

レイトンとエンジニアリング・サイエンス

齊藤了文

Edwin T. Layton, Jr. and Engineering Science

Norifumi SATO

大阪体育大学紀要
第25巻 (1994) pp.161-176

レイトンとエンジニアリング・サイエンス

齊藤了文

1994年3月31日受付

Edwin T. Layton, Jr. and Engineering Science

Norifumi SAITO

In this paper I want to make clear "engineering knowledge". According to Edwin T. Layton, Jr. engineering science and natural science are mirror-image twins. I. e. engineering science has its own knowledges. Most people think engineering as applied science. And then modern engineers are seen as taking over their knowledge from scientists. From this point of view, engineering appears as derivative from science. But engineering itself has an autonomous body of knowledge. Layton asserted this thesis. I summarize his papers and draw some implications from his case studies. Two points are important; problem solving activities of engineering and finite point of view of engineering. I conclude that these points make engineering autonomous.

序

論理学や数学は、19世紀後半以降その学問性を主張しようとして、心理主義批判を行った。つまり、それらの学問は心理的な主観的な内容を問題にする学問ではなく、客観的な学問であることを示そうとして、心理主義批判がフレーゲやフッサールなどによって行われることになった。論理学も数学もある意味で、思考を対象とする学問であると考えられる。具体的なものが研究対象となっているのではなく、いわば紙と鉛筆だけで研究ができる。これは、きつと外のものを問題にしているのではなく、いわば頭の中にあるもの、つまり心理学的なものを対象にしていると思われた。しかし、例えば矛盾律が主観的な法則であっ

て、人によって異なるとすると、これは問題である。このため、論理学においては対象を限定することによって、論理的对象を措定しある意味でプラトニズムをとることにより、「個人とは独立した対象」を問題にする学問として論理学(更に数学)を基礎づけようとした。現実に応用できるという論点を無視したり、紙に書かれた線分は純粋数学には関係しないと主張することによって、いわば現実から逃避することによって、数学や論理学はその客観性、学問性を基礎づけようとしたのであった。

また、多くの社会科学、特に経済学や心理学においても、数学的方法や自然科学の方法を導入することによって、その学問性を保証しようという試みは行われている^{註1)}。これらの学問は、自然科

学とはその対象が異なるために、自然科学の方法の導入は困難であり、その適用可能性に関しても、完全に一枚岩でない部分は存在する²²⁾。しかしともかく、自然科学の方法が導入されることによって経済学や心理学のある部分に関しては学問化が成立したと言うことはできるであろう。そして、その対象が相違することから、これらの学問は自然科学とは別の学問であると当然主張できる²³⁾。「学問性」を確立することは、自然科学の方法の導入によって、それぞれの学問が自然科学から独立した学問であるということはその「対象」の相違によって示されることになる。

さて、工学も 19 世紀以来、その専門化 Professionalization を進めている。たとえば京都大学においても、工学部の学部の増加には目をみはるものがある²⁴⁾。これは当然科学技術の発展と位置づけられる。しかし、それにもかかわらず、工学の学問としての独自性は確立することが困難である。

たとえば、工学が問題にするのは結局は現実に存在する物体であるので、自然科学の「対象」と変わらないように思える。だから論理学のように、それ独自の対象を提出することもできないし、経済学のように、もともと違う対象を扱った学問であると主張することもできない。また工学は、基本的には自然科学の法則（これこそ自然科学の成果であろう）を使ってものを作っているとみなされているので、工学の「学問としての独立性」は与えられないように思える。その対象も学問性も自然科学と同じであれば、工学は自然科学という学問に従属した「単なる応用科学」ということになるだろう。

さて、これとは反対の極に、工学は技術であって知識とは言えないという主張も存在する。体系化、学問化できない部分に工学の本質をみようという試みである。この理解はたとえば産業革命以

前の技術史をみると、理解しやすい考え方であろう。しかし 20 世紀の状況においては、科学的方法の導入とともに、単に個人的な技術、技能という論点のみを強調することは許されないであろう²⁵⁾。

このように見てくると、工学を自然科学から独立した学問とみなすことはそれほど簡単ではないことがわかる。そこで、工学を独立した学問と理解しようとする場合にまず必要となる論点は、工学が知識である、ということだ。これは工学は技能にすぎないものではなく、学問になるべき「知識」をもっているという論点であり、次にこの知識は、自然科学が教えるままの「自然法則」とは違ったものだという論点である。レイトンがこういう主張を提出して以来、Technology & Culture の紙上などで多くの論文が書かれてきた。この小論は、彼の主張の紹介とその批評を行う。

さて工学に関してはこれまで、テクノロジーによって作られた多様な機械が人間に及ぼす影響とか、その製造に関わる労働の問題といったことが主として問題にされてきた。外部から工学の営みを見て、それに対して経済的社会的側面から批評が行われてきた。この外面性は工学自体がその姿を自ら進んで表そうとはしないために、ある程度避けられないことでもあった。しかし、近年になってペトロスキが『人は誰でもエンジニア』や『鉛筆』において²⁶⁾、工学的な思考の内部に入った記述をしたり、日本でも『電子立国日本の自叙伝』を始めとする多くの本²⁷⁾で、ある程度工学の内部に立ち入った記述が行われている。また、面白いことに、一昔前までは、科学技術について発言する人は、理論物理学者が多かったように思われる（哲学者も昔は頑張っていた）が、このごろでは工学者、技術者と言われる人々の発言が目立ってきたように思える。つまり、19 世紀から 20 世紀前半にかけて工学の科学化が完成していったのであ

るが、それに対する反省の試みはやっと緒についたにすぎない。そのような傾向を示すものとして、工学者の社会的発言が活発になってきたと見ることもできるであろう。この傾向を踏まえて、工学をその「内部から」理解することが必要となる。科学的知識に関してはその本性の究明は従来多数行われてきたが、工学の「知識」ということになると、その問題設定がまだ新しく、まだ解明もそれほど進んでいない。

例えば工学についての反省と工学の独自性の確立を明確にするという点から、歴史家レイトンは「知識としての工学」を主張し⁸⁾、エンジニアリング・サイエンスの成立の内部事情を探る論考を多数執筆した⁹⁾。それに影響されたりして、何人かの人は同じ方向での論文や著書を著し¹⁰⁾、またそれに疑問をもつ人との間で論争が行われたりしている。これとは独立に日本では、吉川弘之¹¹⁾を中心とするグループが、工学の中心に位置する「設計」ということに関する反省を体系的に進め、人工物工学研究所を東京大学に設置してその研究を進めようとしている。彼らだけに研究方向が限られるわけではないが¹²⁾、この日米の傾向は、実際的研究(CADに關係する研究)と歴史的研究(19-20世紀の工学史)という相違はあっても、工学という営みに含まれている知識の側面を取り出し、工学の学問性の由来を探り、独立した学問としての位置づけを求めようとする試みだとみなすことができるであろう。

工学はその成果からみると、もちろん非常に発達している。その思考の過程をたどり、「工学の知識」という側面から理解することによって、一般に「応用できる」または「実際に使える」知識の構造が、よりよく理解されるのではないだろうか。この小論は、この点を念頭に置いて、レイトンの議論を土台にしつつ工学的知識の構造を解明しようとするものである。

第1章 レイトンにおけるエンジニアリング・サイエンスの理解

第1節 レイトンの紹介

レイトンはミネソタ大学の機械工学部のテクノロジーの歴史の教授である。

ここで使う彼の論文¹³⁾は、1. Mirror-image Twins (1971) (以下MTと略す)、2. Technology as Knowledge (1974) (TK)、3. Technology and Science (1976) (TS)、4. American Ideologies (1976) (AI)、5. Scientific Technology (1979) (ST)、6. James B. Francis (1981) (JF)、7. Through the Looking Glass (1987) (TLG)、8. The Dimensional Revolution (1988) (DL)、9. Science as a Form of Action (1988) (SFA)、の9つである。(論文の表題はここでは少し省略している。レイトンからの引用は、以下各表題の最後に示した略号を使う。また出典等も含めて、詳細は最後の文献表を参照されたい。)

すこし論文について述べておく。まず、Scientific TechnologyとJames B. Francisの二つは、水車に関するケース・スタディが中心になっている。またMirror-image Twinsは、それがTechnology and Culture誌上に掲載後、そこで最も頻繁に引用される論文の一つであるという意味で、科学とテクノロジーの關係の論点で大きな影響を与えた論文である¹⁴⁾。また、Through the Looking Glassは、the Society for the History of Technologyの会長講演である。また、Science as a Form of Actionは、Michael Foresの批判に応えた論文である。この論争はTechnology and Culture誌上で、1988年1月号で行われた。そしてそこには彼の学生であったDevid F. ChannellがForesの批判に応えた論文も含まれている。

第2節 エンジニアリング・サイエンスの成立

19世紀から20世紀にかけて、エンジニアリン

グ・サイエンス engineering science が成立してきた。「アメリカのテクノロジーは 19 世紀に科学革命を経験した。テクノロジーの知識は何世紀も昔からある手仕事の伝統の母体からその根を引き抜かれ科学に接ぎ木された。1800 年には手仕事であり中世以来ほとんど変化を示さなかったテクノロジー共同体は、科学共同体の鏡映像 Mirror-image Twins として再構成された」 p. 229 MT。これをレイトンは、「テクノロジーにおける科学革命」と名づけている (p. 229 MT)。

エンジニアリング・サイエンスと科学（自然科学）とは共生している。両者とも物質とエネルギーの世界に住んでいるが、異なった社会組織である。両者ともそれぞれの知識体系を科学 science と呼んでいるが、その指し示すものは違っている。ただ、完全に異なっているわけではなく、お互いに利益を与えるような関係をもっている (p. 688 AI)。以上がエンジニアリング・サイエンスに関するレイトンの主張の概観である。ただし彼がアメリカの状況に¹⁵⁾焦点を合わせて論じている¹⁶⁾ということには注意する必要がある。

第 3 節 工学の相互作用モデル

まず「工学は科学の知識を応用しているにすぎない」という主張がどこから出てきたかということ、ここ 50 年程度の技術史家の論を参考にしながら、レイトンは“Technology as Knowledge”で次のようにまとめている。

Charls Singer, E. J. Holmyard, A. R. Hall は、A History of Technology, 5 vols. (London, 1954-58) において、テクノロジーをテクニクとして扱っている。つまり、科学者が新しい知識を生産し、テクノロジストはそれを応用する。ここから、第一に「テクノロジーの知識は本質的に自然哲学と同一になり」 p. 31 TK, 第二に「この知識は 1800 年以降科学者によって産出された」 p. 31 TK ことになる。

また、Maurice Daumas 編集の Histoire général des technique, 3 vols. (Paris, 1962-68) においても、テクノロジーの歴史は、テクニクとそれによって作られたものの歴史に還元されている。ここでは科学よりも経済的決定要因が強調されているが、テクノロジーに思想の成分を基本的に与えない点では、前書と共通する。

これに対して、Melvin Kranzberg と Carroll Pursell は、Technology in Western Civilization, 2 vols. (New York, 1967) において新しい視点を示している。つまり、テクノロジーの歴史の視野を広げ、テクノロジーが独立した歴史的力をもつと考え、明示はしていないが、思想をテクノロジーの一部とみなした。

さて、アリストテレスや中世における論点をみても、テクノロジーと知識との結びつきは示されている。両者の分離は最近のことであり、人工的である。これは、基礎研究が新しいテクノロジーの知識の源泉だとするものである。こうすると、「テクノロジーそのものは新しい知識を生み出さず、テクノロジストの役割は別の場所で生み出された知識を応用するだけのことになってしまう」 p. 34 TK。これが、上述の Hall らの著作によって導入された理論である。

Hall は科学を上部構造に還元しようとするマルクス主義に反対した。Edger Zilsel は、科学革命のマルクス主義的な解釈をして、「科学的方法の 2 つの成分 [職人の経験論と学者の体系的思想] の間の社会的障壁が壊れ、優秀な職人が学究的な訓練を受けた学者に採用されたときに、科学革命が生じた」 p. 35 TK と述べる。Hall は、これに反対する。つまり、科学の実験的方法は単なる試行錯誤には還元できず、科学法則は職人の使うルールの単なる拡張でもないと言う。更に、彼は「テクノロジーは科学に、器械の使用と問題提示という点で影響を与え」、「科学はテクノロジーに理論と

いう点で影響を与えた」p. 35 TK と述べる。

科学は新しい知識を創造し、工学はその知識を応用する。こういうイメージは非常に流布している。レイトンはこのイメージの一つのルーツを以上のようにまとめる。

しかしそれに対して、テクノロジーも思想の体系であって、科学とは独立した体系だと、レイトンは言おうとする。ここで引き合いに出すのがコイレ (Alexandre Koyré) である。科学の成果である法則がテクノロジーに与えられるだけでなく、コイレも言うように、「宇宙が精密な数学的法則によって支配されているという考え」p. 36 TK が重要である。つまり科学の成果をただ受け入れたというよりも、科学の「方法」を使って自然科学とは別の「知識体系」を作り上げたというのである^{註17)}。

ワットの蒸気機関はブラックの潜熱の理論の応用だというイデオロギーがある。しかし、科学的テクノロジーは自律的に発展したのであり、エンジニアは、エンジニアリングのために仕立てられた科学を発展させるために、物理学から方法を借りたのである (p. 175 TS)。つまり、エンジニアリングは単なる応用物理学ではなく、また物理学は知性化されたエンジニアリングだとも言うことはできない。

「エンジニアが物理学者から借用したものは、実験的、数学的方法であり、科学的テクノロジーを育てる時に必要な制度である」p. 175 TS。もちろん、科学から工学に対して直接の影響がない、と言っているわけではない (p. 603 TLG)。しかし方法の借用によって、制度上の類似性が増し、20世紀になるまでに、工学は物理学の鏡像になった。ただし工学は「知る事」以上に「すること」を評価したが、物理学ではそれが逆転している。

物理科学は抽象的で一般的であることが最高で、器具の操作や応用は最低であった。それに対

してテクノロジーでは、成功した設計者が最高で、「単なる」理論家は最低だった。つまり「科学者は知る know ことを求め、テクノロジストはする do ことを求める」p. 243 MT。何を重要とするかの順序が違っている。

以上がレイトンの主張である。工学は科学とは別種の知識体系をもつという主張の根拠として、彼は歴史的事例を提示する。最初は、テクノロジーの発達が基礎研究の発達に促されていないという事例であり、もう一つは、テクノロジーと科学との間には知識のやりとりが一方的でないということを示す事例である。

まず最初の例である。基礎研究がテクノロジーの進歩のペースメーカーだという考えを受けて国防省は \$ 10 ビリオンを 1945 年から 1966 年の間に科学研究に援助した。その 1/4 が基礎研究のためのものであった。しかしそれだけの援助をする価値があるのかということが問題にされ、8年かけて研究された。さて援助とその成果に関する実態を吟味してみると、テクノロジーに対する科学の直接の影響が小さいことがわかった。基礎科学による貢献は、全体の 0.3% にすぎなかった。ただここで「彼らが証明したことは、直接の影響は小さかったということだった。つまり、科学とテクノロジーの関係の伝統的なモデルは、改変する必要があることを彼らは示したのであった。」p. 231 MT

次に、テクノロジーと科学の間には、知識のやりとりが一方的でないということは、熱力学の発達を考えればよくわかる。「この科学は設計原理としてフランスの工学者カルノーから始まった。それは自然の法則ではなく、蒸気機関の効率の限界についての発言であった。その発展は単純な巨視的モデル—カルノーの理想的熱機関に依存していた。それは分子仮説には依存していなかった。それは Kelvin, Rankin, Helmholtz のような科学

者—工学者によって工学の文献の中で発見され、彼らによって科学の言語に翻訳された。熱力学が物理学によって吸収されたので、カルノーの理想的熱機関は統計力学の分子モデルによって置き換えられることになった」p. 245 MT。

このようにみえてくると、特に後者のようなタイプの実例はその他たくさんありそうだし、レイトンの主張はなかなか納得のいくものである。そして実際、このあたりの基本的論点に関しては、一般に合意が生じているようである。

科学とテクノロジーの関係は、テクノロジーの歴史の文献の中で、この25年かなり論じられてきた、と1987年のThrough the Looking Glassでレイトンは述べている。そして「相互作用モデル interactive model」をとるという点でコンセンサスが生まれている、と述べる(p. 597 TLG)。昔は、テクノロジーは科学の下に従属する階層のものだと考えられていた。この古いモデルでは、テクノロジーは科学からその知的な実質を引き出したとみなされていた。それに対して新しいモデルは、テクノロジーを自律的で、科学と同等の共同体と見なすものである。つまり、テクノロジーと科学との関係は、共生的 symbiotic で、平等的で、相互作用しているものだとする。両者ともその産物を互いに利用しあっている。テクノロジーも科学と同じように、創造的である(p. 597f. TLG)。そしてもう一つのコンセンサスは、科学だけが唯一の客観的に妥当な知識の形式ではない、ということである(p. 598 TLG)。「科学もテクノロジーもサブカルチャーだと見なすことが、相互作用モデルの本質である」p. 602 TLG。

第4節 まとめ

こうして、工学者の共同体が科学者の共同体とは相対的に独立しているという論点、従って工学の知識、テクノロジーの知識の独自性、自律性があるという論点に関してはある程度納得できるで

あろう。すると問題になるのは、工学の知識、テクノロジーの知識は、自然科学の知識といわれるものと何がどのように違うかということである。この具体的究明なくしては、「工学の知識」ということを大きな顔をして言うことはできない。しかし、この詳細に関しては、まだ意見の一致が得られていない^{#18)}。そこで、この小論ではレイトンの論点を手掛かりとして取り上げることにする。レイトンは、歴史家らしく、ケース・スタディという方法を使って、幾つかの論点を示している。

レイトン自身は、工学の知識の特質として、「設計」ということを強調する。(これを第2章第1節で概観する。)つまり、科学は「知ること」を求めたが、工学は「すること」を求めた。つまり、作ることができなければ、工学の知識とはなりえない。この対比に基づいて、彼は工学の知識の特質として、「理想化 idealization」を取り上げる。これに関して次章で3つの論点を概観する。

科学的方法を導入しても、工学を全く科学と同一視できないのはどうしてなのか。これが基本的な問題設定だと考えられる。科学的方法の第一として、定量的数量的な世界記述、つまり科学法則があげられる。世界を科学的に記述するために科学法則を使うと、抽象化や理想化は必要である。しかし、現実の機械を制作する場合には、複雑な物理的相互作用を排除できない(これについては、第2章第2節で概観する)。科学的方法としての実験について考える。工学においては模型(モデル)を使って実験する。その実験が実物大の装置にもあてはまる実験になっているかどうかが問題になる(これについては、第2章第3節で概観する)。最後に、工学の使用するモデルに関しては、科学的に基本的なオントロジーに還元するということも行われていない(これについては、第2章第4節で概観する)。

第2章 工学的知識

第1節 設計

設計の位置づけは重要である。「工学の応用説」によれば、科学が見つけた真理、科学的法則を使って、工学は設計し、ものを作るにすぎないということになる。つまり、頭を使うのは科学であって、工学は体を使うにすぎないということになる。この論点を批判しようとする、まず、工学における設計には、科学法則だけでは十分でない」と主張する必要がある。そして更に、ここで付加されているものは、技能という全くの体で覚えたこととは違って「知的なもの」だと言う必要がある。

前者に関しては3つの指摘がある。

コイレー彼は「知ること」と「すること」の区別を強調した — は、物理的实在を精密な数学的世界の言葉で書くようにしたのが科学革命だと言う。このような科学の性質と比べて、工学は理論を用いていても、その結果は精密でない。つまり、工学には総合する行為である設計が不可欠であり、そのため経験的な仕事を排除できない。設計を洗練するには、経験的な退屈な過程が必要なのである (p. 176 TS)。

また科学的法則の普遍性、客観性と比べて、工学は自己の外にある需要に奉仕し、そのために目的論的になる (p. 176 TS)。社会的な必要性や社会的責任に関係する。しかしここにいう目的論は、医学や農学という実践的な学問が共通にもつものである (p. 91 SFA)。(この意味で工学の学問性に関わる論点は、実践と結びつく学問にまで一般に開かれているように思われる。)

19世紀から20世紀にかけての橋の設計家である J. L. Harrington はカンザス市の第12ストリート高架橋を設計した。しかしこの設計は、「工学的な知識を十分利用するのに失敗した」ということで J. L. Mensch によって批判された。Harrin-

gton は基礎科学を攻撃するために、エンジニアリング・サイエンティストによって使われた多くの議論を使った。Harrington は、「自分の計画を完全な材料と技量を期待することに基づかせ、両者の不完全性は全く許容しない極端な人」を批判する。「便利さや設計の一様性を考慮することは、計算された応力と精確に一致して切断することを許すものではない」のだから、純粋に理論的な計算はしばしば無駄になると彼は更に指摘する。「数学的分析は健全な判断力 sound judgement によって支援されねばならない」と彼は結論づける」 p. 698 AI。

しかし、それにもかかわらず、決まりきった建築をする現在の建築家が、何世紀も前に生きていた天才でさえなしえなかった建築をすることができるという意味で、エンジニアリングの設計は累積的である (p. 698 AI)。これは継承と発展が困難な技能とは区別される「知識」と言っている性質だと思われる。

またテクノロジストは「すること」を求めるとして、工学における設計の役割をレイトンは強調する。設計は工業製品を作るのに必要な知識を具現している。「設計は抽象的で理想化された概念から、現実の世界に存在する具体的で高度に複雑なテクノロジーの産物にいたるまでの認知の橋を作りあげている。それは最高のレベルにある「方法の知識 knowing how」である。」 (p. 604 TLG) ここで問題になるのは、設計、方法の知識というものが、知的に優れた行為であるということである。アインシュタインの科学の知識と、子供が自転車に乗る方法の知識という対比で理解すべきでなく、アラン・チューリングとクレイ・コンピュータの発明者の知識の相違と考えてほしい (p. 604 TLG)。こうレイトンは言う。

つまり、工学は、経験的な部分を含み、数学化とは違った仕方でも補足が必要であり、また実践的

という意味で目的と関与する。しかもそれは累積的であり、「方法の知識」と言っても知的なものを含む。このような論点は、幾つかの事例に基づく経験的断定であるとはいえ、ある程度納得できるものだ。すると内容は差し当たりそれほど明確に示されてはいないにしても、工学の知識というものを大枠として認めていいように思われる。問題はそれがどのようなものかということである。

第2節 理論における理想化

工学はどのような意味で自然科学とは違ったタイプの理論になるのか。

工学と物理学との重要な相違は、理想化 *idealization* である (p. 178 TS)。一般性を求める物理学者は問題を単純化しようとする。摩擦や流体の抵抗や不完全な弾性や縮尺の影響を排除する。しかし、テクノロジストにとっては、これらの要因を考慮に入れる必要がある。「工学者はより複雑な実在を考慮に入れねばならない」(p. 178 TS)。数理物理学の古典的方法是線型化だった。

そして、このような線型化が用いられたのは、摩擦等を説明するために変数を加えると線型方程式が非線型方程式になってしまい、一般解が存在しなくなってしまう、特殊な解も得にくくなってしまふからだ。これは、特殊な解を必要とする工学者には受入れられても、「知ること」をめざす物理学者にとっては耐えられない。つまり一般性が得られない (p. 179 TS)。

もちろん、工学者は理想化をしていないと言っているわけではなく、物理学者も非線型を考察していないのではない。しかし、工学における理想化は「すること」をめざしているだけに、「知ること」をめざす科学と比べて、高度な理想化が困難であるのは確かであろう。このことに関して、例えば Benjamin Franklin Isherwood は、「理想化された法則は、工学の実践において出会う複雑な状況を正確に表現しない」 p. 180 TS と述べた。

例えば水車の歴史を考えてみる。

流体の速度を支配するトリチェリの理論だけでは実質的にはどうしようもなかった。

19世紀の工学者である Fourneyron は、摩擦と流体抵抗がないという条件の下で問題を解いた。数学的理論を使って設計しようとする、こうしかできないだろう (p. 99 JF)。

水の実際通る道は、乱流をつくる鋭い曲がり目がない限りは重要ではないと彼は考えた。しかし、Boyden はその想定が正しくないことに気づいた。渦も乱流も多くのもことによってつくられる。そしてこれこそ、タービンの効率を失わせる一番重要な源泉になる (p. 99 JF)。

つまり、理論を先行させて工学がそれに倣おうとしても、実はその理論が理想化を行い条件を捨象しているので、ものをうまく動かそうとする工学においては役に立たないことになる。理論の有用性は実は自明ではないのである。この論点を更にみていこう。

テクノロジーに対する実験的アプローチはアメリカではすぐに採用されることになった。しかし、理論は遅れた。これは一つには、19世紀のアメリカのエンジニアが高度な数学的訓練を受けていなかったということもあるが、もっと大きな問題は、数学理論を実際には役に立たないものと見なしていたということである。「理論的アプローチは、採用されるために、その有用性を証明しなければならなかった。困難は現存する理論の制限にあった。材料力学は1830年代までに科学に発展していたけれど、その理論の応用範囲は限られていた。限られた数の問題に対して非常にエレガントな解答が利用できた。しかし大抵の問題は解決できなかった。多くの問題は非決定的だった。未知数の数が方程式の数よりも多かったのでその問題は解けなかった。残念ながら、非決定的な事例の中には、アメリカの工学で実際にしばしば出会われる

もの、連続した梁やトラス橋が含まれていた。」p. 240 MT

結局、工学者は複雑な実在を考慮に入れねばならない、という論点と、科学で作られた理論はエレガントではあっても問題解決できないという論点と、第1節で述べた経験的な部分が残るということである。「今までのところ、実践の複雑さは理論を越え続けている」p. 89 ST。工学の実践において単純な理論の適用は可能でない。そして複雑な実在を扱うための理論は—それをエンジニアリング・サイエンスは求めようとするのだが—科学が目指す理論とは違う方向をむいている。つまり、より理想化の少ない、いわば泥臭い理論が必要とされることになったのだ。(ここで、もしかすると量子力学などを念頭に置いて、すべてを結局は説明することになる理論があれば充分ではないか、と考える人もあるかもしれない。これこそは複雑な実在を扱う理論だ、と考えるのである。このタイプの問題設定については、第4節で扱うことになる。)

第3節 実験における理想化

工学では直接自然に関わるのではなく、人間の作った装置に関わる (p. 695 AI)。工学の理論と実験は物理学のとは違っている。どうして工学は自然科学とは違ったタイプの学問になるのか。この問いに対して、今度は実験という側面から考えてみよう。

水車を例にとつて考えると、例えば18世紀の中頃に John Smeaton は、水車の最適動作条件を確定するために模型実験をしようとした^{#19}。彼は模型水車を作って、荷重、水車速度、水量、羽の数、羽の角度といった重要な可変要素のうちの一つをそれぞれ系統的に変えていった。(この方法を W. G. Vincenti は「パラメーター変化」と名付けている^{#20}。) これによって最大効果を生む場合に水車がどのような条件をもつ必要があるかを発見しよ

うとした。

このとき、模型を使うのは、系統的な変更の便利さと経済性のためであった。実物大の水車なら、莫大な投資が必要になり、変更もその測定も単純ではない。例えば大きな橋をかけるために実験を行うということを考えてもこの点は理解できるであろう。

さて、工学の理論と実験は物理学のとは違っている。工学では直接自然に関わるのではなく、人間の作った装置に関わる (p. 695 AI)。そして「機械に実験を応用する試みは、「縮尺効果」による複雑な問題にまで達していた。その結果はしばしば首尾一貫せず、機械の大きさが変わるにつれて予想もできないような仕方で変化した。」p. 96 JF

つまり、模型を使って得られた結果がそのまま実物大の機械にも当てはまるということは(特に水力学に関わる水車のような機械に対しては) そう単純にはいえないことがわかってきたのである。

縮尺の影響という圧政から工学者を解放した年を1883年に設定したいとレイトンは言う。この年にレイノルズ数で有名な Osborne Reynolds が流体力学に関する論文を書き、流れが層流から乱流へ移行する条件を「無次元数」で表した。これによって模型による実験と実物大の性能の間の「類似性の法則 laws of similitude」がわかるようになった (p. 23f. DR)。

レイトンは、次元解析 dimensional analysis の勃興が工学の革命を作りだしたと述べる。これを彼は「次元革命 dimensional revolution」と名づける。「それは二つの密接に相関する部分をもっている。有用な縮尺—モデル実験 scale-model experiment とより洗練された、理想化が少ない工学理論 more sophisticated, less-idealized engineering theories の二つである」p. 23 DR。これを使ったより有用で精密な実験によって、工

学はより科学的になり、多くの方面へテクノロジーの発展を加速させた。そしてその革命の典型的な影響は流体力学や空気力学でのモデル実験や強力な工学理論に現れ、間接的ではあるがライト兄弟以後の航空学の目をみはる進歩をそれは可能にしたといえる (p. 23 DR)。

縮尺効果について、少し歴史を遡って概観してみる。例えば B. C. 1 世紀の Vitruvius は木工ぎりを使って 1 インチ程度の孔を開けることは可能だが、掌の大きさの孔をあけることは不可能だろうと言って、同じ原理が縮尺によっては成り立たないということを指摘している。しかし例えば、レオナルド・ダ・ヴィンチは「単純な幾何学的規則を用いて、大きな仕事に木工ぎりをスケール・アップする方法を示そうとした。木工ぎりに必要な力は、押し退けた面積つまり半径の自乗に比例すると彼は考えた」 p. 25 DR。

この考えは初等幾何学の相似則に基づく透視図法によるものだろう。「しかし小さなモデルを大きな人工物に関係させる問題は、レオナルドが理解していたよりもずっと複雑だった。直観は、テクノロジストを幾何学に基づく正しい類似性関係へと導くかもしれない。しかしこれがたやすく運動学的、動力学的な類似性を含むように拡張できると考えたのはレオナルドが間違っていた。不運にも多くの場合、レオナルドのような単純な幾何学的な議論は十分でなかった。残念ながら、多くの場合に縮尺モデルの運動学的、動力学的ふるまいが実物大の人工物の類似したふるまいに対する正確な導きではないということを、実験家たちは見いだした」 p. 26 DR。

また「工学における状況と鋭く対立して、ニュートンはプリンキピアの中で物理学に対する類似性 similitude の規則を与えた。しかし粒子のシステムに対しては効果的だったが、類似性についてのニュートンの仕事はテクノロジストの助け

にはならなかった。工学の人工物は複雑な形という特徴をもっており、一般に粒子のシステムに還元できない。そのような装置を実験的に理解しようという工学者の試みは、縮尺の問題に出会った。モデルについて正しいことが、幾何学的に同じ実物大の装置に当てはまることはめったになかった」 p. 26 DR。

「縮尺効果は、科学をテクノロジーに応用しようとするあらゆる試みにとって根本的なものであった」 p. 78 ST。工学は人間の作った機械を扱わねばならない。そのため模型による実験が必要になる。しかしその実験の結果も、取り扱いが単純ではない。幾何学的な類似性を単に外挿して済むものではない。この意味で模型による実験は、幾何学に還元されない理想化を行っている。これが、工学で扱う必要のある理想化だ。

第4節 解を求めるための理想化

第2節において、科学における理想化に基づく理論は、工学においては直接使えるものとはならないということを見てきた。この節では逆に、そのような非線型の方程式が与えられるにしても(例えば量子力学の方程式が与えられたとしても)、まだ問題は残るということを見ていく。これは工学が示す、科学とは違った方向への理想化である。まず3つの指摘を見ることにしよう。

「エンジニアリング・サイエンスの応用の範囲の拡大とともに生じたのは、解析解 analytic solutions から離れていく傾向、近似への依拠、そしてある程度は数学的厳密性の減少であった。材料力学において与えられた問題は厳密に弾性理論によって解決されてもいいし、もしくはそれほど厳密でない図形的方法で扱われてもいい。Rodman に始まるアメリカの工学者は、応力ゲージやモデルを使った一層厳密さの欠ける経験的方法のパイオニアだった。技術の選択は経済的および技術的要因に依存した。というのは厳密な取扱いは、可能

な場合には、しばしば時間と努力を一層必要としたからだ。厳密さを変化させる方法の階層の発展は、その使い方を決定する経済的要因の重要さと相まって、エンジニアリング・サイエンスを物理学から区別するのに役立つ。物理学では一番厳密な方法だけが通常は認められている。」p. 242 MT

「材料力学が科学の共同体からテクノロジーの共同体へ移るにつれて、材料力学は重大な変形を受けた。物理学との結びつきは弱まり、それは基礎科学に特徴的ではない仕方でも発展した。同時に技術的有用性の範囲はだんだんと拡大した。科学者は、原子やエーテルや力のような非常に基本的な存在に言及することによって自分が発見したものを説明する傾向があった。しかしこれらの存在は常に直接観察できるとは限らなかった。しかし、設計者にとって有用であるためには、定式は測定のできる存在、特に実際の人間にとって重要なものを扱わねばならない。これらは科学的な意味では基本的である必要はない。」p. 235f. MT。

最後にまた水車の例を考える。水の実際通る道は、乱流をつくる鋭い曲がり目がない限りは重要ではないと最初は思えた。しかし、渦も乱流も多くのものによってつくられる。そしてこれこそ、タービンの効率を失わせる一番重要な源泉だ (p. 99 JF)。

現存する数学は渦も乱流も扱えなかったので、Boyden は数学的アプローチをやめて、「彼は水粒子の流れの道、流線 streamline を、タービンを通して動くにつれて、少しずつたどり、基礎的な水力学的機械的原理を使うことによって、付加される要因を考慮に入れこうして効率の損失を減らした。彼のタービンは 88 パーセントもの効率を得た。Francis は Boyden の方法を吸収し拡張し、タービンを設計するための図式法 graphical method を発展させた。」p. 99 JF

以上の 3 つの例からも分かるように、究極的な説明、また方程式が与えられたにしても、工学はそれを使わず自らの理論を発達させようとする。これはまず、理論よりも現象に従うという傾向を示している。実際 Boyden や Francis は、数学理論を理想化だとみなし、それに従うよりも、実験によって最適の設計をしようとした。これは、理論からみると曖昧な方向に進んでいるようではあるが、実は理論においては無視されていた摩擦や水の内部抵抗や縮尺効果といったものを考慮する方法となっていた。また、「経済的要因」を考慮に入れることとか、「測定できる存在」を問題にすることも行われている。ある程度曖昧なモデルを使うことによって、複雑な現象を考慮に入れることができる。しかも、その結果が容易に手に入り(経済的要因)、しかもそれを使って機械を作るのに役立つ(測定できる存在)。

例えば「エンジニアリング・サイエンスはしばしば自然哲学の基本的オントロジーを落としている。それは形而上学的根拠に基づくのではなく実際の根拠に基づいている。かくして、固体力学 solid mechanics において、工学者は原子と力の小宇宙というよりむしろ連続媒体において応力を扱っている」p. 695 AI とか、工学者は連続媒体における応力を好んで、粒子と力のオントロジーを捨てた (p. 178 TS) と、言われたりする^{#21)}。

機械をつくるためには、抽象的法則が与えられても、それだけでは仕方がない。それを使って具体的な解が手に入らないと何にもならない。法則は自然の本質を知らしてくれるかもしれない。しかし、機械を「つくる」ためには、充分な精度の計算結果が必要なのだ。結局工学においては、物理学の提示するオントロジーに依存しないとか、通常は厳密と見えない方法を採用するということが生じる。「測定できる存在」に依存するということは、機械や構造物を作る場合の必要条件であ

り、経済的要因や図式的方法を用いることは必要な精度で、必要な時間内に（工学にとって重要な要因を無視しないで）解を求めるための必要条件である。つまりこれが工学において必要とされる理想化なのだ。

第3章 レイトンに対する評価と考察

第1節 論点のまとめ

第1章でレイトンは工学的知識の独自性を主張しようとした。そして、ここでの強調点は、工学が科学とは別の共同体になっているということにある。つまり、科学は知ることを目指し、工学はすることを旨とする。工学の特徴づけとして「設計」を特に取り上げるのは、この考えによる。

もう一つの論点は、科学が探究した結論である法則を、工学はただ借用しているいろいろなものを作っているというイメージ、「工学は応用科学に過ぎない」というイメージは、誤解を招くものであるということである。科学の工学に対する影響は間接的である。つまり、法則をそのまま使っているのではなく、方法論を科学から受け継いで、独自の学問をつくり上げている。工学は技能というよりも、知的営為であって、「工学的知識」を探究することに意味があるとする。

第2章では、工学の知識がより具体的に考察された。第1節で、工学の知識の特質として、「設計」が強調されていた。つまり、科学は「知ること」を求めたが、工学は「すること」を求めた。つまり、作ることができなければ、工学の知識とはなりえない。この対比に基づいて、彼は工学の知識の特質として、「理想化 idealization」を取り上げる。これに関しては、以下の3つの論点に分けられた。まず第2節で、工学においては経験的な部分を排除できないという論点が論じられた。科学法則を求める場合には、もしくは世界を記述しようとする場合には、抽象化や理想化は必要である。

しかし、現実の機械を製作する場合には、摩擦などのいわゆる副次的な要因を排除できない。このために科学が提示する理論を直接使用できないことが生ずる。これは科学にとって特に重要な理想化だ²²⁾。次に、第3節では、縮尺効果を取り上げた。モデルを使った実験的研究においては、その実験が実物大の装置にもあてはまる実験になっているかどうかが問題になる。モデルは理想化して作ってあるので、そこで実験して得た結果が、実物にそのまま当てはめることはできず、例えば幾何学的な相似をそのまま当てはめて考えることもできない。これは機械をつくるために、工学が処理しなければならない理想化だ。そして最後に第4節では、工学における理想化においては何に注目されているのかをみてきた。つまり工学の使用するモデルに関しては、科学的に基本的なオントロジーに還元するという事は行われていない。そして、これはいいかげんなことをしているのではなく、解を具体的に求める必要のある工学にとって不可欠の操作だ²³⁾。第3節と第4節で示された理想化は、特に工学にとって重要となる理想化だ。つまり設計に必須の理想化だ。

第2節 考察 1

まず最初に、レイトンの論文を使ったことに関するコメントをつけておく。

レイトンは歴史学者であって、工学的知識がどのようなものであるかを事例を使って説明し、提示する。しかしそこから立ち入って、その基礎にある前提をあえて取り出そうとはしない。私自身はまとめる都合もあって、彼の視点や論点とおもわれるものをなるべく取り出そうとした。しかし章だてや論のはこびも彼と同じではない。例えば、理想化を3つに区別することの強引さについてレイトンは反発するかもしれない。そして、全体として彼自身が必ずしも全面的に納得する論調

にはなっていないかもしれない。しかし「工学の知識」という問題に関して、幾つかの興味深い論点は取り出したつもりである。

またレイトンの問題点として、彼が事例として挙げるのは水車とか水力学の例が多いということがある。しかも基本的にはアメリカにのみ目が向いている。つまり、レイトンは自分の提出した事例に引っ張られた結論を提出している可能性もある。つまり、理想化は流体力学との関連で特に焦点となる。それに対して設計の失敗がもつ意義を焦点にするといった全く違った視点もありうる^{#24}。工学は非常に範囲が広いために、「工学的知識」としてどの程度一般的な話ができるかということ少し慎重にならざるをえない。もちろん考察すべき論点の幾つかを示しているのは事実であろう。

そして一般的に言って、科学と工学の完全な分離は多分不可能であろう。科学と工学を両極として理解すると、工学の側面には、実験や設計といった実践と深く結びつく局面が見出される。この小論ではこの局面を特に取り出そうとして論じたのだ。だから、例えば工学の実際の研究者にとっても、いわば理論の面に傾斜し、理学部での研究とほとんど区別のつかないことをしておられる方もあるかもしれない。またその逆もありうるであろう。この小論では典型と思われるものを提示して、従来科学哲学であまり論じられなかった局面を解明しようとした。このために、「工学」の定義という明確な基準に基づく議論は行わなかった。実際、ある意味では工学の定義から出発するというよりも、その定義を見つけることがこの小論を含めた一連の研究の課題となっているとも言える。

第3節 考察 2

さて、以上のことを踏まえた上で、工学の知識に関して有限性の論点とオントロジーに関わる論

点を述べて結論にする。

工学は問題解決である^{#25}。基本的に問題解決の方法は、3つに分けることができる^{#26}。1. 理論モデル、2. 情報モデル、3. 物理モデル。理論モデルは、入力と出力との関係を関数関係として示すため、対象がもつ傾向を読み取ることができる。他の2つの方法は、特定の入力に対して特定の出力を示す。対象に対する情報が非常に乏しいときは、物理モデルが用いられる。これは自然科学の場合には物理実験であり、工学においては実物大のモデルを用いる代わりに（通常は）縮小したモデルをつくってその動作を調べるということである。これらと比べて、情報モデルは、近年使用されるようになった。つまり計算機シミュレーションのことである。

ここでは情報モデルは考えない。さて、工学においては機械を作るという問題が与えられている、というところから始まる。工学に含まれる目的はこれである。このとき、モデルを使って問題解決をしようとする。しかしもちろん、縮尺模型が作られたり、数学的表現が行われたりするだけでは、問題解決にとってモデルは役に立たない。つまり、モデルを使って、新しい「発見」が行われないと、モデルを作った意味はない。作り上げた水車が高い効率をあげるか、建設された橋が倒れないか、ということを予め知るために、モデルにパラメータ変化が用いられるのだ。

だからそのモデルが説明として単純で、一般に理解しやすいかどうかという、「知ること」をめざした説明の首尾一貫性は、科学には必要なことではあっても、工学の問題解決にはあまり重要なことではない。

経験的なものを排除できないということは、工学の問題解決が、ものを作るということから理解される。そのため、工学の抽象化、理想化は科学の抽象化、理想化とは違ってしまっている。工学

の問題は、多くの条件や複雑な方程式を何とかして処理しなければならないというところにある。(科学では、小さな影響しか与えないものは、それを無視できるような実験室を作ることによって、「純粋な」自然の姿が分かると考えるかも知れない。)そして、工学は解を求めなければならないために、たとえ数学的に摩擦などの要因をいれた方程式を作っても、それが解けるかどうかかわからないし、解けたにしてもそのための時間とコストを勘案しなければならない。有限の資源の下で問題を解決しようとするという意味で、工学は「有限の立場の学問」だと言える。

さて自然科学においては実験室での実験が最上である。つまり、科学にとっては典型的には、どの要因によってこのような結果が起こったかを確認することが、その目的である。このとき、多様な要因が関与している、泥臭い現実の中でその決定的な要因を発見することは困難である。この困難さは特に医学において病原菌を見つけることの困難さにおいて典型的に現れている。また、心理学の実験においても、その独立の要因を見つけることはなかなか困難である。このように、科学は泥臭い現実の中から抽象し理想化した理論を作ることを目指している。これこそ科学に課された課題である。そしてこの観点から、科学の理論とそれに対応するオントロジーの性格が決まってくる。発見された独立の要因（例えばクォーク）がこの世界を構成するものだといったオントロジーがとられる。

これと対比されて、工学では実は低俗なことをしているだけで、自然を理解することのように高尚なことをしているのではない、と言われるかもしれない。しかし、実際に動くものを作ろうとするときには、実際の問題の物理的条件を無視することは虚偽であり欠点である (p. 691 AI)。工学者は機械に起こっている物理的要因の複雑な相互作

用を排除できない (p. 693 AI)。そして工学においては、作ることが目的となっていることを忘れてはならない。そのためには微分方程式が与えられるだけでは駄目であって、具体的な解を求める必要があるのだ。そして解を求めるための理想化も必要となる。このため厳密な数学的方法よりも図式的方法が採用されることもある。この観点から要求されるオントロジーは、世界の究極の構成要素を指示するものではない。実際に動くものを作ろうとするときに求められるオントロジーは、解を求めるための理想化に基づく理論に対応している。

「アレクサンダー・コイレによると、科学革命の主要な結果は、理想的な数学的世界、つまり目的論や相対的な程度の完全性についての考慮のすべてから自由になった、精密な世界の言葉で、物理的実在を記述することだった。しかし、エンジニアリング・サイエンスは、実践に奉仕しているために、この特徴のどれも持っていない。工学の世界は全く理想的な数学的世界ではなく、より複雑で量的に区別されたものである」 p. 88f. ST。

数学的世界は工学の世界ではない。機械を作ろうとする工学者がもっているイメージと、哲学における機械論から連想される幾何学的世界とは全く違っているのである。物理学的理想化がものの本質を示していて、工学的理想化がそれを示さないとなぜいえるのだろうか。

注

- 1) もっとも、法学などでは、科学的方法の導入とは別の、その内部での論理性において学問性を求めようという試みもある。
- 2) 人文科学、精神科学 moral science においてはリッケルトをはじめ独立した学問であることについてはいろいろ議論されている。
- 3) もちろん、心理現象は生理現象に還元されるとすると、ことはそう単純ではない。
- 4) 京都大学の工学部も明治 30 年 9 月に土木工学

- 科と機械工学科の2学科で開校して以来、現在では工学の分野のほとんどを網羅した23学科155講座で運営されている。『京都大学—研究教育の現状と展望—』(1991-1992)を参照
- 5) もちろん、設計においてはこの論点はある程度生きている。
 - 6) Henry Petroski: *To Engineer is Human* (1992) <originally 1985>, *The Pencil* (1989), *Disign Paradigms* (1994)
 - 7) 『テクノパワー』1~5NHK 出版『メタルカラーの時代』山根一真 小学館など
 - 8) 「テクノロジーは知識と考えられる」という論点については、多くの人の賛同があった。この点は、Rachel Laudan が1981年4月のピッツバーグ大学での *Models of scientific and technological change* という会議の報告として述べている。“*Technology and Culture*” 1982 pp. 78-80 を参照
 - 9) このタイプの研究は最近「認知的研究 *cognitive studies*」と呼ばれている。例えば、Robert Friedel “*Engineering in the 20th Century*” p. 672 in “*Technology and Culture*” Vol. 27 No. 4 1986, や Arthur Donovan “*Thinking about Engineering*” p. 678 in “*Technology and Culture*” Vol. 27 No. 4 1986 を参照。
 - 10) この中では、Walter G. Vincenti がまとまった著作を出している。*What engineers know and how they know it—Analytical Studies from Aeronautical History—The Johns Hopkins University Press* 1990
 - 11) 彼のテクノロジーに関する概括的主張は、『テクノグローブ』工業調査会 (1993) にまとめられている。
 - 12) その中では、H. A. Simon がおもしろい。*The Science of the Artificial* 2nd. ed. (1982) MIT Press『新版システムの科学』パーソナルメディア
 - 13) 彼には、評価の高い *The Revolt of the Engineers* 2nd. ed. 1986 *The Johns Hopkins University Press* (1st. ed. 1971) という著書がある。しかし、この本は工学者の社会的責任を中心に論じていることもあり(また、草稿脱稿後この本をようやく手に入れたという個人的理由もあって)、この小論では取り上げない。
 - 14) p. 3 *The Engineer in America: A Historical Anthology from Technology and Culture* edited by Terry S. Reynolds “Introduction”
 - 15) アメリカの大学の工学教育において、まず科学の実験的方法が導入され、次に理論的研究が主流になってきたということを、Bruce Seely は、*Reserch, Engineering, and Science in American Engineering Colleges: 1900-1960* in “*Technology and Culture*” Vol. 34 No. 2 April 1993 pp. 344-386 において論じている。
 - 16) レイトンはドイツとフランスのエンジニアリング・サイエンスはアメリカとは少し違っていることを認めている。しかしそれは文化的伝統の相違であって、基本的には同じであると述べる (p. 93 SFA)。
 - 17) コイレの考えにも問題はあある。コイレは科学とテクノロジーの相違をエピステーメとテクネーという相違とみなした。そのためテクノロジーから科学へと向かう知識の流れを見失うことになった (p. 40 TK)。こうしてレイトンは結局、科学とテクノロジーの相互作用というモデルを採用するのである。
 - 18) 設計以外の意見としては、具体化された知識 *embodied knowledge* や触知できる理論 *tangible theories* といったものが挙げられている。Conference Report *Models of Scientific and Technological Change: Center for Philosophy of Science, University of Pittsburgh, April 9-12, 1981* Rachel Laudan in “*Technology and Culture*” 1982 pp. 78-80
 - 19) 産業が発達する以前は、職人の経験に従って水車をつくってもそれほど支障はなかった。しかし18世紀中期に向かって産業が発達するに従って水力資源が飽和状態になってきた。この背景のもとに、実践的な技術者が定量的な方法を使って水力の効率的な利用を求めようになった。p. 236 『水車の歴史』T. S. レイノルズ平凡社参照。
 - 20) p. 139 *What engineers know and how they know it—Analytical Studies from Aeronautical History—The Johns Hopkins University Press* 1990
 - 21) 例えば、19世紀の工学者 W. J. M. Rankine にとっては、アリストテレス哲学を採用することが、彼のエンジニアリング・サイエンスには必要だった。“*The Harmony of Theory and Practice: The Engineering Science of W. J.*

- M. Rankine” David F. Channell in *Technology and Culture* 23 (1982) 特に p. 47f. を参照。
- 22) 工学は同じ実在, 同じ装置を非線型で表現する (p. 181 TS) というのが, ここでの論点である。しかし, それにも関わらず, 量子論のような全世界を記述する非線型の科学法則があればどうなるか。その場合でも, 科学と工学の理想化の相違はあるというのが, 第3節第4節の論点だ。そこで示された相違から翻って, 理論における理想化を位置づけてみると, 量子論も流体力学の法則も同様に非線型の法則であるとはいえ, 実はその意味が相違していることが理解されるだろう。
 - 23) 数学の厳密さに対して, 物理学のセンスというのは, 理論において不必要なものを省略する能力のように私には思える。そして, 工学者のバランス感覚とは, それに加えて解を求めるといった場合に省略できる能力であるように思える。
 - 24) “To Engineer is Human: The Role of Failure in Successful Design” Henry Petroski Vintage Booksなどを参照。
 - 25) 例えば, 「デザインとデザインメソッド」 S. A. Gregory in 『設計の方法』 S. A. グレゴリー編 彰国社を参照
 - 26) 以下の論点については, 「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 Vol. 27 No. 241』を参照
- University of Chicago Press pp. 229-247 (originally in *Technology and Culture*, Vol. 12, No. 4, Oct. 1971 pp. 562-580)
- 2) *Technology as Knowledge* “*Technology and Culture*” vol. 15 No. 1 Jan. 1974 pp. 31-41
 - 3) *Technology and Science, or “Vive La Petite Difference”* “*PSA 1976*” vol. 2 ed. by F. Suppe & P. D. Asquith pp. 173-184
 - 4) *American Ideologies of Science and Engineering* “*Technology and Culture*” vol. 17 No. 4 1976 pp. 688-701
 - 5) *Scientific Technology, 1845-1900: The Hydraulic Turbine and the Origins of American Industrial Research* “*Technology and Culture*” vol. 20 No. 1 1979 pp. 64-89
 - 6) James B. Francis and the rise of scientific technology “*Technology in America A history of individuals and ideas*” 2nd. ed. edited by Carroll W. Pursell, Jr. pp. 92-104
 - 7) *Through the Looking Glass, or News from Lake Mirror Image* “*Technology and Culture*” vol. 28 1987 pp. 594-607
 - 8) *The Dimensional Revolution: The New Relations Between Theory and Experiment in Engineering in the Age of Michelson* “*AIP Conference Proceedings* 179 *The Michelson Era in American Science 1870-1930*” eds. S. Goldberg & R. H. Stuewer American Institute of Physics New York 1988 pp. 23-39
 - 9) *Science as a Form of Action: The Role of Engineering Sciences* “*Technology and Culture*” vol. 29 No. 1 1988 pp. 82-97

【引用・参考文献】

Edwin T. Layton, Jr.

- 1) *Mirror-image Twins: The Communities of Science and Technology in 19th-century America* “*The Engineer in America: A historical anthology from Technology and Culture*” ed. by Terry S. Reynolds The Univer-