

近世哲学研究

第 2 号

-
- カント哲学における「経験」概念について —— 福谷 茂 1
 —— 「世界」概念導入のための端緒として ——
- ヘーゲルのコルポラツィオン論 —— 早瀬 明 21
 —— 市民社会の団体主義的変革に向けた
 ヘーゲルの試み ——
- 工学はどのようなタイプの学問か —— 齊藤 了文 39
- 信仰の情熱とその逆説 —— 田中 一馬 65
 —— ケルケゴール『おそれとおののき』に
 おけるアブラハム解釈をめぐって ——
- ハイデッガーのヘーゲル解釈 —— 橋本 武志 85
 —— 意識の二義性と意識の転換 ——

1995

Epistola VIII

京大・西洋近世哲学史懇話会

工学はどのようなタイプの学問か

齊藤了文

序論

科学哲学においては、科学的知識の本性や科学の方法についての考察が行われてきた。例えば、科学的説明、経験的検証、反証、科学的実在論といったテーマである。

しかし、ここでは工学はほとんど無視されていた。この理由の一端は、工学は応用科学であると思なされたからではないかと思われる。テクノロジーは技能 craft に過ぎない、したがって理論を含まないという説が流布している。この考えに反対して、ブンゲはテクノロジーが応用科学であるという主張を提出している。^三この考えは、工学の知的

な成分を評価するものではあるが、そこにはまだ吟味すべき問題が存している。つまり、知識とか学問とか合理性といった知的な成分に関しては、工学は科学のおすそ分けをただ頂いているにすぎないということになる。^三もしこう考えられるなら、特に工学を取り上げるだけの価値はないだろう。

しかし、工学と科学には相互に影響関係があるという「相互作用モデル」が提案されている。工学は科学の「成果」というよりは、その「方法」を使って、科学とは別個の学問を作り上げてきた。いわば、工学と科学は、鏡映像 mirror-image twins である。このように歴史家レイトンは、

十九・二十世紀の科学技術の発展を省みつつ結論づけている。空気が飛行機に寄与したことよりも、飛行機が空気力学の発展に寄与したことがはるかに大きい、と言われるような論点である。

また、真理よりも効率を求めることに工学の特徴を認める場合や、工学では価値や目的が大きく関係するという点が強調される場合もある。しかしそれにもかかわらず、科学の知識を工学に直接利用することがあるという事実は否定できない。もちろんレイトンによつても。

すると工学と科学に相互作用があるとか両者には目的の相違があるという程度の論点だけでは、工学の「知識」が科学にどの程度依存しているかは未決定だ。科学の方法の使用は認められていて、科学の成果をそのまま使っている場合もあるからである。そこで、工学が科学の発見した法則に依存する程度を見極め、工学独自の問題設定を解明する必要がある。

工学の学問性ということを考えるために、以下二つの論点に絞って考察を行う。まず第一は、科学の成果である「法則」に関わる問題である。この法則を「応用する」と

いうことは自明なことなのか。これが第一の課題である(第2章)。第二は、工学に独自だとされる「設計」に関する問題である。設計に関わる知的な作業は、いわゆる科学の知識とはどう違うか。この説明が第二の課題である(第3章)。

この小論では、「科学哲学」の枠組みと対比することによって、「工学の知識」を位置づけることを試みる。そのためまず、「科学の知識」についての究明を行ってきた論理実証主義以降の科学哲学の議論を取り上げることにする(第1章)。

第1章 科学哲学の論点

科学哲学の議論の流れを、ポパーの科学理論を洗練したと言われるラカトシユのまとめに従って取り上げることにする。つまり、この章は『反証と科学的研究プログラム』の方法論（6）に基づいて、これまでの科学論における問題状況のラカトシユによる再構成をたどる。

「正当化主義者たち」は、科学的知識は証明された命題

から成ると考えた。彼らのうち、古典的な主知主義者たちは、啓示や知的直観による証明を承認した。また、古典的な経験論者たちは、経験によってその真理値が確証される事実命題を、科学の理論を証明するための経験的基礎だとした。そして、この証明のために、「帰納論理学」を彼らは必要とした。しかし、アプリアリな真理を基にして科学的知識を証明しようとする企ては、非ユークリッド幾何と、非ニュートン物理学の誕生によって打ち砕かれた。また、帰納論理学の確立も、その論理的困難によって打ち砕かれた。

そこで、確率主義（新正当化主義）は、科学の理論は証明不可能であることは認めたと、経験的証拠を基にして理論の「確からしさ」を求めることで満足しようとした。しかし、理論は証明できないだけでなく、確からしくもないということポパーは明らかにした。

ラカトシュはこのように論じた上で、ポパーの反証主義の論点を分類する。まず、ドグマ的反証主義者は、科学の知識は証明できないけれども、経験的な反対証拠に基づいて「反証」することはできると言う。これは最も弱めら

れた形での正当化主義である。

しかしこのドグマ的反証主義は、二つの観点で批判される。まず第一に、理論的命題と事実的命題の間には自然的境界線があるという論点が批判される。事実的命題がそれだけで確実な経験的基礎になりうるかという論点だ。例えば、ガリレオが月の表面を「観察」することによって、天体は完全に透明な球体だという理論を反駁したという主張はどうであろうか。つまり、彼は望遠鏡を使って「観察」していたのだが、それはいわば純粹な観察ではなく、望遠鏡に関する光学理論の信頼性に基づいた観察なのである。この意味で観察命題と理論命題の自然な境界は存在しない。

第二に、確実な事実命題があったとして、それがあつただけで理論的命題を反証することはできるかどうかという問題である。つまり、堅固な証明済みの「経験的基礎」命題と矛盾するのは、問題になっている科学理論と「条件が一定ならば *ceteris paribus*」という条項の連言なのである。例えば、ニュートン力学と重力の理論と異論のない初期条件とを用いて或る惑星の軌道を計算する。しかし、その惑

星は計算された軌道から逸脱している。それではこの逸脱はニュートンの理論を反駁していると言えるか。否。彼は、この惑星の軌道をかき乱す他の惑星があるに違いないと考えて、その質量や軌道を計算して、その観察を天文学者にたのむ。観察できれば、ニュートンの理論は安泰である。これが観察できなかったときでも、望遠鏡が悪いとか、宇宙塵がその惑星を隠しているといったいいぬげができる。このような補助仮説は、科学理論において必ず必要であるために、変則事例を理論の反証とすることは基本的にはできないことになる。

さて、(下グマ的反証主義と対比される)方法論的反証主義は、規約主義(conventionalism)の一種だ。規約主義は、どんな理論でも、何らかの補助仮説か用語の再解釈によって反証例から救い出されると主張する。方法論的反証主義者は、いくつかの単称言明を「命令」によって反証不能にさせる。「適切なテクニクを学習した人なら誰でも」受け入れられることを決定できる言明は、括弧つきの「観察的」言明と呼ばれる。望遠鏡を使って「月はどこほこしている」というのは「観察的」言明である。

方法論的反証主義者は「決定」によって、「観察的」命題を手にいれる。さらに彼らは、テストされている理論を問題の中心ではない背景理論(補助仮説)から区別する決定期行う。このような決定はもちろん誤る可能性をもっている。しかし、進歩の可能性のためには、このような代償を支払わなければならないとラカトシュは論じる。彼は後者の決定を、「前進的な問題移動」の方向に向けることによって、研究プログラムが科学的と言われるようになること論じている。

科学の研究プログラムは、その「堅い核 hard core」とそれを囲む「防御帯 protective belt」からなる。例えば、ニュートンの力学法則と重力理論を堅い核とすると、それを取りまく補助仮説、「観測」仮説、初期条件といったものがその防御帯となる。

ラカトシュの積極的な主張はともかくとして、第2章以下で論じる論点と関わる三つの点を確認しておく。それのまず第一は、法則、理論が大きな役割を果たしているという論点だ。これは実験よりも、理論の方が科学の中心にあるという論点だ。そして、それと関係して、純粋な事実

というものはなく、せいぜい「観察的」命題があるにすぎないということ、理論—負荷性の論点が主張される。

第二に、正当化主義者にとつても、方法的反証主義者にとつても、実験は個別的事例、単称判断を与えるものとしてしか問題になっていない。観察的命題か、せいぜい「観察的」命題があるということから話が始まる。実験のその他の役割については問題にされていない。

第三に確認したいことは、補助仮説に関わる問題点である。これを使うことが、科学の法則や理論の反証に際して、重要な考慮すべき条件だと考えられたのである。

以下このような論点を踏まえてそれと比較しつつ、工学における法則の役割の問題、更には科学においては無視されることの多い設計の役割について考察することにする。

第2章 法則を道具として使うには

ここで取り上げる論点は、「科学法則」の役割と価値の問題である。法則を予測や問題解決に役立つ道具として使

うには、考慮すべきことが多いということを論じる。法則には補助仮説がついているために、具体的な場面に法則を適用することが必ずしも自明な問題ではない、というのがその中心である。

科学の成功という論点は、一般に認められている。それは科学法則が道具として役に立つのはどういふ場合だろうか。

第一に、統一的な説明をすることができるといふ論点があげられるかもしれない。法則の説明能力が、法則の応用可能性に重大な寄与をするといふ論点である。

この論点について吟味するために、まずヘンペルの演繹的—法則的説明 (deductive-nomological explanation) について述べる。彼は科学的法則の正当化 (検証、確認、反証) を目指すというより、科学的法則が様々な自然現象を説明できるということを論理的に分析しようとする。彼が言う演繹的—法則的説明 (D・N説明と略される) は、被説明項を一般法則の下に包摂することによって行われる。つまり、説明されるべき現象である被説明項が、ある特定の状況から、いくつかの法則に従って起こったことを示そ

うとする。

ここで被説明項を演繹するのに用いられる前提は、幾つかの特定の事実を表す個別命題と、普遍的な幾つかの一般法則である。この意味で被説明項は論理的帰結であるとともに、その特定の状況と一般法則が与えられることによつて、被説明項が予測されるものとなる。

しかし例えば、Nancy Cartwrightによるとそこには考慮すべき問題がある。彼女は、ヘンペルのD・Nモデルが説明、確証、応用の三者を統合するのに役立ったと評価する。その上で、van Fraassenが確証と説明の同一性を否定したのに比して、彼女自身は説明と応用（理論が現象を記述する能力に関わる）が同一でないことを示そうとする。そのために量子論をめぐるボルンとアインシュタインの論争を彼女は取り上げる。アインシュタインは量子力学の説明に満足できなかった。つまり、アインシュタインは光が波であり粒子であるという現象が量子力学によつて記述できるといふ以上のことを要求していた。それが説明への要求である。つまり、ボルンの量子力学には「初期条件」に対する理論への橋渡し原理がなかった。そのために、量子

論は、その現象を記述することはできたが、アインシュタインにとつてはアドホックであつて、説明とは認められなかった。彼女はこう解説する。

彼女は、「ある理論の諸法則はそれが説明できる以上の多くの現象をカバーできる」と述べる。ここから彼女は、「科学における応用はそれ自身の構造をもつており、理論科学の構造と異なっている。そのためにそれ自身の哲学を必要とする」と結論する。つまり、「科学的説明」とは違ふ仕方では、応用（ここでは理論が現象をカバーする範囲の問題だった）について考察すべきだと彼女は述べている。少なくとも、法則の応用を説明能力の面からのみ理解することはできないという論点は、肯定できるだろう。

第二に、科学法則が普遍性をもつという論点がある。法則の普遍性のおかげで、多数の対象に法則が応用できるといふ論点である。しかし、工学者にとつてみると、法則が「どういう条件の下で成り立つか」を知ることには重要性があるように思える。研究室の中という統制下の環境ではなく、現実の環境の下で家は建っている。また摩擦がある、空気や塵があるという条件の下で、橋を作らねばならな

い。「工学についての最も単純な見方は、それが直接的演繹的活動に他ならないというものである。工学者は科学者によつて与えられた多くの方程式から選択し、関心のあるパラメータの値を代入し、計算を行う（もしくはそれを機械にやらせる）。そしてそれからその答えを手元にある特殊なプロジェクトに応用する。まずい教え方をされた工学講座は、この立場を助長している。しかし工学の実際の経験をしている人は誰も、そんなに単純で同情心のない見解を黙認するとは思えない^(五)」。

普遍的な法則を適用しているということは、法則や方程式に含まれている変数に数値を代入することだという印象がある。初学者の学ぶ教科書にはこのような場面も存在する。しかし、工学の営みはそれだけなのか、更にそれが中心になつていいのか、この点を問題にする。

法則の理論的位置づけに興味をもった教科書とは違つて、法則を使えるということを教えようとする教科書がある。「メカニクス—ショックレーの物理学^(二〇)」である。トランジスタの発明者として有名なショックレーは、自分の研究生活によると、この力学の教科書に示した創造的

発見のパターンは現実の活動の中で十分つかいものになるはずだと述べている。この本の特徴は、「法則を正しく理解するためには、その内容が何を意味するかを知るだけでは不十分で、この法則が成り立つ場合がどんなものか、（即ち、どんな環境のもとで成り立つのか？）ということ、及び、成り立たない場合はどういう時か、ということをも一緒に考えなければいけない^(二一)」という見方が貫かれて書かれていることである。自然法則には、内容、成り立つ場合、成り立たない場合の三つの面があつて、これらの三つのことさえ知れば、法則をうまく使いこなせる。工学者であるショックレーはこう主張する。

例えば、作用反作用の法則における「成り立たない場合」は次のようなものである。「もしこの2つの物体が非常に遠く離れていて、それらの運動が急激に変化し、そのために力の大部分がエネルギーや運動量を波動運動として放射するために生じるというような場合には成り立たない^(二二)」。このように、「成り立たない」場合を考慮することが、法則を実際に適用できる条件だと、工学者ショックレーは考えている。

また自然法則とは違った状況ではあるが、例えば、コンピュータサイエンス(特にソフトウェアに関して)を考えてみる。その理論的基礎は、チューリングの数学基礎論に関わる貢献が大きな意味をもっていることは認められるだろう。しかし、コンピュータサイエンスの全体を応用論理学としてとらえていかというと、そこは問題である。ACM (Association for Computer Machinery) は、一九六八年以来三回にわたってコンピュータサイエンスのカリキュラムを提案してきた。^(一三) それらのカリキュラムはアメリカ合衆国のみならず、日本の大学にも大きな影響を与えた。その中で、一九八八年の「カリキュラム88 プロトタイプカリキュラム」において、コンピュータサイエンスの学問性を定義する三つのパラダイムが提案されている。第一は、数学に由来する「理論」であり、第二は、自然科学に由来する「抽象化(モデル化)」であり、第三は、工学に由来する「設計」である。

論理学的基礎があるということは、コンピュータサイエンスを支配する普遍的法則があることを意味するだろう。自然科学と類比的に考えると、すべての自然法則が分かって

いるにも等しい状況である。それにもかかわらず、特に「工学」に関わる「設計」の観点を導入することによってコンピュータサイエンスが学問になると考えられるようになったことは非常に特徴的である。^(一四)

普遍的な数学や論理学の法則がすべてを「支配」しているにしても、それだけでは扱えない部分が工学には残されていることがここでは示唆されている。

さて、以上は、法則そのもののもつ優秀性(説明可能性、普遍性)が道具としての優秀性と一致するかの考察だった。次に、科学的法則そのものにとつては余分のものとなつている条件(補助仮説、理想化、計算可能性)について考察する。

そこで、第三の論点は、補助仮説の問題である。ラカトシユの主張する堅い核と防衛帯との区別は理解できる。科学的法則をつくりあげるときには、補助仮説からなる防衛帯は、やっかいなものになる。つまり、規約主義が主張するように、どのような変則事例も補助仮説をうまく変えることによつて説明できるとしたら、堅い核そのものを反証することはできなくなる。しかし、それに対して、法則を

応用する場合には、補助仮説はどう理解されるか。一つの解釈では、例えばこの機械の腕に直線運動をさせるときに、腕を動かすという堅い核にあたる運動をする以外に、腕が据え付けられている土台を動かすといった方法なども可能だということを示している^(二五)（これも、堅い核を残して、そのまわりの防御帯を修正する方法であろう）。他の解釈では、補助仮説が変則事例を説明することに特に関わり、そのとき生じた振動や予定された位置からの変異を補助仮説が説明すると考えられるかもしれない。

後者の場合も、腕の精密な制御をめざす場合には、前者と状況は似てきて、堅い核と補助仮説のどちらをどの程度使用すれば、腕が効率的に目的に合うように動くかは、相互作用があるため、単純には決められない。

また、条件一定条項 *ceteris paribus* は、科学の法則の検証にあたっては、有用な条件であるが、工学においてはそれはならない。つまり、橋や家を建てるときには、何らかの法則に従うにしても、それぞれ土地の状況やまわりの環境は全く違う。そして、例えば橋に対する風の影響を一定

にしようとして、(マディソン郡にある橋のように) 橋のまわりを屋根や壁で囲んだりすると、コストはかさむし、その屋根や壁自体に対する風の影響もまた問題として残る。つまり、工学においては条件の一定性を単純に利用できず、そのため堅い核である法則の応用は、単純な作業ではなくなる。

実際問題、工学においてはどのような条件を考慮すべきかということが、その中核をなす法則の位置づけ以上に重要な問題として出てくるのだ。

次に考察すべき第四の側面は、法則にはすべて理想化が行われているということだ。特に工学では理想化が行われていることを考慮している。そのため、工学的問題解決では、理想化された法則のシミュレーションよりも実物実験をやって確認しようとする。「他の機械要素の設計計算の場合と違って、金属ばねで摩擦のないものばね特性については、実験値と理論値とがよく一致するので、正確なばね定数が必要な場合はきちんと計算するとよい^(二六)」。「『実際の設計』という本の中にこのようなことが書かれている。これは実はよく読めば、理論値が実験値によく合う場

合に限って、理論値を信頼してもかまわない、ということだ。基準は明らかに実験値である。

例えば、 balanによる水車の解析は、十八世紀初頭になされた水車の理論解析の試みの基礎となった。しかし、balanを始めとして定量的な考え方を導入した人々は、現場とは関わりのない科学者や理論家だった。「彼らは現実の実験結果より、一般的な数学的原理とか科学の潜在的な有益性の例証を与えることの方に関心を抱いていたのである」^(二七)。

しかし、水車大工たちは、理論解析の初期の結果をほとんど無視し、慣習や過去の経験にしたがって水車をつくった。しかし、それでもたいした支障はなかった。「balanやピトーが行った基礎的解析は、現実に対してはあまりにも単純すぎる仮定に基づいており、実物や実験によって検証されたものではなかった」^(二八)。

このような論点は、工学において「理論」が軽視されるという結論にもつらなっている。「科学において実験は、科学的な予測の真理を検証することによって、理論の真理をテストするために用いられるだろう。しかし工学は単純

化した分析で済まされねばならないので、真理の問題は存在しない。従って工学では、実験は必然的に単純化されてしまった分析について、その実際上の信頼性をテストするためにのみ用いられるだろう」^(二九)。

つまり、工学では法則が理想化されていることを意識せざるをえない。そして、その法則の信頼性が絶対のものではない。多くの理想化が関与する理論的な分析よりも、機械がどう動くか、それにどのような応力がかかるかを理解するときには、実験（模型実験、ときには実物実験）の方がより役立つのである。つまり応用の問題の本性は、「残存する理想化による偏りを決定し、新しい事例に対する外挿を正当化することである」^(三〇)。

第五の論点は、理想化が特に実際的な計算可能性と結びつくという論点である。より実在的な realistic 説明は、計算や分析が複雑になるというコストを含んでいる。流体力学のストークスの方程式は、単純な形態に関してのみ解が得られる。「検証できる主張の導出において科学者が理想化と近似 idealizations and approximations を用いるのは、実際的な計算可能性を達成するためである。これは、理論

の確証や反証に関して問題を生ずる^(二四)」。

この実際的な計算可能性という論点のために、単純な誤差の問題とは違って、真理からの距離は、問題にはなっていない^(二五)。それにもかかわらず、実際的な計算可能性は、現に行われつつある科学にとって、必須の制約になっている^(二五)。

以上五つの論点は法則を応用するということときに考慮すべき事柄である。法則をうまく道具として使おうとするには、科学の立場から見られた道具のすばらしさ(説明力、普遍性)には尽くせないものを考慮しなければならない。しかも、法則は理想化されているし、複雑な系を扱わなければならぬので、補助仮説をうまく使うことが要請された。そのため、現象の基本的法則そのものの役割は相対的に減少してしまうことになる。この意味で法則を応用することが単純な仕事ではないと結論できる。

第3章 (その1) 逆問題の論点

ここでは、工学における多くの問題が逆問題と呼べる

ようなものになっていると主張する。つまり、D・N説明のように演繹的な包摂を考えるだけでは解決のできない問題が工学には課せられていることを示す。

「問題を解くとき、原因(入力)がわかっていて、そこから結果(出力)を導くことを順問題を解くという。例えば、あるシステムの部品が壊れたことがわかっていて、それがシステム全体にどのような影響を及ぼすかを調べるのは順問題の解析である。逆問題を解くというのは、原因はわからないが、結果がわかっていて、その結果から逆に原因を推定することである。例えば、さまざまな事故の原因の調査はまさしく逆問題^(二六)だろう」。因果法則と原因が分かっているれば結果は容易に求められるので、順問題は本能的には非常に扱いやすい問題である。

さて、工学的な逆問題は、入力と出力との関係づけのものになっていく支配方程式がわかっている場合がほとんどである。「医用画像診断、X線CTでは、人体にさまざまな方向から入射した透過X線の減衰をもとに断面内のX線吸収能の分布を測り、そのデータから人体内部の構造を再構成する。これは一種の材料特性逆問題^(二七)である」。それで

は、「こうした計測のデータから原因をどのように調べればよいのだろうか。まずそうしたデータから多分これが原因だろうという「疑似解」を仮定する。次にそれを支配方程式に入力して、出力、応答を出してみる。出た結果と元のわかつている出力を照らし合わせて、それがどんどん近づくように「疑似解」を修正していく。計測された情報と、計算された情報を合うよう、仮定した入力をどんどん変えていくわけである」^(二八)。このとき「ただちに解が得られるかどうかはわからないのだが、応答を求めるだけだから、計算は順解析なので、安定に計算できる」^(二九)。疑似解を出す必要があるのは、逆問題解析には一般に解の不適切性と総称される困難があることによる。つまり、まず解があるかどうかかわからない。そして、解の唯一性も保証されない。しかも、これが保証されていても、解が数値的に不安定になる。つまり、測定値に誤差が含まれると、解が大きく変動することがあるのである。このため、安定な計算ができる順解析を使うために疑似解が必要となる。

このような診断問題^(三〇)、更には設計もある意味では逆問題として特徴づけられる。つまり、一般に、機械や材料、

構造物の設計を考えても、仕様(結果となるべき目標)が決まった上で、それを満たす構造や材料(原因となるもの)を決定しようというのだから、広い意味の逆問題と考えることができる。ただし、設計においては、支配方程式が明記されているとは思えないし、仕様そのものも(少なくとも設計の当初には)予め明確になっているとは限らない。

工学では、逆問題を解いている。そのため、問題の性質上疑似解が必要となり、解が一義的には決まらない^(三一)。「逆問題解析は、順解析に比べて取り扱いが困難で、大量のデータと大規模な数値計算処理が必要になることが多い」^(三二)。

さて、解が多義的になるという主張を更に考察する。「最適な組合せを見いだす基準は、そのものを設計している個人により異なる。われわれは、新しい製品に関する多くのパラメータをできるかぎり数値化して、その組合せのオブティミゼーションを図ろうと努力するが、残念ながら、関係するパラメータには、数値化できないアナログパラメータが多い。例えば色の取り合わせ、かっこよさ、便利さなどは、すべてアナログパラメータである。このよう

に、エンジニアが新しい製品を作ろうとすると、未知の分野の問題解決と同時に、アナログパラメータの組合せをいかにして最適化するかということが問題になる。しかも、多くのパラメータは互いに相反する効果をもたらすことが多い。たとえば、製品の粒をそろえるために寸法公差を小さくしようとすれば値段は高くなり、安全に重点をおいた設計をしようとする製品がえてして大きくなり重くなる。つまり設計のねらいは、未知の問題の解決もさることながら、相反するパラメータを抱えて、どこに妥協点を見つけるかということが重要である」。

複数の価値を比較調整することが工学の仕事である。このとき、相反する目的が入り乱れ、トレードオフが生じる。この点に注目したい。

工学は、効率を求めると一括して言われることもあるが、工学における設計活動は、そのように一つの価値だけが突出して重要になっているのではない。もちろん、全体として機械の効率がよいことは、たいいていの設計にとって好ましい性質かもしれない。しかし、そのときに相反するパラメータをどのように調節するかという問題は難問で

ある。いわゆる工学者のバランス感覚と言われるものによって、その問題が処理されていると言われることもある。「工学の最先端にいる設計技術者は、数値解析に基づいての決定が、自分が下す決定のうちのほんのわずかな部分にすぎないことを知る。・・・解析の重要性をけなそうとしているのではない。どんな人も、解析が訓練を受けた技術者の本質的な道具だということをわかっている。しかし解析は、典型的な設計問題、特に新しい問題にあたって、技術者が答えなければならぬ問いのすべてもしくはその大多数にも答えるものではない」。

以上の考察から、三つの点が注目される。まず因果的説明や演繹的説明があっても（支配方程式と結果までもが与えられても）、工学の問題は解の多義性を含み、単純には解決しない。この意味で、工学の営みを分析するために、科学の分析とは違った分析が必要になるであろう。

そして多くの制約をバランスさせるということは、進歩の概念とは一致しない。何がいかは、そのときの状況によって決まる部分がある。絶えざる進歩というよりも、広い意味の環境への適応をめざしているといった方がピッ

タリくるように思える。

最後に、価値の選択は、トレードオフの問題であり、物理的条件によつて完全に決定されるのでないのと同様、社会的条件だけを考慮して済むわけでもないことも明らかだ。

第3章（その2） 総合の論点

設計に関して別の論点を見ることにする。

設計の主役はシンセシスである。^(三六)「新製品を生み出すエンジニアリングの過程では、解析（アナリシス）もさることながら、製品に関係するもろもろのパラメータを総合して、全体的な最適化を図る総合（シンセシス）が非常に重要である」^(三七)。

まず設計といつても、ある程度単純な、材料をつくるということを考えてみる。「これまでの理解を超えて超伝導性の臨界温度の高い物質が発見されたということは物理学にとっては重要な出来事だが、それだけで超伝導の実用化がいきなり達成されると考えるのは、物理学上の発見から工学

による利用目標の形成、そのための加工を経て実用化される作業と時間の大きさに無理解な姿勢といわなくてはならない」^(三八)。

「超伝導酸化物の高温超伝導性を含め、超伝導というところを通して理学的視点と工学的視点を考えてみると理学的視点は超伝導酸化物の一つの姿を徹底して理解しようということであり、工学的視点は本来は、超伝導酸化物のある特徴を生かす目標を想定して、それを実現するにはどんな支援技術と組み合わせればいいのかを考えることになる」^(三九)。例えば、「安定化材との共加工、多芯フィラメント化、ツイスト、この三つのどれが欠けても超伝導線は工業材料として安定な働きができない」^(四〇)と言われる。工業材料としては加工できるという特徴をもつことが大事である。この意味の性質（超伝導と加工可能性）をどうすれば調和できるか、どの程度のトレードオフを認めるかが考察すべき中心問題になる。

ここにおいても分かるように、工学においては、総合すること、どうして総合すればいいかを考えることが重要な問題になってくる。

多数の要因を一度に考慮しなければならない。これによつて何が起るかは、単純には理解しがたい。「橋梁は天候と交通量に応じて劣化する。水は鋼を浸食し、橋の土台を洗い流す。また、上を走る乗用車やトラックが橋をたわめる。過積載は小さなひび割れを引き起こし、構造の健全性を損なう。

橋梁欠陥の一般的なメカニズムについては、エンジンアの間では意見は一致しているものの、詳細については不明な点が多い。橋梁構造はコンピュータで分析するには複雑すぎるからである。一方、シミュレーションでは、単純化のために仮定をたくさん用意しなければならないので、その結果が現実と一致することはほとんどない。

いったん橋梁が劣化し始めると、荒廃は加速する。一番応力を受ける金属の梁材部分が最も早く腐食する。そして、健全な金属部分が少なくなると、応力の集中度が高まる。同様に、破壊した構造部材は耐荷重力を低下させるので、重量物の影響を一段と受けやすくなる。

単純な問題であっても、チェックされずに進行すると、重大な被害につながることもある。たとえば道路面に放置

されたごみは、排水を妨げ、水をたまりやすくする。寒冷地では、水が内部で凍り、構造材にひび割れを起こすことがある。しかし、凍結防止剤を使うと、塩分を含んだ水溶液が腐食を急速に進める。塩分濃度が臨界点に達すると、たとえセメントや構造全体は健全であっても、コンクリートを打ち替えなければならない^(四三)。

多数の要因を一度に考慮すると、たとえそれぞれの因果関係は分かっているとしても、全体として何が起るかは予想できない。多くの要因の相互作用を調べるために、コンピュータ・シミュレーションがよく使われる。しかし、ここで使われる方程式は、理想化が行われているために、実際の橋に起ることをうまく予測できるとは限らない。また、自動車事故のように、橋の上でいつ起るかを予想しにくい、いわば非線形の現象が生じるとなると、橋の劣化の予測は困難になる。

多くの要因が複雑にからみあつて相互作用する場合、例えば非線形現象の典型である流体によつて動く水車を作る場合には、理論に頼るよりも、実験をして解を出すことが行われてきた^(四三)。実験は、個別的な要因が結果にどれほど

効くかということ調べるためだけでなく、全体としてのシステムがうまく動くかどうかを調べるためにも行われる。自動車の衝突実験などもその類である。うまく総合する際に必要となる知識は、正当化ということに関わるタイプの知識とは違う。個別的な理論があるかどうかとは違った問題である。

それでは、「説明に関する統一を求める」とこと、「多様な個別的な条件を統一して機械をつくる」とこととの間には、どういう相違が見られるのか。

説明の統一ということは、理想化を目指すことが重要になる。本質を示す法則さえあればいいということにもなる。D・N説明によれば、演繹的な包含関係をもつ普遍的な法則が求められる。

ここでは何によって統一すればいいか、とか統一的に理解すべき根拠は何かという問題設定が行われている。例えば物体の本質を求めようとする、デカルトの蜜蝋の比喻を考える。蜜蝋は蜂の巣からとられたばかりならば、花の香りもあり、固くてつめたい。しかし、それを火に近づけると、香りは消え、液状となり熱くなる。しかし、これで

も同じ蜜蝋といえる。すると蜜蝋そのものとは何だったのか。花の香りでも、形でもない。そして蜜蝋に属さないものを排除していつて、あとに残るものは、広がりをもった変化しやすいものだ結論する。物体の本性を不可欠な条件 *conditio sine qua non* としてとらえようとする。そして、延長としての物体の理解は、あらゆる物体に共通の本質を示すものとみなされる。このようにして、自然的世界は統一的に説明し理解することができるだろう。

しかし、シミュレーションを行うのは、本質や個別的要素の法則を知るだけでは済まない部分があるからだ。つまり、本質的条件や制約を明示するだけで自然が理解できるものとなるかということに疑問を付すものである。すべての規則を書いて、それを知っているプログラマーでも、大きいプログラムの振る舞いをすみずみまで理解してはいえない。その意味で、不可欠な条件を探すだけでは、工学は満足しない。

「抽象化することが学問であり、抽象化するとその適用範囲が広がり、学問的にも理解しやすく、理論としての体裁をなしているように一見感じられ、皆そちらのほうに流

れ、そちらの肩を持ちたくなるが、実は現実を詳しく記述する能力は落ちているのである。本質論的説明、あるいは悪い言葉でいえば第1次近似のレベルで対象を記述し、説明するにはそれでもいかもしれないが、工学的に具体的な個々の対象を取り扱おうとすると、これではまったく役に立たず、第3次近似的な世界を築かねばならないのである。理学的立場は気楽であるが、それでは現実に対して責任をとる工学的立場とはなれないのである。そういった意味で、理学より工学は難しいのである」^(四四)。

このように、長尾真は述べる。説明の統一と設計の統一では、考慮すべきものの方向が違う。説明の統一は、理論の抽象化によってなすとげられるかもしれないが、設計の統一においては、多くの具体的問題を解決するために、他の原理を持ち込んで「きたなく」理論を修正したり、個別的な場面ごとに理論を詳細化する(第3次近似)必要がある。そのような複合的な状況においては多くの法則が相互作用する。にもかかわらず、それを調節しなければならぬ。これが設計の統一だ。これがうまくいくと、「まったく設計だ」という肯定的な評価がなされる。

第3章(その3) 具体的なものをつくる

理論をつくるというのではなく、具体的なものをつくる。これに関わる論点のうちの一つ、安全性の問題を取り上げる。つまり、理論の正当化や反証によって理論を鍛えることと、ノイズが生じて機械が間違った動きをしないように安全性を考えることとはある意味で似ている。その上でそこにはどういふ違いがあるのか。これが、ここでの問題意識の発端である。

変則事例が生じた。これは法則の存立にとって重大な事態である。しかし、理論や法則にとって、その事態に対する一つの対処は、整合性であろう。法則、更には補助仮説をどれほどうまくすれば、整合的になるかを考える。そして、この場合には論理的分析が効力を発揮する。

それに対して、『実際の設計』では次のように言われている。「ベアリングを選択することも大切だが、それ以上に大切なことは、ベアリングと荷重点をなるべく近づけて配置するように設計することである。静的には材料力学の

梁のモーメントを思い出せばしごく当たり前の話である。しかし動的には、設計図では見えにくい不つり合いによる力や慣性力があちこちに発生し、動く速度によつてそれらが共振すれば非常に複雑なモードをもつ振動が生じる。計算してやろうと考える前にまず軸受にかかるモーメントを小さくして系としての剛性を高めてやる方が望ましい^(四五)。

ベアリングにかかる力は静的には計算することもできる。しかし、動的には複雑なことが生じる。従つて、この複雑さを計算するよりも、複雑さの生じる範囲を限定しようとする。これは機械をうまく動かすための方法の一つである。

人間は誤ることがある、また思いもかけないミスをしているかもしれない。それがあつたにしても、機械がうまく動くということをめざしている。

このような場合、ときに行われる方法が冗長度を高めることである。そして冗長度は、理論の単純性とは相反する論点になるだろう。

法則を鍛える場合には、反証を処理することが必要になった。このときには、完全に首尾一貫していることを確

かめることが目標となる。しかし、完全な説明とか、普遍性をもつ説明をめざしても、あまりいいとは思えない。どうせこの世界には、予想もしないことが起こる。だから、危機管理や安全率の顧慮の方が、現実の世界で動くことを考えると合理性を示すことになる。

エラーに対処した機械を作ることと、批判を免れた理論をつくることとは違う。後者は、そんなものがあつたにしろ、どこか遠い未来の目的である。しかし、前者はこの現実の世界に使えるものになっている。もちろん絶対の安全は不可能だ。爆弾によつて家は壊れるだろう。しかしそのときは、予想された使用条件を越えており、コスト等とのトレードオフがあるので、家が壊れても仕方がない^(四六)。後者は論理的可能性を考えて、それに対処しようとする。それに対して、前者は現実的可能性しか考えない。そのため、思わぬ落とし穴にはまることもある。しかし、それはわれわれが機械を使うためのリスクであり、コストである。機械は動かなければ何にもならない。

結論

以上の考察を二通りの仕方で見直してみる。一つは、一貫した具体例を使って工学の見方を提示することである。もう一つは、以上の論点を踏まえた上で、工学はどういう意味で合理的な営みと言えるかを考察することである。

一九七〇年四月に起こったアポロ13号の事故は、宇宙空間で起こった大事故(二つあった酸素タンクが二つともダメになった)である。しかし、それにもかかわらず三人の宇宙飛行士は地球に無事に生還できた。これはアメリカの優れた技術力を示している。工学における「設計」の考えをここに見てみよう。

この宇宙船には、水素と酸素を反応させて電力を発生させ、その副産物として必要な水を生み出す燃料電池と呼ばれるものがあつた。実は酸素タンクの一方の内部の配線の絶縁被膜が、地上でのテストの際に誤ってはがれてしまっていたのである。それを知らずに宇宙で酸素タンクのファンを廻す操作をしたために、アーク放電が起こり酸素タンクは温度が上がり圧力が高くなつて破裂した。

さて、後に事故原因が究明されて以上のことが分かっ

ただが、その事故の当初は酸素が船体から漏れているという結論に達するのに十三分もかかっている。そして宇宙船が修復不可能なダメージを受けたと認めるまでに更に一時間かかっている。異常がどこに生じたかを知らせる警告ランプはつき、確かに爆発の振動を宇宙飛行士は感じていたのに。しかし地上の管制官も含めて、アポロの安全性を確信していたこともあつて、異常を知らせる警報システム自体に異常が起きたのではないかという「計器の不調」という解釈がその間何度も行われたりした。あるメーターが読み取れないという小さなトラブルはたまにあるものだ。そしていくつかの可能性を試すために、スイッチを切ったり、計器の表示を読み上げたりした。そこで一方の酸素タンクの圧力計がゼロと表示されているのを知り、船外にうすい霞がただよっているのを見たとき、乗組員は酸素が漏れていることを確信した。

いろいろな計器を備えていても、このように、故障の診断のような逆問題の解は多義的になる(これが、「第3章その1」の論点だ)。そして最終的な原因は、地球に戻ったあとの究明を通じて発見されることになった。

多数の要因を考慮しなければならない。そして、宇宙飛行はどんな事故が起こっても、それを実時間で解決しなければならぬ。そして時間の制約を受けつつ、燃料、酸素、水、電気等の制約の下で地球に帰還するという問題解決をしなければならぬ。宇宙飛行に使うチェックリストの中には電話帳ほどの厚さになるものもある。アポロ13号では、予め予想しなかった条件が起こっても、地上にその宇宙船と対応するシミュレーターがあったために、その中で複合する条件をいろいろ試すことができたのが重要だった（これが、「第3章その2」の論点だ）。

また、アポロ宇宙船は、ほとんどすべてのものが二つ以上ダブル搭載されていた。その意味で冗長度の高い余裕のある設計になっていた。これがNASAがアポロに対してもっていた安全性に対する絶対の自信の根拠であった。そして究極の冗長系というものがもう一つの宇宙船、月着陸船だった。これを救命ボートとして使うことによって最終的に地球への帰還が可能になったのである（これが、「第3章その3」の論点になる）。

さて次に、第二の問題、工学の合理性の問題を論じる。

工学の合理性は、理論として完結しているとか、整合的であるというのとは違っている。機械が環境にうまく「適応」することが、その合理性の中心をなすと思われる。

さて、第2章では、科学の法則を応用するためには、何を考えねばならないかを概観した。そこでは、応用することが、単純に行えることではないことが示された。そのことから、幾つかの原理からの演繹という仕方では、工学の合理性を判断することが不可能だということは理解される。

また、第3章では、設計と結びつく論点を見てきた。設計は逆問題である（3章その1）ということから、単純に論理的な演繹とは違うアプローチが、設計を理解するには必要だとここでも示された。また、総合するという側面（3章その2）では、理論を作り上げることと機械を作ることの相違が示された。ここでも、普遍性、体系性とは違った仕方では合理性を理解すべきことが示唆された。最後に、安全性（3章その3）ということと関わって、理論の正当化と機械の安全性の違いを見てきた。これは、首尾一貫した理論を作ることを目指す態度と、ある限定された場

面であまく動くものを作ろうとする態度の相違である。

最後に考察しなければならぬことは、多くの場面に
出てきた「総合する能力」である。分析的な能力は演繹と
いった仕方、合理的に解釈されやすい。それに対して、
総合する能力、バランス感覚は非合理的なものと見間違われ
やすいものである。総合するということは、どういう意味
で合理的か。

演繹とか議論に関わる論理的な意味での合理性とは違
うという否定的な答えはすぐできる。それに対して、積極
的な答えを与えることはなかなか難しい。

総合はしている。しかし、それはムチャクチャなことを
しているのではない。シミュレーションをして全体の振る
舞いを調べることは有用である。しかし、それだけでは十
分ではないのも確かだ。それでは、総合においては、全く
の試行錯誤ではなくて、どういう制約があるのか。こうい
うように問いを立てることができる。

ここでは、一つの試み^{四人}だけをあげておく。それは、
ヒューリスティクスという考えである。Koenは工学の
方法はアルゴリズムではなくてヒューリスティクスだと^{四人}

いう論点を提出している。彼は、ヒューリスティクスの
特徴を幾つか挙げてている。例えば、解を保証しないとか、
実用的な基準に基づいて受け入れられるとか、相互に
矛盾してもいいが、複雑で理解できない問題を解くのに用
いられるといったものである。これは、論理的ではないに
しても、何らかの制約の下で工学が存立していることを示
しているとも考えられる。この論点を更に吟味すると、説
明的な統一性はないにしても、実用的な基準では合理的と
いえる基準が見つかる可能性はあると思われる。

この指摘だけでは、十分な結論を示したとはとてもい
えない。しかし、工学の特異性の確認はまだ始まったばかり
であり、工学の合理性の根拠の探究は、これからの研究
の大きな課題だと言いたい。そして、この合理性の解
明がうまく行えれば、以下の帰結に到達できるだろう。

この点に関して、アイデアを思いつくことと設計す
ることとを区別して一つの論点を述べる。これは、イマジ
ネーションのみを強調する芸術作品といわれるものと設計
との違いも示している。芸術では、原稿を書くとか、色を
塗るとか、五線譜をうめるといったように、制作に際して

の技能よりも、イマジネーションが特に重視される（実際はともかく、こういう印象があることは否めない）。

工学の内部でもアイディアは強調されることもあるが、やはり以上見てきたようにある程度の合理性をもって具体的に総合を行っているということに注目すべきであると思われる。

芸術の活動や全知全能の神の創造においては、総合において考慮が必要な様々な制約を無視することが可能であった。しかし、芸術と比べて、工学においてはこのようなごまかした条件を総合し、しかも何か「合理的な仕方」で行っている。その点に気づいて、そのタイプの合理性を分析することが重要である。

さて、設計とは頭の中で考えたものを、現実のものとして実現することである。これは、一般に何かの計画を遂行しようとする場合の我々の知的能力に関わる。そのとき、モデルや法則を我々の知識の典型とみなして、それについて考えても、複雑な現実の世界で生きる知識の考察にはならない。

工学の示す合理性は普遍的法則からの演繹によって保

証されているものではないし、科学理論の形成において探究されてきた合理性とも一致しない点を含んでいる。そして、現実が与える制約を考慮しつつそれを総合しようとするのが工学の試みである。従って、この世界に生きていく我々の知識の姿は、工学の知識を研究することによってより明確になることが期待されるのである。

注

(一) Mario Bunge, 'Technology as Applied Science,' in *Technology and Culture*, Vol. 7 No. 3, 1966.

(二) ホバーによれば、応用科学者は、批判的思考を身につけていないという意味で、悪い教育を受けた人々である。K. R. Popper, 'Normal science and its Dangers,' in I. Lakatos & A. Musgrave (ed.), *Criticism and the Growth of Knowledge*, Cambridge U.P., p. 52f. 邦訳ホバー「通常科学とその危険」(邦訳イ・ラカトシュ/A・マズグレイヴ編『批判と知識の成長』(木鐸社) 所収)

(三) この論点に関しては、拙論「レイトンとエンジニアリングサイエンス」(『大阪体育大学紀要』第二五卷(一九九四年) 所収) を参照。

(四) Henryk Skolimowski, 'The Structure of Thinking in Technology,' in

Technology and Culture, Vol. 7 No. 3, 1966.

(十四) Edwin T. Layton, Jr., 'Through the Looking Glass, or News from Lake Mirror Image,' in *Technology and Culture*, Vol. 28, 1987, p. 603.

(十五) I. Lakatos, 'Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes,' in I. Lakatos & A. Musgrave (ed.), *op.cit.*, pp. 91-196 (邦訳ラカトシユ／マスグレーヴ編、同上書、一三二―二七八頁所収)ただし訳語に関しては、『方法の擁護』内の同名論文(村上陽一郎・

井山弘幸・小林傳司・横山輝雄共訳、新曜社)も参照した。

なお、以下すべて、訳文が公刊されていれば、ほぼそれに従うよう
にしてゐる。

(十六) Nancy Cartwright, 'The Born-Einstein Debate: Where Application and Explanation Separate,' in *Synthese* 81, pp. 271-282, 1990, p. 272.

(十七) Nancy Cartwright, *op.cit.*, p. 271.

(十八) Ronald Laymon 'Applying Idealized Scientific Theories To Engineering,' in *Synthese* 81, 1989, p. 353.

(十九) ウィリアム・ショックレー／ウォルター・A・ゴング著、菊地誠訳、日本放送出版会、昭和四三年六月。

(二十) ショックレー／ゴング、同上書、二頁以下。

(二十一) ショックレー／ゴング、同上書、一一六頁。

(二十二) 國井利泰編『b・i・t別冊 コンピュータサイエンスのキャリアラム』には、ACMのこれまでのキャリアラムのすべてと、それをめぐる論文が含まれている。

(二十三) 実はこの論点についての議論は、『b・i・t』一九九一年四号と五号において『計算科学教育に関する討論』として行われている。そこではダイクストラ Esger W. Dijkstra が数学的、論理的観

点のみを強調しようとするが、批判者はそれ以外の問題を解決することが、コンピュータサイエンスには重要だと論じる。尚、拙論

『コンピュータの工学化』(『大阪体育大学紀要』一九九五年

八月)も参照。

(二十五) また、例えば、十九世紀の初期には、理論式の修正を、式そのものの修正ではなく、式の「係数」を適当に修正することによって行うことが、技術論文ではだんだん一般的になっていった(T. S. レイノルズ『水車の歴史』(平凡社)、二七四頁以下)。

(二十六) 畑村洋太郎編著『実際の設計』(日刊工業新聞社)、二三八頁。

(二十七) レイノルズ、同上書、二三五頁。

(二十八) レイノルズ、同上書、二三六頁。

(二十九) Ronald Laymon, *op.cit.*, p. 353f.

(三十) この論点に関しては、T. S. レイノルズ、同上書、二七一頁も参照。

(三十一) Ronald Laymon, *op.cit.*, p. 365.

(三十二) この論点は、我々の認知能力を考へる場合にも、「設計」を考へる場合にも重要な論点である。松原仁・橋田浩一「情報の部分性とフレーム問題の解決不可能性」(『人工知能学会誌』Vol. 4

No. 6 (一九八九年)、六九五―七〇三頁所収)、及び、橋田浩一・松原仁「知能の設計原理に関する試論―部分性・制約・フレーム問題―」(『認知科学の発展』Vol. 7 (一九九四年)一五九―二〇

一頁所収)を参照。

(三十三) Ronald Laymon, 'Idealization and the Testing of Theories by Experimentation,' in Peter Achinstein and Owen Hannaway (ed.), *Observation, Experiment, and Hypothesis in Modern Physical Science*, p. 147.

(三十四) Ronald Laymon, *op.cit.*, p. 155.

(三十五) cf. Ronald Laymon, *op.cit.*, p. 168.

(三十六) 久保司郎「科学も技術も逆問題として考へると、新しい解き方が使えるかもしれない」(『おれきてる』一九九五年第五号、

(樹東芝)、二七頁。また、久保司郎「計算力学とCAEシリーズ10逆問題」(培風館、一九九二年)も参照。

(二七) 久保司郎「科学も技術も逆問題として考えると、新しい解き方が使えるかもしれない」、二七頁以下。

(二八) 久保、同上書、二九頁。

(二九) 久保、同上書、二九頁。

(三〇) 例えば、「パネルデイスカッション 21世紀の計測と制御—より人間的な科学技術を目指して」(「計測と制御」第三二巻第一号、一九九二年一月)における古川俊之の発言(五六頁)。

(三一) 例えば、吉川弘之「テクノグローブ—技術化した地球」と「製造業の未来—」(一九九三年十二月、工業調査会)八四頁以下を参照。

(三二) 久保、同上書、二八頁。

(三三) 江守一郎「これからの設計—」(日本機械学会誌)第八四巻第七四九号、昭和五六年四月)、三一八頁。

(三四) 'Report on Engineering Design [MIT Committee on Engineering Design]' in *Journal of Engineering Education*, Vol.51, No.8, 1961, p.650.

この論点に関しては更に'E. S. ファーガソン『技術屋の心眼』(藤原良樹・砂田久吉訳、平凡社)、Eugene S. Ferguson, *Engineering and the Mind's Eye*, MIT Press, 1992. の第六章も参照。

(三五) ファーガソン、同上書、四一頁以下、Ferguson, *op. cit.*, p.23.

(三六) 例えば、北郷薫「機械設計論—機械設計学建設の道—」(「精密機械」四三巻一号(一九七七年一月号)所収)、二七頁。

(三七) 江守、同上書、三一八頁。

(三八) 萩原宏康「工学的視点と理学的視点の接点—超伝導を例として—」(「日本機械学会誌」Vol.193 No.862(一九九〇年九月)所収)、七五〇頁。

(三九) 萩原、同上書、七五二頁。

(四〇) 萩原、同上書、七五〇頁。

(四一) 例えば加工法(鑄造、切削、溶接、射出成形など)のことを考えると、「製作する物の材質、硬さ、形状、各部分の寸法精度、形状精度、コスト、総生産量などはすべてに企画・設計で決められており、また社内や組織内でどんな加工法でも可能なことは稀であり加工法が限定されることもある。加工法の選択はこのような制約の中で、様々な加工法の中からどのような方法でその物を作るのがより良い方法なのかを決定することである。造りたい物を加工する方法は一通りではなく、いくつかの方法が考えられる場合が多いが、製品の品質・コスト・製作にかかる時間などの要因に重みづけを行い、そのときの目的に合ったより良い方法を選ぶ」(畑村洋太郎編著『実際の設計』(日刊工業新聞社)、一一四頁)。

(四二) K. F. ダンカー/B. G. ラバット「米国の橋はなぜ落ちる」(「日経サイエンス」一九九三年五月号所収)、八〇頁、Kenneth F. Dunker and Basile G. Rabhat, 'Why America's Bridges are Crumbling,' in *Scientific American*, March 1993, p.20.

(四三) レイノルズ、同上書、二七一頁。

(四四) 長尾真「AIマップ—自然言語へのアプローチ」(「人工知能学会誌」Vol.9 No.4(一九九四年七月)所収)、五三三頁。

(四五) 畑村、同上書、二四八頁。

(四六) このあたりの論点については、ヘンリー・ベトロスキ「人は誰でもエンジニア」(鹿島出版会)第4章、Henry Petroski, *To Engineer is Human*, Vintage Books, Ch.4を参照。

(四七) 以下の論点については、ヘンリー・クーパー・ジュニア「アポロ13号奇跡の生還」(立花隆訳、新潮社)、及びNHKでの一九九五年八月二六日放映「海外ドキュメンタリー 実録アポロ13号」生

還への記録』(グローバル・サイエンス・プロダクション制作、アメリカ、一九九五年)に依存する。

(四八) その他、クーンが科学革命の合理性について述べているところも参考になる。クーン『本質的緊張』(みすず書房) 第十三章。Thomas S. Kuhn, *The Essential Tension*, The University of Chicago Press, Ch. 13. またクーン「批判者に関する考察」(ラカトシュ／マスクレーヴ編、同上書所収)、三二二頁以下、T. Kuhn, *Reflections on my Critics*, in I. Lakatos & A. Musgrave (ed.), *op. cit.*, また伊藤邦武「ソラダイム論の展開」(内井惣七・小林道夫編『科学と哲学』(昭和堂一九八八年)所収)を参照。

(四九) Billy Vaughn Koen, 'The Engineering Method,' in Paul T. Durbin (ed.), *Critical Perspectives on Nonacademic Science and Engineering*, Associated University Presses, 1991.