

協調型料金システムの挙動とその理論的特性*

Coordination Price System in Community based Mobility*

原祐輔**・羽藤英二***

By Yusuke HARA**・Eiji HATO***

1. はじめに

交通サービスの料金体系は許認可制やわかりやすさ、公平性のために、一般的には固定的な料金体系である。一方で、料金システムの持つインセンティブによって別の政策的目標を達成させることが可能であることが多くの研究で示されている。たとえば、満員電車や道路渋滞・混雑等の問題は適切な料金システムによって改善することが可能であり、衰退しつつある地方都市の公共交通の問題は単純に値上げするのではなく、経済的持続可能性と利用者便益を考慮した料金体系であることが望ましい。また、情報技術の発達により、ICカードや電子マネー、携帯電話、ポストペイ方式といった柔軟な決済方式が比較的安価に導入可能な状況にある。

また、今後増加が予想されるモビリティシェアリングサービスはその供給量制約のためにこれまでの公共交通等の料金システムと異なるものが必要とされる。ここでは単純な固定料金ではなく、利用者の需要に応じて料金を動的に変化させるとともに、その都市・地域のサービスとして根付かせるための適切な維持管理費用を料金で回収し、高品質なサービスレベルによって提供する必要がある。

にもかかわらず、旧態依然の固定的な料金体系から脱却して動的料金システムに移行することは現実には見られない。そこで、本研究では利用者間・利用者事業者間における相互作用・協調で決定される料金システムを協調型料金システムとして定義する。そして、価格決定メカニズムに市場原理を導入し、サービス向上のための投資原資を得た上で、一定の公平性を担保した料金システムをデザインすることが本研究の目的である。以下では協調型料金システムの一つとして利用権オークション市場を採り上げる。

*キーワード：計画手法論，交通行動調査

**学生員，東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻
(東京都文京区本郷7-3-1, TEL 03-5841-1672
hara@bin.t.u-tokyo.ac.jp)

***正員，工博，東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻
(東京都文京区本郷7-3-1, TEL 03-5841-1672
hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp)

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 既往研究

交通サービスの料金体系における経済評価の研究は古くから行われてきた。多々納ら³⁾は2段階離散選択モデルを用いて定期券購入という長期的な選択と日々の交通手段選択という短期的な選択を不確実性の下で表現するモデルを提案している。北野ら⁴⁾は事前・事後料金システムにおける経済厚生を家計と企業のリスク分担構造から評価し、事後料金システムが社会厚生上望ましいことを明らかにしている。小林ら⁵⁾は独占市場における予約システムの経済便益を評価し、企業利潤と社会厚生が増加する一方で、家計の経済厚生が減少することを明らかにし、キャンセル料金の重要性を示した。

また、社会的厚生を最大化させる効率的なメカニズムを提案する研究も行われている。赤松⁶⁾は交通ネットワークにおけるボトルネック通行権取引制度を提案し、道路利用の予約・割当制と時刻別の通行権を自由に売買する市場の創設によって、効率的な資源配分が達成されることを理論的に示している。和田ら⁷⁾は赤松を拡張し、通行権取引制度と混雑料金制度を合わせることで、渋滞と混雑を解消するメカニズムを提案している。

本研究では筆者らが実施した共同利用自転車オークション⁸⁾を理論的に捉えることを目的とし、利用権販売市場における取引行動と利用権購入が予約を兼ねていることから、そのスケジュールコストを考慮した場合の経済評価を行う。

(2) オークション理論

オークション理論とはオークションプロトコルの設計者が個々の参加者の具体的な行動を直接コントロールすることなく、その目標の達成を実現するメカニズムデザインを対象とした研究分野である。

理論的なアプローチは Vickrey⁹⁾, Riley and Samuelson¹⁰⁾, Myerson¹¹⁾等の初期の研究によって基本的なモデルが確立されている。ある一定の性質をもったクラスに所属するオークション形式における収入同値定理や留保価格の設定による最適オークションメカニズム、さらには、インセンティブ両立性といった重要な定理・性質が示されている。

実証的なアプローチは Elyakime et al.¹²⁾ や Jofre-Bonet and Pesendorfer¹³⁾ が実際のオークション取引を計量モデルとして分析している。特に Jofre-Bonet and Pesendorfer¹⁴⁾ では複数期にわたるオークション取引を分析する動学モデルとして表現していることが特徴的である。

ここで、初期のオークション理論の成果の一つである二位価格オークションの売り手の期待収入を導出する²⁾。市場に n 人の買い手が参加しており、それぞれの評価値 x は確率密度関数 $f(x)$ 、確率分布関数 $F(x)$ に従う。買い手の評価値は iid な $F(x)$ から取られた n 個の評価額であると仮定する。このとき k 番目に高い値を表す分布を導出する。

まず x を固定して分布から取られた値が x と $x + dx$ の間にある確率を考える。これは $f(x)dx$ であり、独立に取られた別の値が x 以上である確率は $1 - F(x)$ 、以下である確率は $F(x)$ である。したがって、ある x が k 番目に高い確率は $f(x)dx(1 - F(x))^{k-1}F(x)^{n-k}$ である。取り出された n 個のうち、 k 番目に高い値である可能性は n 通りあり、他の $n-1$ 個が x 以上である可能性は ${}_{n-1}C_{k-1}$ 通りあるので、 k 番目に高い値の確率密度関数(pdf)を $g_k(x)$ とすると、

$$g_k(x) = n \cdot {}_{n-1}C_{k-1} f(x)dx(1 - F(x))^{k-1}F(x)^{n-k} \\ = \frac{n!}{(k-1)!(n-k)!} f(x)dx(1 - F(x))^{k-1}F(x)^{n-k} \quad (1)$$

と導出される。

2番目に高い値の確率密度関数は $k = 2$ より

$$g_2(x) = nf(x)dx(1 - F(x))F(x)^{n-2} \quad (2)$$

2番目に高い値の確率分布関数は積分することで得られ、

$$G_2(x) = nF(x)^{n-1} - (n-1)F(x)^n \quad (3)$$

である。よって、二位価格オークションの落札者の期待支払い額=売り手の期待収入 R_{sp} は評価値の分布が単位区間 $[0,1]$ であると仮定すると、

$$R_{sp} = \int_0^1 x dG_2(x) = 1 - \int_0^1 G_2(x) dx \quad (4)$$

と一般的に書くことができる。

同様に、最も高い評価値をもつ買い手が常に落札し、評価値が独立かつ同一の分布 $F(x)$ から得られるオークションにおいて、評価値 x をもつ買い手が落札する確率は

$$G_{1,n-1}(x) = F(x)^{n-1} \quad (5)$$

と一般的に書くことができる。以降のモデルでは上記の結果を用いて、定式化を行う。

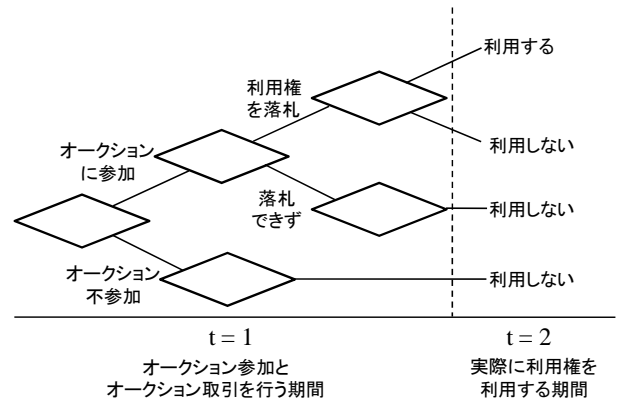


図-1 オークション取引の基本モデル

3. 基本モデル

(1) モデル化の前提

供給量制約のある同質なモビリティシェアリングサービスの利用権が利用者に提供されるオークション市場を考えよう。このときの家計の利用に対する意思決定問題を図-1に示した2期間モデルを用いて定式化する。基本モデルでは利用権に対する意思決定以外の要素を排除した単純なモデルとなっている。第1期に家計は利用権オークションに参加するかどうかを決定し、家計が考える利用権の評価値 v に応じて入札額を決定する。オークションは2位価格オークションであり、Vickrey⁹⁾で示されたように、各買い手は正直に自分の評価値を入札することが支配戦略である。

第2期には利用権を所有している家計は利用する/利用しない選択を行うことができるが利用権を所有していない家計は常に利用しない。また、利用権を利用しない場合に得られる効用は0である。

ここで、この市場に参加している家計が n 人いると設定する。利用権の評価値 v は確率密度関数 $f(v)$ 、確率分布関数 $F(v)$ に従い、区間は $[0,1]$ である。買い手の評価値は iid な $F(v)$ から取られた n 個の評価額であると仮定して、それぞれ v_i とする。オークション形式は2位価格オークションであるので、最も高い入札額を提示した買い手が2番目に高い入札額で落札する。このとき、評価値 v は第2期における利用権を利用した場合の効用 v に対応している。

(2) 買い手の支払額と落札時の効用

利用権を落札したとき、利用の効用 v 、利用しない効用は0であるため、利用しないインセンティブは働かない。よって、落札時は必ず利用権を利用する。ここで、買い手 i が落札したときの支払額 P_i とすると2位価格オークションの落札額であるので、

$$P_i = 1 - \int_0^1 G_2(v) dv \quad (6)$$

$$= 1 - \int_0^1 nF(v)^{n-1} - (n-1)F(v)^n dv$$

と書ける。よって、買い手*i*が落札したときに得られる効用は

$$v_i - P_i = v - 1 + \int_0^1 nF(v)^{n-1} - (n-1)F(v)^n dv \quad (7)$$

である。ここで、買い手*i*が落札する確率(最も高い評価値である確率)は $F(v)^{n-1}$ であり、それ以外の確率は $1 - F(v)^{n-1}$ であるので、買い手*i*がオークションに参加したときの効用は

$$V_i = F(v)^{n-1} \cdot (v_i - P_i) + (1 - F(v)^{n-1}) \cdot 0 \quad (8)$$

$$= F(v)^{n-1} \cdot \left(v_i - 1 + \int_0^1 nF(v)^{n-1} - (n-1)F(v)^n dv \right)$$

である。よって、各買い手の期待効用は

$$E[V_i] = \int_0^1 F(v)^{n-1} \cdot \left(v - 1 + \int_0^1 nF(v)^{n-1} - (n-1)F(v)^n dv \right) dv \quad (9)$$

である。

買い手はオークションで落札した場合は必ず0以上の余剰を受け取り、落札できなかった場合の効用は0であるので、常に $E[V_i] \geq 0$ である。オークション非参加の効用は0であるので、すべての家計にとってオークションに参加するインセンティブが存在することがわかる。

(3) 売り手の期待収入

売り手の期待収入は2位価格と等しいので、

$$R_{sp} = P = 1 - \int_0^1 nF(v)^{n-1} - (n-1)F(v)^n dv \quad (10)$$

である。

具体的な例として $n = 2$ 、評価値が区間 $[0,1]$ の一様分布に従うと仮定すると $f(v) = 1$ 、 $F(v) = v$ より、 $E[V_1] = E[V_2] = 1/6$ 、 $R_{sp} = 1/3$ である。

4. 利用権オークションの取引・予約行動モデル

(1) 基本モデル拡張のための問題設定

基本モデルと同様、供給量制約のある同質なモビリティシェアリングサービスが家計に提供されるオークション市場を考える。ただし、基本モデルの仮定に加えて、新しくスケジュールコストを付け加える。利用権オークションは事前に利用日の利用権を購入する必要があるという点で、一般的な予約システムの問題点と同様にサービス消費行動における需要リスクが存在する。つまり、利用権の予定日(予定時間)にその交通サービスを利用する以外のスケジュールが急に発生し、当初の予定通り利用権を利用して交通サービスを利用するか、新たなスケジュールを優先するかという意思決定問題に直面する。

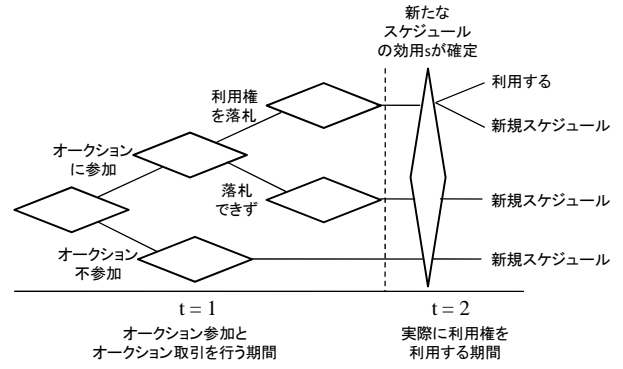


図-2 スケジュールコストを考慮した取引モデル

この構造を図-2で示すような2期間契約モデルを用いて表現しよう。第1期には家計はオークションに参加するかどうかを決定し、 v に応じて入札額を決定する。最も高い評価値の買い手が2位価格で落札し、利用権を得る。

第2期になって初めて、新たなスケジュールによる効用 \hat{s} が決定する。落札できなかった買い手やオークションに参加しない家計は新たなスケジュールを実施するが、利用権を落札した家計は新たなスケジュールを実施すると購入した利用権は利用できないというトレードオフの関係に直面する。新たなスケジュールの効用 s は、区間 $[0,1]$ で確率密度関数 $h(s)$ 、確率分布関数 $H(s)$ に従うと仮定する。

(2) オークションで落札できる場合の買い手効用

まず、第2期における意思決定を考えよう。第2期には急な予定による効用 \hat{s} が確定している。利用者の選択行動は

$$\begin{aligned} \text{利用権を利用する} & \quad v \geq \hat{s} \text{ の場合} \\ \text{急な予定を優先する} & \quad v < \hat{s} \text{ の場合} \end{aligned}$$

と表される。また、便宜上 $v = \hat{s}$ のとき、利用権を利用すると仮定しよう。

次に第1期における意思決定を考える。第1期の時点では第2期における急な予定がどれほど重要なものかは不確定である。そのため、第1期に落札できた時点で評価した利用権から得られる効用を $V^{win}(v)$ とすると、期待効用は

$$\begin{aligned} E[V^{win}(v)] &= \int_0^v v h(s) ds + \int_v^1 s h(s) ds \\ &= [vH(s)]_0^v + [sH(s)]_v^1 - \int_v^1 H(s) ds \quad (11) \\ &= 1 - \int_v^1 H(s) ds \end{aligned}$$

2位価格オークションなので期待支払額は先ほどと同様、

$$P_i = 1 - \int_0^1 G_2(v) dv$$

であるので、落札時から見た第2期の期待効用は

$$E[V^{win}(v) - P_i] = -\int_v^1 H(s)ds + \int_0^1 G_2(v)dv \quad (12)$$

である。

(3) オークションで落札できない場合の買い手効用

第1期に落札できなかった時点の第2期の期待効用は単純に新たなスケジュールの効用平均値であるので、

$$E[V^{lose}] = \int_0^1 sh(s)ds = 1 - \int_0^1 H(s)ds \quad (13)$$

となる。

(4) オークション参加時の期待効用

2位価格オークションで落札する確率は基本モデルと同じであるので、それぞれ $F(v)^{n-1}$ 、 $1 - F(v)^{n-1}$ である。以上よりオークション参加時における効用 V_i^p は

$$V_i^p = F(v)^{n-1} \cdot E[V^{win}(v) - P_i] + (1 - F(v)^{n-1}) \cdot E[V^{lose}] \quad (14)$$

となり、オークション参加時の期待効用は

$$E[V^p] = \int_0^1 V_i^p dv \quad (15)$$

である。

(5) オークション非参加時の期待効用

新たなスケジュールが存在しない基本モデルではオークションの非参加の効用は常に0であり、オークション参加の期待効用は0以上であったため、常に利用権オークションに参加するインセンティブが存在した。しかし、スケジュールを考慮した本モデルでは、オークション非参加時の期待効用は

$$E[V^n] = 1 - \int_0^1 H(s)ds \quad (16)$$

である。よって、各買い手は $E[V^p] > E[V^n]$ の時はオークションに参加するが、それ以外の場合はオークションに参加しないことが示された。つまり $E[V^p] \geq E[V^n]$ のときは全員が参加するが、 $E[V^p] < E[V^n]$ のときは全員がオークションに参加せず、結果として売り手の期待収入が0となることが示唆される。

5. 数値計算例

これまでの内容を数値計算例によって確認することとする。これは上記の内容の理解を深めるためである。

(1) 評価値分布 $F(v)$ 、新規スケジュール効用分布

$H(s)$ が区間 $[0,1]$ で一様分布の場合

評価値と新規スケジュール効用の双方が同じ区間で一様分布である場合、利用権利用効用と新規スケジュール効用の期待値が同じであるため、利用権の支払額の方だ

け、オークション参加の効用が少なくなることが予想される。これを簡単な計算にて確認する。式(12)(13)より、

$$E[V^{win}(v) - P_i] = 1 - \int_v^1 sds - 1 + \int_0^1 G_2(v)dv = \frac{1+v^2}{2} - \frac{n-1}{n+1} \quad (17)$$

$$E[V^{lose}] = 1 - \int_0^1 sds = 1/2 \quad (18)$$

であり、オークション参加時の効用は

$$V^p = v^{n-1} \cdot \left(\frac{1+v^2}{2} - \frac{n-1}{n+1} \right) + (1-v^{n-1}) \cdot \frac{1}{2} \quad (19)$$

よって、オークション参加時の期待効用は

$$E[V^p] = \int_0^1 V^p dv = \frac{n^3 + 2n^2 + n + 4}{2n(n+1)(n+2)} \quad (20)$$

オークション非参加の効用は

$$E[V^n] = 1 - \int_0^1 sds = \frac{1}{2} \quad (21)$$

である。以上より $n \rightarrow \infty$ のとき $E[V_i^p] \rightarrow 1/2$ であるが、常に $E[V^p] < E[V^n]$ が成り立つ。これは仮定より自明な結果である。具体的に各個人の期待効用と市場の買い手数の関係は図-3aで示されている。参加人数が増加するにつれて、期待効用が増加している理由は自分が落札する確率が減少することで新規スケジュールに対応でき、その期待値1/2を獲得できているためである。

(2) $F(v)$ が区間 $[0,1]$ で一様分布、 $H(s)$ が区間 $[0,1/2]$ で一様分布の場合

次に $E[V^p] > E[V^n]$ の場合における挙動を確認するため、新規スケジュール効用の期待値が先ほどよりも低くなる場合として、区間 $[0,1/2]$ の一様分布を考える。そこで、新規スケジュール分布の違いが帰結に与える影響について考察する。

$H(s)$ が $[0,1/2]$ であるときオークションの効用は

$$E[V^{win}(v) - P_i] = v^2 + \frac{1}{4} - \frac{n-1}{n+1} \quad (22)$$

$$E[V^{lose}] = 1/4 \quad (23)$$

より、参加時・非参加時の期待効用は

$$E[V^p] = \frac{n^3 + 3n^2 + 2n + 8}{4n(n+1)(n+2)} \cdot E[V^n] = 1/4 \quad (24)$$

である。 $n \rightarrow \infty$ のとき $E[V_i^p] \rightarrow 1/4$ であり、単調減少関数であるので、常に $E[V^p] > E[V^n]$ が成り立つ。これは図-3bからも明らかである。

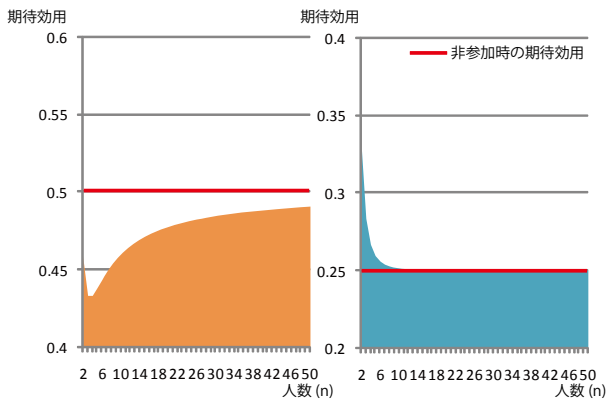


図-3a ケース(1)の場合 図-3b ケース(2)の場合

図-3 オークション参加時・非参加時の期待効用

このように、スケジュール効用の違いによって、家計のオークション参加の意思決定は異なることが示され、また落札した利用権の扱いもケース(1)とケース(2)では異なることが示された。

また、これらの定式化は、ユーザーがそれぞれの利得を比較する意思決定構造を仮定し、期待協調料金制度への参加確率を $E[V^p]$ と $E[V^n]$ の比を用いることで、GEVモデルと整合的に導出することもできる。 V^p 、 V^n は市場参加人数の関数で表現でき、一般に市場参加人数こそが、利用者にとっては自明でないため、期待利得を確率的に記述し、その実際の動きを推定した上で、整合的に評価できることを意味する(※:道路混雑が利用者数の関数で表現できるのと同様である)。

このように、一般に2位価格オークションでは効率的な資源配分が達成されることが理論的に示されているが、交通サービスの利用権等の購入期と利用期が異なる異時点間の消費行動を考慮することによって、不確実な予定がオークションの取引行動に影響を与えることが示唆された。これは筆者らの実験⁹⁾においても見られた行動であり、不確実の予定に対する頑健性をもった市場を構築することが交通サービスにおける協調型料金システムにとって重要であることが明らかとなった。

6. おわりに

本研究では、協調型料金システムとして利用権オークション市場を採り上げ、2期間の意思決定モデルによって定式化した、さらに不確実な予定に対するスケジュールを考慮することによって、予定の不確実性が市場参加に対して影響を与えることを示し、これらの定式化が確率的な行動モデルと整合的であることを示した。以上の結果は本研究における仮定の下で成立する知見であるが、実証データと一致する内容であり、今後は実証研究によって本研究の内容を裏付けるとともに、予定の不確実性に対して頑健性のある協調型料金システムを提案したい。

謝辞：なお本研究を実施するにあたって文部科学省科研費基盤A「プローブ技術を援用したデータフュージョン理論による総合的交通行動調査の高度化(代表:羽藤英二)」の協力を受けた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Milgrom, P.: Putting Auction Theory to Work, Cambridge University Press, 2004 [川又邦夫・奥野正寛監訳, オークション理論とデザイン, 東洋経済新報社, 2007].
- 2) Steiglitz, K.: Snipers, Shills, & Sharks eBay and Human behavior, Princeton University Press, 2007 [川越敏司・小川一仁・佐々木俊一郎訳, オークションの人間行動学 最新理論からネットオークション必勝法まで, 日経BP社, 2008].
- 3) 多々納裕一・小林潔司・喜多秀行: 危険回避性選好を考慮した2段階離散選択モデルに関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 13, pp. 553-562, 1996.
- 4) 北野喜正・西田純二・小林潔司・松島格也: 事前・事後割引料金システムの経済評価, 土木学会論文集D, Vol. 62, No. 4, pp. 638-656, 2006.
- 5) 小林潔司・松島格也・菱田憲輔: 予約システムの経済便益評価, 土木学会論文集D, Vol. 64, No. 2, pp. 299-318, 2008.
- 6) 赤松隆: 一般ネットワークにおけるボトルネック通行権取引制度, 土木学会論文集D, Vol. 63, No. 3, pp. 287-301, 2007.
- 7) 和田健太郎・赤松隆: “渋滞”と“混雑”を解消する情報効率的メカニズムのデザイン, 土木計画学研究・講演集, Vol. 38, CD-ROM, 2008.
- 8) 原祐輔・羽藤英二: 自転車共同利用オークションサービスの実装とそのマイクロストラクチャーに関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol. 39, CD-ROM, 2009.
- 9) Vickrey, W., Counter speculation, auctions, and competitive sealed tenders, *Journal of Finance*, Vol. 16, pp. 8-37, 1961.
- 10) Riley, J., and Samuelson, W., Optimal auctions, *American Economic Review*, 71, pp. 381-392, 1981.
- 11) Myerson, R., Optimal auction design, *Mathematics of Operations Research*, 6, pp. 58-73, 1981.
- 12) Elyakime, B., Laffont, J. J., Loisel, P. and Vuong, Q., First-Price Sealed-Bid Auctions With Secret Reservation Prices, *Annales d'Economie et de Statistique*, 34, pp. 115-141, 1994.
- 13) Jofre-Bonet, M. and Pesendorfer, M., Bidding behavior in a repeated procurement auction: A summary, *European Economic Review*, 44, pp. 1006-1020, 2000.
- 14) Jofre-Bonet, M. and Pesendorfer, M., Estimation of a Dynamic Auction Game, *Econometrica*, 71, pp. 1443-1489, 2003.