

工学的知識の特質¹⁾

齊藤了文

1993年3月31日受付

Some Features of Engineering Knowledge

Norifumi SAITO

In this paper I want to discern engineering knowledge from scientific knowledge. Both are often confused and unluckily the former seems to be dependent on the latter.

In order to appreciate the engineering knowledge, we have to change the view point of seeing the world from analytic to synthetic(productive). We found three features of the knowledge. The first is that engineering knowledge needs very large computation. The second is that to make machines, it is necessary to synthesize many scientific knowledges and many data. The third is that engineering knowledge must deal with open system. All these features depend on the problem of complexity. To put it shortly engineering knowledge deals with the problem of complexity.

問題設定

科学の哲学と比べて、工学の哲学、テクノロジーの哲学といったものは、英米ではあまり取り上げられず、また他の西欧諸国では、主として社会的政治的な観点から、テクノロジーの哲学が取り上げられている。ここでは、製品や産業構造の社会的影響という側面ではなく、工学における研究において用いられる知識の有り方を調べたいと思う。

科学の浸透ということを経験の成立と結びつけるならば、工学は、徒弟制度で教えられる単なる技能の集積でなく、学校で数学、物理、製図などとして教えられるようになって初めて生じたといえる。すると問題にしなければならないことは、工学の知識として認められるのは、科学の知識だ

けであって、工学はそれを「単に応用」しているだけなのか、ということである。

この問題を考えるために、工学が何を解明しようとする知識体系であるかを考察することにする。ここで、中心となる観点は、科学の目的である「説明」に対して、工学がめざす「つくる」ということである。「つくる」ということに独自の意義があるのか。

以下、具体例を概観することによって、「工学」は、「複雑さ」に対処しようとしていると結論する。しかも、この複雑さは「説明」にとっての複雑さととらえるべきではなく、「つくる」という点での複雑さである。この区別をすることによって、工学は法則的知識の正当化という意味での知識の錬磨に向かうよりも、限定された状況でうまく働く知識を形成しようとするのが理解できるように

なる。この知識は、単に不完全な知識とみなすべきではなく、「複雑さ」を考慮した上で、我々がもつ相当いい知識なのである。

このような論点を以下もうすこし具体的に考えていくことにする。

一般的な工学理解

辻井潤一は、工学の方法論を次のようにまとめている。「実現したい機能の仕様が有り、その機能を実現するのに必要な部分機能の仕様を決定し、次に、各部分機能で同じことを繰り返す。」²⁾

設計は工学の中心にある。そのため、要求された仕様がどのような機能からできているかを考え、それを実現することが工学であると考えられる。これは、科学、理学から区別された工学の姿を示している。

またデネットは設計に関して次のように述べている。「(設計の一時的な部分、そのプログラムを含めて) コンピュータがどのように設計されているかを精密に知っているならば、プログラムの計算命令に従うことによって、行われた運動に対する設計された通りの反応を予測することができる。その予測は、コンピュータが設計された通りに実行する場合、つまりブレイクダウンがない場合にのみ、実現する。それ以外の設計的態度 design stance の予測を区別してもいいが、そのどれも、目的に相関的な、つまり目的論的な「機能」という概念に依存するという点では類似している。つまり、あるシステムの設計は、それを大小の機能的部分に分ける。そして設計的態度の予測は、それぞれの機能的部分が適切に機能するというを想定した上で生成される。」³⁾

これによると、結局は工学も、機能を組み合わせることであるということになる。例えば、工学独自の知識として「設計」が言われるときにも、このように単純に理解されることがいづらかあるように思われる。しかも、その場合、目的ということを理解すれば、設計された機械は完全に理解できると考えられやすい。

しかし、実際には「設計十年」と言われるように、一人前の設計者となるのに長い年月の経験を積む必要がある⁴⁾。

ここから、機能を組み合わせることが、工学の中心

部分を占めるにせよ、「機能の組み合わせ」は単純なことではないということが理解されるであろう。実際、H.A.サイモンは、機能から機械への対応を具体的に示すシンセシス問題に取り組もうとした。また、吉川弘之も、一般設計学を提唱している。このよう試みが存在することは、少なくとも設計が単純な仕事ではないことを意味するであろう。

次に、「設計」ということと結びつくもう一つの論点を述べておきたい。それは、テクノロジーの「アイデア」が設計に翻訳され、それが技術を使って実現されて、ものがつくられるという考えである。

この場合、エジソンなどの大発明家のイメージと重なることによって、アイデアを思いつくことこそが、技術の進歩に決定的なことだと考えられたりする。

アイデアは、工学においてめだっている。発明や発見の物語は、突拍子もない場所で発見したことの事例で一杯である。しかし、実はそれが工学の本質を示しているとは言えない。

中川靖造は、『日本の半導体開発』において、菊地誠の言葉として次のような発言を紹介している。「死屍累々というとおかしいが、これだけ長いこと、世界中の学者や研究者が、半導体の開発に取り組んだのに、その大部分はものにならなかった。江崎さんのトンネル・ダイオードなんかがその代表的なものかもしれませんね。結局、現在まで残っているのは素性のシッカリした初期のトランジスタとその周辺技術、それを組み立てた集積回路のプロセス技術、あとは途中から合流したソフトウェア、つまり、信号処理、情報処理のものの考え方にほとんど集約されているような気がしますね。」⁵⁾

このように、機能やアイデアという、すっきりした仕方では、工学は理解し尽くせない。機能という目的論的概念やアイデアという形式や理念を提示する概念を用いれば、「説明」は容易になるであろう。しかしそれだけでは捉えられない何かすっきりしない、複雑な部分を含んでいるのである。その解明に以下進むことにする。

説明することと作ることの区別——その1

説明の優位

科学の成果が与えられていて、しかも求める要求仕様が与えられているのに、なぜそれを組み合わせることがそれほど単純ではないのか。

それは、「説明」することと「作る」ことの相違に由来する。説明は、ある場合には目的を述べれば一応話は終わる。しかし、それに対して、作ることは、目的を示すだけでは終わらない。むしろそこから問題が始まるのである。科学者の知識は、自然哲学の知識につらなるものである。つまり、自然を説明するということが含まれている。工学においては、具体的にうごくものを作ることが、重要な条件を提示している。

それでは、具体的に工学において考慮しなければならない複雑性とはどのようなものであろうか。それを具体例も交えつつ概観してみることにする。

さて、工学が扱う物体は、具体的な物質であり、様々な性質をもっている。つまり、物体を材質、「材料」としての考慮することが必要になる。

これは、物理学における実験と対比して考える必要がある。物理学における実験では、境界条件の設定や単離操作によって、独立変数をできるだけ少なくすることが求められる。これをうまくやらなければ、今生じた現象が何を原因にして起こったかを調べることができなくなる。あまり大きな影響を与えない要因を除外して、単純な法則を求めようとする。この抽象という操作は、物理学に単純なモデルを与えるという点では、重要な意義をもっている。しかしそのためかえって、工学のように法則を現実に使おうとすると、いろいろ問題が生じることになる。

特に古典力学を考えると、物質の材質、材料の問題が生じてくる。歯車のような単純な部品から

なっている時計のような機械の製作においても、古典力学の単純な適用は不可能である。差し当たり硬い金属を使うことによって、その材料は剛体として利用できる。この場合には、古典力学の単なる具体的事例として理解できるかもしれない。しかし、より精密になったり、大きな力がその部品にかかったりするようになると単なる剛体とみなすことはできず、更に時間的影響による磨耗や疲労などを含めて材料に関する複雑な性質を考慮しなければならなくなる。

ヘンリ・ペトロスキは、『人は誰でもエンジニア』という本の中でおもしろい例をあげている。「疲労というエンジニアリング上の概念を学生に教えるとき、私はひと箱の紙クリップを教室に持っていく。学生たちの目の前で、一つのクリップを平らに伸ばし、またもとのように曲げる。曲げ伸ばしを繰り返しているうちにクリップは二つに折れる。これが疲労破壊というものだ、と学生たちに教え、何回曲げ伸ばしすればクリップが折れるかは、クリップの強度によるだけでなく、曲げ伸ばしの激しさにもよるのだと言ってきかせる。紙クリップを、2, 3枚の紙をとじる普通の使い方をしていれば、はさんだりはずしたりするのにほんの少し開いたり閉じたり、何千回、何万回も持ちこたえ、クリップが折れることはめったにないだろう。しかし、本一冊分の紙を閉じるほど大きくクリップを開いたら、十回か二十回曲げ伸ばしただけでクリップは折れるところまで行ってしまおうだろう。

こう言うおいて、学生一人一人に、5つか6つのクリップを配り、私がやって見せたように一ぱい伸ばしては曲げるのを、クリップが折れるまで繰り返すように言いつける。学生たちがこの安上がりな実験にとりかかると、私は黒板に、個々のクリップが折れるまでに何回曲げ伸ばしを要したか、記録する準備をする。学生に回数を報告させ、

その数を棒グラフに描いて、度数分布曲線と称する図表を作る。その結果は間違いなく見事な釣鐘形の正規分布曲線になり、結果が統計的に分布することを示す。そこで学生たちに、すべての紙クリップが同じ曲げ伸ばし回数で折れなかったのは何故かの説明を求める。ふつうは全員が二つの主な理由で一致する。紙クリップが全部同じ強さにはできていないこと。全部の学生が正確に同じようにはクリップを曲げ伸ばししないこと。こうして学生はその場で、疲労という現象、疲労破壊という事実は、正確には予知できない事象であることを理解する。]⁶⁾つまり、同じように作られた部品でも、それぞれ別個の履歴をもつことによって、われわれに予知のできない統計的な多様性を示すのである。

問題は、このことをどう評価するかということである。そして「法則」に基づく説明という観点からは、次のように理解されることがある。

このように、統計的誤差が生じるということ、材料は理論が要求するような剛体といった性質はもてないという論点は、「法則からみると」、不完全な部品を使っているからこのような不具合が出たということを示しているともいえる。数学者が物質とは切り離された線や面などに見出した証明は、物質的なものには適用できない。それは、物質的なものが、数学の要求する完全な直線を作ることができず、その意味で不完全だからだ。この観点からは、複雑性は、不完全性と同義語になってしまうだろう。

次に、「トレードオフ」ということを考えてみる。例えば、自動車の加速性能をよくしようとすれば、燃費は悪くなる。燃費をよくしようとすれば、加速性能は悪くなる。このとき、重量を軽くしようとすれば、今度は安全性が問題になる。このように、あちらをたてればこちらがたたずといったことがおこるのである。部分的な機能を組み合わせ

ることの複雑性は、トレードオフにも由来する。このため目的に向かって、機能を単純に積み上げれば、求める全体がその目的に一致するとはいえなくなる。

ものを「作る」場合に考えなければならない点を武田康生は次のようにまとめている。「設計価値を主として左右するものは次の三要素であるとしてよい。

(1)性能・機能、(2)強度・信頼性、(3)生産性・コスト

この三要素は互いに相反する傾向をもつ。すなわち、性能・機能を重視し過ぎると強度・信頼性が不安となり、性能も強度もというとな生産性・コストの面で弱くなるというのがそれである。したがって、設計の実務にあっては、常にこの三要素を総合的に考えるという態度が、どうしても必要となってくる。設計の結局の目的もこの三要素を総合した全体価値の最大化を図るところにある。]⁷⁾

スピードの出る自動車を作る場合でも、信頼性などを考えに入れなければいけないので、単純にスピードという要求される機能をみだすもの作っているとはいえなくなる。冗長性を含んだシステムは、単純な仕方でも機能を取り上げても、それだけでは分析できないことになる。

これは、科学と比べると、全体の調和をとらなければ具体的なものは動かないということの意味している。工学者のバランス感覚が重視されるころである⁸⁾。

このバランス感覚はトレードオフを考える場合の工学の特徴を示している。しかし、ここで問題になるのは、経済的な考慮をしなければならないということである。つまり、コストと性能、コストと安全性のトレードオフである。人命にもかかわることのある安全の問題をコストという経済の問題でブロックするということにもなりかねな

い⁹⁾。このため、経済的考慮をするということが、学問としての真理の追求と異なるということが指摘される。理論的な究明をすることによって、複雑な事柄の解明に最後まで突き進むというイメージをもつ科学に対して、工学においては現実との妥協をするというイメージがつきまとうことになる。

結局、材料やトレードオフの問題を見てくると、工学は単に不完全なことをしているにすぎないと思われやすい。ここに示された複雑性は、否定的な意味で理解されている。そして「説明」の立場とも結びついて、科学にとっては「まだ理解できていない」段階で、工学は時間やお金の制約をあれこれ言っていると非難されることにもなる。

説明することと作ることの区別——その2 作るということの優位

以上は、工学が科学（理学）に比べて、幾分見切り発車をしているように見られる側面である。しかし、「作る」ということは、それ独自の意義もっている。

「つくる」ということと、「分析する」ことの区別は、次のように理解できる。「分析する」場合には、対象が予め与えられている。すると、その対象のもつ性質は、一義的に定まると考えられる。それに対して、「つくる」場合はそうはいかない。

ある性質を備えた対象を求めようとする。これは、設計や開発などの問題である。このとき、与えられた性質に基づいて対象を決定することはできない。対象が定まれば性質は一義的に定まるのに対し、性質が定まっても、その性質をもつ対象の候補は多数あり、一義的には定まらない。だから、この形式の問題に対しては、仮のモデルを作って評価し、評価された結果に基づいてモデルを修正し、再び評価を行うという試行錯誤のサイクルを繰り返すことによって、解を探索的に求めるこ

とになる¹⁰⁾。

つまり、作る場合には、フィードバック・ループが不可欠になる。試作品を作る場合、最初はある程度動けばいい。そして、それを洗練させることが必要になる。しかも、トレードオフと結びつくことによって、その最適値は一義的に定まらない可能性がある。工学者のバランス感覚といわれるものは、説明の立場からは、ある程度で手を打っているという印象と結びついていた。しかし、これは「作る」場合に欠くことの出来ない条件である。つまり、「解を探索的に求める」ということを、熟練の結果、ある程度直観的にやっていると考えることができる。

またここで、用いられたフィードバック・ループは、ある種の解に接近する役割を果たす（50年前の自動車もその当時は最先端として満足できるものだっただろう）かもしれないが、決定的な点に収束することを意味しない。その当時の、状況にも依存する。すると分析する場合には、真理への近似という言い方がある程度意味をもったが、作る場合には、本来真理への近似という言い方は使えない。

ここに含まれている論点をさらに説明することにしよう。

まず、解を探索的に求めるという論点と結びつく問題である。そして、モデルの選択ということよりも、作られたもの、一般的な意味での機械が「実際に動く」ための条件である。例えば、天気予報をするコンピュータでも、偏微分方程式が与えられるだけでは役に立たず、それを短い時間で計算しなければならぬ。つまり、2、3日かかるような計算をして明日の天気がわかって、それでは意味がない。ある程度、リアルタイムで反応しなければ、実際に動くものとしては意味をなさない。

これは、法則を提示するだけではすまず、それ

を計算しなければならないことを意味している。それが特に問題になるのは、計算量の問題と係わる組み合わせ問題の解決であり、非線型方程式の解法である。

前者に関しては、例えばチェスの手をすべて読みきるといふことは、どんなに速いコンピュータができて無理である。つまり、ゲームのルールが与えられても、それはそこからの帰結をすべて読み切ることにはできないのである。これは、ルールや規則を知ることが、機械が「動く」ことに關して十分な条件でないことを示している。

後者に関しては、コンピュータのシミュレーションを考えることができる。これは、全体のシステムを成り立たせている部分的な法則がわかったときに、全体としてどう動くかを見るときに使われる。これは、工学における「総合」「組み合わせ」をするときの問題になることである。ここで注意すべきことは、たとえ科学によって、個別的な法則がすべて判ったとしても、それを組み合わせた複雑なシステムの動きは、直観的に判るものとはならないということである。要素の性質を単純に組み合わせ、全体の性質が判ると考えるのは、単純な線型的な現象だけである。特に非線型の現象においては、全体としての振る舞いはなかなか予想できるものではないのである。

このように、部分的な動きは理解できていても、それがすべて関与した場合に何が起こるか、われわれには見通せない。ここで、考える複雑さは、排除できない。しかも、一つの法則で書き表して理解できるということは、ほとんど考えることができない。この意味で、科学的法則的理解からぬけおちた複雑さを工学は問題にしていることになる。

また複合システムにおいては、法則を増すということが意味を持たない。それによって、システム全体の処理が単純になるということはない。例

えば機械翻訳のために文法規則を増やすことによって、結局はシステムが崩壊することがある¹¹⁾。

最後に、上に述べた作ることと分析することの区別においては触れられていない点を述べることにする。つまり、具体的なものを作ることによって、環境と係わることになる。これは、工学において「実用化」という点である。作られたものが現実の環境の中に置かれるということを考えなければならない。これは、「オープン・システム」であることを常に考慮しなければならないということである。

科学における実験は、理想状態をつくって、そこで何が見えてくるかを観察する。しかし、工学においては未知の部分を含んだ環境に入れられることが重要である。現在においてすべての状況が確定しているとはいえない。とりわけ人間が機械を使う場合に、人間そのものが機械にとっての環境としては、よく理解できていないことは明らかであろう。そのために、ヒューマンインターフェイスの考察が必要になる。例えば乗用車の場合、素人が千差万別の運転条件の下で運転するのだから、非常に問題である。交通渋滞の中をのろのろ行ったり、山岳ドライブをしたり、高速道路でとばしたりする。このよう急激な変化に耐える機械をつくることは単純なことではない。

原子炉にしても、差し当たり考えられるだけの事故の可能性はもちろん考えて作っている。しかし、それでもどのような事故がおこるか予想できない部分を含んでいる。そのため多種多様な安全装置をつけることになる。バグ、エラーが起こる可能性を常に考えておかなければならない。科学においては差し当たり抽象できたものが、工学においては作られたものが現実の世界の中におかれるということを常に考えねばならないために、全く無視できない意義をもっているのである。

このように、「作る」という観点でみると、工学

の提出する複雑性の積極的な意義が理解できるようになる。つまり、このような複雑性は無視して済むようなものではなく、しかもそれは一般的法則を導入して直ちに解決できるようなものでもないのである。

ま と め

機能とアイデアについての考察から、スピードの出る自動車とか高速のコンピュータとかいうように、機械の「目標」となるものを単に提示しただけでは、工学は理解できないことがわかった。これは、工学において、少なくとも何らかの意味で複雑性を考慮しなければならないことを意味する。

次に、材料とトレードオフについての考察からは、工学に含まれる複雑性は、工学をおとしめるように通常は理解されてきた、ということを見てきた。しかし、ここでの問題は、ものごとを「説明」という観点からみて評価したことに由来する。

だから、「作る」という工学独自の立場から見ると、リアルタイムの処理、総合、オープン・システムのいずれにおいても、複雑性は考慮せざるをえないものである。しかも、これは「説明」の立場からは、あまり問題にされなかった複雑性である。

もう一度まとめると、工学において「総合され」作られたものの複雑性は、システム内部での副作用を理解することが困難であることを示している。また作られたものが、「実際に動く」ために考慮しなければならない複雑性は、結局は完全に計算しつくすことができないということ、情報の部分性、制約された合理性ということに由来する。また、つくられたものが「実用化」されるということに含まれる複雑性は、思いもかけないエラーがoccurするというオープン・システムの性質に由来するものである。

このような複雑さについては、少なくとも「説明」を完全にすることは困難であるし、たとえそれができても、あまり役に立たないものになる。しかし、實際上工学はこれらの複雑性に対処しようとしてきたし、ある程度はそれに成功してもいる。だから、われわれは、何らかの教訓を工学からうけとることができるのではないのか。

そしてこのような複雑さは、実は機械を作ることだけでなく、人間がこの世界においていろいろの理論を用いて生きていくときにも現れるものだと考えられる。直観的にみても「総合」の論点以外は同じことだと考えられる。すると人間がこの世界に適応する場合にも考慮すべき複雑さがあり、それは単に理論を作っていくという過程では出会われないものである。だからこの複雑さは客観的な知識に近づけない人間の不完全性を示しているのではなく、人間が現実生きていくときの条件を示していると考えられる。有限性に引き直って、そこで何ができるかを考えることが必要である。そのため、このような複雑さを扱う工学独自の方法を、それなりに哲学的に位置づける必要がある。

注

- 1) この論文は、1992年度の科学哲学会で口頭発表したものである。
- 2) p. 25『機械の知 人間の知』辻井潤一 東京大学出版会
- 3) p. 4 Brainstorms D. C. Dennett 更に、p.237f. も参照
- 4) 『人工物工学を提唱する』吉川弘之 360 1992/10
- 5) p. 24f.『日本の半導体開発』中川靖造
- 6) p. 26f.『人はだれでもエンジニア』ヘンリー・ペトロスキ 鹿島出版会
- 7) p. 101『設計における総合手段としての相似則』武田康生 in『技術のこころ二』日本機械学会編
- 8) 『もはや技術なし』星野芳郎 p. 58f.
- 9) p. 64『機械工業における強度設計のあり方』中村 宏 in『技術のこころ二』日本機械学会編

- 10) 『知識処理による問題解決の高度化へ』大須賀
節雄 in 『日本の科学と技術』'86 9-10
- 11) p. 199 『機械は考えるか』長尾 真 『科学』Vol.
57 No. 4

参 考 文 献

- * 複雑性の位置づけに関して
The Sciences of the Artificial 2nd. ed. Herbert A.
Simon 『システムの科学』 パーソナルメディア
『情報の部分性とフレーム問題の解決不可能性』松原
仁, 橋田浩一 in 『人工知能学会誌 1989/11』
『市場の秩序学』塩沢由典 筑摩書房
『混沌とつきあう技術』西村肇 in 『東京大学公開講座
53 混沌』東大出版会
Philosophy and AI-essays at the interface ed.by
Robert Cummins & John Pollock MIT Press
1991
- * 全体の枠組みに関して
『人はだれでもエンジニア』ヘンリー・ペトロスキ
鹿島出版会
『人工知能が人間を理解するとき』長尾真 三田出版
会
『科学と技術の近代』山田慶児 朝日選書
『概念の設計から社会システムへ』吉川弘之 三田出
版会
『機械の知 人間の知』辻井潤一 認知科学選書 20
東大出版会
- * 実例に関して
『日本の半導体開発』中川靖造 講談社文庫
『日本機械学会誌』1981/4 特集「設計論」
『日本機械学会誌』1990/9 特集「工学と理学の接点」
『人工知能学会誌』1991/11 特集「人工知能の理論と
実際」
『日本機械学会誌』1991/10 特集「21世紀へ向けての
機械工学教育」
『日本機械学会誌』1992/4 特集「技術史と技術哲学」
『計測と制御』1980/1 特集『計測の未来を語る』
『情報処理』1988/2 小特集『ロボットの信頼性と安
全性』
『情報処理』1989/10 大特集『自然言語理解』
『技術のこころ一』『技術のこころ二』日本機械学会編
丸善株式会社
* 工学的「知識」の問題性について
『技術的探究について』伊藤邦武 in 『関西哲学会紀要』
第 22 冊 昭和 62 年度
“Technology as Knowledge” Edwin T. Layton in
Technology and Culture Vol.15, No.1 Technol-
ogy and Science, or “Vive La Petite Differ-
ence” Edwin T. Layton in PSA 1976 Vol. 2
“Instrumental Realism” Don Ihde Indiana Univer-
sity Press 1991
* 工学の哲学が英米であまり取り上げられなかつ
たこと
“Introduction” Paul T. Durbin in Philosophy and
Technology ed. by P. T. Durbin & Friedrich
Rapp BSPS Reidel 1983
“Instrumental Realism” Don Ihde Indiana Univer-
sity Press 1991
* 関連する拙論
『工学の哲学的基礎づけをめざして』大阪体育大学紀
要 1991
『人工知能研究と人間の有限性』大阪体育大学紀要
1987