

## マルチエージェントシミュレーションによる 開発をとまなう政府調達に関する一考察

池田 明<sup>†1</sup> 海尻 賢 二<sup>†2</sup>

完全競争市場の対極にある開発・生産をとまなう政府調達は、個別契約によらざるをえない。政府調達者と企業間の開発・生産に関する情報の非対称性は、政府調達者にとって適正価格での契約を阻害し、また企業にとって「談合」等のモラルハザードの誘因となる。情報の非対称性を解決するため、一定ルールの下で各企業の原価情報を公開し、情報を共有することが有効な手段である。本論文では、政府調達者および複数企業からなるマルチエージェントモデルを構成し、適切な大域的情報の与え方として、原価情報の提示方法およびタイミング等について提案する。このモデルは、協調行動を誘発し、政府および企業にとって Win-Win 関係を築く可能性をシミュレーションにより検証し、多品種開発少量生産の制度設計に貢献できる可能性を示した。

### A Study of Institutional Design on Government Procurement Accompanying Development in Multi-agent Simulation

AKIRA IKEDA<sup>†1</sup> and KENJI KAIJIRI<sup>†2</sup>

Government procurements involving development and production, which are positioned opposite to fully competitive market, have to be based on individual contracts. The asymmetry of information on development and production between government procurers and companies suffocates the contract with reasonable price for government procurers, and is apt to lead to moral hazards such as “Dango”, or collusive tendering, among companies. In order to solve the problem of information asymmetry, it would be an effective means to share the competitive cost information by opening the cost information of each company under some rules. In this article, based on a multi-agent model composed of government procurer and multiple companies, we propose a framework of information presentation such as how to present the cost and other related information, or the timing of disclosure. We studied the possibility of this model to prompt coordinated action, and build the win-win relationships between the government and companies using the multi-agent simulation, and showed the possibility of the contribution to designing procurement system for development systems of small-batch production.

### 1. はじめに

政府調達は、政府と企業双方にとって公正かつ適正な価格で取引されることが基本である<sup>1)</sup>。我が国の調達制度は、いまだ談合および水増し請求等不祥事が発生し、なんらかの調達方式の改革が望まれている<sup>2)</sup>。

一般市場では、需要と供給によって価格が決定される。開発・生産を要する調達では、契約に不確実性（リスク）と調達者は企業のコスト情報を知りえないか情報の精度が低いという情報の非対称性<sup>\*1</sup>をとまなうため、適切な制度設計が必要である。実環境に合わない制度設計または競争の強化はモラルハザード<sup>\*2</sup>の誘因となり<sup>3)</sup>、罰則の強化だけでは解決されない。市場を形成し難い政府調達に関して、企業が利益を追求しつつかつ調達全体価格を低減させるという両立し難いテーマについて一試案を提言する。

「契約理論」の分野では、モラルハザードに対する契約方式が研究され、欧米先進諸国ではこの研究成果を採り入れたコスト補償契約およびインセンティブ契約<sup>\*3</sup>を契約の基本としている<sup>4)-6)</sup>。しかし、ゲーム理論における駆け引きを主体としたこのような方法には、コスト情報の精度に限界があり、さらに価格低減を実現するためには、競争原理を併用することが必要である。

Axelrod<sup>7)</sup>は、社会現象の分析やメカニズムを解明する方法として、マルチエージェントベースのアプローチが有効であることを提案した。心理、経済、金融、環境および社会科学等多方面で利用されている<sup>8)-12)</sup>。政府調達システムは、プレイヤーである政府調達者および企業群が、契約規則の下で限定合理的に意思決定するマルチエージェントシステムの典型と考えられる。谷本ら<sup>13)</sup>は政府調達の談合問題について、入札参加者間で醸成される協調戦略をとらえ、マルチエージェントシミュレーション（以下 MAS と呼ぶ）手法により、談合を創発する動的メカニズムを明らかにした。

<sup>†1</sup> 信州大学大学院工学系研究科博士後期課程  
Shinshu University, Faculty of Engineering

<sup>†2</sup> 信州大学工学部  
Shinshu University, Faculty of Engineering

\*1 買い手より売り手の方が、製品に関する詳しい情報を保有し情報に格差がある。このような場合の契約は、情報優位にある売り手が有利になる。

\*2 自己の利益を追求する行動が、社会全体にとって望ましくない現象をひき起こすこと。彼等をそのような行動に駆り立てる動機を分析して社会全体にとって望ましい行動へ誘導する制度設計が大切である。

\*3 経済問題では、自己の利益を追求する行動が悪いといっても解決しないので、アメの期待とムチの恐れとを与えて、社会全体にとって望ましい行動へ誘導する契約方法。

これは、企業間のコストを比較する方法が確立していないため、情報の非対称性により「談合という社会にとって望ましくない協調戦略<sup>\*1</sup>」を創発したものと解釈される。エージェント間のジレンマを解消して、命題である調達全体価格を低減するためには、エージェントに対してコストに関する大域的情報を提示して、共創的に相互作用を働かせて解決を図る方法が有効である。

コスト情報の公開方法としては、医療制度における「診療報酬点数表」による方法および公共土木工事等における「単価表」方式が一般に知られている。いずれの方式も公道価格であり、努力が評価される方式ではないため競争が醸成され難い。

池田<sup>2)</sup>は、リスクと情報の非対称性が企業行動に与える影響を数値解析により考察し、モラルハザードの原因となることを示した。解決方法として、見積り方式の標準化と統計処理を組み込んだ見積-実績評価結果の限定公開を示唆した。

本論文では、見積-実績評価の具体的方法として、原価見積り手続きを標準化するとともに、企業間共通の「基準仮想装置」<sup>\*2</sup>を仕様化して、その構成および作業を定義する。各企業の見積-実績評価データに基づき「基準仮想装置」の原価を計算し、共通の競争のコスト情報、「基準原価指標」を導入する。これは、ソフトウェア見積りにおける生産性測定方法として一般に知られている<sup>14)</sup>。

また、企業的意思決定主体に大域的情報として「基準原価指標」の分布を公開することにより、定量的競争力、コスト低減の費用負担の方法および企業間の競争を醸成する時間軸上の情報開示方法に対する企業の振舞いが、社会的ジレンマを回避することができるか、MAS アプローチにより考察する。

## 2. 政府調達 MAS モデル

現実の政府調達では、製品群の種類によって製造方法もまったく異なり、1 種類の基準仮想装置ではカバーが難しいので、製品群別に（場合によってはさらに分類が必要）対応して「基準仮想装置」を設定することが必要である。政府調達 MAS モデルを図 1 に示す。法令・規則等により入札・契約、監査および査定を実施する政府調達エージェントと複数の企業

\*1 公共事業等の入札では、ゲーム理論の観点から高価格の企業間「協調戦略」をとるか低価格の「裏切り戦略」をとって抜け駆け受注するか「囚人のジレンマ」の構図と解釈される。繰返しゲームでは、協調戦略をとったときの報奨利得が高い場合、協調戦略をとるようになる。

\*2 政府調達品の製品群ごとに対応する生産企業は、類似した製造工程を保有している。製品群別に平均的製造工程で構成するモデルを設定して、仕様、製造図、製造工程および加工方法等を規定し、これを「基準仮想装置」と呼び、企業間の原価比較の基準とする。本研究の特徴の 1 つである。

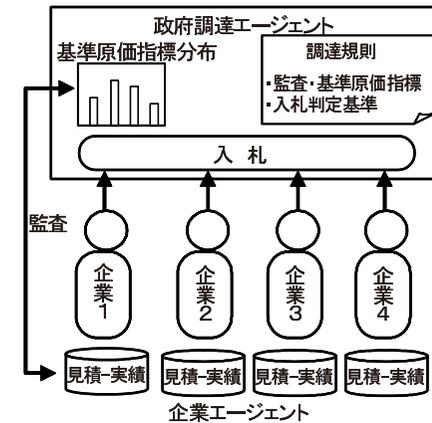


図 1 政府調達 MAS モデル  
Fig. 1 MAS model of government procurement.

エージェントとの間で入札・契約が結ばれ価格が決定される。契約に基づき企業エージェントは開発・生産活動を実施し、原価低減活動を織り込んだ出力として製造原価が発生する。

企業エージェントは、政府調達エージェントから提示される「基準原価指標」の分布から業界における地位、前回の製造原価および原価低減活動を加味して各企業にとって最適な原価見積り値を意思決定し入札する。一方、経営者は生産活動から一定期間の利益を集計して年間損益を算出し、年間利益最大化を適応度として組織を運営する。

企業間の原価比較を可能とするため、共通仕様の「基準仮想装置」を定義する。具体的には、装置の構成、組立図、部品、材料および作業標準等を定義する。

企業エージェントは、見積り値および製造実績値の年間合計値を作業別工程別に分解して、標準原価計算と類似の方法で作業ごとに生産性を測定し、政府調達エージェントの確認を受ける。この情報に基づいて各企業は、先に定義した「基準仮想装置」に対する原価を計算し「基準原価指標」として政府調達エージェントに申告する。政府調達エージェントは、企業名を伏せて「基準原価指標」の分布を公開し、各企業は競合会社の位置関係から定量的努力目標を得ることができる。

上記「基準仮想装置」による提案手法が成立する政府調達品の条件を示す。

- (1) 多機種開発少量生産の調達品で、製品群別に競争会社が存在し、かつ類似の生産基盤を所有することにより「基準仮想装置」が定義できる。

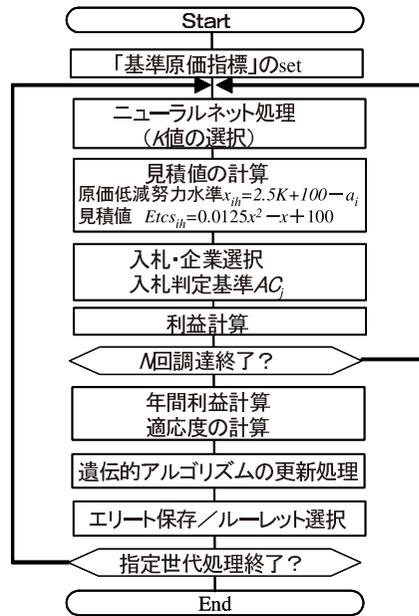


図 2 MAS モデルのフローチャート  
Fig.2 Flow chart of MAS model.

- (2) 開発後同製品が継続的に数倍以上生産され、類似の製品が一定量生産されて習熟効果が期待でき、原価低減モデルが適用できる。
- (3) 2号機以降の入札・契約では、妥当な生産価格が政府調達者の判断基準により決定される。
- (4) 初号機の開発生産および製品を構成する大部分が汎用量販品であるシステムは除外する。

この条件を満たす具体的取引は、防衛関連装置、航空管制装置および宇宙関連装置等があげられる。提案方法が適用できない分野は、汎用量販品で構成された、たとえば通信インフラシステムおよび情報処理システム等があげられる。

これらの調達品の主要条件 (1), (2), (3) および図 1 に基づいてモデル化して、MAS モデルの処理フローを図 2 に示す。

### 2.1 原価低減モデル

各企業の「基準仮想装置」の原価は、現時点における各企業の原価低減活動の成果と考えて、次の式 (1) に従うものとする。競合企業は、同一レベルの生産技術によるものとして、同一の原価低減計算式を適用する。 $x$  を原価低減努力水準とすると、原価低減に要する費用は、 $c$  を定数として  $cx^2$  で表すことができる<sup>4)</sup>。原価を 100 円とおくと、達成原価  $y$  は次式で書ける。

$$y = c \times x^2 - x + 100 \tag{1}$$

上記二次式は、 $x = 1/2c$  のとき、 $y$  は最小値となり、企業は達成原価が最小になるように原価低減努力をするものと考えられる。ここで、20%程度の原価低減を仮定すると、達成原価の最小値は 80 円となり式 (1) に代入して  $c$  を求め、達成原価  $y$  は次式で計算できる。

$$y = 0.0125x^2 - x + 100 \tag{2}$$

### 2.2 企業エージェント

原価低減モデルに基づく原価見積り、政府調達エージェントの見積りに対する入札・価格評価・契約および企業の経営結果として年間損益計算一連の調達サイクルを、人工取引として計算機上に展開する。

企業エージェントの意思決定は、実務者の意思決定と経営者の意思決定の 2 段階レベルで成立している。前者は、競争他社に勝てる入札見積り値を決定する。一方、後者は年間取引の結果および自社の競争力が最大になるように上位の意思決定をする。この 2 段階意思決定構造を模擬して、前者のミクロな意思決定をニューラルネットで、後者のマクロな意思決定を遺伝的アルゴリズムで模擬し、ニューラルネットを構成する結合係数を遺伝的アルゴリズムで強化学習させる方式<sup>13),15)</sup>を採用した。

競合会社は一般に数社であることから、ここでは 4 企業を想定する。以下、各企業エージェントを添字  $i$  ( $i = 1, \dots, 4$ ) で、取引回数を添字  $h$  ( $h = 1, \dots, N$ ) で表すこととする。公開された各企業の「基準原価指標」は、原価低減の進捗状況を示す初期原価  $a_i$  で与えるものとする。

$$80 \leq a_1 < a_2 < a_3 < a_4 \leq 100 \tag{3}$$

実務者の意思決定要素を導入するために、原価低減水準値を数値化した人為変数  $2.5 \times K$  ( $2.5$  は量子化定数) を導入する。すでに達成された原価低減水準初期値を近似的に  $(100 - a_i)$  とおいて、これに人為変数を加えて今回の総原価低減水準を式 (4) で計算する。この人為変数を利用した人工取引のプロセスにおいて、経営者の意思として年間の利益および業界における自社の競争力等事業環境情報を目的関数として、最大になるように調達行動を進化学習

させる。この結果から、調達原価および企業の利益を分析することによって、提案手法が有効であることを評価する。

ニューラルネットの出力をルーレット選択した出力  $K$  値から原価低減努力水準  $x_{ih}$  を次式により計算する。

$$x_{ih} = 2.5 \times K + 100 - a_i \quad (4)$$

ここで、 $K = 0, 1, \dots, K_m$

$x_{ih}$  を式 (2) の  $x$  に代入し、計算結果  $y$  を原価低減織り込み済み見積り値  $Etcs_{ih}$  として入札する。

ニューラルネットは入力ユニット数  $4 \times$  出力ユニット数  $12$  で構成し、入力層と出力層を結ぶ結合係数（実数）の更新には最適値を学習させるため遺伝的アルゴリズムを適用する<sup>16)</sup>。ニューラルネットの出力は、遺伝子の集合をなす染色体から結合係数に変換して次式によって計算後、この出力値  $o_k$  に比例した面積を有するルーレットにより選択して整数値  $K$  を得る。

$$o_k = 1 / \left( 1 + \exp \left( -\frac{1}{T} \sum_{t=0}^3 W_{tk} \times L_t \right) \right) \quad (5)$$

ここで、 $L_t$  ( $t = 0, 1, 2, 3$ ) はニューラルネットの入力信号を表す。

$L_0 = -1$  (バイアス)

$L_{1..3}$  = 企業の識別（順位）を 2 進数で表現

$W_{tk}$  : ニューラルネットの結合係数

$T$  : 感度を示すパラメータ ( $T = 0.03$  を採用)

ニューラルネットの結合係数は、 $4 \times 12$  のベクトルで表現し、1 ベクトルを 4 bit で構成し、これを染色体 192 bits として表現する。

各エージェントは、原価低減水準初期値が異なるため、非均質なエージェントである。したがって、1 つの染色体に企業の識別（順位）をすべて組み合わせて循環数の順序で入力し、結果を適応度として評価する。

なお、式 (4) で示した  $K_m$  は、式 (5) の計算結果に基づいてルーレット選択して得られた値  $K$  の最大値であり、原価低減が最も進んだ企業の原価初期値のとき、原価低減水準が最大になるように設定した<sup>\*1</sup>。

経営者は個々の取引から生じた利益ではなく、1 年間の累積損益で事業を評価する。利益率を  $r$  で表すと、 $h$  番目の取引の利益は ( $Etcs_{ih} \times r$ ) と表すことができ、年間  $N$  回の取引

では、 $i$  企業の年間利益  $P_i$  は次式で計算できる。

$$P_i = \sum_{h=1}^N (Etcs_{ih} \times r) \quad (6)$$

$P_i$  に基づいて  $i$  企業の適応度  $Fit_i$  を次式で定義し、経営者はこの値を最大化するように意思決定する。

$$Fit_i = (P_i)^5 / n \quad (7)$$

適応度が収束する世代後半において、遺伝淘汰圧低下を改良する方法が提案されている<sup>16)</sup>。べき乗スケールリング法を適用して適応度の変化率を大きくするため 5 乗を採用した。ここで、 $n$  は  $Fit_i$  を一定の値に調整するための調整項としての定数である。

### 2.3 政府調達エージェント

「基準仮想装置」を製品と仮定して、政府調達エージェントの入札・契約機能をモデル化する。入札・契約機能は、提出された見積り値から最小値の検出とそれに基づく評価選択から成り立っている。まず、政府調達エージェントは、参加企業  $I$  社の企業エージェントが 2.2 節で計算した見積り値  $Etcs_{ih}$  を比較して、原価の一番低いエージェントの見積り値を選択する。

$$Etcs_{0h} = \text{Min}(Etcs_{ih}) \quad (8)$$

入札判定基準を  $AC_j$  ( $j = 1, \dots, j_m$ ) で表し、 $AC_j$  の変化が政府調達システムに与える影響を分析する。「基準仮想装置」の原価を表す見積り値は、生産性の測定精度および基準仮想装置と実際の製造工程とのズレによる等測定系に誤差があり、これを入札判定基準  $AC_j$  で表す。次式を満たす企業エージェントの見積り値は測定誤差内であり、見積り値は妥当と評価してすべて契約する。次式を満たさない企業は不採用とする。

$$|Etcs_{ih} - Etcs_{0h}| \leq AC_j \quad (9)$$

政府調達エージェントは、入札繰り返しを通じて競争による原価情報が把握できるので、複数社応札に対しても一定基準を満たす原価の中から best value を提案する企業を選択することができる。また 1 社だけの応札に対しても競争的原価情報に基づき価格交渉が可能であるため適正な取引が期待できる。

\*1 原価低減水準の最大値は、2.1 節から  $x = 1/2 \times c$  のときであり、 $c = 0.0125$  と仮定したので、 $x \geq 40$  である。原価低減が最も進んだ企業の原価初期値を 85 円としたので (4 章シミュレーション初期値参照)、式 (4) に代入して  $x_{ih} > 40$  から  $K_m = 11$  とした。

## 2.4 遺伝的アルゴリズム

染色体はニューラルネットの結合係数  $4 \times 12 = 48$  個の重みベクトルで構成し、進化が適用される染色体の集団サイズ<sup>\*1</sup>を  $H$  個として染色体プールに貯蔵する。

$I$  個の企業エージェントに対応した染色体に対して  $N$  回の入札を繰り返し、式 (7) により適応度を計算し、このプロセスを終了した染色体の数が染色体集団サイズ  $H$  になるまで繰り返す。

遺伝子操作は、染色体プールに対応した適応度の対から、適応度を基にルーレット選択により、独立に 2 個の親染色体を選択する。このとき一番適応度の高い染色体が必ず残るようにエリート保存選択を併用する。この親染色体を基に一点交差（確率  $P_c$ ）および突然変異（確率  $P_m$ ）を実施し次世代染色体プールに貯蔵する。次世代染色体数が集団サイズ  $H$  になるまで、このプロセスを繰り返す<sup>16)</sup>。

## 3. 共創的原価情報公開モデル

2章で述べた政府調達 MAS モデルに初期原価の順位情報を入力し、原価低減費用を原価として認める方式を「基本型モデル」と呼ぶこととする。基本型モデルの拡張として競争力評価型モデル、原価低減費用の企業負担モデルおよび入札判定基準の段階的統制モデルの 3 モデルを提案する。政府調達エージェントにとっては、調達コストの削減すなわち各企業エージェントからの見積り値の低減を、また企業にとっては年間利益最大化を評価値として、提案モデルの有効性を考察する。

### 3.1 競争力評価型モデル

企業は利益最大化のほか、競争力向上も企業活動の重要な要素である。「基準原価指標」の分布公開情報から、各企業は競合会社の最低原価と自己の原価差から競争力の向上目標を数値的に把握することが可能である。

$h$  番目の最低原価と見積り値の差は  $(a_1 - Etc_{sh})$  と表すことができるので、 $N$  回の取引の平均値  $l_i$  は次式で計算できる。

$$l_i = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^N (a_1 - Etc_{sh}) \quad (10)$$

\*1 遺伝的アルゴリズムの構成で、染色体の母集団の大きさを表す定数である。一般的には、集団サイズが大きいかほど高い計算機負荷、学習が遅い、局所的な解に収束することが少ない等の特性を示す。遺伝的多様性を制御するシミュレーション上の定数で、定数の決定は現時点では、経験則が予備実験によらざるをえない<sup>17)</sup>。

企業エージェント  $i$  の競争力  $Kyoso_i$  を次式で表現する。

$$Kyoso_i = (10 + l_i)d \quad (11)$$

ここで、定数 10 は競争力を非負とする定数である。また、 $d$  は競争力と年間利益の適応度への寄与率を調節する定数である。企業の経営評価要素として競争力を適応度に加えて式 (7) を次式に拡張する。

$$Fit_i = (Kyoso_i + P_i)^5 / n \quad (12)$$

### 3.2 原価低減費用の企業負担モデル

達成原価は式 (2) で計算され、原価低減には費用が発生する。「基本型モデル」は、政府調達側が低減に要する費用を負担する方法であったが、式 (2) の原価低減費用  $0.0125 \times x^2$  を企業側が負担するモデルについて見積り値と年間利益の関係を考察する。

「競争力評価型モデル」に以下の処理を付加する。原価低減費用は、利益の中から支払うので企業エージェント  $i$  の見積り値は次式で計算できる。

$$Etc_{sh} = 100 - x_{ih} \quad (13)$$

年間利益  $P_i$  を次式で計算し、結果を式 (12) へ代入して適応度  $Fit_i$  を計算する。

$$P_i = \sum_{h=1}^N (Etc_{sh} \times r - 0.0125 \times x_{ih}^2) \quad (14)$$

### 3.3 入札判定基準の段階的統制モデル

「基本型モデル」および「競争力評価型モデル」は、時間的に先に原価低減がより進捗した企業が有利なモデルとなっている。原価低減が進んだ企業は、式 (4) から初期原価分だけ有利であり、これは習熟効果先行の優位性に相当する。企業は学習により達成した原価低減努力水準を次の世代に受継ぎ原価低減をさらに継続することが現実的である。政府調達エージェントは、企業間の競争を維持するため入札判定基準を段階的に厳しく制御し、原価低減水準に応じて発生する原価低減費用を負担するモデルを考える。「競争力評価型モデル」に以下の処理を付加する。

段階的に制御された入札判定基準  $AC_j$  に対応する  $i$  企業の初期原価を  $a_{ij}$  で表す。原価低減努力水準  $x_{ih}$  は、式 (4) の  $a_i$  を  $a_{ij}$  で置き換えて得られる式 (15) で計算される。入札判定基準  $AC_j$  の条件で人工取引によって達成された原価低減努力水準値を平均して、これを  $Avx_{ij}$  で表す。次の段階  $AC_{j+1}$  のとき、初期原価  $a_{i(j+1)}$  は、前の段階で達成された原価低減努力水準平均値  $Avx_{ij}$  を引き継ぐので、 $a_{i(j+1)} = Avx_{ij}$  と書くことができるので、初期原価  $a_{ij}$  は漸化式 (16)、(17) により計算できる。

$$x_{ih} = 2.5 \times K + 100 - a_{ij} \quad (15)$$

$$(0 \leq K \leq K_m)$$

$$a_{ij} = Avx_{i(j-1)} \quad (16)$$

$$i = 1, 2, 3, 4 \quad j = 1, 2, 3, 4, 5$$

ここで、初期値は次式で与える。

$$a_{11} = 85, a_{21} = 90, a_{31} = 95, a_{41} = 100 \quad (17)$$

$x_{ih}$  を式 (2) の  $x$  に代入し、計算結果  $y$  が原価低減を見込んだ見積り値  $Etcs_{ih}$  として入札する。さらに式 (10) における最低原価  $a_1$  は、式 (16) から  $a_{1j}$  と書けるので置き換えて、業界最低原価と当該  $i$  会社の見積り値の差の平均値  $l_i$  を計算する。以下、同様に式 (6) ~ (12) の計算を繰り返す。

#### 4. シミュレーション結果と考察

原価低減の進捗状況が各企業エージェントによって異なり、初期原価  $a_i$  をそれぞれ 85, 90, 95 および 100 円を初期値としてシミュレーションを実施する。競争の激しさを決定付ける入札判定基準  $AC_j$  を 25, 20, 15, 10 および 5 円 (原価 100 円を基準に 25 ~ 5% に相当) の 5 段階をパラメータとして、見積り値および年間利益の世代推移を調べる。世代を 100 世代単位に分割して 5 段階の入札判定基準を割り付け、利益率  $r$  は 0.05 (% にすると 5%)、表 1 のパラメータに基づいてシミュレーションを実施した。各ケースは 50 試行実施し、以下の解析結果は、50 試行のアンサンブル平均による。

##### 4.1 競争力評価型モデル

シミュレーションの結果、各企業の見積り値原価低減世代推移および年間利益世代推移を図 3 に示す。図 3(a) に示す見積り値の 1 世代は、入札・契約手続きを  $N \times H/I = 120$  回取引した結果の平均値を示す。また図 3(b) に示す 1 世代の年間利益は、1 世代  $H/I$  個すなわち 5 年分の取引の平均値に相当する。約 50 世代で一定値に収束することが確認される。

表 1 シミュレーション諸元  
Table 1 Parameters of simulation.

生産 関連		ニューラルネット	遺伝的アルゴリズム				
$N$	$I$	結合係数の数	染色体	$H$	$P_c$	$P_m$	$d$
24	4	$4 \times 12$ =48ベクトル	$48 \times 4$ bits =192bits	20	0.4	0.01	5

図 3(a), (b) について、入札判定基準に対応する見積り値および年間利益の関係を調べるため、初期原価をパラメータとして、世代推移の値がそれぞれ一定値に収束した区間 50 ~ 100 世代について平均値を計算し、横軸に入札判定基準値  $AC_j$  を、縦軸に見積り値および年間利益の平均値をそれぞれプロットして相関関係をグラフ化したものを図 4 に示す。比較のため「基本型モデル」のシミュレーション結果から、上記同様の手続きで作成した見積り値および年間利益の平均値を図 4 に破線で重ねて表示した。

図 4(a) から入札判定基準 25 ~ 10 円の領域では、「基本型モデル」は、ほとんど競争による見積り値低減効果が見られないのに比べて、「競争力評価型モデル」は各企業とも入札判定基準値に関係なく見積り値の低減を自主的に実施し情報公開による効果を示している。入札判定基準値 10 円以下の領域では、両モデルとも入札判定基準値が小さくなるに従い、各企業の見積り値は、原価低減努力が一番進んだ企業 (初期原価 85 円) に近付き、見積り値の差の幅が減少することが観察される。

一方、図 4(b) に示す年間利益と入札判定基準値の関係から、「基本型モデル」および「競争力評価型モデル」の間には、差異が認められない。入札判定基準値 25 ~ 10 円の領域では、各企業の見積り値約 90 から 83 円に対して 90 円 (83 円)  $\times$  5%  $\times$  24 回取引 = 108 円 ~ 100 円の年間利益を確保している。

入札判定基準値 10 円以下の領域では、初期原価 100 円の一番原価低減の遅れた企業は、原価低減が他 3 社に追従できず、年間利益面で脱落の可能性もありうることを示唆している。上位 3 社の間では過当競争になり、原価低減の最も進んだ企業と伯仲した企業間では確率により支配される。

以上の結果から、企業適応行動は次のように考察される。「基準原価指標」の分布情報公開は、10 円以下の過当競争領域を除いて、入札判定基準値に依存することなく、コストに関する業界での位置関係から競争力を認識して競争市場を形成し、調達全体価格を低減する行動をとるようになる。政府調達者にとって好ましい結果となるにもかかわらず、企業にとっても所定の年間利益を確保することができる。必要以上に厳しい入札判定基準値の設定 (ここでは 10 円以下) は、企業間の過当競争を招き、最終的に 1 社独占となり適正な価格競争が失われる怖れがある。

##### 4.2 原価低減費用の企業負担モデル

シミュレーションの結果、各企業の見積り値原価低減世代推移および年間利益世代推移から、4.1 節と同様の手続きで作成した見積り値および年間利益の平均値をそれぞれグラフ化して図 5 に示す。比較のため「競争力評価型モデル」のシミュレーション結果を図 5 に破

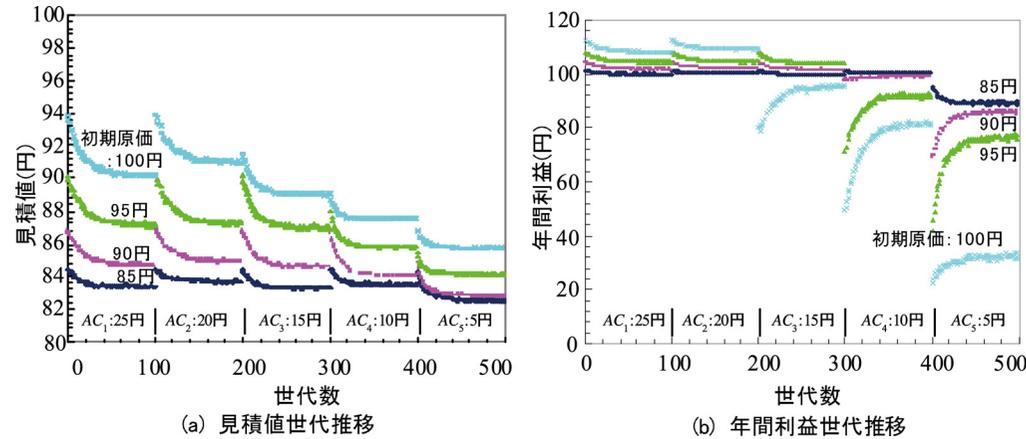


図 3 競争力評価モデル世代推移  
Fig. 3 Generational transition of (a) Estimated costs and (b) Annual profits for the competitiveness evaluation model.

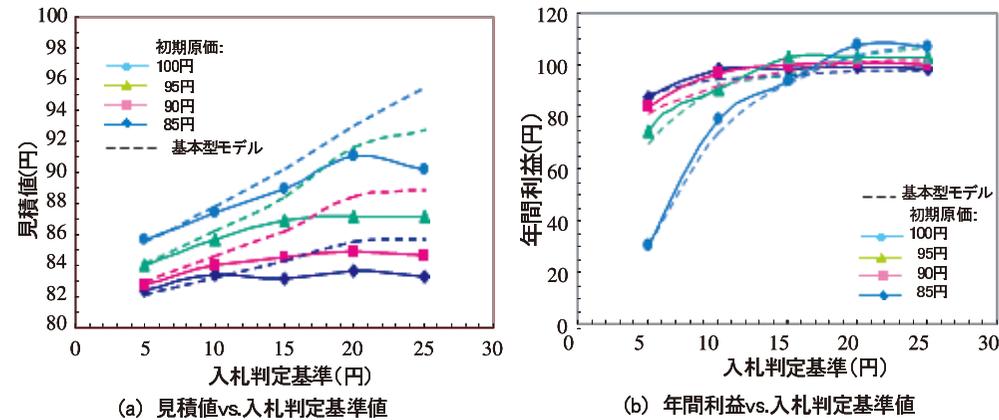


図 4 競争力評価モデル  
Fig. 4 Simulation results for the competitiveness evaluation model: (a) Estimated cost vs. bid decision criterion; (b) Annual profit vs. bid decision criterion.

線で重ねて表示した。

図 5 (a) から原価低減費用を調達者が補償する「競争力評価型モデル」に比較して、「原価低減費用の企業負担モデル」では、原価低減の一番進んだ初期原価 85 円の企業を除いて

見積り値はいずれの企業も高いままで原価低減努力が認められない。これは原価低減努力をした企業ほど費用負担が大きくなり利益を圧迫し、競争による原価低減の誘因を抑制するものと考えられる。

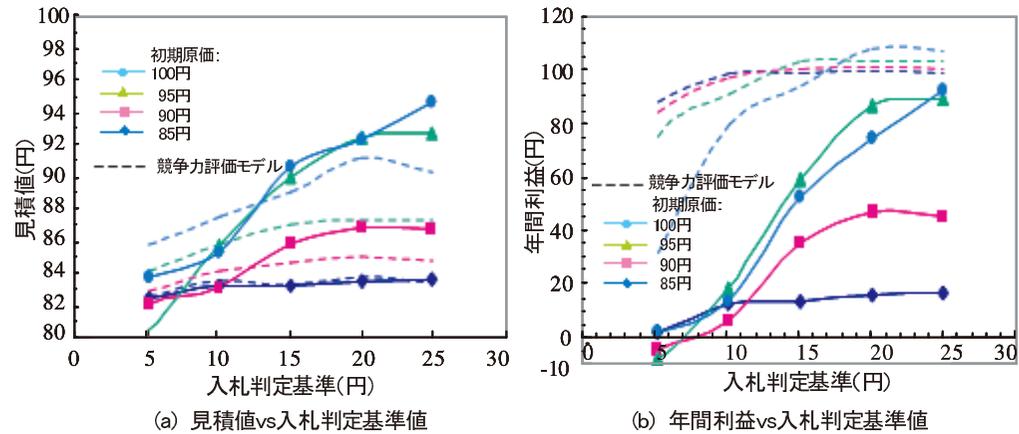


図 5 原価低減費用の企業負担モデル  
 Fig. 5 Simulation results for the model companies bear cost reduction expenses: (a) Estimated cost vs. bid decision criterion; (b) Annual profit vs. bid decision criterion.

したがって、原価低減より見積り値を下げないことが年間利益を最大化することになり、入札判定基準値 10 円以下の過当競争領域以外見積り値が下がらない。図 5 (b) から、入札判定基準値全域にわたって「競争力評価型モデル」に比べて年間利益は低い。原価低減の遅れている企業が、原価低減の進んでいる企業に比べて年間利益が高く、努力しない企業が優位である逆転現象を示している。原価低減に要する費用以上の利益を確保するためには、見積り値をできるだけ高くかつ、原価低減費用を低く抑える戦略が有効であることを示している。また、企業にとって利益から原価低減費用を捻出するモデルは、過当競争領域の拡大と、それともなう利益薄の魅力のない市場を形成し、市場から退出の恐れすらある。

以上の結果から、政府調達側による原価低減費用の補償は、企業側の原価低減への誘因となり、企業間のコスト競争を醸成する。企業への費用転嫁は原価低減への意欲を減殺し見積り値の高騰を招き、さらに「基準原価指標」の分布情報公開による競争効果を失わせることになる。

#### 4.3 入札判定基準の段階的統制モデル

シミュレーションを実施した結果から、4.1 節で示した図 4 と同様の手順で作成した見積り値および年間利益をグラフ化して図 6 に示す。比較のため 4.1 節の「競争力評価型モデル」の結果を図 6 に破線で重ねて表示した。

図 6 (a) から各企業の見積り値は、「競争力評価型モデル」と比較して入札判定基準値の低下に対応して各企業とも大幅に原価低減が進むことを示している。「入札判定基準の段階的統制モデル」では、各企業の見積り値は原価低減の一番進んだ企業かつ原価低減の最小値 80 円に収束することが観察される。また、図 6 (b) から各企業の年間利益は、原価 80 円に対する利益率 5%を 24 回取引するので合計  $80 \times 0.05 \times 24 = 96$  円に収束し、調達原価すなわち見積り値最小かつ企業にとって年間利益率最大が達成される。「競争力評価型モデル」に比較して入札判定基準値 10 円以下の過当競争領域でも過当競争に陥らないことを示している。これは原価低減費用を政府調達側が補償し、かつ段階的に入札判定基準を制御することにより、原価低減の遅れた企業に努力する時間的猶予を与えることになり、ハンディキャップを解消して競争市場を維持し、原価低減を誘導する効果があるものと考えられる。

#### 4.4 各モデルの比較

政府調達の制度設計として 4 種類のモデルを提案したが、政府調達者にとっては、調達コストの削減すなわち各企業エージェントからの見積り値の低減を、また企業にとっては年間利益の最大化を指標としてこれらのモデルの有効性を評価する。

比較を容易にするため、図 4 (a), (b) から各入札判定基準値に対応する各企業の見積り値および年間利益結果を平均して、平均見積り値と平均年間利益の関係を求め横軸に平均見積

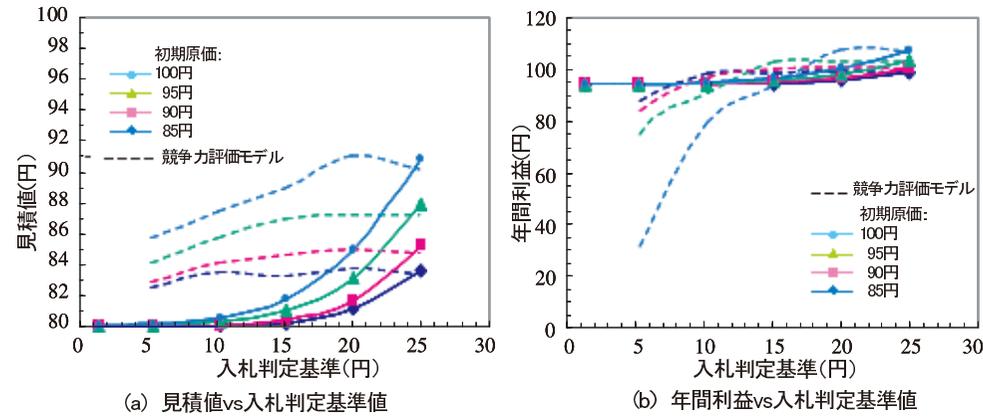


図 6 入札判定基準の段階的統制モデル

Fig. 6 Simulation results for the gradually controlled bid criterion model: (a) Estimated cost vs. bid decision criterion; (b) Annual profit vs. bid decision criterion.

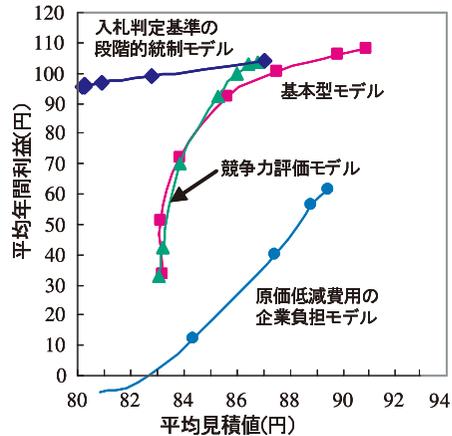


図 7 平均見積り値と平均年間利益の相関図

Fig. 7 Correlation between average annual profits and average estimated costs for the four models.

り値を、縦軸に平均年間利益をプロットして相関関係を図 7 に示す。図 5 および図 6 についても同様に平均見積り値と平均年間利益の相関関係を求めて図 7 にあわせて示す。

政府調達者および企業双方にとって最も望ましいモデルは、平均見積り値が小さかつ平

均年間利益が大きいポジションである。図 7 から左上隅に位置するモデルは、「入札判定基準の段階的統制モデル」>「競争力評価型モデル」>「基本型モデル」>「原価低減費用の企業負担モデル」の順に優れていることが理解できる。

政府調達システムが健全であるとは、best value の製品を適正なコストで入手することとするならば、可能な限り原価低減活動に対する誘因を喚起し、チキンレースを防止するシステムであることが必要である。

「基準原価指標」が公開されていることおよび近似的に無限繰り返しゲームであることを考えあわせて、このシミュレーションが示すように、「入札判定基準の段階的統制モデル」は、チキンレースには至らない。本論文で提案した「基準原価指標分布の公開」によるコスト競争モデルは課題解決の有力候補の 1 つと考えられる。

## 5. おわりに

競争市場形成には、情報の非対称性を解消して、コストの標準化・透明化・公開化の実現が絶対条件であるといわれている。競争市場形成の重要性が指摘されいながら実現困難な分野として、防衛関連装置、航空管制装置および宇宙関連装置等の多品種開発少量生産における政府調達の分野がある。本論文では、このような分野を対象として、企業間共通仕様の「基準仮想装置」を導入して、その原価情報を指標としてその分布を公開することによって

競争を醸成し、数値的競争関係の提示、時系列段階的入札判定基準の制御および低減に要する費用の政府補償の有効性をマルチエージェントベース手法に基づいて分析した。シミュレーションの結果、調達価格の低減および企業にとっても適正な年間利益が確保され健全な取引が形成される取引過程を解明することができ、この分野における政府調達制度設計に貢献できる可能性を示した。なお、単発開発品および汎用量販品で構成されたシステムについては適用が困難であり別途検討が必要である。今後、実際の製造工程に適合した最適な「基準仮想装置」モデルの分析および設計条件の検討が研究課題である。

### 参 考 文 献

- 1) Sandler, T. and Hartley, K.: *The Economics of Defense*, Cambridge University Press (1994). 深谷庄一ほか (訳): 防衛の経済学, 日本評論社 (1999).
- 2) 池田 明, 海尻賢二: 政府契約における開発リスクとコストに関する一考察, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.104, No.224, KBSE2004-8 (2004).
- 3) 伊藤秀史, 小佐野広: インセンティブ設計の経済学, 勁草書房 (2003).
- 4) Mcmillan, J.: *Games, Strategies, & Managers*, Oxford University Press (1992). 伊藤秀史, 林田 修 (訳): 経営戦略のゲーム理論, 有斐閣 (2003).
- 5) Worthington, M.M. and Goldsman, P.L.: *Contracting with the Federal Government*, John Wiley & Sons Inc. (1998).
- 6) 西山泰男: 米国政府調達における動機付け契約の特徴と分類の考察: 契約形態の整理と考慮, プロジェクトマネジメント学会誌, Vol.6, No.3, pp.25-30 (2004).
- 7) Axelrod, R.: *The Complexity of Cooperation*, Princeton University Press (1997). 寺野隆雄 (訳): 対立と協調の科学, ダイアモンド社 (2003).
- 8) 前田義信, 今井博英: 群集化交友集団のいじめに関するエージェントベースモデル, 電子情報通信学会和文論文誌, Vol.J88-A, No.6, pp.722-729 (2005).
- 9) 高橋大志, 寺野隆雄: 金融市場におけるマイクロマクロリンクの解明: 自信過剰な投資家の出現, 情報処理学会論文誌, Vol.47, No.5, pp.1433-1442 (2006).
- 10) Epstein, J.M. and Axtell, R.: *Growing Artificial Societies*, The Brookings Institution Press (1996). 服部正太, 木村香代子 (訳): 人工社会—複雑系とマルチエージェント・シミュレーション, 共立出版 (1999).
- 11) 山影 進, 服部正太: コンピュータのなかの人工社会—マルチエージェントシミュレーションモデルと複雑系, 共立出版 (2002).

- 12) 上田次次ほか: 実世界ジレンマにおける共創的意思決定と制度設計 (研究課題番号 16016228) (参照 2007-07-30). [http://research.nii.ac.jp/kaken-johogaku/reports/H17\\_A06/A06-16.pdf](http://research.nii.ac.jp/kaken-johogaku/reports/H17_A06/A06-16.pdf)
- 13) 谷本 潤, 藤井晴行: 談合の数理, 日本建築学会計画系論文集, No.565, pp.379-386 (2003).
- 14) Boehm, B.W.: *Software Engineering Economics*, pp.329-346, pp.492-531, Prentice Hall (1981).
- 15) 川村秀憲, 山本雅人, 大内 東: 外部観測に基づく進化的フェロモンコミュニケーションの評価と群知能の創発現象に関する研究, 計測自動制御学会論文集, Vol.37, No.5, pp.455-464 (2001).
- 16) 大内 東, 川村秀憲, 山本雅人: マルチエージェントシステムの基礎と応用, コロナ社 (2004).
- 17) 嘉数侑昇, 三上貞芳, 皆川雅章ほか: 遺伝アルゴリズムハンドブック, 森北出版 (1997).

(平成 19 年 8 月 6 日受付)

(平成 20 年 4 月 8 日採録)



池田 明

1964 年信州大学工学部通信工学科卒業。1969 年信州大学大学院工学研究科修士課程修了。1969～2004 年日本電気株式会社勤務。2004 年より信州大学大学院工学系研究科博士後期課程。3 次元レーダ, 航空管制, C3I システムの開発, 政府調達システムの研究に従事。電子情報通信学会会員。



海尻 賢二 (正会員)

1977 年 3 月大阪大学工学博士。同年 4 月信州大学工学部情報工学科助手。1995 年教授。遠隔教育, プログラミング言語, ソフトウェア工学に関する研究に従事。電子情報通信学会, 教育システム情報学会, IEEE, ACM 各会員。