

人工物の科学方法論—その範囲と認識論的基盤—

出口弘 (Hiroshi Deguchi)

東京工業大学

要旨 本発表では、人工物の科学方法論が社会科学を含む広範囲の領域で必須の科学論となることを示す。それが従来の社会科学の方法論の議論を受けつつ、工学等の人工物と主体を含む人工物の科学方法論として既存の自然科学（自然物）の科学方法論とは別の、広がりがあり重要な科学方法論の領域を構成することを示す。

人工物の科学は、H.A.サイモンにより提唱されて依頼50年を越える歴史を持つ。さらにその淵源としての一般システム理論からサイバネティクスまでの歴史を遡れば100年近い歴史を持つ事になる。この広くシステムの科学と呼ばれる人工物の科学は、「もの」の科学としての物理学を規範とする自然科学とどのように異なり、それは如何なる意味で科学であり、更にそれが我々の社会をデザインする「科学」としてどのような意味と意義を持つのだろうか。また物理法則に基づいた工学的な構築物・人工物であるビルや橋梁、自動車や飛行機、電化製品などはどのような意味で人工物なのであろうか。

システム科学では、何らかの機能要件や意味的要件を満たすものとしてシステムを設計する。その際機能的或は意味的要件そのものの設計・デザイン（機能設計）モデルとその機能や意味を実現する物理的実態としての構築物の設計（実装設計）モデルのレイヤーの異なる設計モデル概念がある。

人工物の科学は、人間が意図した意味や機能を持ったシステムをデザインする科学であり、そのモデルを、意味や機能を実現する層と切り離してデザインすることに人工物の科学の本質がある。

自然物の科学では物理的層における観察可能な対象について、その性質を「物理学的説明」によって明らかにしようとする。物理学の様な自然科学では、物理学的説明は対象の性質を明らかにするという、「法則の発見」という理解の構成法をとる。法則が何らかの言語（通常は数理言語）の上で、対象についての論理的な推論を可能とし、当該の対象についての様々な問いかけに対する答えを与える一連の枠組みが与えられるからである。

これに対し、上位の機能要件を記述する層のモデルはしばしばシステムモデルと呼ばれる。この機能・意味要件を記述する上位システムモデル記述とその実現としての物理的モデル記述の二層の区別とその関係が、人工物の科学を考察する上では基盤となる。人工物の科学では、1) 目的や意味を満たす構築物をモデルとしてデザインすると同時に、2) そのシステムモデルを現実世界で実現することもまた目的とする。この二つの目的のうちで、前者だけを扱う、即ち実現の基盤を持たないモデルそのものを機能要件を満たすものとして定式化し、その性質を論じる作業は、数理的なシステム理論と呼ばれ、それ自身が一種の「サイエンス」として認められている。狭義の

人工物の科学はこの抽象的なシステムモデルの研究を意味することもある。例えば集中定数系や分布定数系、或はフィードバックシステムなどのシステム概念がこれにあたる。これらのシステム概念はしばしば数学的なモデルの一種と見なされることもある。実際集中定数系は常微分方程式の特殊な形態であり、分布定数系は偏微分方程式の特殊な形態とも言える。だがこれらのシステムモデルは、それが現実世界に顕現するための何らかの物理的基盤での実現と言う第二のフェーズと結びつけられる形で提供されている理念型であるという点で、数学的なモデルとはその知識運用を異にする。この二つのフェーズの関係は抽象的には図1のように示される[1]。

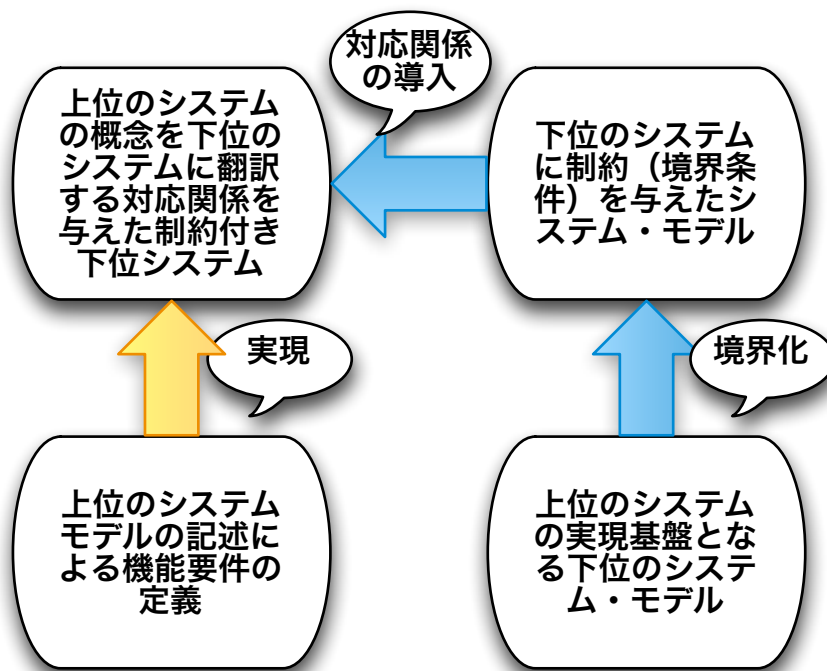


図1 上位のシステムを下位のシステムで実現する

この人工物としてのシステムの定式化とその実現についての理解を深める為に次の四つの事例を挙げる。

(1) オクロの天然原子炉と物理的概念の上に設計される人工物

アフリカのガボン共和国のオクロ鉱床見つかった、ウランの鉱床はオクロの天然の原子炉と呼ばれている。そこではウラン鉱床にしみ込んだ水を減速材として核反応を起こし発熱し、その熱で水が蒸発すると核反応は停止し、また温度が下がると水が浸入して核反応が始まるというサイクルを30万年の間、繰り返していたと考えられている。ここに存在しているのは核反応の開始と停止のサイクルを示す純粋な物理現象であるが、それを我々は「水を減速材とする軽水炉」という理念型で認識できる。この軽水炉という理念型は、核反応により熱を発生する物理的システムを実現する為には、ウランの核反応に対してどのような制約条件が課される必要があるかを説明している。オクロのウラン鉱床とそこに流れ込む水脈は、その条件を満たしていた為に、それ自体はウラン鉱脈の上の物理現象であるものが、あたかも人工物である原子炉に

見立てることができた。物理学的な基盤に基づいた人工物のシステム設計では、機能要件は独立なシステムモデルとして抽象的に記述されるのではなく、最初からそれが実現される物理的概念を用いて構成されることがしばしばである。軽水炉の設計では、ウランの核分裂反応を前提として、そこから熱を取り出す為のシステムとして減速材や反応炉や冷却装置等のシステムの機能要件が付け加えられる。それらが入る事で、只の核分裂反応が制約され境界化され、軽水炉というウランの核分裂反応を制御して熱を取り出すという機能要件を満たすことが保証される。この関係は図2のように示される。オクロの鉱床での核反応のサイクルを軽水炉と見なすという、「見立て」は正しい事は、オクロの鉱床での地下水とウランの制約された関係が、地下水を減衰材と見なすという見立てで、軽水炉の要件を満たす事が示されることで明らかとなる。

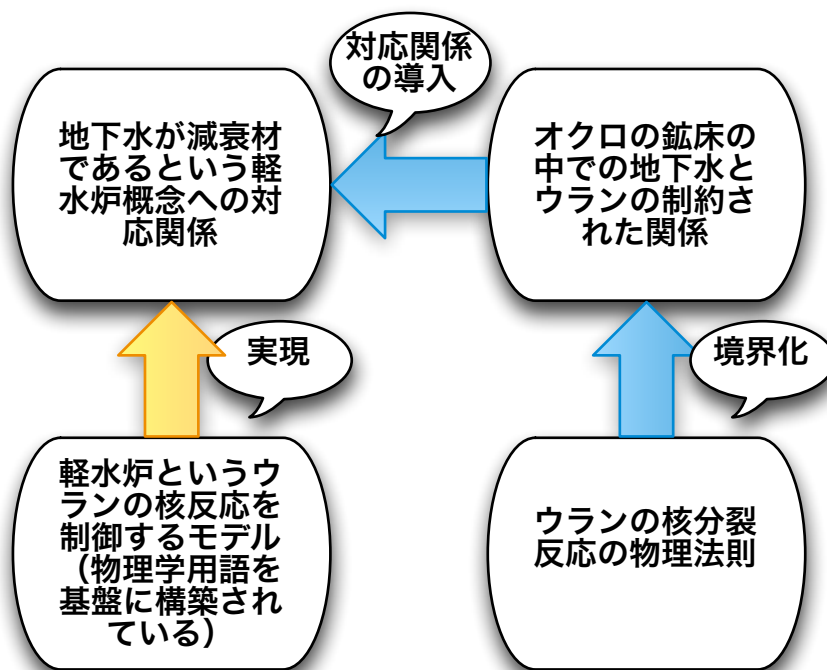


図2 人工物としてのオクロの天然原子炉

ただしこの事例では、軽水炉をオクロの天然鉱床で実現すべく我々が設計を行ったのではなく、オクロの鉱床で起きているできごとを、システムとして認識で来たということになる。

一般的には例えば橋梁の設計では、鋼材を用いてある強度の構築物を作るという、鋼材を用いるという物理概念を前提として、橋梁の強度やその機能質要件が定義される。次に現実の鋼材を組み合わせる境界化して、その機能要件を満たす構築物を実現することになる。

(2) フィードバックという人工物

工学的人工物の中には、設計水準が物理的な基盤とは離れたところでなされるものも多くある。その場合、上位のシステムとして記述されたモデル概念は、存在概念ではない。例えばフィードバックという概念を考える。この概念はシステム概念としては良く知られる代表的なものである。このフィードバックという概念は、認識概念で

あり、実在のシステム側の概念ではない。つまり現実のシステムの中で、フィードバックを満たす部分を切り抜くことはできない。フィードバックが認識側の設定概念で実在側の属性ではないことを示すために、簡単な微分方程式、 $dx/dt=ax$ 、 $a>0$ で記述されるシステムを考える。このシステムは発散する。

$$dx/x=adt, \log x-\log x_0=at \text{ より } x(t) = e^{at}x(0)$$

このシステムに対し、 $u(x)=-kx$ で、このシステムを安定点させる制御を考える。仮に、 $dx/dt=cx$ 、 $cx=ax-kx$ 、が先に与えられたとして、この c から a と k を分離するのは論理的に無理であることを示そう。

この系を 0 点へと安定化させるため $dx/dt=ax+u(x)$ という負のフィードバックのための制御項 $u(x)$ を付け加える必要がある。 $u(x)=-kx$ 、 $k>0$ とすると、 $(a-k)<0$ つまり $a<k$ のときシステムは 0 で安定する。ここで、 $c=a-k$ としよう。もし $dx/dt=cx$ という系が先に与えられたとして、それを見てもどこが制御項でどこが元の方程式かは分離できない！ つまりフィードバックという概念は認識概念であり、実在のシステム（を模写していると想定しているモデル）から、フィードバック項を分離することはできない。

このことは上位の機能的なシステム記述は、それを実現する基盤の層の中に 1 : 1 で対応し確定的に見いだすことのできる概念ではないという意味で、存在概念なのである。オクロの天然原子炉もフィードバックシステムで、核反応を水の蒸発がコントロールして停止させ、温度が冷えると水が浸入して核反応が開始するという、サーモスタットによる温度フィードバックと類似のコントロールを繰り返していると思わせるが、それはあくまでそうした解釈が可能というだけであり、軽水炉という理念型をそもそも知らなくてもそれは核反応の開始と停止を繰り返す物理的振動系として物理学的には解釈される。それをフィードバック系と見なす妥当性は検証可能であるが、フィードバックシステムとして一意に解釈される必要は無い。先に実現された物理的システムが与えられた場合には、それがどういう機能を持つかを我々は上位の理念型を用いて理解し解釈し検証するのである。他方で我々が軽水炉という概念から物理的境界条件を与えて人工物として組み立てた物理的システムとしての軽水炉に対しては、その原子炉を単なる物理現象とは思わない。それは我々が図 1 で示した意味でのシステム間を結ぶ知識運用を行っているからである。人工物のデザインや対象の解釈は我々がどのような知識運用をするかによっており、上位のモデルとその物理的実現のモデルの相互連関が意味を与えるという意味の全体論が知識運用という観点から成り立っていると言える。

(3) コンピュータという人工物

デジタルな情報処理では、機能の記述とその物理的実現の方法が分割され設計された知の運用を行っている。そこではまずロジックゲートを組み合わせた論理演算を、物理的に実現するゲート素子が必要となる。そのゲート素子は電磁気学的に実現される必然性は必ずしも無い。水流を使ってゲート素子を実現してもよいが、それは機能要件として別途要請される低コストで小さなデバイスという要件を満たさないだけである。コンピュータの様な人工物では、物理的実現基盤自体がゲート素子の様な人工物であり、そこでは階層的な実現関係が見て取れる。高次のプログラム言語で記述された仕様が、マシン語で実現されるプロセスそのものをシステムとして実現したのが

コンパイラであり、そのマシン語で描かれたシステムは、コンピュータというハードウェアで実現され、更にそのハードウェアはゲート素子で実現されるという実現の階層構造がある。このような階層構造の中では、物理的法則に基づく実現層は基底には存在しても直接的な物理的境界条件の制約とは切り離されて設計できる。それゆえこの種の人工物の設計で必要なのは、抽象的なシステム間の関係としての知識運用となる。

(4) 人工物と成長するシステムのデザイン

社会のシステムも階層的な実現関係を持ち、社会の諸システムの機能は、個人や組織を実現基盤として実現され、組織の機能は部分組織や個人を実現基盤として実現される。その意味では社会や組織は人工物として物理的制約条件からは切り離されて分析される。逆に言えば社会のデザインを物理学的階層での法則に還元することに妥当性を見いだせない。

更に社会的なシステムの構築は、意図的にデザインされたのではなく、歴史的に生成されたものという理解がある。しかし例えば近代の国民国家は B・アンダーソンのように『想像の共同体』としての人工物であり、どのように我々が伝統と呼んでいるものの多くも『創られた伝統』としてのある種の人工物ということができる。構築された現実を「誰が」構築するのかという問いは、意図した設計という概念と裏腹になる。社会的に構築される解釈や制度装置は、ビルや橋梁、或はだがインターネットは誰がデザインしたという問いは、ビルや橋梁よりも遥かに答えることが難しい。インターネットは個々には様々な組織がその経路やサービスをデザインしつつも、全体としては成長するシステムとなっている。無論その基幹技術はデザインされたものであるが、それがどのように成長しているかを管理する管理者はいない。その意味では祭りの個々の構成要素は、何処かで誰かがデザインした作った伝統だが、その全体の成長は誰もデザインしていないというような社会のシステムのデザインと似ている。報告者は八重山の波照間島をフィールドとした調査を行っているが、その波照間島のムシャーマという祭りでは、多くの要素的な儀礼があり、中には明らかに明治以降にデザインされ導入された踊りなど、様々な時期に誰かがデザインし導入した意味的要素が成長し折り重なって構築されている。その全体は成長し進化し伝承され変容する。

都市もその意味では成長し進化し変容するシステムであり、個々の道路やビルや家はそれぞれデザインした主体がいるが、それが全体として成長する様は、制約をかけ成長を報告づける事はできても確定的な設計がなされるわけではない。

今後我々の社会のあらゆるシステムは、その要素はデザインされた人工物であると同時に、全体システムは成長し進化し変容するとして緩やかにデザインされる。その意味での人工物を我々はマネジメントするすべとしての知識運用の方法論を見いだす必要がある。本稿で我々は、人工物の科学というのがどういう知識構造と知識運用のもとに分析してきた。人工物の科学基礎論はこのような知識の運用論に基盤を持つ必要がある。 文献

[1] 出口 弘,小澤 正直, 集合論的不確定指示子による理論間関係の論理分析, 科学基礎論研究第 28 巻第 1 号, 科学基礎論学会 2000,pp23-29