

vol. 2004-4

Mech D & A News

Mechanical Design & Analysis Co.

December 2004



Renoir, Girl in a Lace Hat, 1881.

【特集】 現代のCAE

— 科学に従事するということ —

*FEM Consulting Services for Engineering Practice
Find Innovation in Tradition 2008-2019*

【1】 科学に従事するという事

科学は人間によってつくられるものです。これはもともと自明なことですが、しばしば忘れられがちなことでもあります⁽¹⁾。自然科学と人文科学、科学と工学、工学と技術といったもの間には多く断絶があります。しかし、もし科学が人間によってつくられるものであることをもう一度思い出すのであれば、この断絶を少しは和らげることにつながるのではないのでしょうか。

エンジニアになるためには、ごく若いころから基礎的な科目の熟達に多くの時間を費やさなければなりません。学生になったとしても既に数千数万の手によって繰り返された計算や実験を改めて反復し、標準的な科学の手順を身につけることが求められます。首尾よく科学者やエンジニアになったとしても、他の者によって既により良く解決された課題を自分で確かめることに時間を奪われることが少なくないでしょう。

自然科学は実験に基づいています。われわれは実験の意味するところについて熟慮を重ね、互いに討論することによって原則を見出し、得られた原則によって経験を整理することで一連の成果に到達してきました。人と人とが言葉を交わすことから科学が生まれます。

歴史を振り返ってみますと、科学でも芸術でも、活発な活動の時代と長い停滞の時代が交互に現れているのがわかります。現在のわれわれは、科学技術が良く実り、やや翳りが見え始めた時代に生きています。このような飽和の時代には、あらゆる課題が既に提起され、新たな研究の課題を見出すことが難しいと言われる。

しかし、科学的な課題が満ち溢れていた時代というのは、本来そんなにあるわけではありません。今までに蓄えられてきた方法論、その結果としていま許される技術、許される機会、許される時間の制約を考えれば、どのような時代にあっても、課題を選択できる余地はわずかしかないことがわかります。科学は単に個人の能力に依存するのと同時に、歴史あるいは伝統といったものに深くしばられています。

科学に限らずどのような分野においても、ものごとを深くつきつめて考えようとする、必ずこの歴史の中で成立した精神的な構造につきあたります。どんなに新しいことを考えようにも、まずは古い言葉によって書かれた概念からスタートしなければならないからです。

科学が発展してきた過程の中で、個人と個人の繋がりが果たしてきた役割についても思い出す必要があるでしょう。これは師弟関係に限らず、個人を支える友情であっても愛情であっても、あるいは同じ課題に進む人たちの間の敬意であってもかまいません。個人間の尊敬と扶助の思いは、長い歴史のなかでいずれは個々に埋没するものではありますが、それでもなお、科学の伝統を形成してゆくための最も大事な点とその善意のなかにあります。

実用に役立つということは、この善意の面から見ても、科学を推進する大きな力でした。望遠鏡は、星を見て占うといった動機の中から学問としての天文学を切り離しました。占星術よりも天文学の方が短期的には確度の良い成果をもたらすことができたからでしょう。もちろん、実用への応用性が権威や金銭と必要以上に結びつくこともあります。しかし、それは科学に限らず占星術の昔からあることであり、善意としての科学への努力があることを否定することはできません。

多くの科学者やエンジニアは、人間が正しく自然を理解したことを自分の目で確かめたいという願望を強くもっています。この願望は善意でもあり希望でもありますが、合理性を上回る力を持ち、われわれを突き動かします。単純な善意でもなく希望でもなく野心とも割り切れない情念に人間を引き寄せる力を科学は持っています。見えるはずのないウィルス顕微鏡の視野に追い、蹉跎の森に踏み込んでいった野口英世の心を知ることは、後世のわれわれにとって非常に難しいことであります。

【2】 知ること

われわれは、本能的な部分と知的な部分の両方によって生かされています。このうち知的な部分は、後天的に獲得した経験によってもたらされていることに注意しなければなりません。古代の魂が呼び覚まされるというようなことが皆無ではないにせよ、通常、知的な経験は肉体的な遺伝によって継承されることはないからです。言葉は必ず他人から学ばなければなりません。

偉大な音楽家が名前を残すのは何故でしょう。彼らの作品は、後続の演奏家たちによって注意深く再構成され、新たな解釈が加えられ、広く聴衆の理解が得られるように維持されてきました。作品の偉大さは、このような数限りない

伝承の反復のなかで徐々にその姿を現してきた結果です。決して唐突に現れたわけではありません。歴史はひとかけらの事件ではなく、相当の程度まで数の問題であるからです。

これは科学でも同じではないでしょうか。過去の世紀以来、例えば質量をいかに測定し定義するか、あるいは平面はいかに計測されまた機械的に工作できるか、といった細々とした手順が確立されてきました。この結果、運動、引力、熱といった、本来それらが生まれた時代の含みをもった言葉に後世の新しい血が通い、明白な物理的意味をもつようになってきたのです。科学の歴史は発見の歴史であると同時に、概念の成長の歴史を表しています。

例えば量子力学であれば1920年代中盤、有限要素法であれば1960年代後半から1970年代初めの数年間に、爆発的な進歩がありました。古典力学の完成と周辺技術の発達を背景にして、有能な科学者があふれ出たように見える時期です。科学に限らず歴史的な事蹟はすべて過去の龐大な蓄積を背景にしているために、時を得ると各地でほぼ同時に急速に、場合によっては誰ひとり欲していない方向に、進むことに注意すべきであろうと思います。

Science (サイエンス) という言葉は、ラテン語の Scire (知る) から出ています。しかし、知るという行為にはどうしても暗さがつきまとうことを理解しておくことも必要であるように思われます。創世記⁽²⁾によれば、蛇は「善悪を知ることができるようになる」と女を誘惑しました。善悪、明暗、陰陽という概念は、両極端を掲げることによってその内側の全ての世界を表そうとしています。また「知る」という行為はこれも極限において「実行できる」という可能性を示しています。

日常の視野においては軽いものは重いものよりゆっくり落下するにもかかわらず、ガリレオは「真空」という実現不能な極限の状況を示唆し、その中では全ての物体は同じ速さで落下すると主張しました。科学に限らず、知るという行為が一定の成果をあげるためには、疑い試すという危うい過程を経ることがどうしても必要です。

ただし知るという行為そのものが暗さを意味するわけではありません。知るという行為に派生しがちなこと、例えば猜疑や慢心がわれわれを暗さの淵に導きます。あるいは知ることをないがしろにしたもの、例えば正確な知識に支えられていない議論や主張は、より深刻にわれわれの健全さを損ないます。知るという行為は非常に狭い門をたたくことに他なりません。

神の存在についての問題は、かなり以前から学問的な課題でなくなり、われわれが何をなすべきかという問題になっています⁽³⁾。全く同様に自然法則に対する理解は、確固とした世界観の骨格を表すものであるという初期の概念から脱却し、われわれの自然への問い方の経験、あるいは確かに事実に基づいてはいるが広く認められている幾つかの判断、というような幅の広い相対的な概念に変わってきました。

古典的な科学の方法論においては、経験を理想化して他の現象から切り離し、これらの現象を自然法則と呼ばれる数学的な構造と対比するという手順が主張されました。しかし例えば近代の量子論の分野では、計量そのものに完全な厳密性を与えることができないことを不確定性原理は教えています。日頃われわれが親しむ実験や解析でさえ、(不確定性原理を持ち出すまでもなく)それが蓋然的な近似値にしかすぎないことは、現代では疑いようもありません。すなわち、「なぜか」という問いに対して完全な因果律をもって答えることを断念せざるを得ない点において、われわれは古典的な世界と明らかに異なった立場に立っています。

しかしそれでもなお実験を多数回繰り返すことによって統計的な分布を導き出すことができ、さらにこの種の実験の系列を繰り返すことにより客観的な記述に到達させるという現代の方法論が、古典的な方法論の自然な拡張であるというハイゼンベルクの主張⁽⁴⁾には耳を傾ける必要があるように思います。暗闇の箱の底に残った希望のカードを頼りとして、われわれは糸をのぼり続けなければならないからです。

【3】哲学にいたる前に

哲学の深みに不用意に落ちてしまう前に、もう少し目先の課題について考えてみる必要があるでしょう。われわれは機械に接し、日々の対策を求められる立場にあります。おそらく医学における臨床と同じような役割を課せられています。このような立場が本来の科学とほど遠い事情を含んでいることは、いまさら言うまでもありません。それにもかかわらず、臨床の医療や機械設計が科学の一派であるという認識を漠然と支えてきたのは、先に述べたように善意とか信仰と呼ぶべきものです。

学問は、知的な好奇心のおもむくがままに突き進む性質を持っています。それが時として危険な性質であることをわれわれは身にしみて知っていますが、一方ではその特質が丹精あるいは精進という現実的な努力となり、われわれを哲学的な麻痺の状態に停滞させることがありませんでした。Ingenious（巧み）がエンジニアリングの語源でもあります。

この種の巧緻性を平たく言えば、問題を小部分に分解して考えるということです。デカルト（1596-1650）の「方法序説」⁽⁵⁾に与えられる4つの原則 - 洞察・分析・総合・枚举 - の中で、この小部分に分ける操作（分析）は最も広く知られた方法です。言うまでもなく、FEMのメッシュ分割はこの方法論を形にしたものです。全体を構成する微分方程式を直接解くかわりに、メッシュの接続節点でのみ釣り合い方程式を満足させることで、平均的な全体像の解明を可能としてきました。

知ることは、見聞きすることから始まります。しかし、われわれの身体的な能力は外界の状況をそのまま受け入れるだけの容量を、もともと持ってはいません。例えば視覚や聴覚の分解能が、適度に制限されていることで濾過の能力が与えられていることを考えれば、小部分に分割する行為は人間の容量不足に対する救済でもあります。小部分に分解する、すなわち濾過する操作は、われわれに知るための現実的な手段を与えてきました。

誤解を招く言い方ですが、事実が事実を物語ることはありません。形、色、温度、剛性、粘度といった物質の特性は、われわれの知覚が物質に語りかける、すなわち観測することによって答えてくるものであるからです。すなわち、われわれと物質の相互作用の結果としてこれらの特性を知ることができます。

従って好むと好まざるとにかかわらず、われわれは少しの重要な事実をもって新規の発見を主張するのと同時に、それ以外の重要でない事実は状況の中に捨てる、という二重の仕事を負うことになります。この取捨の選択が完全に人間的な操作であるがゆえに、科学的な業績に対してでさえ、完全な客観性を問うことは非常に難しいのです。歴史的な評価が定着するためには、関係した個人の姿、平たく言えば利害関係が摩滅するのを待つ必要があります。

たとえ一人の偉業あるいは狂気が歴史を動かすことがあったにせよ、それを単純に受け入れることは意味がありません。わずか一人の事蹟によって動いてしまうほど周囲の情勢が熟していたと考えるのが順当であるからです。重力はいずれ誰かが発見したに違いありませんし、全く同様に、世界大戦の引き金を落とす指は数多にあったと考えられます。科学も歴史も、それ以外にはどうしようもなかった些末な事実の蓄積によって、動かしがたい現実を構成しています。

ひるがえって、個人の倫理性と歴史上の事蹟の関連を問うことが無意味であるとするれば、倫理は社会に求めるものではなく、個人の中で完結している必要があります。いかなる時代に生きる場合でも、われわれは受け取るのも自由、拒否するのも自由な入場券を差し出されているわけではないからです⁽⁶⁾。

【4】事実の構成と伝承

科学に従事しようとする人は、実験や解析によって手にした事実が、自然あるいは世界といった大きな枠組みの中にいかに調和して組み入れられるかを問い続けることでしょう。この大きな枠組みは、単にわれわれが探求するだけではなく、そこに現実に住むという観点から、起伏に富み、思いがけず変動する対象であることを知っています。

客観的と主観的という概念は、この調和の究明への出発点となりえる二つの極限の真理を表していますが、どちらか一方で片をつけようとするのは、きわめて乱暴な解釈となります。例えば無機的な塩は、そのまま放置されれば単なる「バラバラな技術的諸問題」の一つにしかすぎません。しかし化学的な作用を借りて植物の根に吸い上げられる機会に恵まれれば、有機的な生命の循環の一部を構成することになります。

一つの客観的な事実の発見は、雑誌に投稿され、他者によって追試され、やがて教科書の脚注に、最後にはその本文に掲載されるといった手続きによって一般化されてゆきます。こうした主観をまじえた手続きは研究者の視野を広げ、さらに新たな客観的発見を促すことにつながることでしょう。科学が客観的事実を物語るというのは一つの真理と考えられますが、物語るのは人の作用であり、客観の対極である主観もまた真理であるという理解に通じます。

われわれとは別系統の種であるネアンデルタール人は、石器を残したものの咽頭の構造が言語を操るには不十分であったために、ほぼ数万年にわたって石器の形態を変えることができなかったと言われていました。考古学的には多くの議論があると思われませんが、つまるところ、火のまわりで食事をしながら昔話を語るとか、道具の作り方を教えるといった心の作用が、文明のもっとも重要な基礎をなすのではないのでしょうか⁽⁷⁾。

われわれヒトもこの4万年のあいだ肉体的な形質を変えていません。しかしわれわれがネアンデルタール人と大きく異なるのは、言語および文字という後天的な獲得形質によって知的能力の産物を次世代に継承してきたことです。これを広義の遺伝と解釈します。一方、狭義の遺伝、すなわち肉体的な形質の伝承という面からは、例えば20年にわたる成長といったヒトの特徴が与えられ、知的な能力の発現の可能性をより強固なものにしています。

これら広義と狭義の遺伝の働きによって、われわれは食物連鎖の頂点に立ち、文明を継承してきました。しかし哺乳類に代表される高等な生物は、一部の特殊な能力を高めて現在の環境に対する順応力を向上させてきた経緯をもっています。反面、その特殊性に束縛される結果、それ以上の進化が期待できないのと同時に、その種が欠損したときの代替がありません。いま人間における科学や芸術の発達を獲得形質の伝承と考えるのであれば、その進化の方向性に対して、われわれは各個人の中で完結した倫理観によって対処すべき責任を負っています。

E.H. カーは、次のように言っています。「私たちが用いる道德上の掟は、小切手のようなものです。表面の印刷された部分には自由、平等、正義というような抽象的な言葉が書かれています。しかし私たちがどのくらいの自由を誰に与えようというのか、誰を平等な仲間と認めるのか、どの程度までなのか、それを裏面に自ら記入しないうちは小切手は価値がないのです。抽象的な超歴史的な規準を打ち樹てて、それで歴史的行為を審くことはできないということがあります。」⁽⁶⁾

【5】単位とことばの役割

機械の話に戻しましょう。ものが変形するという現象を知ることは（おそらくかなり）難しいことです。日常的には、変形というかわりに「ものに力を与える」といった表現が使われます。何mm変形したかという結果をものさしで計るよりは、どのくらいの力で押したかといった感覚の方が身近だからです。

言うまでもなく、力制御なのか変位制御なのか、集中荷重か分布荷重か、保存力か非保存力か・・・、「ものに力を与える」という一言の裏には膨大な世界が広がっています。一般の人々ならまだしも、専門域の異なるエンジニアから「ものに力を与える」と話しかけられて当惑することは、決して稀ではないはずです。

ものさしで何mmかを計る、天秤で何kgかを量るといったことからわかるように、単位系は分析の方法と結果を定める道具です。寸法や重さのように形状に結びつきやすい単位は理解も容易であるので、早い時期から整備されてきたことでしょう。時間や音のようにわかりにくいものであっても、打ったりリズムの数を記録するとか、音符にして可視化することで単位系の中に組み込まれていったと考えられます。

大脳新皮質の一部に損傷を受けた患者は、イメージは思い出せても、そのもとになる単語を思い出すことができなくなると言われています。マリリン・モンローの写真を見せると、映画女優であること、ケネディとの噂、最後に自殺したこと、しかしその自殺には疑義があることまで思い出しますが、マリリン・モンローという名前を思い出すことができなくなります⁽⁸⁾。

この事実は、細分化されたイメージとそれを統合して表現する言葉が、脳内の別々の場所に格納されることを教えてくれます。単位系がものごとを小部分に分割する働きをもつ道具であるとすれば、言葉はそれを再びつなぎ合わせる働きをもちます。切る道具とつなぐ道具を別々の知性の場所に置くことで、われわれは非常に強いフィードバック・ループを思考経路のなかに獲得したと考えられます。ものごとを抽象化して象徴として扱う能力、外界の変化に知的に順応する能力といった人間固有の力は、この言葉を介したフィードバック・ループの実現によるものです。

例えば自然法則を表す数式から単位を消して無次元化すれば相似則が得られます。相似則によって統合された概念には新たな用語が与えられ、さらに一般化が進みます。この一連の過程は、視覚から得られた形状が象形文字となり、それが変形・分解されて部首という単位になり、部首が組み合わされて全く別の意味をもつ漢字に発展してきた過程と同じです。象形文字にとどまった文明がいずれも息絶えてきた現実を見れば、抽象化が果たす役割の大きさを理解することができます。

機械工学便覧などを見ると、その索引にある用語数は9,000～12,000語です^{(9),(10)}。法律、医学、哲学、宗教の諸分野に著された辞書群を見ても、10,000強という語彙数は一般性のある数字であるので、この程度の語彙を操ることが学問の一分野に粗い網をかけることに相当すると考えられます。一日一語を理解したとしても30年を必要とします。

また少し専門的に、例えば座屈という現象に注目してティモシェンコの教科書⁽¹¹⁾を見ると、約1,000の用語が挙げられています。すなわち、一万の知識を背景にして千を語るぐらいが、平均的な人間としての限界ではないかと考えられます。

言語は、分解したものだけでなく分解できそうもないものまで含めて再統合できるだけの力を持っていることに注意しなければなりません。この力によって、情感のような心の作用まで他者と共有することができます。これは人間に恵まれた大きな能力と言ってよいでしょう。しかし発達しすぎた言語世界は他の言語世界と相容れることが非常に難しくなります。

他分野の研究者と話が通じない、製造部門と話が通じない、家庭での理解も得られないという事態が往々にして起こります。現代では、科学の標準的な手順を学び用語法を獲得するために、われわれは若い時代の十年を単位とする長い時間を費やさなければなりません。その間に家庭を営み、社会的な生活を並行しなければならないことを考えると、科学を職業とすることは誰もができません。

【6】FEMについて

1950年代にFEMが現れたとき、これが重用されたのは、抽象化とはむしろ逆の方向、すなわち形状をそのまま再現すること（具象化）が高度に実現できる道具であったからです。小部分に分割することでFEMが抽象化に貢献した部分は少なくありません。しかしその価値を決めたのは逆の方向性でした。

科学では単純化と複雑化、あるいは統一化と多様化という反対方向を向く二つの流れが同時に進行し、その矛盾に見える過程が科学的な知識の累積にとって必須の条件であるとポアンカレは指摘しています⁽⁶⁾。近年のCADの跳梁を嘆き、古典力学の洗練性を忘れないことは非常に大事なことでありますが、抽象化の退潮はそもそもFEMが自らまいった種でもあります。デカルトを力でねじふせるかのような時代を注意深く生きなければなりません。

力で問題を解決しようとする訴えにわれわれが最終的にどうしても加担できないのは、何が精神的で何が力づくであるかを識別する問題がすでに純粋に精神的な問題であるからです。放たれた矢はさらに強い力でしか方向を修正することはできません。しかし放たれる以前に、矢の方向は弓をひく者によってのみ定められます。そして弓をひくもの精神的な実在なしには、そもそも矢が飛ぶことはありません⁽¹²⁾。

科学は、西欧的な宗教観と方法論という二つの側面から構成されています。このうち前者については多くを語るだけの背景をわれわれは持ちません。しかし英国の聖職者であるMartin C. D'Arcy (1888-1976)の以下のような言葉には真摯でありたいと思います。「歴史上の問題に出会うたびに、それは神の御業であったと答えるようなことを研究者は行ってはならない。現世の事件を完全に処理し尽くすまでは、それより広範な問題を持ち出してはならない。」⁽⁶⁾

参考文献

- (1) W. ハイゼンベルク, 山崎和夫訳, 「部分と全体」, pp.vii-x, みすず書房, 1974.
- (2) 例えば, 共同訳聖書実行委員会, 「聖書新共同訳 - 旧約聖書続編つき」, p. 旧4, 日本聖書協会, 1987.
- (3) W. ハイゼンベルク, 山崎和夫訳, 「真理の秩序」, 筑摩叢書, p.212, 筑摩書房, 1989.
- (4) W. ハイゼンベルク, 山崎和夫訳, 「科学における伝統」, pp.1-14, みすず書房, 1978.
- (5) デカルト, 谷川多佳子訳, 「方法序説」, 岩波文庫, 岩波書店, 1997.
- (6) E.H. カー, 清水幾太郎訳, 「歴史とは何か」, 岩波新書, p.107, p.118, p.119, p.132, 岩波書店, 1962.
- (7) 赤澤威編, 「ネアンデルタール人の正体」, p.308 (内田伸子), 朝日新聞社, 2005.
- (8) 柳澤桂子, 「ことばと記憶」, 図書, 672, 岩波書店, 2005.
- (9) 日本機械学会, 「機械工学便覧」, 1987.
- (10) 文部省, 「学術用語集・機械工学編」, 日本機械学会・丸善, 1985.
- (11) S.P. ティモシェンコ, J.M. ギア, 長谷川節訳, 「弾性安定の理論」, 上・下, 1974.
- (12) W. ハイゼンベルク, 尾崎辰之助訳, 「現代物理学の自然像」, p.46, みすず書房, 1965.

表紙: Pierre Auguste Renoir, Luncheon of the Boating Party, 1881, The Phillips Collection, Washington.