

招待論文

構成的情報学の方法論からみたイノベーション

中島 秀之^{†1} 諏訪 正樹^{†2} 藤井 晴行^{†3}

デザインとは、対象とするシステムにおける認識レベルの異なる層の間に縦の因果を作り出す行為であると定義する。因果関係というのは認知的関係であり物理的実体ではない。また、そこには機械論的なメカニズムは存在しない。そのような前提でイノベーションを考えると、生成・評価・方向性の絞り込みという3つの行為のループが必要ということが分かる。これらのうち、特に方向性の絞り込みがイノベーションの核心部分である。これらの定式化を行い、進化論的方法論のみが有効であることを主張する。

Innovation in the Framework of Methodology for Constructive Informatics

HIDEYUKI NAKASHIMA,^{†1} MASAKI SUWA^{†2}
and HARUYUKI FUJII^{†3}

We define design as a process to create new vertical causal relations between two or more cognitively different layers of the subject system. A causal relationship is not a physical reality but a cognitive one and there is no predetermined mechanical system behind it. When we examine an innovation process under the above perspective, we can see that it consists of three phases: generation, evaluation and focusing. Focusing attention to promising candidates or properties in preparation for the next generation is the most essential part of innovation. We formalize those three phases and claim that the evolutionary methodology is the only effective one for innovation.

1. はじめに

本稿の目的を先に述べてしまいたい。厳密な定義は次章以降に行う。

イノベーションを起こすための一般論あるいは一般的手法というものが追求されている。しかしながら、これは革新的な芸術（絵画や音楽など）を創り出すための一般的手法が存在しないのと同様に、一般化は不可能であると考えている。優れた音楽家が音楽院で育つのは、音楽院がイノベーションの手法を教え込んだからではなく、先天的にセンスのある人材にイメージを実現するための技術と知識を与えたからである、このようなわけで、個々のイノベーションプロセスを一般化し、次のイノベーションにも同じ方法を使うということはいえないと考えている。

本稿では構成的情報学の方法論をベースにイノベーションのプロセスについて考察する。本稿の主張は情報処理の研究方法論を基盤とはしているが、情報処理だけでなく、新しい現象や仕組みを構成する方法論を必要とするすべての分野に適用可能であると考えている。芸術の分野の定式化にまで踏み込めるかどうかは検証していないが（ただし、わかりやすいと思うので例には使っている）、おそらく本質的には同じはずである。

具体的にいえば、特定の要求仕様に対してそれを満たす、その時点で知られている設計・構築手法を超えた手法を発見するための系統的な手続き（アルゴリズム）は存在しない。存在するのは現存のシステムに関するパラメータを改善する（探索でいえば「山登り法」が適用できる範囲の）手法のみである。たとえば、ロータリーエンジンを発明したのはイノベーションに相当するが、ロータリーエンジンの燃費改善はここでいう山登り法の範囲であるからイノベーションではない。

イノベーションは3つのフェーズ（の繰返し）で起こると考えている。(1) 生成・(2) 評価・(3) 方向性の絞り込みの3つである。(2) 評価には主として知識、(3) 方向性の絞り込みには主としてセンスが重要である。また、(1) 生成がコンピュータサポートに最も適した活動、イノベーションには(3) が最も重要であるというのが、本稿の主張の一部である。このことを裏付けるには、我々が検討している構成的情報学の方法論が助けになると考えて

†1 公立はこだて未来大学

Future University - Hakodate

†2 中京大学情報理工学部情報知能学科

School of Information Science and Technology, Chukyo University

†3 東京工業大学大学院理工学研究科

Graduate school of Information Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

いる。

2. デザインという行為

「イノベーション」というのは新しい、従来存在しなかった仕組みを創り出す行為（プロセス）である。この仕組みというのは、とある機構が存在して、その動作が特定の望ましい性質を有している様子をいう。たとえば、トランジスタやコンデンサというものを特定のパターンで組み合わせて構成した機構（A）が、電波を受信し、選択し、増幅して音波に変えるという性質（B）を持つときにラジオが創出されたことになる。ただし、これは1回限りの現象ではなく、一定の法則に則って構成すれば、（多くの場合に）望ましい性質を持ってくれるものでなければならない。この新しい機構（A）と性質（B）の間の法則を我々は縦の因果関係⁷⁾と呼んでいる。これを見出す（あるいは作り出す）ことがデザインである。

自然科学の探求する因果関係が同一の記述レベル内の関係であるのに対し、デザインで求める関係は記述レベルの異なる層の間に成立するものであり、これが縦の因果関係である。通常の因果関係は分析的に解明されるが、縦の因果関係は構成的に見出される。なお、「機構」から「特定の望ましい性質」が現れるときに、それがあらかじめ設計されていない場合に「創発」と呼ばれることがある。縦の因果関係を創発させることがイノベーションであるといういい方もできる。

「デザイン」という用語は多義に使われている。本稿ではデザインを、これまでになかった仕組みを構成する行為としてとらえ、その行為に含まれるイノベーション的要素について考察する。デザインの対象は形（意匠）を有する「モノ」には限らず、新しい社会の仕組みや、ソフトウェア⁴⁾やアルゴリズムなどの「コト」であってもよい。

デザインのプロセスは、存在しないものを新たに創り出す構成的プロセスである。ここで問題にする「構成的プロセス」は、すでに存在するものを理解しようとする「分析のプロセス」とは異なる。一般的には、構成を部分から全体へ、そして分析を全体から部分へ向かうものとしてとらえ、両者は方向が逆のプロセスであると考えられているが、そうではないことを主張したい。我々は分析的なプロセスを包含する構成的プロセスを提案する。

分析的科学（代表例は自然科学）の方法論とは、事象の観測や実験から一般的法則を導くことである。具体的には、事象^{*1}の集合から帰納法により仮説を構成し、その仮説から演繹される事象を実験によって確認するというループを繰り返すことになる。

*1 自然発生する事象と、実験で作り返す事象の両方が含まれる。

構成的プロセスも、構成とその評価という意味では、分析と類似のループを繰り返すものになるが、イノベーションと呼ばれるような新規のものが構成された場合にはその評価には自明の基準が存在しないことが多い。その場合、新しい事象を理解するための分析的手法と同等のものが評価のために必要となる。すなわち、構成的手法はその一部である評価の部分に分析のループを含むものとなる。したがって、構成と分析は方向が逆なのではなく、前者が後者を包含するプロセスである。具体的には4章で述べる。

3. ノエシスとノエマ

前章で、デザインという行為は概念（性質）の層と実体（機構）の層の間の縦の因果関係を作り出すことであると規定した。この関係をより詳細に見るために、ノエシスとノエマとしてのとらえ方を導入する。

木村¹⁾は音楽を例として生命の根拠との関わりとしての主体と、世界との関わりとしての主体の「あいだ」の関係を考察している。彼のいう2つの主体概念の関係は、本稿で問題としている主体に関する2つの異なる層における説明的切り口であると考えられることができる。

木村によれば音楽の演奏においては以下の3つの契機が並行的に存在している。

第1の契機：瞬間瞬間の現在において次々に音楽を創り出してゆく行為 [ノエシスの側面]。ノエシスは具体的な行為の層であり、下位の層となる。

第2の契機：自分の演奏している音楽を聞くという作業 [現在ノエマ的側面]。ノエマは構成される音楽という、ノエシスの1つ上の層である。音楽を現在形として認識している。

第3の契機：これから演奏する音や休止を先取的に予期することによって、現在演奏中の音楽に一定の方向を与えるという作業 [未来ノエマ的側面]。これも音楽という層であるが、未来の部分の計画あるいは予測が入る。

ノエマ層は認知的実体が構成する世界である。私たちの行為は、意識のうえでは認知的実体への働きかけであるが、同時にノエシス層を構成する実体にも作用する。行為をなすということは世界を知ることである。行為の結果としてノエシス層のありようが変化し、その帰結としてノエマ層のありようが変わる。

デザインという行為は多層のシステムからなり、上述のような「機構層（下層）- 発現層（上層）」という縦関係が見出せるような2層が、階層構造の様々な位置に存在する。

4. FNS ダイアグラム

構成のループを図1に従って精緻化しよう。

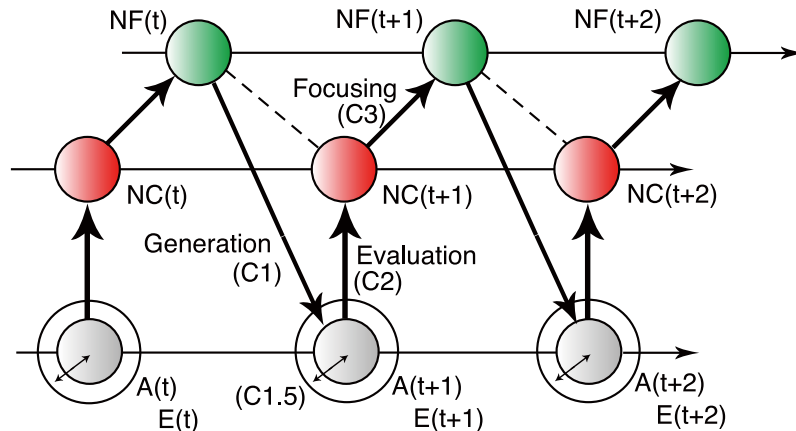


図1 FNS ダイアグラム
Fig. 1 FNS diagram.

- (C1) 木村のいう第1の契機．現在構成したい目標の記述である「未来ノエマ」NF(t) から下層での行為（ノエシス）A(t+1)が発生する．
訓練と技術を要するプロセスでもある．高度の専門的技量が最も必要とされる．望む機械を設計・製作する作業，描きたい絵を実際に描く作業，楽器を奏でる作業，運動のパフォーマンスなどがこれに該当する．
- (C1.5) 発生した行為 A(t+1) は環境 E(t+1) とのインタラクションを通じて様々な現象（これもノエシス）を引き起こす．
建築物や工業製品が実際に使われる場面，あるいは構築したシステムの実証実験などがこれに相当する．陶芸，なかでも萩焼きなどの場合は釜の中の微妙な温度分布や炎の回り具合など，偶然的要素が比較的大きい．
- (C2) 木村のいう第2の契機．発生した現象（ノエシス）を認知/評価したものが上層の現在ノエマ NC(t+1) となる．
ノエシスが環境と複雑なインタラクションを起こすがゆえに，そのインタラクションから適切な部分のみを認識したり，新しい変数や規則を発見したりする行為がこれに相当する．これは必ずしも簡単なことではない．たとえば，アイデア考案中に自分の描いたデザインスケッチの中に新たな側面を見出すことがこれに相当するが，熟練デザイナーだけができることである³⁾．

しかし，C2はC1に比べて，専門知識や熟達を必要とする要素が少ない．C1は専門的知識や技術を要するが，C2が研究成果の理解や芸術鑑賞に相当するプロセスとなる場合には一般人にも実行可能である場合がある．

従来の科学的分析プロセスもこの部分に相当する．その場合はC2がフラクタル的に仮説生成と実証という分析のループを内包することになる．

- (C3) 木村のいう第3の契機．生成された現象の認識から新しい構想 NF(t+1) へと移る行為．

木村が述べる演奏の例では，現在ノエマとして各演奏者が聴いている音の延長線上で次に弾くべき音を楽譜に従って想定する行為はこれに相当する．楽譜の存在は未来を絞り込む知識として働く．しかし，C3における最も重要な絞り込みは，まだ産み出されていない未来ノエマを想起（創造）する行為で，時折セレンディピティとも呼ばれている．非常に難しい行為であり，1章で絞り込みには主にセンスが必要であると書いたゆえんである．

芸術の例を続けると，これは芸術家の側にのみ可能な領域である．現在ノエマから未来ノエマを生み出すためには芸術的センスが必要である．

本稿の主題であるイノベーションは，広義にはC1からC3を回すプロセスにあるが，狭義にはこのC3の部分であると考えている．

ノエマの層とノエシスの層の間には縦の因果関係⁷⁾が存在する．これを認識するのがC2であり，これを使って現象を生成するのがC1である．

なお，上記のプロセスの粒度や各層を回る速度には様々なものがある．木村の例示した演奏においてはこれらは非常に速いループを描くが，作曲や作画においてはもう少し遅いものになるうし，建築物のデザインや新しい車の設計ではさらに時定数の大きなループとなる．

さらに，上記C2の記述でも触れたように，各々のプロセスをより詳細に見るとフラクタル的に下位層のループが見えてくることになるが，このあたりの詳細化は今後の研究を待ちたい．

なお，従来から提案されている様々な構成プロセスをFNSダイアグラムにマップすることができる．それによって様々なプロセスの共通基盤の理解が深まると考えているが，それは他稿に譲りたい．以下様々な例示にとどめる．

身体知（運動）のコーチングにおいて，コーチが選手の欠点を発見することはC2の例である．自分では実践できなくても選手の欠点を見る「眼」を有するコーチはいる．囲碁や将棋でも，プロのように新しい手筋を思い付くこと（C3）はできなくても，学習を重ねること

によりプロの打つ手を観賞すること (C2) ができるようにはできる。なお、定石というのは C1 を定式化したものであると考えている。

ポラニーは科学的発見について、2 層のモデルを提唱している⁶⁾ (「発見は 2 段階で行われる」 pp.19-21)。彼は未来ノエマの創造 (C3) に相当する行為を「想像」、ノエシスの認知 (C2) に相当する行為を「直観」と呼び、直観は訓練できるが想像力はそうではないとしている。

従来より、Plan-Do-See (仮説生成—実験—検証) のサイクルが提唱されているが、これは C1-C1.5-C2 がサイクルをなすことに相当する。Plan-Do-See のサイクルは比較的固定した目標 (たとえば、ある評価指標の値の改善) に向けてのサイクルであり、未来ノエマの逐次的な推移という概念はない。そのため、C3 については陽に述べられることが少なかった。我々は、C3こそがイノベーションの場であると考えている。

ただし、実社会では目標の変更は起こっている。C3 を陽に扱う例として、携帯電話の発展の実例をマップしてみよう。

(C3₀) 電話を持ち運べるようにしようという未来ノエマを持つ。

(C1₀) 通信手法としてセル方式の採用などの技術的革新。

(C1.5₀) 固定電話から携帯電話への移行が起こる。

(C2₀) 固定電話から携帯電話への移行のトレンドを認識する。

(C3₁) 携帯電話会社は通話料の増大を狙い、カメラ付き携帯を考案 (想定はカメラで撮影した画像の送信による通信量の拡大)。

(C1₁) カメラ付き電話の実装。

(C1.5₁) 電話をつねに持ち歩く人が多くなるが、映像は記録に使う (想定とのズレ)。

(C2₁) 「携帯電話」から「携帯」へ。

(C3₂) オサイフ携帯の着想。

...

5. 進化とイノベーション

以下ではイノベーションの核心である C3 に焦点を絞る。そして C3 の方法論としては進化論的なものしかないことを主張する。

現代の進化論には様々な論争があるが、最も基本的な部分、すなわち生物の進化は変異の生成と、生成された個体の選択の繰返しである、という点では一致をみていると考える。

イノベーションのプロセス C3 も基本的には上記の意味で進化プロセスと同じであると考

える。すなわち、数ある可能性の中から将来に向けての方向性を絞り込むのに機械的手順は存在しない。1 つには対象システムの仕組みが完全には理解されていないために、そのような機械の手順が構成できないという理由があるが、より重要なのはプロセス C1.5 という環境とのインタラクションの存在である。これはオープンなインタラクションであるから、予測できない要素が存在する。そのため、絞り込みが必ずしも狙った方向に働くとは限らない^{*1}のである。

しかし注意しておかなければならないことは、生物の進化は結果論であるという点にある。進化プロセスが方向性を持っているわけではない。たとえば「環境の変動が進化を加速する」といういい方は本末転倒である。環境が変動するということは選択の基準が変わったということであり、その結果として選択される個体が変わるわけである。環境が一定のうちは進化も「山登り」を繰り返すことが多いはずである。たとえば海という環境が変わらない限り魚のヒレの形がどんどん最適値に近づくだけであり、足に変わることはない^{*2}。

この点だけは、我々が考えるイノベーションとは本質的に異なる。イノベーションは結果論ではなく、方向性や意図を持っているのである。つまり、環境もシステムの一部を構成することになる。したがって「山登り」できる範囲ではそれを積極的に行う。ここにはたとえば航空機設計法といった工学の分野が成立する。

厳密にいえば進化にはノエマ的側面が存在しない。したがって本稿で扱っているような認知的 2 層システム (図 2) ではなく、物理的な 2 層 (発現形 (phenotype) の層と表現形 (genotype) の層) のシステム (図 3) である。特に未来ノエマが存在しないから、その結果として C3 に相当する、ノエマ層内での意図的絞り込みのフェーズが存在せず (これが、進化は方向性を持たないとしている理由)、表現形の突然変異による組み換えがあるだけである。

一方で、C3 という単一層内でのプロセスを進化論的な単一層内のプロセスとして見ることは可能であるし、有意義である。つまり、C3 は単純な矢印で表せるようなプロセスではない。その中に進化のようなループを内包する複雑なプロセスである (実は同じ意味で C2 は分析的ループを内包するものである²⁾)。

*1 これは複雑系一般に通用することである。

*2 生物進化というものが、その環境に最適化するという方向性を持っているわけでもない。少々不便であっても生き残ればよいのである。たとえ海の環境が一定であっても、足を持って陸に上がるものが皆無なわけではない。このような周辺の性質を持ったものが、環境の変動とともに中心に、結果的に移動することがあり、そこから山登り進化が始まることもある。

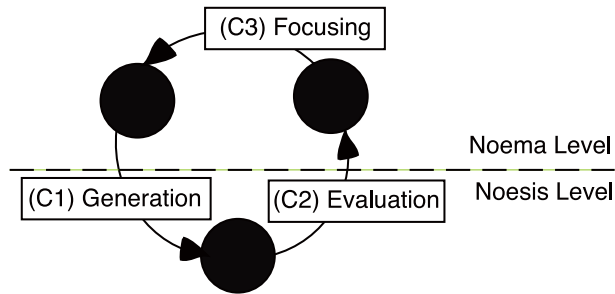


図2 構成的プロセスの全体
Fig. 2 Entire constructive process.

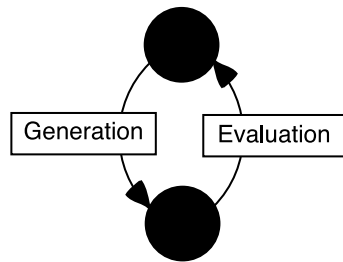


図3 進化的プロセス
Fig. 3 Evolution process.

C3の方法論として進化論的なものしかないという主張の要点は、新たな良い概念のみを生成する機械的な方法論が存在しないということである。様々な可能性を、ほぼ風潰し的に考えて行かなければならない。ただし、このプロセスは慣れた人の場合は意識下で行われるため、本人は意識していないことが多い。

金出⁸⁾は研究方略として、発想は素人のように自由に、研究実施は玄人として方法論に則ったものが良いと述べている。これは進化システムにおける変異の生成はできる限り自由に行うのが良く、逆に選択は厳密かつ効率的に行うべきと理解できる。山登りの部分も後者に含まれる。FNSダイアグラムにおいてこの両者はC3のプロセスに内在するループであると考えることができる。大胆な未来ノエマを作り、選択するという暗黙のプロセスである。イノベーションには進化的プロセスしかないという主張を証明することは困難であるが、

傍証なら囲碁や将棋の歴史に求めることが可能である。囲碁や将棋では長い間の研究によってある程度の全体と部分の関係が解明されており、それが定石という形で残されている。この定石は分析的科学における法則に対応するものである。法則と異なるのは大域的整合性を保証しない^{*1}点にある。盤面にある特定の性質を持たせたい場合、それが実現可能な場面と、それを実現するための石や駒の配置がパターン化されて蓄積されているのである。しかし、盤面の他の部分の状況によっては定石が使えない場合もある。また、そのような定石が存在しない場合の手法、あるいは、定石そのものの生成に使われた手法は「生成と評価のループ」である。つまり、これらのゲームのような、人間の知能と比較して非常に単純なシステムで、しかも千年以上の研究が施されたシステムにおいてすら生成と評価のループ以上の方法論が見つからないのである。

傍証は他にもある。記号の処理はすべからくこのようなループを含んでいる。論理推論ですら探索を要する。使うべき規則の数が有限である演繹系のPrologの実行もバックトラックをとまなう探索である。帰納推論となればその探索範囲の限定すら困難になるが、候補の探索が基本である。

連続値を扱う場合には別の手法が存在する場合がある。一定の範囲の線形方程式を解くには探索を含まないアルゴリズムが存在する。探索の場合でも最急降下法などのアルゴリズムが有効な範囲もある。統計量が使える場面も多い。しかしながら、このような幸運に恵まれるのはAI問題のごく一部にすぎない。残りの部分では生成と評価のループが唯一の手法になるのではないか。

6. イノベーションにおけるコンピュータの役割

狭義のイノベーションプロセスとは本質的には生成と評価の繰返しであると述べた。このうち、生成はどちらかといえばコンピュータが得意とし、評価は圧倒的に人間が得意とする。人間には乱数を作り出す能力はないとされている。なんらかの偏りが出るのだ。それに対しコンピュータプログラムはかなり質の高い(真の乱数に近い)疑似乱数を発生させることができる。また、すべての場合をきれなく数え上げるといったこともコンピュータは得意であるが、人間には難しい作業であろう。

ガリバー旅行記⁵⁾の飛ぶ島(ラピュータ)の部(pp.184-185)には以下のような文章創

*1 物理学における法則ですら、すべての場面で適応可能な統一理論はいまだに発見されておらず、ある意味では完全な無矛盾世界観には到達できていない。

作機械が登場する。

縦横二十フィートのわくの表面には、さいころくらいの大きさの木片がいくつもならび、すべて、ほそい針金でつながれている。そして木片のどの面にも、この国のあらゆる単語が、でたらめに書かれていた。

教授の命令で、弟子たちが、わくのまわりについている四十のハンドルをまわすと、単語のならびがすっかりかわった。それを三十六人の弟子が読みあげ、うまく文章になっている部分を、四人の弟子が書きとめる。こうして、いずれは、完全な百科全書をつくるつもりである、というのが教授の話だった。

これは生成が得意な機械に生成をさせ、評価の得意な人間が評価するという共同作業の典型的な例である。

7. 結 論

イノベーションプロセスとは生成・評価の繰返しにすぎない。ただし生成されたシステムが環境とのインタラクション (C1.5) により予期せぬものを生み出すことがある。これが結果的に成功すればイノベーションと呼ばれるのであるが、同時にこの存在が機械的なイノベーション方法論の存在を拒んでいる。

人間の生成能力はそれほど向上しない。訓練が効くのは評価の方である。一方、機械は生成が得意である。認知的裏づけとしては、コンピュータプログラムでは乱数に限りなく近いものは作り出せるが、人間に乱数を生成させる望みは薄いということがあげられる。生成を機械化し、評価を人間が行えるシステムが良いと考えている。もちろん、この生成と評価は独立ではなく本稿中で述べたように縦の因果関係にある。それをうまく考慮した生成システムを作るのが良いと考えている。

参 考 文 献

- 1) 木村 敏：あいだ，弘文堂 (1988).
- 2) 中島秀之：構成的情報学と AI，人工知能学会論文誌，Vol.21, No.6, pp.502-513 (2001).
- 3) Suwa, M., Gero, J. and Purcell, T.: Unexpected discoveries and S-invention of design requirements: Important vehicles for a design process, *Design Studies*, Vol.21, pp.539-567 (2000).
- 4) Winograd, T.: *Bringing Design to Software*, ACM Press (1996).
- 5) ジョナサン・スウィフト：ガリバー旅行記，講談社青い鳥文庫 (1992).
- 6) マイケル・ポラニー：創造的想像力 (増補版)，ハーベスト社 (2007).

7) 中島秀之，諏訪正樹，藤井晴行：縦の因果関係，日本認知科学会第 24 回大会予稿集，pp.42-47 (2007).

8) 金出武雄：素人のように考え玄人として実行する—問題解決のメタ技術，PHP 研究所 (2003).

(平成 20 年 1 月 8 日受付)

(平成 20 年 2 月 7 日採録)



中島 秀之 (正会員)

1952 年兵庫県生まれ。1977 年東京大学工学部計数工学科卒業。1983 年同大学院工学系研究科情報工学専門課程修了 (工学博士)。同年電子技術総合研究所入所。2001 年産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センター長。2004 年公立ほこだて未来大学学長。編著書に『知的エージェントのための集合と論理』(共立出版)，『思考』(岩波講座認知科学 8)，『Prolog』(産業図書)等。



諏訪 正樹 (正会員)

1962 年大阪生まれ。1984 年東京大学工学部卒業。1989 年同大学院工学系研究科博士課程修了 (工学博士)。同年 (株) 日立製作所基礎研究所入社，推論学習の研究に従事。1994~1996 年スタンフォード大学 CSLI 研究所にて客員研究員。1997 年オーストラリアシドニー大学建築デザイン学科主任研究員。2000 年より中京大学情報科学部助教授。2004 年より同教授。2006 年より同大学情報理工学部教授。高次認知，特に身体知の学習，感性の開拓，創造プロセスの認知分析の研究に従事。



藤井 晴行 (正会員)

東京生まれ。早稲田大学工学部建築学科卒業，同大学院理工学研究科建築学専攻博士前期課程修了。カーネギーメロン大学大学院人文社会科学研究科哲学専攻修士課程修了。理学修士（計算言語学），博士（工学）。清水建設技術研究所特別研究プロジェクトグループ，同基礎研究室などを経て，現在，東京工業大学大学院理工学研究科助教授・建築学専攻。シドニー大学建築学部デザイン・コンピューティング・認知研究センター客員研究員。研究および先端芸術表現を通じて行為としてのデザインの研究に取り組んでいる。
