

特集・技術経済研究のフロンティア

技術連関表の科学技術政策論的含意

菰田 文男

今日では、科学技術にまで言及することなしには政治・経済・社会・文化を論じることが不可能なほどに、その影響力は大きくなっている。しかし、21世紀を目前とする現在、これまでの科学技術体系はさまざまな意味で限界に直面しているだけでなく、その負の側面すら目立ち始めている。21世紀の科学技術はこの負の側面を克服しつつ、効率的かつ人間に優しい豊かな消費社会を実現しなければならない。たとえば、1995年に施行された「科学技術基本法」を受けて発表された「科学技術基本計画」の冒頭で述べられているように、(1) 深刻化が予想される地球環境、資源・エネルギー、人口、食料・農業問題などを克服すること、(2) 一方で効率的で活力を維持しつつ他方で公平で精神的に豊かで潤いのある社会を構築すること、が必要である。その意味で、科学技術政策は極めて重要になる。

それにもかかわらず、科学技術政策の立案は容易ではない。その理由は、産業政策一般と比較してみれば明白である。産業構造もダイナミックに変化するとはいえ科学技術の進歩の速さはそれを遙かに上回っており、流動的でその将来の進歩の方向性は見通し難い。したがって、産業分類と異なり科学技術分類は不断に変化するとになり、また客観化・計量化が難しくなる。

このような理由から、産業政策の基礎となる産業分類や産業連関表に相当する

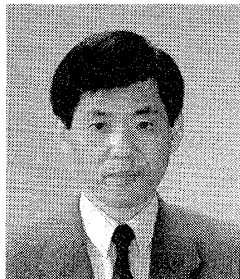
ツールを、科学技術政策は有していないのである。科学技術政策を立案する上で最も重要なことは、(1) 将来の科学技術の進歩の基本的な方向性を知ること、そのために科学技術の個々に公平に目配りしつつその全体像を描くこと、(2) それを客観的・計量的に叙述すること、(3) ある特定の社会的課題や技術的課題を解決するために、どのような科学技術の進歩を必要としているかを理解すること、等にある。これを容易ならざるものとしているのが、産業連関表に相当するツールが存在しないということなのである。

したがって、本稿ではこのような限界を克服するために、科学技術文献データベースの利用、とりわけこれから作成された技術連関表の有効性を提起する。

1. 科学技術データベースと技術連関表

科学技術の進歩の方向性を計量的に理解するために、「デルファイ法」やその他の予測があるし、また企業は「技術マップ」などを作成して、これをおこなってきた。しかし、これらの手法は一般に限られた狭い科学技術分野に限られ、また主観的になるという欠点があった。これに対して、科学技術文献のデータベースはこのような限界をかなりの程度解決できる。

世界には科学技術の専門領域ごとに多数の文献データベースがある。たとえば、Chemical Abstract (化学)、INSPEC (物理学、情報論)、



Fumio KOMODA
埼玉大学経済学部教授
1978年九州大学大学院経済学研究科博士課程
〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保255
048-852-2111 (勤務先)

Professor,
Saitama University, Faculty of Economics,
255 Shimo-Okubo, Urawa-shi,
Saitama 338-8570 (office)

COMPENDEX (工学全般), JOIS (科学技術全般) などである。さらに, 世界の特許をデータベース化したINPADOCやPATOLISなどもある。これらのデータベースは各々に固有の科学技術分類の体系を有しており, また検索語(キーワード)の体系を有している。言うまでもなく, データベース作成者は科学技術の進歩の方向性を的確に反映できるような科学技術分類と検索語とを工夫する。したがって, データベースの分類や検索語を検討することを通じて, われわれは現在の科学技術のパラダイムを知ることができるのである。

それは次のような方法を通じてである。第1に, 文献数の増加している科学技術分類や検索語は, その分野の研究の重要性が増していることを示しており, とりわけ新しく追加された分類や検索語についてはそうである。第2に, より重要な方法として, 科学技術分類と検索語を組み合わせる技術連関表を作成することである。これにより, ある目的を達成するためにはどの科学技術の進歩が必要であるかとか, ある科学技術を育成するためには別のどのような科学技術の下支えが必要であるかとか, 等を示すことができる。

具体的にはわれわれは生物学とのアナロジーにおいて, 検索語(キーワード)を「技術種」とし, 科学技術分類を「技術類」と名づけて, それぞれ行と列にとり, マトリックスを作成した。JOISの場合であれば約3,500の科学技術分類と約50,000の検索語を有しているので, 最大限3,500行×50,000列という膨大なマトリックスが作成可能ということになる。このマトリックスに対して, 分析目的次第ではクラスター分析という数学的解析手法を用いて連関関係の中軸(クラスターの中心)にある技術分野を抽出することもできる。技術連関表の詳細については, われわれの別著を参照されたい。

このような方法で作成される技術連関表を異時点間で比較したり国別に比較したりすれば, その意義はさらに一層高まることになる。したがって以下では, 科学技術文献データベース, およびそれから作成された技術連関表から得ら

れる科学技術政策論的な含意について, その主要な点を述べておこう。

2. 21世紀の課題と科学技術

まず, 科学技術基本法で述べられているような将来の科学技術のさまざまな課題について, その重要度, および実際の取り組み度合いを比較することから始めよう。

その課題に関連する検索語を科学技術振興事業団のデータベースであるJOISから抽出し, その1981年→96年の16年間の文献数の変化をみると, 環境問題に関するものとしては「環境汚染 (8,328 → 13,112)」「環境保全 (925 → 5,672)」「環境工学 (47 → 90)」「環境科学 (65 → 108)」, 食糧・農業問題に関するものとしては「食糧問題 (82 → 189)」「食糧資源 (43 → 85)」, 人口問題に関するものとしては「人口問題 (104 → 251)」, 資源問題に関するものとしては「資源開発 (1,854 → 1,000)」「資源回収 (1,191 → 1,513)」「資源技術 (38 → 19)」, 科学技術と人間・社会との結びつきに関するものとしては「人間性 (66 → 71)」「生きがい (20 → 72)」「人格 (19 → 60)」「単調労働 (20 → 22)」「人間機械系 (580 → 676)」「人間情報処理系 (97 → 76)」「ライフスタイル (21 → 350)」「クオリティ・オブ・ライフ (0 → 626)」「人間工学 (434 → 516)」「ヒューマンインタフェイス (0 → 2,633)」等がある。以上から, 環境問題の解決に対するプライオリティの極めて高いという事実を看取できる。また, 科学技術と人間・社会との調和については, 個々の検索語ごとの件数はさほど多くないがその検索語の種類の多様さの中に, 人間に優しく社会と調和した科学技術開発の重要性とともに, その実現のためには多面的な技術が必要であり, 難解かつ複雑であるという現実を知ることができる。

次に, このような課題を解決するためには一体どのような技術が必要となるかは, 技術連関表から知ることができる。たとえば, 「人間工学」という検索語を付された文献はどのような科学技術分類項目に多いかを調べてみると, 表1のような順になる。同表の意味は人間と科学

表1. 「人間工学」の技術連関（上位25）

	人間工学
人間機械系	269
産業衛生、産業災害	28
安全管理	21
生体計測	19
計算機システム開発	14
運転者	14
作業研究	13
生産工学一般	13
入出力装置	11
インテリアデザイン、家具	9
応用心理学	8
荷役・運輸機械、倉庫一般	8
品質管理一般	8
信頼性	7
職務・職能管理一般	6
車体構造とぎ装	6
自動車設計・構造・材料一般	6
関連産業（繊維工業関連産業）	6
生体機能強度解析	6
パターン認識	6
技術教育	6
図形・画像処理一般	5
運行技術	5
計算機シミュレーション	5
人工知能	5

（注）科学技術振興事業団のデータベース・JOISの検索語「人間工学」を付された文献が属する科学技術分類の上位25位までを、1996年について検索したもの。

技術との調和を目指す上での必要な技術の一つとしての人間工学は、自動車や計算機関連で必要とされているということ、そしてそのためには心理学、生体計測、生体機能強度解析のような人間に直接関わる研究とか計算機システム開発、人工知能、計算機シミュレーション、パターン認識のように情報通信関連技術の下支えが必要であるということを示している。同様の技術連関表を「環境保全」について作成すれば、具体的数値は掲げられないが「環境保全」という検索語を付された文献は「鋳型材料、造形」「鋳造一般」「ゴム・プラスチック工業」「ポリウレタン」「燃料電池」「熱処理技術」などに多く分類されている。このことから、化学や鋳鍛造のような分野において環境保全の重要性が高いこと、また「燃料電池」「熱処理技術」といった技

術の下支えが必要であるということ、等が理解される。

このようにある課題の克服や目的の達成のためにはどのような技術の進歩を必要としているかを、技術連関表を用いて知ることができる。その意味で大規模な技術連関表を作成すれば、その意義は極めて大きいものとなる。

3. 情報通信技術政策

次に、科学技術分野の中でもとりわけ重視され取り組みが積極的である分野は何かを考えると、情報通信技術であることは疑いない。このことは、情報通信技術分野が技術連関表のクラスターの中心に位置していることがわれわれの研究でも既に確認されていることから分かる。さらに別の証拠の一つとして、世界の工学分野の主要な文献を収録したCOMPENDEXをみると、それに収録される文献の絶対数においても伸び率においても「Computer and Dataprocessing（分類コード72）」「Electronics and Thermionic Materials（71）」といった情報通信技術が最も大きく、全収録論文数に占める割合は1971-72年から1995-96年にかけてそれぞれ3.4%→8.7%、7.7%→7.4%となっている。また、JOISにおいても同様の結果がみられる。また、技術データベースから離れてみても、科学技術政策研究所『2025年の科学技術』によれば将来重要になる技術上位100位の中に情報通信技術は5年前の調査では10件であったのに1996年調査では24件に著増している。また、経済企画庁『2015年の技術』によれば、重要技術100件のうち情報通信関連のものは23件であるが、実際には他の分野の技術であっても「通信衛星利用自動車」「知能ロボット」等、その実現は情報通信技術の進歩を前提している技術が極めて多い。

情報通信技術が最も重視される理由は、情報通信ネットワークが豊かな消費と効率的な社会システムを可能とすることにあるし、逆に使い方次第で経済や消費生活を大きく混乱させてしまうことにもなるという点にある。情報通信技術の進歩を背景としたコンピュータネットワー

クの高速化は、全ての産業分野において研究開発、製造、販売・流通というあらゆる企業活動を効率化させ（生産性上昇）、またサイバースペースの上にこれまでにない魅力的な新サービス群を生みだし、豊かな消費社会のためのインフラを提供することになる。その意味で科学技術政策の最も重要な位置を占めることになる。

情報通信技術の育成のためにはその全体像を正しく描くことが大切である。20世紀を支えた道路網とその上に成立する自動車文化と異なり、21世紀を支える通信網とその上に成立するマルチメディア文化は、膨大な要素技術群から成る巨大システムでありまたブラックボックスとなっているからである。その全体像は、ハードウェア技術、ハードとソフトの融合領域の技術からソフトウェア技術に至る膨大な要素技術の連関としてとらえられねばならない。そして、コンピュータがコンピュータネットワークへと進化するにつれて、とりわけソフトウェアが重要になってくる（ソフトウェア主導型の技術進歩）。その理由は、ソフトウェアはハードウェアよりも、(1) 同じ機能を低価格でおこなうことができる、(2) ニーズに応じて柔軟に対応できる、等の利点を持つからである。

このような技術進歩につれてハードウェアとソフトウェアの連関構造も組み替えられるのであり、その実態を技術連関表から把握することができる。とりわけ、将来の情報通信ネットワークは一層高速かつ知的なものへと進化していかねばならない。そのときに必要な技術は何か、技術連関の中軸技術は何かを技術連関表から明確にし、育成することが科学技術政策にとって重要な課題となるが、そのためには技術連関表が有効になる。

もちろん、実際にはこの作業は容易ではない。情報通信技術は2-3年後の技術さえ見通せないといわれるほど進歩が速いため、その将来の動向を正しく把握することは難しいが、避けて通れない。たとえば、1980年代に日本が第5世代コンピュータ開発（人工知能）の開発に重点を置いていたとき、アメリカは人工知能の早

期の実現が困難であるという認識のもとにコンピュータのネットワーク化による情報処理能力の向上を目指し、インターネット分野での世界の圧倒的な優位の基礎を築いたのである。

情報通信分野の分析にとっては、INSPECが最も適している。これから今後どのようなハードウェアやソフトウェアが必要になっているかは、その文献数の推移から知ることができる。それによれば、ハードウェアでは集積度の飛躍的向上を追求して量子効果を利用した量子素子、超伝導素子や、コヒーレント光、レーザーといった高速通信のための量子力学に基礎を置く技術が最も重要になる。たとえば、「ナノテクノロジー (nanotechnology)」は1989-90年0件から1995-96年には833件に増加している。ソフトウェア分野ではソフトウェアのインテリジェント化が最も重要になる。人間の思考に近いアルゴリズムを用いた知的ソフトウェアとなる。そのようなものとして、「知識ベースシステム (knowledge based systems)」「脳モデル (brain models)」「ニューロネットアーキテクチャ (neural net architecture)」などがあり、1989-90年から1995-96年にかけてそれぞれ3,194→3,565件、212件→590件、0件→1,076件と増加している。さらに、「認知科学」「自己組織化データベース」「超並列アーキテクチャ」など、より高度の計算機科学が追求されなければならないのである。ところが、このような最新の科学技術概念は統制語化されていないので、いわゆる自然語検索する必要がある。たとえば、「ナノテクノロジー」も1989-90年に統制語としては0件でしかないが、自然語検索すれば8件見られるのである。

知的なソフトウェアを支える技術は何かを技術連関表から知ることが出来る。たとえば、科学技術分類「ソフトウェア (computer software) (分類コードC6)」は検索語「脳モデル (brain models)」「非線形ダイナミックシステム (nonlinear dynamical systems)」と1987-88年→1995-96年にかけて、それぞれ7→31件、0→40件へと連関を急速に高めていることが象徴するように、情報通信技術は新しい数学モデ

ルや脳モデルのような科学の下支えを必要とするようになっていく。技術から科学へ、物理学から生物学へと研究のシフトが進んでいるといえる。

4. 技術から科学へ、物理科学から生命科学へ

新しい科学技術において、技術以上に科学の相対的な重要性が高まり、その中でも物理学以上に生物・生命科学の重要性が高まることは、JOISに収録される文献のうち「物理学（分類コードB）」の文献よりも「生物科学（E）」の文献の伸びが大きいことに象徴される。

生物、生体、脳の研究が重要になる理由は、単に知的好奇心を満たすための科学技術的条件が整備されてきたことのみにあるのではなく、経済社会システムの変化にも深く関係している。すなわち、20世紀には耐久消費財（家電と自動車）が広く家庭に普及してゆくという消費主義型の経済成長であった。このような消費財は人間の肉体的・生理的な欲求との結びつきが強かったといえる。自動車は人間の地理的移動に要する生理的苦痛を解決したし、電気掃除機、洗濯機を始めとする耐久消費財は主婦を家事労働から解放した。ところが、このような肉体的・生理的な欲求との結びつきが大きい財に対する需要は飽和状態に達し、消費者は「これ以上欲しいものは何もない」という状態にある。このようなもとでさらに市場ニーズを喚起し、消費者に豊かさを実感させるためには、人間の生理的・肉体的・本能的な欲求に根ざすのではなく、精神的なものに訴えかけこれを充足させる（たとえば、「よりよく生きたい」という欲求を充足させる）ものでなければならない。そのためには当然、人間の心、生体、脳などを解明することなしには不可能なのである。ニーズが人間の基本的欲求からますます離れてくるにつれて、その消費に対する意味、価値、目的があいまいになり捉え難くなるが、それを捉えるためには生命科学の進歩が不可欠である。

生体や脳の研究は20世紀の後半にそのための基礎が切り開かれた。1953年の2重螺旋構造の発見が遺伝子工学の出発点となったし、MRI、

PETのような脳機能の計測機器の発展が脳の機能の研究を進めつつある。遺伝子や脳の研究は未だ産業化には端緒的な段階にとどまっていた、基礎的な研究段階といえる。その点で情報通信技術とは大きく異なっている。しかし、21世紀には他の多くの科学技術分野のパラダイムを変えるほどに大きな役割を果たすようになるであろう。したがって、アメリカは1990年代を「脳研究の10年」として精力的に取り組んでいる。

生命科学がどのような分野で利用されるようになるかとか、また生命科学の進歩はいかなる科学技術の進歩に支えられるかとか、も技術関連表から理解できる。たとえば、JOISの場合「遺伝子操作」という検索語を付された文献がどのような科学技術分野に分類されているかを1986年→96年の時系列でみると、「腫瘍の化学・生化学・病理学（分類コードGE02030N）」が191→237件、「ウイルス感染の生理と病原性（EG04042Y）」が98→133件、「免疫療法薬・血液製剤の基礎研究（GW22010D）」が31→74件、「野菜（FC03043X）」が1→77件、「作物の品種改良（FC02030G）」が24→76件などとなっている。遺伝子工学技術が主として医薬品で、次いで食糧分野で利用されていることが分かるが、近年食糧分野での利用の相対的な伸びの大きいことも分かる。

さらに科学技術分類「生体工学（EL）」に分類された文献がどのような検索語を付されているかをみると、1996年には「生体機能補助機器」210件、「医療機器」181件、「診断」475件、「画像処理」220件、「パターン認識」148件、「計算機利用システム」56件、「計算機シミュレーション」211件、「ネットワーク」346件、「モデリング」108件、「数学モデル」168件、「自己組織系」40件などとなっている。生体工学が医療における厚生向上に不可欠の技術であるということや情報通信ネットワークに利用されることが理解できるとともに、生体工学技術進歩はコンピュータ技術、画像処理技術が必要であることを示している。

さらにここから理解される極めて重要なこととして、生体工学が自己組織系といった新しい

科学パラダイムにもとづくモデリング技術に支えられているということがある。21世紀の生物科学はこれまでの要素還元主義と決定論的な線形数学に基礎を置く科学パラダイムから離れて、非線形系数学に基礎を置くものへと変わりつつある。それは具体的には、物理学の中で得られたカオス、フラクタル、非線形系、複雑系、ゆらぎなどの考えが生物科学に導入されるというプロセスを通じてであることも技術連関表から理解できる。

また、生命科学の特徴は、さらに価値、倫理等の人文社会科学系との交流を必要としているということにある。事実JOISでみても、検索語「価値」「倫理」「哲学」「人間性」「ライフスタイル」等は科学技術分類「物理学(分類コードB)」とはほとんど関連していない(「哲学」を例外として)のに対して、「生物科学(E)」とは関連がみられる。生命科学においては人間・社会との関係をいかに求めるかが重要である。現在の科学の進歩は物理学、化学、生物学、脳・神経科学、そして人文社会科学という階層性のそれぞれのレベルでのシステムの原理を発見するとともに、各階層間の関係性あるいは結びつきを知ることに向けられつつある。このような文脈を意識しつつ、科学技術が人間・社会との関係についての学際的研究も必要になり、科学技術政策もこのような文脈を意識した立案が必要になろう。生物科学と人間・社会との調和が現在どのような方向で求められつつあるかは、科学技術分類「生物科学(E)」と検索語「価値」「倫理」「人間性」等とのいわゆる“and検索”をおこない、これによって検索された文献のタイトル、抄録、全文をみてゆけばかなりの程度において的確に推測できるであろう。

5. 日本の科学技術政策

科学技術データベースは多くの場合著者の国籍籍を明記しているので、それぞれの国に固有の科学技術的基盤の性質を知り、またそれにもとづいて科学技術政策の問題点を考えることができる。

日本の科学技術基盤や力についての一般的な

評価は、(1)アメリカに近づき、分野によっては追い越している、(2)しかし基礎研究は弱く、独創性が乏しく、アメリカの物真似という性格がある、(3)ハードウェアは強いがソフトウェアは弱い、(4)研究室間の壁が高く人的交流が少なくといった研究体制の硬直化等ゆえ総合的でシステムの思考に弱い、等である。紙幅の関係で数値そのものの表は掲げられないが、情報通信や情報論関連の文献を収録するINSPECに依拠しつつ検証して見よう。

まず、全般的に考えてアメリカのものが圧倒的に多く、次いで日本の文献が多い。とりわけ、「電子プローブ分析」「量子干渉素子」「ナノテクノロジー」など量子力学と関連した未来のハードウェアについてはアメリカに匹敵するほどである。日本は量子大国としての地位を獲得することも可能であるといえる。これに対して、「プログラミング」「エキスパートシステム」などはアメリカに大きく劣るだけでなく、イギリスと比較しても少ない場合が多い。ハードウェア文献数が多いという点で日本に似ているドイツが経済的に行き詰まりを示しているのに対して、ソフトウェア文献の多いイギリスが新しい経済システムの確立に向けて歩んでいることをみると、ハードウェアに偏った日本の情報通信政策(単に資金的偏りのみをいっているのではなく、ハードウェア開発に適した組織重視の研究体制そのものも含めていっているのであるが)の再考をする上で、貴重な示唆を示すものといえる。

さらに、日本の文献数がアメリカを超えているハードウェア技術でさえ、以前はアメリカが圧倒的に上回っていた技術も多く(「LSI」等)、もともとはアメリカでブレークスルーが切り開かれたことを示している。アメリカが基礎研究に優り、アメリカから日本に技術移転されたことを示している。プロダクトライフサイクル論的な国際技術移転構造の実態について、データベースからかなりの程度論証可能である。

しかも、日本の技術水準の向上にもかかわらず、基礎研究の弱いという日本の状況は必ずしも十分には改善されていないように思える。な

ぜならば、「DRAM」「原子層エピタキシャル成長」で日本がアメリカを上回りながら「メモリ」「エピタキシャル成長」ではアメリカに劣っていたりするという事実が多く見られるからである。原理にまで遡った基礎研究へのアメリカの研究資源の投入を物語るものと解釈できる。すなわち、日本が狭い分野に集中的に投入しているのに対して、アメリカの研究は幅広く奥行き深い研究開発基盤を有しているのであり、これが現在のパラダイムの中でみれば予想もつかないような画期的なアイデアの源泉（プール）になっているのである。日本の研究開発基盤のひ弱さを物語るものといえる。

さらに興味深い事実は、1990年頃からの韓国、台湾、中国等の東アジアの文献数の著増である。21世紀のアジア諸国の発展を予兆させるものがある。

現在、科学技術はますます他の領域との融合に向けて進みつつある。しかも、単に自然科学・工学の内部での融合にとどまらず、人文社会科学系との融合なしには成立しなくなりつつある。その理由は、脳科学に代表されるように生物・生命科学は倫理、哲学、価値などを深く関係するからである。INSPECによれば、検索語「価値」「倫理」「哲学」「人間性」等を持つ文献について、日本のものの比率は高くない。たとえば、学術審議会特定研究領域推進分科会の報告書でも、日本の脳研究は受容体、イオン・チャンネル、細胞内情報分子などの分子・細胞レベルの脳の基本的機能については世界をリードする成果をあげているが、学際的・総合的に脳機能のメカニズムを扱う成果には乏しいと述べられて

いる。自然科学と倫理、哲学、社会、経済的な観点を扱う人文社会科学とのコミュニケーションの希薄さにかなりの程度起因していると考えられる。自然科学内部のみでなく人文社会科学も含めた学際的な研究体制の確立が早急の課題となっているといえる。

本稿では科学技術文献データベースを利用した技術連関表が日本の科学技術基盤の特徴を浮き彫りにし、科学技術政策の立案に有意義であることを述べた。おそらく、本稿での叙述にとどまらず一層の工夫次第でさらに示唆に富んだ結論を引き出すことも可能になるであろうと思われる。たとえば、引用回数などで文献の重要度にウェイトづけをしたり、特許データベースを用いたり、インターネットという巨大なデータベースを利用したり、等が考えられる。今後の課題としたい。

参考文献

- [1] 学術情報センター，学術論文数の国際比較調査：1976—1993，学術情報センター（1996）。
- [2] 科学技術庁科学技術政策局編，科学技術基本計画（解説），大蔵省印刷局（1997）。
- [3] 菰田文男・西山賢一・林倬史・金子秀，情報通信と技術連関分析，中央経済社（1996）。
- [4] 菰田文男・西山賢一・林倬史，技術パラダイムの経済学，多賀出版（1997）。
- [5] 根岸正光，学術論文数の国際比較調査，情報管理，39（4）（1996）。
- [6] 西山賢一，複雑系としての経済学，NHK出版（1997）。