HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	動力学教授法の課題 : 主客転倒状況における再考
Author(s)	大野, 栄三
Citation	教授学の探究, 14, 49-71
Issue Date	1997-03-25
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/13600
Type	bulletin (article)
File Information	14_p49-71.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

動力学教授法の課題

——主客転倒状況における再考——

大野栄三
（北海道大学教育学部）

1 はじめに

初等，中等教育において理科として位置付けられている教科の教育内容は何かという問題は，明治19年の一連の学校令の中で初めて「理科」という言葉が登場して以来議論されてきたことである。ここで言う教育内容についての議論とは，理科が近代科学を教える科目か，それともホピ・インディアンの世界観を教える科目かというレヴェルの議論ではなく，19世紀的近代科学の成果とそれに続く発展を教育内容にするという了解の上で続けられてきた議論を指しているのである。我が国の理科教育史を見みれば，「理科」という名称を付した教科が設けられたことによって，科学の方法論——科学的と称される思考方法やそれに係わるある種の態度——を，科学自体の論理的大系乃至その実体にこだわることなく教育できるという幻想が醸成されてきたことは否めない事実であろう。[1] この幻想の中で唱えられた「科学的な考え方」とは，科学のみでは規定できないメタ的対象であり，論理的な思考力，判断力，直感力，想像力，問題への主体的対応等々の科学と関連があるとみなせる諸力を包括的に表現する曖昧なものであった。

「科学的」という形容詞を付されたこのような思考方法や態度は，科学における個々の具体的行為をすべて説明可能であるとする誤った印象を我々に抱かせるものであった。例えば，科学的思考方法の育成を主眼とした理科教育を実現するためには，問題解決に重点を置いた教育方法学的研究が必要であると主張された。[2] しかし，問題解決のスキルに目が向きすぎた理科教育が，受験競争の激化と相俟って，物理法則を単なる約束事として捉えたり，「物理がわかる」ということを「問題を解く」ことと誤解するような状況[3]を生み出してきたことは論を俟たないであろう。現実の科学者の多様な研究スタイル[4]は，それらを「科学的な考え方」として一括してしまうことに無理が在ることを示している。教育内容を構成するために科学的思考方法や態度における多様性を捨象してしまうことは，仮説を作り，結論を演繹し，それを実験により検証するというあまりにも常識的で空虚な普遍性——小学生には新鮮かもしれないが——を与えるだけか，悪くすれば自由な発想，創造性を狭い枠組の中へ押し込めてしまうだけであろう。[5]

本来，「科学的な考え方」が意味する思考方法や態度とは，具体的な自然科学的概念，法則を徐々にねばり強く理解していく過程で培われていくものである。[6] 平和の確立や民主主義の徹底等を現代日本の教育が目指す目的として据えたときに，柴田義松は「このような目的がそのまま授業の目的や課題となるわけではない。またこの両者をせっかちに直結しようとするのはまちがいである[7]」と述べているが，科学教育においても同様の事が言えるであろう。つまり「科学的な考え方」の育成が教育目標であるからといって，科学的思考方法や態度を直接的に教育

するわけにはいかないのである。例えば，実験方法について論じることは可能としても，実験の原動力となる発想，アイデア，構想等を獲得するための確固とした方法論を生徒へ明示的に教えることは不可能であろう。

「科学的な考え方」の育成とは客観的認識形成における主体の側のあり方についての考察を要する課題である。主体の形成という教育目標は理科に限ったものではなく，およそ客観的認識形成を目指す教科に共通した目標である[8]。各教科では，それぞれの教科が教育内容として持っている客観的概念に依存して，主体の異なる側面が具体的に形成されていくことになる。結局，科学教育における主体の側のあり方とは，自然科学的概念と法則を学習することによって形成された客観的認識総体と主体の間の不断の相互作用によって培われていくものなのである。何らかのやり方で抽出され明文化された主体の側のあり方 —— 主体のあり方をそこまで明確に表現できるかどうかは疑問であるが —— を直接的に教えることによって主体形成を進めていくことはできないのである。したがって，科学教育の教育内容を構成する場合，近代科学の成果 —— 自然科学的概念，法則として確立された人類の知的遺産 —— が「主」であり，「科学的な考え方」は「客」であると言い切ってしまうべきなのである。本稿で言う「主」としての「近代科学の成果」とは，単なる知識，情報ではなく，人類の知的，精神的営みの成果自体が持つ機能や特質に重点を置いた理解を意味している。この「主」としての「近代科学の成果」を教授する過程に「客」である「科学的な考え方」が埋め込まれていなければならない。

確かに，現実の科学研究の場では，研究を行う主体のあり方が自身の研究行為に影響を与えていると同時に，その研究成果が主体の側のあり方になにがしかの働きかけをしているという「研究をする主体」と「その研究成果」がわかちがたく結びついている状況にあることは否定できない。そこでは鶏が先か卵が先かの如き論争に決着を付けようとする試みは無意味であろう。一方，科学教育の場を考えてみると，「科学的考え方」を現実の課題に適用することのできる主体を培うためには，まず主体形成の土台を構成する基礎的な科学の成果 —— これは生徒ではない主体によって過去に為された成果である —— を教える必要があるのではないだろうか。

このことは主体のあり方などはどうでも良いと言っているのではない。ここで議論しようとしているのは「近代科学の成果」か「主体形成」かという二者択一ではなく，それらの関係である。「理科」という名称によって生起した「主客」転倒の状況，言い換えれば，「科学的な考え方」として一括りにされる思考力の育成を直接的に目指すことが重視される反面，自然科学的概念，法則の学習は知識伝達的にこなせるものであるとして相対化され，軽んじられるという状況を問題としたいのである[9]。

近代科学の成果が，絶対的真理であるとまでは断言できないが，適切な真理の近似であると言うことさえできない社会的産物であるという思潮が 1960 年頃から始まった。このような思潮の中で，系統学習に対する批判からスタートした教授学的研究の焦点は，「教師は何(What)を如何（How）に教えるか」から「生徒は何（What）を如何（How）に学ぶのか」へ，そして最終的に「生徒は如何（How）に学ぶのか」へ移っていった。科学教育における「何（What）を」は，それまでの具体的な「近代科学の成果」から「科学的な考え方」と称せられる包容力はあるが甚だ曖昧なものへと変貌し，「如何（How）に」の中へ解消していった。これが現在の科学教育における主客転倒状況の特徴である。このような主客転倒状況では，確固たる知的土台を欠いた主体しか形成されないことは容易に想像できるであろう。浮遊する主体は，相対的に土台を選択できるわけであり，ある程度の内部的整合性を持っているような知的営みの所産

—— 例えば，呪術的思考形態[10] —— へと容易に漂着してしまうのである。そのような教育は，15年戦争当時いとも容易く科学的思想を捨て去ることのできた知識人が多数輩出[11]したように，その場の状況に応じて主体形成の土台を安直に取り替える人間を育てるだけであろう。

本稿の目的は，「理科」という名称から生まれてくる幻想的，恣意的モメントを排し，近代科学の等身大の姿 —— それを学ぶ主体の側のあり方をも射程に入れた上で —— を教える教科として理科を位置づけ，上述の主客転倒状況を元に戻すことにある。以上の目的を念頭に置き，本稿では物理教育における動力学教授法[12]の課題を今日的主客転倒状況の中で再検討していく。以下では議論の焦点を「何（What）を」，つまり教育内容の「主」たる存在である「近代科学の成果」に絞っていくことにする。人間社会の制度が理念を参照しながら規定されて行くように，「如何（How）に」は「何（What）を」を参照することで具体化されていくからである。科学教育における「何（What）を」の基本部分は，やはり19世紀的近代科学と言えるであろう。主体形成のための確固とした土台となるべき自然科学的概念，法則を教えるためには，19世紀的近代科学の持つ特質を近代科学以前の自然観と20世紀的近代科学の両方から照射される光の下で把握しておかなければならない。以下では，まずガリレオ・ガリレイ以後の近代科学の展開において中心的存在であった物理学を考察の対象とし，現代物理学理論の重要な特質である「精確さ」と「普遍性」に注目する。そして，これらの特質を醸成したガリレオ以後の自然哲学から，その数学化の流れ，自然現象の原因追究に対する姿勢，さらに自然科学的概念と数学的概念の相互関係について考察する。最後に，以上の考察から明らかとなる動力学理論が持つ機能や性格と関連づけながら物理教育における動力学教授法の課題を議論していく。[13]

2　近代科学理論の特質——「精確さ」と「普遍性」——

理論物理学者ロジャー・ペンローズは基礎的な物理理論を「最高」，「有用」，「暫定」という3つのカテゴリーに整理している。[14]彼は「最高」カテゴリーに分類される理論の条件を，世界のあらゆる現象に例外なく当てはまるわけではないが，その適用範囲と精確さが驚異的であることとしている。つまり，物理理論の評価基準として2つの近代科学の特質を用いているのである。第一は理論が高精度であるかどうかという「精確さ」という特質と，第二は理論が広範囲の現象に適用できるかどうかという「普遍性」という特質である。ペンロースは「最高」カテゴリーに分類される物理理論として，ユークリッド幾何学，ガリレオによって導入されニュートンによって発展させられた動力学（静力学を含む），マクスウェルの電磁気学，特殊及び一般相対性理論，量子力学，量子電磁気学を挙げている。

ペンローズは各理論が「最高」カテゴリーに入る理由を以下の様に述べている。彼はユークリッド幾何学を現実には湾曲している物理空間を記述する物理理論とみなしており，その誤差が1メートルの範囲内で水素原子1個の直径に足りないという驚異的な精度を持っていることを述べている。動力学は月や惑星の運動に適用された場合，その誤差が1000万分の1以下であり，マクスウェルの電磁気学は量子力学と結びついて，素粒子レベルから銀河系の尺度に及ぶ広範囲の世界に精確に適用できる。特殊相対性理論は光速度に迫る速度で運動する物体の現象を驚異的な精度で記述できる。一般相対性理論は，中性子星が他の中性子星の廻りを公転運動している場合，重力波の放出により，公転周期が徐々に減少していくことを予測している。“Hulse-Taylor binary pulser PSR 1913+16” という一対の中性子星の観測から一般相対性

理論の精度が評価されており，その結果は10^{14}分の1という驚くべき値――地球上の時計による測定精度の限界値――であった。[15] 量子力学は化学反応，原子スペクトル，超伝導，レーザー発振等の広範囲の現象に対して実験と精確に一致している。量子電磁気学は驚くべき精確さを備えており，電子の磁気モーメントの値として，理論値は1.00115965246，実験値は1.001159652193であり，ありうべき誤差は最後の2桁においてほぼ10であることを紹介している。実験精度の目覚ましい進歩，理論の精密化，コンピュータの高性能化による数値計算の進展などから，他の物理量に関しても数ppm以上の精度で量子電磁気学の理論と実験結果を比較できるようになっている。[16] 量子電磁気学はそれまでの最高理論と比較して優美さや整合性に欠けているが，このような高精度の結果を与えることから「最高」カテゴリーに分類されるのである。

プトレマイオスの惑星運動論は「有用」カテゴリーに分類されている。プトレマイオスの理論は非常に精巧，複雑な円運動の組み合わせを用いてかなりの精度で惑星運動を記述し，アリストテレスの宇宙体系を数学的に表現することに成功していた。この理論は，その予測能力のおかげで約20世紀という長い間，「一定の歴史的重要性をもつ組織的な役割」を果たしたのである。ペンローズはそのことを評価してプトレマイオスの理論を「有用」とみなしているが，精確さという評価基準に照らして「最高」に入れることはできないと述べている。観測技術が進歩し，より高い精度の予測能力が必要となるにつれて理論の複雑性は増大し精確な予測が不可能となったからである。

科学哲学者も，実在論者であるか反実在論者であるかを問わず，「精確さ」と「普遍性」という特質が科学理論の評価基準となることは概ね認めるであろう。例えば，トーマス・クーンは論文「客観性，価値判断，理論選択」の中で，優れた科学理論を評価する五つの基準について述べている。[17] その第一が，「理論は精確でなければならない。すなわち，理論が扱うその領域内において，理論から導出される帰結は既存の実験や観察の結果と一致しなければならない。」という理論の「精確さ」の基準である。その第三が，「理論は幅広い適用範囲をもつものでなければならない。特に理論の帰結は，その理論ににによって説明しようと最初にもくろまれていた特定の観察や法則や下位理論をはるかに越えたものでなければならない。」という「普遍性」の基準である。クーンはこれら五つの評価基準は，おおかたの科学哲学者が認めるだろう正統的見解であるとしている。[18]

科学理論の評価基準として使用されている「精確さ」と「普遍性」という特質は，近代科学をそれ以前の世界観，学問観と分かつ重要な思想的特徴――自然哲学の数学化――と密接に関連していることを次に見ていこう。

3　近代科学の歴史的発展に見る原因追求の放棄または保留

佐々木力は，一連の科学思想史的考察を基にして，コペルニクスからニュートンにかけての科学革命の結果として，それまでの「アリストテレス―トマス主義的に理論化された直観的・日常的世界観」が崩壊し，「確実性」と「有用性」という新しい学問理念が形成されたことを論じている。[19] これら新たな学問理念とともに始まった科学革命は，古典力学，電磁気学，熱力学に代表される19世紀的近代科学としてひとつの完成を見たと言えるであろう。この学問理念である「確実性」がより具体的な特質として顕現したのが，近代科学理論の持つ「精確さ」と「普遍性」である。現代においてもそれら特質の追求を，科学的行為の重要な目標の一つとして挙

げることができる。[20]

近代科学理論の特質である「精確さ」と「普遍性」は，自然現象の記述に数学が使用されたことから生まれた。ガリレオ以前，人々の世界観を支配していたのはアリストテレスの自然学であった。アリストテレスが展開した運動論における議論の中心はあくまで質的なものであった。物体の運動状態 —— 物体の速度，加速度，運動の軌道等 —— を詳しく分析することではなく，運動の原因を追求することが彼の自然哲学の目的であった。アリストテレスの自然学では，土，水，空気，火の四元素が存在し，それら元素の本性によって物体の行う運動の性質が説明される。例えば，土の元素はその本性に従った運動が宇宙の中心 —— これは地球の中心でもある —— に向かうものであるため，土の元素を多量に含んでいる地上の物質は，地球の中心に向かって落下するとされた。つまり，アリストテレスの自然学は目的論的理論であり，物体の運動は物体自身の本性によって決定されたのである。物体はその内在的目的を達成するために運動を行うと理解され，運動自体を量的に記述することは単にその過程を見るだけであり，物体の内的目的とは関連がなく本質的概念ではないとされた。つまり運動とは，ドングリが成長しクヌギの木になり，やがてその木が実をなし最後には朽ち果てるという過程と同質のものとみなされたのである。その後，聖トマス・アクィナスの手によってアリストテレスの学問はキリスト教的世界観を構成するための強固な基本思想，つまり中世における正統的見解となった。

しかしながら，16 世紀後半から 17 世紀にかけて，測定可能，計算可能な自然現象だけに注目し，問題の数学的定式化を遂行する数々の実践が成功を納めた。ケプラーは宇宙が示す純粋な数学的調和を求めてティコ・プラーエの遺した膨大な観測データを調べ，楕円軌道の導入により惑星運動の三法則を定式化した。これは完全な円軌道の組み合わせという束縛から抜け出すことのできなかったコペルニクス天体論の複雑さを低減し，その精度を向上させた。ガリレオは振り子の等時性，落体の運動法則，投射体の軌道等を数学的に定式化した。この頃から，アリストテレス主義に対する本格的批判と近代科学がスタートした。

ガリレオにとって数学は極めて重要な武器であった。彼は『偽金鑑識官』の中で自然現象を理解するための数学の必要性について次のように述べている。

> 「哲学は，眼のまえにたえず開かれているこの最も巨大な書（すなわち，宇宙）の中に書かれているのです。しかし，まずその言語を理解し，そこに書かれている文字を解読することを学ばないかぎり，理解できません。その書は数学の言語で書かれており，その文字は三角形，円その他の幾何学的図形であって，これらの手段がなければ，人間の力では，その言葉を理解できないのです。それなしには，暗い迷宮をさまようだけなのです。[21]」

速さの概念を例にとると，瞬間の速度と平均速度とが混乱しており，等速運動と加速度運動の区別も不明確であった中世の状況の中から，ガリレオは時間，距離と同様に速度も連続的に変化すると考え，落下距離，速度，時間の間の関係を数学的に定式化した。つまり，ガリレオは自然哲学の数学化を展開し数学的自然学と呼べるもの，つまり今日の物理学の礎石を築いたのである。[22] しかしながら，ガリレオの偉大さはこのような自然哲学の数学化を押し進めただけではなかった。

ガリレオの業績が落体の運動法則の数学的定式化を与えるものであり，原因をあたえるものではなかったことはこれまでにしばしば指摘されている。スティルマン・ドレイクはこのようなガリレオの知的営みは，科学というものを自然現象の原因追求を唯一の目的とする学問から，

「原因追究を不必要として放棄」して自然現象を数学的に表現する学問へと変容させるものであったと述べている[23]。ガリレオは晩年の著作「新科学対話」において，サルヴィヤチに次のように語らせている。

「今ここで自然運動の加速度の原因が何であるかに就て研究することは適當でないと思ひます。これに就ては色々な学者が種々の意見を提出して居り，…（ここで種々の説が述べられる――大野）…。これら凡ての觀念は，その他のものと共に検討を加へねばならないでせうが，これによって得るところは少いでせう。しかし現在，吾々の著者の求めているところは，その原因は何であれ，加速運動のいくつかの本性を研究し，説明するに在るのです[24]」

このような原因追究の放棄または保留は，ケプラー，ガリレオの成果を総合化したニュートンにも見られることである。ニュートンはガリレオの運動理論とケプラーの天体論を総合化して古典力学の基礎を築き，ガリレオ以後の自然哲学の数学化という流れを決定的に押し進めた[25]。彼の古典力学は18世紀以後に解析力学として発展し，洗練された数理物理学としてペンローズの「最高」カテゴリーに属する物理理論となった。ニュートンの『プリンシピア』を見れば，そこに記されている知的営みが万有引力の物理的原因を追求することではなく，万有引力によって引き起こされる動力学的現象の数学的記述，説明であることがわかる。しかしながら，ニュートンは，万有引力の原因を究明することが自身の手によってできなかったことを充分自覚していたようであり，『プリンシピア』の最後に次の有名な一節を記して読者にその考察を委ねている。

「これまで，われわれは天空とわれわれの［地球上の］海の諸現象を重力によって説明してきたのであるが，この力の原因をまだ指定してはいなかった。たしかにその力はある原因から生ずるものでなければならない。…しかし，私はいままでに重力のこれらの諸性質の原因を，じっさいの諸現象から発見することはできなかった。そして私は仮説をつくらない。というのは，じっさいの現象から導き出されないものはすべて仮説とよばれるべきものだからである。…そしてわれわれにとっては，重力がじっさいに存在し，…あるゆる運動を説明するのに大いに役立つならば，それで十分である[26]」

ニュートンは万有引力の原因を科学的――彼の言葉では実験哲学的――に見出すことができなかったことを率直に認めているのである。万有引力の原因が説明されていないことやそれが遠隔力であることを理由に多くの人々，特に近接作用に基づいた渦動宇宙論を展開したデカルトの影響下にある人々から反対意見が出された。ホイヘンスとその弟子であり微積分学に多大の貢献をしたライプニッツは，オカルト的な力の復帰であるとして遠隔力であるニュートンの万有引力を認めなかった。しかしながら，地上での物体の運動から天体の運行に係わる広範囲の動力学的現象を精確に予測できるという「精確さ」と「普遍性」[27]，さらには，技術的応用により実証された「有用性」のために，ニュートン力学は多くの人々に採用され，解析的な形式に改められることにより，さらに発展していったのである。

ドレイクが「1604年当時ガリレオの落体の法則は，いわば時代を超越していた」と表現しているように，質的な原因追究ではなく自然現象の数学的定式化を行うこと，言い換えれば，形而上学的な自然の説明に対して現象を定量的かつ一義的に捉えて記述することに重点を移すというやり方はそれまでの自然哲学にはなかった思考方法なのである。このような数学的定式化は，感覚によって直接捉えられることのない理論的対象――原子，電子等――を導入する。

我々はそれら理論的対象を用いてさらに分析を進めていき，原因となる究極理論へと遡っていく[28]現実の様々な局面は数学的に抽象化され，理論はより広範囲の現象に適用できるように発展していく。数量化された形式で導出された理論の予測結果が実験結果と比較され，理論の成績評価が行われる。再び「オカルト的な力」が侵入し形而上学的な原因追究の迷宮に迷い込んでしまうことを防ぐために，ガリレオ以後の近代科学は，上述の一連のプロセスを通してより高精度で普遍的な理論を構築するという不断の努力を行ってきたのである。ニュートン力学の歴史的発展の中で，「精確さ」と「普遍性」という特質は，質的な原因追究に拘っている反対派を説得しニュートン力学を受け入れさせるという極めて重要な役割を果たしてきたのである。

ガリレオ以後，近代科学が自然現象の原因を形而上的，質的に追求することから，現象の数学的記述へと重心を移したこと，そして数学的定式化とその結果形成される「精確さ」と「普遍性」という特質が，近代科学という知的営みをそれまでの自然哲学から分かつ上で大きな影響を持っていたことを見てきた。しかしながら，物理学の目指す所を，我々の知覚可能な現象をそのままに定量化し一義的に記述することであると捉えてしまうと，物理教育の目標が生徒につまらぬクソ実証主義を修得させることへと集約されてしまう。このような物理学の単純な把握は，「所与を扱う自然科学的概念形成」と「所与の拘束を受けない（乃至は受けにくい）数学的概念形成」の相互関係という認識論の根本問題を見落としているのである[29]

4　自然科学的概念への数学的概念の浸透

エルンスト・カッシーラは，1910年の著書「実体概念と関数概念」の中で数学的概念形成と自然科学的概念形成の関わりを考察し，物理学における概念形成がどのような形式でなされるのかを議論している[30]カッシーラは19世紀的近代科学の特徴である数学化という要素を次のような記述で表現している。

> 「物理学の諸理論はそれを表現する〈数学的形式〉によってはじめて規定される。理論によって再現され理論において統一されるべき「事実」に関する生の素材を収集するためだけにも，〈数えること〉と〈測ること〉の機能は不可欠である[31]」

カッシーラは，数学的概念形成においては直観によって得られる所与はひとつの契機として発動し，概念形成に向けて多様な形式に解釈し直されて認識されるが，所与を与える外界の存在そのものを捉えようとした場合は，そのような解釈し直しは外界の存在そのものの偽造になるのではないかという疑問を呈する。我々が実験や観測から得られる事実を解釈し自然科学的概念を形成していく過程で，多数の数学的概念が動員される。19世紀的近代科学を構築する上で常に効力を発揮してきたそれら数学的概念というものは，およそ人間の感覚器官の能力によって直接知覚される可能性のないものであることをカッシーラは指摘する。直観によっては捉えることが不可能な数学的概念を用いて，直観を説明し，統合するという状況に対するカッシーラの考察の跡を辿ってみよう。

カッシーラは，力学を構築するために必要とされる運動の概念を基礎づけるためには，まず運動の舞台である空間と時間を感性的印象ではなく，純粋幾何学の空間と時間として捉えなければならないことを指摘する。

> 「普遍的・科学的意味での運動とは，〈空間〉と〈時間〉がとり結ぶ一定の関係以外の何ものでもない。しかし空間と時間そのものは，もはやその直接的・心理的・「現象的」性質においてではなく，その厳密に〈数学的な〉規定においてその基本的関係の項として

前提されているのである[32]」

例えば，重力――視覚的には天と地の存在――のために，我々は空間の上下方向の異方性を当然のこととしている。また心理的，生理的時間が一様に経過しないことは日常経験から明らかである。つまり空間と時間の等方性，斉一性という数学的概念は感覚的印象からかなり距離を置いたものであり，感覚的印象を積極的に解釈し直すことによってはじめて獲得できるものなのである。

このようにして運動概念の舞台として構成された時空間内で運動の軌道が決定されるわけであるが，運動の軌道は無限個の点を結んだ曲線であり，そのような無限個の位置を統一的に捉えるためにはまたもや数学的概念の導入が必要となるのである。カッシーラは，連続した無限個の点からなる運動の軌跡という概念は，個々の位置を表す有限個の点である観測データから無条件に保証されるものではなく，個々の点の間を補間していくための何らかの数学的概念，例えば惑星の楕円軌道等，の使用が不可欠であると説く。

> 「運動物体の統一的な軌道に関するあらゆる言述は，〈無限個の〉可能な位置についての申立てを含んでいる。しかし，無限なるものは，言うまでもなくそれ自身としては知覚されえないのであり，思惟による綜合とある普遍的法則の予料とにおいてはじめて生み出されるのである。数学的な事実としての運動は，構成的に産出された時間・空間点の〈全体〉を包括する規定をこの〔普遍的〕法則によりわれわれが創り出すことによって，その規定が連続した時間の各瞬間のそれぞれに空間内での物体の位置をひとつそしてただひとつ対応づけるかぎりで，はじめて得られるのである[33]」

カッシーラの考察の対象は運動の軌跡から運動物体自体に移る。その結果，「自然科学的概念形成の第一歩が，ある感性的集合の諸項のかわりにその集合を完結させる観念的〈極限〉を導入[34]」することから始まっていることがますます明らかになる。力学において回転の自由度のない運動を考える場合は，その物体の質量が重心にあたる空間の一点に集中している質点という数学的な極限概念を使用して物体の並進運動を考察する。さらに回転の自由度を考慮しなければならない状況においても，物体を純粋幾何学における剛体であるとみなす。剛体ではない物体の運動を取り扱うためには，物体の個々の部分が相互にどのような移動をおこなっているのかを考え，物体の構成部分（極限としては物体を構成する粒子）に相当する数の運動過程を追跡していかなければならないからである。「感性的物体を幾何学的物体で，感性的延長を数学者の「叡智的」で連続な延長で置き換えることなしには，運動の物理学的〈定義〉でさえ確立されえない[35]」のである。

このようにして連続性と斉一性を持つ時空間内における質点の等速度運動や等加速度運動，さらには非一様な加速度運動という概念が生まれ，それらを記述するための精密な数学的運動方程式が導出されることになる。カッシーラは自然科学的概念形成に先だって数学的概念の存在が不可欠であることを次のようにも表現している。

> 「いかなる自然科学の〈理論〉も，これらの事実そのものに直接関連しているのではなく，われわれが頭のなかでそれらの事実と置き換える観念的な〈極限〉に関連しているのである。われわれは，相互に作用を及ぼす質量を〈完全〉弾性体ないしは非弾性体と見なすことによって物体の衝突を研究し，完全流体の概念を把握することによって流体中の圧力の伝播の法則を確立する。また「理想」気体から出発し，したがって直接感覚されるデータにいわば仮説的に考え出された〈モデル〉を対置することによって，気体の圧

力と温度と体積の関係を吟味する。[36]」

以上の議論から，単に知覚情報を掻き集めるだけでは自然科学的概念は形成され得ないことが結論される。つまり自然科学とは知覚された現象を忠実に記述しようとするのであるが，「個々ばらばらの事実の単なる集積でもって事足れりとする通常の経験的考察様式にとどまることを意味するものでは決してない。数学的な〈仮説〉はこれら諸事実の間に〈理念的〉な箍をはめる[37]」のである。所与を数学的概念へ変換していく過程の必要性を認めるならば，物理学が知覚世界を忠実に記述する科学であるとする単純な捉え方が誤りであるというカッシーラの次の見解も了解できるであろう。

> 「もしも真に「客観的」な記述という課題が，所与を可能なかぎり忠実に捕捉し，個々の特徴を何ひとつ余計に付け加えることも見失うこともないということだとすれば，物理学の概念的手続きの特徴と価値とをなしているのは，それとはまったく逆に，ほかならぬはじめに在るもののこの種の変換なのである。ここでわれわれが直面しているのは，単なる受動的な模写ではなく，当初与えられたものを新しい論理的な領域に移し変える能動的な過程である。[38]」

ニュートンの万有引力の法則は2物体間に働く引力が，物体間の距離の2乗に反比例するという言明である。この言明に関して，万有引力定数Gの値を高精度で決定していく実験は有意義であるが，引力の距離依存性が2乗に反比例するのか，それとも1.99996乗に反比例するのかを判断しようとする精密測定の試みは無意味である。距離の2乗に反比例するという結論を実験結果から導出するためには，「論理的な領域に移し変える能動的な」作業が要求されるのである。

ケプラーはティコ・プラーエの遺した観測データを楕円軌道という感覚から直接的に与えられることのない数学的概念で統一的に解釈することにより惑星運動の法則を導出した。彼の業績は，数学的仮説を使用することで「直接的観測が取り残した空隙を埋め，ばらばらの感性的所与を概念的推論のひとつながりの連関で置き換えることによって，直接的経験を〈理論〉にまで拡大」したものである。ケプラー以後の近代科学では，旧来の思弁的なアリストテレス的自然学におけるように「数学的に確定された現象からその絶対的原因へと遡及すること」が課題なのではなく，「いまなお概念的に手の加えられていない最初の知覚事実から現実の量的「理解」への移行」が重要になったのだとカッシーラは指摘する。[39]これはスティルマン・ドレイクが質的，形而上学的原因追究の放棄として表現したガリレオの卓越性と同じである。[40]

自然科学的概念形成に先立って所与を数学的概念により変形する過程は，物理学者にとってはあらかじめ実行済みのものであるが，このような変形こそが「認識論にとっては真の根源的な問題」をなしているのだとカッシーラは述べている。[41]本稿では，以上の議論からカッシーラの新カント派哲学を展開していくのではなく，この「認識論の真の根源的な問題」が物理教育において如何なる形で顕現するかを考察することにする。なぜなら，このような数学的概念による変形過程の位置づけを明確にすることこそが，「精確さ」と「普遍性」という顕著な特質を持つ近代科学理論を如何に教育内容として構成すべきかという課題に答えるための礎石となるからである。

5　動力学教授法の課題(1)——原因追究の放棄又は保留——

リリアン・マクダーモットは，多くの生徒が初等的ではあるが基本として押さえておくべき

概念を正しく理解せずに物理学の学習課程を開始していることを示す様々な研究結果――自身の研究も含めて――を紹介している。[42] これまでの研究から，生徒は物理の学習を経験する前に，物理理論とは矛盾する直観的概念――学校教育以前の日常経験に強く根ざした考え――を既に持っているということが明らかにされている。

このような直観的思考形態は，数学的定式化のような抽象的思考を要求することが少なく，かつ経験との矛盾が表面化しにくい内的整合性を保っている。実生活の諸問題に対して定性的解決を得るだけであれば，その目的に応じて多少アドホックな概念を導入しながら直観的思考が構成する理論を使用していくことで対応できる。近年，科学教育における構成主義的研究が様々な直観的概念の事例を報告しており，その文献数は良くも悪しくも指数関数的に増加してきた。学習の初期状態といえる直観的概念の重要性を指摘し，そのあり様を徹底的に調査，分析したことは科学教育における構成主義の成果であろう。しかしながら，教育における本質的課題は如何にしてこのような直観的概念を保持した状況から，有意味な自然科学的概念，法則の理解へと至るかである。[43]

動力学を学習する際，生徒が持っている直観的概念がアリストテレス的運動論に類似していることは良く指摘されていることである。アリストテレスの自然学では，ニュートンの慣性の法則に対応するものとして，力が加えられていない物体は静止し続けるという静止の原理があり，物体の速度はそれに加えられている力に比例するとされる。物体の運動に対するこのようなアリストテレス的理解は，生徒が日常経験するありふれた動力学的課題――物体の運動に常に摩擦力が関係しているような課題――に対して定性的，かつもっともらしい解答を与えてくれるのである。そのため，定量的な結果を必要としないのであれば，生徒はこのような誤った概念を保持し続けることに不自由を感じることが少なく，物体の運動方向は加えられている力の方向と常に同じであるという様な誤信へと導かれていくことにもなる。

このような独自の説得力を持つ直観的説明と比較して，「精確さ」と「普遍性」という特質を持つ動力学理論は，その数学化された形態ゆえに経験的，直観的理解が難しく，現実の問題への適用も容易とは言いがたい。ニュートンの運動の第一法則である慣性の法則は，力が加えられていない物体は無限に続く直線上を運動し続けるという，日常生活ではほとんど直接感覚不可能な言明である。また第二法則は物体の加速度は物体の運動状態を変化させる力に比例しているという法則であり，物体の速度が力に比例するというアリストテレス的日常経験とは相容れないものである。

これまでの物理教育では，自然界の様々な現象がなぜ起きるのかについて納得のいく説明を与えてくれる学問が物理学であるとされてきた。教育を行う場合の基本姿勢は概ねこのような学問観に沿っていたであろう。つまり，生徒に「これこれの現象はなぜ起こるのか考えてみましょう」と問い，「それは然々の自然科学的概念，法則を用いてこのように説明されます」という具合である。動力学の基本法則[44]が日常生活から得られる経験とは相容れない言明であっても，その基本法則が力学的現象の原因を生徒に与えてくれるのであれば，この基本姿勢に疑問を持つ必要はないだろう。

しかしながら近代科学の歴史的発展において見たように，ガリレオ以降，動力学は説明の対象である自然現象の原因を追求することを放棄，または保留してきたのである。ガリレオは加速度の原因を問わずにその性質を測定することに力を注ぎ，ニュートンは万有引力が如何にふるまうかを示したが，引力が発生する原因に触れることには躊躇した。このことは動力学の基

本法則にまで遡って生徒に説明を行ったとしても，その基本法則なるものが原因を与えてくれる言明を含んでいないということを意味している。したがって動力学教育においては，「なぜ」という疑問に答えていくという物理教育の基本姿勢を再検討せざるを得ないのである。

カール・R・ポパーは「科学の目的は，われわれが説明する必要のあるすべてのことについて満足のいく説明を見出すことである」と主張している[45]。ここで，動力学的自然現象を説明するという行為を考えてみよう。ノーウッド・ラッセル・ハンソンは「ある出来事は，それよりも説明を必要とする程度の少ない別の出来事群に遡ることができたとき，説明されたと言える」とし，次のような例を挙げている。

> 「私の書斎に入ろうとしたとき，私は不意に滑ってしまう。――床を磨いたばかりだったからである。これ以上言うべきことはない。これ以上の説明は不要であろう。といっても，これ以上の説明はあり得ない，という意味ではなく，そうするには余りに明白だ，という意味である。よく磨いた床を歩き廻るとどうなるか，ということは明らかである。床を磨いたばかりだった，ということで，この事態にとって必要な説明は尽くされている。磨かれた表面の上でなぜ革靴がすべるか，という一般的な理由は，私が滑って転んだ理由を説明することと直接のつながりはない。ある出来事が起きたら，それを日常的で常識的なことがらにまで戻ってみよ，その上さらにそれを遡ろうとは普通しないものだ，というわけである[46]」

ハンソンは，物理学における説明をこのように捉えることから出発し，ニュートンの運動法則が物理学者によってどのように使用されるのかを分析した。その結果，ニュートンの運動法則は状況に依存して様々な使われ方――定義としての使用，経験則とみなして使うこと，もはやそれ以上の説明を必要としないアプリオリな言明と解釈して使用する等――をしていることが示された[47]。

生徒――彼らが教科書の権威に盲従しないとして――が原因として受け入れやすい説明は，非常識的ではあるがこれ以上説明の必要がないアプリオリな言明ではなく，多少のアドホックな説明を必要としても常識的な事柄を述べている言明である[48]。これは，アリストテレス的運動論に類似した強固な直観的概念を生徒が保有していることからも明らかであろう。もしも，生徒が非日常的，非常識的慣性の法則を最初からこれ以上の説明が不要なアプリオリな言明として理解してくれるならば，動力学教授の目標の一つはその時点で既にほぼ達成されたことになる。しかし普通は，慣性の法則を説明された場合，それが常識から素直に演繹されて出てくるようには思えないし，次のような疑問も涌いてくるだろう。物体はなぜ慣性の法則に従った運動を行うのだろうか。それが物質の本性だからであろうか。結局，原因追究を放棄または保留した動力学の枠内では，慣性の法則とはそれ以上の説明を必要としないものなのだと考えざるを得ないのであるが，居心地の悪さは残ってしまう[49]。

いずれにしても，原因追究を放棄または保留している動力学を教えるときには，説明の連鎖を単純にその基本法則にまで遡ったとしても，生徒の「なぜ」に対する答え――論理的には説明を必要とする度合いが小さいとしても――を与えたことにはならないのである。このような状況でなされてきた事は，前提となる説明に説得力を与えるために，近代科学理論の持つ特質である「精確さ」と「普遍性」を確認することであった。つまり次のような論法である。

> 「もしも非日常的，非常識的なニュートンの運動法則と原因不明の相互作用――万有引力――の法則を認めれば，天体の運動や潮汐現象などの動力学的自然現象が体系的に説

明できるようになり，一つの普遍的な力学に含まれることになる。このことこそがそれら諸法則の存在理由なのだ。」

これはハンソンが運動の第二法則と万有引力の法則の使用方法の一つとして挙げているものと同じである。[50]この用法に従うならば，生徒は動力学の基本法則を取りあえず認め，[51]それらを使用して自然現象を精確かつ普遍的に記述，説明することで，自分が使用した動力学の基本法則そのものの妥当性を納得して行くことになる。このような方法は，理想的には，理論の全体[52]に対して実験，観測を行い，経験による検証を行うことを要求する。しかし，実際の教育の場ですべてを実行することは不可能である。そのため，教師は説明の前提となる基本法則を生徒に示し，いくつかの実験――時間節約から「少しだけ」になることが多いだろう――を行う。その結果から，教師は生徒にこれら基本法則は検証されたのだと宣言することになる。生徒にとって，これは全く説得力がない宣言である。なぜなら，一つまたは少数の決定的実験が存在し，それ又はそれらによって基本法則が検証または反証されるのではないからである。教師の行った実験は基本法則を検証し，他の仮説を徹底的に除去するものではなく，基本法則の妥当性を示唆するだけである。動力学理論全体があって，初めて生徒は基本法則を説得力ある常識として――原因を表しているとは思えないまでも――取り扱うことができるようになるのである。動力学理論全体から一部分を切り出してきて妥協する授業では，聡明な生徒は，将来，物理学理論のより広い範囲を学ぶことによってこの不満が解消されるのだろうと期待しつつ沈黙することになるだろう。

動力学教育における説明の集合は，通常，両端のある鎖や積み上げられたブロックのように配列されている。しかし，上述の議論は，その構造が網の目の様に連結したネットワークになっていることを示唆している。またそのような構造は，ホーリズム（holism）のような視点から動力学理論を捉えることにも繋がっていく。つまり物理教育における動力学理論とは，いくつかの基本法則から論理的に構成されることによって理解されるのではなく，動力学理論全体が一つの理論的構造物としてあり，それを実験，観測によって確認していくものであると考えられるのである。ウィラード・V・O・クワインは科学全体を次のような比喩で表現している。

「科学全体は，その境界条件が経験である力の場のようなものである。周辺部での経験との衝突は，場の内部での再調整を引き起こす。……ある言明の再評価は，言明間の論理的相互連関のゆえに，他の言明の再評価を伴う……そうした他の言明は，はじめの言明と論理的に連関している言明であるかもしれないし，論理的連関そのものについての言明かもしれない。[53]」

科学全体がホーリスティック（holistic）な構造を持っているか否かという問題を検討することは本稿の枠を越えるものであるが，物理教育のために科学全体から切り出されてきた動力学理論は，ホーリスティックな構造を持たざるを得ないと思われる。動力学の基本法則は動力学的現象の原因を与えてくれるものではなく，非日常的，非常識的内容である。そのため，それらは生徒にとって説明の前提としての説得力を持たない言明でもある。さらに，摩擦力の伴った動力学的現象が極めてありふれた日常的現象であることに起因して，生徒は間違ってはいるが，常識的で経験に根ざした直観的概念を強固に保有している。このような状況で，動力学の基本法則に説得力を付与するためには，これら基本法則が動力学理論全体の中で如何なる位置づけにあるのかを，基本法則自体とその近辺の定理だけに注目した局所的議論によってではなく，動力学理論全体のネットワークと基本法則の関係というホーリスティックな視覚から実験

的に確認することで明らかにしていかなければならない。物理学は実験科学ではあるが，直接経験によって定義することのできない概念や言明を含む理論構造を有しており，それら抽象概念等は理論全体との関係によって意味を与えられるようになっているのである。

動力学の基本法則は非日常的，非常識的ではあるが，説明を必要とする度合いは小さい。そこで，それらをアンリ・ポアンカレの定義する実験的に反証不可能な「規約」[54]として認め，そこから理論全体を実験結果と照合しながら演繹していくことは可能であろう。しかしながら，動力学理論全体を把握した後であれば，動力学の基本法則を「規約」として捉えることが有意味な試みであると認める哲学の持ち主もいるかもしれないが，これから動力学を学ぼうとしている生徒にとっては，物理的意味もしくは実体のない「規約」は無機的で，理論全体との有機的統一に欠けた説得力のないものであろう。このような思考の経済の如き理由から，生徒が保有する常識的な直観的概念に基づく強固な誤信を捨てさせることは難しいだろう。やはり，動力学の基本法則は，理論全体が持つ網の目のような関係の中において物理的意味もしくは実体を表していなければならないのである。

このようなホーリスティックな構造を持つ動力学理論を教授する場合に，一連の説明をネットワークから切り出して，線形に配列することが最善とは思われない。しかし，それは教育における系統性を否定しているわけでもない。そこには高度にインターコネクトされた構造によって表現される系統性が存在している。このようなホーリスティックで複雑な構造を持つ動力学理論に生徒が適応してけるような教育内容，教材構成を考えていくことが重要な課題なのである。

6　動力学教授法の課題(2)――「精確さ」と「普遍性」――

ホーリスティックな構造を持っている動力学理論を，それとは矛盾する強固な直観的概念を保有している生徒に教えるためには，理論全体に対してなるべく影響力のある実験を構成することが現実的であり，かつ重要な課題であろう。近代科学の歴史的発展に見られるように，科学理論の持つ特質である「精確さ」と「普遍性」を検証していく実験，観測は，新しい理論に説得力を与え，それを学んだ人々が再び居心地の良い質的，形而上学的説明や呪術的思考へと戻ってしまわないための有効な歯止めの役割を果してきた。科学理論の持つ広範囲の現象に対する精度の高い定量的な予測能力は，直観的理論の結果と比較して遥かに優れている。レヴィ・ストロースも述べているように，「成績という点では科学が呪術より良い成績をあげることは事実」なのである。そこで物理教育においても，ガリレオ以後行われたように，運動物体の位置，速度を定量的に精度良く測定することにより，直観的概念の矛盾を突いていくことが必要となる。しかしながら，これまでの物理教育における多くの場面では，原理・原則や考え方を教えることが主眼であるという理由から，「精確さ」と「普遍性」という特質は一連の教材に対して付加的に配される傾向にあったと言える。

「精確さ」と「普遍性」という特質を物理教育に取り入れるために，まず最初に，実験により自然現象を数量的に把握することの意義を生徒が理解しておく必要がある。我々は，頭の中に描いたイメージ自体は間違っていなくても，そのイメージによって欺かれることがあるからである。例えば，地球の赤道にロープをぴったりと巻き付けたとしよう。次にそのロープを１ｍだけ長くして，ロープと地球の間を等距離に保って張りつめたとしたら，地球とロープの間隔はいくらになるだろうか。継ぎ足した１ｍという長さはロープの全長の約1/40000000である

ため，地表面からほんのわずかしか離れないだろうと考えてしまうが，計算結果は約16 cmにもなる。ロープと地球の間は少し離れるという我々のイメージは間違ってはいないのだが，数量的な把握という点では誤っている。「高さhに質量Mの物体があります。自由落下したときの地上での速度を求めなさい。重力加速度はgとします。」というような問題をいくら多く解いたとしても，数量的把握も含めた正しいイメージの理解には至らないのである。

教育内容の大部を割いて自然現象の数量的把握を取り扱っている例として，P．S．S．C．の物理教科書がある[55]。P．S．S．C．の運動により編まれた教科書の第1部「宇宙」では，物理学において扱う長さや時間の量的把握，それらの測定原理と具体的方法，測定に伴う誤差の処理という教育内容が扱われている。教科書の第1部はこのあと動力学の基本概念である速度，加速度の理解，原子，分子の概観へと進んでいく。板倉聖宣は，P．S．S．C．の教科書出現以前は，科学における測定の意味とその結果の量的把握を重視し，「物理学の一つ一つの法則にはいるまえにまず，現代の物質観を測定と関連させつつ展開したような教科書はなかったといってもよいであろう」と評している[56]。また各章末の演習問題には具体的数値を代入して答えを出す形式のものが多く含まれており，物理法則中に現れる諸量の間の実際的な量的関係を理解することが求められているのも見逃してはいけない特徴である。1958年から1968年にかけてカリフォルニア大学バークレー校で行われた大学院予備試験の筆記試験問題集にもこの傾向が見られる。この試験問題集の日本語版の訳者らは「いくつかの重要な普遍定数や典型的な量のだいたいの数値や大きさの程度を，記憶しているかどうかをためす問題が相当数あることにも注目したい。表を見ればすぐわかるそういった数値を暗記する必要はあるまい，というのも一つの考え方である。……しかし，具体的な現象を扱う場合には，それでは間に合わないことが多い。また，けた違いに大きすぎたり小さすぎる値に，すぐこれはおかしい，と気づくのも重要なことである」と指摘している[57]。現在においても，このような数量的把握の指導が教材全体と統合化したかたちで充分に行われているとは言えないであろう。

上述の数量的把握と併せて，動力学的現象の原因を追求する――これは形而上学的，呪術的考察につながりやすい――のではなく，現象そのものを定量的に精度良く測定していくことで，直観的概念，経験則が如何に矛盾したものであるかを暴いていかなければならない。例えば，板倉聖宣の非常に優れた静力学の授業プラン「ばねと力」を見ると，なぜ地球が物を引っ張るのか，つまり引力の原因は一体何かという疑問には深入りしないで，引力がどのように振る舞うのかを説明し，静力学的概念，法則の学習へと入っている[58]。そこでは，定性的，質的な原因解明を生徒に求めるのではなく，定量的考察――等しいか否か，大小関係，比例しているか否か等――を要する質問を行い，生徒の持っている生活体験によって組み上げられてきた直観的概念や経験則が，如何に近代科学の成果と矛盾したものであるかを彼らに徹底的に理解させることから始められている。

動力学においても，近代科学理論の特質である「精確さ」と「普遍性」を活かし，アリストテレス的動力学の矛盾を浮き彫りにするような授業プランが望まれるが，動力学的現象を定量的に測定する実験がはんざつであり，必ずしも成功しているとは言い難い。例えば板倉聖宣は，P．S．S．C．の教科書である前掲書における実験――電磁式記録タイマーを用いてテープに運動を記録する――も，生徒にとって記録テープの読みとりが難しく，成功していないと指摘している[59]「動力学のばあい数式はいかにも正確に計算されるが，それらの計算結果が現実に適応するかどうかについて実験の行なわれることがほとんどなかった」と板倉が述べている

状況は現在も同じであると言えよう。定性的もしくは半定量的実験によって直観的概念，経験則の持つ矛盾を明らかにできれば良いが，動力学の場合はそのような実験結果によって科学と直観が決定的に対立するという状況にまでは至らず，せいぜい二者が共存するだけであろうと思われる。イギリスの科学者ケルヴィン卿が言ったように「あなたが話していることを測定することができ，そしてそれを数量的に表現できるなら，あなたはそれについて何かを知ることができる。しかし，それを数量的に表現できない時には，あなたの知識は，貧弱で不充分なもの」なのである。

既存の考え方では説明不可能な問題を解決してくれる新しい概念を学んだ後，生徒はそれらの新しい概念を彼らのまわりの世界に適用しようと試みる。そのような応用の結果，世界に対する新しい洞察や発見が得られたとき，新しい概念は実り豊かなものとみなされ，その説得力は増す。今後，さらに「精確さ」と「普遍性」を確認するための優れた授業実験を考究していくことが必要である。

しかしながら，動力学的現象を簡便かつ的確に精度良く測定したとしても，動力学教授法の本質的問題は解決されていない。なぜなら動力学においては，直接感覚される測定データと数学的概念が分かち難く編み合わさって自然科学的概念が形成されているからである。自然科学的概念形成と数学的概念の相互関連についてのカッシーラの考究からわかるように，測定結果から新しい動力学概念を導出する過程には数学的概念が深く係わっている。そのため優れた定量的実験を構成するためには，単に数値データを収集する際のはんざつさを除くだけでなく，直接感覚されるデータと数学的概念の複雑な絡み合いを解きほぐしていくことも必要なのである。

7　動力学教授法の課題(3)——数学的概念の浸透——

ニュートン力学では，そこに含まれる概念，法則の多くを，力，重さ，速さ等の日常使用される言葉を用いて表現することができる。だからといって，このことからニュートン力学を学ぶのが容易であるということにはならない。動力学を学習する際の根本的な障害は，このような日常言語と共用される動力学的専門用語の多義的性格に在るのではなく，カッシーラが述べているような自然科学的概念と数学的概念の相互関連の中に在る。

動力学における自然科学的概念や法則は，測定データの示す現実と数学的概念が複雑に編み合わさって形成されている。生徒と教師は，授業実験から得られる測定結果の集積を縦糸とし，数学的概念やそれまでに学んだ自然科学的概念を横糸として，新しい自然科学的概念を編み上げていかなければならない。それは実験による現象を忠実に記述することではなく，実験結果を「新しい論理的領域に移し変える能動的な過程」である。動力学に於ける諸概念，法則に数学的概念が織り込まれている様子をニュートンの運動の第一と第二法則に見てみよう。

ニュートンの運動の第一法則は慣性の法則であり，物体に力が全く加わっていないか，または加えられた力がつりあっている場合，物体は静止または等速直線運動を続けることを述べている。明らかに，ここには無限遠方にまで続く直線という数学的概念が伏在している。さらに構造を持った時空間中での位置の変化を運動として捉えた場合，慣性の法則は運動の舞台となる無限の均質な空間と均質な時間の流れという数学的概念で構成される時空構造と密接不可分な関係にある。このことは第一法則自体が知覚不可能な極限概念であることを意味している。ニュートンの万有引力の法則によって運動中の物体にはこの宇宙に在る他の物体から常に引力

が働いており，それら引力がつり合いの状態にあることが保たれることは極めて希である。その結果，運動中の物体にはニュートンの運動の第二法則（$F=Ma$）によって決定される加速度が発生し，無限遠方へ遠ざかっていく等速直線運動を維持することはほとんど不可能であろう。つまり我々の日常とは，運動の第一法則を完全な形で所与から導出することが極めて困難な状況なのである。運動の第一法則を慣性運動を行うという物体の本性を述べた言明であると理解すると，アリストテレスが唱えた物質の本性に基づいた運動法則と同じような質的説明になってしまう。

運動の第二法則は，物体の加速度がその運動を決定する力と関係づけられることを理論的に述べている。ニュートン以前にはなかったこの新しい見方は，自明ではなく，実験的に確認されなければならない。測定結果から運動物体の自然科学的概念を形成することは，運動している物体の軌跡を滑らかな曲線という数学的概念で捉えることから始まる。ここには既に物体を質点とみなすことが含意されている。通常，自由落下の軌道が直線になるということを与件として動力学の学習を始める。自由落下する物体が直線軌道を取ることは経験からもっともらしいことであるし，結局は動力学理論の帰結として直線軌道が得られる。しかしながら，飛行機から投下された荷物 —— もちろんパラシュートは使わず，空気抵抗も無視できるとして —— の落下軌道が放物線になることは一見しただけで断定できるものではない[60]。例えば，投下された荷物が着地する所を質問したときに，直観的に投下後まっすぐに落下するという誤答 —— 正解は飛行中の飛行機の真下である —— を与えることは良く知られている。時間間隔Δtで投下物体の位置測定を行っても，不連続な測定点が得られるだけである。それらの点列を内挿することで滑らかな曲線は形成されるが，その曲線が，x^2なのか$x^{1.996}$であるのか，それとも複雑な超越関数で表現されるものなのかを直接感覚されるデータだけで決定することは不可能である。落下軌道を数学的曲線として捉えるために必要なことは，測定点数をさらに増やしていくことではなく，動力学の数学的モデルを不連続な測定点の集積に対置することで落下物体の運動の概念を把握することである。自然現象の精密測定によって得られるデータ群という縦糸の中へ，数学的概念，動力学的モデルという横糸が織り込まれていかなければならないのである。

また，自然科学的概念を学習する際の数学的概念の浸透は，従来の教育で「理想的な場合」として片づけられていた所に見られる。例えば，力学台車の運動を吟味することで，力学台車の運動という現象から質点の運動という自然科学的概念までの距離を評価してみよう。車輪の半径がRの台車を考える。通常，力学台車を用いて運動を議論する場合は，車輪と地面の間に充分な摩擦があり，車輪と地面の接点では車輪の地面に対する相対速度が0 —— 車輪は滑らずに回転すること —— になっていることが前提とされている。台車に撃力が加えられたとき，車輪の軸回りの角力積が0 —— 車軸は車輪の中心に取り付けられているから —— であるため車輪の回転は地面との接点で働く摩擦力によって発生する。摩擦力によって，車輪の角速度ωはゼロから増加していき，台車の速度は0からV_fまで増加することになる。車輪の滑りのない回転を伴った安定した台車の運動が実現するのは，車輪の角速度ω_fと台車の速度の間に$R\omega_f=V_f$の関係が成立するときである。このような滑りのない運動を行っている台車から車輪の回転運動が捨象され，質量Mの有限の大きさを持った剛体が摩擦が全くなくなった平面上を運動する状況へと変形される。次に，物体はその質量Mが重心である一点に集中している質点という極限概念[61]に置き換えられ，摩擦の全くない滑らかな2次元平面上を運動する点として表される。これら一連の変形操作は極めて簡単化した描写であり，仔細に見れば，この他にも多くの

数学的，動力学的概念が台車の運動という現実の中へ複雑に織り込まれていることがわかるであろう。いずれにしても，台車の運動を直接感覚することによって得られるデータを縦糸，数学的，動力学的概念を横糸として編み上げていく作業が完了して，はじめて台車の実験によって得られる諸結果を普遍的な法則として捉え直す準備ができたことになる。

このような自然科学的概念と数学的概念が複雑に編み合わさった運動の第一法則や第二法則から学習を開始するのではなく，実体的イメージを捉えやすい運動の第三法則から導入する動力学の教授方法が考えられる[62]しかしながら，このときにも様々な数学的概念の浸透から逃れられるわけではない。

以上の議論から分かるように，動力学の学習を始める前に，自然科学的概念形成に要求される数学的概念を理解しておくことが少なくとも必要である。そして動力学学習の本質的な部分は，実験から得られる測定データに数学的概念及び動力学の数学的モデルを対置することで自然科学的概念という複雑な織物を編み上げていくことなのである。定量的測定の結果を集積するだけでは不充分であることを，カッシーラは次のように表現している。

> 「ばらばらの観察の単なる帰納的総和という意味での「純粋の」経験なるものは，決して物理学の礎石たりえない。というのも，そこには数学的に形式を付与する力が伴っていないからである。生まの事実が数学的シンボルによって表わされ，それと取り替えられてはじめて，その事実を現象全体と体系的に統合する概念的把握という知的作業が始まるのである[63]」

測定結果と数学的概念を編み上げる過程は，単なる理想化 —— 例えば，摩擦力→0 とする等 —— として捉えるべきではない。むしろ測定結果を数学的概念を用いて変形していく過程として理解すべきである。カッシーラは物理学における所与の数学的変形 —— 彼はこれを認識論にとって真の根源的な問題と位置付けている ——について，物理学者はあらかじめそれを実行ずみのものだと前提にしていると述べている。確かに，物理学者が研究を行う場合に，毎回所与の数学的変形を意識的に行うという面倒なことは繰り返さない。しかしながら，新しい概念に初めて接することから始まる物理教育においては，新しい理論を理解する際に要求される概念の多くを，あたかも数学的変形を経ずに所与から直接的に得られるものであるかのように取り扱うことはできない。むしろ，この数学的変形過程こそが，まず最初に把握しておくべき重要な教育内容の構成要素なのである。

動力学は日常なじみのある現象であるため，数学化された形式を用いないで理解することが可能であると考えがちである。しかし実際は，日常経験として豊かであればある程誤った認識 —— 例えばアリストテレス的運動学のような —— が強固となるため，積極的に数学的概念を導入し直観的誤信を除いていかなければならない。このことは「数式を使用しない動力学」という教育内容 —— その善し悪しは別として —— は実現可能であろうが，「数学を使用しない動力学」という教育内容は欺瞞であり本質的に成立しないということを意味している[64]

8 ま と め

児童中心主義的教育に見られる主客転倒状況の中で，教育内容の「主」たる存在であるべき「近代科学の成果」を再考した。以下に本稿で考察してきた動力学教授法の三つの課題をまとめておこう。

動力学を学習する際の第一の課題は教育内容である動力学理論全体が持つホーリスティック

な構造を捉えることである。物理教育のために科学全体から切り抜かれてきた動力学理論は，動力学的現象の原因について納得いく答えを我々に与えてくれない。つまり，動力学理論の基本法則はそれ以上の説明を必要とする度合いが最も小さい言明ではあるが，現象を引き起こす原因に迫るものではない[65]。例えば，万有引力の法則はその相互作用のふるまいについては述べているが，相互作用の原因については触れていない。非日常的，非常識的な動力学の基本法則に説得力を与えるためには，その言明に原因を求めるのではなく，基本法則が動力学理論全体と如何に係わっているのかを考察するとともに，動力学理論全体が実験，観測によって検証されなければならない。したがって，動力学理論が持つホーリスティックな構造を踏まえた動力学教授法が必要なのである。

第二の課題は，生徒の持つ直観的概念，経験則に対抗して，動力学の優れた「精確さ」と「普遍性」という特質を確認できる定量的実験を構成することである。動力学理論のホーリスティックな構造から理論全体を理解した上で実験的検証を行っていくことが理想であろうが，現在の授業では不可能なことである。現時点での最善の策は，理論全体に対してなるべく影響力のある実験を構成することであろう。近代科学の歴史的発展を見ると，新しい理論に説得力を与えてきたのは，その理論の持つ「精確さ」と「普遍性」という特質が実験的に検証されてきたことであることがわかる。広い範囲の現象に対する精度の高い定量的予測が行えるという動力学理論の特質が，非日常的，非常識的な動力学の基本法則に説得力を与えるのである。しかしながら，この「精確さ」と「普遍性」という特質を検証しようとするこれまでの定量的授業実験はその煩雑さや実験原理の難しさのため成功しているとは言いがたい。

第三の課題は，実験結果から自然科学的概念を形成する際に，数学的概念の存在を必要とすることである。この課題は，実験の構成とその解釈という観点から，上述した第二の課題と分かちがたいものである。動力学における自然科学的概念は，直接感覚される測定結果と数学的概念が織りなす複雑な編み物である。このことは，第二の課題を解決するためには，常に第三の課題の解決策を参考にしなければならないことを示唆している。測定データの集積 —— それらがどれ程高精度なものであったとしても —— から新しい動力学的概念を把握するためには，数学的概念やそれまでに学んだ動力学の数学的モデルを用いることが不可欠なのである。したがって動力学教授法は，このような自然科学的概念という複雑な織物を如何に解きほぐした形で生徒に提示するのか，そして再び教師と生徒の手で如何に編み上げていくのかを具体的に示さなくてはならない。アルバート・アインシュタインが抱いた「数学が経験から独立した思考の産物であるなら，それがこれほど見事に現実の対象にあてはまるのはどうしてなのだろう」という疑問は，生徒への重要なメッセージ —— 動力学教育がどこかへ置き忘れていた —— を表現している。動力学理論の進歩に数学は極めて有効であったが，それは全く当然なことではなく，驚くべきことなのである。

芸術家パウル・クレーの残した言葉[66]を借りて動力学を表現するならば，「動力学とは，目に見えている力学的現象を再現するのではなく，目に見えるようにすることだ」となるであろう。そして，動力学に関する教授法を研究している我々は，「精密測定や数式の操作に支配されたクソ実証主義の世界」と「考え方や態度という語り得ないものの誘惑に満ちた世界」に挟まれた細い道を足を踏み外さないように進んで行かなければならないのである。

注

(1) 板倉聖宣は，日本の高校における「物理」教育が「物理学」教育とは別のものであると言われた戦後の状況について次のように述べている。

「「物理学」と区別された「物理」は，既成の物理学の論理にこだわることなく，物理的な自然現象についての知識と，科学的な考え方とを教育すべきであるという主張にたつもので，生徒の素朴な考え方を尊重するというたてまえから，科学の論理を積極的に教育することを拒否するのである。そのような「物理」教育では，日常身辺の物理現象を実験的に解明することに力がおかれ，その結果，現代物理学の考え方などは，ごく簡単にお話的に取り扱われるのにすぎなくなる。」

板倉聖宣著，『日本理科教育史』（第一法規出版，1968年）145頁

(2) 例えば，中野栗夫著，『科学的思考力育成の実際』（東洋館出版社，1965）11頁には次のような著者の見解が述べられている。

「…科学的能力の要素がほとんどすべて，問題解決過程の中に含まれていることに気づいたので，科学的能力の中に含まれる各要素を問題解決手順の中に統合したら，有機的に纏まったものになり，理解にも，指導にも便利であろうと考えるようになった。」

(3) 小野周他，『現代の科学教育 —— 特に高校物理教育について——』，科学，第36巻，7号，1966，368～375頁。

この討論は30年前に行われたものであるが，今あたらめて読み返したときにその内容が全く色褪せていないということに驚く。このことは科学教育におけるさまざまな問題がいかに深刻なものであるかを我々に痛感させてくれる。

(4) 例えば，理論物理学者F.J．ダイソンの著作「宇宙をかき乱すべきか」（ダイヤモンド社，1982）79頁にある次の一節は，科学的方法 —— その歴史的発展も含めた —— の個人差を表現している。ここで，ディックとはリチャード・ファインマンの，ハンスとはハンス・ベーテの，オッピーとはロバート・オッペンハイマーの愛称である。

「ディックの物理が普通の人々にひどくつかみにくかった理由は，彼が方程式を用いなかったことにあった（ファインマン・ダイアグラムのことを指す—— 大野）。ニュートンの時代以来，理論物理学がやってきた通常の方法は，まず方程式を立て，次にその方程式を解くため奮闘するというやり方だった。これがハンスとオッピーとジュリアン・シュウィンガーが物理をやった方法だった。ディックは，方程式を書くことなしに，彼の頭の中から直接に解答を書きおろした。彼は，ものごとが起こる仕方の物理的描像を頭に描き，その描像が彼に最小限の計算で直接に解答を与えたのであった。方程式を解くのに生涯を費やした人がディックにとまどわされたのは，少しも不思議ではなかった。彼らの頭は解析的で，ディックの頭は絵画的だった。…」

(5) かってベル研究所が創造的な人間に共通する特質を定量的に評価しようと試みたが，その結果，創造的な人間に共通している傾向は二つだけであったと言われている。一つはどれ程散らかっている机でも平気で仕事が出来ることと，もう一つはユーモアのセンスを持っていることだった。

(6) これは断るまでもないことかもしれないが，ここで述べていることは，自然科学的概念，法則を知識として伝達しておけば，放って置いても「科学的な考え方」が育成されるというような低レヴェルの見解を意味しているのではない。

(7) 柴田義松著，『現代の教授学』（明治図書，1971）16頁

(8) 歴史教育を例にとると，遠山茂樹がその著書『歴史学から歴史教育へ』（岩崎書店，1980）の中（55頁）において，日清・日露戦争の学習の直接のねらいは，平和のお説教を子供に信じさせることではなく，「この

戦争の原因，性格，結果についての科学的認識をえさせることにある」と述べている。そして，「知育にあっては，あくまでも知的認識の深まりを通して，知識の主体的受けとめが求められるので，他の近道を求めるのは邪道である」としている。

(9) 具体例として，神志那良雄著，『理科好きの子供を育てる教師を育てる―― 教員養成系大学（学部）における物理教育 ――』，応用物理，第64巻，1995，269頁にある次のような主張を挙げておく。

「小・中学校における理科（物理）教育では，〝物理学〟などの学問体系に基づいた内容は，教える必要はない。身近な自然現象に対する興味・関心と直接体験，観察・実験による現象の把握，論理的思考の訓練，これこそが必要と考える」

(10) クロード・レヴィ・ストロース著，『野生の思考』（みすず書房，1976）18頁

クロード・レヴィ・ストロースは未開人の呪術的思考を「技術や科学の発達の一時期，一段階にしてしまうと呪術的思考を理解する手段をすべて放擲することになる」と述べた後，次のように続けている。

「呪術的思考は，まだ実現していない一つの全体の発端，冒頭，下書，ないし部分ではない。それ自体で諸要素をまとめた一つの体系を構成しており，したがって，科学という別の体系とは独立している。この両者が似ているのはただ形の類似だけであって，それによって呪術は科学の隠喩的表現とでも言うべきものになる。それゆえ，呪術と科学を対立させるのでなく，この両者を認識の二様式として並置する方がよいだろう。」

(11) 加藤周一著，『戦争と知識人』（加藤周一著作集第7巻，『近代日本の文明史的位置』，平凡社，1979）所収，（近代日本思想史講座4，筑摩書房，1959）初出

(12) 本稿では「動力学」という語を，ニュートン力学にその後発展した解析力学の成果を含めた学問体系を意味するものとして使用している。

(13) 本稿で考察していく科学教育は系統学習なのかという質問に対しては，系統性の欠落した科学教育は可能なのかという質問で答えたい。科学という人類の知的営みは，決して行き当たりばったりに為されてきたわけではない。学問的体系以外の何かに基づいた学習 ―― 生徒が理解してくれることを望むのであれば，凡そ教育内容，教材配列が全くランダムな学習というものは不可能であろう ―― を考えたところで，そこに現れる系統性が学問的体系から懸け離れたものになるのであろうか。教材の系統性と発展的な連関については，田中実著，『新しい理科教室』（新評論社，1956）第二話及び第三話を参照のこと。

(14) ロジャー・ペンローズ著，『皇帝の新しい心』（みすず書房，1994）174頁

(15) デヴィッド・リンドリー著，『物理学の果て』（青土社，1994）124～126頁，

S. W. Hawking and R. Penrose, The Nature of Space and Time, Scientific American, July 1996, pp 60-65

(16) 木下東一郎著，「量子電磁気学の現状」（江沢，恒藤編，『量子物理学の展望』上巻，岩波書店，1977）所収

(17) トーマス・クーン著，『本質的緊張』（みすず書房，1992）417頁

(18) クーンはこれら五つの客観的理論評価基準だけでなく，科学者個人の主観的要素を無視することができないことを主張するわけであるが，本稿ではこの点についての議論は行わない。

(19) 佐々木力著，『近代学問理念の誕生』（岩波書店，1992）

(20) 20世紀的近代科学の開花は，この19世紀的近代科学の体系の批判的発展の上にあるが，学問理念としては「確実性」と「有用性」という19世紀からの延長上にあることは現代物理学の旗手であるペンローズが行った理論評価から分かることであろう。

(21) 山田慶児，谷秦訳，『偽金鑑識官』（中央公論社，世界の名著21『ガリレオ』）所収

(22) 佐々木力著，『科学革命の歴史構造』（岩波書店，1985）第2章

(23) スティルマン・ドレイク著,『ガリレオの思考をたどる』(産業図書, 1993) 47頁

(24) ガリレオ・ガリレイ著,『新科学対話』(岩波文庫, 1948) 下巻 24〜25頁

(25) I. Bernard Cohen, The Newtonian Revolution (Cambridge, 1980)

(26) アイザック・ニュートン著,『プリンシピア』(講談社, 1977) 651〜652頁

(27) ニュートン力学の精度を示す歴史的事実として, 小惑星ケレス, 海王星, 冥王星の存在が理論から予測されたことが挙げられる。詳細及び参考文献は
パークレー物理学コース「力学　上」(丸善, 1975) 207〜209頁
を参照のこと。また力学教育との関連については,
田中一著,『自然科学の基礎としての力学』(理科教室, 38巻, 1995, 11月号) 所収
を参照のこと。

(28) 19世紀の実証主義は原因について全く触れないという極端な態度をとったため, 原子, 分子等の理論的対象を考えることを拒絶した。もちろん本稿はこのような極論を支持するものではない。

(29) 本稿ではクソ実証主義を回避するために科学的概念への数学的概念の浸透を議論するが, 科学的概念に膠着している実体的イメージに注目することも重要である。例えば,
高村泰雄著,『教授学研究ノート』(北海道大学教育学部紀要　第25号) 所収
を参考のこと。しかしながら, 現代物理学において我々が取り扱うのは計算可能な数学的モデルであり, 現実世界, つまり実体との間にいくらかの距離があること——だから, 実体そのものではなく, 実体的イメージと呼ばれるのである——に留意しなければならない。

(30) エルンスト・カッシーラ著,『実体概念と関数概念』(みすず書房, 1979, 山本義隆訳) 第4章

(31) エルンスト・カッシーラ著, 同上書, 134頁

(32) エルンスト・カッシーラ著, 同上書, 137頁

(33) エルンスト・カッシーラ著, 同上書, 138頁

(34) エルンスト・カッシーラ著, 同上書, 142頁

(35) エルンスト・カッシーラ著, 同上書, 164頁

(36) エルンスト・カッシーラ著, 同上書, 150頁

(37) エルンスト・カッシーラ著, 同上書, 157頁

(38) エルンスト・カッシーラ著, 同上書, 141頁

(39) エルンスト・カッシーラ著, 同上書, 157〜158頁

(40) ドレイクはガリレオを実験科学者として規定しているが, カッシーラはプラトニストとして捉えている。いずれにせよ, 本稿ではガリレオ以後の近代科学が形而上学的な原因追究を課題としなくなったという新しい自然認識の態度と方法論に注目しているのである。

(41) エルンスト・カッシーラ著, 前掲書, 138頁

(42) Lillian C. McDermott, "Research on conceptual understanding in mechanics", Physics Today, (July, 1984), pp. 24-32.

(43) 科学教育における構成主義は, 自然現象を理解するために必要な抽象的な科学概念を個々の生徒が自分自身の手で構築していく具体的メカニズムを何も提供しないとして批判される。科学教育における構成主義に対する批判としては, 例えば次の文献を参照のこと。
J. F. Osborne, "Beyond Constructivism", Science Education 80, 1996, pp. 53-82
M. R. Matthews, Science Teaching (Routledge, 1994), Ch. 7
また, 生徒が保有している直観的概念は, 新たに学んだ科学的概念によって置き換えられるのか。それと

も，学習が進んでいく課程で単純に忘れ去られるのか。反対に，日常生活で使用するために温存されるのか。この点を明らかにすることは残された課題である。例えば次の文献を参照のこと。

S. Carey, Conceptual Change in Childhood (MIT Press, 1985)

M. Chi, "Conceptual Change within and across Ontological Categories: Examples from Learning and Discovery in Science", In R. Giere (Ed.), Cognitive Models of Science (University of Minnesota Press, 1991)

(44) 以下では，ニュートンの運動の三法則と万有引力の法則を意味している。

(45) カール・R・ポパー著，『客観的知識』(木鐸社，1974) 217頁

(46) ノーウッド・ラッセル・ハンソン著，『科学的発見のパターン』(講談社学術文庫，1986) 198頁
物理教育では，ハンソンは相対主義的科学論を展開する哲学者として，クーン，ファイヤーアーベントと一括りで批判されることがあるが，筆者には「共約不可能性」という考え方を古典力学と量子力学の間の対応原理という課題に則して述べるハンソンと，「共約不可能性」を最大限に拡張して使用するファイヤーアーベントが同じ範疇に属するとは考えにくい。また，実験，観察の中には理論負荷的として解釈されるべきものもあるが，そのことはすべての実験，観察が理論負荷的でなければならないということを含意しているわけではない。仮にすべての実験，観察が理論負荷的であったとしても，そこから相対主義が帰結されるか否かは自明ではない。いずれにしても本稿の興味は，古典力学における法則が如何なる機能を持っているかについて行った彼の分析にある。

(47) ノーウッド・ラッセル・ハンソン著，同上書，第五章「古典質点物理学」

(48) 物理学の説明の場合，何が「常識的なことがら」かという問題は，説明を受ける側の判断に依存している。物理教育における説明の連鎖が如何に在るべきかは，生徒がそれまでに受けてきた教育によって左右される。例えば，ある物理現象を説明するために，反陽子 —— 1.6×10^{-19}C の負電荷と 1.7×10^{-24}g の質量，そして半径が 10^{-12}cm 以下の粒子 —— という直接感覚することのできない理論的対象を想定しなければならないとしよう。もしもその説明を受けている生徒が，原子や電子という理論的対象について既に学習しているならば，反陽子という概念を含んだ説明は，容易に納得できるとは言えないまでも，全く非常識的というわけでもないであろう。しかしながら，原子論に全く触れたことのない生徒には，そのような微小粒子の存在を必要とする説明は非常識なものと受け取られるだろう。物理学を学んでいけば，多くのことが「常識的なことがら」となる —— 素粒子を 10 次元時空の中のひもの運動とみなすことも常識となる —— のである。

(49) 執拗に説明を求めるならば，非ユークリッド幾何学で表現される時空間の曲率と物体の慣性的性質が関係づけられているアインシュタインの一般相対性理論による説明が必要になるだろう。そして，各素粒子はなぜ特定の静止質量を持っているのかという具合に疑問は続いていく。これは究極理論とはどのようなものかに関連している。

(50) ノーウッド・ラッセル・ハンソン著，前掲書，221～229頁

(51) ここでの「認める」という言葉は，実験，観測の結果によっては反証される可能性もある仮説として，取りあえず受け入れるという程度の意味で用いている。

(52) 動力学理論の全体とは基本法則だけでなく，そこから演繹される物体の運動に関する様々な理論的解析も含んでいる。例えば，フーコー振子，投げ上げたラケットのような剛体の回転と並進運動，潮汐作用の解析等の運動に対する理論的解析である。

(53) ウィラード・V・O・クワイン著，「経験主義のふたつのドグマ」(『論理的観点から』，勁草書房，1992) 所収

(54) アンリ・ポアンカレ著,『科学と仮説』(岩波文庫, 1959)

(55) 山内恭彦他監訳,『PSSC 物理』(岩波書店, 1967)

(56) 板倉聖宣著,『物理教育を革命する教科書』(『日本科学技術史大系』第 10 巻, 第一法規出版, 1966) 所収, (科学朝日, 1961 年 12 月号) 初出

(57) M. チェン著, 小出昭一郎・水橋誠二・萩原照男訳,『バークレー物理学演習』(培風館, 1978)

(58) 板倉聖宣著,『仮説実験授業 —— 〈ばねと力〉 によるその具体化 ——』(仮説社, 1974)

(59) 板倉聖宣著,『授業書〈力と運動〉』(国土社, 科学教育研究　No. 6, 1971)所収。この授業書の目的は, PSSC 物理に見られるはんざつな実験を行わずに動力学を指導することにあり, 運動物体, 例えば自由落下をしている物体の速度, 加速度の時間変化を測定する定量的実験は行われていない。授業書の多くの部分が子供達に慣性の法則を理解させることに向けられている。

(60) もしかすると, 渡辺正雄が次に述べるような悲しむべき結果として, 小学生でも放物線と断定できるかもしれない。

「日本では, パラボラが「放物線」と訳されたため, 小学生でも, 物を投げれば放物線を描くものと頭からきめてかかってしまう。改めて物体の投射経路が何になるかを問いもせず, まして, それがパラボラになることに驚きを覚えたりはしないのである。」(渡辺正雄著,『日本人と近代科学』(岩波新書, 1976)202 頁)

(61) 質点という概念が成立するのは, ニュートンの運動の第三法則 (作用・反作用の法則) によって, 物体の各部分間に作用する力が互いに相殺してしまうからである。その結果, 物体はその質量があたかも重心という幾何学的一点に集中したように振る舞うとみなせるのである。これも動力学のホーリスティックな構造を表している。

(62) 例えば, 作用反作用の法則から導入していく教授理論として, 高村泰雄編著,『物理教授法の研究』(北海道大学図書刊行会, 1987 年) がある。

(63) エルンスト・カッシーラ著, 前掲書, 170 頁

(64) 近年, 科学と数学の関係について新しい局面 —— 数学的証明の限界, カオス的な決定不可能性の問題等 —— が注目されている。

John L. Casti, " Confronting Science's Logical Limits ", Scientific American Oct. 1996, pp. 102-105

(65) 最近のオカルト宗教, 超常現象ブームの一因として, 大人と青少年の間で科学的な事柄を説明するという行為に求めるものがずれていることが考えられる。大人にとっては常識的な科学的説明も, 子供に徒っては納得できる原因にまで遡っていない説明なのである。

(66) 芸術家パウル・クレーは,「芸術とは, 目に見えるものを再現するのではなくて, 目に見えるようにすることだ」という言葉を残している。