

テクニカルノート

マルチエージェントベースアプローチによる リスク・生産情報格差下における 政府調達契約に関する一考察

池田 明^{†1} 海尻 賢 二^{†2}

仕様書が不完備な場合の政府調達は、交渉契約によらざるをえない。「開発・生産リスクおよび官民生産情報格差」と「契約制度」の未整合は、モラルハザードの誘因となる。本論文では、マルチエージェントベースアプローチにより政府調達を模擬し、エージェントの裁量行動が、モラルハザード「過大請求」および「価格交渉レース」の誘因となることを検証し、制度改革の基本条件を提言する。

A Study of Government Procurement Contracts under Risk and Production Information Gap Using Multi-agent Based Approach

AKIRA IKEDA^{†1} and KENJI KAIJIRI^{†2}

Government procurements with incomplete specification have to be based on negotiated contracts. The contract with the risk and the information gap between government procurers and companies on production is apt to lead to moral hazards. In this article, we simulate government transaction with multi-agent based approach, we verified that agent discretion behavior lead to moral hazards such as “excessive claim” and “price negotiation race”, and propose basic condition for the reform of the government procurement institution.

^{†1} 信州大学大学院工学系研究科博士後期課程
Graduate School of Engineering, Shinshu University

^{†2} 信州大学工学部
Faculty of Engineering, Shinshu University

1. はじめに

10 数年来、政府調達に係わる不祥事、「談合」および「過大請求」が繰り返し報じられている。不祥事がモラル欠如または仕組みに起因するか見極めたいうえで、制度改革が必要である。特に開発をとまなう特注品の調達では、仕様を明確にし難いケースもあり、仕様書に不完備性がある場合、調達は個別交渉契約^{*1}によらざるをえない^{1),2)}。また、技術の急激な進歩は、「開発・生産リスク」の増加および「官民生産情報格差」の拡大を招き、契約にこれらの対策が講じられていなければ、モラルハザード問題^{*2}となることが報告されている¹⁾。

わが国の一般競争入札を基本とする政府調達契約は、リスクに対する費用の支払い方法および情報格差対策が明示的に示されず、欧米諸国の契約と比べて著しく異なっている²⁾。情報格差を解消する一方法として、筆者らは企業間共通仕様に基づく仮想装置を定義して企業間の価格比較を可能にし、競争的市場価格を形成する方式を提案した³⁾。この方式の有効性を確認するため、政府調達者および複数企業からなる政府調達マルチエージェントシミュレーション（以下 MAS と呼ぶ）モデルを提示し、適切な大域情報を与えることにより企業間で協調行動が創発し適正な価格競争が誘発することを検証した³⁾。

一方、リスクと情報格差が企業行動に与える影響について数値解析により考察⁴⁾したが、不祥事の発生メカニズム解明には至らなかった。実際の調達では、規則に記述されていない担当者の駆引き裁量行動が様式化され、談合・過大請求に発展していったと考えられるが、客観的に実証されていない。

そこで本論文では、上記政府調達 MAS モデル³⁾を基礎として、リスク、情報格差および契約形態を定式化して組み込み、政府調達者および単一企業からなる人工取引モデルを考える。このモデルに政府調達および企業エージェントの意思決定要素として駆引き裁量を数値化した人為変数を導入する。この人為変数を利用した人工取引の過程において、経営者の意思として一定期間の利益を目的関数として契約上決められた利益が最大になるように調達行動を進化学習させることによって、担当者の適応裁量行動を探索する。駆引き裁量値の時間的進化すなわち獲得した行動様式を調べて、行動様式と現実の世界における不正行為との

*1 随意契約とも呼ばれ、発注者が複数企業について技術力および実績を資格審査し、提案書等を評価して性能・価格・日程等を交渉により契約する方法。一方、一般競争を適用した場合、企業は諸リスクを度外視して競争することになり、採算性から談合への誘引となる恐れもある。

*2 相手の行動に関する検証が困難なことにより、自己の利益を追求する相手方の行動が、社会にとって望ましくない現象を惹き起こすこと。社会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。

関係を検証する。

2. 政府調達の課題

2.1 開発・生産リスクの表現

一般に製造原価は統計値として把握され、 $S = C0 + \phi$ で表される²⁾。ここで、 S ：製造原価、 $C0$ ：平均製造原価、 ϕ ：平均値が0、標準偏差が σ_0^2 の正規分布に従う原価変動の確率変数を示す。製造原価は設計工数、材料費、加工費および経費すべての費用を含むものとする。原価低減努力結果は、原価低減が限界まで反映され $C0$ に含まれるものとして扱う。

工学的見積りの分野で、見積りと実績の比較がソフトウェア 63 例⁵⁾、米国防総省主要開発品 37 例⁶⁾ 報告されている。報告例から誤差の標準偏差は、平均値に対して 20%前後であった。本論文は相互作用の振舞いを検証することが目的であり厳密性を要しないと考えて、開発・生産リスクは、標準偏差（平均製造原価の 20%）で数値化した。

2.2 官民間情報格差

生産に関する官民間情報格差により、調達者が企業の提出する原価見積りを正確に評価することは難しい。2.1 節のリスクに加えて情報格差がある場合、調達者は正確な平均製造原価が分からないため、つねに企業の見積り値に対して値引き（査定）して契約することが最良の戦略となる。生産情報の格差から交渉者の関係は「囚人のジレンマ」を形成し、価格交渉過程における値切りと吹っかけの戦略は双方にとって支配戦略となる⁴⁾。

2.3 わが国の政府調達の契約形態

わが国の政府調達の契約形態は、定額型契約が基本である。原価監査機構を有する省庁では、米国におけるインセンティブ付き定額型契約（Fixed Price Incentive 契約）^{*)1}の変形と考えられるわが国固有の契約形態（以下 J-FPI 契約と呼ぶ）を併用している。J-FPI 契約は契約原価以上の費用が発生した場合企業側が全額負担し、契約原価未満の場合、原価差額の 100%（契約によって、特例として 50%を返納する）を政府へ返納する^{2),7)}。また、契約原価に認められた率の利益を上乗せすることを認めている。本論文では、J-FPI 契約および定額型契約形態の妥当性を価格交渉の観点から取り上げる。

*1 欧米諸国では、リスク（2.1 節の ϕ ）の負担に応じて 3 種類の契約を企業に提示する。定額型は、実際の費用の大小にかかわらず契約した金額が支払われ、企業がリスクを全額負担する。原価補償型は、発注者が費用（ $C0 + \phi$ ）を支払い、リスクを全額負担する。インセンティブ型（FPI 契約はこの一種）は、両者の中間型であり、リスクを官民間で分担する。契約方法がリスクの大きさに応じて準備されている²⁾。一方、わが国では定額型が基本であり、リスク補償が明確にされていない。なお、J-FPI 契約は、定額型と原価補償型の論理積と理解できる。

3. リスクに対する企業の適応行動

政府調達に係わる業務の枝葉を捨象し、個別受注生産方式の基本機能（政府調達、設計・生産、原価計算および経営）によるプロセスを図 1 に示す。意思決定をともなうプレイヤーは、政府調達、原価計算（企業実務）および経営の 3 エージェントに集約した。なお、文献 3) で提案された政府調達 MAS モデルを基礎に 2 章の機能を組み込んだ。詳細については、文献 3) を参照されたい。

3.1 政府調達エージェント

政府調達エージェントは、原価計算エージェントから提出された原価見積り E に対して調達者裁量値 $\alpha L1$ (α は量子化定数) で査定して契約原価 Ct を決定する。

$$Ct = E - \alpha L1 \tag{1}$$

条件として、調達者は平均製造原価の情報を知り、リスクだけが存在する簡単な場合を想定する。条件から値引きを要求しないので、本章では $L1 = 0$ として扱う。

3.2 設計・生産

契約した企業は、2.1 節の製造原価により正規分布 ($C0, \sigma_0^2$) に従った製造原価を発生する。取扱いを単純にするため、平均製造原価を 100 で正規化し、リスクを標準偏差 $\sigma_0 = 20$ として扱うものとする。

3.3 原価計算エージェント

(1) 生産結果報告と次回原価見積り

原価計算エージェントは、製造原価 S から利益が確保できる駆引き裁量値 αK を加味して、“次回原価見積り $E =$ 今回の取引における生産結果”として計算し政府調達エージェントへ

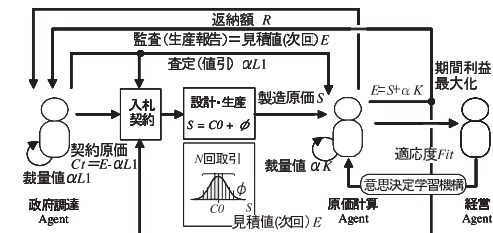


図 1 政府調達 MAS モデル
Fig. 1 MAS model of government procurement.

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

製造原価・見積もり			生産関連		ニューラルネット		遺伝的アルゴリズム						
$C0$	r	g	N	α	W_{iK}	T	染色体		H	P_c	P_m	M	l
100	0.05	4.0	25	5	$8 \times 9 = 72$ ベクトル	0.03	72 ベクトル \times 4 bits = 288 bits		20	0.4	0.01	200	45

報告する．

$$E = S + \alpha K \quad (K = 0, 1, 2, \dots, K_m) \quad (2)$$

式 (2) における K は、後述する 3.5 節のニューラルネットの出力、式 (4) の計算結果に基づいてルーレット選択して得られた値である．

(2) 利益と返納額計算

2.3 節で述べた J-FPI 契約形態を定式化する．人工取引の結果として、原価計算エージェントは利益 Pf および返納額 R を次式により計算する． $Ct \leq C0$ のとき、 $Pf = Ct(1+r) - S$ 、 $R = (C0 - Ct)(1+r)$ である．また、 $Ct > C0$ のとき、 $Pf = C0(1+r) - S$ 、 $R = 0$ である．ここで、 r は利益率を示す．

3.4 経営エージェントの容認利益最大化経営

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し、政府への返納額を極力抑えて利益最大化を図るものとする．したがって、1 年間 N 回の取引における総損益から総返納額を引いた値を適応度と定義して、経営者はこの値を最大化するように意思決定する．ここで、 h 番目の取引における利益および返納額をそれぞれ Pf_h および R_h で表すと、 N 回取引後の適応度 Fit は次式で計算できる．

$$Fit = \left(\left(\sum_{h=1}^N Pf_h - \sum_{h=1}^N R_h + M \right) / l \right)^3 \quad (3)$$

ここで、 M 、 l は定数でありシミュレーションのときに決定することとし数値を表 1 に示す．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ため、べき乗スケール法を適用した⁸⁾．また、適応度の変化率を大きくするため 3 乗を採用した．

3.5 意思決定学習機構

企業の意思決定は、現場と経営者の判断の二重構造で成り立っている．本論文では、前者のミクロな個々の取引の意思決定をニューラルネットで、後者のマクロな年間取引の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する方式を採用した^{3),8)}．

(1) ニューラルネット

ニューラルネットは、入力ユニット数 $8 \times$ 出力ユニット数 9 で構成する．入力層に与える入力信号 L_i ($i = 0, 1, 2, \dots, 7$) は、 L_0 : -1 (バイアス)、 $L_{1\sim 4}$: 製造原価の識別を 2 進数で表現、 $L_{5\sim 7}$: 4 章で後述する査定値 $L1$ を 2 進数で表現する．

原価計算エージェントの意思決定は、この入力信号から、ニューラルネットの出力値 O_K を、以下のシグモイド関数により計算し、ルーレット選択により K 値を求める⁸⁾．

$$O_K = 1 / \left(1 + \exp \left(-\frac{1}{T} \sum_{i=0}^7 W_{iK} \cdot L_i \right) \right) \quad (4)$$

$$K = 0, 1, 2, \dots, K_m$$

ここで、 T は出力の精度を決定する定数であり、 K_m は最大出力ユニット数を示し 8 とした．また、 W_{iK} は入力層と出力層を結び結合係数 (実数) であり、 W_{iK} 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⁸⁾．

(2) 遺伝的アルゴリズムによる学習

ニューラルネットの結合係数 $8 \times 9 = 72$ 個の重みベクトル W_{iK} を染色体と呼ぶ．進化が適用される染色体の集団サイズを H 個として、染色体に対して N 回の入札を繰り返し、式 (3) により適応度を計算する．染色体 H 個のすべてについて、このプロセスを繰り返す．

遺伝子操作は、染色体に対応した適応度を基にルーレット選択することにより、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⁸⁾．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) を適用して、適応度の大きい染色体が次世代に引き継がれ進化遺伝させる．

4. 情報格差下における価格交渉

政府と企業間の価格交渉過程を n 個のエピソードに分割して表現する． n 番目のエピソードに裁量値 $L1 = n$ を対応させて 3 章で述べた MAS 処理を実施し、適応行動を探索することとする．政府調達エージェントは、各エピソードで企業が適応した見積り結果を判定し

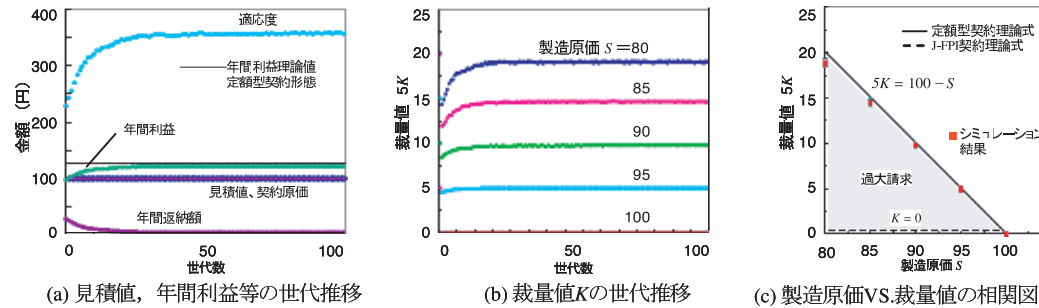


図 2 リスクに対する企業の適応行動シミュレーション結果
 Fig. 2 Simulation results for adaptation behavior of enterprise for the risk. (a) Generation change of estimates, profits, etc.; (b) Generation change of discretionary value K ; (c) Production cost vs. discretionary value.

て、次のエピソードでさらに査定するか否かを判断する。

価格交渉過程を繰返しゲームと考えて、式 (1) において、 n 番目のエピソードの変数を E_n および Ct_n と表記し、 $\alpha L1 = \alpha n$ を代入すると、査定された契約原価は次式によって計算できる。

$$Ct_n = E_n - \alpha n \quad (5)$$

n 番目のエピソードの終了時点で、政府調達エージェントは今回の見積り値 E_n と前回の見積り値 E_{n-1} から $|E_n - E_{n-1}| \geq g$ を判断して次の行動を決定する。 g は閾値定数である。この条件を満たすとき、“値切り” に対して見積り値 E_n が“吹っかけている”と判断して、政府調達者はさらに査定値を 1 単位すなわち $+\alpha$ 査定を増加させることとする。 $|E_n - E_{n-1}| < g$ ならば、“吹っかけ”を諦めたと解釈して価格交渉を終了する。

5. シミュレーション結果と考察

表 1 のパラメータに基づいてシミュレーションを行った。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。

5.1 リスクに対する企業適応行動

シミュレーションの結果、適応度、見積り値、契約原価、年間利益および返納額の推移を図 2(a) に示す。図から適応度は約 25 世代で一定値に収束していることが分かる。容認利益最大化を学習するに従って、返納額が急激に減少しノイズ分だけの返納に収束する。返納額を最小にして利益最大化を図ったことが分かる。年間利益は約 120 円に収束することが

観察され、取引回数は 25 回であるから、平均利益率に換算すると $120/25 = 4.8$ 円、%にすると 4.8% となり、経営エージェントの立場からは、容認利益率 5% に限りなく近い満足のいく結果となった。

一方、定額型契約形態の年間利益理論値は、定義から総取引原価の r 倍であるから、 $C0 \times N \times r$ で表され、前提から $C0 = 100$ において計算できる。結果を図 2(a) にあわせて示す。獲得した適応行動の年間利益は、定額型契約形態の年間利益とほぼ同等の結果となった。製造原価をパラメータとして裁量値 $5K$ の世代推移を図 2(b) に示す。また図 2(c) は、図 2(b) で適応度が一定値に収束した区間 50~100 世代について横軸に製造原価を、縦軸に裁量値 $5K$ をプロットして相関関係をグラフ化したものである。

図 2(c) から裁量値 $5K$ の振舞いは、図中プロット () で示され、これは定額型契約理論式 (式 (2) で $E = 100$ において、式 $5K = 100 - S$ で示される) におおよそ一致することが分かる。原価計算エージェントは、各取引において裁量値 = $(100 - \text{製造原価})$ を製造原価に上乗せして、政府調達エージェントへ申告する基本行動を獲得したことが分かる。この裁量行動は、「過大請求」($K \neq 0$ の意味で) と呼ばれ、この行動によって年間利益約 5% が確保できたことが分かる。企業が定額型か J-FPI 型か契約形態を選択できるなら、あえて不正を冒して経営結果が同等である J-FPI 契約を選択しない。

調達価格低減の観点から、原価計算エージェントが、裁量行動をとらざるをえない状況を取り除いて、契約ごとに「リスクを評価して支払う契約形態²⁾」の導入により、企業の原価低減努力を喚起することが得策である。

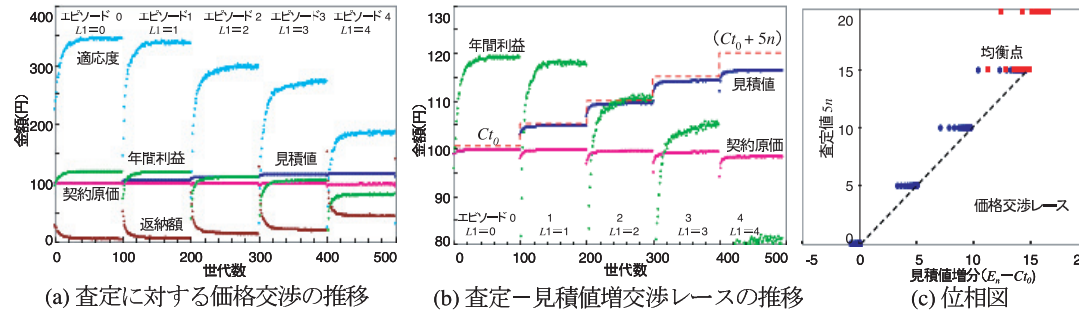


図 3 情報格差下における価格交渉のシミュレーション結果
 Fig. 3 Simulation results for the price negotiation under the information gap. (a) Transition of price negotiations with the assessments;
 (b) Transition of assessment vs. price negotiation rate; (c) Assessed values vs. estimated value increments.

5.2 情報格差下における価格交渉過程

3.5 節のニューラルネットの入力信号 $L_{5\sim 7}$ に査定値 0~4 を入力する．この査定値をパラメータとして，1 エピソード 100 世代，調達，開発・生産および経営のサイクルを単位とする 5 エピソードを学習した結果，適応度，年間利益，見積り原価，契約原価および返納額の推移を図 3 (a) に示す．図から適応度は各エピソードにおいて約 25 世代で一定値に収束し，各エピソードにおいて図 2 (a) とおおよそ同等の結果であることが分かる．

契約原価，見積り値および年間利益の関係を図 3 (a) から取り出して図 3 (b) にスケールを拡大して示す．また，エピソード 0 では，査定値 $5L1 = 5n = 0$ であるから式 (5) に代入して， $Ct_0 = E_0$ で表される．査定値と見積り値の推移を比較するため，この Ct_0 を基準としてエピソード n の査定値 ($Ct_0 + 5n$) を図 3 (b) にあわせて破線で示す．

原価計算エージェントの見積り値が，政府調達エージェントの査定値 ($Ct_0 + 5n$) の増加に対抗してほぼ査定値分だけ階段状に増加している．しかしながら，各査定値に対して契約原価は 100 円と一定である．これは原価計算エージェントが，容認利益を確保するため査定値分上乘せして見積もり，査定を受けた後でも所定の契約原価を確保する行動を獲得したものと考えられる．

政府調達エージェントの査定に対抗して，原価計算エージェントが見積り値を増加追従させる行動，すなわち軍拡競争に似た「価格交渉レース」^{*1} が発生することを示している．エピソード 4 ($L1 = 4$) で見積り値の増加分が約 0 となり，査定値増加に対して適応度および年間利益の低下が見られる．これはニューラルネットの出力ユニット数最大値 $K_m = 8$

の設計に対して裁量値 K が (図 3 (b) から見積り値は 120 円と考えられる，式 (2) から K は $(120 - 80)/5 = 8$ となる) $K \cong 8$ となり，出力限界により見積り学習性能が劣化したものと理解される．なお，図 3 (c) に縦軸に査定値 $5n$ を横軸に Ct_0 を基準とした見積り値増分をプロットし，価格交渉の様相をグラフ化した．企業の生産能力等の限界要因によって，均衡点が複数存在することを示している．

定額型契約形態であっても，政府調達者および企業にとって実質利益をとまなわない「価格交渉レース」および「過大請求」が起り，ニューラルネットの出力限界に対応付けられる生産設備および保有工数等の経営資源限界によって決まる均衡点に達する．時間経過とともに「査定-過大請求」が，相手の行動を先取りして織り込み済みの行動を様式化して均衡点に達するものと解釈できる．

契約上の容認利益を遵守する自制した経営者モデルを想定したが，利益至上主義をとる企業は情報格差に便乗して，容認利益の数倍の虚偽の製造原価を申告することも可能である．政府調達エージェントが適正な原価査定をするためには，判断基準となる「情報格差を解消する方法」³⁾ の活用が必要である．

*1 敵対する 2 国間において，1 国が軍備を増強すると敵対国が対抗処置としてさらに軍備増強し，経済的制約等によって均衡点に達するまで，際限のない軍備拡張競争 (arms race) に陥る．これは，Richardson の軍拡競争モデルとして定式化されている²⁾．生物界においても，進化過程で捕食者と被食者間に，軍拡競争関係のあることが知られている．政府調達者と企業間でも，「値切り-吹っかけ」の際限のない「価格交渉レース」に陥る．この価格交渉過程で，一種の情報戦の結果到達した実体のともなわない価格に対して，「吹っかけ」分に対する政府への申告が，虚偽申告 (過大請求) となり政府調達であるがゆえ，モラルハザード問題へ発展する．

6. むすび

本論文では、「わが国の契約制度」の下で、政府調達に内在する「リスク」および「生産情報の格差」が、プレイヤーに与える影響を、マルチエージェントベースアプローチにより分析した。各エージェントが適応的に業務遂行した結果、裁量行動がモラルハザードを招き、「過大請求」および政府調達者および企業にとって実質利益とならない、軍拡競争に似た「価格交渉レース」に至る過程を分析した。

急激な技術変化の環境下で、透明性・公平性優先の観点から、モラルハザード問題を解消するためには、欧米諸国が採用している「リスクを評価して契約に取り入れる形態」²⁾にあわせて判断基準となる「情報格差を解消する方法」³⁾の活用を提案する。課題の性格上、実取引データの入手は難しいが、この観点からの検証が今後の課題である。

参 考 文 献

- 1) 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).
- 2) 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).
- 3) 池田 明, 海尻賢二: マルチエージェントシミュレーションによる開発をともなう政府調達の制度設計に関する一考察, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.7, pp.1-10 (2008).
- 4) 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).
- 5) Boehm, B.W.: *Software Engineering Economics*, pp.329-346 and pp.492-531, Prentice Hall (1981).
- 6) Unger, E.J., Gallagher M.A. and White III, E.D.: R&D Budget-driven Cost and

Schedule Overruns, *The Journal of Cost Analysis & Management*, pp.80-97, Society of Cost Estimating and Analysis (2004).

7) 財団法人防衛調達基盤整備協会: 防衛庁中央調達関係法令集, 防衛調達基盤整備協会 (2005).

8) 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).

(平成 20 年 6 月 23 日受付)

(平成 20 年 9 月 10 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。