

# 人工物工学研究の新しい展開

## — 個のモデリング・社会技術化へ —

太田 順<sup>1\*</sup>、西野 成昭<sup>1,2</sup>、原 辰徳<sup>1</sup>、藤田 豊久<sup>1,2</sup>

東京大学人工物工学研究センターは、人工物工学に関する諸問題を解決するために設立され、現在第Ⅲ期に入っている。問題解決シナリオとして、まず、問題解決を問題設定の側面から扱う共創的なアプローチを採用する。データ分析法や計算科学、シミュレーションを基盤とし、実験経済学、実験心理学的手法を組み入れたモデル化を指向する。個の認識過程、認識に基づく個の活動、さらには個の価値形成という3つの側面に注目したモデル化を行う。この提案は、マルチステークホルダーの存在による社会技術的な側面と、個のモデリングという人間的な側面の両者を包含しており、製品サービスシステムのモデル化等の新しい問題設定がなされている。

**キーワード:**人工物、モデル化、個人、社会技術、共創

## New research trends in artifactology

### – Modeling of individuals and socialization technology –

Jun OTA<sup>1\*</sup>, Nariaki NISHINO<sup>1,2</sup>, Tatsunori HARA<sup>1</sup> and Toyohisa FUJITA<sup>1,2</sup>

The aim of Research into Artifacts, Center for Engineering (RACE), the University of Tokyo is to solve problems related to artifactology. The center has entered the third stage. A new approach in the problem-solving process has been proposed in this paper. The scenario for problem solving starts by establishing a problem using the concept of co-creation. Next, models related to artifacts are constructed by integrating the methods used in experimental economics and techniques of experimental psychology into computational science, data analysis, and simulation technology. Modeling of individuals is realized by focusing on three processes: recognition of individuals, activities of individuals based on recognized results, and value construction of individuals. This proposal of RACE includes the socio-technical viewpoint of multi-stakeholders and the human-centered viewpoint of modeling of individuals. Several new research topics are presented, including novel modeling methodology for product service systems (PSS).

**Keywords:** Artifacts, modelling, individuals, social technology, co-creation

### 1 はじめに—人工物工学が目指すもの—

人工物工学という学問を対象として扱う、東京大学人工物工学研究センターが1992年に設立された。このセンターの設置目的は、「人工物工学に関する教育研究を行う」ことである。人工物工学という用語は、元東京大学総長吉川弘之の「人工物工学の提唱」<sup>[1]</sup>において議論されている。そこでは、まず、我々が直面している環境、貧富、安全、健康等の多くの困難な問題、すなわち「現代の邪悪なるもの」に共通するのは、人類の安全と豊かさを求めてきた行為の結果、全く予期せず生じた点にある、と述べている。そして、既存の学問体系は領域性と視点の限定によって構築されたものであり、これらの問題の解決のために適用できないのはおろか、これらの問題を生ぜしめた原因となっ

ている、と主張している。そして、その解決のためには、人間が創出するものすべてを対象とし、領域を否定し、どの視点も取り入れられる新たな学問、すなわち従来型の演繹を基盤とする学問ではなく、仮説・法則や行為を導出するためのアブダクションを基盤とした学問として「人工物工学」という学問体系を説明している。

この論文では、まず人工物工学を、周辺学問領域との関係において概観する。そして人工物工学研究センターが提唱する今後の人工物工学における新しい課題、方向性、ならびに研究の方法論を提案する。そして、構築した新しい方向性、方法論に沿ってセンターメンバー間で抽出した人工物工学に関する具体的課題について述べる。

1 東京大学人工物工学研究センター 〒277-8568 柏市柏の葉5-1-5、2 東京大学大学院工学系研究科 〒113-8656 文京区本郷7-3-1  
1. Research into Artifacts, Center for Engineering (RACE), the University of Tokyo 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa 277-8568, Japan  
\* E-mail: ota@race.u-tokyo.ac.jp, 2. School of Engineering, the University of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku 113-8656, Japan

Original manuscript received December 2, 2013, Revisions received May 12, 2014, Accepted July 4, 2014

## 2 人工物工学と他の学問領域との関係、人工物工学の新たな課題

### 2.1 人工物工学の位置付け

本節では、人工物工学に関連する学問領域を概観する。

Simon は「システムの科学」<sup>[2]</sup>において、自然を対象としその解明を試みる自然科学との対比において、人間が作った人工物に関する学問体系構築の試みを行っている。そこでは、人工物を扱う学問体系のカリキュラムを、デザインの評価、代替案の探索、限定合理性等社会をデザインするための拡張、という観点から論じている。市川は、後向け因果性を前提としない科学を人工科学と定義しており<sup>[3]</sup>、その成果が、美しさと有用さにより人間により評価されると述べている。ギボンズらは現代社会における知識生産のモードの変化を探求している<sup>[4]</sup>。そこでは、各々の学問領域の中で内的論理によって生み出される従来型の知識をモード1と呼び(一般的な科学はモード1に対応する)、より社会に開かれたトランスディシプリナリな領域の中で生み出される知識をモード2と呼んでいる。その上でモード1とモード2の関係について論じている。また「総合工学」という学問分野は「旧来の工学には見られなかった工学における横型分野であり、あらゆる工学体系や知識を総動員して設計・製造される人工物に関する分野である」<sup>[5]</sup>と定義されている。その重要性のため、日本学術会議では第20期(2005年)から総合工学委員会がスタートしている。このように人工物工学的な問題意識は、多くの研究者間に共有されており、対象に依存しない横型の学問体系の重要性が認識され続けていることが分かる。

対象に依存しない学問領域の中で人工物工学に関連が深いものとして、「問題解決」が存在する。Smith は広義の問題解決を、問題の同定・定義・構造化等から構成される問題設定と、診断・代替案の生成等から構成される狭義の問題解決の二つに分けて考えている<sup>[6]</sup>。多くの場合、後者は適切なモデル化と最適化法等により適合解を得ることが多い。前者はいくつかの方法が提案されている<sup>[7]</sup>が、まとめてソフトシステムアプローチ<sup>[8]</sup>と呼ばれることが多い。代表的な手法がソフトシステム方法論(Soft Systems Methodology: SSM)<sup>[9]</sup>である。ここでは、accommodation と呼ばれる複数の問題当事者が他を受け入れる状況を目指して、7つのステージからなるモデルが提唱されているものの、定性的な議論が多い。総合的な問題解決のためには、両者のアプローチの融合が不可欠であり、さまざまな試みがなされている(例えば文献[10])が、現在確固たる方法論が確立できていない。

上記の背景を踏まえ、人工物工学研究センターが取り組んでいる人工物工学の位置付けを俯瞰したい。日本学術

会議「新しい学術体系委員会」が2003年に取りまとめた対外報告書では、人工物工学と関連の深い設計科学について以下の議論がなされている<sup>[11][12]</sup>。

「あるべきものの探求」を目的とする知の営みには広い意味での「設計科学」という呼び名がふさわしい。設計科学は目的や価値を正面から取り込んだ新しい科学でなければならない。設計は人間のためのものであるから、設計科学の対象は人工物システムである。新しい学術の体系は、「文」と「理」に共通する「秩序原理」という新しい概念を通して構築される。「物質界」「生物界」「人間界」の3つの階層がそれぞれ「物理学」「生命科学」「人文・社会科学」に対応する。設計科学はそれぞれのドメインに限定された対象を持つわけではなく、上記3つのドメインのどれにもかかわる「人工物システム」を対象とする。設計は不変の法則と可変のプログラムを組み合わせることによって目的を達成し、価値を実現する極めて人間的な行為であり、設計科学はそのための合理的な基盤を与える「人工物システム科学」でもある。

すなわち、人工物工学とは、普遍的な意味の人工物システムを新しく作り出す(設計する)ための学問体系であり、前述した問題解決とは異なり人工物を生み出すことに重点を置いていると言って良い。

### 2.2 人工物工学研究が踏み出してきた領域と新しい課題

人工物工学を扱う人工物工学研究センターがどのような研究を遂げてきたかを以下に述べる。同センターは、当初、設計科学、製造科学、知能科学の3部門の体制でI期(1992年～2002年3月)がスタートした。そこでは、人工物工学の課題分析とその一般化(研究アジェンダの設定)を行い、新たな機能を実現する仮説と発見の論理構築の基礎を築き、人工物工学教育に関するミッションとして脱物質化、脱領域化が抽出された。これらは既存のさまざまな分野を、機能性と普遍性の観点から統一的にとらえ直すことによって、より発展性のある新たな学術分野を構築する理念でもある。ただI期では課題抽出が主な成果であり、現代の邪悪に対処する方法論を構築できたとは言えなかった。そこで、I期の成果の現実問題への適用(創出行為の研究)を目的としてII期(2002年4月～2013年3月)がスタートした。ミッションを実現する上で攻究すべき4つの分野を提案し、それぞれを部門とした。まず、人工物工学における問題や知識表現法としてデジタル価値工学を提唱した。次に脱物質化の方法論として、大量生産・消費ではなくリサイクルやメンテナンスを扱うライフサイクル工学、物質の製造ではなく機能の提供という観点から人工物を論

じるサービス工学、そして個人間の合意形成やそれに伴う社会の構築を扱い、脱領域的な観点から上記のライフサイクル工学とサービス工学を結びつける共創工学を位置づけた<sup>[13][14]</sup>。また、人工物工学にとって重要な概念である価値を扱った価値創成イニシアティブ(住友商事) 寄付研究部門を2005年12月から2010年3月まで継続した。Ⅱ期の成果として、ライフサイクル工学研究部門では、これまで行われてきたライフサイクル工学をモニタリング、メンテナンスまで拡張した学問体系を確立した。サービス工学研究部門では物質的機能のみにとらわれないサービスの設計論とその産業展開を、デジタル価値工学研究部門では知の新たな表現と価値の創出を、そして共創工学研究部門では異分野や多様な行動主体の共創による問題解決の方法論を求めるとともに、3つの研究部門を統合する基盤を築いてきた。寄付研究部門では人間の価値観について扱い、そのモデル化を行った。

Ⅱ期の成果を全体としてとらえると、例えば資源制約や廃棄を考慮した人工物の設計や大規模複雑シミュレーション基盤の技術等、物質界に重心を置いた設計科学を対象とした研究成果を多く出してきたと言える。しかしながら構築した人工物をどのように「多様で変動する人」や「多様で変動する社会」に浸透させるかという観点からの議論はまだまだ不十分であり、課題が残されている状態であった。

### 3 人工物工学の新しい方向性

#### 3.1 新しい方向性の提案

現在、人工物工学研究センターではⅢ期(2013年4月～)がスタートしている。Ⅱ期での成果、限界を踏まえ、Ⅲ期では学問対象を人文・社会科学にまで発展させ、より包括的な人工物システム科学の学問体系の構築を目指す必要があると考えた。そのために、これまでの4部門間の融合を深め、メンバー間の相互作用を促進するという観点ならびに、人工物と人と社会というテーマをインテンシブに扱うため、2部門に再構成した。図1に人工物工学に対する人工物工学研究センターの取り組みの推移を示す。この図は、文献[15]をベースに議論、作成したものである。すなわち、よりミクロな観点から、多様で変動する人への人工物の浸透や相互作用を扱う Human-Artifactology 研究部門(人工物と人との相互作用研究部門)と、よりマクロな観点から、多様で変動する社会への人工物の浸透、相互作用を扱う Socio-Artifactology 研究部門(社会の中の人工物工学研究部門) からなる体制とした。

人工物と人との相互作用研究部門では、さまざまな社会の問題の解決を目指す中で、人と人工物のかかわりについて研究を行う。第Ⅱ期で得られた価値のモデルとサービス工学研究で得られた知見をベースとして、人に関する重要課題である個のモデリング、すなわち人工物の存在により価値観が変動する、ダイナミクスまでも考慮した多様な個のモデリングを目指す。製品サービスシステム設計や人間機械協調システム設計等の具体的な問題を扱う中で、普遍的観点からの人工物と人のかかわり方を明らかにしていく。

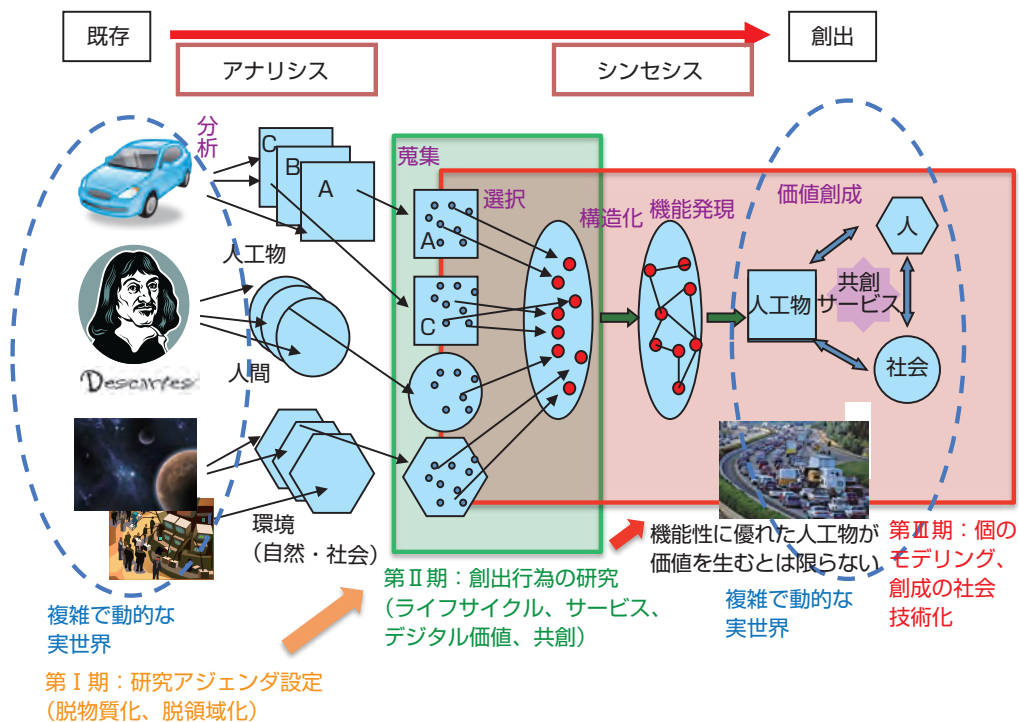


図1 人工物工学に対する東京大学人工物工学研究センターの取り組みの推移

社会の中の人工物工学研究部門は、さまざまな社会の問題の解決を目指す中で、社会と人工物のかかわりについて研究を行う。第Ⅱ期で得られたライフサイクルシステム概念、共創の概念をベースとして、社会に適用する人工物創成の社会技術化を目指して、目的が不明確な問題に対する関係者間の協働による目的確定と解探索とを組み入れた、人工物システムの共創的設計方法論の提案を目指す<sup>[16]</sup>。ここで、社会技術とは「自然科学と人文・社会科学の複数領域の知見を統合して新しい社会システムを構築していくための技術」<sup>[17]</sup>を意味する。分野として多様性を有する総合工学に属する諸問題－例えば複合領域最適設計、地球環境問題を扱う共創技術戦略－を扱う中で、社会と人工物のかかわりに関する共通構造を明らかにしていく。上記二部門の連携により、センター全体の目標を「動的に変動する個のモデリングに基づく人工物創成の社会技術化」と設定し、人工物と個・社会・環境の持続的調和関係の持続的な構築を目指す。

### 3.2 研究の具体的方法論

前節で、今後は、個のモデリング、人工物創成の社会技術化という観点からアプローチすることを述べた。ここでは、その具体的な方法論について述べる。

まず「個のモデリング」について議論する。この問題については、Ⅱ期でも扱ったが個々の相違のモデル化までの成果が主であり、その個の変容具合＝ダイナミクスについてはほとんど扱っていなかった。実社会の問題においては、行為主体が徐々に変容するのが通常なので、この問題は非常に重要である。問題解決のための議論を階層性から始める。モデル化を、対象の複雑さに着目して、人と人工物に対して行う。それぞれをモデルとして記述するとおおまかに図2のようになる。身体部位、部品等の要素があって、人や人工物が構成され、それらが集まって集団となり、最終的に社会を構成する、という意味である。個々の四角は二つ以上の階層から構成されていると考えられる。それ

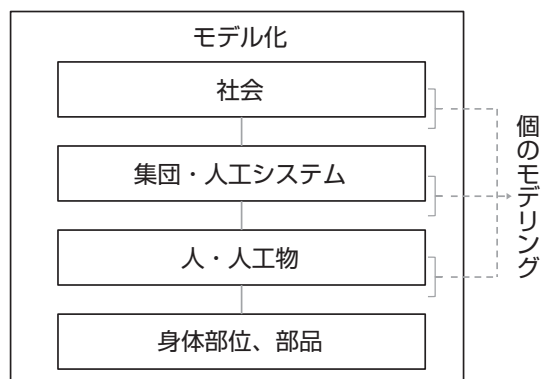


図2 モデル化の全体像と個のモデリング

ぞれの階層でのモデル化は多く行われているが、異なる階層をつなぐモデル化は一般的に非常に困難である。その理由としては、各々のモデルの表現形式が異なるということが挙げられる。また、ある階層のモデルがhomogeneous(均質)の場合に、それに隣接する階層がheterogeneous(不均質)となるという特徴を有しているという議論がある<sup>[18]</sup>。階層構造のモデル化についてはすでにいくつかの手法が提案されている<sup>[19]</sup>ものの、一般的な知見という観点からは改善の余地が残されている。ここでは、単純化のため、ある四角における個はその最下部で表現されると考え、それらが、直下の四角の最上位部における均質要素(おのおの内部状態を有し、その状態量は異なる値をとり得る)間の相互作用という形式でモデル化する。この際、要素の内部状態や相互作用の相違が個の多様性となり、そのダイナミクスが個のダイナミクスとなる。

社会技術についてはすでに多くの研究がなされている(例えば文献[20])が、ここでは問題解決の側面から「社会技術化」という言葉をとらえる。その過程にはさまざまなものが存在するが、通常は、図2で述べた問題のモデル化を行い、導解、製造、評価、保全という段階を踏んで物事が進む(図3(a))。ここで製造とは得られた解を実社会に導入するという意味であり、実体を作ることに限定せず広くとらえている。人工物創成も一つの問題解決過程であり、同様のプロセスを踏むが、ここでは「社会技術化」を目指すということを、それらの前段、すなわち問題設定から考えるというようにとらえる(図3(b))。これは、前述のSmithの広い意味での問題解決に対応する。良く知られていることであるが、人工物を作り出す際には、利害関係等が必ずしも一致しない複数の当事者がいる環境すなわ

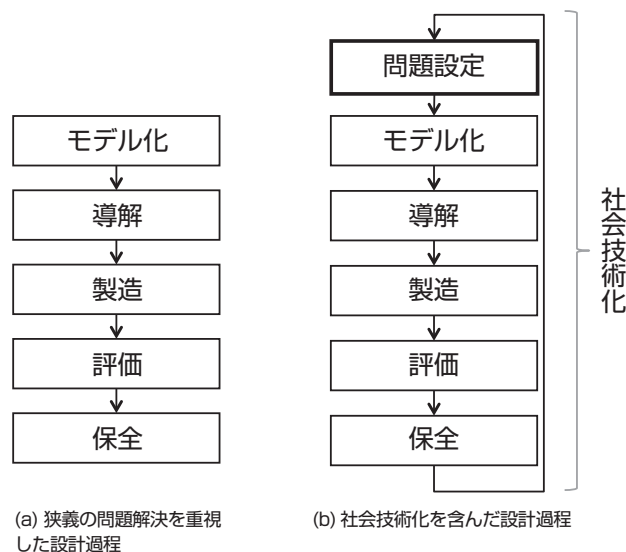


図3 社会技術化を含んだ人工物設計過程

ちマルチステークホルダー環境を想定する必要がある、この構造の問題の定式化ならびに体系化が人工物創成の社会技術化に役立つものと考えている。この問題解決は、上田らが提唱してきたクラスⅢ問題と深い関係がある。上田によれば、人工物システムの設計の問題は大きく3つのクラスに分けられる<sup>[21][23]</sup>。このうち、クラスⅢ問題とは「不完全目的情報問題であり、環境ばかりでなく、目的に関する情報も観測者には予測できず、問題を完全に記述できない<sup>[7]</sup>問題と述べられている。これと前段の議論を踏まえて、我々が再解釈すると、目的や仕様が曖昧な問題を、設計者や受給者が協力して目的と仕様を同時に決定し、問題解決するものである、となる。この問題は非常に取り扱いがやっかいであり、Ⅱ期においてはあまり正面から扱わなかった問題であったが、Ⅲ期ではいくつかの実際の社会の問題を解決する上で、この問題ならび解法の体系化を目指すものである。

これらの問題を含んだシステムの解決シナリオについて述べたい。

(1) まずは、データ分析技術やシミュレーション、計算科学をモデル化の基盤として利用する。当センターのメンバーの多くはこれらの分野の専門家である。ここではそれらに加えて、比較的少数の行動主体から構成されるエージェントの行動原理ならびに相互作用を経済的側面または心理的側面から実験的に導出する実験経済学、実験心理学的手法を組み入れることを考える。

(2) その上で、個のモデリングをする。ここでは個をエージェントとしてとらえ、個の認識過程、認識に基づく個の活動、その活動を生成する基盤となる個の価値形成という3つの側面からのモデル化を行う。上述の相互作用は、各側面に対応するステップで表現され、マルチステークホルダー同士の相互作用、調停が表現できることになる。このようなモデルを階層ごとにつなぎ、社会、人、人工物のモデル化を目指す。

(3) (2) で形成されたモデル化に基づき、問題解決を遂

行する。図4は上述の問題解決のシナリオの全体像を示したものである。図中左部の手法群を用いて動的に変動する個のモデル化を行う。それらは右側に記述されている問題解決プロセス全体に貢献するが、主にモデル化のフェーズで利用される。

ここまででフレームワークの議論ができた。人工物工学の学問体系化という観点からは、さまざまな領域の、個々のアプリケーションを上記のフレームワークに当てはめて記述し、その普遍性を議論する必要がある。問題設定については社会技術学、モデル化については機能学、導解については構成学、製造は製造学、評価は評価学、そして保全は保全学という脱領域型学問体系化を目指す。これは、吉川が提唱する設計型工学カリキュラム<sup>[24]</sup>の枠組みに沿ったものである。

#### 4 研究事例と残された課題

本章では、具体的な研究事例と残された課題を述べる。

##### 4.1 メンバー間の協力による共同研究テーマ設定－製品サービスシステムのモデル化を例として

製品サービスシステムとは、「製品を売るだけでなく、製品とサービスの組み合わせによってユーザーのニーズを満たすもの」である。ここでは、人工物工学研究センターで開発した世界初のサービスCADであるサービスエクスプローラーに、実験経済学的手法に基づいた方法論を組み入れることで、サービスを設計するサービス設計者、運用するサービス実務者、享受するサービス受給者の相互作用のモデルを構築する。ここではまず実験経済学的手法に基づく方法論の一般的な考え方を説明し、製品サービスシステムへの応用について述べた後で、それを当該テーマに適用する方法論について述べる。

##### 4.1.1 実験経済学的手法の製品サービスシステムへの適用

実験経済学では、統制された社会経済システムを図5のような実験室環境に構築し、実際の人間を被験者として、

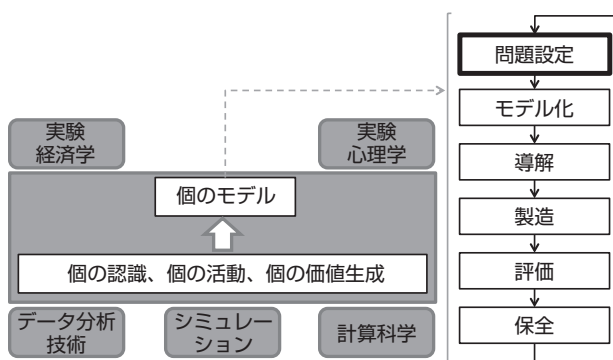


図4 問題解決のためのシナリオ



図5 実際の経済実験室

そこでの振る舞いを観察・分析するものである。特に、価値誘発理論<sup>[25]</sup>に基づき、実験中で得られた得点に応じて報酬（主として国内通貨を用いる）を与えることにより、被験者の選好を統制している点に特徴がある。すなわち、実験者が定める効用関数を被験者に誘発するという一方で、効用さえも統制した仮想的な社会システム内での振る舞いを観察し、各主体効用の変化や全体の社会的余剰を見ることで、価値として明示的に取り扱うことが可能となる。この方法によって、2章で述べた「個の価値生成」過程のモデル化が可能となる。被験者実験の手法自体はこれまでの実験経済学の枠組みと同じであるが、実際の人間の行動として得られた結果から、個の行動主体（エージェント）レベルから価値生成過程のモデルへ展開するところに新しさがある。このためには、実験を行うためのフレームワーク、そこでの行動様式、相互作用等を事前に熟慮し、慎重に計画する必要がある。この点についてはサービスエクスプローラーとの融合によって、初めて遂行可能になる。エージェント単体の時には合理性に基づき活動をするのでモデル化しやすいが、マルチエージェント系の場合には、各エージェントの価値の相互依存関係により、各エージェントがどう行動するかは本質的に難しい問題である。ナッシュ均衡等の静的な均衡状態に関する議論はこれまでも非常に多くの研究がなされているが、それを取り巻く複雑なダイナミクスを含むと、その詳細については十分に分かっているとは言いがたい。特に価値の生成という観点からは、ほとんど良く分かっていない。実験経済学を基軸とする手法は、その部分のモデル化に貢献することができる。

以上のような方法を用いることで、設計された製品サー

ビスシステムが実験室の仮想社会においてどのように機能するかを、実社会に適用する前に経済実験という方法で検証することができる。機能性にすぐれた製品サービスシステムであったとしても、ビジネス環境あるいは消費者の利用局面において、十分な価値を見いだせないことが経済実験によって明らかになれば、製品サービスシステムの構造について再設計するか、あるいは、高い価値を生み出すような社会システムの構造、すなわち制度（メカニズム）としての構造を変化させる必要があることがわかる。このように、新しい人工物設計論への展開が可能となる。

#### 4.1.2 製品サービスシステムのモデル化

製品サービスシステムの設計とは、製品という主たる人工物単体の設計ではなく、製品およびサービスの双方による機能創出とその伝達方法を設計することである。それが故に、人や社会との相互作用までも同時に考慮した総合的なシステム設計が必然的に求められる。そこでは、競合商品や他の消費者等、社会に存在するさまざまな相互作用によって変化する、限定合理的な受給者の購買、利用、および参加行動のメカニズムを包含した個のモデリングが肝要であり、これらに基づいた製品サービスシステムの逐次作成・修正が有効と思われる。

スマートハウスを例にした本共同テーマの構想を図6に示す。スマートハウスは、住宅、電化製品、設備機器という物理的な人工物を中心に構成されるが、エネルギーの需給により表出する利用を介して、生活者のニーズに応じたさまざまなサービス提供の可能性が考えられる事例である。

本構想ではまず、サービスエクスプローラーを用いて、人工物を中心に据えた受給者のモデル化と製品サービスシ

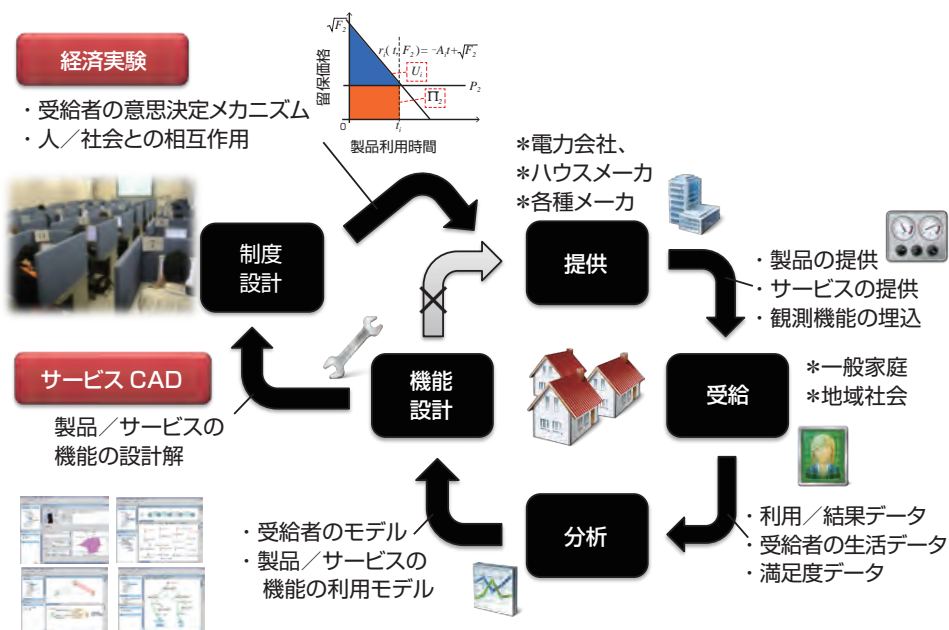


図6 スマートハウスを例にした製品サービスシステム構想

システムの機能設計を行う（図6左下）。その後、前項で述べた経済実験による受給者の意思決定の観察技術を用いて、認識・行動・価値に関する個のモデルを精緻化するとともに、製品サービスシステムを修正・精緻化していく（図6左上）。これは、機能設計にとどまらず、人と社会との相互作用を考慮した制度（メカニズム）設計を実験室にて行うことを意味する。その後は、実際のサービス提供を通じて得られるさまざまなデータをフィードバックとして用いて、より詳細に分析する（図6右下）。この図6の項目を図4の項目と厳密に対応させることは困難であるが、おおまかには以下ようになる。「分析」が問題設定とモデル化に、「機能設計」と「制度設計」が導解に、「提供」が製造に、「受給」が評価と保全に、それぞれ対応する。すなわち、「分析」においてその直前の受給の結果を踏まえて問題設定（社会技術化に相当）しつつ、個のモデリングを行うことを意味する。上記のうち、図6左下についてはⅡ期の成果の利用が可能である。図6左上、図6右下がⅢ期で新たに扱うテーマである。

#### 4.2 関連テーマと残された課題

その他にも以下に示すような共通のテーマ設定を行い、この解決の中で、人工物工学研究センターの目的の達成を目指している。

- CO2 排出、省エネルギーの推進、燃料の安定供給等を考慮した新しいエネルギー政策
- 新しい人材教育システム-産業志向型の社会移行スキルトレーニング
- 震災時の市民の帰宅行動を考慮した水需要予測と応急給水体制のあり方
- 看護学生が多様な患者に対して適切な看護処置を適用できるようにするための看護技術自習支援システム

おのおののテーマは、この論文の最初で述べた環境、貧富（教育は貧富の問題を解決する有効な手段である）、安全、健康という「現代の邪悪なるもの」の典型的なものであり、個のモデリングという人間的な側面と、マルチステークホルダーの存在による人工物創成の社会技術的な側面との両者を包含した典型的な問題と言える。これらの問題の解決はⅢ期の大きな成果となることが期待できる。

残された課題として、最も重要なものは、ある問題に対する解決策を提案できたとして、それをどのようにして他の課題に適用するかという横展開の問題である。換言すれば、脱領域的な知見をどのように蓄積するかという問題である。現状では、各々の問題を解く中で、その解法プロセスを俯瞰的に眺め、できるだけ普遍的な形で記述する、データベース化することが、上記の問題解決の第一歩であると考えている。

## 5 おわりに

本稿は、始めに人工物工学研究の現状と将来構想について述べた。次いで、個のモデリング、人工物創成の社会技術化という観点からアプローチすることで、人工物と個・社会・環境の持続的調和関係の構築を目指すという方針について説明した。実験経済学的手法を組み入れた個のモデリング手法を適用するシナリオについて述べ、製品サービスシステムのモデル化をテーマ例として抽出した。

我が国の限られた人的・物的リソースを戦略的に活用する観点から研究・教育においても選択と集中が求められている。研究者自らが社会連携も含めた実社会における行動・働きかけを積極的に起こすとともに、その中で得られた知見・情報を組織内に場として素早く循環させていく仕組みの促進が肝要である。この際考慮すべき重要なこととして、アウトカム創出の観点からの評価を取り入れた、研究組織や研究者に対する新しい評価体系の導入が不可欠になる。今後は、研究成果の新しい評価の形式について考える必要がある。

## 謝辞

この論文を執筆する上で、さまざまな観点から影響を与えていただいた、東京大学人工物工学研究センターの元メンバー、現メンバー、その他関係者の方々に心より謝意を表す。木村文彦東京大学名誉教授（現法政大学）ならびに東京大学人工物工学研究センター外部評価委員の先生方に御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 吉川弘之: 人工物工学の提唱  
<http://www.race.u-tokyo.ac.jp/open/documents/Yoshikawa.pdf>, Accessed 2013 July 26.
- [2] ハーバート A サイモン著, 稲葉元吉, 吉原英樹訳: システムの科学第3版, パーソナルメディア (1999).
- [3] 市川惇信: 人工科学と技術, 計測と制御, 42 (3), 162-171 (2003).
- [4] マイケル ギボンズ著, 小林信一監訳: 現代社会と知の創造-モード論とは何か, 丸善 (1997).
- [5] 日本学会会議: 総合工学分野の展望, (2010).  
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-h-3-7.pdf>, Accessed 2013 March 15.
- [6] G. F. Smith: Defining managerial problems: a framework for prescriptive theorizing, *Management Science*, 35 (8), 963-981 (1989).
- [7] 常田稔: 経営管理問題の設定・定式化, *早稲田社会科学研究*, 46, 69-95 (1993).
- [8] 木嶋恭一: ソフトシステムアプローチ, *社会・経済システム*, 23, 51-65 (2002).
- [9] P. Checkland and J. Scholes: *Soft Systems Methodology in Action*, John Wiley & Sons Ltd., (1990) [妹尾 堅一郎訳, ソフト・システムズ方法論, 有斐閣 (1994)].
- [10] マイケル・C. ジャクソン, 小林憲正, 高橋真吾, 根来龍之, 吉田武稔: *ホリスティック・クリエイティブ・マネジメント-21世*

紀COEプログラム:エージェントベース社会システム科学の創出 (木嶋恭一, 中條尚子 編著), 丸善 (2007).

- [11] 日本学術会議: 新しい学術の体系---社会のための学術と文理の融合---, (2003).  
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/18pdf/1829.pdf>, Accessed 2013 July 26.
- [12] 日本学術会議: 新しい学術の体系, (2003).  
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-18-t995-60-2.pdf>, Accessed 2013 July 26.
- [13] 馬場靖憲: 人工物工学研究は何ができなかったか: 次期への期待, (2002).  
<http://www.zzz.rcast.u-tokyo.ac.jp/PDF/soukatsu.pdf>, Accessed 2013 Feb 18.
- [14] 福原知宏, 竹中毅, 森下壮一郎, 鈴木正昭, 西野成昭, 藤井信忠, 武田英明: 人工物工学における価値創成研究: 映画を題材として, *The 22nd Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence*, 3B3-10, 1-4 (2008).
- [15] K. Ueda, T. Takenaka and K. Fujita: Toward value co-creation in manufacturing and servicing, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1 (1), 53-58 (2008).
- [16] N. Nishino: Co-creative Value Manufacturing: a methodology for treating interaction and value amongst artefacts and humans in society, *Nanotechnology Perceptions*, 9 (1), 6-15 (2013).
- [17] 社会技術の研究開発の進め方に関する研究会: 社会技術の研究開発の進め方について, (2000).  
<http://www.ristex.jp/aboutus/pdf/his02.pdf>, Accessed 2014 April 26.
- [18] 伊藤正美: 自律分散システムはいかにして構成されるか, *計測と制御*, 29 (10), 877-881 (1990).
- [19] 阪口秀, 草野完也, 末次大輔編: *階層構造の科学*, 東京大学出版会 (2008).
- [20] 吉川弘之: インタビュー「科学と社会技術の未来」, *社会技術研究論文集*, 1, i-viii (2003).
- [21] 上田完次: *人工物環境の生命論パラダイム, 技術知の射程*, 吉川弘之監修, 田浦俊春, 小山照夫, 伊藤公俊編, 東京大学出版会, 129-149 (1997).
- [22] 上田完次他: *創発的シンセシスの方法論, 未来開拓プロジェクト成果報告書* (2001).
- [23] K. Ueda, A. Markus, L. Monostori, H.J.J. Kals and T. Arai: Emergent synthesis methodologies for manufacturing, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 50 (2), 535-551 (2001).
- [24] 日本工学アカデミー-EAJ NEWS: 第174回談話サロン「設計型工学のカリキュラム」, (2012).  
<http://www.eaj.or.jp/eajnews/news147/01.html>, Accessed 2013 July 26.
- [25] V.L. Smith: Experimental economics—induced value theory, *American Economic Review*, 66 (2), 274-279 (1976).

#### 執筆者略歴

太田 順 (おおた じゅん)

1989年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年新日本製鐵(株)入社。91年東京大学工学部助手。94年同講師。96年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻助教授。2009年6月東京大学人工物工学研究センター教授。この間96-97年Stanford University Center for Design Research 客員研究員、マルチエージェントロボット、大規模生産/搬送システム設計と支援、移動知、人の解析と人へのサービスの研究に従事。この論文の総括、全体構成、具体的内容の構成に貢献した。



西野 成昭 (にし の なりあき)

1999年神戸大学工学部卒業。2001年同大学大学院自然科学研究科博士前期課程修了。2004年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士(工学)。同年より東京大学人工物工学研究センター研究員。同センター助手、助教を経て、2009年11月より同大学大学院工学系研究科准教授。実験経済学やマルチエージェントの手法をもとに社会システムに関する研究に従事。人工知能学会、情報処理学会、日本経営工学会、サービス学会、システム制御情報学会、日本LCA学会、ESA、CIRP、INFORMS等の会員。この論文の、社会技術に関する方法論、具体的テーマの説明に貢献した。



原 辰徳 (はら たつり)

2004年東京大学工学部システム創成学科卒業。2009年同大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程修了。博士(工学)。同専攻助教を経て、2013年3月より東京大学人工物工学研究センター准教授。サービス工学、製品サービスシステム、観光サービス等の研究に従事。2009年東京大学学生表彰工学系研究科長賞(博士)を受賞。精密工学会、日本機械学会、情報処理学会、サービス学会、観光情報学会、各会員。CIRP Research Affiliate。この論文の、個のモデリングに関する方法論、具体的テーマの説明に貢献した。



藤田 豊久 (ふじた とよひさ)

1995年秋田大学教授。2003年より東京大学教授。2012年からは東京大学人工物工学研究センター長、環境資源工学会会長(2005~2009年)。専門は資源処理工学、環境浄化、機能性流体。受賞約20件、特許約60件、発表論文等約300件。この論文の全体的な概念構成ならび方向性に関する議論の主導に寄与した。



#### 査読者との議論

##### 議論1 全体について

コメント(持丸 正明:産業技術総合研究所サービス工学研究センター)  
 人工物工学の体系を確立し、展開していく方向性と方法論について、その中核である東京大学人工物工学研究センターでの議論を中心に研究フレームワークを提案し、さらに、そのフレームワークに基づく研究活動事例を示した論文であると理解しました。人工物工学と Synthesiology は同根であり、人工物工学の目的とするところは、Synthesiology 誌のスコープと合致しています。それゆえ、この論文で提案されている研究フレームワークの議論は、本誌の読者にとっても有益なものだと考えています。

しかし、現在の章立てでは、「人工物工学の新課題とそれに対応する研究フレームワーク」の論文ではなく「東京大学人工物工学研究センターの第3期の紹介」であるかのように感じられます。「人工物工学の研究体系」を形成することが、この論文の向かうべき最終目標ですので、それに対する論理展開にしたらいかがでしょう。

回答(太田 順:東京大学)

貴重なコメントありがとうございます。東京大学人工物工学研究センターより人工物工学の進展と言う観点から記述すべきというのは、そのとおりだと思います。おっしゃるとおりの構成に変更しました。



## 議論2 II期とIII期との関係について

質問（赤松 幹之：産業技術総合研究所ヒューマンライフテクノロジー研究部門）

III期において設置した Socio-Artifactology と Human-Artifactology と二つの部門についての説明がありますが、いずれも「II期での活動をベースに」と書かれているだけで、II期とIII期との関係が明確に書かれていません。マルチステークホルダーの問題や不完全情報での解探索の問題がライフサイクル工学と共創工学ではなぜ扱えなかったのか、それともライフサイクル工学と共創工学を進める中でこの問題が大きく浮上して来たのか、など取り組みが必要であると判断した仮説形成のプロセスを書きいただきたいと思います。

回答（太田 順）

II期では、物理学ベースの設計科学を対象とした研究成果を多く出してきました。III期では学問対象を人文・社会科学にまで発展させ人間社会までも含んだものを対象と考えています。そのような背景の元、社会技術化の問題を、上田完次先生が提唱したクラスⅢの問題と関連付けて議論しています。これはII期においてはあまり正面から扱わなかった問題でしたが、III期ではいくつかの実際の社会の問題を解決するというミッションであり非常に重要であるため、この問題ならび解決法の体系化を目指すものです。II期の成果とIII期の成果の関係が不明瞭であったため、各々の記述を、より違いが明確になるように書き換えました。例えばII期の寄付研究部門の成果を人間の価値観とする等、記述の変更をしました。またII期の成果のサマリーに具体的な内容（資源制約や廃棄を考慮した人工物の設計や大規模複雑シミュレーション基盤の技術）を書き加えました。

個のモデリングについては、II期でも扱いましたが個々の相違のモデル化までの成果が主であり、その個の変容具合＝ダイナミクスについてはほとんど扱っていなかったためそれをIII期で扱うことを考えています。そのような内容をこの論文に書き加えました。

## 議論3 個のモデリングについて

コメント（赤松 幹之）

個のモデリングについての記述がありますが、これだけですと個のモデリングが何なのか読み取ることはできませんでした。また、実験経済学的アプローチが事例として挙げられており、これは個のモデリングを行うための実験方法として採用したものと推察しますが、個のモデリングをするために必要な要件が何であって、それを満たすようにどのような機能を実験システムで実現できるようにしたのか、などの仮説構成が書かれていると、センターのミッションを達成するための具体的なアプローチとして、その意義を読者が理解できると思います。

コメント（持丸 正明）

「個のモデリング」は、第III期の研究アプローチにおける重要な用語です。ただ、査読者には、この「個のモデリング」を明快に理解す

ることができませんでした。

回答（太田 順）

個のモデリングに関して、まず階層構造についての記述を変更しました。単純化のため、ある四角における個はその最下部で表現されると考え、それらが、直下の四角の最上位部における均質要素（おのおの内部状態を有し、その状態量は異なる値をとり得る）間の相互作用という形式でモデル化しました。この際、要素の内部状態や相互作用の相違が個の多様性となり、そのダイナミクスが個のダイナミクスとなります。その上で、個をエージェントとして捉え、個の認識過程、認識に基づく個の活動、その活動を生成する基盤となる個の価値形成という3つの側面からのモデル化を行う、と考えました。上述の相互作用は、主に個の認識過程、個の活動というステップで表現され、マルチステークホルダー同士の相互作用、調停が表現できることとなります。そのような記述を加えました。これが個のモデリングです。

実験経済学的アプローチについては、エージェント単体の時には合理性に基づき活動をするのでモデル化しやすいですが、マルチエージェント系の場合には、各エージェントの価値の相対関係により、各エージェントがどう活動するかがよくわかっていません。実験経済学的手法は、その部分のモデル構築に貢献するものです。実験経済学によって、実験者が定める効用関数を被験者に誘発するということであり、効用さえも統制した仮想的な社会システム内での振る舞いを観察し、各主体効用の変化や全体の社会的余剰を見ることで、価値として明示的に取り扱うことが可能となります。この方法によって、2章で述べた「個の価値生成」過程のモデル化が可能となると考えます。そのような記述をこの論文に加えました。

## 議論4 社会技術化について

コメント（赤松 幹之）

III期での取り組みが実験経済学的研究の説明が中心になっているために、社会技術化に関する研究のアプローチが具体的に主張されていないように思われます。これから行われる研究ですので、フレームワーク通りに奇麗に整理はできないとは思いますが、読者に主張を理解してもらうためには、論文全体の論理構成がある程度整合されていることが望まれます。

回答（太田 順）

おっしゃるとおり、社会技術化に関する議論が少なかったため、それに関する記述を加えました。マルチステークホルダー環境自体が社会技術化との関わりが強いと考えられます。図4と図6の対応関係を記述しました。「分析」が問題設定とモデル化に、「機能設計」と「制度設計」が導解に、「提供」が製造に、「受給」が評価と保全に、それぞれ対応します。「分析」においてその直前の受給の結果を踏まえて問題設定（社会技術化に相当）しつつ、個のモデリングを行うことを意味します。