

産業競争力の源泉である数学および数学生について¹

ダイキン工業株式会社 テクノロジー・イノベーションセンター

デジタルエンジニアリンググループ

高根沢 悟

1. 日本のものづくりの強みである擦り合わせ型とその逆の予測型

日本のものづくりは擦り合わせ技術が強みとしてきた。擦り合わせ技術とは、現象論に基づいた具体的な修正行為のことである。つまり、実際にものをつくり動かし、状態を観察しながら部品特性や相互特性を逐次改質していく行為、またそのプロセスやそれを支える知識全体のことである。また同様に、日本の製造業では現場、現物、現実を見て問題解決を図ろうとする三現主義が特に重視されてきた。三現主義は大変科学的なものである。なぜならば科学は、観測された事実に基づいて法則性を確かめようとする経験的実証主義がその根幹であるからである。

擦り合わせ技術はこの三現主義に立脚したものであり、三現主義に擦り合わせ技術が組み合わさることにより強力な製品開発力を産む。平たく言えば、現実をまずしっかりみて悪いところがあれば修正すると良い製品が出来るということである。現実の問題は大変複雑であり、一見ささいな違いに見えても最終的な性能に大きな影響を与える場合もあるし、同時に考慮しなければならない因子も多いのが通常である。具体的にまずものを作り、現実をありのままに見て修正を繰り返し磨き上げることで初めて細部の質を上げることが出来るのである。日本刀の職人を彷彿とさせるようなこのやり方は、多くの日本の製造業に受け入れられて世界に類を見ない高品質の製品を産み出すことに成功してきたのである。

ところで、擦り合わせはまず現実のものがなければ始まらないのであり、ではそもそもまずどんなものを作ればよいのだろうか。実はそれが分からないところが擦り合わせ型の最大の弱点である。大まかに言って欧米では、まずどんなものを作ればよいのかをものを作る前に仮想的に考える。欧米のものづくりは日本のものづくりとは逆で、原理に基づいて公理論的に何を作ればよいかを考えるのである。動力飛行機の発明者であるライト兄弟はまず設計図を描くところから始めた、という話は児童の啓発話として有名であるが、欧米のものづくりを象徴している。欧米ではどんなものを作ればどんな結果に至るのか予測する行為が中心であり、日本の擦り合わせ型とは真逆の予測型と言ってもよいだろう。欧米のそのような原理に基づくものづくりは極めて

¹ 本稿は「数学・数理学専攻若手研究者のための異分野・異業種研究交流会 2024」で行われた基調講演に基づく。

数学的であるように思う。予測型の強みは、原理的に影響の強い因子を制御する点あり、現状を大きく変える柔軟性があり、また合理的なため効率がよい点にある。反面、対象を抽象化・理想化して考えるので複雑な現実が考慮されず細部の詰めが甘く、品質不足となりやすい。それが日本のメーカーになかなか受け入れられない理由でもあると思う。

2. 擦り合わせ型・予測型それぞれの特徴と予測型の重要性

擦り合わせ型は一度勝ちパターンを作れば、現実の複雑な問題を漸次改善し強みを伸ばし続けながらしばらく優位に立つことが出来る。しかしながら、一度作った勝ちパターンを原理面から見直すことがなかなか出来ないため、負け始めたらとことん負けるスパイラルに入ってしまう。なぜなら現象論に基づいたものであるため、まず何か具体物が必要なのであり、それが理に叶わないものであれば、細部を擦り合わせたところで根本的に理に叶ったものに修正される可能性は低いからである。

一方の予測型は、原理を変更し勝ちパターンを変えるのが得意である。一度負けても外的な要因等で条件が変われば、すぐに原理変更し勝ちパターンを変えられるので環境変化に強いという特徴がある。たいへん汎用抽象的であり、また公理論に基づいたものである。

抽象的というのは擦り合わせ型の文化では悪い意味で使われることも多い。曖昧とほぼ同義だと思われているからである。実際単に曖昧なことも多く、抽象的であることと、曖昧であることの区別はほとんどついておらず質が悪い。抽象数学は抽象的だが曖昧ではない。むしろ抽象的であるがゆえに本質が無駄なく明快に記述される。数学に深く取り組んだことのある人ならば、抽象化による明確化というものがいかなるものかよくわかると思う。企業活動では抽象的な原理追求は直接利益を産まないのであるが、原理の問い直しなく勝ち続けることは出来ないのである。

擦り合わせに基づく日本のものづくりの強みは概ね 2000 年頃まで遺憾なく発揮されたと思うが、その後は弱みが目立ち始め、欧米の原理に基づき発想する強みが大いに発揮されてきたと感じる。背景として、デジタル技術の革新、エネルギー需要の拡大と地球環境に対する社会的関心の変化、先進国における格差の拡大と労働市場の変化、中国の台頭などがある。これらが予測型に有利な状況をもたらしたと感じている。外的な要因が変化したため、原理を問い直すことで勝ちパターンを変更することが可能となったためである。デジタルの特性を踏まえたとき、何を大きく変更できるのか原理的に考えて初めて勝ちパターンを変更できる。デジタルならばソフトウェア更新により製品購入後でも性能を向上させることが出来るようになる。またデジタルで計算機パワーを使えば、人間ならば一生かかっても終わらない量の情報操作を殆ど一瞬と思えるようなスピードで実行することが可能となる。デジタルをどれだけビジ

ネスの中核部分に埋め込めるかが競争力に大きく影響するのである。従来製品やサービスを擦り合わせているだけではこのような発想は産まれないのである。また擦り合わせ型は、大きな投資、ハード資産が必要になるため原理変更したくても小回りが利かない。また労働市場がハードからソフトに移行する中では維持発展が難しくなっていく。地球環境やエネルギー源に対して社会の関心は高く、単純な市場原理で購買行動が決まらなくなっている。予測型の富める者がますます富むのに対して、擦り合わせ型は今、勝ちパターンを見出すのに必死である。擦り合わせ型の人々は、いまだに予測型を軽視しているように見える。企業を取り巻く環境が急激に変化する状況においては、原理を自在に書き換えるルールメイカーが有利なのである。このことが日本でもっと多くの人に理解されて欲しい。

3. 原理発明をもたらす基礎と数学の評価

原理発明をもたらす基礎研究を欧米が行い、日本はそれを応用して擦り合わせて高品質なものをつくり利益をあげる、かつてはこれが批判された時代があった。実際これは非常に強力な地球規模のスキームだったと感じるが、最終製品を日本が作り利益をあげる構造だったために日本に有利だと批判されたのである。その後欧米は擦り合わせ型の強みを分析、真摯に学び今では予測型と擦り合わせ型を組み合わせたハイブリッドとなっているようである。例えばシリコンバレーでは、スタンフォード大学をはじめとした大学を中心に原理を作り、それを取り巻くスタートアップ企業が現実をしっかりと見て具体化していくのである。その予測型と擦り合わせ型の組み合わせが、今日のシリコンバレーの繁栄を支えているという見方がある（文献[1]）。一方の日本は、本来強みだった擦り合わせ技術はどこ吹く風でデータサイエンティスト志望者が増えているが、原理変更の担い手にはなっていないようである。データサイエンティストの武器である AI やビッグデータは、今のところ原理を問い直してはくれない。AI の実現を夢見て、その基礎を作った数学者アラン・チューリングはこの状況を見て満足するであろうか。原理の問い直しは今のところ人間の役割である。しかし原理を問い直し書き換える筈の基礎的な学問や研究は衰退するばかりであり、企業も基礎的な研究は無くしていく方向である。このような状況で、数学生徒の社会進出や数学の産業応用は今後、日本の産業競争力の命運を分けるほどに重要になっていくと筆者は考えている。なぜなら、原理の問い直しに適した訓練を受けているのが数学生徒であり、数学は原理を純粹に考える学問だからである。

そのような中、最も危惧していることは、その重要さが認識されず数学の知識が何の役に立つのか？という卑近な実用性で数学が評価されてしまうことである。ほとんどの場合、数学研究の成果や、数学を学んだ学生が企業で速戦的に役に立つわけではない。ところが、産業界が抱えている課題は、目に見えない構造的な問題や、対処的

な解決しか図れていない難問が根にある場合が多く、抽象化して原理を追求しない限り本当の問題解決が難しい。必要な方法論はまさに数学であり、頭の使い方も数学に類似した面があると筆者は感じる。産業界の本質的な課題は数学的課題に置き換えられることも多いのではないかと感じることもある。数学の訓練を受けた者は、原理を考え抜く特別な意欲と能力を持っている。産業界をとりまく環境が目まぐるしく変化する中で、大小さまざまなレベルで原理からの問い直しが必要となっており、数学や数学生を速戦性で評価すべきではない。

4. 欧米では数学者は物事を根本から考える人

筆者が以前働いていたフランスメーカーでは、管理職の多くが数学の学位を持っており、明らかに数学に対する価値の置き方が日本と異なる。日本ではメーカーの管理職に数学の学位を持った人物が着任することは稀なことである。話のついでに他にも異なる点を紹介しておく。フランスでは技術者として入社するとまず、半年から1年かけて座学教育が行われる。理論教育がほとんどで、実践教育が少し付帯しているという感じである。多くのベテラン技術者が教育作りに携わっており、研究者であると同時に教育者である。技術者は業務の中で見出した原理や法則を教育に反映する役割がある。日本メーカーでは座学教育は嫌われる。日本では OJT (On the Job Training) による実践教育が中心で、座学教育はあまり多くない。反面、具体的にどうすればよいか？にとことん先輩が応えてくれる。現場で実際のものを見て触りながら対処方法を学ぶことが出来る。またフランスでは新しい原理を産みだす技術者、自律的マネジメントを行う技術者が最も尊敬される存在である。技術者の仕事は考えることだと思われているからである。日本では、経験を積んだ技術者、商品を産みだした技術者が最も尊敬される存在である。技術者は実践的な専門知識をもった人だと考えられているからである。概してフランスでは専門性の高い技術者が育ち易く、日本では広くなんでも出来る技術者が育ちやすい。フランスでは原理追求志向が高いことは間違いなく、数学は日本と比べ物にならないほど重要だと思われている。それぞれ一長一短なのであるが、しかし日本メーカーがこのまま数学の重要性に気付かないまままでよいと筆者は思わない。

ところで日本の企業はトップマネジメント層が殆ど文系出身者で占められていることが知られている。技術者の多くが、文系出身者はコミュニケーション能力が高いからだと思われているかもしれない。筆者はそのようには考えておらず、原理追求、抽象思考を日本では文系出身者が担っているためだと考えている。文系出身者が上に立って、原理から問い直しをしているからこそ勝ち続ける日本の企業もあるのだと考えている。最近、技術の世界では少しだけ文理融合が流行りであるが、原理からの問い直しが必要な状況を表しているかのようである。それはそれでよいことではあ

る。しかしながら、日本において文系に期待されているこの問い直しの役割を、欧米では数学出身者が担っているように思える。米国の人々が数学者のことをどのような存在だと思っているかを物語る例がある。映画ジュラシック・パークの中で、イアン・マルコムという数学者が登場する。テキサス出身の数学者でカオス理論が専門という設定なのであるが、それはさておき、このイアン・マルコムが「あんたたち科学者は、出来るかどうかということに夢中になるあまり、すべきかどうかを考えようとしなかった」というセリフを語るシーンがある。科学者たちの本質的な間違いを数学者が指摘するシーンとなっているのである。米国では、数学者というのは物事を根本から考える人、本質的なことを考える人、と思われているのではないだろうか。日本ではこの重要な役がなぜ数学者なのか、ほとんどの人が理解できないのではないだろうか。また、余談であるが、イアン・マルコムがあんたたち科学者という言い方をしているところを見ると、米国では数学者は科学者だとみられていないようにも見える。日本では理系であることの象徴は数学を学ぶことであり、その理系の代表的な職業が科学者なのに。米国では数学者は科学者と異なるイメージを持たれているということである。これはとても面白いことである。実は筆者も数学が理系の学問だという感じがあまりせず、文系に分類されても特別な違和感はない。

5. 数学と他分野の関わり

さてここまでは公理的に原理追求する姿勢が産業界にとって重要であるという話をしてきた。ここからは姿勢の話ではなく、数学が他分野や産業とかかわることでのような影響があるかという話をしよう。

数学者 R. クーランは 1924 年に古典的名著『数理物理学の方法』クーラン＝ヒルベルトの第 1 版の序文で以下のように述べている。

— 解析学者の多くが、彼等の学問が物理学やその他の部門と一体のものであるという意識を失い、一方物理学者の方でも、数学者の問題や方法のみならず、その研究領域や用語に対する理解さえもなくなりつつある。この傾向は疑いもなく科学全般に対する脅威である。科学の発展の流れは次第に分岐し、漏出し、遂には乾上がってしまう危険にさらされている。このような運命を避けるためには、統一的な観点の下に、種々雑多な科学的事実の内的な関連を明らかにすることによって、離ればなれになったものを再び一つにすることに我々の力を向けなければならない。—

このような問題意識の下で名著は産まれたのである。技術者の多くが有限要素法を頻繁に使うのであるが、これがクーランの手により偏微分方程式の数値解法として産みだされたものであることは彼らに知る由もない。今では技術者は有限要素法をすっかり工学的道具だと思い込んでいて、メッシュを切る、などと凡そ数学とは思えない言葉が飛び交っている。幾何学的変分問題を研究していた筆者にとっては、クーランは

神のような存在であり、その様子をみながら数学の影響力の大きさを感ずると同時に、寂しさも同時に感じている。

別の例をもういくつか挙げよう。微分幾何学の権威である窪田忠彦を中心に、矢野健太郎らは、1943年ころに歯車研究の権威である成瀬政男と歯車幾何学研究に参画した旨が記録に残っている（文献[3], [4]）。その歯車理論と技術が現在のトヨタへ大きく貢献したということである。また窪田忠彦はれっきとした微分幾何学者であるが、歯車の幾何学という工学書も書いている。

また、数学生や数学者にとっては常微分方程式や位相幾何で有名なポントリヤーギンであるが、実は技術者にとっては振動論、自動制御論で有名な人物である。物理学や工学の中から数学的な問題を汲み取りながら、学問間の有機的な関係を見出して成果を挙げたようである。

ニュートン、ガウス、オイラー等の大数学者も、物理からみれば物理学者であろう。技術者にとって欠かすことの出来ない分析アルゴリズムである FFT (Fast Fourier Transform, 高速フーリエ変換) は、実はガウスがアルゴリズムを発見し天体観測の軌道の補間に利用していたということを最近知って驚いている。

筆者はダイキン工業株式会社にてシミュレーション技術開発に従事している。弊社は空調グローバル No.1 となり空調のことを一番知っている企業と言ってもよいと思うが、それでも空調機の血液と呼ばれる冷媒の挙動が予測できず設計で非常に苦労している。我々は、冷媒の気液界面挙動が数学的に記述出来ないこと、それを支える数学が未確立であることが根本的な課題であるとみて、現在、東京大学数理科学研究科の数学者達と数学研究を行っている。

数学は単純な応用を超えて、工学をはじめとした異分野と有機的な関係を築くことによって、高い汎用性と爆発的な問題解決力を産む力があるのである。

6. 数学・数理学および数学生に期待すること

今我々産業界は、モノ売りからサービスを売る時代への大変革期を迎え、新たなビジネスモデルの創出に苦しみ悶えている。デジタル革命を代表とする大きな変化によって、勝ちパターンも大きく変わったことは既に述べた通りである。いつまでも日本の得意な擦り合わせに固執しているだけでは競争力を失いかねない。擦り合わせの強みを残しながら、真摯に予測型を取り入れていくべきである。繰り返しになるが、シリコンバレーでは元々欧米の強かった予測型に、日本の強みである擦り合わせ型を取り入れて、大成功をおさめた。GAFAはそのようにして新しいビジネスモデルを育み世界を席卷するプラットフォーマーとなったのである。

また、2010年代に産業界で叫ばれ始めたフロントローディング、そして今現在も頻繁に啓蒙推進されているV字プロセスに沿った開発やモデルベース開発などは、筆

者から見れば予測型を取り入れるべきだということを言っているも同然である。そもそも何を作るべきなのか？従来の原理に則っていて価値があるのか？別の原理でものを作るべきではないのか？そのような問い直しが必要だということに多くの人が気づいているのである。

しかしながら、擦り合わせ文化で育った人々が予測型の思考を持つことは容易ではない。講演や講習会などが数えきれないほど開催されているが、多くの技術者達が頭を悩ませ、多くのものづくり企業が擦り合わせから抜け出せず苦勞している。どこまで原理追求が必要なのか、どこまでの抽象思考をすればよいのか、どこまで基礎に溯ればいいのか、感覚を掴み切れないのか文理融合までが叫ばれるようになっている。

このような状況において筆者は、抽象思考の訓練を積み、本質を考え、原理を書き換える数学生が産業界に進出すべき時だと考えている。数学の基礎訓練を積んだ者は、この苦しい現状を突破する力を持っている。また弊社の事例でも述べたように、企業の根本課題が数学に依存している場合も案外多いのではないかと感じている。しかし技術者はそれに気づけない。抽象思考の訓練を積んだ数学出身者であればきっと気づくであろうに。原理を考えるのは欧米で、日本はそれに磨きをかける、そのやり方では今後勝てないだろう。もし数学生が多くのものでづくり企業で活躍する日がくれば、弱みを克服し産業競争力は飛躍的に高まるに違いない。

また欧米では、純粋数学者と応用数学者の割合が半々くらいだそうである。そもそも、純粋数学と応用数学の垣根もないのかもしれない。ガウス、クーラン、ポントリャーギンら大数学者達が自由に学問間を行き来して大きな成果を残したように、数学、諸科学とそして技術が垣根を払い、数学の抽象性を武器に相互に全体が大きく発展することを願っている。

文献

- [1] 文系と理系はなぜ分かれたのか、隠岐さや香，星海社新書
- [2] 数理物理学の方法1，クーラン＝ヒルベルト，丸山滋弥訳，東京図書
- [3] 数理解析研究所講究録 1257 巻 2002 年 260-274，木村洋
- [4] 東北大学萩友会 ひと語録 成瀬政男プロフィール
- [5] 微分幾何学，窪田忠彦，佐々木重夫，岩波全書
- [6] 歯車の幾何学，窪田忠彦，現代工学者
- [7] 常微分方程式，ポントリャーギン，千葉克裕訳，共立出版
- [8] The Evolution of Applied Harmonic Analysis, Elena Prestini, Springer
- [9] ものづくり白書 2015，経済産業省