



第4回 公式を「使える知識」に変える

—モデル・アナロジー・多重表現による概念形成の授業づくり—



東京学芸大学
右近 修治

1. はじめに—公式は知っているのに、なぜ使えないのか

生徒は公式を覚えている。しかし、少し状況が変わると使えない。問題文に書かれた条件を図に表せない。グラフを描くことはできても、そこから物理的意味を読み取ることが難しい。より多くの演習問題に接し、経験を積むことで、公式の使い方に慣れていく面は確かにある。しかしそれだけでは、何に着目し、何を単純化し、どのような表現に置き換えて考えればよいのかは、生徒個々の経験に依存し、授業の中で十分に共有されないままになりやすい。物理を学ぶとは、自然をそのまま写し取るのではなく、対象をモデル化し、言葉・図・グラフ・数式・実験事実を相互に結びつけながら考える方法を学ぶことである。本稿では、こうした「考え方」を暗黙の経験知としてではなく、授業の中で明示的にガイドするための手立てとして、モデル、アナロジー⁽¹⁾、多重表現⁽¹⁾、そしてモデリング・インストラクション⁽²⁾の考え方を紹介する。モデリング・インストラクションは、米国を中心に発展してきた物理授業の方法であり、日本ではまだ広く知られていないと言いがたいが、物理をモデル化の過程として学ぶという点で、本稿の主題と深く関わっている。

2. 多重表現—図・グラフ・式・言葉を結びつける

物理では、文章、図、グラフ、表、数式など、さまざまな表現が用いられる。授業中の説明や板書、教科書の図版、実験結果の表やグラフ、そして公式も、いずれも物理概念を表すための表現である。数式はしばしば計算の道具として扱われるが、物理においては、物理概念を凝縮して表す重要な表現でもある。たとえば $F=ma$ は、単に F 、 m 、 a という三つの記号を結びつけ

た式ではない。物体が受ける合力、物体の質量、運動状態の変化としての加速度の関係を表している。物理の数式は、数学の式と同じ形式でも、そこに物理量の意味や物理法則が埋め込まれている点で異なる。したがって、数式を示すだけでなく、それがどのような図、言葉、現象と対応しているのかを明示する必要がある。

このような観点から重要になるのが、多重表現である。多重表現とは、図を多く使うこと、グラフを添えること、カラーの図版を増やすことだけを意味しない。むしろ、複数の表現をどのように組み合わせ、それぞれにどのような役割を担わせ、生徒にどの表現から何を読み取らせるかを考える授業設計の問題である。Ainsworth は、この点を DeFT という枠組みで整理している。DeFT とは、Design, Functions, Tasks の略であり、どの表現をどの順序で提示するか、それぞれの表現が何を補い、どの解釈を絞るのか、さらに学習者にどのような表現間の対応づけを求めるのか、という三つの観点から多重表現を考えるものである。

このことを、図1の状況図と自由物体図 (free body diagram; FBD) を例に考えたい。図1(a) は机の上に置かれた本、図1(b) はばねでつるされた本、図1(c) は摩擦のない斜面上で、斜面に沿った力によって静止している物体である。それぞれの図は、物体がどのような状況に置かれているのかがわかるように描かれている。机、ばね、斜面、力を加える手など、周囲の物体も含めて描かれているので、生徒はまず「どのような場面か」を把握できる。

しかし、力のつり合いを考える段階では、状況図に含まれる情報のすべてが必要なわけではない。むしろ、何に着目すればよいのかが見えていない生徒にとっては、机の形、ばねの長さ、物体の大きさ、接触面、力

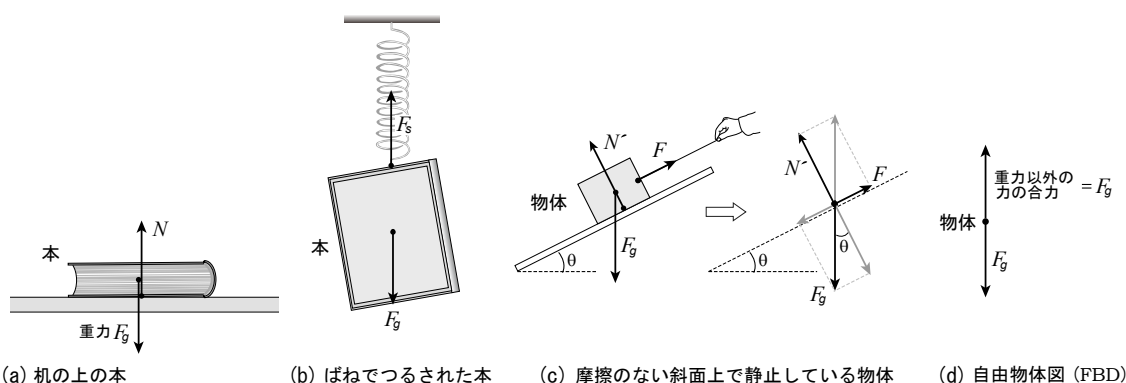


図 1

の作用点などが余剰情報となり、認知的負荷を高めてしまうことがある。そこで FBD では、着目する物体以外の周囲の物体をいったん捨象し、その物体が外部から受ける力だけを矢印で表す。FBD では物体を箱や円で描いてもよいが、本稿では点として描くことにする。点で描けば、力の作用点が物体のどこにあるか、物体が回転するか、力のモーメントを考えなくてよいか、といった問題をこの段階では切り離すことができる。いま扱っているのは剛体の力学ではなく、質点としての物体に働く力のつり合いだからである。

ここで重要なのは、FBD が単なる簡略図ではないということである。FBD は、現実の状況から力学的に必要な情報だけを取り出したモデル表現である。図 1(a) では、本は机から上向きの力を受け、下向きに重力を受ける。図 1(b) では、本はばねから上向きの力を受け、下向きに重力を受ける。図 1(c) では、物体は斜面から受ける垂直抗力と斜面方向の力を受け、それらの合力が重力とつり合う。状況図としては三つともまったく異なる。しかし、FBD として整理すると、いずれも、重力と、重力以外の力の合力がつり合うという同じ構造として読むことができる。

これは、FBD を描くことによって初めて見えてくる重要な気づきである。机の上の本、ばねにつるされた本、斜面上で静止する物体は、一見すると別々の現象である。しかし FBD によって余剰情報を取り除くと、それらはすべて「力のつり合い」という一つの原理から理解できることがわかる。物理の概念形成において大切なのは、まさにこのような発見である。個別の状況の一つひとつ別々に処理するのではなく、異なる状況の背後に同じ構造を見いだす。FBD は、そのための

表現なのである。

したがって授業では、教師が最初から「これらは同じである」と説明してしまうのではなく、生徒自身がその共通性に気づけるようにしたい。たとえば、まず図 1(a), (b), (c) を提示し、それぞれの物体が受ける力を個別に考えさせる。次に、周囲の物体を消して、着目する物体だけを点で表す。さらに、その点に働く力だけを矢印で描かせる。最後に、三つの FBD を並べて、「何が同じか」「何が違うか」を問う。ここで生徒が「どの場合も、重力と、それに対抗する外力の合力がつり合っている」と発見できれば、力のつり合いは単なる公式ではなく、複数の現象を結びつけるモデルとして理解され始める。

この過程は、Ainsworth の DeFT の考え方に対応している。状況図、FBD、言葉、数式をどの順序で提示するかは Design の問題である。状況図が場面の具体性を担い、FBD が力学的関係を抽出し、言葉がその意味を説明し、数式が $\sum \vec{F} = \vec{0}$ のように関係を簡潔に表すことは Functions の問題である。そして、生徒が状況図から着目物体を選び、周囲の物体を捨象し、物体が受ける力を取り出し、複数の FBD に共通する構造を発見することは Tasks の問題である。多重表現を用いた授業とは、複数の表現を並べるのではなく、表現を移動しながら物理的意味を構成する過程を、生徒に経験させることなのである。

3. アナロジーはモデル形成の足場である

物理には、直接見ることでできない対象が多い。電流、電圧、電場、エネルギー、原子、波の重ね合わせなどは、日常経験だけから直ちに理解できるものでは

ない。そのため授業では、生徒がすでに知っている事柄を手がかりにして、新しい概念に近づくことが多い。電気回路を水の流れで考える、音や光の波を水面波で考える、気体を多数の小球の運動として考える、といった説明がその例である。既知の事柄を通して未知の概念を理解しようとする働きがアナロジーであり、これは単なる説明技法ではなく、人が新しい概念を構成するときに働く基本的な認知作用でもある。

したがって、アナロジーを授業から排除することは現実的ではない。教師が使わなくても、生徒は自分なりのアナロジーで考える。問題は、アナロジーを使うか使わないかではなく、どのように使い、どこで止め、どのように物理モデルへつなぐかである。アナロジーは、親しみやすい手がかりになる一方で、対応づけがうまくいかない部分をそのまま延長すれば、概念理解の妨げにもなる。いわば「諸刃の剣」である。

電気回路の水流モデルを例に考えよう。水流モデルでは、電圧差を水压差、電流を単位時間あたりの水の流れ、抵抗を管の流れにくさに対応させる。このモデルが有効に働くのは、「水压差・流れにくさ・水流量」の関係が、「電位差・抵抗・電流」の関係と対応していることを生徒が読み取れる場合である。重要なのは、「水压＝電圧」「水流＝電流」という単語の対応ではなく、関係の構造が対応していることである。

しかし、日常的な水の流れのイメージをそのまま電流に重ねると、誤った推論を招くこともある。たとえば、川の流れでは下流ほど勢いが弱くなるように見えることから、電流も回路を進むにつれて減り、豆電球を通過した後では小さくなる、と考えてしまうかもしれない。また、電池をポンプにたとえると、電池が一定量の電流を押し出しているように受け取られやすい。しかし実際には、通常の電池はおおまかには一定の電位差を保つ装置であり、電流は回路全体の抵抗によって決まる。

このように、一つのアナロジーですべてを説明することはできない。Gentner らの研究⁽³⁾では、電池の直列・並列については水流モデルを用いた学生の成績がよく、抵抗の直列・並列については群移動モデルを用いた学生の成績がよかったことが報告されている。アナロジーには、それぞれ照らし出しやすい側面と、見えにくくしてしまう側面がある。

ここで重要なのは、アナロジーを「わかりやすい導

入」としてだけ使わないことである。「電流は水の流れのようなものです」と説明して終われば、生徒はそのイメージを物理的実体のように受け取ってしまうかもしれない。授業で扱うべきなのは、むしろ対応づけそのものである。何が何に対応するのか。どの関係はうまく対応するのか。どこから対応が崩れるのか。最後に、アナロジーではなく、物理モデルとして何を残すべきなのか。ここまで扱ってはじめて、アナロジーは概念形成の足場になる。

この点で参考になるのが、Glynn の TWA などを踏まえたアナロジー指導の考え方である⁽⁴⁾。TWA は、ターゲット概念とアナロジーとの対応を確認し、対応が崩れる箇所を明示したうえで、最後に物理概念としてまとめ直すことを重視する。

アナロジー指導は、モデルを「与える」活動ではなく、モデルを「吟味する」活動である。モデルは自然そのものではなく、自然をある目的に応じて単純化し、特定の側面を取り出した表現である。アナロジーもまた、有効範囲と限界をもつ表現である。アナロジーを便利な導入の道具として消費するのではなく、モデルの適用範囲と限界を考える場として活用する。そのとき、アナロジーは、公式に入る前の「たとえ話」ではなく、生徒が物理モデルを形成するための重要な足場となる。

4. モデルをつくり、試し、修正する——モデリング・インストラクションの考え方

モデリング・インストラクション (Modeling Instruction : MI) は、Hestenes らによるモデリング理論を背景に、米国を中心に発展してきた物理授業の方法である。ここでは、物理を公式や定義の集まりとしてではなく、現象を説明し、予測し、制御するための「モデル」を構築・検証・適用する営みとして捉える。全米モデリング教師協会 (AMTA)⁽⁵⁾ も、授業内容を多数の個別トピックではなく、少数の基本モデルを中心に構成することを重視している。つまり MI は、公式を効率よく教える方法ではなく、生徒が物理学者のように、現象からモデルをつくり、試し、必要に応じて修正する過程を経験する授業設計である。

第2節で見た FBD の活動も、MI の観点から見れば、単なる作図練習ではない。生徒は状況図から FBD へ表現を変換し、異なる現象の背後に共通する力学構造

を見いだす。式は、現象から切り離された公式ではなく、構成されたモデルを数式で表したものとなる。

もちろん、生徒がすべてを自力で発見するわけではない。教師は、どの現象を比較させるか、どの量に着目させるか、どの表現へ移らせるかを意図的に設計する必要がある。モデルが観察事実や実験結果とうまく合わない場合には、その不一致を手がかりとして、モデルの適用範囲や限界を考えさせる。したがってMIは、単なる自由探究ではなく、教師が適切に足場をかけるガイドされた探究である。

このようにMIは、公式を出発点として与えるのではなく、モデルの構築・検証・修正の過程を通して、公式の意味を理解させる授業設計である。

5. まとめ

公式を覚え、典型問題を解けるようになることは、物理学学習において重要である。しかし、公式が「使える知識」になるためには、生徒が、状況から何に着目し、何を単純化し、どの量や関係を取り出すのかを考えられるようになる必要がある。物理を理解するとは、現象をそのまま受け取るのではなく、対象をモデルとして捉え直し、図・グラフ・言葉・数式・実験結果の表現間を往還しながら、その意味を吟味することである。多重表現を相互に結びつけて使う表現協調、アナロジー、モデリング・インストラクションは、その過程を授業の中で具体化するための手立てである。

このように考えると、表現協調は、公式理解の補助的な工夫にとどまらない。状況図からFBDへ、実験結果からグラフへ、言葉による説明から数式へと表現を移すことは、現象をどのようなモデルとして捉えるかを検討する活動である。また、アナロジーの対応関係と限界を吟味することは、モデルの有効範囲を考える活動でもある。さらに、モデリング・インストラクションは、こうした表現の移動とモデルの吟味を、現象からモデルをつくり、試し、修正する学習過程として組織する。したがって、表現協調、アナロジー、モデリング・インストラクションは、いずれも探究活動と深く結びついている。

ただし、ここでいう探究活動は、単に実験を多く取

り入れる授業形態でも、生徒に自由に調べさせる活動でもない。デューイの探究論⁶⁾に即して言えば、探究とは、何が問題なのかが定まらない状況を、問いや根拠を手がかりに、より明確な状況へと整える過程である。物理では、この不確定さは、公式を知らないことよりも、どのモデルで現象を捉えればよいかが定まらないこととして現れる。生徒が「なぜこの式を使うのか」「この図は何を捨象しているのか」「実験結果は予想とどこでずれるのか」と問うとき、日常的・直感的な理解は、物理量の関係や因果構造を吟味する科学的探究へと組み替えられていく。

したがって、探究活動の意義は、既習事項を応用させることだけにあるのではない。生徒が不確定な状況に出会い、問題を設定し、仮説的にモデルをつくり、表現を変換しながら推論し、実験や観察によって確かめ、必要に応じてモデルを修正するところにある。この過程を通して、公式は、教師から与えられた計算手順ではなく、どのような状況をどのように単純化し、どの量の関係を取り出したものなのかを表すモデルの表現として理解される。公式を「使える知識」に変えるとは、公式を記憶すべき結果として覚えさせるのではなく、公式を、現象をモデル化し、表現を往還し、根拠を確かめながら使うための思考の道具として獲得させることなのである。

参考文献

1. 右近修治:「第2章 授業方法 (1)―物理を伝える表現―」, 今井章人・新田英雄・安田淳一郎編, 『物理教育の理論と実践』, オーム社 (2025) 44-101.
2. 笠調平:「第7章 物理教育研究に基づく、講義が中心ではない授業」, 上掲書 263-287.
3. Gentner D., Gentner D.R., "Mental Models of Electricity", in Gentner D. & Stevens A.L. eds., *Mental Models*, Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 1983 (邦訳・淵一博監訳『メンタル・モデルと知識表現』, 共立出版, 1986年)
4. Richard K. Coll, Allan G. Harrison eds., *Using Analogies in Middle and Secondary Science Classrooms: The FAR Guide - An Interesting Way to Teach With Analogies*, Corwin, 2007.
5. 全米モデリング教師協会 (AMTA) <https://www.modelinginstruction.org/> (2026年7月閲覧)
6. Roberto Gronda, *Dewey's Philosophy of Science*, Springer, 2020.