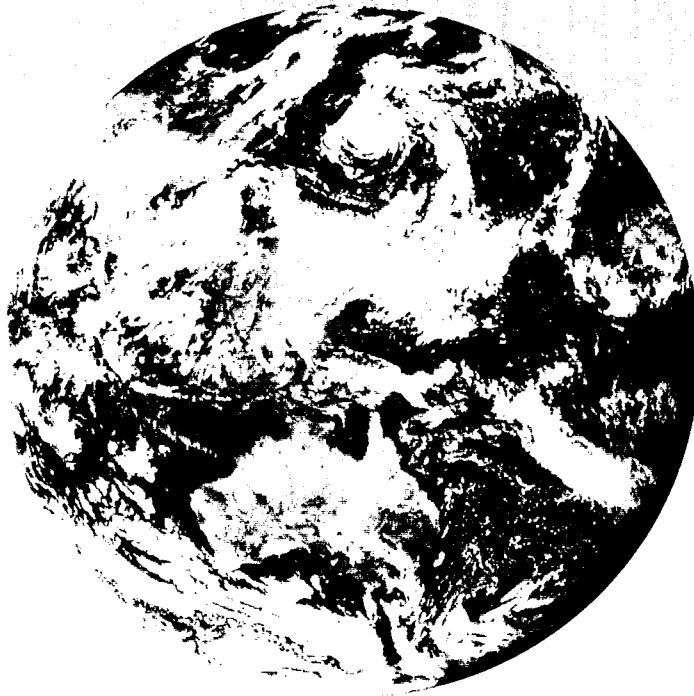


21世紀フォーラム

No.94



財団法人政策科学研究所

現場の思想としての工学

齊藤了文（関西大学社会学部教授）

はじめに

工学は、大学の中で、科学を応用した学問と見なされている。しかし、「ものづくり」という視点で工学を考えることによって、工学の学問性の別の面が見えてくる。

実は、事故の面でも、研究開発の面でも、エンジニアの知的行為において、科学的認識論では問題にならなかった部分が大きく影響する。これ自身を科学や工学の学問性そのものとは少し異質な、社会的側面だと位置づけることもできるかもしれない。しかし、経済的分析や政治的分析によると、エンジニアの知的営みが余りにも多く見過ごされることになる。

ここでは、大学の中の学問的営みとしての工学と、社会の中の労働者の一員としての工業という二つの理想型の間に位置すると思われる、現場のエンジニアの認識モデルを取り上げることとする。科学者という認識モデルでもなく、労働者という視点のモデルでもない、現場でものづくりの基本に従事

するエンジニアという、知的労働者の認識モデルとそれ由来する行動規範を概観する。

そこでのキーワードは、「複雑性」であり、「限定合理性」である。

さて、現実のテクノロジーの世界ではよく事故が起こっている。科学が進んでいるのに事故は減らない。これは、科学によって世界がより広く、より深く知られてきたことからすると、奇妙なことである。

科学主義の基本は知識を鍛え上げた上で、問題のない行動をすることである。科学的な完璧な知が得られたら、世界のすべてが予測できるはずであり、そうすると世界は事故もなく安全である。ラプラスの魔という理想に従うと、このようなことになる（ラプラスの魔は決定論に導き、キリスト教神学とは相容れない部分があるために問題にされた。一神教の教義も真理を知った上での行動という意味では軌を一にしているために、何が真理であるかは大きな対立軸となった）。

根拠のある知識に基づいて世界を解

明することは、それなりに意義がある。しかし、問題は、法則や要素を見つければ、自然の解説はほとんど済んだと言えるかどうかである。

さて、そこで注目されるのが「複雑性」である。チェスを考える。これはルールは決まっている。コマの動き方は十数通りであろう。そして、最初の盤面は決まっている。チェスのゲームの世界は、初期値も法則もすべて分かった世界である。

さて、このとき、各盤面で対戦者それぞれが選べる手が10個あり、ゲームは100手で終わるとする。ゲームは私が一手打つと相手がまた一手打つことになる。すると、盤面ごとに場合分けをする（私の選択肢は10個と見なす）と、最終的に相手の王様を取るか、取られるかで終わることになる。これに平均して100手かかるとする。すると、すべての可能性を見通すには100の一〇〇乗の可能性を辿る必要がある。しかし、実はこの数は非常に大きい。

宇宙の年齢を三〇〇億年とすると、

それは一〇の一八乗秒程度になる。すると、一秒に一億手読むコンピュータがあつても、一〇の二六乗の可能性しか探索できない。一〇の一〇〇乗の可能性のすごさは、このコンピュータがさらに一億倍速くなつても、一〇の三四乗の可能性しか探索できず、すべての可能性を見通すことは現実的に全く不可能だといふところにある。

ゲームのような単純なルールの組合せでも、それに基づいて将来を予測することは実際上不可能である。すると、自然科学で宇宙方程式や究極の粒子が分かり、初期値も確定したにしても、そこから将来を予測することは、実際上無理である。科学で獲得できる知識は、世界の現在の姿(初期値)とそこに働く法則(自然法則)の集合であるとも見なせるが、このような真理を得ても、それで話が終わるわけではない。つまり、世界を決定論的に(ある場合には確率的に)理解しようとしても、要素や法則の基本的な知識だけでは、世界の予測やコントロールは不可能である。

人工物の設計は、様々な部品を組合わせることを基本としている。その意味で組合せに基づく複雑性の問題が常につきまとうことになる。つまり、思わぬ副作用に基づくエラーの可能性はゼロにはまずできない。

ただ、ものづくりをしなければならぬ工学は、複雑性を受け止めつつ、

信頼性があり安全な人工物を作ろうとしている。ここでのような知識が用いられているかが問題である。

工学の認識論

組合せ問題が重要になるのは、生命系でも同じである。また、政策、制度設計でも同じである。部分が分かつて、それだけでは総合的な予測やコントロールは難しい。ただ、このような総合の問題がある程度合理的に追求され、見通しがついている分野は工学の設計である。そういう意味もあつて、工学の認識論を展開することは、重要である。

工学の認識論のポイントは、「総合すること」と「行為」である。総合のポイントは、複雑性に関与する。行為は、限定合理性と結びつく。さて、以下この二つのポイントをもう少し見ていくことにする。

まず、複雑性のポイントである。例えば、テレビを取り上げる。この中にもたくさん部品が含まれている。要求される機能を出すように部品が配置される。しかし、中には熱を発生するものもあり、また熱に弱い部品もある。同様に、電磁波を発信する部品も、それをノイズとして受ける部品もある。このような(テレビを見ている人には直接関係していない)機能を示して他の部品に影響することは、いわば副作用といえる。多数の部品が使われる場

合には、製造する場合に生じる問題も含めて多様な副作用を考慮しなければならぬ。それに対処するために、例えば部品同士の距離を確保すると、製品の大きさを小さくできないといった副作用が生じる。

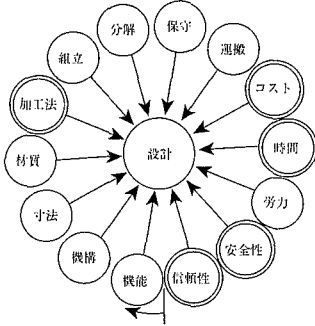
さらに、製品を人間が使うことによつて、思わぬ問題が生じる。子どもが小さな穴に指を突っ込んでケガをすることもある。また、化学プラントでは、その後のメンテナンスまでも考えねばならない。しかし、これには組織や人間が関与する。人間が関与すると、エンジニアのつくる人工物はさらに複雑なシステムになり、エンジニアに見通し難いものとなり、設計も「筋縄ではいかなくなる。

より基本的な問題を取り上げよう。設計とは単純に製図をするというだけでなく、人工物をつくるための情報を集めることである。ここでの問題は、多くの制約を考慮しつつ設計するということだ。

コスト、加工法、時間などの制約を満たしつつ設計が行なわれるということとは、例えば、『設計の方法論』(畑村洋太郎 二〇〇〇)では次のような図で示されている。(図一)

この場合、まず注意すべきことは、これらの制約は価値であるということだ。科学は客観的な知識を求めようとしていくかもしれない。また、科学的データといつても、理論負荷性によつ

図1 狭義の設計に対する制約条件



出所：『岩波講座 現代工学の基礎 1』 畑村洋太郎『設計の方法論』（2000年 岩波書店）

て解釈によってその位置づけが異なるので、客観的真理と言えないという論点も存在する。理論負荷性をどの程度の強さで主張するかはともかくとして、ものづくり、設計、工学においては、もともと価値の問題を避けることができないのは当然である。

これらの価値は、エンジニアが考慮すべき価値であるとともに、消費者の要望の提示という意味も含んだ価値である。そして、設計する場合には、これらの価値をどの程度、どのような仕方を取り上げるかが重要になる。

飛行機の設計でも、機体に穴が開かないように頑丈な設計を目指す、最終的には空を飛べない飛行機が出来上がるかもしれない。また、自動車の衝突安全性を向上させようとするれば、ボディに使われる鉄板の厚みを増せばいいかもしれないが、それによって燃費が落ちることになり、エネルギーの浪費という意味で環境面では好ましくないものになってしまうかもしれない。

この場合、軽金属を使うと、衝突安全性も燃費も良くなるかもしれないが、その場合加工が難しくなったり、コストが上昇したりする。つまり、設計においては様々な制約同士のトレードオフがあり、単純に一つの価値だけを求めてもそれでは設計ができないことになる。いわば、価値に関する複雑性がポイントとなり、価値同士の副作用が問題になる。

こうして、設計においては、「まとまった設計」という評価が褒め言葉になる。

次の問題が、エンジニアが全知全能ではない（限定合理性）ということに關係する。科学の知識というのは、結局は世界についての知識を全て知ることにつながる。これは、どれだけ時間がかかっても真理を知ればよいということである。

このような知識のあり方と対比すべきは、ものづくりの知識、工学の知識の姿である。例えば、日本の家は木材を使っている。面白いことに、木材の科学的性質が全て分かっているわけではないのに、木材建築がなされてきた。科学的性質が確定した後で初めて家を建てないと、安全だとは確信できないと言われるかもしれない。にもかかわらず、昔から家が建てられ、時に崩壊することはあっても、たいていは安全に住み続けてきた。この意味で、ものづくりの知識は、根拠づけられた真理が捉えられて初めて、世界に対して発信するような知識のあり方をしている。

情報量、知識の量、処理能力がある限度しかないにもかかわらず、ものづくりは昔から行なわれてきた。複雑な世界、不確実な世界にどう生きていくかということに道しるべを与えている。ものづくりにおける人間の行為は、根拠のある知識を持った上で、それで世

界を合理化しているという見方は違ったものである。局所的な最適化はできるにしても、全体的な最適化はできない。そのような情報、知識、処理能力は人間にはない。

これが限定合理性である。このような条件の下で世界に働きかけようとしている。隠遁して世界の真理を知った上で人々に伝えようという観想知ではなくて、少しは雨に濡れてもいいけれど、また台風の時にはパラパラになるかもしれないけれど、普通に使いやすい傘をつくるという日常の実践に必要な「行為の知」が、ものづくりの知である。

「ものづくりの知」は、「行為の知」であるために、ある程度の情報量の制約や情報処理能力、時間や資金の制約の下で、どのようにうまくやっていくか、ということに関わる知識である。

世界が合理的で予想できることだけが起るなら、世界の合理化には意味があるかもしれない。しかし、科学の知識は基本的に法則や要素の知識であって、現実の複雑な世界でどのように生きるかということを考える場合には、それを外挿し、拡張しても及ばないことが多い。つまり、テクノロジーの発達した現代社会の生き方を考える枠組みとしては、（どれほど科学の知識が増えてもそれに応じて生じてくる）複雑な世界を、よく生きるにはどうするかということである。

この場合、ものづくりの知は、确实で根拠のある知識をどう獲得するか、知識をどう鍛えるか、という問題設定とは違った問題設定にあることに留意することが重要だ。不確実かもしれない知識を使って、しかも時間の制約もあるのに、どのようにして失敗を少なくするかが問題になる。目の前の階段を降りるのに、数学的物理学的にどう表現されどのような方程式を解けば最適解が見つかるかという問題設定ではなく、視覚や触覚のフィードバックも利用しつつ、踏み違えずに降りるにはどうするかというのが問題である。この問題設定がものづくり、工学の知識の基本にある。

さて、工学の中では、複雑性などのように対処しているのだろうか。

まず、実験が重要である。これは幾つかの要素（もしくは、法則）の相互関係を調べるものである。実物実験、モックアップや模型実験などは、局所的な要素の挙動だけでなく、全体の挙動を理解しようとする試みである。コンピュータを使ったシミュレーションも同様である。例えば、風洞を使って飛行機の形を決めることがここでの問題である。流体力学の方程式は扱い難いために、風洞を使ったり、数値解法によるシミュレーションを行うことによつて形態の細部に依存する（全体の）挙動を調べている。

また安全性を確保するための方法と

して「冗長性」が使われる。家を建てる場合、理論上は四本の柱で地震にも耐えるはずである。しかし、想定した地震よりも大きな地震が来るかもしれない、施工不良があるかもしれない。そのため、柱の数を六本にしたり、柱の大きさを太くする事が行われる。不確実性に対処するこのような方法は「安全率」とも言われる。

また、飛行機が飛んでいるときに穴が開いても、それによつて機体全体が破壊しないような仕組みはフェイル・セーフと呼ばれる。ワープロを三時間も使ってレポートを書き終え、思わず安堵してスイッチを切ろうとした場合に、「ファイルを保存しますか」と聞いてくるのは、フル・プルーフとも言われる。様々な仕方で思わぬ失敗が起こる。その場合に、大きな被害が発生しないように考えるのが、安全性や信頼性を確保するための仕組みであり、基本は冗長性である。

シミュレーションや冗長性といった仕方で安全性の確保は、完全な知識に基づく世界の予測という仕方で安全性の確保とは違っている。工学研究の中では法則の探求も行われているが、前者は特に現場における工学の知識として注目すべきであろう。

一般に、安全性を確保する方法は多様である。例えば、自動車の安全性を考えてみると、①安全運転、は基本である。そして、自動車そのものの安

全という意味で、②衝突安全性、③エアバッグ、シートベルト、さらに、道路に関して、④信号機、⑤ガードレール、がある。実は、これ以外に⑥救急車のシステム、も事故後の問題解決には重要だ。また、⑦自賠責や任意保険、⑧損害賠償法、などによつても、事故後生活が苦しくなることを防ぐ面貢獻している。さらに、この頃は三菱自動車の事件で有名になった⑨リコールの制度、そして⑩安全車テストの公表、も購買者にとつて重要な意味を持つ。

實際上、設計は様々な制約の間でトレードオフを考慮する必要があり、行方であるために、ある時点である限定された資源の下での問題解決が要求される。だからこそ、複雑性に対処する様々な方法は工学の内部に限定されず、さらに制度設計の問題としても現れてくる。

工学倫理

それでは、このような知識をもって設計を行なうエンジニアの倫理をどう考えるべきか。科学者の場合は論文を書く人として、盗作をしないとか、データの捏造をしないといった著作権に関わる問題で倫理的吗どうか問題になる。これは研究者倫理である。それに対して、エンジニア、ものづくりをする人の倫理は違った側面を持っている。ここでのポイントは「人工物に媒介された」倫理という側面である。

まず、倫理というところで「人に迷惑をかけない」ということをその規範の中心と考える。人間として最小限守るべき規範として、このような行動規範を取り上げる。

すると、エンジニアの倫理、ものづくりをする人の倫理というのは、エンジニアが自分の仕事の中で人に迷惑をかけないというのがその中心になる。エンジニアは人工物を作る人だから、その人工物が他人に迷惑をかけることが重要だ。それは、基本的には事故やトラブルを起こさないものをつくることと言える。

さて、我々が子どもの頃から教えられた倫理、道徳は、基本的には対人関係の倫理である。もう少し限定すれば、対面した相手に対する配慮が問題だ。この場合は、相手が誰か分かっていて、その人に適切な配慮ができるかどうかの問題となっている。子どもの頃から人づき合いのうちに、このような倫理は多くの場合習慣化し、身につけてきている。

それに対して、工学倫理はエンジニアとユーザとの間に人工物が入り込んでいることに注目する。これは、ごく当然の条件だが、他人に対する配慮を考えるとなかなか重要な帰結を含んでいる。

①人工物は多様に使われる。椅子を使う場合でも、「座る」「踏み台にする」だけでなく、「投げつける」(プロレス)、

「鉢植えを置く」などといった様々な使い方ができる。つくった人(エンジニア)は、人工物を存在させた張本人だが、ユーザの行為全てをコントロールできるわけではない。こうした中で、ユーザがケガをするといった問題が生じることがある。どこまでユーザの行為を予測し、配慮した設計ができるかはなかなか難しい。

②人工物の周りに多数の人間が関与している。自動車事故の場合でも、歩行者、ドライバー、エンジニア、整備士、交通誘導員など、たくさんの方が関係する。もともと、人間は同じように罵られても、暴力で反撃することも、反撃しないこともできる。これが、人間の自由意志であり、そのために自己の行為に責任が帰せられる。そして、この責任は、それ以前の因果関係とは独立して、人間という行為者が行為を始められるということがポイントである。

この自由の考え自体の評価はともかくとして、このような責任についての考え方に従うと、最終的に引き金を引いた人だけが悪いということにもなってしまう。この意味で人間の自律を強調すると、組織や消費システムなどの介入することの多い、人工物の倫理をめぐると問題は、奇妙な帰結が生じてしまっ。

③複雑な人工物が問題である。医者がメスを使った手術に失敗しても、そのメスをつくった人が責任を問われるこ

とはまずない。しかし、ドライバーが事故を起こしたり、従業員が機械の操作を誤って手を挟んだりすると、機械を作った人の責任が問われることがある。そして、複雑な機械の設計、さらにヒューマン・インタフェイスまでも考える設計は困難であり、エンジニアが全てを配慮できないことによつて、事故やトラブルが起こる。

エンジニアは普通、テロリストではないが、限定合理的であつて、複雑性に対処しなければならぬ。そのため、故意というよりも過失が問題になる。ただ、通常、故意の行為のみが倫理行為として取り上げられているために、倫理的に考察すべき問題が生じる。さらに、製造物責任法では、さらに奇妙な印象を受ける無過失責任になっている。

④人工物は時間的存在である。つまり、長期間存在するために、例えば、取扱説明書を常に添付することは難しくなるかもしれない。橋やピラミッドはその例である。しかも、人工物は時間とともに劣化する。それによつて、人工物をつくったエンジニアは、人工物の事故の責任を時間的に限定できるかもしれない。行為の責任が時間とともに減衰することは理解不可能ではないが、子どもの頃からの倫理ではこのような問題設定はあまりない。

⑤人工物は一人では作れない。そのために、組織の中で仕事をする必要がある

る。さらに、OJTによって、組織の中で一人前のエンジニアになる。つまり、医者や弁護士のような自由業と呼ばれる専門家と比べて、組織の一員としての役割が大きくなる。ビジネス倫理も考慮する必要がある。

⑥公衆の要望を満たすことが必要になる。大量生産物（人工物）は、消費者が注文したのではない。つまり、つくってくれと頼んだ依頼人は、人工物のユーザとは違う。しかし、買ったテレビが火を噴いて、遊びに来ていた友達が火傷をするということも起こりうる。つまり、人工物をつくる人、人工物（これは人間ではないが）、つくるところを依頼した人という三者の関係以外に、いわば第三者（公衆）として、エンジニアとも依頼者とも違った人に迷惑をかけることがある。化学工場からのガス漏れで、近隣の人々が悪臭で頭痛がするというのも同じ枠組みで考えられる。目の前の人とは違った人に対する配慮が要請される。

人工物をつくることによってエンジニアには、結果責任が帰せられることがあるかもしれない。ハンムラビ法典ではそうなっていた。しかし、公衆に対する設計はなかなか難しい。要求仕様に則って設計は行なわれる。しかし、その要求仕様が公衆の要求仕様だとすると難しい問題が生じる。

例えば、エアバッグを装備することによって、何人もの人が衝突時に大け

がをすることが防げる。ただ、子どもがシートベルトをせずに助手席にちょこんと座っていたりすると、衝突時にエアバッグが開くとその衝撃で大けがをすることがある。この場合、衝突時にケガをしそうな大人の防御としてエアバッグを装備したにしても、それが子どもが座ることによって大けがを生み出す機械として機能してしまう。人工物は、要求が限定され、明確であると設計は可能になりやすい。しかし、ある意味稀な例外を考慮すると、設計は複雑になるか（その意味での故障の確率が増す）、不可能になるかである。

（エアバッグそのものの機能改善は可能でも）一般的に稀な例外として傷害を与える人工物を使わないという決定をすると、衝突時の大人のケガが増えることになる。しかし、稀な人、少数者を無視することも許されない。ただ法的制裁をちらつかせて、行為をしない、禁止というやり方で安全を確保するやり方は、人工物の設計においてはどの程度機能するか考える必要がある。

要するに、人工物の設計、工学の認識をもとにして、エンジニアの行為、社会に対する行為を考えると、子どもの頃からの倫理観では扱えない問題が多く含まれていることが理解される。

まず、複雑な価値の相互作用を扱うために、善悪の二元的尺度で判定することが許されないことになる。局所的

には最適でない設計であっても、大局的には最適に近い機能が得られる可能性がある。もちろん逆もありうる。

また、人工物に媒介されることによる奇妙な帰結は上に概観してきたが、それ以外に、エンジニアが直接的にはCADや試験管しか見えないにもかかわらず、それらを使ってつくられた製品、人工物が他人にどのように影響するかを考えなければならない。これは、實際上、見通しにくいものである。

また、人工物は複雑だということもあって、意図的行為というよりも、過失によって他人に被害を与えることがある。これには、親しみなどのような仕方でも他人を配慮するのではなく、規則、基準、制度などがエンジニアの倫理的行為には重要な役割を果たすということが含まれる。工学倫理においては、倫理を心情的なものとしてしまうことはできない。

人工物をつくる現場

ここで現場として念頭に置いているのは、大学の研究室でもなく、ベルトコンベアの前でネジを締めている従業員でもない。念頭に置いているのは、エンジニアと言われる人々だ。

研究開発において、要求仕様を決定する場合にも、ユーザ、依頼者が目的を設定して、エンジニアはその命令に従ってものづくりを行っている、とは言えない。情報システムの構築におい

て、SEとクライアントの話し合いが必要だとはよく言われる。例えば、製鉄所の製造システムのコンピュータ化をしようとする、製鉄の専門的なエンジニアと情報システムをつくるエンジニアとが一緒になって話し合いながらシステムをつくり、テストを行い、その改良をする。専門家と素人という枠組みではなく、複雑なシステムは誰もがその全体像を理解していないということがポイントである。そして、社内のITシステムの構築でも、自宅の建設でも、ユーザは自分の欲求を「知って」いない、と言われることになる。エンジニアの仕事は、要求定義、目標設定にまで及ぶ。

また、基礎研究は、研究所や大学で行われている。そして、知財の制度もでき、産学の連携もできている。これによって、研究開発が問題なく行われるかという点、そうでもない。開発し、製品化するのには困難である。いわゆる「死の谷」と総称される問題がある。いわば、ものづくりにおいては、シーズだけでは無理で、(商品の販売まではともかくとしても)安全で使い勝手のよい製品に仕上げるまでの(いわば工学的な)仕事でも、問題がある。製品開発のシーズを見出すだけでエンジニアの仕事が終わるわけではない。

さらに、運用、メンテナンスの問題がある。人工物はつくった人と別に、使う人がいる。そのために、ライフサ

イクルコストが重視される。長期間の機能保証が要請される。これはいわば、つくるのが長期化していると言える。つまり、つくったものを消費者に渡して終わり、ではない。製造物責任法は、製造物が、途中誰の手に渡っても、安全性に関しては責任を持たねばならないという法律である。これに従うと、エンジニアは、つくって、渡して、はい終わり、と言うことはできない。建設における品確法も同様の機能を有している。このことによって、エンジニアの仕事は拡大する。

エンジニアの仕事が拡大する点にも、実際は、工学プロパーの方法論だけでなく、組織や制度などを含めて、エンジニアは限定合理性に対処している。そこでは過失と制度と組織がポイントとなる。

人工物の複雑性は、ものづくりをするエンジニアの倫理的問題が過失であることを示している。事故等の問題は、通常陰謀によって起こるのではなく、思わぬ副作用によって起こる。そのため事故を起こした人に罰を与えることだけでは、問題は解決しない。問題は過失をどのようにしてコントロールするかであって、過失を非難することではない。

さらに、人工物を媒介することによって他人に影響を与えるというポイントは、制度の必要性を示している。これは、予想される被害者が非常に一般

的になるために、個人的な対応ではすまなくなる点にも由来する。

そして、エンジニアの限定合理性は、組織を必要とする。一人で処理する情報を多人数の組織で行う。このことによって、様々な問題が短期間にうまく解決可能となる。ただ、そのために、組織に由来する副作用が存する。

エンジニアの拡大した仕事の領域には、組織と制度が重要な役割を果たすことになる。エンジニアの知的活動には、経営学に限定されることのない、「技術経営」の考え方が必要だとも言える。そして、現代という人工物に取り巻かれた世界に生きる(技術者に限られない一般)人は、人工物を生み出したエンジニアのものを考え方を理解する必要がある。そのポイントは、「複雑性」「限定合理性」「人工物に媒介された倫理」、そして最後に「組織」と「制度」である。

工学の知は、科学の応用というように科学に従属した知ではなく、政策や生命活動も含めた総合的知識を理解するための知識モデルとなりうる。(ただし、工学の倫理は、人工物を媒介した行為という特異性をもつことも留意する必要がある。)一般に、限定合理的な我々が、複雑な世界に生きていくための「しなやかな合理性」こそが、工学の知が提示する認識論的な示唆である。

(さ)いとう のりふみ