



横断型基幹（横幹）科学技術とは何か

木村 英紀*

What is Transdisciplinary Science and Technology?

Hidenori KIMURA*

Abstract— The notion of transdisciplinary science and technology has been gradually formed during struggles to establish the recognition of non-natural scientific foundation of engineering. This article presents the way the struggle has been conducted in the author's step-by-step advance towards the understanding of transdisciplinary science and technology. Similar notions related to transdisciplinary science and technology, such as “pure engineering” and “design sciences”, are discussed in the context of engineering education and social relevance of science and technology. The importance of the transdisciplinary science and technology in the future techno-society is discussed. Consilience of knowledge is discussed in the light of transdisciplinary science and technology.

Keywords— transdisciplinary science and technology, design science, fundamental sciences, scientific revolution, consilience

1. はじめに

横幹連合が発足したころ、「横幹科学技術とは何ですか?」という質問をよく受けた。大変不謹慎なことであるが、今から思うと聞かれる人の職種によって答えを変えていたように思う。相手が企業の方の場合はシミュレーションや設計などのソフト系科学の体系化として答え、大学の先生には旧来の科学の範疇にはおさまらない「技術の科学」を説き、そして科学技術政策にかかわっておられる官の方には技術の横の連携を体現する科学技術のプラットフォームと答えた。これらはすべて横幹科学技術のある側面を語っていることは確かなのであるが、それらのさらに一歩奥にある学問としての原理的な基礎については、残念ながら確信を持って言えるものを持たないもどかしさに悩んできたのが実情である。いろいろな人の考え方を学び、横幹のような考え方に拒否反応を示す人々との「他流試合」もそれなりにこなして来たつもりであるが、この状況は今でもそれほど変わっていない。いろいろな側面を持つことは間口が広いことで、それはそれで結構なことではあるが、「学」としての基盤を確立することは焦眉の課題であると言える。

*理化学研究所 バイオ・ミメティックコントロール研究センター 生物制御システム研究チーム 〒463-0003 名古屋市守山区下志段味字穴ヶ洞 2271-130

*Bio-Mimetic Control Research Center, RIKEN, 2271-130 Anagahora, Shimoshidami, Moriyama-ku, Nagoya, Aichi 463-0003, Japan

Received: 13 January 2007, 13 February 2007

本稿はこの問題に対する学問論としての模索の過程を示し、読者の方々に「横幹科学技術とは何か」を自らの問題として考えていただくために書かれたものである。

2. 応用工学と純粋工学

筆者は長い間、大学で制御工学を講義してきた。制御工学の講義は学部後期の最初に始まるのが普通である。フィードバックや周波数応答など聞きなれない概念に戸惑う学生も多いが、新鮮さに魅力を感じる学生もそれなりにいる。しかし、講義が進んで「可制御性」や「安定性」など理論の核心となる部分にさしかかると、付いてくる学生数が急に減ってくる。電気系、機械系、応用物理系など幾つかの異なる母集団の学生を相手にしてきたが、この点はどこでも同じであった。抽象性をなるべく和らげるために具体的な制御の例を数多く示したり、演習問題を課したりしても、状況は基本的に変わらない。筆者にとってこのことは大げさにいえば教育者としての壁であり、その克服は課題であり夢であった。

じつはこのことが工学教育の根幹にかかわっていることに気がつき始めたのは、それほど昔ではない。私の理解は次のようなことである。工学の基礎教育には二つの範疇がある。ひとつは自然科学の応用を教えることであり、もうひとつは自然科学とは無関係な工学固有の論理を教えることである。私は便宜上前者を「応用工学」、後者を「純粋工学」とよんだ [1]。制御工学はもちろん

純粋工学のひとつであり、他に数理計画法、設計工学、システム工学、情報処理、シミュレーション、品質管理などが純粋工学に属する。一方、応用工学は、流体、熱、材料のいわゆる機械三力学をはじめ電気工学、機械工学、応用化学など伝統的な工学の学科で教えられている科目の多くがこれに属する。応用工学と純粋工学の違いは自然科学に基礎を持つか持たないかの違い、学生流に言えば「もっと基礎を勉強したいと思ったら理学部の講義を聴きに行けばよいのか、それとも工学部の大学院に行くのがよいのか」で分けられる範疇である。この違いがはっきり意識されていないことが学生を躓らせるのではないかと気がついたのである。このような考えに至ったきっかけは、吉川弘之先生の「人工物工学」の概念を知ったことである [2]。工学の対象は本来人工物である。にもかかわらず人工物の工学を提唱する意味は、人工物は自然とは異なった論理をもつこと、それを科学として研究する分野が必要であること、にある。これは吉川理論に多少悪乗りした筆者流の解釈でもあるが、吉川先生の言われる領域工学と人工物工学の範疇化は応用工学と純粋工学の区分に対応していると考えられるので、自分の考えにそれなりに自信をもつことができた。

応用工学の講義は高校でも習ってきた自然科学の延長であるだけでなく、日常的な経験あるいはその経験の延長上にあるから親しみやすい。材料力学を例に取れば、学生は20年間の人生で材料に力を加えれば変形することは何度も経験している。したがって材料力学で梁の強度を計算することは、その経験世界の延長にあると言ってよい。しかし純粋工学はそうではない。例えばフィードバックによって安定性を確保することを経験している学生はほとんどいない。学生が制御理論の抽象性についていけなくなるのは、抽象のレベルが高いからではなく、抽象の質がそれまでの経験世界を超えているからである。工学は俗に言われているように単なる自然科学の応用ではなく、工学独自のすぐれた論理を持っており、そのことが応用工学と純粋工学の区分を作っているのである。このことに気づいてから講義の冒頭にそれを学生に伝えることにした。そうするようになって以後、少なくとも私自身の講義への意気込みが変わってきたし、講義の落ちこぼれも大分減ったような気がしている。

かつて著名な理論物理学者であり戦闘的なマルクス主義者でもあった武谷三男氏は、技術を「客観的な法則の生産現場における意識的な適用」と定義した。この定義は第二次大戦末期に武谷氏が治安維持法違反の容疑で検挙されたときに特高調書のなかで初めて述べられた、というドラマティックな出自も手伝って、戦後「武谷テーゼ」として有名になり、その信奉者は少なくなかった。客観的法則とは自然法則のことである、という武谷氏自身の注釈があるので、「武谷テーゼ」は、技術（そのアカ

デミックな表現である工学も含めて）が自然科学の応用であると言っているに等しい。私が講義を通して到達した考えは、これに真っ向から反するものである。冗長さをそぎ落とした簡潔な「武谷テーゼ」には筆者も共感していたが、以後それを物理学者からみた技術の狭い見方として否定するようになった。自然科学者や応用工学研究者の多くが武谷氏と同じように技術を捉えていることを知ったのは、その後のことである。

教育の場面では取りあえず工学の基礎科目を2つの範疇に分けることができる。教育と研究は一体であるとするれば、このことを工学の基盤そのものの文脈で説明する必要がある。「純粋工学」というものがあり得るとすれば、その役割は何か？自然科学とは異なる工学の基礎とは一体何にもとづいているのか？それがどのような知の領域を構成しているのか？考えなければならない問題はたくさんある。

3. 純粋工学から横断型科学技術へ

ほとんどの応用工学の学科目はひとつの専門分野にかかわる学科だけでしか教えられていないが、純粋工学の学科目は工学部の多くの学科で教えられている。この違いは何を意味しているだろうか？多くの応用工学と接点をもつことは、純粋工学が工学の各分野を横に束ね、それらの知識を目的に向かって統合するような役割を果たしているのではないかと考えられる。つまり純粋工学は「知の統合」を担っている、ということである。逆に応用工学は、個別化された要素技術を末端とする細分化された分野の系列をなしている。

例えばガスレーザーというひとつの研究分野を考えよう。この分野はレーザーというもう少し大きな研究分野の一部であり、レーザーは量子エレクトロニクスの一部であり、さらにそれは物性物理学の一部である。物性物理学はもちろん物理学の一分野であるというように、研究者の研究対象は何層もの枝分かれした研究分野の階層の末端に位置している。研究分野の枝分かれは細分化の結果生じたものである。純粋工学にも細分化はあるが、それほど顕著なものではない。たとえば制御工学の場合、機械系の制御、化学系の制御などのように、応用工学との結びつきで研究分野が並列に構成されている。

応用工学は自然に依拠することを通して要素技術に到達するし、一方、純粋工学は論理に依拠することによって要素技術を人間社会に結び付ける。このような考えの下に、応用工学を縦、純粋工学を横とする工学の研究分野の二次元構造が考えられる。Fig. 1はこのような工学の構造を示す。こうして横断型科学技術の理念が次第に固まってきた。

その頃筆者は、東京大学で新しく作られる大学院の

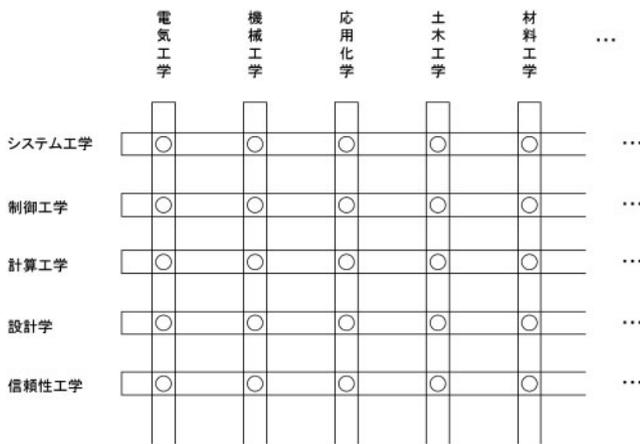


Fig. 1: 工学の二次元構造「たて」の応用工学と「よこ」の純粋工学の接点（印）を通して技術は社会とかわる

研究科に移った。その研究科の理念は「学融合」で、来るべき世紀の新しい学問はそれぞれの規範の間の融合を目指さなければならないという、それなりに説得力のある理念のもとに作られた魅力ある組織に思われた。しかし、現実の教育や専攻の運営はさまざまな専門分野の研究者がそれぞれの伝統と文化を主張して譲らない、座り心地のよいところでは決してなかった。人的な資源の制約が厳しかったために、必ずしも研究科の理念に共鳴した人を多く集めることができなかつた面もあるが、それ以上に、我が国の科学技術の世界で縦割り文化が想像以上に強く、研究者の考え方、生き方を制約していることが肌で感じられた。

以前ほど顕著ではなくなったが、技術の世界では「電気屋」「機械屋」「化学屋」などという言葉がまだ生きている。これらは卒業した学部の学科に対応している。このような呼称は技術者の専門を示すと同時に、技術者が背負ってきた技術文化を示すものである。さらに言えば、企業の中でのそれぞれの専門の「縄張り」を表すものでもある。筆者は電気系、機械系、応用物理系の3種類の学科に勤めた経験があるが、それぞれの学科で教育や運営のやり方がずいぶん違うのに戸惑った経験がある。それぞれのやり方には優劣がつけにくい。文化の違いというしかない。技術文化に多様性があるのは悪いことではないが、一方では、将来社会で活動する学生の考え方の幅を狭め、学生を自らの文化伝統に囲い込む結果にもつながりかねない。ちなみに「屋」という呼称が成り立つのは、応用工学関係の学科である。純粋工学の卒業生は、企業では「その他」という枠の中で肩身の狭い思いをすることになる。その結果、貢献をしている割にはそれに見合う処遇が得られない、という嘆きを聞くことが多かった。「たて型」のわが国の文化が技術の世界に投影された結果であろう。

日本語では「横取り」「横着」「横車を押す」「横紙やり」「横恋慕」「横道にそれる」など、「横」を使った悪い意味の言葉は実に多い。にもかかわらず「横断型」という名称をあえて使うのは、わが国に顕著な「たて」に対抗する意味合いからでもある。強いたての文化に対抗して「よこ」の文化を育てていくには、ある種の「社会運動」が必要である。これが学会連合を実現しようとする動機となった。人工工学と設計学の吉川弘之先生が共鳴して下さったことは、何ものにも優る援軍であった。

4. 認識科学と設計科学

筆者は2003年から2005年にかけて学会会議の会員に選ばれた。あらゆる専門分野の学者が集まった学会会議は、学問論の花が咲くにふさわしい場である。1997年に吉川弘之先生が会長になられてから、「社会のための学術」というスローガンが掲げられ、それを実現するための科学者コミュニティの役割が真剣に議論されるようになった。その努力は学問論にも反映され、2003年に「学術の新しい体系」と題する報告書としてまとめられた[3]。この報告書のポイントの一つが、科学を「認識科学」と「設計科学」に二分したことである。というより、前者は旧来の科学を意味するものであるから、新しく「設計科学」という科学の範疇が提案されたことになる。設計科学に類似した概念はこれまでもあったが、対象の認識に基づいてそれを実際の目的に応用する「実学」の立場が強い。「実学」を科学に従属するものではなく、それと対等な科学としてみなすことは、自然科学とは独立な技術の基礎を科学として認める純粋工学の立場につながる。設計科学の立場から横幹科学技術の科学としての方法論を確立することができるのではないかと考え、「学術の在りかた常置委員会」にこの問題を討論する分科会をつくることを認めて頂いた。

認識科学はすでにフランシス・ベーコン以来の、事実→仮説→検証→理論のループをベースとした方法論の雛型がある。設計科学はこれに匹敵するような一般的でしかも実行可能な方法論を作ることができるであろうか？というのが最初の問題意識であった。[3]でもこの問題に挑戦しているが、解答が得られているとはいえない。科学論や科学史には素人の研究者が集まって議論するのであるから、闇の中を手探りで進むしかない。それでも、[3]にヒントを求めて、いくつかの確認をすることができた[4]。

まず、認識科学は唯一絶対の存在である自然をよりどころにしているから、問題に対する解はひとつだけしかない。これに対して設計科学ではよりどころとせざるを得ないのは「論理」である。論理は前提条件がすべてであり、それに対応するのは「価値」である。したがって

設計科学は、認識科学が遠い昔に投げ捨てた、あるいは投げ捨てざるを得なかった「価値」を復権させるものである。つまり設計科学は「あるべきもの」の探求である。これに対して認識科学は「あるもの」の探求となる。

「あるべきもの」を見つけるプロセスは価値と切り離すことはできない。価値を導入する以上、解は一意ではあり得ない。そこで「最適化」が重要な課題として浮かび上がってくる。価値をどのレベルで捉えるかは最適化をどのレベルで行うかに直接対応している。部分最適化から全体最適化に向かうプロセスが、設計科学の普遍的でしかももっとも重要な課題である。設計科学は、価値命題 → 最適化 → 実現 → 検証のループをまわすことを通じて全体最適化に近づいていく知の営みである。

認識と独立した知の営みの科学として設計を捉えることは、自然科学と独立した技術の基礎としての横幹科学技術を定立することと共通の発想であると言ってよい。その意味で横幹科学技術と設計科学とは重なり合う部分が多いし、横幹科学技術は設計科学に属するといってもよい。しかし両者が同じものである、と言い切るにはためらいが残る。横幹科学技術はあくまでも技術をベースとした発想であるのに対し、設計科学は技術を含むいわゆる実学全般を対象としたものであるから、視野のスケールが違う。おそらく設計科学を最初に構想した人々は社会科学も視野に入れていたに違いない。横幹科学技術は、設計科学の中で、さまざまな分野の知識を統合することにかかわる部分である、というのが現状では妥当な表現であろう。言い換えれば、設計科学で「知の統合」を担うのが横幹科学技術である。「知の統合」という概念は[3]では視野の外にあった新しい概念である。これについては次の説で少し議論したい。

5. 知の統合

「知の統合」という言葉はすでにいろいろなところで使われている。しかしその意味するところは人によってまちまちである。きちんとした定義がされないままに言葉だけが独り歩きしている感もないわけではない。「知」も「統合」も表意文字独特の曖昧さがふんだんに張り付いており、しかもどちらもある種の情緒を呼び起こしやすい言葉であることがその理由であろう。

エドワード・ウィルソンは、その著書のタイトルを *Consilience*、サブタイトルを *Unity of Knowledge* としている[5]。*Consilience* という聞きなれない単語は、ウィリアム・ヒューウェルという19世紀の哲学者が初めて使った言葉で、原意は「共に跳ぶ」である。ウィルソンによれば、「事実と事実にもとづく論理を学問の諸分野にまたがって作り出すことによって、知識が文字通り、共に跳躍することを指す」この言葉の意味が、知の統合

として適切であると主張している。筆者もこの意見に賛成であるが、ウィルソンの捉え方と全く異なる視点からである。

ウィルソンが構想している知の統合は、ひとつの学問の原理にすべての学問を帰着させることである。物質科学が物理学・化学・生物学の垣根を取り払い、概念の統一に向かいつつあることは確かである。DNAの二重らせん構造の発見はこのことに大きく貢献した。ウィルソンはこのような概念の統一が、やがて心理学、社会科学、人文学を席卷し、芸術、宗教、倫理まで及ぶと展望している。その中心となるのが彼の専門である脳科学をベースとした人間生物学である。これは一種の還元主義であり、共通の原理に知の全体を還元することをもって統合とする考え方である。このような「大統合」の考え方は、現状では科学というよりはイデオロギーに近い。少なくとも科学としての要件である「反証可能性」を満足しない。

ウィルソンの還元主義的な知の統合が垂直型であるとすれば、私たちが目指す知の統合は諸分野を横に結ぶ生成的な知の統合である。あえて定義するならば、次のように表現されよう。知の統合とは、異なる研究分野の間に共通する概念、手法、構造を抽出することによって、それぞれの分野の間での知の互換性を確立し、それを通して、より普遍的な知の体系を作り上げること。

[3]では設計科学の提案とならんで「文理融合」も考察しているが、ここでは「法則」に支配される物質科学と「信号のプログラム」に支配される生命科学、「シンボリックプログラム」に支配される人文・社会科学との間には、学問の「秩序原理」において大きな違いがあることを指摘しており、その違いをわきまえた上での「融合」を勧めている。その「融合」(我々の立場では先に述べた意味での「統合」)の上に成り立つのが設計科学であり、その「統合」のツールであり、プラットフォームとなるのが、横幹科学技術である。

ウィルソンは、彼の主張する還元型の知の統合の原点を18世紀の啓蒙思想に求めている。「知は力である」という啓蒙主義のエートスは我々も共有したい。しかし、我々はすでにあまりにも多くの知の悪用を見てきたし、それが生み出した数多くの「現代の邪悪」[2]に直面している。啓蒙主義者のように、人間とその未来に対して単純に楽観的になるわけには行かない。筆者は個人的には、前世紀の初めに活躍した物理学者エルンスト・マッハを「生成型知の統合」の創始者であると考えたい。マッハについての私の知識は多くはないが、何冊かの著書を読んだ限り(たとえば[6])、彼がニュートン以来の力学的世界観を拒否し、それに代わるものとして、現代におけるモデルとシミュレーションの思想を萌芽的に提唱しており、それをツールとして物理学、生理学、心理学の

ある種の統合を目指していたことを見て取ることができ、マッハは伝統的な物理学者やマルクス主義から、客観的な物質世界の存在を否定する異端者として批判されたが、その思想は、ピアノ、ヒルベルト、ラッセルらの「数学の論理化」を目指す数学基礎論の研究と結びつき、やがて科学の論理化を目指す論理実証主義を生み出す。論理は量子力学とともに 20 世紀前半の科学の世界を二分する巨大なテーマであった。その延長上に横幹科学の原型となる計算、ネットワーク、システム、情報、制御など純粋工学が花咲いたのである。これを筆者は「第 3 の科学革命」と呼んでいる [7]。第 3 の科学革命は、技術が社会と接点を拡大する過程で起こるべくして起こった科学の変革であり、技術の基礎が自然科学だけにあるのではないことを明瞭に示す歴史的な事実である。我々が名前を知る科学史家はほとんどがその興味を自然科学に限定しており、第 3 の科学革命が生み出した「技術の科学」を真剣に取り上げようとしないのは残念である。

6. むすび

純粋工学、設計科学、知の統合など、横幹科学技術と関連するいくつかの概念について述べてきた。これらをまとめれば、「横幹科学技術は、設計科学における生成的な知の統合を生み出す科学と技術」となるであろうか？しかしこの定義は設計科学と知の統合と言う二つの新しい概念を含んでいるので、難しさを先送りしたに過ぎないとの批判も生まれよう。ただ単に概念の間を堂々巡りしているに過ぎない、と批判する人もいるかもしれない。好意的な方は、「成功例を示すことが必要である」というアドバイスを下さる。

過去に遡れば、横幹的な知の統合の例はたくさんある。たとえば、すでに言及した数学基礎論である。文系の論理学と理系の数学の結びつきが数学基礎論という新しい分野を生み出した。ゲーデルの不完全性定理やチューリングの計算機械の理論がこの延長上にあることを思えば、そのインパクトの大きさは理解できよう。もうひとつ例を挙げれば、生物の制御と人工物の制御が同じ原理に従うことから始まったウィナーのサイバネティクス [8] である。サイバネティクスは、生命科学と工学を架橋する最初の突破口を切り開いた。サイボーグ、サイバー空間などの言葉が今でも使われていることを考えれば、このインパクトの大きさも明らかである。

このような大きな例でなくても、生成的な知の統合がイノベーションを生み出した例は少なくないし、その過程で横幹科学技術が先進的な役割を果たした例も調べれば少なくないと思われる。最近では、たとえばボーイング 777 の開発が、木型模型を全く用いず、三次元 CAD をプラットフォームとして、完全な仮想空間の中で行わ

れたことを挙げることができよう。流体力学や材料力学などを航空機の設計という視点で統合した三次元 CAD は、まさに生成的な知の統合である。このような事例は今後急速に増加していくに違いない。横幹科学技術の視点からそれらを掘り起こして、追体験をすることは今後の課題である。

最後に、横幹科学技術はわが国の科学技術が取り組んでいる最大の課題であるイノベーションと深くかかわっていることを述べておきたい。イノベーションとは科学技術の成果を社会的・経済的価値に変換すること [9] であるが、これこそ科学技術と社会の接点から生まれた横幹科学技術がもっとも真剣に取り組まなければならない課題である。これについては横幹連合の各グループが真剣に取り組んでおり、連合の活動実践を通して「知の統合」の視点からの施策を提言するはずである。

参考文献

- [1] 木村英紀: 横断型科学技術の重要性を主張する, エコノミスト, 2002 年 5 月 21 日号.
- [2] 吉川弘之: 人工物工学の提唱, ILLME, Vol.4, No.1, pp. 41-56, 1992. (インターネットからダウンロード可. <http://www.race.u-tokyo.ac.jp/about/documents/Yoshikawa.pdf>)
- [3] 日本学術会議 18 期運営審議会付置, 新しい学術体系委員会: 新しい学術の体系 - 社会のための学術と文理融合, 2003.
- [4] 特集「21 世紀の学術における横断型基幹科学技術の役割」, 学術の動向, 2005 年 8 月号.
- [5] エドワード・ウィルソン: 知の挑戦 - 科学的知性と文化的知性の統合, 山下篤子 (訳), 角川書店, 2002.
- [6] エルンスト・マッハ: 感覚の分析, 須藤吾之助, 廣松渉訳, 法政大学出版会, 1971.
- [7] 木村英紀: 第三の科学革命 I,II, 科学, 岩波書店, 2006 年 1 月号, 2 月号.
- [8] N. Winner 著 (池原他訳): サイバネティクス (第 2 版): 動物と機械における制御と通信, 岩波書店, 1962.
- [9] 柘植綾夫 監修: イノベーター日本, オーム社, 2006.

木村 英紀



1965 年東京大学工学部計数工学科卒業。1970 年同大学院博士課程修了。同年 4 月大阪大学基礎工学部助手、講師、助教授を経て 1987 年同大学工学部教授。1995 年東京大学大学院工学系研究科教授。2002 年 10 月理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センターチームリーダー。制御理論、ロボ制御、生物制御の研究に従事。計測自動制御学会、IEEE Fellow, 1984,90 年 IFAC 論文賞, 1985 年 IEEE CSS G. Axelby 賞など受賞。横幹連合副会長。