

“Strong Inference”について

東北大学医学部 八 尾 寛

まえがき

私事ではあるが、京都大学の大学院に在学中に、当時教授として帰国されたばかりの久野宗先生から最初に読むように勧められた論文が、ここに紹介する John R Platt の“Strong Inference”だった。私がそのころの自分の研究に対して漠然と感じていた不満が何に起因するのかを、彼の思想は明瞭に示してくれたように思う。そのとき以来、私の思考は画然と整理され、自信を持って、自分のアイデアを研究に実現していくことができるようになった。ゆえに、研究を始めたばかりの人や研究を志す人の一助にもなればと、本論文の拙訳をお目につけた次第である。訳するにつれて、この論文が書かれたのが35年前であるにもかかわらず、少しも古さを感じさせないことに、驚きもし、かつ残念に思うところがあった。ここに述べられた思想は、経験を積んだ研究者にとっては当たり前のことであろう。しかし、Platt がいみじくも述べているように「日々の仕事に追われて忘れていく」ことがなきにしもあらずである。

この論文に対してはいろいろな反論があることと思う。私自身も、「誰のものでもない仮説」「数式の有用性に関する疑問」「定性的研究の優位性」などの議論は極端すぎると考える。また、本論文では、「対立仮説」をたて、「判定実験」をデザインすることの重要性を説いているが、良い対立仮説を立てるにはどうすればよいのか、良い判定実験をデザインするにはどうすればよいのかについては述べていない。これは、それぞれの研究者の問題意識とセンスにゆだねられている。問題意識を高めセンスを磨くことがまず第一であり、“Strong Inference”をゲーム感覚的に適用することは慎むべきであろう。科学的問題に対する取り組み方の違いが、研究者の個性である。それぞれの研究者が、自分に適した自分なりの思想を確固たるものにするうえで、本論文がたき台になればよいと思う。

本論文は、学生・大学院生の教育を念頭に置いて書かれているように思う。学生は、研究室にはいるまで「科学の方法論」の教育をこのように明瞭な形

で受ける機会がない。日本の小・中・高校教育においては、知識の習得に偏り、本来の科学教育が行われているとは言い難い。「科学的」なるものに漠然としたイメージを持ったまま大学に入り、大学を卒業してしまうのではないだろうか。教養科目の定番だった分析化学実習が科学的思考を養う上でいかに重要な位置を占めていたのか。本論文であらためて痛感した次第である。講義や学生実習に“Strong Inference”の考えを盛り込むことは、学生に考える習慣を植え付け、考えることの喜びを与え、研究に対するロマンを芽生えさせるのに、きわめて有効であることは疑いない。

“Strong Inference”はそのまま直訳すれば「強力な推論」となるが、これでは本論文の意図が生かされないように思う。適当な訳語が思いつかないので、英語のままにした。また、いくつかの比喩については、著書が意図していると思われる意味を推測して [] 内に書いた。本論文に興味を持たれた方は、ぜひ、原文を読まれるようお勧めする。末筆ながら、本論文を訳するにあたり、阿部高明、岡田泰伸、河和善の各氏に貴重なご批判をいただいたことを感謝したい。

Strong Inference—系統的な科学的思考こそが より急速な研究の進展をもたらさう*。

ジョン R プラット^[1]

今日、科学者は、「すべての科学は平等である」という耳ざわりの良い空想にしがみつしがちである。たまたま現時点で攻撃対象になっている異端者は例外として、おのおのの科学者の研究対象や研究法は、他の科学者に比べて同程度かやや優っているかのごとく主張されている。この空想のもとに、われわれ科学者は互いに心を込めて政府の交付金の支給先を推薦し合っているのである。

しかし、この問題を詳細に眺めると、科学のある分野は、他の分野よりもずっと速く、具体的な数字でいえば約一桁程度速いスピードで前進していることに異論を唱える人はいないだろう。そのような分野の研究では、いくつかの新しい発見が見出しから躍り出ている—それらは、複雑で難しい問題に対する本当の知的前進である。このような例は、分子生物学や高エネルギー物理学にみとめられる。「分子生物学においては、一ヶ月に少なくとも一つは衝撃的な成果が米国科学アカデミー紀要に掲載される」と Alvin Weinberg は述べている^[2]。

急速な進歩が、ある分野には存在するのに、他の分野には存在しないのはなぜだろうか。対象の扱い易さ、その対象に引き寄せられる人の質や教育、あるいは研究協力の広がりなどが通常考えられがちな説明である。しかし、これらの要素は重要ではあるが、説明としての的を得ているとは言えない。科学の進歩において最も重要な要素は思考の仕方であると、私は最近確信するに至った。上述したような急速に進展している分野は、科学研究を進める方法論が系統的に用いられ、かつ教育されている分野である。この帰納的推論を積み上げていく方法は、科学研究を進める上で非常に有効に機能している。ゆえに Strong Inference と名付けるべきであると考えられる。この方法論、その利用例や歴史、およびその理論的根拠を調べることに、ならびに他の研究領域のグ

ループや個人が、それぞれの科学的・思考的活動にこの方法論を役立たせることが可能か否かを考えることは重要である。

Strong Inference は、それを各要素に分解すると、Francis Bacon にまでさかのぼる単純かつ旧式の帰納的推論の方法に行きつく。各要素のステップは、ほとんどの学生にはなじみ深いものであり、ほとんどの科学者がその時々実践しているものである。ただ、それらが系統的に適用されているか否かという点が異なっている。Strong Inference は、以下のステップを、科学のあらゆる問題解決に、定式的に、明快に、かつ規則正しく適用することから成り立っている。

- 1) 二者択一的な「対立仮説」をたてる。
 - 2) 二者択一的な結論が引き出されるような判定実験(あるいはその組み合わせ)を計画する。判定実験は、得られた結果が対立仮説の一方を可能な限り棄却する様にデザインする。
 - 3) はっきりした結果を得るまで実験を遂行する。
- 1) 残された可能性をさらに検討するためのサブ仮設や、連鎖的な仮説を設定して、この手続きを繰り返す。
- 等々。

これは、例えば木登りのようなものである。最初の枝分かれで、我々は—この場合は、「自然」または実験結果が—右の枝へ進むべきか左の枝へ進むべきかを決める。次の枝分れ、さらに次の枝分れでも同様である。同様の分岐点が「条件付きのコンピュータプログラム」にも存在する。この場合、次の動作はその直前の計算結果により決まる。大学初学年向けの化学の教科書には、内容不明のサンプルを定性分析するステップを詳細に説明する「条件付き帰納法樹形」や「論理樹形」が描かれているのだが、これも類似のものである。ここで、学生は、「内容不明のサンプルに試薬 A を加えよ。赤い沈殿が生じたならば、それはサブグループ α に属する。これを濾過して、試薬 B を加えよ。反応がなければ、試薬 B' を加えよ。…」といった、推論の連続から

* Reprinted (abstracted/excerpted) with permission from "Platt, J. R. Strong inference. Science 146, 347-353". Copyright 1964 American Association for the Advancement of Science. The following is not an official Japanese translation by the staff of SCIENCE, nor is it endorsed by SCIENCE as accurate. Rather, this translation is entirely that of The Physiological Society of Japan. In crucial matters please refer to the official English-language version originally printed in SCIENCE.

成る具体的な問題に遭遇する。

未知の問題については、もちろん、どんな場合でも帰納的推論は演繹ほどは簡単でも確実でもない。というのは、帰納的推論は最終的に不可知に終わる可能性をはらんでいるからである。ステップ 1) およびステップ 2) は、仮説、実験、結果、棄却が厳密な三段論法に当てはまるように熟考のうえ設定されなければならない。どのようにして設定するかという問題については、他書で詳細に論じられている^{[3]、[4]}。見当違いの場所でぐずぐずしたり疲弊したりせずに、設定の考察に努め、次のステップに進み、さらに次の分岐点に進むべきであるということが、このような定式的な図式から浮かび上がってくる。

この方法がなぜ急速で力強い進歩をもたらすのか。その理由は明らかである。未知を探求するに当たって、これ以上に速い方法はない。つまり、この方法は最も少ないステップから構成されているのである。棄却されていない結論はすべて不確実であり、再検討されなければならない。次の仮説群に回帰する際の遅れは、単なる遅れにすぎない [見当はずれのことをしているのに比べれば、ずっと速い]。Strong Inference またはそれによって形づくられる論理樹形と帰納的論理展開の関係は、それが次々と可能な限りの速さで確実な帰納的結論に到達するという点において、三段論法と演繹的論理展開の関係になぞらえることができる。

「しかし、この方法のどこがそんなに目新しいのかね」という人もいるだろう。これは、科学の方法そのものであり、以前から存在していたものである。この方法に、なぜ特別の名前を付けるのか。その理由は、科学者の多くがこの方法をほとんど忘れていた現状があるからである。科学は今や日常のビジネスになっている。装置、計算、講義は、それ自体が目的になっている。われわれ科学者のうち一体何人が、仮説の棄却に焦点を絞りながら、選択仮説や判定実験について日々書き留めているだろうか。我々は、あたかもステップ 1), 2), 3) を常に心に抱いていたかの様に、科学論文を書くだろう。しかし、それ以外のときは日々の忙しい仕事に追われて忘れていた。われわれは、ときとして「問題指向」よりも「テクニク指向」になりがちである。われわれは、「自分たちのやり方」が一般的であるように感

じがちである。そして、どのようにして帰納的推論の方法に磨きをかけるのかを、学生に教える機会を逸してしまう。さらに、きちんとした対立仮説を立てて、はっきりとした棄却をすることを、常日頃から心懸けることによって、研究が、そのあらゆる過程で力強く前進することを理解していないのである。

平均的な科学者に見られる整理されていない思考法と、Strong Inference のユーザーの思考法の違いは、ちょうど、たまにしか点火しないガソリンエンジンと、持続的に回転しているエンジンの違いに例えられよう。もしも、われわれのモーターボートのエンジンが、熟慮しているとはいえ緩慢な知的活動と同じように気まぐれだったならば、夕食までに家にたどり着けないだろう。

分子生物学

最近の分子生物学は、上述の系統的な推論の方法が広く用いられ、効果を取めている分野である。分子生物学が対象としている領域は複雑である。しかし、この10年間に行われた一連の判定実験により、遺伝のメカニズム、酵素活性の調節機序、蛋白合成の調節機序などが、驚くほど詳細に解明されてきた。

系統的な論理構造がどの実験にも認められる。1953年、James Watson と Francis Crick は、DNA 分子—細胞における「遺伝物質」—が長い2重らせん分子であることを提唱した^[5]。このことから、判定試験を必要とする多くの対立仮説の存在が示唆された。細胞が分裂するときに2重らせんのDNA鎖は結合したままだろうか、それとも分離するのだろうか。Matthew Meselson と Franklin Stahl は、巧妙な isotope-density-labeling 法を用いて、DNA鎖が分離することを示した^[6]。DNAらせんは常に2本鎖なのだろうか、それとも原子模型から示唆されるように3本鎖の形を取り得るのだろうか。Alexander Rich は、イオン濃度によって、どちらの形も取りうることを示した^[7]。これらは、John Dalton が好んだであろう種類の実験である。ただし、結合しているものが原子ではなく、長い巨大分子である点が異なっている。

別の対立仮説の例をあげてみよう。「遺伝子地図」—リコンビナント実験に基づいて異なる遺伝形質間の近縁関係を統計的に表したもの—は、T. H. Mor-

gan が1911年に提唱したように DNA 分子のような一次元の地図(すなわち、線形地図)なのだろうか、それともループや分岐を持つ二次元の地図なのだろうか、Seymour Benzer は、バクテリアを用いた何百通りもの詳細な微小遺伝子の実験を行った結果、一次元モデルの数理的マトリクスのみが当てはまることを示した^[8]。

もちろん、いま取り上げたような判定実験は他のどの分野にも見いだされる。分子生物学の異なる点は、定型的な帰納的推論が系統的に行われ、教育されているところにある。英国 Cambridge 大学の分子生物学教室では、Francis Crick や Sidney Brenner の黒板は、毎朝、論理樹形でいっぱいになっている。一番上のラインに書かれているのは、ラボから出てきたはやほやの結果であったり、手紙や風説に見られる最新の情報である。次のラインは、2~3通りの可能な解釈であったり、“What he did wrong.” という数行のリストであったりする。その下に、可能な解釈の数を減少させ得るような一連の試行実験や対照実験が列挙されている。等々といった具合である。人が入れ替わり立ち替わり入ってきて、なぜその実験がうまく行かなかったのか、どのように変更すれば良いのかなどの議論をするにつれて、その論理樹形は、あたかも木が成長するように、その日のうちに成長していくのである。

Strong Inference の考え方は、論文に書かれている文体や言葉に良く現れている。例えば、Joshua Lederberg は、抗体産生に関する様々な説を分析するに当たって、9通りの「否定されるべき」説をリストアップし、それぞれの説を「否定するにはどのような判定実験がもっともふさわしいか」を論議している^[9]。

フランスの指導的研究者である François Jacob と Jacques Monod の論文もまた高度な「論理構成」で有名だが、彼らの文章の一節一節は「帰納的三段論法」でつながっている。しかし、その文体には共通性がある。例えば、1964年に *Journal of Molecular Biology* に掲載された最初の論文^[10]から、すでに “Our conclusions... might be invalid if... (i)... (ii)... or (iii)... We shall describe experiments which eliminate these alternatives.” という文体をすぐに見いだすことができる。物理学、化学、その他の諸分野の平均的な研究者は、いま挙

げた例に比べ、論理的に厳密でない論文や鋭利に表現されていない推論に慣れているので、上述した雑誌を手当たり次第に覗いて見るだけできつと良い経験になるだろう。

分析的な方法論に対する抵抗

生物学に対するこのような分析的なアプローチは、それほど厳密でなく、また、散漫な慣習になじんできた研究者の多くにとっては、これを受け入れること自体に非常に強い抵抗があるので、ときには、ほとんど革命と言ってよいほどのものである。1958年、Boulder で開かれた生物物理学会議において、この2つのものの見方をめぐってドラマチックに激論が闘わされた。Leo Szilard は、次のように言い切った：「いかにして酵素が誘導されるのか、いかにして蛋白質が合成されるのか、いかにして抗体が産生されるのか、という問題は、一般に信じられているよりも解明に近づいている、もしもばかげた実験を行い、それを一年に一つずつ片づけてゆくならば、解明に50年にかかるだろう。しかし、少しのあいだ実験の手を休めて、蛋白質の合成されるメカニズムとしてどういうものが可能なのかを考えれば、50ではなく5つ程度の可能性しかないだろう。そして、これらを判定する実験はほんの少しで十分だろう」。

若手の1人が付け加えた：「いかに少ない実験でエレガントに結果を導きうるのか、というのは、[今さら論じる必要もない] 古典的な考え方である」。

これらのコメントは、居合わせた多くの人々を狼狽させた。1人の電子顕微鏡学者は言った。「皆さん、この発言は問題をはずれています。これは科学哲学の問題です」。

Szilard は次のように反駁した。「私は三流の研究者を相手に議論していたのではない。一流の研究者を相手にしていたのだ」。^[哲学の問題について議論できなければ、一流の研究者とはいえない]

1人の物理化学者が忙しそうに訪ねた。「記念写真は昼食前に撮影するのですか、それとも昼食後ですか」。^[こんな議論は時間の無駄だという皮肉]

しかし、これで議論をそらすことはできなかった。1人の著名な細胞生物学者が立ち上がって発言した。「どんな2つの細胞も全く同じ特性を有していない。生物学はヘテロなシステムを相手にする科学

である」。さらに彼は、個人的な考えだが、と前置きして、続けた。「世の中には科学者と科学にたずさわる者がある。後者は、きわめて単純化されたシステム—DNA 鎖や *in vitro* 系—を用いて作業している。しかし、彼らのしていることは決して科学ではない。われわれは、彼らの補助的な作業、例えば、装置の組立やマイナーな研究、を必要とする。しかし、彼らは科学者ではない」。

これに対して、Cy Levinthal は次のように反論した。「なるほど、確かに生物学者には二種類の人がある。しかし、それは、解明されうるものが一つはあるのではないかと探し求めている人と、生物は非常に複雑なので何も解明されはしない、と言うことしか知らない人の二種類である。…自分が関心を寄せている特質を備えていると思われるシステムのうちで、最も単純なものを研究対象とするべきである」。

ミーティングが散会しかけたとき、1人がつぶやくのが聞こえた。「Szilard のやつは、おれに何をしろというのだ—ピストル自殺をしろとも言うのか」。

自分たちの方法論に対する批判や自分たちの方法論を撤回させようとする試みに対して自己防衛に傾くのは当然の成り行きである。しかし、以上のようなケースでは、この分析的な方法論は、それが研究の効率を著しく向上させるがゆえに、知への挑戦としてではなく、戦闘の手段と見なされがちなのは、不幸なことである。1958年の Szilard らの議論の過程で提出された分析的方法の延長上にある、この「きわめて単純化されたモデルシステム」こそが、まさしく分子生物学における最近の勝利の多くをもたらしたのである。これらの勝利は、「どんな二つの細胞も同じではない」と言って自らを正当化する種類の人々—彼らの言っていることが究極的には真理であるにせよ—によってもたらされたのではない。これらの勝利は、まさしく新しい思考方法の勝利である。

高エネルギー物理学

以上のような分析的な思考法は、まれではあるが、決して新しい生物学に限ったものではない。高エネルギー物理学は、棄却の論理が新聞の解説記事にすら顕著に認められる分野の一つである。たとえば、

C. N. Yang と T. D. Lee の有名な発見の中で次のような疑問が提出されていた。素粒子の反応においても、鏡像対称性すなわち「パリティ」が保存されるのだろうか。それとも、パリティの破れる素粒子反応が存在するのだろうか。これに対する判定実験が示唆され、数カ月以内に実行に移された。その結果、パリティが保存されると言う仮説は棄却された。この判定実験の一つは、Richard Garwin, Leon Lederman, Marcel Weinrich らにより行われた。この実験のアイデアは、ある晩の夕食時にうかんだ。真夜中までに測定装置が組み立てられ、午前4時までには、予期されたパルスを検出した。そのデータは、パリティが保存されないことを証明したものである^[11]。パリティの破れという現象は、言い換えれば、定式的に対立仮説を構成するという方法の出現を待っていたのである。

この分野の理論家は、新しい性質や新しい粒子の存在を、もしそのような性質や粒子が発見されなければ、理論そのものが否定されるくらい断定的に予言しようとすることに誇りを持っている。生物学者の W. A. H. Rushton が言ったように、「絶体絶命の瀬戸際に曝されないような理論は生き残れない」のである^[12]。Murray Gell-Mann と Yuval Ne'eman は、彼らの「八道説」にしたがって素粒子を分類し、未知の粒子のオメガ-マイナスを予言した。オメガ-マイナスは、その後、探し求められ、発見されている^[13]。この理論の対立的な選択肢は、電子の持つ単位電荷の3分の1の電荷を持つ粒子の存在を予言していた。この粒子は、実験で発見されなかったため、こちらの選択肢は棄却されたのである。

高エネルギー物理学においては、論理樹形そのものがシステムを構成しているので、そのいくつかのステップは、通常、粒子を検出し泡箱写真を起動させる電子共鳴回路に組み込まれている。電子カウンターは、それぞれの粒子に固有のパターンで応答するので、除外するにせよ感知するにせよ、期待される結果をもたらすように測定回路が設定されている。このような判定装置が連鎖的に設定されていると、問題の粒子が完全な論理樹形を走り抜けるのに1マイクロ秒内外しかかからない。このようなエレクトロニクスによる予備的な分析は、人間が行う2者択一的論理の予備的な分析と同様に、判定基準を鋭敏化することにより、判定の速度をスピードアッ

プする。電子共鳴回路は、あらかじめスキャンするように設定された何十万もの無関係な像を除外する。そして、究極的に、目的のパルスが、たとえ数時間離れていても、2, 3検出されさえすれば、それが、反陽子の存在を証明するのがあるいは理論を否定するのかを、十分判定することができる。

私が挙げた2つの分野で Strong Inference が重要視されている原因の一つには、リーダーシップをとってきた人々の果たした役割が挙げられる—例えば、分子生物学における古典的遺伝学者の役割、Szilard や1948～50年にシカゴで彼が主催した「中西部チャウダーと細菌学の会」の役割、Max Delbrück が Cold Spring Harbor で開いたフェージ遺伝学のサマーコースの役割などである。しかし、それぞれの分野が本来持っている性質もその原因の一つである。生物学というものは、量的に膨大な情報が複雑にからみ合っている、いわば「ハイレベルの情報」を扱う分野である。そこでは、もし、何が最も重要かつ決定的な実験なのだろうかということをおおむね注意深く考えておかなければ、ありきたりの「ローレベルの情報」しかもたらさない観察や実験に、何年も何十年もの歳月が簡単に費やされてしまうだろう。高エネルギー物理学の方では、新しい加速器から出てくる粒子の情報の洪水と、運転に要する何百万ドルもの費用が、同様の分析的アプローチを推進したのである。レベルの高いグループ討論を、あらゆる実験に先立って行うことにより、無駄を省くことができる。そして、このような習慣が分野全体に広がっていったのである。

帰納法と多重仮説

Strong Inference が確立された方法論として発展するにあたり、重要な歴史的背景が2つあったと考えられる。その第一は、Francis Bacon の果たした役割である^[14]。彼が目指していたのは、論理的に一貫性がなかったり、どのようにでも解釈できるような当時の理論、あるいは「単純な枚举によって」結論を引き出そうとする、より前進的ではあるが粗雑な試みに代わる「より確実に」「自然を見いだす」方法であった。当時すでに実験といものが提案されていたのだが、この実験の重要性を唱えるだけにとどまらず、理論と実験を相互にその正しさをチェックできるように関連させることが実り多き結果をも

たらすことを実証したところに、彼の貢献がある。彼が提案した多くの帰納的手段のうちで、私が最も重要であると考えるのは、条件付き帰納的論理樹である。これは、対立仮説(Bacon によれば、考え得る「諸原因」)の設定からスタートし、判定実験(「道標に示されたそれぞれの行く先」)を経て、他のいくつかの可能性を棄却し、残された問題点を把握すること(「公理の確立」)に至るプロセスである。彼の言うところの「道標」は、「分かれ道に立てられて、それぞれの行く先を指し示している道しるべ」から借用されたものだが、ちょうど論理樹の分岐点に立てられているのである。

彼の著書、The New Organon 第2巻には、いくつかの判定実験が提案されているが、これらの多くは未だに魅力的である。例えば、物体の重さが、一部の人が言うように、その「固有の性質」によるのか、あるいは地球の引力によるのか、もし後者であるなら、物体の重さは距離とともに減少するはずだが、を判定するために、彼は、振り子時計とゼンマイ時計のすすみ具合を比較し、両方の時計を地面から高い尖塔の頂まで持って上がる実験を提案している。もし尖塔の上で、振り子時計のすすみが「その重さが減少したために遅くなったならば、…地球の引力が重さの原因であるということが出来る」と、彼は結論している。

ここにこそ、意味のない空虚な理論を退ける方法があったのである。

Bacon いわく、帰納法は誰にでも学ぶことができる。これは、ちょうど「定規やコンパスの助けを借りて、よりまっすぐな線やより完全に近い円を描く」ことを学ぶようなものである。「私の主張する科学を発見する方法は、最も確実なルールと証明を用いて何事も推し進めていくがゆえに、標準的な人々の知恵の啓発には大いに効果があるが、一個人のずば抜けた才能に役立つ物ではない」。たとえ誤りがたびたびあっても、それは致命的にならないだろう。「方向が定まらず混乱しているよりも、失敗した方が、真理に早く到達するだろう」。

当時の若い人々が、Bacon の考えに喜んで飛びついた理由がわかるというものである。

それにも関わらず、この方法には難しいところがある。Bacon が強調したように、「棄却」することが必要である。彼は言う。「この帰納法は、科学的な

らびに芸術の発見と証明に利用できるけれども、正しい棄却と除外をもって自然を分析する必要がある。しかる後に、十分多くの否定結果が積み重ねられてようやく、いくつかの肯定的な例証に基づく結論に到達するのである。「最初、否定することから始まり、除外し尽くした後で、最後に肯定にたどり着くのが[人間に与えられた]唯一の方法である」。

別の表現を借りれば、現代の哲学者の Karl Popper の言うように、科学には証明のようなものはない—というのは、後から出てくる別の説明の方が、同程度に、あるいは、より良いということが起こり得るからである—ゆえに、科学は反証を挙げることによるのみ進歩する。否定され得ないような仮説を立てるこつなどあり得ない。というのは、そのような仮説は何も主張しないからである。すなわち、「実践的な科学のシステムにおいては、ただ経験によって論駁されることのみが許される」^[15]。

反証を挙げることを原則として厳しく要求される場所に難しさがある。もしあなたが立てた仮説に対して私が別の仮説を立てたならば、明らかにどちらか一方が除外されなければならない。科学者は、選択の余地がなく、仮説が否定される憂き目にあう愚者か、仮説を否定する議論屋か、のどちらかにならざるを得ないように見える。おそらく、この点に、非常に多くの人々が分析的なアプローチを強力に押し進めることに抵抗する理由—そして偉大な科学者が時として議論好きである理由がある。

幸いにも、この難点は、第二の偉大な知性の産物ともいえる「多重仮説の方法」により克服されるであろう。この方法は、Bacon 流の図式を仕上げるのに必要とされていたものである。これは、太陽系の起源に関する Chamberlin-Moulton 仮説で有名な今世紀初頭のシカゴの地質学者 T. C. Chamberlin により提唱された方法である^[16]。

Chamberlin によれば、われわれが悩むのは、単一の仮説を立てることにより、それにとらわれてしまうからである。

「ある現象に対して、もっともらしいオリジナルの解釈を提出した、ちょうどその時に、自分の賢い子供に対する愛情が自然に芽生えてくる。その解釈が確固たる理論に成長するにつれて、彼の親心はその子供に集中するようになり、それは彼にとってますますすいとおしくなる。…そこで、知らず知らずの

うちに、理論を事実にあうように無理矢理こじつけたり、事実を理論にあうようにねじ曲げたりするようになる。…

「この重大な危険を避けるには、幾通りかの複数の作業仮説を立てる方法が推奨される。これは、力を分散させ、愛情を一点に集中させないという点で、単純な作業仮説とは異なっている。…各々の仮説には、それ自身の判定基準、それ自身の証明手段、それ自身の真理を追及する方法がある。そして、あらゆる面からその対象を取り囲んでいる一群の仮説があれば、その全体から実り多い手段や方法が生まれてくるだろう」。

Chamberlin の考えによれば、この方法は、「ものごとを弁別して考える習慣を形成する」とともに、教育上において最も重要な価値がある。「一定期間この方法を正確に実践すれば、複合思考癖とも呼ばれるような独自の思考様式が養成される」。

この魅力的な論文は、もっと手に入りやすい今日の学術雑誌に掲載されるべきである。そして、すべての大学院生—さらには、すべての教授に読まなければならない。

Chamberlin の考えは、科学においてわれわれが直面する多くの問題点をうまく言い当てていると同時に、その解決法を指し示している和我には思われる。厳密な帰納的推論に必要とされる対立仮説間の衝突と棄却が、それぞれの仮説一つずつを自分の持論とする人間同士の衝突になることがしばしば見受けられる。しかし、各人が複数の作業仮説を立てるようになれば、アイデア同士が衝突するにすぎない。その結果、各人にとって、決定的な反証を挙げること—Strong Inference を実行すること—を日頃から目標とすることに、大きな抵抗や葛藤をとまなわなくて済むだろう。実際、そこに誰彼の「個人的な所有物」でもない多重仮説があり、かつそれらを検証する判定実験があるならば、未だかつて経験したことのないような興味と興奮をもって、研究室での日々を送ることができよう。学生達は、探偵小説がどう種明かしされるのかを知りたくて、ほとんど待ちきれずに仕事に取りかかることだろう。今日の分子生物学や高エネルギー物理学において、Chamberlin がいったような「弁別的にもの考える習慣」や「複合思考」が発達した理由、および論理の明確さ、刺激の強さ、学生の熱心さ、チームワー

クの良さ—国際的なチームワークすらも—が発達した理由はここにあると思う。いったい、これほどまでに効果的なものが、これ以外にあるだろうか？

多重仮説が Strong Inference とうまくかみ合うようになれば、科学的探索は知的活力の源であるとともに情熱の源にもなることだろう。

残念なことに、現代の科学の他の分野には、比較的不健康なところが認められる。それは、対立仮説を立て、反証を挙げることの必要性が忘れられているからである。各々の研究者は、論理樹の一つの枝しか把握していない—あるいはそれすらない。そして、どこで判定的な決断を下すということもなく、行き当たりばったりに伸びる曲がりくねった木のようなものである。科学的にみて、どこか具合が悪いところがあるなど表面的な症状からわかるものである。それは、例えば、次のような症状である。The Frozen Method [手法こり：方法にこだわって、研究の目的が曖昧になっている]、The Eternal Surveyor [永遠の探求者：何年間も一つの研究テーマにしがみついていること]、The Never Finished [終わらなき研究：同じことを手を変え品を変え行うこと、同じテーマを方法や材料を変えて研究すること]、The Great Man With a Single Hypothesis [一説居士：一つの仮説を堅持しているがために偉大だと賞賛されるような人]、The Little Club of Dependence [助け合いクラブ：閉鎖的な小集団の中で、お互いが依存関係になっている。相手を強く攻撃することもなく、なれ合っている、ぬるま湯のような集団]、The Vendetta [恐るべき復讐者：対立する意見を持つものに対して、研究費や人事など研究と無関係のところまで報復する人間]、All-Encompassing Theory Which Can Never Be Falsified [融通無碍の理論：こんな理論は、ごまかしにすぎない]。

ある皮肉屋が、出所は怪しいのだが、教室で講義をしている理論化学者の話を教えてくれた。「というわけで、イオン特性の割合がより小さいため、第一物質の方が、第二物質よりも C-Cl 結合が長いのである」。

教室の後ろの方から、次のような声が出た。「でも、X教授、表によれば、C-Cl 結合は第一物質の方が短いですよ」。

「ああ、そうかね」と教授はいった。「なるほど、

これは簡単に説明できるよ。これはだな、この物質においては二重結合の性質がより強いからだよ」。

この種の話が本当ならば、ここに出てくる「理論」は、もはや理論と呼べる代物ではない。というのは、それは何も除外しないからである。それはすべての結果に当てはまるがゆえに、何も予言していないと同じことである。このような理論は、単なる言葉の羅列にすぎず、教授がたびたび繰り返していうだけの理由で、大学院生が暗誦し、信じ込んでいるだけである。これは、科学ではなく信仰であり、理論ではなく教理である。それが手振りで表現されようと、数字で表現されようと、あるいは、数式で表現されようと、反証を挙げるができるものでなければ理論とはいえない。つまり、実験の結果によっては誤りであることが実証される可能性のある理論でなければ、理論とはいえないのである。

化学の分野においては、共鳴理論を支持する人達は、きっと私が彼らのことを批判していると思うだろう。一方、分子軌道論を支持する人達は、私の批判が彼らに対するものだと思うだろう。しかし、そのような彼らの反応—私自身をその中に入れれば、われわれの反応—が、とりもなおさず、彼ら自身を物語っているのである。共鳴理論と分子軌道論が30年間も対立していたという事実は、[どちらかを否定する]反証を挙げられなかったという、自分たちの無能さを公衆にさらけ出しているようなものである。

私のここでの目的は、しかし、誰それの悪口を言うことではなく、われわれ一人一人に誤りがあったということを認め、あらゆる分野のあらゆる研究室において、反証を挙げるにより判定できるような鋭利な多重対立仮説を立てることを試みることの必要性を説くことにある。

系統的な適用

有数の科学者の研究の進め方は、Strong Inference の力の証明であったと考えられる。これらの成功は、凡人の及ばない類い希な知的能力のおかげであると同程度に、Bacon 流の「最も確実な規則と実証」の系統的な適用のおかげではないだろうか。Faraday の有名な日記や^[17]や Fermi のノート^{[41, [18]}からは、定式的な帰納法を次々と問題に適用していく日々のステップの有効性を、彼らがど

れほど確信していたかが伺われるのである。

X線を発見してから8週間以内に、Roentgenは、その主要な特性のうちの17を確認した。研究者はすべて、彼の最初の論文^[19]を読むべきである。その中に書かれている実証の一つ一つは、帰納的推論の珠玉というべきものである。最も効率の良い方法でなければ、これほどの速さで次々と証明していくことはできなかつたろう。

有機化学は、その始まりにおいてからが Strong Inference の精神のふるさどであった。ベンゼンの炭素原子間の結合はそれぞれ異なる性質を持っているのだろうか、それともすべて同等なのだろうか。もし異質ならば、水素原子を2カ所置換した誘導体は5種類存在しているはずである。同質ならば3種類のはずである。結果は、3種類の誘導体—オルト—、メタ—、パラ—誘導体—であった。これは、Strong Inference のテストである—生成物がグラム単位かミリグラム単位かといった測定法上の問題ではなく、対立仮説に基づく論理的な問題である。X線や赤外線を用いた測定法により確認されるよりも50年以前において、他のどんな方法が、炭素原子の正4面体構造やベンゼンの6角形対象構造を推論することができただろうか。

Pasteur が生物学の領域に入ってきたときの状況も同様に理解される。彼が、それまでとは全く異なる思考法を持ち込んできたことに異論をはさむものはないだろう。彼の研究対象は、2、3年ごとに、ある生物学的問題から他の問題へと移っていった：ビート糖の発酵に対する光の影響から、ワインやビールの「病気」へ、カイコの病気へ、「自然発生」の問題へ、ヒツジの炭疽病へ、さらには狂犬病へと。ヨーロッパには、このそれぞれの分野に、Pasteur の何百倍もの知識を持っている大家たちがいたにも拘わらず、彼はその大家たちが解き得なかつた問題を数ヶ月で解き明かしたのである。彼の成功をもたらしたものが百科事典的な知識でなかつたことは明白である。また、成功が次から次に繰り返されたことから、単なる幸運でなかつたことも明白である。成功は彼独特の探求法の系統的な適用の威力によってもたらされたのである。バクテリアは上から落ちてくるのだろうか。それならば、フラスコの管をS字型にすればよい。バクテリアは、部分的な真空に吸い込まれるのだろうか。それならば、綿栓をすれ

ばよい。[有名な「自然発生」の実験]。一週一週と、彼の考案した判定実験は除外の論理樹を形成していったのである。現代の分子生物学における Strong Inference のドラマは、単に Pasteur の物語の繰り返しにすぎない。

Newton や Maxwell がしたような偉大な科学的統合は、既存の規則や方法によらない類い希な個人的な能力の成果である。それにも拘わらず、これら偉大な統合者が、Strong Inference の考えを習慣的に持ち込んでいたことは注目に値する。例えば、Newton は、その著書 Opticks [光学]で Strong Inference を帰納的証明に用いているし、Maxwell は、色覚にはわずか3色が必要だけであるということを実験的に証明するのに Strong Inference を用いている。

効率の物差し

Strong Inference を系統的に用いることが効率的なことが明らかになったので、これが科学の方法一般の効率を評価する物差しになると考えられる。測量、分類、装置の設計、系統的な測定と数値表、理論的計算は、一もしもそれらが、自然はどのようになり立っているのかという疑問に対する推論そのものの一環として機能しているならば—、それぞれにふさわしい位置づけを得られるだろう。残念なことに、これらの方法が方法だけにとどまっておき、科学の真の進歩という観点からは、単なるその場しのぎにすぎず、権威付けの象徴として自分自身を正当化する肥大化した方法論になっていることがあまりに多い。

「研究に捧げた一生」なるものをわれわれは賞賛するけれども、あらゆる分野において、ほとんどの場合必要とされるのは、一生という長い時間よりも、むしろ2、3ヶ月や2、3週間の短い時間の分析的帰納的推論である。どんなに新しい領域でも、Roentgen がそうしたように、いかに速く大まかな調査を終えて分析的推論に取りかかることができるのか、ということを考えるべきである。われわれは、Pasteur がそうしたように、まず Strong Inference が適用できないかということを考えるべきである。このような考えは、百科事典的なものの考え方では理解できないだろうけれども。

精密な測定をしたり、小さな研究をすることは、

あたかも「科学という寺院にレンガを積み重ねる」がごとく敬虔に語られている。しかし、そのようなレンガのほとんどはレンガ工場の周りに転がっているにすぎない[科学には役立っていない]^[21]。定数表ならば、それにふさわしい位置づけと価値を持っているといえるが、同じたぐいのことを次から次へと行う研究は、つねに再評価を繰り返さなければ、思考の代償としての戯れや、研究室における知力の悲しむべき無駄遣いや、人を一生不具にしてしまう誤ったトレーニングなどになってしまうだろう。

昔のことわざ風にいえば、実験であれ理論であれ、一つの方法や一つの手段しかもたない人にはご用心。そのような人は、問題指向よりは、テクニック指向になりやすい。テクニック指向の人は、自由がきかない。問題指向の人は、少なくとも、最も重要なものに自由に手が届く。Strong Inference は、人を問題指向に向き直させるけれども、その人が今までもっていた方法を自発的に傍らへ押しやり、新しい方法を修得することを繰り返して求める。

他方、科学的効率を問題にする人は、誰でも、現代の物理学や化学における数学的表現のほとんどは、人を惑わせるものか、そうでなくても不適切なものであるという結論を下すだろう。

数学的定式化の大きな価値は、実験値が計算値と5桁まで合うとき、大部分の対立仮説がほとんど除外されることにある。(ただし、Bohr 理論と Schrödinger 理論は、ともにほとんど等しい Redberg 定数を予言していたが)。しかし、2桁ないし1桁しか一致しないときは、それは落とし穴になる危険性がある。親指の尺度[親指ではかようなおざっぱなやり方]の方がまだましである。定量的な一致よりも、定性的な除外の方が、仮定をテストする上においてより厳密であり、また科学的な解釈の上でより重要である。

これは、「王様は裸だ」といっているようなものである。今日、われわれは、科学は定量的でなければ科学たりえないと、伝道している[これは信仰である]。われわれは、因果関係を研究する代わりに相関関係を研究したり、系統立てて論じる代わりに数式を用いたりしている。測定値や数式は、思考を鋭敏化するように考えられているが、私の見解では、思考を因果関係から切り離して曖昧にすることの方が多し。測定値や数式は、本来論理的判断の補助的

手段として使われるべきなのに、科学的操作の目的と化す傾向がある。

多くの—おそらくはほとんどの—科学上の大きな争点は、物理学や化学においてさえも、定性的であり、定量的ではない。数式や測定値は、それが論拠を示す操作に関わっているとき、および、その時のみ役立つのである。しかし、論拠や反証を提示することがまず第一であり、その論拠や反証が完璧な説得力を持つならば、定量的な測定値がなくても、事実上最も強力であるといえる。

たとえてみれば、現象を論理の箱に閉じこめる場合と数式の箱に閉じこめる場合を比較してみよう。論理の箱は、目が粗いが丈夫にできている。数式の箱は、目が細かいが壊れやすい。数式の箱は、見た目に美しく問題点を包装するけれども、あらかじめ論理の箱に閉じこめておかなければ、その現象を保管することはできないだろう。

私の言わんとしていることは、科学と呼ばれている多くの領域で、われわれは自分たちの慣習的なやり方や、未整理のまま続けてきた研究のやり方に、とらわれがちであるということである。測定し、定義し、計算し、分析はするが、論理的棄却はしない。これは、われわれの精神を最も有効に使っているやり方とは言い難く、科学上の問題点を解き明かすにあたり、最も速い進展をもたらすやり方とも言い難い。

もちろん、科学者にとって、他を非科学的であると決めつけるのは、簡単であり、又、よくあることである。私が強調したいのは、ここで述べていることが必然的に正しいということではなく、われわれは、科学的効率を測りうる、ある確実な基準を長い間求めてきたということである。その基準とは、すなわち、科学の様々な領域でどれだけ効率的に成功を収めることができるかを測定できる基準—多くの人が納得する基準、その時代の科学の趨勢や流行に流されず、また、そういうものが生み出す既得権や空回り仕事に左右されないような基準である。私は大衆的な基準にも、自分自身の科学的能力を夢想的なレベルのものと比較するような私的な基準にも、同程度に関心がない。Strong Inference は、科学研究を最も効率的に進めるための秘訣を与えると同時に、最も効率的な科学はこうあるべきだ、といった基準になるものであると、私は信じている。

Strong Inference の手助けになるもの

この方法をどのように学び、どのように教育すれば良いのだろうか。それは、難しいことではない。最も重要なことは、この種のものの考え方は、まぐれでえられるものではなく、教育や学習の可能なシステムであるということ、つねに、心に留めておくことである。現代の分子生物学者は、その生ける証である。第二に必要なことは、この方法を、正確に、かつ手順通りに、かつ規則正しく実行することである。具体的には、毎日、半時間から1時間を分析的思考に割り、保存できるノートに論理樹や対立仮説や判定実験を書き込むことである。Fermi のノート法の価値、そのノート法が彼の同僚や学生に及ぼした影響、ならびにそのノート法を「誰が採用しても得るところがある」という証言の数々については、他において論じているので、興味のある方は参照されたい^[4]。

この方法を、特に自分の同僚や一彼らの学生に教育するには、かなりの慎重さを要する。Strong Inference 的なものの見方は、作業手法や科学的価値に対して非常に厳密に批判的なので、それぞれのケースを比較しようとする、独善的かつ攻撃的にも受けとれがちである。そこで、私がここでできるように、具体例を挙げたり、一般的な用語のみを用いて自己分析や自己啓発を促すことによって、Strong Inference を教育していくのがよいだろう。

ここで、第三者の批判を必要としない、厳しいが役に立つ自己診断法—Strong Inference の試金石—について述べよう。というのは、この自己診断法は、誰でも必要なときに会得し、利用することができるからである。これは、昔からなじみのある Bacon 流の「棄却」に相当するけれども、私はこれを「質問法」とよんでいる。この自己診断法は、自分自身のものの考え方だけでなく、他人のものの考え方にも適用できる。これは、何か科学上の解釈や理論が提唱されているのに接したときに、「ところで先生、いったいどんな実験をすれば、あなたの仮説の反証を挙げることができるのですか」と、また、何か科学的な実験に接したときに、「ところで先生、あなたの実験は、いったいどんな仮説の反証を挙げているのですか」と心中に問いかけることから成り立っている。

これは、まっすぐに核心に迫る方法である。この自己診断法を試みれば、誰でも、さらに検討を要する科学的ステップがあるのか、それともないのかという肝要な疑問に焦点を当て直すようになるだろう。

このような質問があからさまに提出されれば、大物学者と思われる人の多くは、怒りで顔を真っ赤にし、つばを飛ばさんかぎりに、それがあたかも彼に対して向けられた敵意のある証言であるかのように、質問者をつまみ出そうとするだろう。そのような人は、見かけほどでもないのである。というのは、自分自身で対立仮説を立てたり、自分自身で判定実験を考えたりすることに慣れていないことが明らかだからである。同時に、彼の属している科学領域の程度も疑わしいものである。このような質問が、彼や、彼の属している分野をも教育する効果があるということがわかっていないのである。

これに対し、分子生物学者や原子核物理学においては、この「質問」に対して、即座に仮説に対して反証を挙げうるテストを一つならず数個概説することで反応するだろう—のみならず、すでにそれらの実験に、発言者の大学院生の2、3人が取りかかっていることが明らかにされるだろう。

私は、政府機関がこの種の試金石を利用してもし良いのではないかとさえ考えている。すべての科学が平等であり、相互推薦方式以外の方法では、科学者の能力を正確に評価できないというのは正しい考えではない。注目すべき人、資金を提供すべき人は、「調査研究」や「さらに詳しい研究」をしようとする人ではなく、ノートを作っている人、対立仮説を立てて判定実験を考えている人、反証を挙げよという「質問」にどう解答したらよいかを心得ていて、すでにそれに取りかかっている人なのである。

われわれの前には、本当に難しい問題や、ハイレベルの情報からなる複雑な問題が残されている分野がいくつもある。例えば、社会的、国際的な問題はいうまでもなく、光合成の問題、細胞の構造の問題、神経系の分子レベルでの構造と形成の問題などが残されている。このような複雑な分野で最も処理速度の速い方法、つまり、最も効果的に頭を使う方法は、何が問題なのか、ほかにどんな可能性が考えられるのかということ、研究の各ステップにおいてはっきりと示し、それに対し反証を提出しうる判定実験

を挙げていくことである。この種の複雑系の問題は、解決されうるものであるならば、単位時間にレベルの高い情報を得るために、様々な可能性を挙げその一つ一つを除外していく操作を最大限の効率で進めていく人—ほんの少しでも思考に時間を割くことをいとわない人—によってのみ解決されるだろう。

あらゆるグループが、このようにして問題解決に取りかかったならば、ほとんどすべての分野で物事が科学的に解明されるスピードが何十倍にもなることだろう。そして、分子生物学で見られたような現象が何度も繰り返して現れることだろう。

References and Notes

1. J. R. Platt, *Science* **146**, 347 (1964) The author is professor of biophysics and physics at the University of Chicago, Chicago, Ill. This is the text of an address given before the Division of Physical Chemistry of the American Chemical Society in September 1963, under the title "The New Baconians."
2. A. M. Weinberg, *Minerva* 1963, 159 (winter 1963); *Phys. Today* **17**, 42 (1964).
3. G. Polya, *Mathematics and Plausible Reasoning* (Princeton Univ. Press, Princeton, J. J., 1954), vol. 1, *Induction and Analogy in Mathematics*; vol. 2, *Patterns of Plausible Inference*.
4. J. R. Platt, *The Excitement of Science* (Houghton Mifflin, Boston, 1962); see especially chapters 7 and 8.
5. J. D. Watson and F. H. C. Crick, *Nature* **171**, 737 (1953).
6. M. Meselson and F. Stahl, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S.* **44**, 671 (1958).
7. A. Rich, in *Biophysical Science: A Study Problem*, J. L. Oncley et al., Eds. (Wiley, New York, 1959), p. 191.
8. S. Benzer, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S.* **45**, 1607 (1959).
9. J. Lederberg, *Science* **129**, 1649 (1959).
10. P. F. Davison, D. Freifelder, B. W. Holloway, *J. Mol. Biol.* **8**, 1 (1964).
11. R. L. Garwin, L. M. Lederman, M. Weinrich, *Phys. Rev.* **105**, 1415 (1957).
12. W. A. H. Rushton, personal communication.
13. See G. F. Chew, M. Gell-Mann, A. H. Rosenfield, *Sci. Am.* **210**, 74 (Feb., 1964); *ibid.* **210**, 60 (Apr. 1964).
14. F. Bacon, *The New Organon and Related Writings* (Liberal Arts Press, New York, 1960), especially pp. 98, 112, 151, 156, 196.
15. K. R. Popper, *The Logic of Scientific Discovery* (Basic Books, New York, 1959), p. 41. A modified view is given by T. S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions* (Univ. of Chicago Press, Chicago, 1962), p. 146; it does not, I believe, invalidate any of these conclusions.
16. T. C. Chamberlin, *J. Geol.* **5**, 837 (1897). I am indebted to Professors Preston Cloud and Bryce Crawford, Jr., of the University of Minnesota for correspondence on this article and a classroom reprint of it.
17. M. Faraday, *Faraday's Diary 1820-62* (Bell, London, 1932-36).
18. H. L. Anderson and S. K. Allison, *Rev. Mod. Phys.* **27**, 273 (1955).
19. E. C. Watson [*Am. J. Phys.* **13**, 281 (1945)] gives an English translation of both of Roentgen's first papers on x-rays.
20. See G. W. Wheland, *Advanced Organic Chemistry* (Wiley, New York, 1949), chapter 4, for numerous such examples.
21. B. K. Forscher, *Science* **142**, 339 (1963).