

M. ヴァーゲンシャインの科学教授論における発生的概念形成の認知科学的意義
 ——「慣性の法則」の教授過程を例にして——

大 高 泉

(教育学部理科教育学研究室)

Kognitivwissenschaftlicher Sinn der genetischen Begriffsbildung
 in der Martin Wagenscheins Unterrichtstheorie der Naturwissenschaft
 —— Am Beispiel des Lehrganges: „Beharrungsgesetzes“ ——

Izumi OHTAKA

(Seminar für Pädagogik der Naturwissenschaften an der Erziehungswissenschaftlichen Fakultät)

Zusammenfassung: Heutige Kognitivwissenschaft hat der Didaktik der Naturwissenschaften neue Erkenntnisse des naturwissenschaftlichen Verstehens in den Kindern gegeben. In der Abhandlung wurde die Bildung des naturwissenschaftlichen Begriffes in dem Wagenscheins genetischen Lehrgang am Beispiel des Lehrganges: „Beharrungsgesetzes“ aus der kognitivwissenschaftlichen Sicht des naturwissenschaftlichen Verstehens analysiert. Aus dieser Analyse ergab sich, daß die Kontinuität des Verstehens als genetisches Prinzip den didaktischen Implikationen aus der kognitivwissenschaftlichen Forschung in dem Inhaltsbereich: „Kraft und Bewegung“ entsprach. Aber zwischen Wagenscheins genetischer Begriffsbildung und den didaktischen Implikationen aus der kognitivwissenschaftlichen Forschung von heute bestand ein Unterschied. Der Unterschied lag darin, daß während die genetischen Begriffsbildung die Kontinuität von dem ursprünglichen Verstehen und Denken der Natur in den Kindern zum naturwissenschaftlichen Verstehen und Denken der Natur voraussetzte, die didaktischen Implikationen den Unterschied zwischen den ursprünglichen naiven Begriffen in der Kindern und den formalen naturwissenschaftlichen Begriffen herausstellte.

I. 序

ヴァーゲンシャイン(M. Wagenschein, 1896-1988)がこの世を去ってから既に3年が経過した。その後も彼の科学教育学・教授学に対する関心は深くまた評価も高い¹⁾。しかし、彼自身のみずからの思想・実践を系統的に語っているとはいえず、彼の科学教育学・教授学はけっして体系化されているわけではない。そこで筆者は、

1960年代後半以降の彼の科学教育論、すなわち発生的教授 (genetisches Lehren) 論を中心に、その構造を解明し、系統的に再構成することを目指してきた。いうまでもなく、彼の教授論は長年に及ぶ実践経験に根ざしたものであり、また彼自身、その教授論を陶冶論的に基礎づけるという試みはある程度行っている。しかし、特に認知心理学的な基礎づけを意識的に試みているわけではない。ヴァーゲンシャインの科学教育学・教授学の体系化の一環として、認知心理

学的観点から彼の科学教授論を基礎づけたり、その意義や妥当性を吟味することが必要ではなからうか。

ところで彼の発生的科学教授は、直接的には科学の再発見的な理解を目指し、究極的には陶冶・人間形成 (Fomatio) を目指している。ヴァーゲンシャインのいう科学の理解には、大別して二つの意味があるといつてよい。無論一つは、自然科学の概念・法則・原理等とそれを生みだしてきた方法を理解することである。もう一つは、自然科学の科学論的理解、つまり自然科学のメタ理解である。彼にとって、自然科学とはいかなるものであり、また「自然科学一般がいかにして成立したか、そしていかにして成立するかを経験すること」²⁾もまた自然科学を理解することの本質に属することなのである。自然科学についてのこうした科学論的考察は自然科学のアスペクトキャラクター (Aspektcharakter) の認識を目指したものであり、自然科学による陶冶成立のための不可欠の前提であった³⁾。このアスペクトキャラクターの認識をいかにして形成するか、これこそが発生的教授論・発生的原理の基軸になっているのである⁴⁾。

この前者の意味での理解については、近年「ブーム」といわれるほど⁵⁾、認知心理学的・認知科学的研究 (以下「認知科学的研究」とする) が興隆し、自然科学の理解や子どもたちの懐いている概念・見方等に関する研究に新たな地平を開きつつある。ヴァーゲンシャインの科学教授論に関するこれまでの研究では、こうした認知科学的観点から彼の科学教授論を吟味するというものは全くといってよいほど存在しない。そこで本稿では、この認知科学的な自然科学の理解研究の知見から、発生的教授論・発生的教授過程を吟味してみることにする。筆者は、これまでヴァーゲンシャインの発生的教授論のいわば内的な構造の解明・再構成を主眼としてきたが、本稿はいわば外的な基準からの彼の科学教授論の究明といえよう。この吟味にあたっては、「慣性の法則」の教授過程を中心事例としてとりあげ、その概念形成を中心に分析する。それは自然科学の理解に関する認知科学的研究の中で

は、「力と運動」に関するものに最も関心が注がれ、他の領域と比べて相対的に詳しく研究されている⁶⁾からにはほかならない。

II. 「慣性の法則」の教授過程構成の基本的視点

1. 「慣性の法則」の教授過程の位置

ここでとりあげる「慣性の法則」の教授過程は、ヴァーゲンシャインの教授論の重点が「範例的」から「発生的」へ移行する丁度その時期に提案されたものである。したがって、この教授過程が発生的教授論に典型的な教授過程の特質をすべて備えているとはいえない。例えば、教授過程の構成における科学史の機能ないし位置づけ一つをとってみても、既に論究した「地球史」の教授過程⁷⁾や「地球の自転」の教授過程⁸⁾とは必ずしも同じではないのである。「慣性の法則」の教授過程を構成するにあたっては、どちらかといえば、特定の初源的な自然現象の観察から、慣性の着想がいかにして発生するかを調べることもよりも、慣性概念の精神史的な分析に重点がおかれていた⁹⁾。これは、「基礎物理学をいかに教授すべきかについて、過去の偉大な物理学者以上にだれがより良い助言をわれわれに与えることができようか」という基本テーゼに基づくものである。というのも偉大であるとはいえ過去の科学者にとって、今日われわれに自明と思われることでさえ驚くべきこと・不思議なことであった。この科学者の事情は、今日の子どもにとっても当てはまる。すなわち、われわれに自明なことも子どもにとっては驚くべきこと・不思議なことであり得るのである。しかもそうした科学者は、みずから発見するだけに留まらず、その発見を他の人々に解らせるという課題に直面したのであった。つまり彼にとっては、「探究し、発見し、納得させることが融合していた」のであり¹⁰⁾、そこには、つまり他の人々を「納得させる」というところには教授学的観点といい得るものがあるのである。こういう論理で、ヴァーゲンシャインは上述の基本テーゼ、言い換えれば、自然科学の精神史的分析の教授学的意義を強調するのである。ちなみに、

「慣性の法則」の教授過程が提案されている箇所
のタイトルは、『物理学の教育的次元』の初版では単に「精神史」となっており¹¹⁾、「発生的教授(精神史)」となったのはそれ以降の版になってからのことであった。しかし科学的概念の形成に限定していえば、「慣性の法則」の教授過程における慣性概念の形成には、たとえ萌芽的で不十分とはいえ、発生的教授論における科学的概念の形成の特質のいくつかが現れていることもまた確かである。そこで先ず、ヴァーゲンシャインがこの教授過程を構成するためにいかなる基本的視点に立っているかを探ることにする。

2. 「慣性の法則」の教授過程構成の基本的視点

ヴァーゲンシャインは従来の慣性の法則の扱いを、「この法則をあまりにも軽く扱すぎ」、「飽きれざるをえない」と酷評する¹²⁾。その理由は2つある。一つは完成された形での慣性の法則を、物理の教科書の多くがその最初の方で扱っているからである。もう一つはより本質的であるが、この法則が、示唆的とはいえ納得しえない実験から引き出されているからである。その結果は、子どもたちがこの法則を理解せずに、ただオオム返しをするだけになっているというのである¹³⁾。

この実験というのは、次のような一連の実験である。すなわち、ある球が株のある畑を転がると遠くへ行かない。平な芝生の上ではきつと遠くへ行く。ざらざらした石畳の上ではもっと遠くへ行く。磨かれた石畳の上ではなお一層遠くへ行く。したがって摩擦が小さければ小さいほど運動はより長く持続する。そしてここから、「摩擦が全くなければ、物体は永久に(unaufhörlich)直線運動をし続ける」という命題をあたかも論理的帰結であるかのように引き出すのである¹⁴⁾。ケプラーもこの一連の実験を当然知っていた。また慣性の法則の教授ではよく引き合いに出される経験、つまり電車がブレーキをかけると電車の進行方向に身体が倒れかかるという経験も彼にとっては周知のことであった。無論、当時は電車ではなく馬に乗っての経験ではある。しかし、いずれにせよ、ケプラーはこ

れらの実験・経験から慣性の法則を引き出し得なかったのである。摩擦がある場合は摩擦が物体の運動にブレーキをかけることは確かであるが、このことと摩擦がない場合には、長い行程の後で物体が静止する傾向にないかどうかは別問題であって、上述の実験では決定できないのである¹⁵⁾。

ところで慣性の法則を理解するには本質的な難しさ、ないし抵抗感があることも否定できない。それは先ず第一に、日常経験がこの法則と反するように思われることである。例えば、床の上で荷物を移動するには、荷物に力を加え続けなければ移動できないし、ましてや摩擦がないにせよ力を加え続けられない場合には、その荷物が永久に運動するようには考え難いのである。さらに、慣性の法則に対するわれわれの理解し難さや抵抗感は、この法則と日常経験との見かけの不整合によるばかりではない。ヴァーゲンシャインは、この法則がわれわれの中に生き続けているアニミズム的な基本態度ともそぐわないところに、そうした理解し難さや抵抗感の本質的原因がある¹⁶⁾、と見ているのである。すなわち、それは、人間も動物も「疲れてしまって」永久に運動を続けることはできず、やがては静止せざるをえないが、生物と無生物の区別がつくようになった後でさえ、無生物、つまり物体にもこのように期待するものである。ゴムナジウムの上級段階の生徒ですら、水の波、音、光についてそれらが途中で「疲れる」ために弱まり次第に遅くなることがあり得るし、それが真実であるとしばしば見做しているのである。したがって、「何らかのものが固有の魂的な推進力(seelenartiger Antrieb)もなく、外的な助けがなくても、運動をかたくなに続けることができるのではないかという期待[慣性運動の存在への期待]に対しては、大人よりも子どもの方がはるかに強固な不信感を懐いているのである。」¹⁷⁾

上で述べたように、ケプラーは通常の慣性の法則の教授において行なわれる一連の実験や引き合いに出される経験については既によく知っていた。それにもかかわらず、摩擦のない場合

ですら、自然の「みずから静止しようとする意志」(von selber Zur-Ruhe-kommen-Wollen)を信じたのであった。ヴァーゲンシャインはこの事実を指摘して、上述の実験から一足飛びに慣性の法則を引き出す通常の教授を批判するのである¹⁸⁾。ケプラーは次のように述べているのである。すなわち、

「世界全体のすべての物質的なもの、あるいはすべての物の資料は鈍重で、ある場所から他の場所へみずから変わるのが下手であり、それゆえ、ある生命によってか、さもなければ外から引かれたり動かされなければならぬ、という類の性質をもっている。あるいは、このようなむしろ無生命的な悪い習慣 (tode Vnart) を有している。……静止したりもしくは留まっているのに……それが (「そのものが」) いくつかの運動に対して悪い習慣があるということに十分である。したがって、ある物体が存在し、そして特に駆動者がいないとすれば、それはいつもおかれていた心地よい場所に静止しているのである。」¹⁹⁾

しかもケプラーは、慣性運動をアニミズム的に考えて、慣性運動の原因として「魂的な力」(sehlenkrafft) を想定していたのである。これは地球の回転についての彼の説明に象徴されている。すなわち、

「地球の回転はある内部的な原因から引き起こされる。……けれども、その回転がたとえ内部的な原因をもっているにせよ、この原因はもの、あるいは物質にあるのではなく……人間の身体に運動する魂的な力が宿っているように、この運動は地球の内面的な力に由来しているのである。」²⁰⁾

ケプラーばかりではなく、彼より100年程前のレオナルド (Leonardo da Vinci, 1452-1519) にとっても、ひとりでに運動している物体 (慣性運動をする物体) には持続的にはたらく外力が必要であった。レオナルドの考えをあげてみよう。

「物体の中で運動原因の激しさ (Heftigkeit) が継続しているかぎり、すべての物体は直線運動を継続する…… [しかし] いかなるもの

もその運動状態に長く留まることはできない。というのは、原因が失われれば作用は起こらないからである。……それが運動している場所で、運動している物体の摩擦が小さければ、駆動者の力は運動体が駆動者から離された後しばらくの間運動体と結び付けられたまま残り、しかも摩擦が小さくなればなるほどそれだけ長く結び付けられている。」²¹⁾

ここにはひとりでに継続する運動、しかも直線運動が存在するが、その原因は駆動者の力の影響である。しかし、この影響はいわば忘れ去られ、摩擦によって消耗されるのである。ヴァーゲンシャインの経験によれば、この見解は偏見をもたないけれども納得することである²²⁾。結局、レオナルドにせよケプラーにせよ、運動についてのアリストテレスの命題、すなわち「運動しているものはすべて本性からか [自然な運動]、あるいは外的な力によってか [強制運動]、または自由な意志によって運動 [生物の運動] している」²³⁾、という命題の多くが生きているのである。そしてヴァーゲンシャインは、こうした見解が子どもの見解と一致しているし、物理学が適切に教えられていないかぎり、現代の大人の見解とも一致しているとするのである²⁴⁾。

いうまでもなく、慣性概念の精神的展開過程の分析はレオナルド、ケプラーに留まらない。ヴァーゲンシャインの分析は、さらにガリレイ、デカルト、ニュートン、そしてアインシュタインにまで及んでいる。とはいえ、こうした分析から「慣性の法則」の教授過程を構成する視点を明確に述べているわけではない。本来、慣性概念の精神的分析は、教師の意識改革のための事例であった。それは、「今日のほとんど専ら素材的で論理的な状態から心理的なものや精神的なものを一緒にとり上げ融合させる態度へ」と教師の意識を変えることである。しかもこの改革は、一人ひとりの教師の精神の中で生じ、ゆっくりと進行するもので、何年もの時間がかかるものである。このプロセスは、決して「熟達」(Fertigwerden)のプロセスではなく、「開眼」(Sehend werden)のプロセスなのである²⁵⁾。

いずれにせよ、ヴァーゲンシャイン自身の教授経験と照らし合わせた、この精神的分析から、「慣性の法則」の教授過程を構成する視点として、彼は少なくとも次のような基本的視点を設定しているものと思われる。先ず第一に、通常の慣性の法則の教授で行われる一連の実験や引き合いに出される電車の中の経験からは慣性の法則は引き出し得ない。第二に、日常経験に反するように思われたり、また人間がもっているアニミズム的基本態度とも相容れない慣性運動を理解するには、摩擦のない状態での慣性運動の観察とその運動が永久に持続するという永続性の確信にこそ理解の鍵がある。第三に、運動を継続する物体の「努力」について語るような、「アニミズム的な語り方に関してそれほど超越していると感じたり、余計なものであると感じてはならない。」²⁶⁾第四に、慣性運動に関するアリストテレスやケプラーやレオナルドの見解は、今日の子どもや大人にも見出すものであるし、その中にはだれもが納得するものさえ存在する。それゆえ、こうした素朴な概念を無視しえないのである。

3. 「慣性の法則」の教授過程

さてそれでは、このような基本的視点にたって、具体的にはどのような「慣性の法則」の教授過程が構成されたのであろうか。ヴァーゲンシャインは3つの教授過程を提案している。これら3つの教授過程はそれぞれ異なった年齢段階の生徒を対象にしていて、全体的に見れば3段階からなる「慣性の法則」の教授過程といえるものである。第一の教授過程は、フォルクスシューレ段階の生徒、つまり12、13歳ぐらいまでの生徒を、第二の教授過程は、14~16歳までの生徒を、第三の教授過程は、ギムナジウムの上級段階の生徒のみ、つまり17、18歳の生徒をそれぞれ対象にしているのである。そして教授過程全体は、前述の基本的視点からも明らかのように、「[慣性運動をしている]物体に摩擦がブレーキをかけることをただ示す実験から、諸条件の理想化を求めるガリレイやニュートンの仮説への移行を成し遂げることを」²⁷⁾目指して

いる。つまり、現実の観察から抽象化し、物体がそれ自体で放置され、影響を受けずに、つまり力を受けずに運動するように、思考実験の中で孤立化させる。そうして慣性運動を想定し、その永続性を確信するようにするのである。

そこで、第一の教授過程では、前述したような馴染のある実験・経験から近似形式の慣性概念を形成する。確かに近似的な慣性概念ではあるが、厳密な形で慣性の法則を理解もしないで口真似するだけよりはましである、とヴァーゲンシャインは考えている。とはいっても、彼はそもそもこの年齢段階の子どもに慣性の法則を教授する必要があるかどうか、また真の方法でそれが可能かどうかについては疑問視しているのである²⁸⁾。第二の教授過程では、地球の回転を例にして宇宙空間で実現されている慣性運動の直線性と永続性について確信するのである。ヴァーゲンシャインはこの教授過程を何週間もかかるが、その代り「理解すれば役に立ち、陶治的である他の多くのものを一緒にとり上げ」、非常に正確でより良い途筋である²⁹⁾と推奨している。第三の教授過程は、「回り道をしないで慣性の法則に至る最善のもの」³⁰⁾で、ここではガリレイによる慣性概念の考察・説明過程に沿って、慣性運動の永続性について確信するように企図されているのである。

ところで、「慣性の法則」の教授過程の提案は、前述のように教師の意識改革の方向性を示すことに主眼があったのであり、それらは授業の計画、いわゆる指導案という形で示されているわけではない。そこで、いかなる学習内容・活動が展開され、またこれに対していかなる教師の活動や指導上の留意点があげられているか、これらの観点を中心にヴァーゲンシャインの「慣性の法則」の教授過程を再構成し、吟味することにする。なお以下の3つの教授過程のタイトルは筆者が付したものである。

(1) 近似的な慣性概念の形成

この教授過程は、通常の慣性の法則の授業で行われる一連の実験や引き合いに出される列車の中での経験を厳密かつ入念に分析することから始める。この実験というのは、本稿のIIの2

で述べたように、摩擦の大きな平面から摩擦の小さい平面まで、それぞれの平面上で同一の球を転がすものである。ここから摩擦が小さくなるにつれて、球の運動が長く持続することが分かる。そしてこの観察から次のことに気づく。われわれが地上で知っているすべての物体は、もしそれ自体で放置されれば、運動状態からいつかは静止すること。しかし、その物体が完全に静止する以前に、まだいくばくか運動し続けようとする。だからといってそれは生きていたのではないこと。そして、こうした「努力」(Streben:「傾向」)というものがそれ自体のものであり得ること。というのは、摩擦が小さくなればなるほど、遠くまで進むからである。こうした運動の「勢い」(Schwung)によって、できる限り先へ進むとする物体のこの「努力」を、われわれはこの物体の「慣性能力」(Beharrungsvermögen)、もしくは「惰性」(Trägheit)と名づけるのである。しかし、教師はこうした一連の実験をするばかりではなく、真空中に投げられたり、もしくは転がされた球が空中よりも(ほとんど同じ状態の下で)ずっと遠くへ進むということを語らなければならない。それは年齢が低ければ低いほど、子どもたちは、空気中における投射体の運動をアリストテレス的に考えるからである。つまり、空気を運動物体の前方ではその運動を邪魔するものと考え、他方その物体の後ろ側ではその物体を推進するものと考えからである。それゆえに、空気の影響がない真空中においても運動物体が遠くへ行こうと「望んでいる」(will)ことを報告しなければならないのである。このことが先の一連の実験よりも決定的なのである。

(2) 宇宙空間での慣性運動の考察

この教授過程は、「全く準備されていない現実」³¹⁾(ganz unpräparierte Wirklichkeit)から出発する。運動させられたものはすべて、それを「そっとしておけば」静止する。運動を持続すべきものはすべて「駆動者」を必要とする。投げられた石、ボーリングのボール、波、流れを見ればこのように思われるのである。川の流れもそうであろうか。それは絶えず上流から流

れ込んでおり押されているのである。では川の流れが海の中でどのように静止するのか。その流れを追いかければよいようであるが、そこには大きな波がある。それを動かしているのは暴風であるが、暴風がないところですら波打っているのである。だが風はいつもどこかに吹いていて、結局波を動かしているのは暴風である。つまり空気が「動いている」のである。けれども空気は「それ自体から」動いているわけではない。太陽がそれを動かしているのである。それはちょうど暖炉が部屋の空気を動かすのと同じである。太陽が絶え間のない貿易風を動かしているのである。もし太陽が毎日地球の周りを回転し、赤道付近の熱を周囲に煽らなければ、貿易風が現在吹いているようには持続し得ないであろう。この時点では、太陽の回転が「見かけ」であると主張する根拠はさしあたり全くない。太陽は絶え間なく運動していて、その熱ゆえに最終的な「駆動者」なのである。しかしその場合、貿易風が赤道に垂直に吹かないということは十分には説明がつかないままである。

さて学習者が、天空の日々の回転が地球の回転の結果であり得るという可能性に漸く気づいたのなら、高い塔から落ちる物体の「東方ずれ」(Ostabweichung)に関する厳密な報告³²⁾によって、そしてそれについて十分考えさせることによって、地球の回転が現実であるということを知得させる。この場合、慣性の法則が既に利用されているのであるが、しかし厳密な形ではなく、上述の第一の教授過程におけるような暫定的な形でのみ利用されているに過ぎない。今度は逆に、地球の回転から厳密な慣性の法則に至るのである。すなわち、東方ずれ、貿易風、フーコー振り子のそれぞれか、もしくはこれらの事実すべてに基づいて地球の回転について知得すれば、そこには何千年来目だった躊躇もなく持続している(というのは一日が長くはならないから)運動があるのである。なるほどそれは決して直線運動ではないが、回転している地球の上の土の塊が、もし地球にぴったりくっついていないとすれば、その土の塊が「本来は」直線的に進み得るということに対するひとつの微

候がある。それが地球の「偏平性」(Abgeplattetheit)である。生徒は土地測量技師のいうそれを当然信じるはずだし、そのために[偏平率の大きい]木星の写真をみると特に信じるであろう³³⁾。この事実は地球の外側の部分[赤道部分]がより速くそのカーブから飛び出したい、離れたいと望んでいる(wegwollen)ということである。回転する地球が慣性運動の永続性(Unaufhörlichkeit)を納得させるのである。慣性運動の直線性(Geradlingkeit)は、その永続性とは少なくとも矛盾しない。しかもこの点については、列車の脱線転覆の多数の事例から既に子どもたちは十分納得しているのである³⁴⁾。

(3) ガリレイの思考過程の探究

この教授過程は、ガリレイがいかにして慣性の法則に至ったかを調べる。ガリレイはいわゆるピサの斜塔で揺れ動く天井灯によって刺激されてか、片側で少しもちあげて離れた振り子が別の側でほとんど同じ高さまで昇ること、そしてさらに、糸を妨害する固定的な障害Aによってより急勾配で上昇するときですら振り子はほ

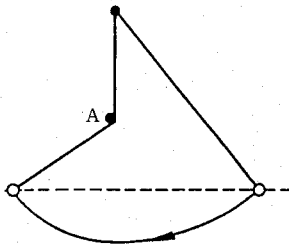


図1

図1 障害Aがある場合の振り子の運動

とんと同じ高さまで昇ることに気づいた³⁵⁾(図1参照)。さてガリレイは振り子の降下を単なる降下としてではなく、ある全体、つまり一つの「ゲシュタルト」の半分と見ているのである。それゆえ、その対称性が気に入ったのである³⁶⁾。彼はその勾配をいろいろと変え、両側でますますなだらかにもしている。彼は上昇を下降の逆と見ている。落下の場合は反対側で上昇する間に再び使われるために速さが蓄積されるのである。この実験によって、道のりではなく、高さだけが最下点での速さにとって規定的であることを容易に思いついた。そしてその球が傾斜Iで険しく、傾斜IIでよりなだらかに、あるいは傾斜IIIでより一層なだらかに、上昇していくかどうかには関係なく、その球は常にそれがやって来たと同じ高さまで昇ることを容易に思いつくのである(図2参照)。しかしガリレイはそこに留ってはいない。彼はその事実を極端化し、それによってその臨界的極限、つまり極端な事例を目指すのである。さらにその場合、この事象を全体構造として見ているのである。すなわち、その上昇は勾配が小さくなればなるほど水平になって行くだろうということを狙っているのである。さてどうなるか。その球は永久に転がり続け、I、II、IIIの場合におけると同じく首尾一貫して挙動するに違いない。すなわち、上昇行程の勾配が険しくなくなればなくなるほど、その上昇行程は長くなるのである。その上昇行程の勾配が全くないとなれば、すなわち水平であるとすれば、その上昇行程は数ではいえないほど長くなる。つまり、行程IVは、「無限に長い」のである。これは、球が永久に進むこと

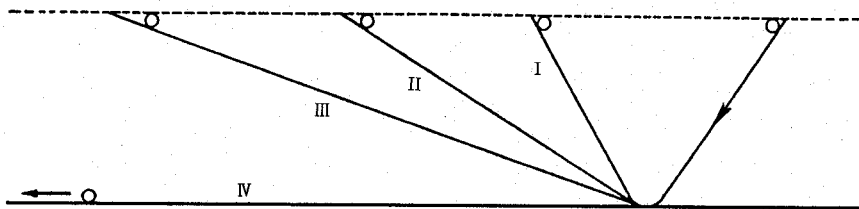


図2

図2 斜面上の運動の極限化

を意味している。「それは、出発点の高さに再び達しようとする、その願望が果され得ないということをその球があたかも知らないかのようにである。」³⁷⁾

I, II, IIIの場合には、すでに摩擦を度外視した場合にのみ、球は元の高さに達するという理想化が、全く「有限なもの」において行われている。厳密に言えば、このことは一つの仮説である。事実は次のことに過ぎない。摩擦が小さくなればなるほど元の高さに近づく。ガリレイの場合、既に抽象化が前もってなされている。換言すればこうである。その球が「元の高さに来ようとすること」(A)は、その球が「永久に進み続けようとすること」(B)よりもずっと容易に信じられる。しかし(A)を言った人は、だれでも(B)を言わざるをえない。これこそガリレイのやり方なのである³⁸⁾。

III. 「力と運動」に関する生徒の概念の実態と教授の指針

1. 「力と運動」に関する子どもたちの概念の実態

自然科学の諸々の概念を子どもたちがどのように概念化し、理解しているかなど、自然科学の理解に関する認知科学的研究は目下、子どもたちの概念や理解の独自性を表現するのに実に様々な術語を用いている。例えば、alternative framework, alternative conception, children's ideas, children's science, intuitive rule, naive knowledge, misconception, preconception, spontaneous idea, students' conception 等々である。無論、ここでは一般的に「子どもたち」というのはいるが、そうした研究の対象は大学生はもとより自然科学者などまでも含んでいることを付言しておきたい。いずれにせよ、このような多様な表現が象徴するように、一口に子どもの概念化・理解の独自性とはいっても、それぞれの研究にはニュアンスがあることは確かである。しかしながら、子どもたちが国家、文化、言語、教育システム、学校経験などの違いにもかかわらず、「どこでも厳密に同じように同じ種類の概念化を発展させている」³⁹⁾、というこ

とについてはかなりの共通理解があることもまた確かなのである。なおここでは、そうした多様な表現を統一し、しかも個別的な概念のみならず、概念相互のシステム的な理解をも含めて「生徒の概念」と呼ぶことにする。

力や電流や熱であれ、原子・分子であれ、概念の如何にかかわらず、このような「生徒の概念」には次のような共通する特徴がある。主たるものをあげれば、先ず第一に、人々は年齢を問わず、科学のフォーマルな学習をする以前に、この概念をもっている。第二に、この概念は年齢、能力、国籍等々にかかわりなく、多くの人々に共有され、「顕著な一貫性・同一性」をもっている。第三に、その概念は自然科学者から見れば受け入れ難く、ポイントが「ずれている」ように思われるかも知れないが、生徒たちにとっては筋が通っていて、受け入れることができ、かつ妥当で、当該現象を説明することができ、もしくは問題の要求に手近に応えるという意味で生きてはたらいっている。つまり、生徒たちにとって、その概念は「自己充足的」(self-contained)なのである。そこには、ある問題に対する答えを選び出すばかりではなく、先ず問題そのものを認定する「自己-レファレンスシステム」(self-reference system)が存在する。第四に、その概念には科学史上現われた旧理論と類似したものもある。第五に、この概念は驚くほど根強く、少なくとも伝統的な教授方法では変え難いものなのである⁴⁰⁾。

それでは慣性の概念についての「生徒の概念」はいかなるものであろうか。自然科学の理解に関する認知科学的研究の中では、本稿の序で述べたように、「力と運動」の領域が最も関心を引いてきた。それは慣性概念にのみ限定されるわけではないが、慣性概念が中心になっていると見てもよいであろう。ここではガンストン(R. F. Gunston)等の研究を手がかりにしながら、「力と運動」の理解についての「生徒の概念」の実態を見てみよう。彼は、これまでの関連する研究から共通項を引きだし、「力と運動」に関する「生徒の概念」を次のような5つの「直観的規則」(intuitive rules)として一般化している⁴¹⁾。

- ①力は生き物とかかわる。
- ②一定した運動は一定した力を要する。
- ③運動の量 (amount of motion) は力に比例する。
- ④物体が動いていなければ、それにはたらく力は存在しない。
- ⑤物体が運動していれば、物体に対して運動方向に作用している力が存在する。

①～⑤それぞれについて、「生徒の概念」の実態をすこし詳しく見てみよう。まず、この①はアニミズムに由来している。子どもたちは、無生物についてもしばしば「生命力」で語る。例えば、自由に運動している物体がやがて止まるのを、子どもたちは「止まりたいから」、あるいは「それ自体止まらざるをえないから」という⁴²⁾。上級段階の物理の学生も、こうした回答をするときがある。例えば、彼らは「重力の意志に逆らって道を切り開こうとしている」物体について語るのである⁴³⁾。次に②は、直接慣性の法則にかかわる。この「生徒の概念」は極めて広範に行き渡っていて変化し難いものである。図3のように斜面から滑りおりてきている人の状況について、この「生徒の概念」は例えば次のように表現されるのである⁴⁴⁾。

「もしここに沿って[水平に]動かし続けたいなら、彼は押し続けなければならない。さもないと力を使い果たし、止まってしまう。」(13歳)

「一定して走り続けるには、あなたは一定して押し続ける必要がある。もしあなたが何かを強制的に動かさなければ、進んで行こうとしないのではないかな。」(14歳)

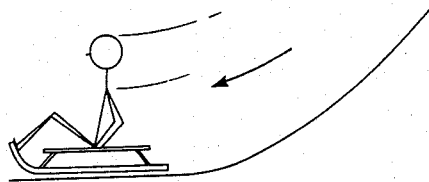


図3

図3 斜面から水平面への滑降

フランス、ベルギー、イギリスの中等学校及び大学の生徒約300～400人に対して質問紙法を用いたヴィエノー (L. Viennot) による調査でも、同様の概念が見出された⁴⁵⁾。他方、ロングフォード (J. M. Longford) らは、摩擦のない(シミュレートされた)条件下での物体の運動についてすら、この「生徒の概念」が強力で執拗であると指摘している。もし、ある物体がある一定の力を受け取らなければ、それを動かす原因となる力が運動の間に「使い果された」、と言われるのである。彼らの研究では、いわゆるドライアイスパックの実験後に、このコンピュータシミュレーションゲームを実施し、一定の速度でそのパックをまっすぐ動かすように生徒たちに求めた。この生徒たちのほとんどは、高名な大学に入ると目される平均以上の能力をもった生徒たちであったが、「物体が運動し続けるなら、その物体に力がはたらき続けなければならない」という考えを懐いていた生徒が全体の50%以上にもなった⁴⁶⁾。

次に③は、簡単にいえば「あるものを強く押しせば押すほど、それは速く(遠くへ)進むこと」を意味する。例えばワッツ (D. M. Watts) らは、イギリス総合制学校の14歳の生徒、125人に対して、空中に鉛直に投げあげられた石にはたらく力や飛んでいる砲弾にはたらく力について尋ねた。その結果は、生徒たちの約85%が力と運動を関連づけていた。例えば、投げあげられた石については次のように説明する。

「ちょうど手を離れるそのとき力は強く上向きに押ししている。それは頂点に達した時下向きに落ち始める。……なぜなら重力は下向きにはたらくているからである。……高さが最高点になると力のはたらかない。[最高点では]まだではあるが、すぐに重力が石を引き下げる。」⁴⁷⁾

つまり、投げあげた時にはその力が「強く」、石が次第に上昇していくにつれて減少し、運動が止まるにつれて力もなくなり、それからは重力がその石を下の方へ引っ張っているように考えられているのである。

このような生徒の説明の中に、既に④が含ま

れている。例えば、ばねにつり下げられて振動する物体にはたらく力を考える中で、中等学校の最終学年の生徒及び大学3年生のおよそ20%の生徒が変曲の位置で、「運動がないことは力がない」ことを意味すると論じた。しかも、そうした生徒は、「 $V_3 = 0$ 、だから $F_3 = 0$ 」, 「 M_3 は静止しているから $F_3 = 0$ 」というような科学で用いられる言い方すらしているのである⁴⁸⁾(図4

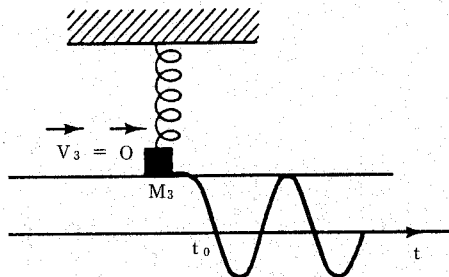


図4

図4 バネにつり下げた物体の運動

参照)。また特に、③の事例のように、運動の静止が一瞬ではなく、静止し続けている物体にはたらく力について考える場合に、この④の「生徒の概念」が顕著に現れる。ミンストレル (J. Minstrell) は、アメリカのハイスクールの物理の授業で、テーブルの上に静止している一冊の本にはたらく力を図示させた。その結果、重力だけが垂直方向の力を及ぼしていると考えている生徒が52%いることが分かった。つまり「テーブルは単に邪魔になっているだけ」、と考えられているのである⁴⁹⁾。他方、ドライバー (R. Driver) は、11歳の子どもにボールベアリングが床を転がってから静止したとき、何がそれを止めたのかを尋ねた。これに対してこの子どもは次のように答えたのである。

「私は知らないわ。それらがなぜ止まるのか。いつでもそれらは止まるのよ。あなたがそれを押した後は、その押しがどれだけ強いかでそれは進むの。それで押しが消えていったらいつものように元〔静止状態〕に戻るの。』⁵⁰⁾

すなわちここでは、④の「生徒の概念」が何か動くのを止めたときの理由としても用いられているのである。

最後に⑤は、鉛直方向への投げ上げや放物運動では、その運動方向に沿って、つまり投げ上げる時には上昇方向に、落下してくる場合には下降方向に力がはたらき⁵¹⁾、等速円運動では接線方向に力がはたらき⁵²⁾と考えるものである。

自然科学の理解についての認知科学的研究が明らかにしてきた「力と運動」に関する「生徒の概念」のうち、主要なものは以上のようなものである。結局、まとめていえばクレメント (J. Clement) が指摘した「運動は力を伴う」⁵³⁾ (motion implies a force) という概念、逆にいえば「力がなければ運動しない、あるいは運動し続けない」という概念がほとんどの生徒に共有され、それはなかなか変化させ難いものであるということである。この「生徒の概念」こそ、慣性の法則に真っ向から反する概念であることはいうまでもない。

2. 教授の指針

さてこうした「力と運動」に関する認知科学的研究は、「力と運動」の教授へどのような方向づけを与えているのであろうか。とはいっても、上記のように「力と運動」についての「生徒の概念」の実態については詳細かつ広範に明らかにされてはいるが、そうした実態を踏まえて一体どのようにしてそうした「生徒の概念」から「科学の概念」へと変換するのか、いわゆる概念変換 (conceptual change) のための教授のあり方についての系統だった研究は、まだまだ未成熟であることは否定できない。そこでここでは、「力と運動」に関する「生徒の概念」の変換のための、換言すれば、「力と運動」の自然科学的概念形成ないしフォーマルな理解のための教授の方向について、これまで指摘されている主な観点をあげておこう。基本になるのは、まず第一に、生徒たちが「力と運動」についての授業を受ける以前に、既に彼ら自身が「力と運動」についての考えをもっているということである。その内容は前項で述べた通りである。第二に、

科学は広範で多様な状況に適應する理論や説明システムを求めるが、子どもたちの概念、説明形式は必ずしもそうではないということである。「力と運動」にかかわる様々な状況に対して矛盾する、とわれわれには思われる概念・見方も、彼らにとってはそうは思われないこともあり得るのである。例えば、物体の落下現象と床の上で物体を動かす現象についていえば、そもそも落下現象を「当然のこと」と考え、敢えて説明する必要がないと考えるかもしれないし、ましてや力と運動の関係から両現象を統一的に説明する必要があるとは考えないかも知れないのである。ガストンは子どもたちのこうした概念・説明形式の特質を「極度の説明おしめ」(parisimony of explanation)と呼んでいる。したがって、第三に、学習者が特定の状況について懐いている概念・見方を学習者自身にはつきりと表現させることが極めて重要である、ということである⁵⁴⁾。

ガストンはこうした基本的観点から次のような7つの具体的観点を上げている⁵⁵⁾。

- ①生徒の見方と科学者の見方の矛盾は、見かけに過ぎないことがある。
- ②生徒たちの見方と相反する経験を提供し、かつそれについて議論する機会を提供する。
- ③新しい概念、つまりフォーマルな科学の概念の「わかりやすい、もっともらしい、実り多い」という特徴を強調する。
- ④生徒の概念・見方を変えるために時間をたっぷりかける。
- ⑤自己の学習について生徒自身に考えさせる。
- ⑥定性的なアプローチを採用する。
- ⑦授業・教科書での言葉の使い方に留意する。これらについては、ほとんど説明を要しないものもあるが、補足説明を加えておこう。

まず①は、例えば前述ミンストレルの研究のように、テーブルの上に乗っている物体にはたらく力が重力だけで、テーブルからの反作用を考えずに「テーブルが固いから」との理由で物体が落下しないことを説明する場合に当てはま

る。これは科学の見方と無論一致しないが、動力学的に力概念を形成している生徒、換言すれば、ある物体に加速度を与える原因としてのみ力を捉えている生徒にとっては、静止している物体にはたらいっている反作用については力としては捉えにくいのは当然なのである⁵⁶⁾。次に②は、生徒たちに自分たちの見方を詳細に説明させた後で、これらの見方に反する諸経験を提供することである。「生徒の概念」の変換に対するこうした反証経験の意義を強調する研究も多い⁵⁷⁾。しかも、明らかに矛盾する観察事実についてどのように理解するか、子どもたち自身に考えさせる機会を提供する必要がある。それは、こうした機会がなければ、自分の見方とは矛盾する観察事実をアノマリーとして簡単に片付けることがあり得るからである⁵⁸⁾。その際いろいろな見方を支持したり、それに挑戦することができるような授業の雰囲気も大事であるし、そうした議論や挑戦力を高めるためには相反する見方に分かれた陣営間で行なう討論形式の授業も有効である⁵⁹⁾、という。

ところでこの②は、「生徒の概念」の変換のためにはそれと相反する経験が必要であるというものであった。しかし、生徒たちにとって、自分の見方に満足できなくなることだけでは十分ではないのである。そのための要件が③である。ヒューソン(P. W. Hewson)は、概念変換をもたらすためには、すなわち「生徒の概念」に取って代わるべき新しい概念や見方、つまり科学の概念や見方が「生徒の概念」との生存競争に打ち勝つためには、「分かりやすい」(intelligible)、「もっともらしい」(plausible)、「実り多い」(fruitful)という3つの要件を満たしていなければならない⁶⁰⁾、と指摘している。ここで「もっともらしい」という要件は、既知の知識と共存できるということであり、「実り多い」とは新しい概念の方が淘汰されるべき「生徒の概念」よりも有効で生産的であるということである。既に前項Ⅲの1で述べたように、授業にもち込んでいる「生徒の概念」は極めて根強い。そのため生徒が自分の概念・見方を理解し、それからオルターナティブな概念・見方との矛盾を解

消していくには時間がかかる。それゆえに、生徒の概念・見方を変えるためには時間をたっぷりかける必要があるのである。これが④の観点である。

さらに、生徒たちが自分の概念そのものについて理解するには、彼ら自身の学習について自分自身で考えさせる必要がある。こうした学習は、力学の概念変換のための重要なアプローチの一つに属しているのである⁶¹⁾。これが⑤の観点である。⑥は力学学習の焦点が正確な数学的理解・処理にある場合、力学の概念を理解せずに公式の暗記に陥りやすいという傾向にかかわる。これに対処するには力学を先ず定性的に扱うことが必要である。これが⑥の観点である。最後の⑦は授業・教科書での言葉の使い方に関するものである。例えば「力はどうしてもある物体に運動を引き起こす」(a force will cause a body to move) という言明は、「運動は力を伴う」というアリストテレス的運動概念を強化する場合があるし、「慣性に打ち勝つ」(overcome inertia) という言明は運動のインペータスの見方のいくつかの側面を強化することがある⁶²⁾、という。したがって、こうした言葉の使用に留意する必要があるのである。

今述べた具体的観点のうち、特に②～⑤は、生徒みずからが自分の懐いている「生徒の概念」を対象化し、その概念の欠陥、不十分性、不整合性、非生産性等を自覚し、フォーマルな科学の概念へとそれを変換するための観点であった。一言でいえば「生徒の概念」と科学の概念との違いを際立たせ、前者から後者への変換を図るための観点といえよう。とはいえ、第一の基本的観点にあったように、その変換はあくまでも「生徒の概念」との関連の中で生じざるをえないのである。結局、ここでは、インフォーマルな「生徒の概念」によりながら、同時にその「生徒の概念」を越えて、フォーマルな科学の概念へ至るというプロセス、いわば弁証法のプロセスが求められているのである。したがって、これらの観点から構想されるべき教授は一般的に言えば「学習者が現時点でもっている知識・概念・見方等々を積極的に利用し、それを

改編しつつ新たな概念をそれに組み込んでいくことを目指す」教授であるといえよう。これを生徒の側から見れば「意味継続的学習」とも呼ばれている⁶³⁾。こうした方向性をもつ教授—学習が望まれるのは他でもない。「われわれは既有的知識との関係でしか物事を理解することができない以上、[例えば「生徒の概念」のような]インフォーマルな知識こそわれわれの理解の源泉である」⁶⁴⁾からである。

IV. 発生的概念形成の認知科学的意義

「慣性の法則」の教授過程を中心事例にしながら発生的概念形成の認知科学的意義の一端を探ることにしよう。既に述べたように、この教授過程が発生的教授過程の特質のすべてを具現しているわけではないので、「地球史」や「地球の自転」など、典型的な発生的教授過程の事例で補完しながらその認知科学的意義を探ることにする。なお発生的教授過程の特質に言及することになるが、その特質のそれぞれの内容にはここでは立ち入らない。この内容の詳細については既に別稿⁶⁵⁾で論究しているのでそちらに譲ることにしたい。

先ず第一に指摘されなければならないのは、ヴァーゲンシャインが物体の慣性、一般的に言えば「力と運動」に関する子どもたちの概念を的確に把握していたことである。本稿のIIの2で述べたように、ヴァーゲンシャインは子どもたちや一般の大人たちにとって、「外力もなく、魂的な力もなく、運動をかたくなに続ける」ということが信じ難いこと、「原因が失われれば作用は起こらない」と考えやすいことなどを指摘していた。これは前項のIIIの1でとりあげた「力と運動」についての「生徒の概念」の②、③、④に相当する。結局、ヴァーゲンシャインは「運動は力を伴う」という「力と運動」に関する「生徒の概念」の核心をつかんでいたといえる。しかも、子どもたちが「力と運動」に関してアニミズム的な考えをもっていること、そしてこのことが慣性の法則を理解する上での障害になっていることをも承知していたのである。

第二に、そうしたアニミズム的な運動概念や子どもの素朴な概念をすぐさま打ち消すような形で教授が構成されてはいないということである。慣性の法則の暫定的な理解から探究の連鎖を通して、宇宙空間での慣性運動の考察に至ったのである。そしてさらに、子どもたちにとって理解し難い慣性運動の永続性をガリレイの思考実験によりながら納得させようとしたのである。ここでは生成的に構成された探究の連鎖を通して、理解の「連続性」(Kontinuität)が保障されているのである。このように発生的教授では「連続性」が重視される。これは、「連続性」がヴァーゲンシャインにとって、「真の理解」(wirkliches Verstehen)の本質的要件だからである⁶⁶⁾。それゆえ発生的教授論では自然に対する子どもたちの本源的な関係・思考、つまり本稿の文脈で言えば、「生徒の概念」などを「誤っている」として消し去るのではなく、新たなものを組み入れ、優先させることに腐心する⁶⁷⁾。これこそヴァーゲンシャインが強調して止まない「変容を受けて維持する」(Verwandelt-Bewahren)という立場である⁶⁸⁾。そのため発生的教授過程では、「自然との関係の子どもらしい初期の段階」を飛び越して、測定、抽象化、系統化、数学化を早めるのではなく、子どもの本源的な自然理解に十分配慮し、それを活用するのである。それゆえ例えば、子どものアニミズム的思考、擬人的思考、世俗的思考、比喩、アナロジー等も発生的教授過程では積極的モメントとして位置づけられているのである⁶⁹⁾。この立場は言語の面でも強調される。すなわち母語(Muttersprache)や日常語ですら、発生的教授過程の展開では積極的な意味をもつのである⁷⁰⁾。無論こうした教授には時間がかかる。ヴァーゲンシャインは、随所で「時間をたっぷりかけること」を力説している⁷¹⁾。この点は前項のIIIの2の④に相当していよう。いずれにせよ、発生的教授過程におけるこうした理解の「連続性」の保障は、そのIIIの2で述べた「意味継続的学習」の立場と相通じるものであろう。これが発生的教授過程の認知科学的意義の第二点であり、中核的意義といえよう。

第三に、発生的教授論においては自然の事物・現象、事実との関連性、ヴァーゲンシャインの言い方では「即事性」(Sachlichkeit)、あるいは「現実の居合せ」(Anwesenheit der Wirklichkeit)、つまり「現象の優位性」が強調される⁷²⁾。ヴァーゲンシャインが最良の教授過程と考えた「慣性の法則」の第二の教授過程では、「全く準備されていない現実」から出発することが基本であった。ここには今述べた「連続性」と並ぶ理解のもう一つの要件がある。すなわち、ヴァーゲンシャインにとって、「理解は現象の上に立つこと」⁷³⁾なのである。これは先に述べたIIIの2の⑥の定性的力学の強調を含んでいることはいうまでもない。

第四に、「慣性の法則」の教授過程では、「ソクラテス的方法」に関連する場面は見られなかったが、ヴァーゲンシャインの教授論では「範例的」、「発生的」の如何を問わず、一貫して「ソクラテス的方法」が重視されている⁷⁴⁾。これは「対話」が思考活動を活発にするからであり、集団における陶冶過程の進行に欠かせないからである。しかも子どもたちに見かけの知識の矛盾、つまり本稿の文脈でいえば、「生徒の概念」の矛盾を自覚させる時に効力を発揮するからである⁷⁵⁾。この点は、前項のIIIの2で述べた教授の指針の基本的観点の第三、すなわち「学習者自身の懐いている概念・見方をはっきりさせる」という観点、そしてそのための具体的観点である②の「生徒の見方と相反する経験を提供し、かつそれについて議論する機会を与える」を含み得るといえよう。

第五に、今述べたIIIの2の第三の基本的観点や⑤の「自己の学習について生徒自身に考えさせる」という具体的観点も、ヴァーゲンシャインの発生的教授論では重視される。すなわち、子どもたちの、自然に対する前科学的な理解・態度から物理学的な理解・態度へと移行する過程の中で子どもたちは、自分たちの変容、つまり物理学のアスペクトをもつことによる変容を絶えずふり返り、反省を加える必要性が重視されているのである。そのため生徒は授業の中で「自分がしていること」に気づかなければならな

いのである⁷⁶⁾。

さてこれまで、発生的概念形成・発生的教授過程の特質と自然科学の理解に関して認知科学的研究で得られた教授の指針との対応を吟味してきたわけである。「力と運動」に関する認知科学的研究の知見と照らし合わせてみた時、少なくとも以上の点が「慣性の法則」の教授過程や一般的にヴァーゲンシャインの発生的教授過程の意義として認められる、と主張しても牽強附会にはなるまい。とはいえ、ヴァーゲンシャインの発生的概念形成・発生的教授過程と「力と運動」に関する認知科学的研究から得られた教授の指針との間には基本的相違が存在することに留意したい。というのも、ヴァーゲンシャインにとっては、「物理学の理解は人間の本質に属していて、それを目覚めさせるだけである」⁷⁷⁾という表現が象徴するように、自然についての子どもの思考から科学的思考への連続性が前提にされているのに対して、認知科学的研究では前項の2の②や⑤の具体的観点のように「生徒の概念」と科学の概念とを相対立するパラダイムとして、どちらかと言えば、両者の相違を際立たせることに主眼があるからである。

V. 結 語

いささか精緻さを欠く部分が残る吟味ではあるが、「力と運動」についての認知科学的研究の知見から、「慣性の法則」の教授過程を中心事例として、ヴァーゲンシャインの発生的概念形成、一般的には発生的教授過程の意義、あるいは妥当性を吟味してきた。無論、この吟味はその一端を示しえたに過ぎないことを断っておきたい。まずそれは、発生的教授過程の特質が、前項のIVで述べたものに尽きるものではないからである。何より発生的原理の中核的原理である、狭義の「根付き」⁷⁸⁾、すなわち自然科学的着想とその直接的基盤になると考えられる特定の自然現象との関連性についての認知科学的妥当性や意義は吟味し得なかった。必ずしも、「連続性」、「即事性」の原理に還元され得ないこの「根付き」

の問題については、「力と運動」に関する認知科学的研究では言及されていないものと思われる。むしろこれは、ヴァーゲンシャインの発生的教授論の独自性の現れともいえるかも知れない。いずれにせよ「力と運動」の領域が、確かに自然科学の理解についての認知科学的研究で最も関心を引き、それゆえに相対的には詳細に論じられてはいるものの、そこから引き出された教授の指針は未だ断片的であり、教授論としてはまだまだ未成熟であることは否定できない。しかしながら、長年の実践に裏打ちされてはいるが、必ずしも心理学的に基礎づけられてきたわけではなかった、ヴァーゲンシャインの発生的教授論が認知科学的観点から見ても少なからぬ意義と妥当性を有していることは確かである、といっても過言ではないと思われる。

註

- 1) H. Chr. Berg, G. Gerth und K. H. Potthast (Hrsg.), *Unterrichtserneuerung mit Wagenschein und Comenius Versuche Evangelischer Schulen 1985-1989*, Münster 1990. H. Rumpf, Erlebnis und Begriff, Verschiedene Weltzugänge im Umkreis von Piaget, Freud und Wagenschein, in: *Zeitschrift für Pädagogik*, 37. Jg., 1991, No. 3, S. 329-346.
- 2) M. Wagenschein, *Naturphänomene und Verstehen, Genetischer Lehrgänge* (以下, NSV と略記), H. Chr. Berg (Hrsg.), Stuttgart 1980, S. 97. ただし……は筆者の中略, 以下同様。
- 3) 詳細は拙稿, 「自然科学の陶冶価値の認識構造分析—M. ヴァーゲンシャインの物理教育論の場合—」, 教育方法研究会, 『教育方法学研究』, 第七集, 1986年, 63-85頁参照。
- 4) 詳細は拙稿, 「M. ヴァーゲンシャインの科学教授論における「発生的」の概念とその変容」(以下, 拙稿 I と略記), 教育方法研究会, 『教育方法学研究』, 第八集, 1988年, 109-127頁参照。
- 5) H. Pfundt und R. Duit, *Bibliography Students' Alternative Frameworks and Science Education*, Kiel 1988, S. v.
- 6) R. F. Gunstone and M. Watts, Force and motion, in: R. Driver, et. al. (ed.), *Childrens' Ideas in Science*, Open University Press 1985, p.

- 85.
- 7) M. Wagenschein, *Ursprüngliches Verstehen und exaktes Denken II* (以下, U IIと略記), Stuttgart 1970, S. 68ff. この教授過程の分析は, 拙稿, 「M. ヴァーゲンシャインの科学教授論における発生的教授過程の特質」(以下, 拙稿IIと略記), 教育方法研究会, 『教育方法学研究』, 第九集, 1990年, 37-59頁参照。
- 8) M. Wagenschein, U II, S. 25ff. この教授過程の分析は拙稿, 「M. ヴァーゲンシャインの科学教授論における教材の『発生的メタモルフォーゼ』—『地球の自転』の教授過程を例にして—」(以下, 拙稿IIIと略記), 『高知大学学術研究報告』, 第39巻, 社会科学編, 1990年, 19-32頁参照。
- 9) これはヴァーゲンシャインの教授論における「歴史発生から子ども発生への重点移行」の問題である。詳しくは, 拙稿I, 109-127頁参照。
- 10) M. Wagenschein, *Die pädagogische Dimension der Physik* (以下, PDPと略記), 3. ergänzte Aufl., Braunschweig 1971, S. 263f.
- 11) M. Wagenschein, *Die pädagogische Dimension der Physik*, I. Aufl., Braunschweig 1962, S. 246.
- 12) M. Wagenschein, PDP, S. 265.
- 13) Ebenda, S. 266. ヴァーゲンシャインは, 「物理の授業の最初に先ず覚え込まされた法則が慣性の法則であった」というアインシュタインの話为例としてあげている。A. アインシュタイン, L. インフェルト (石原純訳), 『物理学はいかに創られたか』, 岩波新書, 1978年, 上巻, 10頁。
- 14) M. Wagenschein, PDP, S. 265.
- 15) Ebenda, S. 266.
- 16) Ebenda, S. 271.
- 17) Ebenda, S. 271. ただし [] は筆者の補足, 以下同様。
- 18) Ebenda, S. 266.
- 19) N. Copernicus, *Erster Entwurf seines Weltsystems*, F. Rossmann(Hrsg., übers., u. erl.), Darmstadt 1986, S. 83ff.
- 20) Ebenda, S. 86f.
- 21) M. Wagenschein, PDP, S. 268.
- 22) Ebenda, S. 268.
- 23) Ebenda, S. 268. アリストテレスは, 月下界の運動を外部から力を受ける「強制運動」と「自然運動」とに二分する。「自然な」運動とは, 物質の中の「原質」(地球の核心から順に土・水・空気・火)が, みずからの「自然な」場所に至ろうとする「自然な」傾向にしたがって行われるものである。火にとっては, その「自然の」場所である最上殻に向かって立ち昇ることが「自然な」運動であり, 土にとっては, 地球の中心に向かおうとすること, 例えば, 落下することが「自然な」運動である。アリストテレスの運動論の詳細は, 例えば, 村上陽一郎, 『西欧近代科学』, 新曜社, 1976年, 153-164頁参照。
- 24) Ebenda, S. 268.
- 25) Ebenda, S. 275. ここでは精神的分析が中心であるが, ヴァーゲンシャインはやがてこういった発生的教授論に特有な教材研究の手続きを「発生的メタモルフォーゼ」と呼ぶようになる。拙稿III参照。
- 26) Ebenda, S. 267.
- 27) W. Köhnllein, *Die Pädagogik Martin Wagenscheins*, Diss., 1973. S. 468.
- 28) M. Wagenschein, PDP, S. 272.
- 29) Ebenda, S. 272f.
- 30) Ebenda, S. 273.
- 31) Ebenda, S. 272.
- 32) W. Brunner, *Dreht Sich die Erde?*, Leipzig und Berlin 1915, S. 19ff. あるいは, M. Wagenschein, U II, S. 45. なおこの実験と理論の詳細については, 拙稿III, 24-29頁参照。
- 33) 楕円体である地球の切り口の楕円の長軸を a , 短軸を b とすると, 偏平率 f は $f = (a-b)/a$ で示される。国際楕円体 (1967年) では $f = 0.0034$ である。ちなみに, 木星の偏平率 $f = 0.065$ である。例えば, 横山泉監修, 『地球』, 東海大学出版会, 1986年, 6-15頁参照。
- 34) M. Wagenschein は物体の慣性由来する遠心力の教授についても度々詳しく語っている。例えば, M. Wagenschein, PDP, S. 211ff. あるいは, M. Wagenschein, *Das genetische Prinzip als ein Weg zur Intensivierung des Unterrichts*, in: *Gymnasium Helveticum*, Sonderheft, Juni, 1972, S. 339.
- 35) G. ガリレイ (今野武雄, 日田節次訳), 『新科学対話』, 岩波文庫, 1975年, 下巻, 31-32頁参照。
- 36) ここでヴァーゲンシャインはウェルトハイマーの分析を手がかりにしている。M. ウェルトハイマー (谷田部達郎訳), 『生産的思考』, 岩波書店, 1974年, 207-216頁参照。
- 37) M. Wagenschein, PDP, S. 274.
- 38) G. ガリレイ (青木靖三訳), 『天文対話』, 岩波文庫, 1975年, 上巻, 222-226頁参照。ただし, ガリレイにとって, 永久に続く水平面は地球の表面であり, 結局, ガリレイの「慣性」運動は等速円運

- 動であった。
- 39) R. F. Gunstone and M. Watts, *op. cit.*, pp. 85-86.
- 40) 例えば R. Gunstone and M. Watts, *ibid.* p. 86. A. B. Champagne, et. al., Naive knowledge and science learning, in: *Research in Science & Technological Education*, Vol. 1, No. 2, 1983, p. 174. J. Clement, Students' preconceptions in introductory mechanics, in: *American Journal of Physics*, Vol. 50, No. 1, 1982, p. 70. K. M. Fischer, A misconception in biology: aminoacids and translation, in: *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 22, No. 1, 1985, p. 53.
- 41) R. F. Gunstone and M. Watts, *op. cit.*, pp. 91-98.
- 42) 既にピアジェもこうした概念を指摘している。J. ピアジェ (田辺振太郎, 島尾元訳), 『発生的認識論序説』, 第二巻, 物理学思想, 三省堂, 1976年, 79-80頁。
- 43) R. F. Gunstone and M. Watts, *op. cit.*, p. 91.
- 44) *Ibid.*, P. 92.
- 45) L. Viennot, Spontaneous reasoning in elementary dynamics, in: *European Journal of Science Education*, Vol. 1, No. 2, 1979, pp. 205-221.
- 46) R. F. Gunstone and M. Watts, *op. cit.*, pp. 92-93.
- 47) D. M. Watts and A. Zylberztajn, A survey of some children's ideas about force, in: *Physics Education*, Vol. 16, 1981, p. 362.
- 48) L. Viennot, *op. cit.*, p. 206-209.
- 49) J. Minstrell, Explaining the "at rest" condition of an object, in: *The Physics Teacher*, Vol. 20, 1982, January, p. 12.
- 50) R. Driver, *The Pupil as Scientist?*, Open University Press 1983, p. 26.
- 51) J. Clement, *op. cit.*, p. 67.
- 52) R. F. Gunstone and M. Watts, *op. cit.*, p. 87.
- 53) J. Clement, *op. cit.*, p. 67-70.
- 54) R. F. Gunstone and M. Watts, *op. cit.*, p. 98.
- 55) *Ibid.*, pp. 99-102.
- 56) J. Minstrell, *op. cit.*, pp. 12-14. 彼は, 反作用概念の形成のための教授指針を上げている。
- 57) 例えば J. Clement, *op. cit.*, p. 70.
- 58) J. A. Rowell and C. J. Dawson, Laboratory counterexamples and growth of understanding in science, in: *European Journal of Science Education*, Vol. 5, No. 2, 1983, pp. 203-215. 科学理論の転換とアノマリーとのかかわりについての議論は, 例えば, Th. クーン(中山茂訳), 『科学革命の構造』, みすず書房, 1975年, 58-73頁参照。
- 59) A. D. Champagne, R. F. Gunstone and L. E. Klover, Effecting changes in cognitivestructures among physics students, in: L. H. T. West and A. L. Pines(ed.), *Cognitive Structure and Conceptual Change*, Academic Press, 1985, pp. 163-186.
- 60) P. W. Hewson, A conceptual change approach to learning science, *European Journal of Science Education*, Vol. 3, No. 4, 1981, pp. 386-389.
- 61) A. D. Champagne, R. F. Gunstone and L. E. Klover, *op. cit.*, pp. 163-186.
- 62) P. F. Gunstone and M. Watts, *op. cit.*, p. 101.
- 63) 村山功, 宮下孝広, 「科学における問題解決と理解」, 岩波講座, 『教育の方法』, 第6巻, 岩波書店, 1987年, 67頁。
- 64) 村山功, 「自然科学の理解」, 『教科理解の認知心理学』, 新曜社, 1989年, 135頁。
- 65) 拙稿II, 拙稿III, 及び拙稿, 「M. ヴァーゲンシャインの科学教授論における発生的原理の構造」(以下, 拙稿IVと略記), 『高知大学学術研究報告』, 第38巻, 社会科学編, 1989年, 55-67頁参照。
- 66) M. Wagenschein, U II, S. 179. 詳細は拙稿II, 45-46頁, 拙稿IV, 58-60頁参照。
- 67) Ebenda, S. 27.
- 68) Ebenda, S. 91, M. Wagenschein, *Ursprüngliches Verstehen und exaktes Denken I* (以下, U Iと略記), Stuttgart 1970, S. 383, M. Wagenschein, PDP, S. 110f. これは, もともとシュブランガーの概念である。E. シュブランガー (岩間浩訳), 『小学校の固有精神』, 槇書房, 1981年, 67頁。
- 69) M. Wagenschein, PDP, S. 83, 87.
- 70) M. Wagenschein, U II, S. 153, 162. M. Wagenschein, U I, S. 383.
- 71) Ebenda, S. S. 68, 72f, 97f. M. Wagenschein, NSV, S. 101, M. Wagenschein, U I, S. 525.
- 72) M. Wagenschein, U II, S. 153, 162. 詳細は拙稿II, 47-49頁, 拙稿IV, 60-62頁参照。
- 73) M. Wagenschein, NSV, S. 97.
- 74) W. Köhnlein, a. a. O., S. 495.
- 75) 拙稿II, 53-54頁参照。
- 76) M. Wagenschein, PDP, S. 108.
- 77) Ebenda, S. 120. 同様の主張は例えば, Ebenda, S. 73, 78, 120. M. Wagenschein, U I, S. 176, 331.

78) 拙稿IV, 62-64頁参照。

平成3年(1991)9月29日受理

平成3年(1991)12月27日発行

