

平成 22 年 5 月 24 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19530164

研究課題名（和文）

公共財供給メカニズムの性能と均衡戦略の学習可能性：理論的・実験的研究

研究課題名（英文）

Performance of mechanisms for providing public goods and learning of equilibrium strategies: A theoretical and experimental study.

研究代表者

曾山 典子 (SOYAMA NORIKO)

天理大学 人間学部 総合教育研究センター 准教授

研究者番号 50309522

研究成果の概要（和文）：

本研究では、ピボタル・メカニズムの性能と Groves-Ledyard メカニズムの下での均衡戦略の学習可能性について実験経済学手法を用いて研究し、次の2点を明らかにした。(1)厳密に凹の評価関数の下で連続的に変化する公共プロジェクトの規模決定問題に適用されるピボタル・メカニズムは、支配戦略である真実表明以外には最良反応が存在しない利得構造を実現でき、支配戦略の適応的学習を促す上で優れた性能を発揮する。(2)Groves-Ledyard メカニズムにおいて、個人の戦略選択行動の Nash 均衡への収束を図るために罰則パラメータの値は supermodularity の充足を要求するほど高い水準に設定される必要はなく、Nash 行動下での収束条件の下限を超える値で十分収束が可能である。

研究成果の概要（英文）：

In this research, we investigated the performance of Pivotal mechanisms and attainability of Nash equilibrium through Groves-Ledyard mechanism by the experimental economics method. Two points to mention in the following can be shown as this research result. 1) Pivotal mechanism, which is applied to problem of providing size of public products changing continuously under the strictly concave evaluation function can generate the payoff structure, has no best response other than truth-telling as dominant strategy, therefore it achieves the best performance under adaptive processes for learning dominant strategy. 2) In the Groves-Ledyard mechanism, punishment parameter  $\gamma$  is required value over the minimum value of convergence condition under Nash behavior, however individual behavior strategies can converge to Nash equilibrium under low  $\gamma$  less than high  $\gamma$  which is able to satisfy supermodularity.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
19年度	1,100,000	330,000	1,430,000
20年度	900,000	270,000	1,170,000
21年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：社会科学

科研費の分科・細目：経済学

キーワード：実験経済学，公共的意思決定，探索行動，Nash 均衡戦略，supermodularity

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) ピボタル・メカニズムの真実表明誘発性能の検証

ピボタル・メカニズムは、公共財に対する真の選好を表明することが、各個人にとって支配戦略となるという意味で、誘因両立性を満たす公共財供給メカニズムであり、理論的には各個人が真実表明を行うと期待されている。しかし、固定規模の公共プロジェクト実施の可否決定問題に適用されるピボタル・メカニズム（以下では離散型 PVM と表記）に関する実験研究では低い真実表明率が得られていないことが過去の研究によってわかっている。

平成 16～18 年度の科学研究費補助金交付対象研究（研究代表者：曾山典子，課題番号：16530130）において、意思決定主体や戦略の数を 2 主体 3 戦略の最も単純な意思決定環境においても、変則的戦略選択行動をとる主体が多く存在することを明示し、その要因を次の通り示した。離散型 PVM における利得構造は、戦略の選択と利得とのフィードバックにもとづく何らかの学習プロセスを通じて支配戦略を見出すことを困難にし、各意思決定主体は、自己の戦略と他の主体の戦略のあらゆる組合せについて自己の利得を求めなければ支配戦略を見出すことはできず、そのために、支配戦略の探索コストは大きくなってしまふ。

しかし、ピボタル・メカニズムを連続的に変化しうる公共プロジェクト規模の決定問題に適用した場合には、誘因両立性を満たす上でのキーとなる Clarke 税は特定の戦略の組合せにおいてのみ発生するのではなく、どのような戦略の組合せの下でも発生し、その大きさは意思決定主体の選択する戦略（公共プロジェクトに対する評価関数のパラメータ）に依存して変化するため、支配戦略の学習困難性は大幅に緩和されると期待できる。この場合、連続的に変化しうる公共プロジェクトの規模決定問題に適用したピボタル・メカニズム（以下では連続型 PVM と表記）の下で、意思決定主体は戦略選択と利得とのフィードバックにもとづく学習過程を経て、真実表明が支配戦略であることを見出すことが可能となり、彼らの表明するメッセージが真実表明に収束すると期待できる。

### (2) Nash 均衡戦略学習プロセスの探求

ピボタル・メカニズムは、公共財の効率的供給を達成するための資産配分メカニズムとして見た場合、予算均衡条件を満たさないという重大な欠陥がある。他方、公共財の効率的供給を達成しつつ、誘因両立性を満たすメカニズムは存在しない。そのような中、Nash 均衡戦略によって公共財の効率的供給を達成しうる Nash 遂行メカニズムがいくつ

か発見された。代表的なメカニズムである Groves-Ledyard メカニズム（以下では GLM と表記）は、Groves と Ledyard によって開発された公共財供給メカニズムであり、公共財を含む経済において、Nash 均衡によって Pareto 効率的配分を遂行できる優れた公共財供給メカニズムである。

Chen と Plott は、公共財の効率的供給を達成する上での GLM の性能に関する実験研究を行い、GLM の唯一のパラメータである罰則パラメータ  $\gamma$  の値が十分大きい場合には、GLM が生成する配分は、素早く正確に Pareto 効率的配分に収束するが、 $\gamma$  の値が小さい場合には、Pareto 効率的配分への収束速度は遅く、効率性の程度も不十分となることを発見した。また彼らは、準線形の効用関数で表される選好を想定した場合に、GLM の生成するゲームが supermodularity を満たすための必要十分条件を導出した。その条件は、 $\gamma$  がある閾値以上となることであり、安定的で速やかな Pareto 効率的配分への収束が観察された場合の  $\gamma$  の設定値はこの閾値を超えていたが、十分な収束が見られなかった場合の  $\gamma$  の設定値はこの閾値を下回っていたことを明らかにした。その上で、Milgrom と Roberts の「supermodularity は、これを満たすゲームにおいて、Cournot-Nash の最良反応動学 (best response dynamics) を含む広範な動学的学習過程の下で、プレーヤの戦略が Nash 均衡に安定的に収束するための十分条件となっている」とする命題に照らして、GLM が Nash 均衡の学習可能性に優れている場合には公共財の効率的供給の達成に有効であるが、そうでない場合には GLM の性能は高く評価できないことを示した。

しかし、supermodularity が Nash 均衡への安定的収束のための必要十分条件ではなく、十分条件に過ぎないため、Chen が示した閾値を下回る  $\gamma$  値を持つ GLM の下でも Pareto 効率的な配分への収束が期待できる場合がある。研究分担者である森が 1980 年代末に GLM に関する実験を行った際、 $\gamma$  の値が Chen らの閾値に照らしてメカニズムの生成するゲームの supermodularity を保証しない水準であったにも係らず、実験結果は GLM が近似的に公共財の効率的供給を達成することを示していた。本研究では、GLM の実験を通して意思決定主体が採用した Nash 均衡戦略の学習プロセスを探究することによって、supermodular ではないゲームを生成する GLM であっても、Nash 均衡への収束を保証し、公共財の効率的供給を達成するような均衡戦略学習プロセスを特定することが可能であると考えられる。

## 2. 研究の目的

### (1) 厳密に凹の評価関数の下で連続的に変

化しうる公共プロジェクトの規模決定問題に適用される「連続型ピボタル・メカニズム」に関する実験を実施し、意思決定主体が戦略選択と利得とのフィードバックにもとづく学習過程を経て、支配戦略を見出すことが可能となり、彼らの表明するメッセージがピボタル・メカニズムの支配戦略である真実表明に収束することを実証的に裏付けることが可能であるかを検討する。

(2) Nash 遂行メカニズムの代表的なメカニズムである Groves-Ledyard メカニズムの下で実験を実施し、実験で示された均衡戦略の学習プロセスを特定することを通じて、Groves-Ledyard メカニズムが意思決定主体の選択する戦略が Nash 均衡戦略へ収束することを保証し、公共財の効率的供給を達成し得るために必要かつ十分な均衡戦略学習プロセスがいかなる形態をとるのかを探究する。

### 3. 研究の方法

(1) ピボタル・メカニズムの真実表明誘発性能の検証

固定規模の公共プロジェクトの実施の可否決定問題に適用される離散型 PVM と厳密に凹の評価関数の下で連続的に変化する公共プロジェクトの規模決定問題に適用される連続型 PVM の性能を比較するため、①に記した実験モデルに従って実験室実験を行い、②に記したコンピュータ・シミュレーションを行い、実験結果の頑健性を検討した。

#### ①実験モデル

両 PVM 実験とも、意思決定主体は2主体とし、一方の主体はランダムに戦略選択を行うコンピュータ・プログラムとした。この意思決定環境を維持しつつ、被験者に割り当てられる真の評価値はラウンド間で不変とし、意思決定を18ラウンド行った。戦略数については、離散型 PVM 実験では3戦略を前提とし、連続型 PVM 実験は、一定値以上の実数とした。

離散型 PVM 実験では、意思決定主体は選択する公共プロジェクトに対する評価  $s_i$  として、 $s^L, s^M, s^H$  (ただし、 $s^L < s^M < s^H$ ) の3つの値のうちの1つを表明する。プロジェクトに対する真の評価値  $\theta_i$  も  $s^L, s^M, s^H$  のうちの1つの値に限定されている。2主体によって表明された評価値の合計  $s_1 + s_2$  が公共プロジェクトの実施費用  $c$  以上であれば、プロジェクトは実施され、そうでなければ中止となる。プロジェクトが実施される場合、各主体は  $c/2$  に等しい固定費用負担額を支払い、中止の場合は固定費用負担額がゼロとなる。他方の主体の表明する評価値を  $s_j$  と表すとき、 $s_1 + s_2 \geq c$  かつ  $s_i < c/2$ 、または、 $s_1 + s_2 < c$  かつ  $s_i \geq c/2$  が成り立つ場合には、固定費用負担額に加えて、 $|s_i - c/2|$  の Clarke 税  $t_i$  を負担しな

なければならない。したがって、意思決定主体の利得  $u_i$  は、プロジェクトが実施される場合は  $u_i = \theta_i - c/2 - t_i$  であり、中止の場合は  $u_i = -t_i$  となる。

連続型 PVM は、評価関数  $V_i(y)$  と限界評価関数  $V_i'(y)$  を次式のように特定化し、各主体には限界評価関数の切片の値  $s_i$  をメッセージとして表明させた。

$$V_i(y) = s_i y - ay^2/2, \quad V_i'(y) = s_i - ay,$$

ここで、 $a$  は正の定数である。

プロジェクトの単位あたりの実施費用は一定値  $c(>0)$  をとるものと想定し、社会的純便益  $V_i(y) + V_j(y) - cy$  を最大化する公共プロジェクトの規模は、各主体の戦略値  $s_i$  が  $c/2$  以上に限定されているならば、次式ようになる。

$$y^* = (s_i + s_j - c)/2a \geq 0$$

各主体が負担する費用負担は、固定比率費用負担  $(c/2)y^*$  と次式で求められる Clarke 税  $t_i$  である。

$$t_i = [V_i(y_i^*) - (c/2)y_i^*] - [V_i(y^*) - (c/2)y^*] = \frac{(s_i - s_j)^2}{8a}$$

したがって、連続型 PVM における利得  $u_i$  は、次式のように求められる。

$$u_i = \frac{(2\theta_i - c)(s_i + s_j - c)}{4a} - \frac{(s_i + s_j - c)^2}{8a} - \frac{(s_i - s_j)^2}{8a}$$

なお、離散型 PVM 実験は20名が実験の値を変えて2回行い、延べ被験者数は40名である。連続型 PVM 実験は被験者数が33名で重複して行っていない。

#### ②シミュレーション

適合的学習過程を次に記す2つのタイプに特定化し、コンピュータ・シミュレーションを通して、離散型 PVM と連続型 PVM の支配戦略学習性能の比較を行った。

##### (Myopic な学習過程)

前回のラウンドに得られた利得と前々回に得られた利得との大小関係によって今回の戦略を前回の戦略から変更するか否かを決定する。

##### (Heuristic な学習過程)

以前のラウンドに最大利得をもたらした回数が最も多く、最小利得をもたらした回数が最も少ない戦略を今回の戦略とする。

シミュレーションで使用する値(主体が選択する戦略の集合、真の値、ラウンド回数)は実験と同じとし、プロジェクトの実施費用離散型 PVM のシミュレーションでは、 $c$  は130とする。連続型 PVM シミュレーションでは、公共財の限界費用は  $c=100$  とし、限界評価曲線の傾きの絶対値  $a$  は1とした。

ランダムに選び出された各ラウンドでの相手の戦略の18個の並びを前提とし、各学習過程に沿って、シミュレーションプログラ

ムが戦略を選択する処理を1万回ずつ行った。離散型PVMと連続型PVMのそれぞれにおいて導出された1万回の戦略選択において、支配戦略への収束（最終ラウンドまで真のメッセージである70を選択し続ける状況の実現）が観察された件数の割合や平均収束ラウンド数、真実表明率を計測した。

## (2) Nash 均衡戦略学習プロセスの探求

GLMの下で、メッセージがNash均衡に収束するための条件を①に示すように導出し、これを用いて、②に記した実験を行い、その結果を分析することによって、Nash行動の頻度について検討するとともに、メッセージのNash均衡への収束を検証した。

### ①Nash 均衡に収束するための条件の導出

2次の公共財評価関数を組込んだ準線形の効用関数を持つ個人が、Cournot-Nashの最良反応動学に従ってメッセージの選択を行う「Nash行動」を採った場合を想定する。彼らのメッセージがNash均衡に収束し、Pareto効率的配分が達成されるための必要十分条件を、罰則パラメータの値の範囲を示す形で明示し、その下限がChenの導出したsupermodularityのための閾値を下回ることを示した。

### ②実験

①で導出した理論の特徴を備えた準線形効用関数を各被験者に割り当てた上で、罰則パラメータの値を3つのケース、1)Nash均衡への収束条件の下限より低い正の値に設定した場合、2)収束条件の下限を上回るが、Chenの閾値を下回る値に設定した場合、3)Chenの閾値を上回る値に設定した場合について実験を実施した。実験の実施に先立ち、罰則パラメータの設定値を決定するために、Nash行動を前提としたGLMのメッセージの推移に関するコンピュータ・シミュレーションを行い、罰則パラメータの値を1)のケースでは2,2)のケースでは5,3)のケースでは40と決定した。

実験は、1グループあたり5名の被験者を採用し、3セッション（1セッションは20ラウンド）の実験を行った。同一のグループについて、限界評価曲線の傾きは共通の値を設定し、限界評価曲線の切片は公共財評価の差異を想定し、各被験者で異なる値を設定している。また、私的財の初期保有量については、Nash均衡における効用水準が被験者間で大きな格差が生じないように、異なる値を設定している。罰則パラメータの値は、各セッションで変更し、グループごとに罰則パラメータの3つの値を設定する順序を変えている。実験グループは7グループ構成し、被験者の重複はないため、被験者総数は35名となる。

## 4. 研究成果

### (1) ピボタル・メカニズムの真実表明誘発性能の検証

離散型PVMの真実表明は支配戦略であるが、一意的な最良反応ではなく、他の意思決定主体の戦略が一定であっても、支配戦略を選択した場合と他の戦略を選択した場合とで利得が同一となるフラットな利得構造部分が存在する。一方、連続型PVMでは、公共プロジェクトの規模に関する個人の評価関数を厳密な凹関数に限定する限り、フラットな部分のない利得構造が実現できる。戦略の選択と自己の利得との対応関係から支配戦略を適合的に学習しようとする個人にとって、この利得構造の相違が、離散型PVMでは支配戦略を学習することは困難であるが、連続型PVMでは容易にさせていると考え、これを検証するために戦略選択の繰り返しを行う実験を行った。

実験の結果は、支配戦略に収束したラウンドの平均値では、離散型PVMが15.6ラウンドであるのに対し、連続型PVMでは11.9ラウンドと収束スピードが速くなっており、真実表明率も離散型PVMでは53.5%であるのに対し、連続型PVMでは65.7%と高くなっている。特に前半の9ラウンドでの真実表明率は離散型PVMの方が約4%高くなっているが、後半9ラウンドでは離散型PVMが57.8%であるのに対し、連続型PVMは85.9%に達している。このことは、連続型PVMの下では、被験者の大半が10ラウンド程度の学習過程を経た後には、支配戦略を認識し、真実表明を行うようになることを示唆している。

さらに支配戦略の適合的学習過程を、Myopicな学習過程とHeuristicな学習過程に特定化し、コンピュータ・シミュレーションを行った結果、支配戦略への収束が観察されたケースは、Myopicな学習過程では、離散型PVMが69.9%であったのに対し、連続型PVMでは95.0%、Heuristicな学習過程では、離散型PVMが69.9%であったのに対し、連続型PVMでは100%であった。また、平均収束ラウンドについては、Myopicな学習過程では、離散型PVMが15.7ラウンドであったのに対し、連続型PVMでは13.1ラウンド、Heuristicな学習過程では、離散型PVMが10.6ラウンドであったのに対し、連続型PVMでは4.3ラウンドであった。真実表明率は、Myopicな学習過程では、離散型PVMが51.5%であったのに対し、連続型PVMでは69.5%、Heuristicな学習過程では、離散型PVMが56.9%であったのに対し、連続型PVMでは86.1%であった。以上のシミュレーションの結果は、実験結果と整合的なものとなった。

実験やシミュレーションの結果は、支配戦略（真実表明）の他にも最良反応が存在する「弱い誘因両立性」しかみださない離散型PVMに対して、支配戦略が一意的な最良反応となる「強意の誘因両立性」をみたす連続型PVMが、支配戦略の適合的学習を促す上で優れた性能を発揮することを示している。

## (2) Nash 均衡戦略学習プロセスの探求

① 2 次の公共財評価関数を組込んだ準線形の効用関数を持つ個人が、Cournot-Nash の最良反応動学に従ってメッセージの選択を行う Nash 行動は、次式の他の人々のメッセージの平均値である  $\mu_i(t)$  を最大化する第  $t$  意思決定ラウンドにおける個人  $i$  のメッセージ  $x_i(t)$  を選択する行動であると定式化できる。

$$\mu_i(t) = \bar{y}_i - \frac{c(x_i(t) + S_i(t))}{n} - \frac{\gamma}{2} \left\{ \frac{n-1}{n} \left[ x_i - \frac{S_i(t)}{n-1} \right]^2 - \sigma_i^2(t) \right\} + \beta_i(x_i(t) + S_i(t)) - \alpha_i(x_i(t) + S_i(t)),$$

ここで、 $\bar{y}_i$  は個人の私的財の初期保有量、 $c$  を公共財の限界費用、 $S_i$  は他の人々のメッセージの和、 $\sigma_i^2$  は他の人々のメッセージの平方標準誤差、 $\gamma$  は罰則パラメータ、 $n$  はメンバー数である。

本研究では、GLM におけるメッセージが Nash 均衡に収束する条件を明確に示すための状況を設定するため、公共財の限界評価曲線の傾きを決定するパラメータ  $\alpha_i$  がすべての個人について同一の値  $\alpha$  をとる場合を考察の対象とし、Nash 均衡への収束条件が [1] となる。ここで、Chen によって導出された GLM が supermodularity を充たすゲームを形成するための必要十分条件は [2] のように表され、[1] の右辺を  $\gamma_s$ 、[2] の右辺  $\gamma_c$  とおくと  $\gamma_s - \gamma_c = \alpha n^2 / (n-1) > 0$  であるので、各個人が Nash 行動に従ってメッセージの選択を行う限り、 $\gamma$  の値を  $\gamma_c < \gamma < \gamma_s$  と設定すれば、Nash 均衡への収束を図ることができる。

$$[1] \quad \gamma > \frac{(n-2)}{(n-1)} \alpha n$$

$$[2] \quad \gamma \geq 2\alpha n$$

### ② 実験と実験結果の分析

実験の結果、Nash 行動は各 20 ラウンドの 3 セッションからなる 7 つの実験における延べ 2,100 回の意思決定のうち約 70% の意思決定において観察され、罰則パラメータを  $\gamma_c < \gamma < \gamma_s$  に設定した場合には約 75.5%、 $\gamma_s < \gamma$  に設定した場合には 82.9% の頻度で観察された。Nash 均衡へのメッセージの収束は、 $0 < \gamma < \gamma_c$  に設定された場合にはまったく生じなかったが、他の 2 つの設定では、7 実

験中 5 実験で観察された。

この実験結果から、GLM の下では個人の戦略選択行動としては Nash 行動が一般的であり、Nash 均衡へのメッセージの収束、すなわち Pareto 効率的配分の達成を図るためには、罰則パラメータ  $\gamma$  の値を必ずしも supermodularity の充足を要求するほど高い水準に設定する必要はなく、Nash 行動下での収束条件の下限を超える値に設定すれば十分であることが言える。つまり、この実験結果は、Pareto 効率的配分を達成する上での GLM の性能を発揮するためには、罰則パラメータ  $\gamma$  の設定に関して、Chen の示した  $\gamma_s$  よりも、本研究で示した  $\gamma_c$  の方がより重要な意味を持っていることを示唆している。ここで指摘した点は、 $\gamma$  を高く設定することが、個人の数（経済規模）が大きくなる場合や個人合理性の充足や応益性の観点からみた公平性の確保の問題を考慮した場合、GLM の性能を低下させる可能性があることを考慮すれば、より重要である。

以上の研究成果に関しては、学術雑誌掲載論文としては公表していないが、計測上の誤り等をチェックした上で、論文としてまとめ、学術雑誌への投稿を予定している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 3 件）

- ① 曾山典子, 森徹, 「Groves-Ledyard メカニズムにおける Nash 均衡の達成可能性：実験研究」, 『オイコノミカ』第 46 巻第 4 号, 1-24, 2010 年, 査読無
- ② 曾山典子, 森徹, 「適合的学習過程の下でのピボタル・メカニズムの真実表明誘発性能－離散型と連続型の比較：実験とシミュレーション－」, 『オイコノミカ』第 45 巻第 3・4 合併号, 1-21, 2009 年, 査読無
- ③ 曾山典子, 森徹, 「ピボタル・メカニズムにおける支配戦略の探索行動：実験研究」, 『Discussion Papers in Economics, Faculty of Economics NAGOYA CITY UNIVERSITY』No480, 1-16, 2008 年, 査読無

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

曾山 典子 (SOYAMA NORIKO)  
天理大学・人間学部・准教授  
研究者番号：50309522

### (2) 研究分担者

森 徹 (MORI TORU)  
名古屋市立大学・大学院経済学研究科・教授  
研究者番号：6013416

### (3) 連携研究者

なし