

第73回アブダクション研究会開催のご案内

アブダクション研究会

世話人 福永征夫
TEL & FAX 0774-65-5382
E-mail : jfdf117@ybb.ne.jp

事務局 岩下幸功
TEL&FAX 042-356-3810
E-mail : yivashita@syncreate.jp

第73回アブダクション研究会の開催について、下記の通りご案内を申し上げます。

(1) 第72回アブダクション研究会のご報告

10・3・27に開催致しました前回の第72回アブダクション研究会は、『技術の歴史とアブダクション』というテーマで、小西 義昭 氏（日機装技術研究所・日本機械学会フェロー・技術士）に、ご発表をいただきました。

小西 義昭 氏の「とても小さな流れを測る」プロジェクトの見事な成功例や「葦（33）の髄と盲点」の話題など、技術者魂と気骨に溢れた独創的なお話を伺って、出席の皆様が共感と感銘を得られ、懇親の場も含めて、大変に盛会でした。小西先生に感謝をし、出席の皆様にお礼を申し上げます。

内容の報告資料としては、以下に、小西 義昭 氏に執筆していただいた“「技術屋の心眼」とアブダクション”を掲載いたします。

小西先生が参考文献に挙げられた、E・S・ファーガソン著「技術屋の心眼」は、豊かな内容を持ち、説得力に富む、真にすばらしい同時代人の著作で、近代の人間の理解と行動の歴史を捉えた重要な文献だと思われまます。そこで、(2)では、世話人が「技術屋の心眼」を抜粋・要約・編集した概要を掲載しておきます。

会員の皆様には、ご出席の有無を問わず、繰り返して、吟味と玩味をいただき、ぜひとも、皆様の知識の広域化と高次化に向けた探究と研鑽のためにお役立て下さい。このレポートの読後の感想を、グループメール上などにて、積極的にお聞かせいただくことを期待しています。

「技術屋の心眼」とアブダクション

2010.04.12

小西 義昭

【帰納／演繹とアブダクション】

理学にしても工学にしても、各種の経験や実験などから法則を求め(帰納)、法則を実際の例に適用する(演繹)

を繰り返すことで、法則の信頼性を増している。

理学では、何年かけてでも完全な法則を求めることが重要であり、工学では今すぐ実施することが重要であり、たとえ条件が不足しても、不完全な法則でもあえて使用する。目標とすることは異なっても、両者共に方法は同じである。しかし、この帰納と演繹の繰り返しのみでは限界がある。

実際には、技術者は、その時点では論理的説明から飛躍して直感により先に進む。この実践的直感とも言うべきものを、ファーガソン(E.S.Ferguson)は Engineering and the Maind's Eye (技術屋の心眼:藤原良樹, 他訳)と呼ぶ。また、パース(C.S.Peirce)はアブダクション abduction と表現している。

アブダクションは、多くの例から、帰納して法則を導くのではなく、仮定した法則自体に、すでに演繹による結果が内蔵されている「繰りこみ構造」であるという。

例えば、「木を彫って木像を造る」のではなく、「木の中に閉じ込められている木像を取り出す」のだという仏師の表現・言葉に共通するものがあるのではないかと思う。

『張り紙禁止』と書かれた張り紙は、禁止の対象になるかどうかの推論は、同一階層または前後の階層を繋ぐものとしての「帰納・演繹」を超えた、いわばステップをもう一つ飛びこした階層構造が考えられる。

このような、「繰りこみ構造」や「階層構造」であるならば、アブダクションは、「直感や偶然でありながら、後から見れば論理的」、「条件が揃うまでは飛躍があるが、条件が揃ってみれば論理的」というようなものと考えられないであろうか。

【心眼と飛躍】

「技術屋の心眼」によれば、技術者は文章や言葉によらず、画像で表現することで、自らの意志を伝えることが可能であるという。また、画像や図面として取り出す以前の段階に、頭の中で構造を作り出し、動かし、作用させることが出来る。この結果得られた新しい方法、手段、または法則は、実際のものにより演繹、帰納されることで、頭から抜け出し、新発明や新技術として確立し、検証可能となる。

またこの飛躍を可能にするのは、それ以前に、多くの経験や思考を暗黙知として積み重ねていること、それまでの自己を積極的に否定するリスクを許容し、実践する能力を持つことが前提である。

飛躍するための足場と、その足場から空中に飛躍する力と、決断力のいずれが欠けても実現しない。

民話の「わらしべ長者」が、道で1本の麦藁を拾い、トンボを捕まえて結びつけ、出会った子どもに無償であげ、長者と知り合いになることから、自分が長者になる偶然の積み重ねの御伽噺も、要素は同じである。風呂に入り、りんごが落ちるのを見ても、アルキメデスやニュートンと同じことが出来る訳ではないし、運という計測不可能の事象を含めて能力があっても、誰もが飛躍可能になる訳ではない。偶然に行ったことが、新発見や成功に直接つながる結果を導くというセレンディピティーと呼ばれる能力も之と同じである。

NASAの前身であるNACA(アメリカ航空諮問委員会)の管理下にあったラングレー研究所では、航空機の翼型による揚力と抗力の広範で緻密な研究は、NACA系列翼型としてよく知られている。その研究所にて風洞実験により超音速機の空気抵抗の研究をしていたホイットカム氏は、超音速機の翼の胴体への取付け方法の試行錯誤の後、「面積一定の法則」として翼と胴体の断面積を一定に保つという方法を思いつき、実施した。これは最も強度が必要な胴体の翼取付け部を逆に細くすることを意味する常識からは誰も思いもつかない大きな飛躍をした考えである。これにより問題解決の方向が見え、実際に設計に反映したが、強度計算と実績に裏づけられた結果が出てからであれば、超音速機に限れば常識のほうが変わることになる。

【思い込みとヒューマンエラー】

これが反対に悪い方向に動けば、ヒューマンエラーとして事故の原因の一つになる。

例えば、過去の経験と実績に基づいて設計されたはずの端が、強度不足で崩壊したケベック市橋の例では、事故後すぐにサイエンティフィック・アメリカン誌が強度に関する技術的評価を掲載しているが、強度に関していかにも初歩的なミスとの印象を受ける表現がある。教育的な意味では正しいにしても、根本的な解決にはならないことがある。

当事者である設計者は、橋に関して全てにわたって完全でなければならぬが、事故が起きてから、少なくとも1つの欠陥部分を探し出し、検討不足と評価し、コンピュータ設計が発達した現在では起こりえないという考え方を

するのは、目を狭い領域に限定させ、直感の能力と活動を鈍らせ、次の事故の複線になりうる。

過去の事故の事例から、十分に強度のある材料を開発し、コンピュータで設計したが、タコマ橋は、重力方向には十分な強度を持っていたが、横風により吊り橋の中央部分が振じれて、崩壊した。これに対して、強風によるカルマン渦の影響を当時は十分に検討されなかったことが原因であり、現在では問題ないという指摘は、日本の原子炉「もんじゅ」の温度計破損事故は、カルマン渦は十分検討されたが、当時は破損の原因の一つである双子渦については十分知られていなかった。と、続くことになる。タコマ橋の場合には橋を上から吊り上げるだけで、横揺れを防ぐために下から引っ張るロープが無いという、経験豊富な技術者から見れば、バランスを欠いた設計になっていた。強度に囚われて全体を見るための心眼が欠けていたともいえる。

【非論理的なコンピュータ設計】

立体骨組み構造の設計計算が複雑であった時代に、コンピュータによる設計計算が持ち込まれ、設計者が容易に設計できることになったが、このコンピュータで設計した立体骨組み構造のハートフォード体育館がそれほどでもない雪の重さで崩壊した例がある。

コンピュータ設計というのは、設計者が設計の方法を示し、コンピュータ・ソフトメーカの指示した操作方法によって、馬鹿正直で疲れを知らないコンピュータが計算を行い、問題が無いことを確認したという意味であり、設計者はコンピュータの内部の詳細な論理構造を知らずに、またはコンピュータ内部の膨大な量の論理構造をチェックすることが不可能なままで無条件に使っているという意味である。コンピュータ・ソフトの技術者がある条件の下で創った汎用性の高いソフトウェアを、一般の技術者がソフトの内部を知ろうとせずに自分の領域で適用を図っていることであり、両者の間のギャップは誰も埋められない。しかし、論理的には繋がらなくとも直感的に繋がるものもある。

【技術の歴史とアブダクション】

その時代に生きている人々には、自分の属している社会がどちらに、どのように進むかはよくわからないが、過去から現在までの技術の流れを見れば方向が示されていることが容易にわかる。19世紀末のゴーギャン P. Gauguin の絵画で『われわれはどこから来たのか われわれは何者か われわれはどこへ行くのか』 D'où venons-nous ? Que sommes-nous ? Où allons-nous ? という題のものがある。これは永遠の課題であると同時に、課題の中にすでに答えそのものを示されてはいないであろうか。

時には飛躍をそのまま受け入れる姿勢を持ち続けることが、自分自身が何処へ行くのかを示す機会に繋がるように思う。

以 上

(2) E・S・ファーガソン (Eugene S. Ferguson = 1916~2004) 著 = 藤原良樹・砂田久吉訳

『技術屋の心眼 (Engineering and the Mind's Eye)』(09 平凡社) の概要

[序文]

[1] = 多くの人工物が科学的ではない思考法を用いて作られてきた =

● 技術によって生み出された人工物に含まれている知識は、どんなものであり科学がもたらしたものにちがいない——科学の時代と言われる今日、こうしたあまりにも安直な考えが一般的となっている。これは現代の俗説の一つであり、そうした俗説は、技術に携わる人々がわれわれの住んでいる世界を形づくるに際して、科学的とはいえない

い多くの決定——大きなものも小さなものも——をしていることを無視している。日常使用している多くの物体が科学の影響を受けていることはたしかである。しかし、それらの形状、寸法、外観は、技術に携わる人々——職人、技術者、発明家——によって、科学的ではない思考法を用いて決定されてきたのである。肉切りナイフ、橋、時計、航空機が今の形をしているのは、それらの設計者や製作者が長い年月にわたって、形状、様式、構造を確立させてきたからである。

[2]=心眼は思考に必要な新しいイメージや修正されたイメージを形成してくれる=

●技術に携わる人々が構想している物体の特徴や特質の多くは、言葉では明確に表現することができない。それゆえ、心の中で、視覚的で非言語的なプロセスによって処理されることになる。心眼は極めて進化した器官であり、視覚による記憶の内容をよみがえらせるだけでなく、心の中での思考に必要な新しいイメージや修正されたイメージをも形成してくれる。

[3]=看過されてはいる重要な思考様式を正しく認識しなければならない=

●工学(エンジニアリング)の特質を理解しようとするなら、この、看過されてはいるけれども重要な思考様式を正しく認識しなければならない。われわれの物質的な環境の概要を定め、細部を完全なものにしてきたのは、おおむね非言語的な思考である。数多くの選択と決定を通して、技術に携わる人々はわれわれが住んでいる世界の——物理的な意味での——タイプを定めてきた。ピラミッド、大聖堂、ロケットが存在するのは、幾何学や構造理論、熱力学のゆえではなく、これらを思いついた人々の心の中にとにかくも像——文字どおり想像図——としてあったからである。

[4]=現代の工学は、非言語的な学習と非言語的な知識に大幅に、依拠してきた=

●現代の工学——すなわち、ここ500年間の工学——が、非言語的な学習と非言語的な知識に大幅に、そして常に依拠してきたことを論じよう。20世紀の半ばまでは、工学系の学校は図面の描き方を教えることで工業製図の知識を与えてきたし、実験室での実験を通して、材料や機械の特性への正しい認識を培わせていた。技術者が身につける深い知識の大半は本来非言語的なものであって、熟練者が蓄積した直観的な類のものであると理解されていたのである。

[5]=工学の主流は、数式的な関係に表現できない知識を敬遠する傾向にある=

●第二次世界大戦以後、工学の主流は、数式的な関係に表現できない知識を敬遠する傾向にある。社会的な地位が高く教えるのも容易で解析的な「工学的科学」(エンジニアリング・サイエンス)が好まれ、工学的技能は隅に押しやられてきた。・・・言語によらない学習という工学における貴重な遺産を無視した教育は、無数にある微妙な点——そこでは、現実の世界は教授が教えてくれた数学的な世界とは異なっている——について恐ろしいほど無知な学生を生み出してしまおうということである。

[第一章 工学における設計の特質]

[6]=新しい人工物をつくり出すには、密接に関連した二つの過程を必要とする=

●新しい機械や構造物、あるいは技術によるその他の人工物をつくり出すためには、一般に、別のものであるけれども密接に関連した二つの過程を必要とする。まず第一に、設計者は、自分の心に浮かんだイメージを図面や仕様書に変えていく。このなかで、彼らは、明確になっていない問題を解決していく。そうした問題には、唯一の「正しい」答えはなく、数多くの答——よりよいものもあればより悪いものもある——がある。心の中の構想を明確にし、どうすれば不明瞭な要素をはっきりさせられるかを求めて奮闘するのが設計の過程だが、技術者はこの過程を通して多くのことを学ぶ。問題を理解したと思えば、仮のレイアウトや図面を作成し、その仮の設計について、性能、強度、安全性が十分かと分析してから、一組の図面と仕様書を完成させる。第二の過程は、完成した図面と仕様書を中心に展開する。機械や構造物、あるいはシステムを製造したり構築したりする人は、今や自分たちは何をつくり出すことが望まれているのかを正しく知ることができる。彼らの仕事が完了し、プロジェクトが使用者に引き渡され

るまでは、図面と仕様書が仕事を指図する正式の指示書となる。

[7]=アイデアを人工物にするのは複雑・微妙な過程で、科学よりも芸術に近い=

●工学分野の図面は図形による言葉で書かれており、その文法と構文法は実際に使うなかで学ばれる。そこには伝授を受けた者にしか理解できない慣用的表現もある。・・・図面は正確であいまいなところのないもののように見えるけれども、その厳密さの背後には、多くの公式に則らない選択や言葉では表せない判断、直観の働き、そしてあらゆるものの作動の仕方についての仮定が隠されている。設計者と製作者の双方を結びつける、アイデアを人工物に変える過程は、複雑で微妙なものであり、どんな場合でも、科学よりも芸術に近いといえるのではないだろうか。

◇図面を用いない設計——職人の方法

[8]=アイデアが職人の頭の中にあれば、ただちに製作に入ることができる=

●職人の心の中にだけイメージされて直接適当な材料に描かれるにせよ、あるいは、コンピューター画面上で作図されて自動的に製作図がつくられるにせよ、設計では何が必要なかを考えるために、職人がどのようにして仕事をしているかを見ることから始めるのがよいだろう。ある物がつくり出される時、それはまずアイデアとして存在する。それが、鮮明な想像図となっている場合もあるだろうし、単に可能性をもったひらめきにすぎない場合もあるだろう。アイデアが職人の頭の中にあれば、ただちに製作に入ることができる。要求されるのは、材料とそれを望みの物に変えるのに必要な道具と腕だけである。18~19 世紀のアメリカ独特の斧は、鍛冶職人が伝統的なヨーロッパの市販の斧の設計を改良したことから始まっている。斧の頭を徹底的に重くし、その頭の頂部の金属部分を多くすることで、重切断や木の伐採用に斧のバランスが根本的に改良されている。この新しい斧の形は、経験豊かな木こりからの提案や批判に耳を傾けた鍛冶職人によってさらに改良された。職人は、構成要素の形状や配置を忘れないようにするために、紙や製作しようとする物の材料の上にアイデアのスケッチを描くこともあれば、一部の舟大工がするように、すぐさまアイデアを模型にする作業に取りかかることもあるだろう。いずれにしても、選定された材料は設計において積極的な役割を果たす。職人が材料の何らかの特性を見誤ったと気づけば、構想を修正させることになるからである。最後に、斧の場合のように、使用者が重要な役割を演じる——設計の途中の場合もあるけれど、多くはその後の完成品の性能についての報告で——こともあろう。

◇図面を用いた設計——技術者の方法=

[9]=技術者が頭の中のアイデアを製作者に説明するためには、図面が必要になる=

●製作しようとする物のアイデアが職人の頭の中ではなく技術者の頭の中にある場合には、製作する作業者にその構想を説明する手段が必要となってくる。500 年以上にわたって、技術者は自分たちの頭の中にあるものを作業者に伝えるのに、ますます頻繁に図面を利用するようになってきた。設計者の直接の管理下でない作業者によって製造される機械の図面のうち、極めて早い時期のものいくつかは、フィリッポ・ブルネレスキによってつくられている。ブルネレスキは、15 世紀の初頭、フィレンツェのサンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂の巨大な石造ドームの建築を設計・監督した人物である。クレーンの独創的な設計が盗まれないように、ブルネレスキは各種の部品の図面を市外の別々の作業所に送り、できあがったものを受け取って組み立てた。

[10]=設計はアイデアを心眼で処理し、全体としての構図を決断して始まる=

●職人の直接的な設計と技術者の設計図との間の違いは、考え方の差というよりは形式の差である。いずれの場合も、設計は一つのアイデア——時には明確な、時にはあやふやな——から始まる。そのアイデアは、心のスクリーンに映し出して、観察したり心眼によって処理したりすることができる。職人あるいは技術者の設計に関して、「大きな」、重要な、そして決定的な決断は、職人が道具を取りあげる前、あるいは技術者が製図版に向かう前になされるのが普通である。まず、このような大きな決断がなされねばならない。・・・それゆえ、最終的な設計を生み出すのに、職人も技術者もともに、要素から始めてそれを組み合わせていくなどということはいささかもなく、完全な

機械、構造物、装置の構想から出発するのである。

[11]＝現代の複雑な装置は、チームを組んで設計するのが普通である＝

●内燃機関のような現代の複雑な装置は、チームを組んで設計するのが普通である。個々の技術者がもつ専門の知識は、全体にわたる問題の種々な要求を満たすのに寄与する。予期しない問題で修正を余儀なくされるときであっても、設計チームは、全体の設計に絶えず心を配っている一人の技術者に率いられている。

[12]＝計算機のプログラムが設計の原理や技法を完全に表現することはできない＝

●技術者が予期されていなかった難問と取り組む場合は、必然的にエンジンの設計は修正されることになる。そうした難問は、「図面上の部品」が金属の部品に変換されたとき初めて表れる。エンジンのいろいろな要素の働きを調和させるために、無数といってよい設計上の選択がなされてきたであろう。なかには間違った選択もあったろう。しかしながら、間違った選択をすることも、正しい選択をするのと同じ類いのゲームなのである。別のことではなくてある一つのことをするのに、ほとんどの場合ア・プリオリな理由はまったく存在しない。どちらもまだ実行されたことがない場合はなおさらである。「設計の科学(デザイン・サイエンス)」の推進者たちが、設計者の判断を汎用コンピュータのプログラムに組み込むことができるとどんなに信じていようと、技術における設計の原理や技法は、けっして完全に表現することはできない。

◇工学の知識

[13]＝設計者が使う知識は、主要部分が科学に由来しているが、科学ではない＝

●技術分野の設計者が用いる表向きの知識は、その主要部分が科学に由来しているとはいえ、科学ではない。これには、実験的証拠だけでなく材料やシステムについての経験的な観察に基づいた知識も含まれている。航空力学者で工学の知識の発展の跡をたどったウォルター・ヴィンセントは、工学の知識は何よりも、技術分野の設計者の必要に応ずべく発展させられ公式化されてきたと論じているが、それには説得力がある。・・・(航空機の製作に関して、)1930年代には、設計者、操縦士、航空力学者、計測の専門家は次のような合意に達していた。すなわち、航空機は、瞬間的な異常による惨事を避けられるだけの安定性をもたなければならないが、操縦士が最適な制御を行うのに必要な不安定さをもたなければならない、というものである。航空力学者(そう呼びたければ科学者)がこの議論に加わっていたけれども、操縦士の主観的な反応——飛びやすさに対するセンス——と設計者の経験がこの合意の決定的要因であったと、ヴィンセントは指摘している。それは「工学においては避けて通ることのできない類いの、蓄積された実地の判断(主として主観的な意見に基づいた)」であり、「科学的知識に対するものとしての工学的知識の最良の例」であった。

◇発明としての設計

[14]＝設計とは、知っている要素を新しい組み合わせで用いて、発明をすること＝

●設計することは発明することである。人工の世界がどのように組み立てられてきたかに関心を寄せている人は誰も、明白な代案があるのに、なぜそれではなく、特定の設計が採用されたのかをいぶかしく思ったことがあるだろう。代案となる設計の本質的な性質に思いをめぐらすとき、人は心の中で一つの発明を形にしているのであり、その際ふつう、特定の目的を達成するために、すでによく知っている要素を新しい組み合わせで用いる。

[15]＝ニューコメンの蒸気機関は、直観に導かれた技術設計の離れ業だといえる＝

●根本的な発明の一つ——直観に導かれた技術設計における離れ業といえるもの——は、トーマス・ニューコメンの蒸気機関である。初めて運転に成功したのは1712年だが、その最終的な形態は、それに先立つ数年間にわたって苦労して完成されたものであった。通俗的な著述家たちが設計の原理として広くかつ無批判に受け入れてきた考えに、形態は「機能」に従うというのがあるが、ニューコメンの蒸気機関は、そうした意見を信用するのが誤りであることを際立たせてくれる重要な例である。ニューコメンは、炭鉱の底部にあるポンプを駆動するために蒸気

機関を設計した。水を炭鉱の底部から排除するという仕様を除けば、形態が従うべき「機能」はなかったのである。機関は何に似ているべきか、あるいはその部品はどうあるべきか、そしてそれらをどのように組み合わせべきかを、ニューコメンに告げるものはほとんど何もなかった。

◇芸術と工学

[16]＝技術者の図面は、芸術家のデッサンや絵画と重要な特質を共有している＝

●…製図版上に鉛筆やペンで描かれようとコンピューター画面上にカーソルで描かれようと、技術者の図面は、芸術家のデッサンや絵画と重要な特質を共有している。技術者も芸術家もどちらも白紙から始める。どちらも、心眼で見たビジョンをその上に移していく。芸術家が絵を描くときに行った選択はまったくの恣意的なもののように見えるが、洞察と趣意をそなえた自分のビジョンを他の人に伝えるという目標によって方向づけられている。…

[17]＝設計には意外と制限がなく、目標に到達するのに多くの異なった道がある＝

●…考案したもの——機械や構造物やシステム——の図面を描くという技術者の目標は、まったくではないとしても大部分の恣意的な選択を排除するように思われる。しかし、技術者の設計には意外なほど制限がない。目標に到達するには非常に多くの異なった道があり、他のものよりよいものはあるけれども、どれ一つとして、すべての点において最良の道というものはない。

[18]＝技術者の決定は、恣意的で、直観・センス・好みに基づく度合いが高い＝

●設計技術者は決定を下す際に解析的な計算に頼る。けれども、直観とか、適切さについてのセンスとか、あるいは特定の設計をしているうちにつくられる個人的な好みとかいったものに基づいてなされる決定は、その数において、技術者に言わせれば恣意的で、気まぐれで、規律のない芸術家の決定と、おそらく同程度だろう。

[19]＝「芸術家として創作の才をもつ」人は「役に立つ発明の能力ももっている」＝

●工業デザイナーとしての訓練の経験に基づいて、デイヴィッド・パイは、「芸術家として創作の才をもつ」人は「一般に、役に立つ発明の能力ももっている」と述べている。パイの考えでは、「芸術的な才能と技術的な才能は、実際には一つの潜在能力の異なった表れ方」であり、レオナルド・ダ・ヴィンチは、この二つの才能が結合した並外れて強力な例なのかもしれない。しかし、19世紀におけるアメリカの例が明らかにするように、ダ・ヴィンチは大勢の中の一人なのである。卓越したコンサルティング・エンジニアで建築家のベンジャミン・ヘンリー・ラトロープ(1764-1820)は、熟達した水彩画家であった。ロバート・フルトン(蒸気船で高名)やサミュエル・モース(電信機の発明者)は、技術関係の道に転ずる前は、どちらもプロの芸術家であった。…

◇設計の過程

[20]＝どんな設計や建設(ないし製作)であっても、その過程は、同一である＝

●原則として、設計と建設(ないし製作)の過程は、その規模が小さかろうと大きかろうと、単純であろうと複雑であろうと、同一である。…

[21]＝ダムと発電所の設計では全員の理解を確実にするために多数の図面を作成＝

●パキスタンのインダス川上流に位置するタルベラ・ダムと発電所は、ニューヨークと発電所は、ニューヨークの建設工事会社によって設計されたものである。最初は、何をどこに建設するかについて全員の理解を確実にするために、500枚の契約図面と3冊の仕様書が必要だった。さらに、3600枚の建設図面が本社で作成され、現場ではその二倍もの図面が作成されたのだった。

[22]＝主任技術者は常に頭の中で全体の設計を把握していなければならない＝

●…タルベラ・ダムのように大規模な技術プロジェクトの企画では、何百人もの技術者が雇われることもある。主任

技術者がもっていないこまごまとした知識や技能の持ち主も多いであろうが、計画を成功させるためには、主任技術者はつねに自分の頭の中で全体の設計を把握していなければならない。さまざまな構成要素が調和して機能し、また、次の設計者にいく間に非常に重要な特色や細部が脱落しないようにするためには、そのイメージにはほとんど細部までが含まれている必要がある。日程や締切り期限を忘れないようにするには、正式な書類によるシステムのほうが人間の記憶よりも信頼できる場合がほとんどなので、いろいろな種類のフローチャートやその他の手段が利用される。しかしながら、経験を積んだ技術者は、予期されていなかった重大な問題に発展するかもしれないかすかな徴候をとらえるには、お役所的なシステムよりも自分たちの心のほうが適していると考えている。どんなプロジェクトにおいても、多量の暗黙の情報と理解が蓄積されていくので、完成した設計では過度の調整をすることなく期待どおりに機能する製品が描かれているようにするために、主任設計者は並外れた能力をもっていなければならない。

[23]＝宇宙船の損傷では設計者の深い知識と認識が想像外の欠陥を補償した＝

●プロジェクトにこの種の深い知識と認識が必要であることは、1970年に極端な形で実証された。それは、アポロ13号の指令船が、地球から21万マイルほど離れた位置で、二つの酸素タンクの爆発によって損傷を受けたときのことであった。直ちに状況を分析して判断し、勧告を与えるべく、指令船と着陸船の主だった設計者がヒューストンの管制センターに集められた。この損傷は非常事態を引き起こし、故障箇所を調べ、宇宙船の設計時には想像されていなかった欠陥を補償するために利用可能な手段を適応させるという試練の日々は、3日間にも及んだのだった。

[24]＝図面や仕様書は設計者の人達の社会的な関係や活動の結果として生まれる＝

●技術分野の設計の過程を見れば、それがすべからず形式ばった営みというわけではなく図面や仕様書が人々の社会的な関係や活動の結果として生まれることがわかる。設計グループの様々なメンバーは、自分たちが行っている設計を完成するための最良の方法について、それぞれ別個の見方をしていると考えることができる。工学の教授であるルイス・ブ

キャレリは、仕事をしている設計者を観察して、設計グループのメンバー間の非公式な折衝、討論、談笑、噂話、冗談といったものが、結果に影響を及ぼすことが多いと指摘している。

[25]＝製図の教育が消えはじめたとき、完成図面の必要を問う考えが出ていた＝

●・・・1950年代の後半、工学系の学校から工業製図の教育が消えはじめたとき、設計者の指示を現場に伝えるのに完成図面は必ずしも必要ではないとの考えが、しばしば表明された。たぶんスケッチで十分だろうというのである。そうした考えを多くに技術者がまじめに取り上げることはなかったけれども、設計者の考えを現場への指示に変換するやり方には、大きな変化が進行していた。

[26]＝「設計、製図、そして工事のコスト」の効率化を図る試みが出てきた＝

●1961年に、シカゴのTABエンジニアリング社という小さな会社によって、「パノラマ設計法(PDT)」と呼ばれる、設計と製図の根本的に新しいシステムが開発された。・・・各グループによるひっきりなしの討論は、熟考する時間、すなわち見込みのある構想をとくと考えたり、他の図面やノートや本を参照したりする時間をなくしてしまった。・・・設計が最初の考えに基づいてなされ、時間をくう内省や疑わしい構想の再考が最小限になることを確実にした。推進者たちは、この新しいシステムによって「設計、製図、そして工事のコスト」の3分の1から2分の1が節約され、経営者は全体の過程を「よりうまくコントロールできるようになる」と主張していた。

[27]＝1965年には自動製図がコンピュータ・メーカーによって促進されていた＝

●思い上がりもはなはだしいこのPDTシステムはたちまち忘れられてしまったが、1965年には(パンチカードを使用した)自動製図がコンピュータ・メーカーによって促進され、コンピュータ設計[いわゆるCAD]が2-3の工学系の学校で開発されつつあった。

[28]＝設計は、その進行とともに不測の厄介事にぶつかる「不確かな」過程である＝

●どんな場合でも、技術の分野における設計というのは、その進行とともに不測の厄介事にぶつかったり影響を受けたりしやすい「不確かな」過程である。この過程の最終的な帰結を、最初の目標から正確に導き出すのは不可能である。…

[29]＝設計には、数十の小さな決定と、数百に上るもっと細かい決定が伴う＝

●設計のレイアウトと計算には、数十の小さな決定と、さらに数百に上るもっと細かい決定が伴う。というのは、新しい物の形状には、驚くほど制限がないし、計算にはどんな場合でも人間の判断が組み込まれているからである。たとえば、計算を始める場合、初期条件と曲線の指数について仮定を行わねばならない。こうした小さな選択は、計算が終わってしまえばどれ一つとして決定的なもののようにみえないかもしれないが、表面には現れないものの設計の隠れた基礎を形づくっているのである。

[30]＝問題は、設計の小さな細かい決定をプログラマーに委ねてしまうことだ＝

●コンピューター・プログラム——利用できる問題の種類はますます多くなっている——を利用する場合、設計者は小さな細かい決定をすべて、経験を積んだ設計者というよりは「巧みな工学的科学者」といったほうがはるかに近いプログラマーに委ねてしまうことになる。膨大なコンピューター・プログラムの中にある判断や決定の要点をすべて明らかにすることは、不可能ではないとしても困難である。けれども、これらの小さな決定が、設計が成功するかどうかの死命を制することもありうる。…

[31]＝設計には、暗黙裡の知識の仮定と言葉では表せない判断があまりにも多い＝

●…設計には、その形式がどうであれ、常に仮定と判断という問題が存在する。すべての仮定を明確にすることはできない——暗黙裡の知識や言葉にならない(そして言葉では表せない)判断があまりにも多すぎる——がゆえに、仮定や判断、そして決定(大きなものも小さなものも細かいものも)を、工学的科学のみならず現実をも学んできた設計者の手にゆだねるのが大切なのである。デイヴィッド・ピリントンが忠告しているように、「20世紀後半の技術者はすべからず、コンピューターをよく理解していなければならないし、設計者はすべからず、自分たちの基礎である構造物の経験に代えてコンピューターに頼ることのないようにしなければならない」。経験は、構造物が存在する現場で獲得されるべきである。有能な構造設計者は、構造物の機能ばかりでなくその工事にも、体験を通じて精通している。機械および流体システムの設計者は、成功したすべての技術分野の設計者がそうであるように、自分の必要にふさわしい現場経験をもたねばならないのである。

[第二章 心眼]

[32]＝人は実在物や空想に現れる物のイメージで思考する非言語的な能力に頼る＝

●夢を見ない人は別だろうけれど、誰でも、自分の心の中のイメージというものにはおなじみだと思う。多くの人はあまり深く考えることもなく、実在するものや空想の中のみ現れるもののイメージで思考するという非言語的な能力に頼っている。…

[33]＝工学的知識は、図面などの視覚的な言語によって記録され伝達されている＝

●こうした視覚的(ビジュアル)な思考は、工学には不可欠である。工学的知識の大部分は、事実上現代の技術者の共通語となっている視覚的な言語によって記録され、伝達されている。これによって、技術的に明瞭で詳細な図面の「読者」は、描かれている物をつくっている構成要素の形状、寸法、相互関係を思い描くことが可能になる。それは、設計者が製作者に、自分は何を作ってほしいのかを正しく説明している言語なのである。

[34]＝心眼は情報を集めて解釈し生涯の感覚的情報を集積して相互に関係づける＝

●心眼(マインズ・アイ)は、思い起こされた現実のイメージと思い描いた工夫のイメージが存在する場所であり、信じられないほどの能力をもつ不思議な器官である。心眼は、ほんとうの眼を通して入ってくるよりもずっと多くの情

報を集めて解釈し、生涯にわたる感覚的情報——視覚、触覚、筋力、内臓、聴覚、嗅覚、味覚の情報——を集積して、相互につないで関係づける。われわれは、ぶつかったり、なぐったり、触ったり、匂いを嗅いだり、落としたり、もち上げたりといった肉体的感覚による相互作用を通して物を知る。これらのすべての経験の元締めが心眼なのである。われわれは心眼によって、自分たちが住んでいる物理的世界の感覚を作りあげる。

[35]＝視覚的思考は、心眼で経験がどう有益な視覚情報に変換・整理されているかにかかると＝

●いすの上にある織物を見たとき、触らないでも手触りが滑らか(あるいは粗い)だとか、しなやか(硬い)だとか、保温性がよい(悪い)だとか言うことができる。…視覚的な思考がどの程度うまくいくかは、その人の肉体的感覚による経験が心眼によって有益な視覚情報に変換されて、適切に整理されているかどうかにかかっている。

◇本当に見る

[36]＝眼下、リアルで鮮明なオーストラリアとニュージーランドが広がっていた＝

●1970年、宇宙飛行士のフレッド・ヘイズは、数時間にわたる初めての宇宙飛行で、目を見張るような地球の眺めに興奮を覚えた。眼下には、実物大の地図のごとくオーストラリアとニュージーランドが広がっていた。…どんな地図も、これほどではありえない。…飛行シミュレーター、以前のミッションで得られた写真、そのどれ一つとして、本物という驚異的な体験に備えさせてはくれなかった。…

[37]＝現場が持ち込んだ問題に対する技術者の賢明な反応は、「見に行こう」だ＝

●作業者が現場から持ち込んだ問題に対する技術者の賢明な反応が、「見に行こう」だということを早い時期に知ったのは、私にとって幸いだった。机の前に座ってその困難についての説明を聞くだけでは十分でない。…同じ観点から眺めることができるとされるなら、技術者と作業者は一緒に問題の現場に直ちにしかけるべきである。現場において、そして現場においてのみ、現実の世界の複雑さ、すなわち、図面や数式が無視している要素を学ぶことができるのである。

[38]＝創造性を誘発するのは、直接体験に基づく知識と洞察を蓄積していくこと＝

●創造性を誘発するのに、設計者にとって一連のテクニック(中身は空だ)よりも大切なのは、現行の実際のやり方と製品についての知識、そして、技術プロジェクトや工業プラントの現場での観察を通じて得られた、直接の体験に基づく知識と洞察を蓄積していくことである。1950年代には、工学系の学校はまだ、そうした知識を獲得するための機会を提供していた。しかし1950年代に起こったカリキュラムの根本的な変革が、技術の本物の世界に学生を触れさせていたこれらの活動を排除してしまったのは、皮肉なことである。

◇映像や言葉で表せない知識

[39]＝体の感覚が担う熟練工の広い範囲の知識が技術者の構想に生命を吹き込む＝

●工場や現場での体の感覚で覚えている知識が、視覚によって得られるものよりもはるかに広い範囲にまで及んでいなければ、技術屋によって設計された機械や構造物を組み立てたり建造したりすることはできない。蒸気タービンによって駆動される大きな発電機などの機械を組み立てる場合、道具と熟練の技を使い判断を下す機械工やその他(据付工・大工・溶接工・ブリキ工・電気工・巻上げ工・その他)の人々によって、視覚による知識のみならず感触や筋肉の感覚で覚えている知識が機械の中に組み入れられ、技術者の構想に生命が吹き込まれるのである。…(これらの作業員たちの)仕事には、熟知した手による修正も含まれている。工学系の学校が、彼らの手への賛美ではなく、軽視を教えているのは悲しい。そうした手が不可欠であることを認め、事態がうまくいかなかった場合には(望むらくはその前に)作業員たちの警告や洞察を受け入れることよりも、技術者の社会的地位を守ることのほうを大事にしているように思われてならない。

[40]＝技術者が手作業の熟練の技に無知であるために生じることが余りにも多い＝

●作業者たちの知識の歴史的な重要性が認められたのは、1971年に英国の経済史家ジョン・ハリスが、産業革命の間、大英帝国がヨーロッパ大陸に対して保持していた技術面での優位と工員の知識を結びつけてからのことであった。…言葉には表せない工員たちの知識と熟練の技は、産業革命において英国が先導的な役割を果たしたことの決定的な要因ではなかったとしても、不可欠のものではあった。今日でも同様に、工員の知識と熟練の技——体が覚えている言葉にはならない知識と、判断という微妙な行為——は、工業生産がうまくいくにはきわめて重要である。しかし、技術の専門家は、熟練の技と知識をもつ工員を信頼したり彼らから学んだりするという努力をほとんどしていない。…若い技術者は、経験豊かな工員の熟練した淡々とした作業を見るだけで、技能の知識と技をもつ潜在的な可能性と限界について、重要な教を学ぶことができる。…現場や工場での作業を知的に見て過ごす設計者は、プロジェクトの構成をどう改良するか、どうやって予期されなかった事態——技術者が、手作業の熟練の技について無知であるために生じることがあまりにも多い——が生じるのを避けるかを学べると考えていいだろう。

[第三章 近代工学の起源]

◇工学の連続性

[41]＝工学の礎を築いたのは先祖からの技術を守り洗練して子孫に伝えた職人達＝

●工学の強みはその基礎の深さにある。この基礎を築いたのは、何世代にもわたる誠実な職人たちであって、彼らは先祖から学んだ技術の知識を守り、洗練し、さらなるものをつけ加え、子孫に伝えていったのである。われわれは、もっぱら、新しく派手な技術の驚異に目を向けるけれども、少なくとも技術者の80パーセントは、何十年あるいは何百年も生きてきた技術を使って仕事をしている。現代社会を一つのものにまとめあげるのを可能にする工学的なインフラストラクチャー（社会の基幹施設）——建物、光熱システム、水道、道路・橋、あらゆる種類の自走車両、電話等々——は、[ホモ・ファベル]（工作的人間）が仕事をしてきたのと同じくらい長い間にわたって蓄積されてきた技術的知識に基づいている。

[42]＝設計の過程は、何であれ深く広い工学的知識が利用される連続性のあるもの＝

●工学の実践面においても連続性があり、その連続性は、過去20年にわたって工業分野のオフィスにもたらされた急激な変化——計算尺から電卓へ、製図版からコンピューター化された「ワークステーション」へ、棚の参考書籍からオンラインのデータベースへ、写真で複写する図表からどこにもあるコンピューター・プリンターやゼロックスへ——のみを見ている技術者をびっくりさせる。しかし、工学の基礎をなす本質は変わっていない。今も、予備計画は、容易に手に入る情報は何であれ利用する一つの過程である。さまざまな代替案はその意味を完全に理解できるようになるのをまたずに検討され、プロジェクト存続の全期間にわたる特質を決める「大きな」決定がなされる。技術分野の設計を展開していく過程では、設計者は奥深く幅の広い一群の工学的知識を利用する。

[43]＝シリンダー・ピストン等エンジン部品の起源は紀元1世紀頃まで遡れる＝

●…工学的知識の本質と、ずっと以前に遡るその起源を示唆する一例について考えてみよう。どこにでもありふれた自動車のエンジンも、500年前にはその存在を想像することは不可能だった。しかし、レオナルド・ダ・ヴィンチ（1452～1519）の時代には、点火コイルや点火プラグなどの電気部品を除けば、ほとんどの部品は知られていた。自動車エンジンは、シリンダーとピストン、クランク軸、円錐形の弁、カム、歯車、軸受、チェーン、その他の機械要素から構成されている。ダ・ヴィンチは自分のノートを機械要素の絵でうめつくしているが、そのレパートリーは驚くほど完全に近い。シリンダーとピストンなど、部品のいくつかは、紀元1世紀ごろまで遡ることができる。

[44]＝新しい設計の際、慣れた部品を採用し、配置を換え、時に根本を修正する＝

●新しい機械を設計するに際しては、技術者は使い慣れた部品を採用して、しばしば配置を換え、また時には根本的に修正する。15世紀の見習い技術者は、町の塔時計、噴水への送水用ポンプ、製粉機、重い建材を扱うためのホイストなどの装置を注意深く観察して、自分のレパートリーになっている部品を組み立てていったのだろう。も

し、適当なつてがあれば、この時代に集められた多数の技術者のノートの中の図面を調べることもできただろう。

◇設計の秘訣

[45]=<予測可能で制御可能なシステム>の要塞設計の仮定と処理法が今に生きる＝

●(15~16世紀における)イタリアの要塞の設計は、工学の基本的な教義を例証している。それはきわめて正しくまた適切であり、(かつて指摘されたことだが)きわめて自明で、今ではたいへん深く根づいて、そのため、公理のようになっている。すなわち、技術者は、求められた設計がどんなものであれ、計画が実際に有効であるためには、計画されているシステムが予測可能で制御できるものでなければならぬことを知っている、というものである。設計者はまず、システムの境界を設定する(非常に独断的な判断を伴うことしばしばである)。要塞の設計者が大砲の射程内に境界を設定するのと同じである。それから、システムに入ってきてよいものと、出ていってよいものが注意深く決定される。気づかれずに、あるいは原因不明で境界を越えることはなにものにも許されない。理想的な工学のシステムでは、機械によるものであれ人によるものであれ、予測できない行動が入る余地はないのである。このように、要塞の設計者が用いた仮定と基本的な処理法は、現代の技術分野での設計にも、当然のごとく適合している。

[第四章 図像化の道具]

[46]=視覚情報を伝える能力の大きな進歩が始まったのは、ルネサンス期だった＝

●視覚情報を伝えるわれわれの能力の大きな進歩が始まったのは、ルネサンス期であった。印刷術、線遠近法、射影幾何学を含む図示上の基本的な一連の発明によって、ある人の心の中にあるビジョンを、物質的手段——図面——を介して、時間と空間を超えて他の人に伝える際の正確さが向上した。

◇工業図面の作成

[47]=スケッチで、アイデアを試し、代替案を比較し、閃きを紙の上に留める＝

●工業製図はまず、一連のフリーハンドによるスケッチや大まかな縮尺で引いた図面からスタートする。これは、設計する対象物がどのように作動するか、そして設計者の意図を読み手に正確に示すには完成図面はどうなっていないかと思いつく際の投げどころとするためである。設計というのは複雑な知的過程であり、それゆえ、設計者はスケッチを使って、新しいアイデアを試してみたり、代替案を比較したり、(これが重要なのだが)つかの間の内に消え去ってしまう閃きを紙の上に留めておいたりする。

[48]=「思索のためのスケッチ」「指示のためのスケッチ」「討論のためのスケッチ」＝

●スケッチには三種のものがある。一つは「思索のためのスケッチ」である。ダ・ヴィンチのノートにはそうしたスケッチが多数含まれているし、後世の多くの技術者は、スケッチを利用して非言語的思考に集中したり、処理したりしてきた。次は「指示のためのスケッチ」で、縮尺で描かれることもある。このスケッチは、最終図面を引く製図者に指示するために描かれる。200万人もの学生が使ってきた先駆的な大学教科書『工業製図の手引き』を著したトーマス・E・フレンチは次のように述べている。「設計者は自分のアイデアを、確かな腕と明晰な判断によってスケッチすることができなければならない。創意に富んだあらゆる無意識のうちの思考、あらゆる予備設計、そして製図者へのあらゆる説明と指示では、フリーハンドでのスケッチが表現様式なのである・・・それが技術者の最高の設計手法なのだ」。三番目のスケッチは技術関係の人々の間でのやりとりから生まれるもので、「討論(トーキング)のためのスケッチ」である。・・・社会学者のキャサリン・ヘンダーソンは、討論のためのスケッチのつくられ方について、・・・「設計者たちは議論し、いっしょに同じスケッチを利用してながら、鉛筆を実際に次から次へと回している」(と述べている。)・・・同僚との討論の間に自然に描かれるこうした討論のためのスケッチは、構想から製品へと至る過程において、その重要性が変わることはないだろう。こうしたスケッチは、技術上の要点の説明を容易にする。なぜなら、討論に参加している人たちは、討論しているアイデアに対して、図示された共通の枠組を共有しているからであ

る。

◇図面の利用

[49]＝機械製造工場で図面が一般的に利用される以前の 18 世紀のやり方＝

●機械製造工場で図面が一般的に利用されるようになる以前の 18 世紀においては、製造を依頼する者は工場の経営者ないし職工長に、自分の頭の中にあるものを言葉で述べて伝えていた。職工長は年長の工員と相談しただろう。そして、要求されている機械をどのように製造するかについての最終決定は、製造者と注文主との間の協議で合意されたのだった。

[50]＝図面が広く利用されるようになり、検討の場は現場から製図室へ移った＝

●19 世紀に図面が広く利用されるようになると、検討の場は作業現場から製図室へと移った。…ワットの図面は、ボルトン・ワット工場、この工場では製作していなかった部品(シリンダーなど)を供給する外部の業者、そして、機関建屋を建設し、蒸気機関を組み立てて運転の段取りを調える組立工に、正確かつ同一の情報を与えた。…

[51]＝19 世紀、判断を要する問題は、製図室の紙の上で解決する世界へと移行した＝

●…19 世紀にヨーロッパとアメリカの大半の工場で生じた変化は、自分たちの仕事に関する判断を伝統的に行使してきた工員と技術者とが話し合う世界から、判断を要する問題は作業現場から離れた製図室の紙の上で鉛筆によって解決する世界への移行であった。この、すべての自由裁量の権限の排除は、急なものでも、また議論の余地のないものでもなかったけれど、数十年のうちには、技術関係の仕事における権限の中心は、明確に製図室におかれることになった。

◇研究のための模型

[52]＝模型は、実物大の構造物の視触覚情報を与え、アイデアや原理を教える＝

●図形で表す二つ目の工夫は模型であり、それが果たしている主たる目的には二つのものがある。一つは、模型に表現されている実物大の構造物や機械の組立て・運転に関わる人に情報を与えることである。もう一つの目的は、…アイデアや原理を教えたり、馴染みのない構造物や機械に精通させることである。いずれの場合も、模型は視覚的な情報ばかりでなく触覚による情報ももたらしてくれる。多くの人は、図面よりも模型のほうがはるかにわかりやすいと感じている。

[53]＝14 世紀、ハーランドが木造の複雑なアーチ式屋根構造の設計に模型を用いた＝

●14 世紀のイングランドで、…ヒュー・ハーランドは、ウェストミンスター・ホールの木造の屋根構造——非常に複雑なアーチ式トラス構造で、柱のない空間を 68 フィートにわたってまたぐ——の設計に模型を用いている。先例のないこのトラスの応力分布については、現代の[構造]解析学者の間で何年にもわたって論争的になっており、酷評されることも間々あった。(この議論は、工学の解析では、仮定、そして異なる仮定から導かれる相矛盾した結論の存在が避けられないことを際立たせている)。

[54]＝今も新しい設計の最終検討には身体感覚情報をもたらす三次元の模型が好まれる＝

●…ハーランドの 1390 年代の屋根の模型から 1990 年代の NASA による宇宙ステーションの実物大模型に至るまで、何世紀にもわかって、先駆的な作品の作り手たちは、利用可能なあらゆる方法で、いまだできあがっていない自分の代表作が失敗してしまう危険を避けてきた。600 年を経て、いまだに新しいものの設計における最終的な再検討のために好まれている装置は、設計者や製作者に、言葉によらない身体感覚に基づく定性的な情報——すなわち、視覚や触覚、筋肉の感覚、聴覚による情報——をもたらしてくれる三次元の模型なのである。

[第五章 技術の知識の発展と普及]

◇ルネサンス期の挿絵本

[55]＝第一の伝統:「機械の劇場」という挿絵入りの重厚な機械書などの印刷本＝

●ある特定の問題に心を集中させたり、ある特別の構想に心を奮い立たせたりすることのできる技能者の数は、挿絵入りの印刷本の出現によって著しく増加した。このような本には二つの伝統があった。一つは、15, 16 世紀の技術者のノートに起源をもち、「機械の劇場」と呼ばれる挿絵入りの重厚な機械書などの印刷本の中に持ち込まれたものである。こちらは、破壊的であると同時に進歩的なものであった。挿絵を「読む」ことのできる人に、これまでにない目新しい構想を思いつかせることになったからである。西洋における技術の爆発的な広がりの種子は、こうした本の中にあつた。アゴスティーノ・ラメリによって著されたこのような本…(は、)100 年以上にわたって「機械の劇場」の標準となった。

[56]＝第二の伝統:鉱業や冶金のような既存の技術の工具や工程を扱う挿絵本＝

●第二の伝統は、ゲオルギウス・アグリコラによる 1556 年の鉱業や冶金の工程の古典的研究に見られるように、もっぱら既存の技術の(工具や)工程を扱っていて、確立されていた技術を普及させたけれども、急進的な変革を促進するものではなかった。アグリコラたちは実際に記述し、ラメリたちはこうなるだろうというところを記したのである。

[57]＝「機械の劇場」の流れは、新しいアイデアを加え途絶えることなく続いた＝

●ラメリはイタリアの軍事技術者で、1588 年に『さまざまな巧妙な機械』を出版したときは、フランス国王に仕えていた。この本は印刷術と彫版術の粋を集めた見事な例であり、製粉機、製材機、クレーン、揚水機をはじめ、軍用橋や投擲装置などの攻城用機械の 6×9 インチの銅版画が 195 枚入っていた。こうした「機械の劇場」の流れは途絶えることなく 17 世紀へと続き、それぞれの本が新しいアイデアを加え、また、以前の本ですでに登場していたアイデアをより確固たるものにしていったのであった。

[58]＝ラメリは未だなかった質問に答え、課されたことのない問題を解きつつあつた＝

●さらに、1588 年というラメリの本の時点で、社会の需要や要望をはるかに超える多数の技術に関する発明が存在した。ラメリの本にある百種類に及ぶ揚水機の図をめくっていくと、ラメリはいまだ問われたことのない質問に答え、ラメリ(あるいは、おそらく別の技術者)以外の誰一人として課したことのない問題を解きつつあつたのだという確信が生じてくる。経済的な理由がこれらの発明を誘発したということを示唆するものは何もない。明らかに機械が目的なのであって、手段ではないのだ。にもかかわらず、ラメリのそれぞれの機械は、どんなに精巧あるいは突飛なものであれ、後の時代に多少なりとも利用されたのだった。実際、ラメリやその仲間たちは、自分たちの豊かな想像力の彷徨を王や貴族のパトロンに支援されて、材料の進歩と可能性について、絵による目録を楽しんで編纂していた。

[59]＝18 世紀、ロイポルトが記念碑的な機械の本・『機械の劇場』を出版した＝

●18 世紀初頭、ドイツの器具製造者ヤーコブ・ロイポルトが『機械の劇場』という書名の記念碑的な一連の機械の本を出版したことによって、ルネサンスの挿絵本の時代は幕を閉じた。1724 から 1739 年にかけて出版されたこの本は、当時までに蓄積されていた機械の品目(レパートリー)を 10 巻・約 500 の銅版画に集約したものであつた。…

[60]＝近代の挿絵入り技術書には、ルネサンスの技術者のノートのなごりが残る＝

●…多くの機械の劇場やもっと近年の挿絵入りの技術書を見れば、そこに、ルネサンスの技術者のノートのなごりが消えることなく残っていることがわかる。…このように、破壊的かつ進歩的な流れは、19 世紀、20 世紀の破壊的・進歩的な発明家の、役に立つ持駒の基本的な部分を満たしたのである。

[61]＝挿絵本の第二の伝統は、ビリングッチョとアグリコラによって確立された＝

●技術の知識を挿絵によって伝えるという第二の流れは、16世紀の中ごろに、金属や他の鉱物の採鉱、精錬を扱ったビリングッチョとアグリコラの本によって確立された。いずれの著者も、内容の充実した技術に関する知識と、実際に行われている最良のやり方をふんだんに載せており、どちらの本も、分析、採鉱、溶解、精錬、鑄造といった種々の工程について、広範で詳細な記述と多数の図を含んでいた。

[62] = ビリングッチョの『火工術』・アグリコラの『デ・レ・メタリカ』と後続本 =

●ビリングッチョの『火工術』(ピロテクニア・1540年)には、簡単なものではあるけれど約85点の有益な木版画が入っていたし、アグリコラの『デ・レ・メタリカ』(1556年)には250点以上の木版画が入っていて、その多くはきわめて精巧なものであった。自著の多数の図に注意を促して、アグリコラは序文で次のように書いている。「・・・鉱脈、工具、容器、洗鉱桶、機械、炉に関して、言葉によって伝えられる記述が、当代の人から理解されなかつたり後世の人に困難をもたらしたりすることのないように、私は文章で記述するだけでなく、画家を雇ってそれらの形を絵で表すことにした」。『火工術』や『デ・レ・メタリカ』の後に続いた本は、全般的に、大部なものではなかったが内容はしっかりしており、採鉱、精錬、金属加工に従事する職人に役立つものであった。

◇専門技能教育

[63] = 16・17世紀の知的潮流が仕事や工程・機械の視覚的・非言語的な研究を促す =

●16, 17世紀における別の知的潮流が、実際の機械の、視覚的で非言語的な研究を促した。2~3のうるさい思想家は、人工の世界に関して何かものを言う者は、その分野の書物による知識以上のものをもたなければならないと主張するようになった。1531年、哲学者でイングランドの宮廷で家庭教師をしていたファン・ルイ・ヴェイヴェスは学者たちに、職人の仕事を含めて、自分たちの周りの世界に注意を払うよう勧めた。・・・二年後、フランソワ・ラブレーのガルガンチュアの物語の中では、教師と生徒が金属細工師、時計屋、印刷屋の店を訪ねて仕事の中の職人を観察し、こうしてラブレーが一般教養教育の本質であると考えているものを完了させている。200年後ベンジャミン・フランクリンは、しかるべき教育の一環として、少年達は「熟練工の作業場で仕事のやり方を観察する」のに「多少の時間を費やすことを許され」ねばならないということに同意している。

[64] = ニュートンは大陸旅行中の友人に手仕事や技能を観察するように助言した =

●・・・1669年にアイザック・ニュートンは大陸を旅行している若い友人に、「イングランドのわれわれよりも秀でている、あるいはわれわれには及んでいない手仕事や技能」を見つけ出して観察するように助言した。特にニュートンが友人に強調したのは、ドイツが「ガラス面」の研磨と艶出しにおいて何を成し遂げたのかを見ること、軍事設備、鉱山、金属製品を観察すること、そしておそらく、振り時計が海上における経度測定に用いられているかどうかを知るために器具製造者を訪問することであった。ニュートンは、自分の友人が技術に関する事柄の知識を、直接感じ取ってくることに特に関心をもっていた。

[65] = 新しい実験科学を通し「人間の力と偉大さ」を高めるというベーコンの大計画 =

●ニュートンの時代には、ヨーロッパの知識界は、新しい実験科学を通して「人間の力と偉大さ」を高めるというフランシス・ベーコンの大計画から強い影響を受けていた。包括的な計画の一環として、ベーコンは一連の「手仕事の自然誌」を要請する。それは、それぞれの技能を順に研究し、工具、技法、工程を記述し、長い間仕事場でのみ知られていた技術に関する知識を公にすることを意図したものであった。このようにして利用できるようになった知識は、学者によって検討され改良を加えられ、技術知識の全般的なレベルを向上させて、結果として進歩がもたらされるのは確実である、とベーコンは考えていた。・・・

[66] = 技能を偏見なく体系的・帰納的に研究すれば改良されるという仮定があった =

●・・・この計画に暗黙のうちに含まれていたのは、偏見のない心で技能を体系的・帰納的に研究すれば、その技能の改良につながるという仮定であった。種々の手仕事における独創的な仕事のやり方が学者たちによって研究・比較されれば、新しい有益なアイデアが生まれるはずだと考えられていたのである。新しいアイデアは、ベー

コンの言葉を借りれば、「個々別々の秘伝の体験が一人の頭脳によって考察されるとき、技術と技術との観察を結びつけ、互いに利用しあえるようにすることによって」生まれるだろう。

◇物理的原理の教育

[67] = 18 世紀、英国の都市では職人や商人がニュートンの自然哲学の初歩を学んだ =

●18 世紀初頭の英国では、ロンドンや発展しつつあったマンチェスター、バーミンガムなどの地方の工業都市で有料の公開講座が多数開催され、大勢の職人や商人たちがニュートンの自然哲学の初歩を学んだ。よく行き届いたこれらの一連の講義では、力学、水力学、空気力学(これらは 18 世紀から第二次世界大戦までの講座物理の基本的なテーマであった)の原理が説明された。商人や他の新たに勃興した中産階級の人々に混じって、相当数の職人が聴衆として参加しており、その数が数百人に達することもしばしばであった。

◇視覚的解析の道具

[68] = 17 世紀、工学の多くの数学計算における視覚的な取り扱いの基礎が作られた =

●図に表すための一群の強力な考案は 17 世紀の初期にもたらされたのだが、これらは近代工学の多くの数学計算における視覚的な取り扱いの基礎を作った。ネピアの対数とデカルトの座標幾何学によって、技術者は、数字だけではなしえなかったやり方で、自分の計算結果を眼に見える形にすることが可能になった。これに続いたのが、図式力学や計算図表学であった。…

[69] = 技術者は計算尺を学び、数字の解の妥当性について眼での感性を養った =

●…二つの対数を眼に見える形で加えたり引いたりするという…(イギリスの)オートレッド(による)計算尺は答えが近似値でしか読めなかったので、(最初は)ほとんど役に立たなかった(が、)数値計算をよりいっそう促す工学的科学——力学、水力学など——が発展するにつれて、計算尺の有用性は増していった。…計算尺による計算結果の精確さは、技術者が仕事で扱う諸量の精確さと同程度なのである。計算尺は、…その後は、デジタル計算機によって旧式のものとなってしまった(が、)技術の分野で利用される多くのデータは、その性質からして近似的なものなのである。…コンピューターの精確さと速さは、数字で表した解の妥当性についての眼で見たときの感性を犠牲にしてもたらされたものであって、技術者たちはそうした感性を計算尺を使っただけの計算を学びながら養ってきたのである。…

[70] = コンピューターが計算を視覚的に調べて理解する図式数学の利点を犠牲にした =

●…ほとんどすべての技術者が計算尺を利用し、図式力学を用いて構造解析を実行し、どんな計算図表であれ、当面の問題を解くことができそうだと思うものに頼っていたときには、計算を視覚的に調べる(それは正しいだろうか？数値は合理的か？)ことの利点は、彼らが用いていた図式数学の中に組み込まれていた。デジタル・コンピューターが図式手法を時代後れで我慢できないほど時間がかかるもののように思わせているとしても、少数の若い技術者——年老いた昔かたぎの人もそうだが——は、理解を犠牲にして速さを購ってきた場合が間々あると、みるようになってきている。

[第六章 技術者の養成]

[71] = ダ・ヴィンチたちの知識は体の感覚を使っただけの観察に基づいたものだった =

●フィリッポ・ブルネレスキや…レオナルド・ダ・ヴィンチが受けた訓練には徒弟奉公が含まれており、彼らはその中で、図面を引いたり絵を描いたり石や金属に彫刻をしたりするのに必要な用具の調製法や利用法を学んだのだった。彼らの知識は体の感覚を使っただけの観察に基づいたものであった。徒弟たちは、自分たちが求めていることをやってみせる親方に指導された。彼らは、「実用の技芸に熟練している人」を意味する職人として訓練された。15 世紀にフィレンツェの大聖堂を設計して建造を監督したとき、ブルネレスキは材料の諸特性や挙動に関する知識、

長期にわたって存続することを意図した複雑で堂々たる構造物の力学に関する知識をもっていることを実証した。20世紀の技術者には、ブルネレスキが科学の助けなしでこのような見事な偉業を達成したとは考えにくい。けれども、彼の知識は、科学ではなく技芸の世界で発展したものだだったのである。…

[72]＝ベーコンは自然の観察に基づく知識と技工芸を結合した実験科学を構想した＝

●…一般に受け入れられている工学教育のパターンが、今日どのようにして正当化されているのかを理解するには、今日の科学の起源をみるのが適切である。1605年からフランシス・ベーコンは、旧来の科学から人間社会を解放する実際的な新しい科学のプログラムを發展させていた。旧来の科学は、自然界や仕事の世界との接触の影響を受けず、書物上だけの学問の主張や論争という息詰まるようなものであった。ベーコンは、自然の直接的な観察に基礎をおき、知識と技芸や工芸に見出される巧妙さを結合した実験科学を構想していた。

[73]＝「人間の力と偉大さ」を高めるベーコンの新しい実験科学のプロセスと役割＝

●ベーコンが新しい科学の基礎として役立つ手仕事の自然誌を書くことを要請したのは、ピルグリム・ファーザーズがニューイングランドへ移住した1620年であった。4年後、ベーコンはそのユートピア的なエッセイ『ニュー・アトランティス』において、「サロモン学院」(われわれなら研究所と名づけるものの設立)のプランを公表した。この学院の中では「事物の真の本質」が実験を通して決定される。実験の詳細は、種々の専門家の一団によって決定される。実験が遂行されるとき、「編集者」のグループが観察をして、実験から原理を突き止める。「恩恵者」のグループは、実験から「人間の生活や知識に役立つ実用となる事物」を導き出し、進歩の原料、すなわち人間の力と偉大さを高める技術の知識を社会に広める。次に、「灯火」と呼ばれる人々が、「編集者」や「恩恵者」と協議のうえ、以前の実験よりも「さらに自然に突き入り」、より幅広い総合化を行える新しい実験を考案する。最後に、一団の「自然の解釈者」が、「以上の実験による発見を、さらに偉大な観察や公理や箴言へと引き上げる」。

[74]＝現代までに＜どんな発明に含まれた知識も科学に起源がある＞との神話ができた＝

●ベーコンの時代から現代まで——350年以上である——数理的科学の推進者たちは、科学こそ真理への道であり、物質的な世界を変えた進歩的な発明の最も重要な源でもあることを、自分たちのパトロンに納得させてきた。いかなる発明に織り込まれた知識も科学に起源があるという神話は、今や西洋文明において固い信念として受け入れられており、国家の科学政策はその信念に基礎をおいている。

[75]＝われわれは技術が科学の下に位置するものだとならされてしまっている＝

●われわれは、技術は科学の下に位置するものだということにあまりにも慣らされてしまっており、そのため、芸術家として訓練され、芸術家が利用した直観力や言語で表現できない思考をもち続けたルネサンスの技術者によく似た存在が、19世紀というつい最近のアメリカにもいたことが理解しにくくなっている。たとえば、蒸気船で名高いロバート・フルトンとアメリカの電信の発明者であるサミュエル・モースは、ともに、技術者に転ずる前は芸術家であった。…

[76]＝熱力学と蒸気機関のように、19世紀には科学と技術との結びつきが強くなった＝

●…蒸気機関の性能と効率の改善を導くことになる理論的説明を(最終的には)熱力学の原理が与えたように、19世紀後半になると、科学と技術との結びつきが強くなった。…

[77]＝進歩の時代には、市民たちに、科学に対する一つの信仰が益々強くなった＝

●…進歩の時代(1905年ごろから1925年ごろにかけて)を特徴づけたのは、教育を受けた多くの市民たちの間に、科学に対する一つの信仰がますます強くなっていったことである。彼らは、…有能で私欲のない科学者たち(が)「この社会の本質的な構造に異議を唱えることなく、限定された解決できる一連の問題に立ち向かうことによって、産業社会の不公平さの最たるもの」を改善することができる、と信じたのである。

◇グリンター報告

[78] = “(遠からず)工学の技能は工学の基礎科学に大いに依存するようになる” =

●1952年、・・・L・E・グリンター(の委員会の)予備報告(には、)「現在の教職員が生きている間に、工学の技能は工学の基礎科学に大いに依存するようになり、したがって、新しい教職員は哲学博士(Ph.D.)の学位を有している必要があると述べられている。「産業に従事したという適切な経験は、[これまた]均衡のとれた教員には重要である」と報告書は付け加えている。そうした経験を教員の選抜や昇格の際の考慮に入れることもあるが、「特別な教育的背景[すなわち、哲学博士号や理学博士号]をもっていたり、研究ないし教育において明らかな能力をもっている教員には、必要条件ではない」。・・・

[79] = 《職業的、技能的内容をもつ》《工学の技能と実践を伝達する》課程を排除 =

●・・・最終報告には二つの重要な勧告が含まれていて、多くの研究助成金を交付されている学校や交付を望んでいた学校は、すぐにこの勧告に従った。第一は、「高度の職業的、技能的内容をもつ課程」を排除しなければならず、「主として工学の技能と実践の伝達を企図しているもの」も同じである、というものだった。こうして、機械工作コース——溶接、鋳造、金属加工といった基本的な工程と材料について、視覚や触覚による正しい理解を与えることを目指している——は、急速に必要なとされるようになった。工業製図はしばらくは廃れなかったが、それは主として、多くの製図教師が大学内の地位を保持していて、退職させるのが難しかったためであって、製図や画法幾何学のコースの地位が低下したことは関係者全員には明らかだった。「アート・アンド・プラクティス」コース——蒸気動力プラント、電力網、化学反応プラントなどの工学システムの個々の要素を図で説明し、それらの要素が実際にどのように統合されているかを説明するもので、こうして、工学というものが実際になされてきた、あるいはなされているやり方で教育を施す——が存続したのは、委員会の第二の勧告が提出されるまでであった。

[80] = 固体力学、流体力学、熱力学、移動速度論、電気理論、物性論のコースを要求 =

●その第二の勧告では、「6つの工学的科学——固体力学、流体力学、熱力学、移動速度論(熱、物質、運動量)、電気理論、物性論——のコース」を要求していた。報告書は、「現在のカリキュラムで6つすべての工学的科学が含まれているものはほとんどない」と述べ、「だが、[科学的な]技術者は、前述した6つのすべての分野のバックグラウンドを必要とする」と主張していた。工学カリキュラムのすべてが直ちに変更されたわけではないが、研究を志向する工学系の学校や成功しているグループに加わりたいと熱望していた学校にとっては、変革の指針は明白であった。

[81] = 独創的で構想力に富む思考は、技能を理解して初めて、優れた設計をもたらす =

●最終報告はまた、いくつかのコースを求めていた。それは「専門的なバックグラウンドのための、工学解析、設計、工学システムを総合した教育を施すもので、独創的で構想力に富む思考を活性化させ、基礎科学と工学的科学を全面的に用いるために立案・実施される」コースである。工学の設計における従来の「アート・アンド・プラクティス」のコースについてはどこにも述べられておらず、「総合化した教育」は解析の演習となるが多かった。工学の設計が過去にどのようになされたのか、そしてどのように「機能した」かを学ぶよりも、学生は独創的で、構想力豊かになるよう奨励されたのである。だが、そのどちらの才能も、技能を理解した後ではじめて、より優れた設計をもたらすことができるのである。

◇設計の危機

[82] = 工学系大学卒業生の設計プロジェクト実行能力の低下が痛感されるようになる =

●1950年代後半、事業主や工学系の学校の古参の教職員たちは、工学系大学卒業生の設計プロジェクト実行能力が低下していることを痛感するようになった。・・・工学部系の教職員は研究には強くなったが、概して、技術の実践、特に設計をよく知らないことが痛ましいほどはっきりしてくる。教師たちはまた、学生に構造物や機械の設計、建設、操作、維持・管理という微妙で決まった体系をもたない多くの問題の手ほどきをするのに必要な、産業での経験もなかった。・・・

[83] = 工学的科学が発展する一方、設計が「ずるずると後退」したことに気づいた =

●1961年、パデュー大学の・・・ポール・シェニエは、工学的科学が急速に発展してきた一方で、設計が「ずるずると後退」したことに気づいた。おそらくこれは、「いくつかの機関の教職員たちが、設計というのはいま教えることのできない知識領域であると結論し、それゆえ、学生の学科課程表から設計の経験をはずすべく取り計らった」ためである。設計が「ずるずると後退」したことについて、・・・カーネギー・メロン大学の B・R・ティア・ジュニア(は、)「設計はカリキュラムにおける位置をめぐっても、また学問としての地位や名声をめぐっても、工学的科学と対抗しなければならない」。

[84] = 設計問題を考えるのを嫌がり、完全に特定された問題にのみ取り組みたがる =

●MITの教職員の委員会が出した1961年の報告は、設計の危機を見ていた人々の懸念を完全に正しいものとした。最近の卒業生は、すべての要素を含む設計問題を考えるのを「いやがり、その能力もなく」、解析的手法で解ける完全に特定された問題にのみ取り組みたがる傾向がある、と批判されているのである。この傾向は、理学修士や博士レベルでより顕著に認められた。そこに属する若い技術者は、「数値解をもつ問題——学校で解析的手法を教えるのに用いられる類いの問題——を解くことに精通している」。また、「これらの若い技術者たちは、少なくとも微積分レベルの数学を必要としない問題は、自分たちにはふさわしくない、すなわち、高等教育の恩恵をこうむっていない技能者に回されるべきものだと考える傾向にある」。

[85] = 設計は、解析的手法を教えるための学校の問題とは根本的に異なっている =

●・・・MITの委員会は、設計の(各分野)を代表する経験豊かな技術設計者を招き、・・・討論した。・・・報告書は真摯に設計の本質を表現しようとしており、一つの設計の問題には唯一あるいは「正しい」解はないという認識をもって始まっている。これは、設計とは「解析的手法を教えるために学校で用いられている類いの問題」とは根本的に異なっていることを認めるものである。

[86] = 単一解問題の問題点は、不十分な、矛盾した、データの処理の必要がないこと =

●・・・物理、化学、数学、工学的科学のコースは、その形式においてすべて数学的である。学生は与えられたデータを操作して数値解に達する。・・・(委員会の記述をみてください。)

「学生に出される問題は、圧倒的に単一解問題と呼ばれるものである。このタイプの問題がもてはやされる理由(は、それが)成績を評価する本質的に客観的な基準を与える・・・学生は、(授業で)解に到達するための一連の論理的な段階を教えられる。教師は、テスト(で)正解に達している学生の割合に注目することによって、自分の[教え方の]有効性を評価できる・・・」。

・・・単一解問題・・・がもたらす教育上の問題は・・・不十分な、ないしは矛盾したデータを処理する必要(が)なくなる。・・・このような問題を解くには、工学的な判断は不要である。こうした状況にあつては、「懐疑や疑ってかかる態度は奨励されない」と報告にはある。「データ、手法が適用できるかどうか、そして結果にも、疑問をさしはさむことは許されないのである」。

[87] = 設計は心的なプランを必要とする概念的な過程であり、先ず総合が来るべき =

●設計のプロセスについての記述に目を転じると、委員会は次のように断言している。設計は「本質的には心の中でなされ」、図面は心の絵画的な延長(「外部の——信頼できる——記憶」)である。「数学的に考えることについても言えるが、すべての学生が等しく映像的に考える能力に恵まれていると考えるべきではない。どうも教育者は、数学的能力のほう空間的關係によって考える能力よりも好ましい資質であると見なしがちである」。設計は「それをなす前に、断片的なものであれ少なくとも心的なプランを必要とする概念的な過程であり、それゆえ、まず総合が来るべきである」とMITの委員会は述べている。設計の対象は、ほとんどいつの場合も「直接解析するにはあまりにも複雑すぎる」から、計算を可能にするための単純なモデルを考案する必要がある。「自動計算の利用」は、「より複雑なモデルの利用を可能にするけれども、「証明されてもいないのに、より複雑なモデルほど実際の装置を表すと考えてはならない」。

[88] = 最先端の設計技術者は、数値解析に基づく決定がわずかな部分だと知っている =

●工学の設計における解析の、必要ではあるが副次的な役割は、蓄積された知識を設計者が利用する方法を表現したくだりに(次のように)はっきり述べられている。——工学の最先端にいる設計技術者は、数値解析に基づく決定は、自分が下す決定のうちのわずかな部分でしかないことを知る。問題があたりまえのものになり、より多くの決定が数字に基づいてなされるようになると、設計技術者は、新しい、さらに難しい領域に進む。そこでもまた、工学系の学校で学んだ類いの解析に基づくものは、自分の決定のほんのわずかの部分でしかないことを知る。解析の重要性をけなそうというのではない。誰もが解析を、熟練した技術者の欠くことのできない道具として認めている。しかし、解析は、典型的な設計問題——とりわけ新しい問題——の中で解を与えなければならない懸案のすべて、あるいは大部分にさえも、答えることができないのである。いつかは数値解析が、これらの懸案のごく一部ではなく、より多くに答えを与えるようになる、などということはないように思われる。懸案のうち残ったものは、特にそのために行う実験、経験(同種あるいは類似の問題についての以前の実験によって得られた知識を応用する技)、論理的な推論、個人的な好みに基づいて決定されなければならない。経験に基づいた、われわれが直観と呼ぶ潜在意識の推論過程が大きな役割を演ずるのである。

[89]＝哲学・理学の博士から教員を補充する政策が、解析専門家の卵への教育につながる＝

●報告書が工学設計教育に対する工学の教職員の適性や、設計者として成功するための心構えに注意を向けているところでは、二つの印象的な論評で議論は始まっている。それは、「技術者の卵は技術者によって教育されなければならない」というものと、「教職員を哲学博士や理学博士になりたての者から補充するという政策が、解析専門家の卵への解析手法の教育につながっている」というものである。…

[90]＝ドイツとオランダは工学的科学の基礎だけでなく、技術の実践の一部を教える＝

●…20年後の1980年、ケンブリッジ大学の…ジョン・L・レダウェイとレイチェル・A・ブリトンは、…『北アメリカ・ヨーロッパ・日本における工学設計教育の概要』を出版した。…(彼らは)約50の工学系の学校を訪れ、…アメリカでは、まだ存続していた設計や、それを支える工業製図などのコースは、いずれも低い評価しか与えられていないことがわかった。…(彼らが)最もうらやましいと思った工学教育システムは、ドイツとオランダのものであった。「ここでは、工学的科学の基礎だけでなく、技術の実践の一部を教えるための時間をとっている。地位の問題はなく、産業界と工学系の大学との間に強い絆がある…多くの教授は、産業界で10年以上過ごしてから任命されている」。…

[91]＝CAD-CAMで、学生は自動的な解の含意についての理解を欠く結果をもたらす＝

●…1980年にはコンピューター・グラフィックスの技術が発展した。…(だが、)1980年の時点では、コンピューター援用設計—援用製造(CAD-CAM)が近い将来、すべての工学部の教室に導入されるであろうことを窺わせるはっきりした徴候はまったくなかった。それにもかかわらず、レダウェイとブリトンは、コンピューター援用設計がコンピューター自動設計——つまり、オペレーターの側の最低限度の知識であらゆる種類の問題が解けると請け合うソフトウェアを伴ったコンピューター(実際にはワークステーション)の出現——として多くの工学系の学生に広がるだろうという驚くべき可能性を感じとっていた。(彼らが感じとっているように、)学生は、初期条件や最終条件、限界を定めるパラメーター等の適切な入力データを与えさえすればよく、そうすればプログラムが自動的に解答をつくり出してくれるだろう。最も基礎的なレベルにおいてさえも、これは、学生が答の意味しているものや含意についておそらくは理解を欠くという結果をもたらすことになるだろう。もっと高度なレベルでは、設計の本質にかかわる根本的な決定が既製のソフトウェアのプログラマーによってなされ、プログラマーの仮定は実際の設計の要請とはほとんど関連をもたないということになるだろう。

◇専門技術の学士

[92]＝「専門技術系」の学校は、製造の技能にも精通した卒業生が必要だと考えた＝

●1960年代中ごろ、多くの有名な工学系の学校で、格上とされていた軍事研究の猛攻に押されて設計が消えつつあった一方、人気のやや劣る工学系の数校では、『専門技術(エンジニアリング・テクノロジー)に学位を与えは

じめていた。専門技術のカリキュラムは、製図を行うほか、機械の試験のための実験室や「プラクティス・アンド・アート」のコースを含んでおり、そのため、研究志向の学校における工学カリキュラムに比して、30年も時代後れのものだと見なされた。「専門技術系」の学校の教員たちは、科学だけでなく製造の技能にも精通した卒業生が必要だと考えたが、その認識は正しかった。そして、専門技術の学士の数は、1965年のゼロから1980年代中期には約1万2500人にまで増加した。・・・

[第七章 見込みと現実のギャップ]

◇見ることの威力

[93]＝じっと眺め、耳を傾け、周囲をめぐり、人工世界の作動の直観的な感覚を育む＝

●1960年代まで、アメリカの工学系の学校では、学生は技術者が設計したものを心眼によって吟味するよう教師から要請されていた。すなわち、じっと眺め、耳を傾け、周囲をめぐり、こうして人工の世界の作動の仕方(作動しないこともあるが)に対する直観的な感覚を育むのである。彼らは図面を何度も書き直すことで形と大きさの感覚を養った。材料の知識は実験室、鋳物工場、金属加工工場で学んだ。工業都市近傍の学校の学生は、発電所、製鋼所、重機械工場、自動車の組立工場、化学工場に見学旅行をした。近くに重工業が存在しない学校の学生は、2~3人の教師に率いられて工業都市への一週間にわたる旅行を行った。そこでは、操業経験をもつ社会人の技術者たちがしばしば、学生に見識を伝えたり、学生が現実の技術の世界がもつ微妙さを認識する手助けをしたりしたのである。・・・こうした若い技術者が心に抱く物質世界の像は卒業後もさらに広がっていった。社会人の技術者として、彼らは日常的に人工世界の多くの特徴を注意深く眺めながら、言葉では表せない暗黙のうちの知識の範囲を広げ、洗練していった。また、機会を捉えては見慣れない構造物や機械が組み立てられているのを見学し、現場での事故や装置の故障についての知識を深めた。・・・

[94]＝あらゆる技術的な問題が自動的に解ける状態に達したと信じこむことになった＝

●・・・1980年代には工学のカリキュラムは解析的な取り組み方へと移行したので、あらゆるものについての視覚やその他身体感覚に基づく知識は、大して意味のないものと思われた。コンピューター・プログラムが、どう見ても複雑な問題に素晴らしい速さで正確な解を出すので、学生も教師もともすれば、文明はついにあらゆる技術的な問題をたやすく解くことができる状態に達したと信じこむことになった。

[95]＝工学の設計に重要な、言葉では表せない暗黙裡の直観的な理解力が退化した＝

●教職員たちが工業製図と工作実習をカリキュラムからはずし、工場見学も不必要だと考えたとき、学生たちには、自分たちが学んでいる課題の物理的な意味への好奇心が必要だと考える理由はなかった。アメリカ科学財団と国防省が科学研究プロジェクトに対しては一見無制限と思える資金を提供したことによって、物質世界に関する実用的な知識は教職員たちの論議事項から消えり、当然、学生の課程一覧表からも消えた。そして、工学分野の設計にきわめて重要な、言葉では表せない暗黙裡の直観的な理解力は退化してしまった。科学によって工学が先導されるこの新しい時代にあっては、設計の過程は面倒な非科学的な決定や微妙な判断、そして人間による間違いからも開放されることになる、というわけである。

◇設計の問題

[96]＝欠陥のある設計が致命的な結果をもたらし、それは、途絶えずに続いている＝

●複雑なシステムの設計に正確さと厳密さを与える解析手法を生み出すために、莫大な労力と資金が注ぎ込まれているにもかかわらず、逆説が一つ残っている。致命的な結果をもたらした欠陥のある設計は、痛ましいほど途絶えることなく続いていて、その多くが、科学を万能薬と見ている支援者の計画を挫折させてきた。チャレンジャー[スペース・シャトル]、スターク[イラク機のミサイル攻撃で大破したアメリカのフリゲート艦]、ヴィンセンスのイービス・システムなどである。これらの失敗には、経験のなさ、ないしは驕り、あるいはこの両者の徴候が強くにじみ出

ていて、材料の応力の限界や混乱した状況下での人間の限界といったものについて無知であったり軽視していたらしいことを示している。設計が成功するためには、いまでも、言葉では表せない専門の知識の蓄積と経験による直観的な「感触」を必要とし、技術者には、いま設計している新しい技術システムだけでなく、既存のシステムについても深い理解を身につけることが求められる。

[97]＝「グリッチ」はよく起こり、システムの設計者の判断に深刻な疑問が生じる＝

●「グリッチ」という言葉が工学の符牒として導入されたのは、コンピューター化されたシステムにおけるちょっとした間違い——設計のエラー——を表すためであった。しかしながら、グリッチはめったに起こらない間違いなどではなく、こうしたシステムの設計者の判断に深刻な疑問を抱かざるをえないほどたびたび起こっている。1990年1月15日に起きたアメリカ電信電話会社の長距離電話網の全面的な不通は、プログラムによる決定に依存するあらゆるシステムのショッキングな事故の一例にすぎない。…

[98]＝コンピューターモデルは「プログラマーが選んだ一連の恣意的規則なのである」＝

●…有能な人々は客観性と合理性の限界、すなわち、工学における設計がどの程度まで「科学的」になりうるかについて考えてきた。彼らの見解のなかには、コンピューター・モデルを現実の適切な代替物だとする独断的な信条に由来する失敗や意外な出来事の手掛かりが含まれている。ジェームズ・グレイクは「カオス」という「新しい科学」の発展について語る中で、コンピューター・シミュレーションは「現実を可能なかぎり多くの塊に切り分けるのだが、いつの場合も少なすぎるし」、コンピューターモデルはまさに、「プログラマーが選んだ一連の恣意的規則なのである」と指摘している。グレイクは言う。プログラマーのあなたは、選択権をもっている。「自分のモデルをもっと複雑に、もっと現実に忠実なものにすることもできるし、より単純でもっと処理しやすいものにもすることもできる」。

[99]＝動的な系は、初期条件の少しの違いで、計算上の最終状態から大きく乖離する＝

●技術者にとって、型どおりのカオスの勉強で得られる発見の主たるものは、動的なシステムの初期条件のわずかな違いによって、計算された最終状態から予期されなかったほど大きな乖離がもたらされうることである。アメリカ国内の全自動車交通といった非常に複雑なシステムも、原理的には完全に予測可能で、したがって制御できると長く信じられてきた。「カオス」はこの考えが誤りであることを明らかにした。道路は、すべての自動車がコントロール・システムによって自動的に誘導される場合のみ安全であるという考え方は、物理的世界の完全な制御が可能だと信じている技術者の典型的な、しかしながら危険な自惚れである。

[100]＝技術分野の設計の大半は、論理的に矛盾している要請を満たさねばならない＝

●イギリスの建築家アラン・カフーンは、設計の問題の解決に科学の法則をどんなに厳密に適用しても、設計者は心の中に、望んでいる結果の構図をもっていなければならないと、説得力ある議論を展開している。「[科学]法則は自然のなかには見出されていない」と彼は主張する。「法則は人間の心がつくったものである。法則はモデルであって、それが有効なのは、出来事によって誤りであることが示されない限りにおいてなのである」。カフーンはわれわれに、技術分野における設計の大半は、論理的に矛盾している要請を満たさなければならないことを想起させる。たとえば、彼は次のように書いている。——航空機の機体形状に関するあらゆる問題は、物理法則の適用に際しての妥協というものがなければ解決できない。動力装置の位置には決まりがないし、主翼や尾翼の形状についても同じである。ある一つのものの位置が他のものの形状に影響する場合もある。一般則の適用は形状の必要条件である。けれども、実際の形状を決定する十分条件ではない。

[101]＝設計は不測の要素をもち、重大な判断の後に現れる条件の変更に左右される＝

●成功した新しい設計では、学校で会得した知識と経験とが結びついており、必然性よりも判断の結果のほうが多く含まれている。判断が加えられるのは、設計者が所与の目的を達成するために手段を繰り返し修正しながら進行中の設計に対応する際である。したがって、設計は不測の要素をもつ過程であり、重大な決定がなされた後に現れてくる条件がもたらす変更に左右される。設計は、不測の事態が生じた場合に設計者の想像力が要求される創造的な過程でもある。そして、工学設計教育の指導者の一人であるロバート・W・マンが述べているように、創造的

な過程は「その定義からして、事実上予測できない過程なのである」。…

[102]=プログラムの結果を実験的、図解的、数値的に細かく検証する必要がある=

●…考えられている建造物のコンピューター・モデルを誰がつくるかは、当座の関心ではすまされない。そのモデルが商業的に利用できる解析プログラムに組み込まれると、プログラムを利用する設計者には、プログラマーによってなされたすべての仮定を簡単に探し出す術はない。したがって、設計者はプログラムの結果を信頼して受け入れるか、さもなければ、プログラマーが危険な仮定をしたり決定的な要素を省いたりしてはいないこと、そして、設計者自身の独特の課題の微妙さがプログラムに十分に反映されていることに納得がいくまで、プログラムの結果を細かく——実験的、図解的、そして数値的に——検証しなければならない。…

[103]=計算機の解析と設計の結果に立ち向かい、拒否し、修正できる設計者の養成を=

●…別の人物によって作成されたプログラムを利用する危険性を強調するために、(土木工学の)ヘンリー・ペトロスキー…は市販のソフトウェアの利用に関するカナダの構造技術者の言葉を引用している。——構造解析および細部にまでわたるプログラムは複雑なため、専門家は全体として、数人の人が作ったプログラムを利用することになる。その人たちは構造「解析者」の部類に属し…構造「設計者」ではない。総体的に言えば、彼らの設計と建設現場での経験および経歴は限られたものになりがちだろう。このような人の作ったものが有能な設計者の経験や直観を表現することを保証するメカニズムなど、想像するのも困難である…以前にもまして、専門家と教員にとっての努力すべき目標は、コンピューター支援による解析および設計の結果に立ち向かい、拒否し、修正することのできる設計者を養成することである。

[104]=ソフトウェアには多くの仮定があり、結果の妥当性に影響を及ぼすのを理解する=

●コンピューターに立ち向かうことのできる技術者とは、ソフトウェアには多くの仮定が組み込まれていて、それは利用者には容易に見出すことができないが、結果の妥当性に影響を及ぼすことを理解している人たちである。どんな複雑なコンピューター・プログラムにも無数の疑問点が含まれている。コンピューター支援設計がうまくいくためには、用心深さと、成功を収めている設計者が設計上の決定的な決断を下すときに依存するのと同様の、視覚的な知識と適合性に対する直観的な感覚が必要である。技術者は、技術分野でのほとんどすべての失敗が、誤った計算よりも誤った判断の結果であることを常に思い起こさねばならない。…

◇統制された設計

[105]=ファインマンの「上からの統制による設計」と「下からの積み上げによる設計」=

●…物理学者で、チャレンジャーの爆発を調査する公式の委員を務めているリチャード・ファインマンは、NASAがビッグプロジェクトに対する設計手法を根本的に変えなければ、さらなる失敗や予測していなかった厄介事が生じるのは避けられないと述べた。彼は現在用いられている「上からの統制による設計」手順を非難し、これを長い間工学における標準的なやり方となっている実際的な「下からの積み上げによる」設計と比較している。下からの積み上げによる設計では、システムの構成要素が設計され、試験され、必要な場合には、全システムの設計が具体化される前に修正される。上からの統制方式(軍の産物)では、下からの積み上げによる設計ならふつうは解消される数多くの疑問点や矛盾は未解決のまま、全システムが一気に設計されてしまう。そして、各要素の試験を待たずに全システムの組立てに取りかかる。かくして、欠陥をもっているあまり合わない部品を突き止め(このこと自体、困難な問題を含んでいることがしばしばである)、再設計し、組み立て直さなければならないのである。費用もかかる不確実な進め方である。…

◇考慮されない反省の必要性

[106]=先駆的なプロジェクトでは、主任技術者に「論争相手」をつける必要がある=

●…イギリスの構造技術者…アルフレッド・パグズリー(は、先駆的な)プロジェクトでは、主任技術者に「論争相

手(スパーリング・パートナー)」をつける必要があることを理解していた。それは、基本的には主任技術者が入手するあらゆる情報に関知している年長の技術者で、主任技術者がその意見や勧告を無視することはできないような地位にある。このパートナーには、設計の仕事に従事したり、主任技術者によってなされた「重要な」決定のみならず、その細部の含意について調べたり考えたりするための、十分な時間が与えられることに(なる。)

[107] = 「特定の専門分野が内部だけを見るようになり、周囲の知識を排除する愚かさ」 =

●批判的な目で再調査することなく、複雑なプロジェクトのあらゆる側面の決定を主任技術者にまかせてしまうことの危険は、これまたバグズリーが警告を与えているもう一つの危険よりも害は小さいし比べものにならない。その危険とは、専門家全体による誤った教義の採用がしばしばあるということである。新しい教義に対する見当違いの熱狂の例として、バグズリーは1940年のタコマ・ナローズ吊橋の崩壊をあげている。「特定の専門分野があまりにも内部だけを見るようになり、そのため、周囲の他の分野で成長していた関連する知識を排除することを許した愚かさ」というのが、その「大きな教訓」であった。タコマ・ナローズ橋の設計者が空気力学をもっと知っていたなら、この崩壊は避けられただろうとバグズリーは考えた。しかしながら、この橋の設計に空気力学が関係していることを「指導的な構造技術者」の人脈の外にいる人が提示したなら、その助言が土木工学という専門分野に対する攻撃だと見なされたことは、まず間違いない。...

[108] = システムの不適切さで、オペレーターが致命的な誤りの判断をするに至った場合 =

●...不適切なシステムのためにオペレーターが誤った致命的な判断をするに至った場合でも、残念ながら、技術者が事をなす手法を正当化しようという欲求が存在している。

ミサイル巡洋艦ヴァンセンスには、イージスと呼ばれる10億ドルもする「最先端技術を用いた」防空システムが装備されていた。1988年7月3日、この巡洋艦がイランの民間航空機を撃墜し、300人を死亡させた。イージス・システムは軍用機と民間機の双方からIFF(敵味方識別)信号を受信したのだが、巡洋艦のレーダーは一機しか表示せず、それを撃墜する決定が下された。(レーダーや他のいかなる既存の装置も、物理的形状と大きさだけでは航空機の識別はできないであろう)。後になって海軍が下した判定は、一人の下士官兵が表示装置上の信号を誤って解釈したのであり、したがって、艦長の撃墜命令は間違っていなかったというものであった。

[109] = オペレーターたちには、こなすことのできる量以上の情報が殺到していた =

●大きな災難をもたらす「オペレーターのミス」の大半についてと同じく、ヴァンセンスに乗船していたオペレーターたちには、決定的な決定がなされる前の数秒の間に、こなすことのできる量以上の情報が殺到していたのである。海軍のように、イージス・システムは完璧に作動したのであり、惨事は「オペレーターのミス」のせいであると言うのは、このような途方もないシステムを操作しなければならないオペレーターに対するひどい侮辱である。

[110] = 設計者は、システムの中に人間の能力とその限界を組み込むことが必要である =

●SDIの原型であるイージスの設計者たちは、彼らの設計がオペレーター——このシステムに組み込まれた特異性とか制約についての知識をもっていないことがしばしばである——に課すであろう要求をきわめて低く見積もっていた。設計者の誤りよりもオペレーターの誤りが災難の原因だと考えられているかぎり、判断の致命的な誤りは避けられない。設計の過程での驕りと常識の欠如は、機械のほうがおペレーターに、困惑させるような複雑な仕事を要求するという状況をつくり出す。システムの中に人間の能力と限界を組み込むことが必要なのであって、排除してはならないのである。

[111] = 設計の誤りは技術の判断——工学的科学や数学に還元できない判断——の誤りである =

●...不幸な設計の誤りを避けようとするなら、技術者はそうした誤りは数学や計算の間違いではなく、技術判断——工学的科学や数学に還元することのできない判断——の誤りであることを理解する必要がある。実は、技術者が必要とする教育の本質についてのあらゆる論議の最も重要な点はここにある。科学や数学の解析の道具はまず間違いなく必要ではあるけれど、より重要なことは健全な判断と適合性や妥当性に対する直観的な感覚を、学生と新参の技術者の中に育ませることである。

[112]=現実の設計が成功したなら、どんな場合も科学より、技に基づいたものであろう=

●設計の「科学」がどんなに推進されたとしても、不確実な世界の中の現実のものの設計が成功したなら、それはどんな場合も科学よりもむしろ技に基づいたものであろう。数量化できない判断と選択は、設計が現実のものとなる道筋を決める要素なのである。工学分野における設計とは、まったくもってそうした類いの過程である。これまでもそうだったし、常にそうありつづけるだろう。

以 上

[抜粋・要約・編集の文責：福永 征夫]

(3) 既存の領域的な知識をベースにして、新たな領域的な知識を探索し、それらを広域的に組み換えて、より高次の領域的な知識を仮説形成的に創造することを目標に、アブダクション研究の飛躍を期して参りますので、各界、各分野の皆様の積極的なご参加をお願いします。

記

◇ 日 時： 2010年5月29日(土) 13:00~17:00(例会)
17:15~19:15(懇親会)

◇ 場 所： 日本電気企業年金会館 中会議室 (中山氏のお名前で申し込み)

東京都 世田谷区 代沢5丁目33-12 電話：03-3413-0111(代)

* 当日の連絡先(岩下幸功・携帯電話) 070-5541-4742

* 小田急線/京王・井の頭線 下北沢駅 下車 徒歩約8分

* 会場の地図は、グループメールのブリーフケース内「下北沢 NEC 厚生年金基金会館 MA p」に記載。
<http://groups.yahoo.co.jp/group/abduction/files/>

◇ テーマ： 『環境情報と商品企画を考える』

沼田 潤 氏

(知識増幅研究所・武蔵工大名誉教授・元ソニーデザイン<株>社長)

= 参 考 文 献 =

□ 野中郁次郎：『知識創造の経営』日本経済新聞社

◇プログラム：

- | | | |
|---------------|----------------------|-------------|
| (1) 諸連絡： | | 13:00~13:10 |
| (2) 研究発表： | [PART-I] | 13:10~14:25 |
| | <小休止> | 14:25~14:30 |
| | [PART-II] | 14:30~15:45 |
| | <小休止> | 15:45~15:50 |
| (3) 総合的な質疑応答： | | 15:50~16:50 |
| (4) 諸連絡： | | 16:50~17:00 |
| (5) 懇親会： | <皆様の積極的なご参加を期待しています> | 17:15~19:15 |

第73回 アブダクション研究会 (5/29) の出欠連絡

●5/24 (月) までの返信にご協力下さい。ご連絡なしの当日出席も無論可ですが、会場や資料の準備の都合もありますので、できるだけ、ご協力くださるようお願いいたします。

FAX: 042-356-3810

E-mail: abduction-owner@yahoogroups.jp

岩下 幸功 行

●5/29 (土) の 研究会に、未定ですが	出席	調整	●懇親会に、未定ですが	出席	調整
調整	調整	調整	調整	調整	調整
欠席	欠席	欠席	欠席	欠席	欠席

☆ 出欠の連絡は、グループメールメニューの「投票」コーナーから行うこともできます。

<http://groups.yahoo.co.jp/group/abduction/polls>

- * 次々回第74回アブダクション研究会は、2010年7月31日(土)に開催いたします。
- * 岩下 幸功 氏 (有限会社 シンクリエイト代表) にご発表をいただきます。
テーマ名は、「プロジェクトマネジメントとアブダクション (仮題)」を予定しています。
- * 大いにご期待をいただき、奮ってご参加ください。

ご署名 _____

<定例アンケート調査>

もしご協力がいただければ、という趣旨であり、必須ではありません。
皆様のメッセージ集として他の会員にも伝達しますので、情報の交流に積極的に参画下さい。

- (1) 今、アブダクションの研究・実践と関連のある事項で特に興味をもって取り組んでおられること。
- (2) 研究会の議論の場を通してINTERSECTIONAL なアイデアや知見のINCUBATION が進んでおり、例会で発表したいと思っておられること。
- (3) これまで（第1回～第72回）の研究発表やなされた議論（「議事録」を参照下さい）に関して、さらに改めて質疑や意見を表明したいと考えておられること
- (4) アブダクションの観点から、注目すべき人・研究グループ・著書（古今東西不問）。
- (5) 細分化された「知」の再構築を図るという視点から、注目すべき人・研究グループ・著書（古今東西不問）。
- (6) 貴方ご自身がお考えになられている「知」の定義とは？
- (7) その他のご意見、ご要望、連絡事項など。

特に他学会・研究会での発表内容や発表論文等についても是非お知らせ下さい。

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....