調整の例

$t$ 期	$p(t) = (p_A, p_B)$	$D^1(p(t))$	$D^2(p(t))$	$\delta(t)$
0	(3,15)	$A$	$A$	(1,-1)
1	(4,14)	$A$	$A$	(1,-1)
2	(5,13)	$\emptyset, A, AB$	$\emptyset, A$	(0,0)

- 第0期の価格ベクトルは、 $p(0) = (3, 15)$ である。このとき、買い手1と買い手2の効用を最大にするのは、それぞれ $A$ に入札することである。したがって、 $D^1(p(0)) = D^2(p(0)) = \{A\}$ である。この入札情報を基に、売り手は最大化問題(3)を解き、第1期への価格調整ベクトル $\delta(0) = (1, -1)$ を得る。第1期の価格ベクトルは $p(1) = p(0) + \delta(0) = (3, 15) + (1, -1) = (4, 14)$ である。
- 第1期の価格ベクトル $p(1) = (4, 14)$ においても、買い手1と買い手2の効用を最大にするのは、それぞれ $A$ に入札することである。したがって、 $D^1(p(1)) = D^2(p(1)) = \{A\}$ である。第0期と同様に、売り手が最大化問題(3)を解き、第2期への価格調整ベクトル $\delta(1) = (1, -1)$ を得る。第2期の価格ベクトルは $p(2) = p(1) + \delta(1) = (4, 14) + (1, -1) = (5, 13)$ である。
- 第2期の価格ベクトル $p(2) = (5, 13)$ において、買い手1は $A$ を単独で落札しても、 $A$ と $B$ を同時に落札しても効用は0である。しかし、 $B$ を単独で落札すると、効用の値は負である。つまり、可能な効用の最大値は0である。効用の値が0になるのは、どの財も落札しない場合もある。したがって、 $D^1(p(2)) = \{\emptyset, A, AB\}$ である。買い手2は $A$ を単独で落札しても、効用はゼロである。しかし、 $B$ を単独で落札しても、 $A$ と $B$ を同時に落札しても効用の値は負である。買い手1と同様に、可能な効用の最大値は0であるから、 $D^2(p(2)) = \{\emptyset, A\}$ である。売り手が最大化問題(3)を解き、第3期への価格調整ベクトル $\delta(2) = (0, 0)$ を得る。 $p(3) = p(2)$ になるので、オークションが終了する。

オークションが終了すると、配分が決まる。配分は $\pi(1) = \{A, B\}$ ,  $\pi(2) = \{\emptyset\}$ なる配分 $\pi$ である。この時の効用和は $\sum_{i \in I} u^i(\pi(i)) = 18$ で、これは他のどのような配分よりも大きな効用和である。したがって、配分 $\pi$ は効率的である。

<sup>3</sup>表1のような評価関数の値の組み合わせを評価プロファイルと呼ぶ。

以上の例より、ダブルトラック・オークションは補完財の適切な割り当てを可能としていることが分かる。

### 3. ピットフォール

宇都 [6] は、ダブルトラック・オークションの予備的実験を行い、実験において買い手の入札行動が、理論的な入札対応  $D^i(p)$  が指し示すものとは異なることを明らかにした。本節では、宇都 [6] で観察された入札行動を基に、新しい入札対応  $\tilde{D}^i(p)$  を定義する。そして、全ての買い手が入札対応  $\tilde{D}^i(p)$  に従う場合、ダブルトラック・オークションによって競争均衡が実現しない可能性があることを示す。

#### 3.1. ピットフォールの定義

宇都 [6] は、前節の例と同様の2つの財を2人の買い手が競うダブルトラック・オークションの予備的実験を実施した。実験の被験者は、買い手としてオークションに参加した。実験終了後、どのような入札行動をとったかアンケートによる調査を行った。その結果、典型的な入札行動は、正の効用が得られるもの全てに入札するというものであった。理論上は入札対応  $D^i(p)$  の定義より、最大の効用が得られるものだけに入札すると仮定されていた。しかし、最大ではないが正の効用が得られる選択肢が存在するならば、それについても入札するというのが、被験者がとった入札行動であった。

宇都 [6] の実験において典型的な入札行動から、新しい入札対応  $\tilde{D}^i(p)$  を、

$$\tilde{D}^i(p) = \begin{cases} \{A \mid u^i(A) - \sum_{\beta_h \in A} p_h > 0\} & \text{if } \max\{u^i(A) - \sum_{\beta_h \in A} p_h\} > 0 \\ \{A \mid u^i(A) - \sum_{\beta_h \in A} p_h = 0\} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

により定義する。この入札対応  $\tilde{D}^i(p)$  に従う買い手  $i \in I$  は、効用が正になるもの全てに入札する。

次に、全ての買い手が入札対応  $\tilde{D}^i(p)$  に従うとき、ダブルトラック・オークションのアルゴリズムによってもたらされる価格と配分の組をピットフォールとして定義する。

**定義 3.1.** ピットフォール  $(\tilde{p}, \tilde{\pi})$  は、価格ベクトル  $\tilde{p} \in \mathbb{Z}_+^n$  と配分  $\tilde{\pi}$  から構成され、任意の買い手  $i \in I$  に対して、 $\tilde{\pi}(i) \in \tilde{D}^i(\tilde{p})$  である。とくに、ピットフォールにおける価格ベクトル  $\tilde{p}$  をピットフォール価格と呼ぶ。

オークションによって、価格が競争均衡価格に到達する前に、ピットフォール価格に到達したとする。このとき、すべての買い手  $i \in I$  が入札対応  $\tilde{D}^i(p)$  に従うとき、ダブルトラック・オークションの価格調整はピットフォール価格において止まり、競争均衡価格には到達しない。実際にこのようなピットフォール価格が存在することを、例によって示す。

#### 3.2. 例

前節の例と同じように、 $N = \{A, B\}, I = \{1, 2\}$  というオークション市場を想定する。評価プロファイルは表3の通りとする。いま、オークションは  $t$  期で、価格ベクトルが  $\tilde{p}(t) = (5, 10)$  であるとする。もし、2人の買い手が理論上の入札対応  $D^i(p)$  に従っているならば、

表 3: 買い手の評価

	$\emptyset$	A	B	AB
買い手 1	0	12	4	17
買い手 2	0	3	7	14

$D^1(\tilde{p}(t)) = \{A\}, D^2(\tilde{p}(t)) = \{\emptyset\}$  である。この入札情報を基に売り手が最大化問題 (3) を解くと、価格調整ベクトル  $\delta(t) = (0, -1)$  を得る。  $\tilde{p}(t) \neq \tilde{p}(t+1) = \tilde{p}(t) + \delta(t)$  であるから、価格ベクトル  $\tilde{p}(t) = (5, 10)$  においてオークションが終了することはない。したがって、価格ベクトル  $\tilde{p}(t) = (5, 10)$  は競争均衡価格ではない。

しかし、価格ベクトル  $\tilde{p}(t) = (5, 10)$  において、2人の買い手が入札対応  $\tilde{D}^i(p)$  に従っているならば、  $\tilde{D}^1(\tilde{p}(t)) = \{A, AB\}, \tilde{D}^2(\tilde{p}(t)) = \{\emptyset\}$  である。買い手1は、 $A$  を落札すると7の効用が得られるが、 $A$  と  $B$  を同時に落札すると2の効用が得られる。入札対応  $\tilde{D}^i(p)$  は正の効用が得られるもの全てに入札することを意味するから、買い手1は  $A$  に加え、 $AB$  にも入札する。これが入札対応  $D^i(p)$  との違いである。以上の入札情報を基に売り手が最大化問題 (3) を解くと、価格調整ベクトル  $\delta(t) = (0, 0)$  を得る。  $\tilde{p}(t) = \tilde{p}(t+1)$  であるから、前節で定義したアルゴリズムより、オークションが終了し、配分  $\tilde{\pi}$  が決まる。このときの配分  $\tilde{\pi}$  は、  $\tilde{\pi}(1) = \{A, B\}, \tilde{\pi}(2) = \{\emptyset\}$  であり、市場全体の効用和は17である。  $\tilde{\pi}(1) \in \tilde{D}^1(\tilde{p}(t))$  かつ、  $\tilde{\pi}(2) \in \tilde{D}^2(\tilde{p}(t))$  より、価格ベクトル  $\tilde{p}(t) = (5, 10)$  はピットフォール価格である。

この例における市場全体の効用和の最大値は19で、  $\pi(1) = \{A\}, \pi(2) = \{B\}$  なる配分  $\pi$  によって実現する。一方で、ピットフォール価格  $\tilde{p}(t) = (5, 10)$  で実現した配分  $\tilde{\pi}$  は、17の効用和しかもたらない。したがって、ピットフォール  $(\tilde{p}, \tilde{\pi})$  における配分  $\tilde{\pi}$  は一般的に効率的でない。

以上の例より、すべての買い手が入札対応  $\tilde{D}^i(p)$  に従っているとき、ダブルトラック・オークションによって競争均衡が実現するとは限らない。次節では、第2節と第3節の議論を基に、実験における仮説を提示し、実験の概要を説明する。

## 4. 実験

### 4.1. 仮説

本研究の目的は、前節で定義したピットフォール価格の存在が、ダブルトラック・オークションの性能にどのような影響を与えるかを明らかにすることである。

初期価格から理論価格まで理論的に調整される価格の調整過程を、価格の調整経路と呼ぶ。価格の調整経路上にピットフォール価格が存在し、全ての買い手  $i \in I$  が入札対応  $\tilde{D}^i(p)$  に従うとき、ダブルトラック・オークションは財を適切に割り当てられない可能性があるということが、前節の議論により明らかになった。したがって、実験における仮説を以下のよう設定する。

- 仮説1：価格の調整経路上にピットフォール価格が存在しないとき、ダブルトラック・オークションは理論通りの性能を発揮する。つまり、競争均衡価格で補完財を買い手に割り当て、そのときの配分は効率的である。
- 仮説2：価格の調整経路上にピットフォール価格が存在するとき、ダブルトラック・オークションは理論通りの性能を発揮しない。つまり、ピットフォール価格で価格調整が止まり、競争均衡価格に到達しない。また、そのときの配分は必ずしも効率的でない。

### 4.2. 実験におけるオークション市場

実験におけるオークション市場は、第2節における例と同じものである。すなわち、財集合は  $N = \{A, B\}$ 、  $S_1 = \{A\}$ 、  $S_2 = \{B\}$  であり、買い手集合は  $I = \{1, 2\}$  である。実験の被験者は2人で1つのグループとなり、買い手1、買い手2としてオークションに参加する。

オークションの売り手は実験者であり、コンピュータによって最大化問題 (3) を解き、価格調整と財の割り当てを行う。

#### 4.3. 評価プロファイルの設定

実験では、被験者が買い手としてオークションに参加するが、 $\emptyset, A, B, AB$  に対する評価関数の値は実験者が設定する。被験者はその値を基に、オークションに参加する。

本研究における仮説を検証するためには、価格の調整経路上にピットフォール価格が存在する実験条件と、存在しない実験条件を設定する必要がある。ピットフォール価格の有無は、評価プロファイルによって決まる。以下で説明する評価プロファイル 1, 2 は、価格の調整経路上にピットフォール価格が存在しない評価プロファイルである。評価プロファイル 3, 4 は、価格の調整経路上にピットフォール価格が存在する評価プロファイルである。

##### 4.3.1. 価格の調整経路上にピットフォール価格が存在しない評価プロファイル

- 評価プロファイル 1 では、ピットフォール価格が存在するが、それらはすべて価格の調整経路から外れた場所に存在し、競争均衡価格に隣接しない。図 1 は、初期価格、理論的に到達する競争均衡価格 (理論価格)、それ以外の競争均衡価格、ピットフォール価格を表している。横軸は  $A$  の価格、縦軸は  $B$  の価格である、 $A \in S_1, B \in S_2$  であるから、価格調整は  $A$  の価格が上昇し、 $B$  の価格が下降する。図中においては、初期価格から右下方向に価格調整が進む。初期価格から理論価格につながる太線は、価格の調整経路である。ピットフォール価格は○印で示される。ピットフォール価格は  $A, B$  の価格が低い部分に存在しており、競争均衡価格から離れている。
- 評価プロファイル 2 では、評価プロファイル 1 と同様にピットフォール価格が存在するが、それらは全て価格の調整経路から外れた場所に存在する。評価プロファイル 1 と異なり、評価プロファイル 2 では競争均衡価格に隣接したピットフォール価格が存在する。

##### 4.3.2. 価格の調整経路上にピットフォール価格が存在する評価プロファイル

- 評価プロファイル 3 では、ピットフォール価格が価格の調整経路上に存在する。図 3 において、初期価格から理論価格へ調整が行われる段階で、複数のピットフォール価格が存在している。評価プロファイル 3 の場合、全ての買い手が入札対応  $\tilde{D}^i(p)$  に従い、ピットフォール価格においてオークションが終了すると、そのときの配分は効率的ではない。
- 評価プロファイル 4 でも、ピットフォール価格が価格の調整経路上に存在する。評価プロファイル 3 と同様に、初期価格から理論価格へ調整が行われる段階で複数のピットフォール価格が存在する。評価プロファイル 3 との違いは、配分の効率性である。評価プロファイル 4 の場合、全ての買い手が入札対応  $\tilde{D}^i(p)$  に従い、ピットフォール価格においてオークションが終了しても、そのときの配分は競争均衡における配分と同じで効率的である。

#### 4.4. 実験の流れ

実験における 1 回のオークションは以下の Step1 から Step4 までの手続きをとる。

- Step1 : オークションの売り手である実験者は  $p(0) \preceq_g \underline{p}$  を満たす初期価格  $p(0) \in \mathbb{Z}_+^2$  を買い手 1 と買い手 2 に知らせる。価格ベクトル  $\underline{p}$  は理論的に到達する競争均衡価格 (理論価格) である。  $t = 0$  として Step2 に進む。



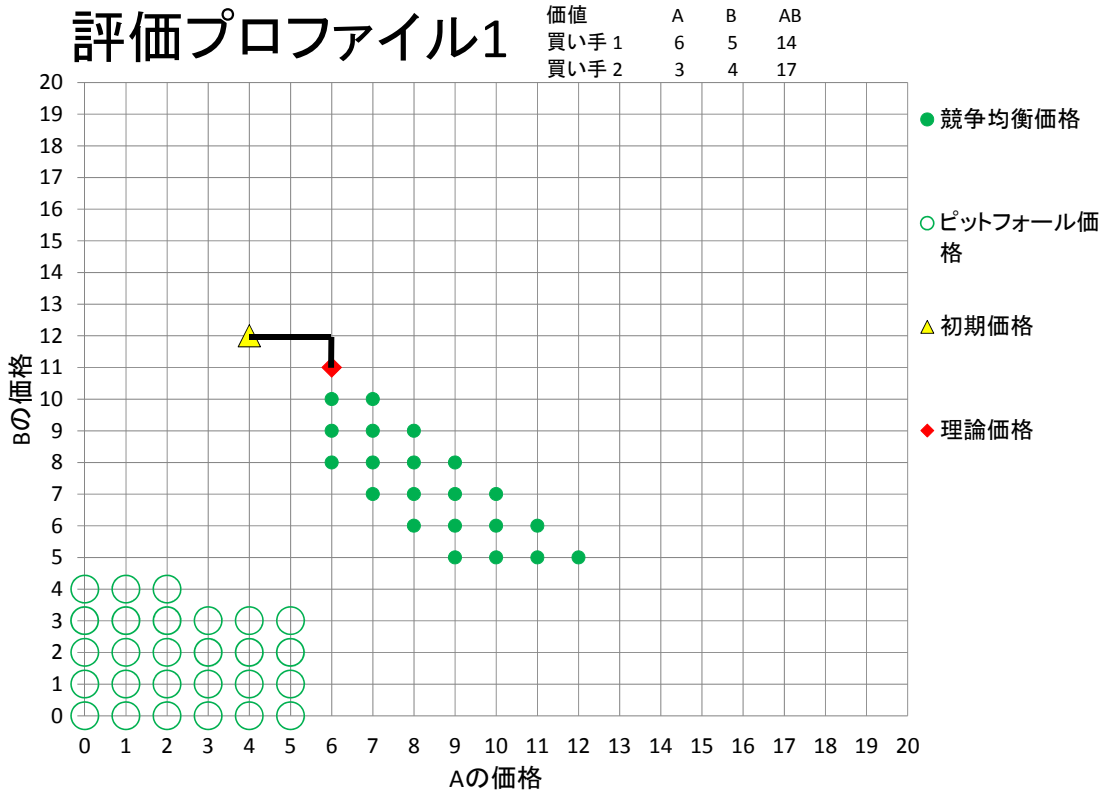


図 1: 評価プロフィール 1

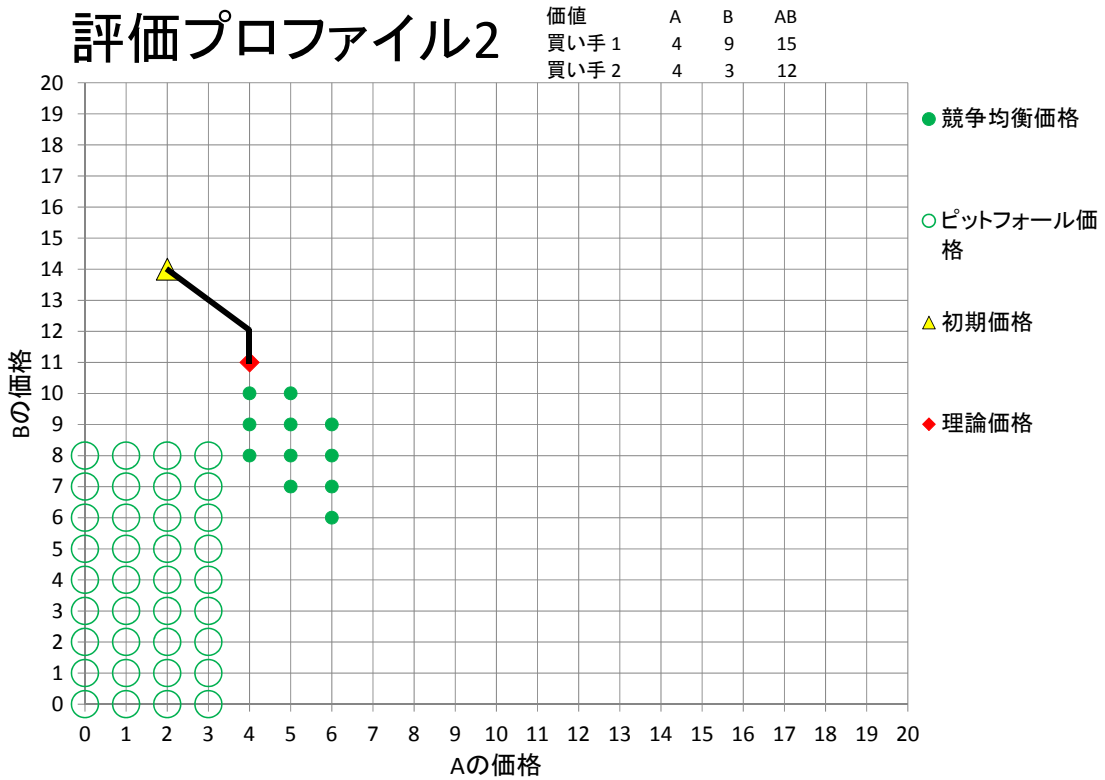


図 2: 評価プロフィール 2

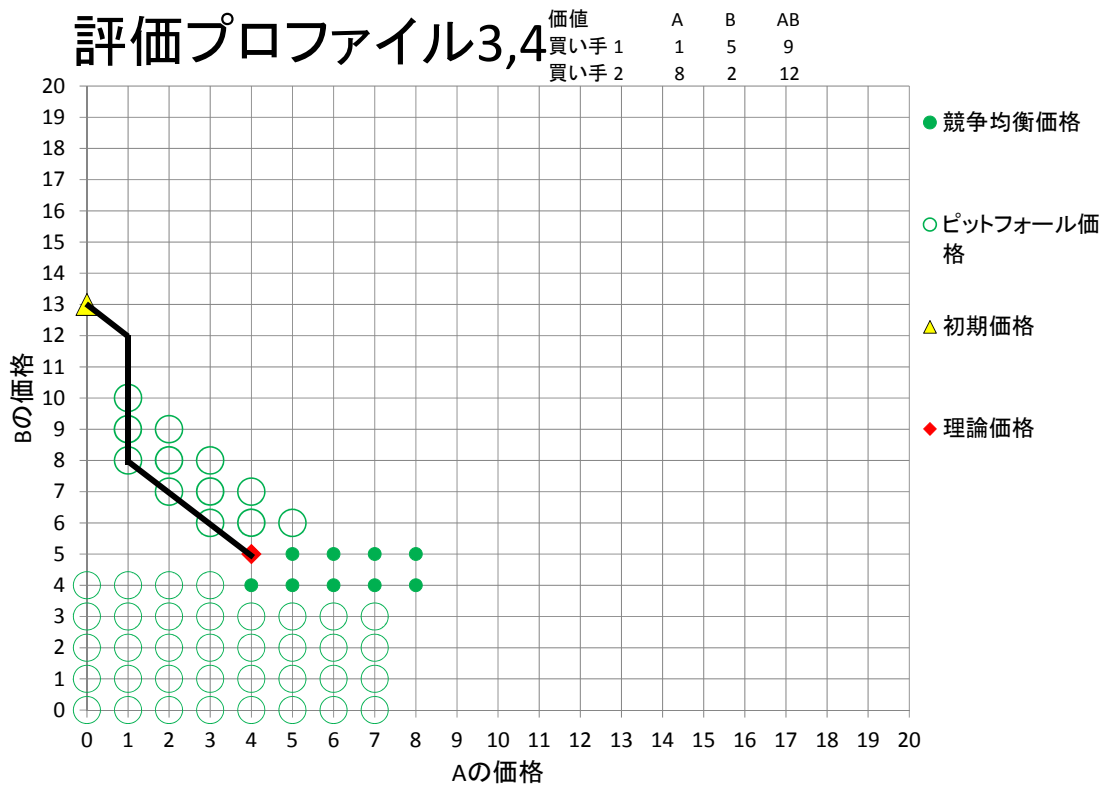


図 3: 評価プロファイル3,4

- Step2: 買い手1と買い手2は、実験者によって与えられた評価関数の値と、AとBの価格を基に入札を行う。それぞれの買い手に与えられた選択肢は、「何も入札しない」「Aに入札する」「Bに入札する」「ABに入札する」の4つの項目から、望ましいと思う項目にチェックすることである。実際の実験画面は図4に示されている。チェックの組み合わせやチェックの数は、自由に決めることができる<sup>4</sup>。ここで、被験者が「何も入札しない」にチェックをすることは、財が1つも割り当てられないという結果を被験者自身が許容することを意味する。また、「ABに入札する」とは、AとBを同時に入札するという意味である。売り手は、2人の買い手の入札情報を基に、最大化問題(3)を解き次期の価格ベクトル  $p(t+1)$  を導出する。 $p(t) \neq p(t+1)$  ならば、Step2に戻る。もし  $p(t) = p(t+1)$  であれば、オークションが終了し、Step3に進む。
- Step3: オークションが終了すると、配分が決まる。配分はオークションが終了した時点における2人の買い手の入札内容によって決まる。例えば、買い手1が「Aに入札する」だけを選択し、買い手2が「Bに入札する」と「ABに入札する」を選択していた場合、買い手1にAが割り当てられ、買い手2にBが割り当てられる。ただし、買い手1に何も割り当てず、買い手2にAとBを割り当てるという配分は実現しない。これは、買い手1が「何も入札しない」を選択していないからである。つまり、配分は2人の買い手の入札内容を同時に満たすものでなくてはならない<sup>5</sup>。可能な配分が2

<sup>4</sup>被験者がチェックを1つもしなかった場合は、「何も入札しない」のみをチェックしたものとして処理している。これは、実験の説明で被験者にも知らせている。

<sup>5</sup>2人の買い手の入札を同時に満たす配分が存在しない場合、Step3に入らずにStep2を繰り返す。実験において2人の買い手が極端に非合理的な入札行動をとった場合Step2を繰り返す、オークションが終了しない可

種類以上存在する場合は、コンピュータが無作為にそのうちの1つを選択する。配分が決定すると Step4 に進む。

- Step4: オークションにおけるポイントを、決定した配分に基づいて与える。ポイントとは、実験終了後に被験者に支払う報酬を決めるためのものである。ポイントは落札した財に対する評価と、オークションが終了したときのその財の価格との差である。Step3 と Step4 についての情報は、図5のような画面で知らせる。

以上のようなオークションを、評価プロファイルごとに4回行い、全体で16回のオークションを行った。各回の評価プロファイルは表4の通りである。実験において買い手がもつ情報は、実験者によって与えられた自身の評価関数の値のみである。相手の評価関数の値について知ることはできない。したがって、各買い手は与えられた自身の評価関数の値と、A と B の価格を基に意思決定を行う。

表 4: 各回の評価プロファイル

評価プロファイル	オークションの回
1	4, 8, 12, 16
2	3, 7, 11, 15
3	1, 5, 9, 13
4	2, 6, 10, 14

#### 4.5. 実験の概要

実験は2012年6月と7月に早稲田大学の実験室にて3回実施した。実験には合計で52人が被験者として参加した。被験者は早稲田大学の学部学生を、早稲田大学のアルバイト専用ホームページで募集した。

被験者は実験室に入室し、コンピュータ席に着席する。着席するコンピュータ席は無作為に決められている。全てのコンピュータ席には仕切りが設置されているため、他のコンピュータの画面を見ることはできない。また、オークションの相手が誰であるかを知ることもしできない。

それぞれの被験者は、買い手1か買い手2どちらかの役割が与えられる。そして、同一の買い手として16回のオークションに参加する。また、オークション市場における相手の買い手は、16回全てを通して同一の被験者である。

実験の仕組みに関する説明は、コンピュータによって行った。実験の仕組みについての理解を確認するために、説明終了後に確認テストを実施した。確認テストが終了し、全ての被験者が実験の仕組みを理解したことを確認し、練習として3回のオークションを実施した。これは、実験における選択の方法などに慣れることを目的としているので、練習で得られるポイントは報酬に影響を与えない。練習が終了し、質問が無いことを確認した上で実験を開始した。

実験終了後、16回のオークションで得られたポイントを基に、各被験者に報酬が支払われた。報酬の計算は、固定報酬800円と、獲得したポイント×50円の合計である。実験の所要時間は90分で、被験者が受け取った報酬は平均で約1500円であった<sup>6</sup>。

能性がある。しかし、本実験研究においては、そのような非合理的な入札行動をとった被験者は確認されず、オークションが終了しない事態は起こらなかった。

<sup>6</sup>16回のうち1回のオークションを無作為に選択し、その回のオークションで獲得したポイントをもとに報酬を支払うと、報酬額に大きな偏りが生じることが予備の実験の結果から予想された。そこで、本研究では16回のオークションで獲得したポイントをもとに報酬を決定した。

残り時間: 19

オークションに参加してください。現在1回目のオークションです。

現在のAとBの **価格**は以下の通りです。

	A	B
<b>価格</b>	0	13

あなたのA, B, ABに対する **価値**は以下の通りです。

	A	B	AB
<b>価値</b>	1	5	9

入札しますか？

選択肢	希望する選択肢にチェックしてください。	選択肢ごとのポイント
何も入札しない。	<input type="checkbox"/> 何も入札しない	0
Aに入札する。	<input type="checkbox"/> Aに入札する	1
Bに入札する。	<input type="checkbox"/> Bに入札する	-8
ABに入札する。	<input type="checkbox"/> ABに入札する	-4

チェックが終わったらOKボタンを押してください。

OK

図 4: 実験画面

残り時間: 3

オークションが終了しました。  
この回におけるオークションの結果は以下の通りです。

オークションの結果	今回の獲得ポイント	あなたの獲得ポイントの総額
あなたはオークションにおいてAとBを得られました。	1	2

よろしければ右のOKボタンを押してください。

OK

図 5: オークション終了時の画面

## 5. 実験結果の予測

本研究で設定した仮説が正しい場合、実験結果については次のような予測をすることができる。

- 予測1: 評価プロファイル1においてはピットフォール価格が存在するが、それらは全て価格の調整経路から外れた場所に存在する。Aの価格が上昇せずに、Bの価格だけが下降するという状況が起こらない限り、このようなピットフォール価格にはたどり着かない。通常はAの価格も同時に調整されるので、このようなピットフォール価格の存在は問題にならないはずである。したがって、仮に全ての買い手が入札対応  $\tilde{D}^i(p)$  に従っていたとしても、競争均衡価格に到達するまで価格調整は止まらない。評価プロファイル1においては、競争均衡が実現しやすい。
- 予測2: 評価プロファイル2においてはピットフォール価格が存在し、競争均衡価格に隣接したものも存在するが、それらは全て価格の調整経路から外れた場所に存在する。評価プロファイル1と同じ理由で、評価プロファイル2においても競争均衡が実現しやすい。
- 予測3: 評価プロファイル3においてはピットフォール価格が価格の調整経路上に存在する。したがって、ピットフォール価格で価格調整が止まり、競争均衡価格に到達しない。また、そのときの配分も効率的でない。
- 予測4: 評価プロファイル4においてもピットフォール価格が価格の調整経路上に存在する。したがって、評価プロファイル3と同じように、価格調整はピットフォール価格で止まり、競争均衡価格に到達しない。しかし、ピットフォール価格で価格調整が止まったとしても、配分は効率的である。

## 6. 実験の分析

### 6.1. 仮説の検証

本研究における仮説を検証するために、実験結果が予測と整合的であるか検討する。評価プロファイル間における競争均衡の実現頻度を比較する。競争均衡は定義2.1より、価格ベクトル  $p$  と配分  $\rho$  により構成されている。理論的には、競争均衡価格に到達すれば、その価格によってもたらされる配分は常に効率的である。しかし、配分を決定するのは買い手の入札の組み合わせである。つまり、競争均衡価格が取引価格となっていたとしても、買い手の入札の組み合わせによって、効率的でない配分が実現する可能性がある。したがって、実験において競争均衡が実現しているかを検証するためには、競争均衡価格への到達と配分の効率性を分けて検証する必要がある。

まず、競争均衡価格の実現割合と配分の効率性に関して、実験結果を概観する。この結果、ピットフォール価格の存在が競争均衡の実現に影響を与えている可能性が示唆された。そこで、ロジスティック回帰分析を行うことで、ピットフォール価格が与える影響を統計的に検証する。

#### 6.1.1. 競争均衡価格の実現

競争均衡価格への到達割合は、評価プロファイル1,2では高い値を示し、評価プロファイル3,4では低い値を示した。表5のa列は、各評価プロファイルにおける競争均衡価格への到達割合をまとめたものである。評価プロファイル1,2では、全サンプルのうち85%以上が競争均衡価格に到達している。一方で、評価プロファイル3,4では、20%程度が競争均衡価格に到

達している、評価プロファイル1,2と評価プロファイル3,4の間には、競争均衡価格への到達割合にして、約60%の差が存在し、この差は統計的に有意であった ( $\chi^2 = 190.49, p < 0.00$ )。

表 5: 競争均衡価格とピットフォール価格の実現割合

評価プロファイル	a	b	a+b
1	89.2%	0%	89.2%
2	86.3%	0%	86.3%
3	18.4%	58.3%	77.7%
4	20.2%	63.5%	83.7%

a:競争均衡価格への到達割合 b:ピットフォール価格で価格調整が止まる割合

この約60%の差は、価格の調整経路上のピットフォール価格の存在によって説明することができる。表5のb列には、ピットフォール価格で価格調整が止まる割合を示している。評価プロファイル3,4において、約60%がピットフォール価格で価格調整が止まっている。表5のa+b列には、競争均衡価格かピットフォール価格いずれかへの到達割合を示している。評価プロファイル3,4では、その到達割合が約80%となっている。競争均衡価格あるいはピットフォール価格いずれかへの到達割合について、評価プロファイル1,2と評価プロファイル3,4の間には、有意水準5%で統計的に有意な差は確認できなかった ( $\chi^2 = 3.34, p = 0.07$ )。

以上より、価格の調整経路上にピットフォール価格が存在しなければ、競争均衡価格への到達割合は比較的高い値を示す。逆に、価格の調整経路上にピットフォール価格が存在すると、競争均衡価格への到達割合は低下し、その低下分はピットフォール価格の存在によるものであるといえる。

### 6.1.2. 配分の効率性

競争均衡価格に到達した場合、評価プロファイル3を除き、ほぼ全ての配分が効率的であった。表6のc列は、競争均衡価格に到達したときの効率的な配分の実現割合が示されている。これより、評価プロファイル1,2,4では、競争均衡価格に到達すれば効率的配分が実現しやすいということが分かる。一方で、評価プロファイル3では、競争均衡価格へ到達したとしても、効率的配分が実現する確率が低い。競争均衡価格への到達が合計で19回あったが、その中で効率的配分が実現したのが14回で、5回は非効率的な配分であった。競争均衡価格に到達したときの効率的配分の実現割合について、評価プロファイル3と評価プロファイル1,2,4の比較を行った。フィッシャーの正確確率検定の結果、評価プロファイル3における効率的配分の実現率が低いことが示された ( $p < 0.00$ )。つまり、評価プロファイル3では、仮に競争均衡価格に到達しても、効率的配分が実現しにくい。

表 6: 効率的配分の割合

評価プロファイル	c	d
1	100%	
2	100%	
3	73.7%	2%
4	95.2%	100%

c:競争均衡価格における効率的配分 d:ピットフォール価格における効率的配分

評価プロファイル3と4との違いは、ピットフォール価格において人々が入札対応  $\tilde{D}^i(p)$  に従ったときに実現する配分の効率性である。予測3,4によると、評価プロファイル4では、

すべての買い手が入札対応  $\tilde{D}^i(p)$  に従いピットフォール価格で価格調整が止まったとしても、そのときの配分は効率的である。一方で、評価プロファイル3では、すべての買い手が入札対応  $\tilde{D}^i(p)$  に従いピットフォール価格で価格調整が止まると、そのときの配分は効率的でない。実験結果もこの予測と整合的であった。表6のd列は、ピットフォール価格で価格調整が止まったときに実現した効率的な配分の割合である。評価プロファイル4では、ピットフォール価格で実現した配分のすべてが効率的である。一方、評価プロファイル3では、ピットフォール価格で実現した配分の98%が非効率的であり、この差は統計的に有意であった(フィッシャーの正確確率検定  $p < 0.00$ )。

以上の分析から、評価プロファイル1,2では、80%以上の高い割合で競争均衡価格に到達し、そのときの配分は効率的である。評価プロファイル1,2では、80%以上の高い割合で競争均衡が実現したことを意味している。これは、予測1,2と整合的な結果である。一方で、評価プロファイル3,4では、競争均衡価格への到達割合が評価プロファイル1,2と比べ約60%低かった。この約60%の差はピットフォール価格の存在によって説明することができる。ピットフォール価格で価格調整が止まるとき、評価プロファイル3においてはほぼ全ての配分が効率的でないが、評価プロファイル4では全ての配分が効率的であった。これは予測3,4と整合的な結果である。また、評価プロファイル3では、競争均衡価格に到達しても効率的な配分が実現しにくいこともわかった。

### 6.1.3. ロジスティック回帰分析による分析

実験条件が競争均衡の実現率に与える影響を分析する。以下のモデルを用いて、ロジスティック回帰分析を行う。

$$y_{it} = \alpha + \beta_1 D1_t + \beta_2 D2_t + \epsilon_{it} \begin{cases} y_{it} = 1 & \text{if 競争均衡実現} \\ y_{it} = 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

被説明変数  $y_{it}$  は、グループ  $i$  の  $t$  回目のオークションにおける競争均衡の実現を表す2値変数である。説明変数として、2種類のダミー変数を用いる。1つ目のダミー変数  $D1_t$  は、価格の調整経路上にピットフォール価格が存在する条件(評価プロファイル3,4)で1を、それ以外(評価プロファイル1,2)で0をとるものとする。2つ目のダミー変数  $D2_t$  は、ピットフォール価格での配分が非効率的である条件(評価プロファイル3)で1を、それ以外(評価プロファイル1,2,4)で0をとるものとする。 $\epsilon_{it}$  は攪乱項である。

分析の結果は表7の通りである。まず、切片の推定値が1.97で、有意水準1%で有意である。次に、 $D1$ の係数が-3.40で、有意水準1%で有意であった。係数が負の値であることから、価格の調整経路上にピットフォール価格が存在すると競争均衡の実現確率が低下するといえる。一方で、 $D2$ の係数は負の値であるが、係数が0であるという帰無仮説を棄却することができなかった。したがって、ピットフォール価格における配分の効率性は競争均衡の実現確率に影響を与えない。

ロジスティック回帰分析から推定されたパラメータを用いて、予測を行う。競争均衡実現確率が0.5以上であれば競争均衡が実現し、0.5未満であれば競争均衡が実現しないという予測と実験データとの比較を行う。予測と実験データとの関係は、表8の通りである。的中率は85.6%であった。

本実験研究では実験実施上の都合により、16回すべてのオークションの結果をもとにして、被験者に報酬を与えている。したがって、繰り返しゲームの状況であると考えられることができる。また、被験者の学習効果などが結果に影響を与えている可能性もある。そこで、

表 7: 実験条件が競争均衡の実現率に与える影響

	Odds Ratio	Std. Error	z-value
Intercept	1.97	0.21	9.22***
<i>D1</i>	-3.40	0.33	-10.38***
<i>D2</i>	-0.41	0.38	-1.09
Number of observation		411	
Log likelihood		-167.74	
AIC		341.48	
$\chi^2$		233.74***	

\*\*\*:prob<0.000

表 8: ロジスティック回帰分析による予測の的中率

		予測		
		0	1	合計
データ	0	173	25	198
	1	34	179	213
	合計	207	204	411(的中率 85.6%)

表 9: オークションの回をランダム効果としたロジスティック回帰分析

	Odds Ratio	Std. Error	z-value
Intercept	2.00	0.25	8.16***
<i>D1</i>	-3.47	0.39	-8.85***
<i>D2</i>	-0.43	0.44	-0.96
Number of observation		411	
Log likelihood		-167.44	
AIC		342.87	
$\chi^2$		234.34***	

\*\*\*:prob<0.000



モデル (5) にオークションの回をランダム効果として加えたロジスティック回帰分析も行う。結果は表 9 の通りである。ランダム効果なしの結果と同じ傾向が得られた。価格の調整経路上にピットフォール価格が存在すれば、競争均衡の実現確率が低下する。また、ピットフォール価格における配分の効率性は競争均衡の実現確率に影響を与えているとはいえない。以上より、オークションの回にかかわらず、ピットフォール価格の存在が与える影響は一貫しているといえる。

以上の議論より、本研究における仮説は正しいと判断することができる。つまり、価格の調整経路上にピットフォール価格が存在しない場合、競争均衡価格に到達し、そのときの配分は効率的である。一方で、価格の調整経路上にピットフォール価格が存在する場合、ピットフォール価格で価格調整が止まり、そのときの配分は必ずしも効率的でない。

## 6.2. 評価プロファイルごとの分析

実験で実現した  $A$  と  $B$  の価格について検討する。表 10 は、全 16 回のオークションで実現した  $A$  と  $B$  の平均価格と理論価格との比較結果を要約したものである。

### 6.2.1. 評価プロファイル 1

図 6 の左上は評価プロファイル 1 である 12 回目のオークションの結果を表している。×印は、その価格で価格調整が止まったことを意味し、右上の数字はその頻度である。実験結果の多くが競争均衡価格に到達し、12 回目のオークションでは、92% が競争均衡価格に到達している。このような傾向は、評価プロファイル 1 である全てのオークションで観察されている。

実験で実現した価格の平均 (平均価格) と、理論価格の比較を行う。 $A$  の平均価格については、8 回目のオークションにおいて、理論価格よりも有意に高いという結果が得られた。それ以外のオークションでは、平均価格と理論価格との間に有意な差は観察されていない。一方で、 $B$  の平均価格は理論価格よりも有意に低くなるという傾向が評価プロファイル 1 のすべてのオークションで見られた。

### 6.2.2. 評価プロファイル 2

図 6 の右上は評価プロファイル 2 である 7 回目のオークションの結果を表している。ピットフォール価格は存在するが、実験においてピットフォール価格で価格調整が止まった結果は観察されていない。これはピットフォール価格が、価格の調整経路上に存在しないからである。一方で、実験結果の多くが競争均衡価格上に分布しており、7 回目のオークションでは、その割合は 92.3% である。このような傾向は、評価プロファイル 2 である全てのオークションで観察されている。

評価プロファイル 2 においても  $A$  の平均価格は理論価格に近く、 $B$  の平均価格は理論価格より低くなるという結果を得た。4 回全てのオークションにおいて、 $A$  の平均価格と理論価格との間に有意な差は見られなかった。一方で、 $B$  の平均価格は、評価プロファイル 1 と同様に、理論価格よりも有意に低くなるという傾向が評価プロファイル 2 の全てのオークションで見られた。

### 6.2.3. 評価プロファイル 3

図 6 の左下は評価プロファイル 3 である 9 回目のオークションの結果を表している。初期価格から競争均衡価格に価格が調整される段階で、複数のピットフォール価格が存在している。そして、実験結果の多くがピットフォール価格上に分布しており、9 回目のオークションでは、その割合は 80% である。一方で、ピットフォール価格において価格調整が続き、競

表 10: 実験における A と B の平均価格と理論価格の比較 (有意差は有意水準 5% に基づく)

オークションの回	評価プロファイル	A				B			
		理論価格	平均価格	t 値	有意差	理論価格	平均価格	t 値	有意差
1	3	4	1.88	-8.46	○	5	8.58	7.20	○
2	4	3	3.23	2.00		8	9.00	3.05	○
3	2	4	4.12	0.65		11	10.08	-6.84	○
4	1	6	6.04	0.20		11	10.36	-3.09	○
5	3	7	4.35	-7.22	○	7	10.96	6.92	○
6	4	4	4.31	1.69		10	12.73	8.50	○
7	2	5	5.19	1.73		13	12.04	-5.95	○
8	1	4	4.31	2.13	○	11	10.04	-6.34	○
9	3	4	2.00	-10.00	○	5	8.20	8.55	○
10	4	3	3.31	1.77		8	9.23	4.70	○
11	2	4	4.08	0.49		11	10.20	-4.38	○
12	1	6	6.40	2.00		11	9.96	-4.19	○
13	3	7	4.31	-7.02	○	7	10.73	6.88	○
14	4	4	4.42	2.19	○	10	12.23	6.67	○
15	2	5	5.00	0.00		13	12.20	-4.62	○
16	1	4	4.23	1.44		11	9.62	-8.29	○

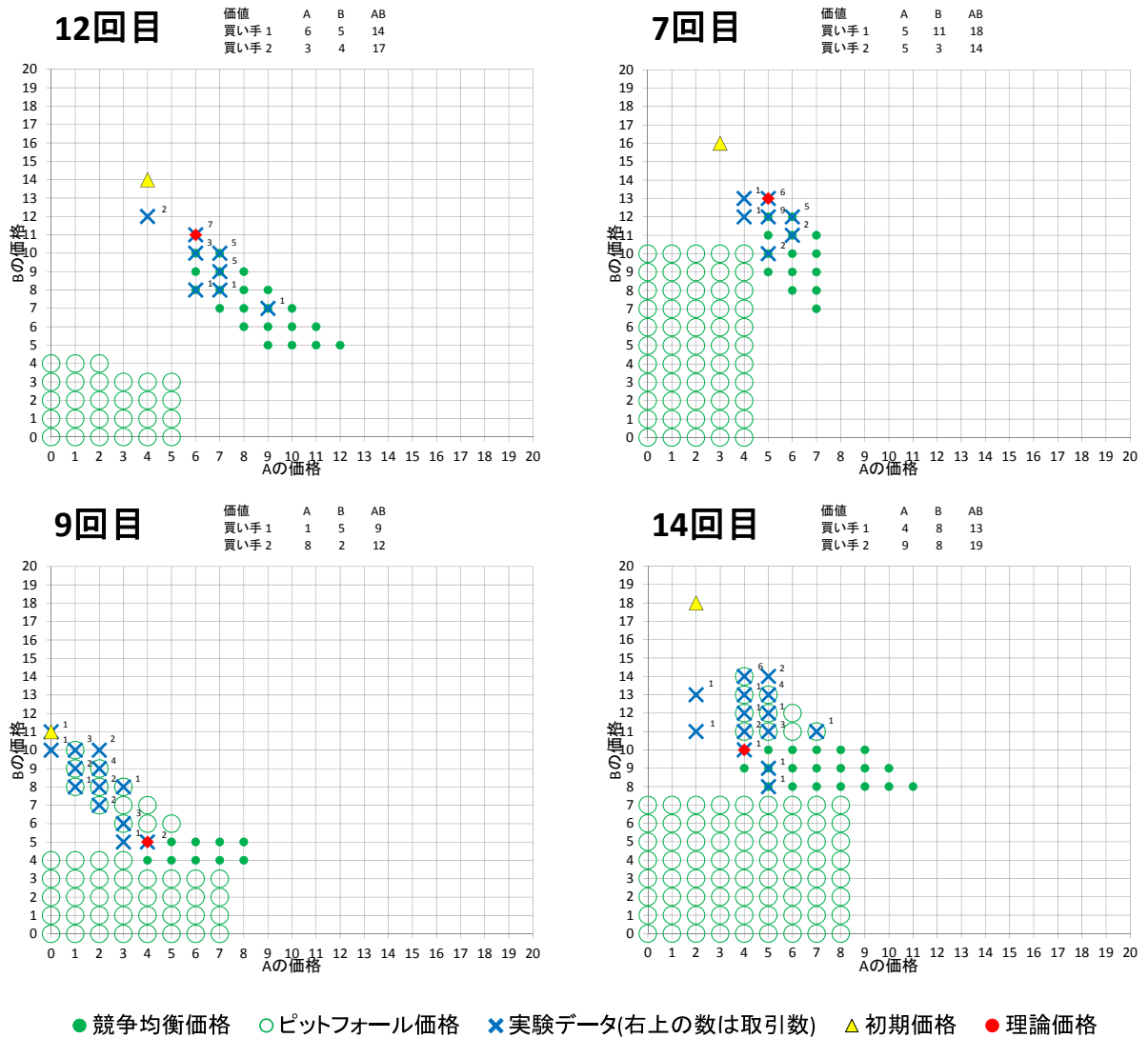


図 6: 各評価プロファイルにおける実現価格の分布

争均衡価格に到達したものは、全体の9%である。このような傾向は、評価プロフィール3である全てのオークションで観察された。

図6の左下から分かるように、多くの実験結果が競争均衡価格から離れている。つまり、Aの平均価格は理論価格より低い値を実現しやすく、Bの平均価格は理論価格より高い値を実現しやすい。評価プロフィール1,2と違い、評価プロフィール3の全てのオークションにおいて、Aの平均価格が理論価格よりも有意に低いという結果が得られた。一方で、Bの平均価格は理論価格よりも有意に高くなるという傾向が評価プロフィール3の全てのオークションで見られた。Bの平均価格と理論価格の大小関係については、評価プロフィール1,2と対称的な結果である。

### 6.3. 評価プロフィール4

図6の右下は評価プロフィール4である14回目のオークションの結果を表している。評価プロフィール3と同様に、実験結果の多くは、競争均衡価格ではなくピットフォール価格で価格調整が止まっている。14回目のオークションでは、競争均衡価格に到達したのは全体の11.5%であったが、ピットフォール価格で価格調整が止まったのは全体の73.1%であった。このような傾向は、評価プロフィール4である全てのオークションで観察された。

評価プロフィール3と異なり、評価プロフィール4におけるAの平均価格は理論価格に近い値を実現している。Aの平均価格が理論価格と有意に異なっていたのは14回目のオークションで、残り3回のオークションについては有意差は見られなかった。一方で、Bの平均価格は理論価格よりも高い値を実現する傾向がある。4回全てのオークションにおいて、Bの平均価格は理論価格よりも有意に高いという傾向が得られた。これは評価プロフィール3と同じ傾向である。

## 7. まとめと考察

本研究では、ピットフォール価格の存在がダブルトラック・オークションの性能に与える影響を、実験的に検証した。その結果、ピットフォール価格が価格の調整経路上に存在すれば、競争均衡価格への到達が難しくなり、一般的に配分の効率性も成立しなくなることが明らかになった。逆にピットフォール価格が価格の調整経路上に存在しない場合、競争均衡が実現しやすいことが明らかになった。つまり、ダブルトラック・オークションが補完財の適切な割り当てを可能とするのは、ピットフォール価格が価格の調整経路上に存在しないときに限られる。したがって、ピットフォール価格が価格の調整経路上に存在するときにおいても、補完財の適切な割り当てを可能とする方法を検討する必要がある。

ピットフォール価格の問題を回避する方法として、初期価格に制約を置かないGDDTモデルのダブルトラック・オークションを運用することが有用と推測できる。ピットフォール価格は、財の価格が比較的低い場所に存在する。ピットフォールを特徴づける入札対応  $\tilde{D}^i(p)$  は、正の効用を得られる選択肢すべてに入札するというものであるが、正の効用が得られるのは価格が入札者の評価よりも低くなっているときである。実際に図1,2,3のように、ピットフォール価格は左下に分布している。そこで、AとBの価格が比較的高い場所(図1,2,3の右上にあたる)を初期価格とすれば、ピットフォール価格を通らずに競争均衡価格へ価格が調整される可能性が考えられる。本研究で検証したDDTモデルのダブルトラック・オークションでは、Aの初期価格を超過需要が起こるに十分低い価格とする制約が課されている。しかし、GDDTモデルであれば初期価格の制約が無いので、AとBの初期価格を高い場所に設定することができる。以上の理由で、GDDTモデルのダブルトラック・オークション

を運用すれば、本研究で観察されたピットフォール価格の問題を回避できる可能性がある。これについては、将来的な研究として検証したい。

実験で実現した  $A$  の価格について、評価プロファイル 1,2 では 1 回のオークションでのみ乖離が見られたが、平均価格は理論価格と等しくなる傾向がある。一方で、評価プロファイル 3 では、 $A$  の平均価格は理論価格よりも低くなる傾向が見られた。評価プロファイル 3 と同じように価格の調整経路上にピットフォール価格が存在する評価プロファイル 4 ではこのような傾向が見られなかった。ダブルトラック・オークションは  $A$  の価格を上昇させるという価格調整を行う。評価プロファイル 3,4 では、価格の調整経路上にピットフォール価格が存在するため、理論価格に到達する前に価格調整が止まる。評価プロファイル 3 の場合、図 6 の左下に示されている通り、 $A$  の理論価格よりも低い価格からなるピットフォール価格が分布している。したがって、 $A$  の価格が理論価格まで上昇する前にピットフォール価格で価格調整が止まり、結果として  $A$  の平均価格が理論価格よりも低くなった。評価プロファイル 4 の場合、図 6 の右下に示されている通り、ピットフォール価格でも  $A$  の価格は理論価格と等しいかそれより大きな価格となっている。したがって、ピットフォール価格で価格調整が止まったとしても、 $A$  の価格は理論価格に達していることになる。以上の理由により、評価プロファイル 3 においてのみ、 $A$  の平均価格が理論価格よりも低くなるという現象が起きたといえる。

$B$  の価格については、全ての評価プロファイルにおいて平均価格が理論価格から乖離する傾向が見られた。この乖離の傾向は評価プロファイル 1,2 と評価プロファイル 3,4 で対称的である。評価プロファイル 1,2 では、 $B$  の平均価格が理論価格よりも低くなる傾向が見られるが、評価プロファイル 3,4 では逆に高くなる傾向が見られた。ダブルトラック・オークションは  $B$  の価格を下降させるという価格調整を行う。したがって、 $B$  の価格調整が進むほど  $B$  を落札して得る効用が大きくなる。評価プロファイル 1,2 における  $B$  の平均価格が理論価格よりも低くなったのは、実験参加者が  $B$  を落札して得る効用をできるだけ大きくするために入札を行わなかったことによるものであると考えられる。実際に、本実験で設定した評価プロファイル 1,2 において理論価格で効率的配分が実現した場合、 $B$  を落札することによる効用は 0 であった。このため、理論価格では  $B$  の入札を控え、できるだけ大きな効用を得ようとしたのである。一方で、評価プロファイル 3,4 は、価格の調整経路上にピットフォール価格が存在するため、 $B$  の価格が理論価格へ調整される前に価格調整が止まる。この結果、 $B$  の平均価格が理論価格より高くなったと考えられる。

本研究では、2 人の買い手が 2 つの財を競うという最も単純なオークション市場の実験を行った。これは特殊なオークション市場であるため、より一般的な  $n$  人  $m$  財オークションへ拡張した研究の必要がある。もっとも、単純な 2 人 2 財というオークション市場においてさえ、ピットフォールの問題が生じていることから、財や入札者をより多くした状況においてもピットフォール価格の問題は依然として生じるものと考えられる。財の種類が増えれば、正の効用をもたらす財の部分集合は大きくなるからである。したがって、ピットフォールの問題は財の種類が増えても存在する問題であると考えられる。また、財の種類が増えることで、効用の計算量が指数関数的に増加する。このことから、財の種類が増えるほど、最大の効用をもたらす財の部分集合を発見することが難しくなり、理論的に想定される入札行動がとられなくなることも推測される。このように、オークション市場を一般化することで、2 人 2 財市場では観察されなかった問題も発生する可能性がある。 $n$  人  $m$  財へ拡張した分析は今後の研究としたい。

入札対応  $\tilde{D}^i(p)$  は、正の効用をもたらすものすべてに入札することで、最大の効用を得られないにしても、正の効用を得る機会を広げようとするリスクヘッジ的な行動基準を表している。これはダブルトラック・オークションに限らず、選択肢が複数あるような状況では観察されうる行動基準である。ダブルトラック・オークションに限らず、様々な経済理論において、 $\tilde{D}^i(p)$  に表されるような行動基準・選好を持った経済主体が存在する場合、どのような帰結が得られるかを検証することが必要である。

#### 参考文献

- [1] F. Gul and E. Stacchetti: Walrasian equilibrium with gross substitutes. *Journal of Economic Theory*, **87** (1999), 95–124.
- [2] F. Gul and E. Stacchetti: The English auction with differentiated commodities. *Journal of Economic Theory*, **92** (2000), 66–95.
- [3] P. Milgrom: Putting auction theory to work: The simultaneous ascending auction. *Journal of Political Economy*, **108** (2000), 245–272.
- [4] P. Milgrom: *Putting Auction Theory to Work*(Cambridge University Press, New York, 2004).
- [5] N. Sun and Z. Yang: A double-track adjustment process for discrete markets with substitutes and complements. *Econometrica*, **77** (2009), 933–952.
- [6] 宇都伸之: 複数財オークションの実験研究. 田中愛治監修, 永田良, 船木由喜彦(編): リーディングス政治経済学への数理的アプローチ(勁草書房, 2013), 89–110.

宇都伸之  
早稲田大学  
政治経済学術院  
〒169-8050 東京都新宿区西早稲田1-6-1  
E-mail: nobuyuki.uto@aoni.waseda.jp

## ABSTRACT

## AN EXPERIMENTAL STUDY OF DOUBLE-TRACK AUCTION

Nobuyuki Uto                      Yoshio Kamijo                      Yukihiro Funaki  
*Waseda University    Kochi University of Technology    Waseda University*

A double-track auction is a new auction mechanism to allocate multiple indivisible goods to buyers, who view items as both substitutes and complements. This auction mechanism is significant since existing auction mechanisms with multiple goods can only allocate substitutes. One experimental study with two goods and two buyers, however, suggests that double-track auctions do not work as the theory predicts due to interference from a theoretically unnoticed price called the “pitfall” price. This study investigates the performance of a double-track auction with an experiment incorporating controls on the pitfall price. In the experiment, two goods are for sale. Two buyers view these goods as complements and bid for them. The experiment consists of two conditions: one with and the other without the pitfall condition. The main result is that the pitfall price negatively affects performance. The pitfall condition achieves competitive equilibrium at a rate that is 60% lower than that without the pitfall condition. However, without the pitfall condition, the auction works as the theory indicates. Therefore, double-track auctions allocate items only when there is no pitfall price.