



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	物理的「量理論」ノート
Author(s)	倉賀野, 志郎
Citation	教授学の探究, 2, 25-41
Issue Date	1984-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/13516
Type	departmental bulletin paper
File Information	2_p25-41.pdf



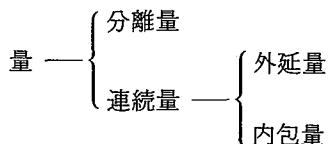
物理的「量理論」ノート

倉賀野 志 郎
(北海道教育大学・釧路分校講師)

序 章

数学教育上では、数学教育協議会を中心に1958年以来、「量理論」については既に様々に論じられている。

遠山啓氏は「量こそは算数教育の背骨をしめる重要問題だと断言してもまちがいない」¹⁾(1959年)とし、量の「体系化に成功したなら、小学校の算数教育の困難は大部分が解消するであろう」²⁾(1960年)と述べている。ここでは「量は抽象的な数と具体的な現実の中間にあって、その二つを結びつける半具体・半抽象的なものと考え」られている。図式化すれば「数—量—現実」となる³⁾。この上で「量の体系」について次のような区分を行ない、とりわけ外延量、内包量に関して数の四則演算との対応関係が展開された³⁾。



このような経緯からするならば、「量」について語るとしても今さらと感ぜられるかも知れないが、1970年代に入って高橋利衛氏、小島順氏、田村二郎氏らによって「量理論」に関する一連の「議論」が行なわれた⁴⁾。

例えば小島順氏は「[どう教えるか]ばかりがいつも議論され、[ほんとうは、それが何であるか]という問題が軽視されすぎている」⁵⁾として、「ともすれば、外延量、内包量という区別は、量の関係を扱うその都度の状況を離れて、固定的な分類として、お題目のようになえられがちである」が「実際は、固定的な分類ではうまく行かない」⁶⁾としている。

また小島氏は「数教協などでは——[量の抽象が数である]というのが正しい」としているようだが「事実をありのままに見ると、数=量の比 という[関係概念]がまずあって、[実体概念]である量はそれをもとに表現され」ており「物体—実数という量規定では、かんじんの量代数(量の演算の構造)の部分が抜け落ちる」⁶⁾のではないかと批評している。

一方、高橋利衛氏は「数学教育協議会第6回大会における遠山啓氏の問題提起は——画期的な出来事」で「氏は小学算数教育として——初めて、[外延量と内包量]という量規定が、量の計算に見通しを与えることを指摘した」⁶⁾としながらも、「およそ物理的な量は現象生起の場の構造と、それを支配する法則の体系および観測法とから切り離して、性格付けを行なうことはできない」し、ある量が例えば「内包量」だとするならば、それが「内包量だということはいかなる意味においてか、物理的に問うべき」であると主張している⁷⁾。もし「物理法則の体系、現象生起の場の構造および観測法の問題との関連へ向けて、量規定の態度を開いてゆか」なければ「外延量・内包量という規定性に立却した[量の理論]なるものは、個々の挙例や立言が決して誤りとはいえないにもかかわらず、視座の交錯と恣意性とが理科学習の進展とともに目

立ってくることになる」⁸⁾。

このような一連の動きのなかで、高橋氏に見られる物理教育サイドから「物理的」という形容詞をつけた「量理論」に関して覚え書きとして整理したのが本稿である。しかし、高橋氏の〔膨大な〕内容を秘めていると思われる著作にまだ充分に取り組めていないのが実情で、物理的「量理論」を全面的に展開するものには到っておらず予備的視点のノートをまとめたものにすぎないことを最初にお断りしておく。

I 章 物理的「量理論」の課題

まず、この「ノート」のまとめ的な部分を最初にしめしておこう。以下叙述されていることは、この「まとめ」以上のものではない。

物理的視点からの「量理論」を考察していくにあたっての諸課題を次のように設定している。

- 1) 数学教育上で遠山啓氏らを中心に展開されている「現実一量一数」の「現実一量」の部分は、自然科学的諸量にかかわって考えていく時、認識過程の細かいひだまで吟味しなければ、そのままでは「素朴实在論的性格」をぬぐいきれないと考える。

また、物理などの自然科学における「量」の問題を考えていくためには哲学上の概念規定そのものの吟味も必要になってくると思われる。

- 2) 高橋利衛氏の「現象生起の場の構造、それを支配する法則の体系および観測法」という視点からの「量の理論」についての考え方、および小島順氏の「量理論」の考え方は、一面では物理学等が〔日常的〕に行なってきたことの背景へとせまるものであると考える。〔日常的〕に行なわれているものへの「量」という視点からの「反省」、数学というサイドからではない自然科学サイドからの「量」への「反省」が今、問われていると思われる。
- 3) 物理的視点から「量」を考察していく時、その「量」の「論理構造」の分析とともに、その量が表現しようとしている物理的实在にまでもどって「表現」そのものの妥当性、物理的意味が問われなければならない。「表現論」に含まれている物理的意味という点が物理的「量理論」においてはとりわけ重要であると考え。 (町田茂氏は「存在そのもの」と、「存在の数学的表現」と、その「存在についての測定値」という3つの概念の区分を行なうことの重要性を指摘している。「物理量そのものは、その数学的表現と測定値とがどうであれ、その実体の属性として存在するもの」で、「古典物理学ではこの三つの同一性が暗黙のうちに仮定されている。」「物理学における自立的実体と対象性」『現代科学と物質概念』所収 青木書店1983年)
- 4) 高橋氏は「法則の体系」と合わせて「観測法」という視点からも「量」を吟味することの必要性を強調しているが、当の物理的量の概念の形成史は、その量の測定史とのかかわりを必然的にもっていると考え。物理的「量理論」という視点からの測定史とかわった概念形成史の分析も必要であると考え。
- 5) 教授学からみた J・ピアジェの「発生的認識論」のひとつの読み方として、かれの考え方が十分に「圏論」(カテゴリー論)⁹⁾にまで深められていなかったが故に不充分さを有している、と考えることも論理的には可能であろう。物理学の後述するような「群論化」しつつある状況に基づく時、物理的「量」の「圏」という視角からの分析は、「原科学」¹⁰⁾等を考えていくにあたっての何らかの手がかりを与えてくれる可能性があると思われる。(ノートでは、この問題には触れていないが、別の機会に論じたい。)この意味で「ピアジェの成果を吸

取し、その理論の中に内在している困難や未開拓の分野を内在的に発展させ、これまでのピアジェの成果をより高次の普遍の中の特殊として位置づける」(田中昌人)ことを教授学から考えていくこともできるのではないだろうか。

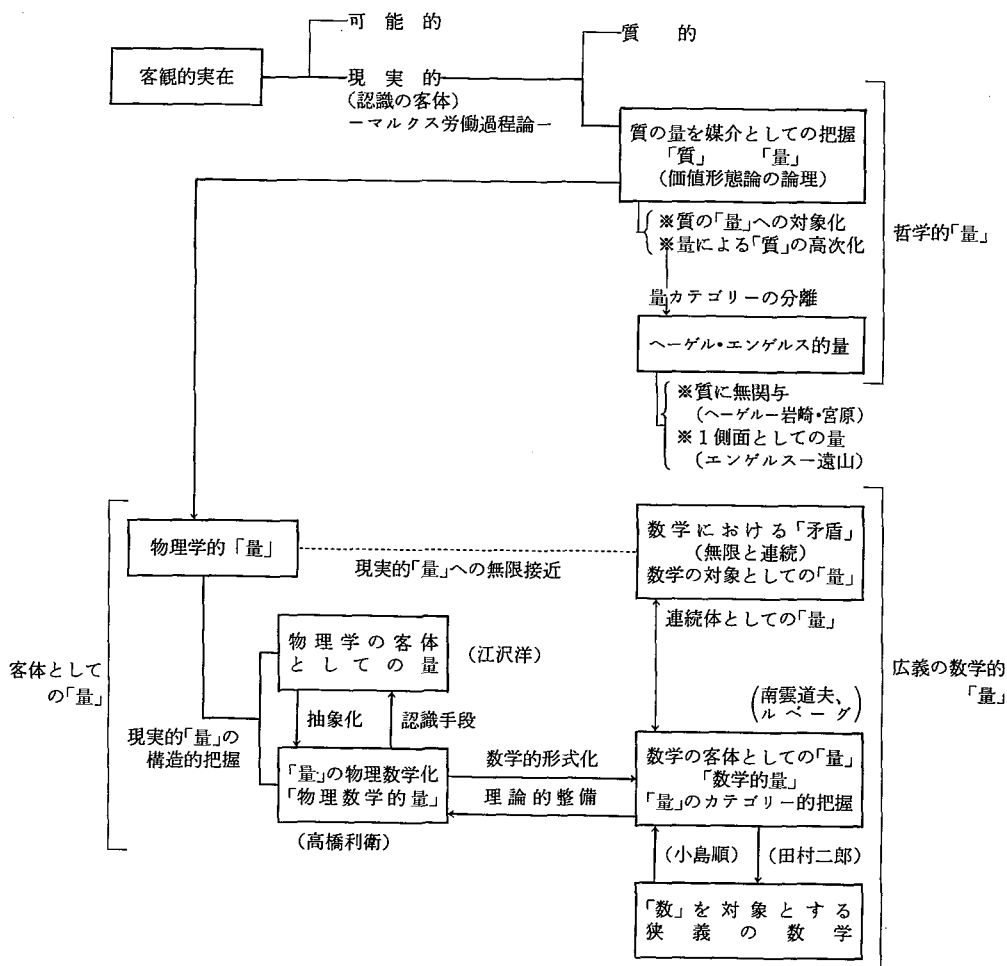
6) 物理的視点からの「量」の認識論、表現論、論理構造等への分析は、数学教育上での「量理論」とは異なった局面を明らかにしつつ、それらに何らかの示唆を与える可能性がある。

以上の点を個々の「物理的」に即して吟味していくこと——これはたいへんな課題であるが、物理的量の認識過程と論理構造の分析をその内に入れているので、教育内容・教材構成を考えていくにあたって、実りある成果をそこから多く生み出す可能性をもっていると考えられる。

まず最初に、「量」について現在考えていることの全体を「見取図」としてしめておこう。「図」の細部を問われると問題を含むものとなっているが、大枠の設定ということで見ていただきたい。本稿自身がノートなので、あえて割り切った形で図式化されている。

全体は、哲学的「量」、客体としての「量」、「広義の数学的『量』」の3つの部分に区分されている。物理的「量理論」は「客体としての量」の部分を中心となるが、他の2つの領域ともかかわっている。

以下、見取図と合わせて、前述の「課題」の1)~4)に関して補足的な説明を加えておく。



「課題1」に関して

労働過程論においては、働きかけの対象としての「客体」は、労働手段のレベルによって規定されており、客観的実在の手段に応じた形で客体化した対象にしか働きかけることはできない。このような「主体と客体との相互作用と認識活動」においては「人間という主体にとって、まだその活動の領域に入ることなく可能的に客体であるにとどまるものが与えられた歴史的諸条件のもとで人間の活動の領域に入り現実的な客体となる。」¹¹⁾

「質と量」との関係を経験論的側面で、以上の点を考慮して考察する時、「客観的実在——量」という「反映論」は、その認識過程の各段階をさらに細かく吟味していかなければならないと思われる。

「質——量」の認識過程を細かく考察していくにあたって、いささか機械的ではあるが、認識段階を作業仮説として次のように設定している。

- 物理量は、ある測定手段における「量的測度」として構成される。

この段階での「量」はまだ直接的なものであり「構造」はいまだ無規定である。質に対する素朴な観念は「測定」のうちに具現化される。

- 「直接的量」により展開されたものとして「質」は認識主体に測定手段によって規定される質、として把握される。

「測定手段」による客観的実在の「客体化」がここで起こる。この段階で当の概念はいまだ現象的なものではあるが構成される。

測定手段の明確化と、当の対象である「質」の明確化とは、相まって進む。

- 「手段」そのものの意識化と、「直接的量」の測度論的考察。

手段の明確化と量の構造の手段に規定されながらの展開による当の概念の「操作的」規定。

「量」概念の「操作的規定」は、その「操作」によってのみ「量」が規定しえるという「操作主義」的な主張に基づくものでなく、認識の一段階として、「質」に対するまだ本質にまでは達していない、ある意味では実体的段階の認識レベルにおいて「操作」の体系として当の概念があらわれることを意味している。「操作」の明確化は「質」の認識に対する反省をせまることとなる。

- 「操作・手段」の意味の明確化——「質」に対する理論的考察、「質」の本質的理解への深化。
- 「量」そのものの構造の理論的整備。

本質に基づかない段階での「操作」、「量」は実体的な意味をもちつつも必然的なものとしては構成されていなかった。「質」の本質への深化は「量」概念そのものも、その意味と必然性、限界性を明らかにしつつ深化させることになる。この段階では、「測定手段」の理論的視点よりの改革も起こる。

- 客体として把握された「質」の客観的実在への無限接近。

「質」の「実在」への接近は、「量」概念の深化を媒介としつつ起こる。また「量」はその過程で、その有する論理構造を公理的に整備していくことによって、何が前提として設定されているのかを明確化していき、理論は数学的に整備されていく。

図式の「物理学的〔量〕」が「物理学の客体としての量」と「量の物理数学化」と相まった形で、現実的「量」へと無限接近していくという部分は以上のことを要約的に整理したものであ

る。「質」への認識の深化の部分には図では捨象されているが、それとの対応関係の中で「量」概念の深化が起こっている。

「質」概念から抽出された「量」概念に基づく「質」そのものの深化とそれによる「量」そのものの「論理構造」の深化——これらは「質」と「量」との関係を客体—主体の認識過程論上のカテゴリーとして把握していくことを意味している。この視点からすると、ここでの「課題」は、認識過程論上に位置づけられた「質」と「量」とのカテゴリーを個々の物理的「量」に即して再吟味していく、ということになる。

このように考えてくる時、「質」との認識論的かかわりを論じながらも、「質」の「一側面」として「量」を論ずる考え方や¹²⁾、「質的無関与性」として「量」を論ずる考え方も¹³⁾、その概括の仕方にいくつかの不十分さを残すものになっていると感じている。「量」概念そのものも再吟味されなければならないのではないだろうか。例えば、あるひとつのエネルギーなら「エネルギー」という「量」概念の理論構成上の深化という問題は「実在——量」という規定では、少なくとも論じきれないものであろう。

また、これは十分に根拠づけえるものではないのだが、マルクスの「価値形態論」における「量」概念は、この認識過程論的視角に基づく吟味の場合、十分に考慮されるべきものではないかと考えている¹⁴⁾。「数学手稿」も、この視角から考える時、いくつかの課題を提起していると思われる¹⁵⁾。

「課題2」に関して

「課題1」のような「質」と「量」との認識過程論的な局面に着目するとともに、「量」そのものの「論理構造」と、そのような「論理」のうち「表現」される物理的な「質」という問題も考えざるをえない。「課題2」はこの点にかかわっている。

小島順氏は「小学校以来の量の計算を公理的線型代数の立場から見直す」¹⁶⁾という視点を設定している。

「量の計算——は、常に〔単位つき計算〕であって、実数の四則演算はその部分的な断面に過ぎない。その数学的形式を整備する第一歩は——〔公理主義〕の立場をとること」である。

「第二は〔カテゴリー主義〕で、量の計算というものを個々の線型空間の中の演算としてではなく、カテゴリー全体の中の写像の合成やテンソル積として理解すること」である¹⁷⁾。

すなわち「〔数代数〕とはっきりと区別された〔量代数〕の世界を意識することが重要」であるということである。また「数」と「量」との関係についても「量を抽象しても数とはならず〔数は量の比にすぎない〕¹⁸⁾として、次のようにその関係を述べている。

「量の空間そのものの抽象化として実数体があらわれるのではない。実在とのつながりを考えると、まず同種類の量の空間 X が意識される。 X においては加法は意味をもつが、乗法は——少なくとも X の中の積としては意味をもたない。しかし、 X の2つの元の〔比〕を考えると、この〔比〕は X に作用する。この作用の合成として比の乗法が定義され——こうして一つの量の空間 X に対して倍変換の体 $\text{END}(X)$ が作られ X は $\text{END}(X)$ 上の線型空間となる。さまざまな量の空間に対する $\text{END}(X)$ の本質的同一性を意識するとき、実数体 R が生まれる。」¹⁹⁾

銀林浩氏は、これに対して次のような意見を述べている。

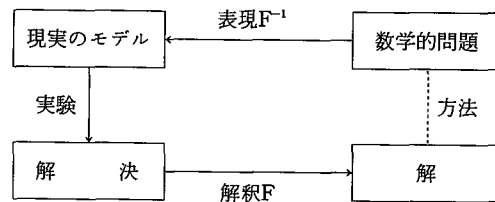
「筆者の関心が、人間はさまざまな量の概念をいかにして獲得してゆくのかという、いわば発生的な点にあったのに対して、小島氏の目的は、完成されたおとなの頭の中にあることを分析する、いわば量の文法にある」。しかし「文法を問題とする〈共時的〉立場と、発達に注目する〈通時的〉立場とが矛盾することを意味」とは考えない、「むしろ、この両者が相補って〔意味の解明〕を完うしうるのだと思う。」²⁰⁾

事実、銀林浩氏は「数学教育」において「子どもの学ぶ——初等数学は、それ自体で構造をもっている」として「量の体系」を「ピアジェの評価した現代数学のカテゴリー論が——有効な分析視角を提供した」としながら「量と関数のカテゴリー」についての分析を行なっている²¹⁾。

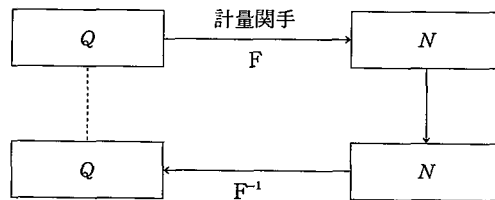
「カテゴリー(圏)の理論では、対象(object)と型射(morphism)が一体のものとして扱われ、「量」の場合、「量」がその対象で、法則あるいは関数、特に正比例関数が型射にあたり「量圏」が構成されるとしている²²⁾。(1975年)

さらに「圏論」の「カテゴリー」や「ファンクタ(関手)」というような「用語」を「流用」して次のような図式化もおこなっている²³⁾。(1980年)

図式A



図式B



「図式(A; 引用者)の中の一つの過程である定式化Fは、現実世界というカテゴリーから数学の世界というカテゴリーへ移る関手」で、図式Bでは、「量の世界から数の世界への関手」を「計量関手」として、「量の世界Qでの要素や操作や関係を関手Fによって一度数の世界Nに移し、そこでの演算や対応規則によって答を求めてからそれを再び量の世界Qへもどす、といったことをやっている」と「量」について説明している。「大事なのは、両者を意識的にハッキリ区別して、しかも関手Fによって両者の間を自由に行き来することである」ということになる²³⁾。

〈共時的〉立場(「量の文法」, 「量」の「公理主義」的把握)と〈通時的〉立場(「発生的」)との両者が相補って進むことに異議をはさむつもりはないが、しかし、銀林浩氏の立場がその解決の糸口への展望をさししめすものになっているかは吟味に値すると思われる。少なくとも銀林氏の立論に関して、次のような問題点があると考えている。

銀林氏は「量のカテゴリー」に基づいて、従前の「外延量, 内包量等」についての説明を行

なっているが、カテゴリーカルな吟味をするためには、その「量」そのものの「論理構造」を「射」とともに物理的意味にまでくいいって行なう必要がある。「圏」という道具立てで考察していくことの意味は、その点にあるはずである。

さもないと、ただ単なる実在との対応、モデルとの対応というレベルのことを数学的に「粉飾」したと思われることになりかねない。数のカテゴリーとの関手も同様である。この図式を使用する限り、小島順氏の方がさらに物理的内容に一步、踏みこんだ形で分析を行なっている。

高橋利衛氏は、小島順氏の「量理論」が、「量把握を可能ならしめる数学的根拠に、われわれの住むこの自然空間の、ユークリッド・アフィン構造性があること」を示した、と評している。

小島氏は、ここで「量の計算——我々が日常の生活で計算しているその仕方、あるいはその際の意識のようなものをそのまま、全面的にとらえようとすれば、どうしてもそれなりの形式が必要である」として、日常的な「量」の〔対自化〕の方法論として「公理主義」の立場をとっている。「圏論」が「量」の有効な概念分析枠であることがしめされるには、銀林浩氏においてはまだ到っていないのではないだろうか¹⁶⁾。

これらのことは、他面では銀林氏のことばを使うならば「現実世界というカテゴリー」の分析を欠いたままでは進みえないことを意味しているように思われる。小島氏の「量理論」も「物理、工学、経済学、その他日常生活にいたるまでの様々な問題に対して線型代数がその数学的モデルを(ある場合には局所的近似として)提供するということ」¹⁶⁾をしめしたが、なぜ、それが妥当するか、どのようなテンソルとして物理量等が「表現」されるかといった問題では、物理的「量」そのものに踏み入らざるをえないことをしめしているといえよう。

高橋利衛氏は、この問題に「工学」という立場から取り組んだものになっている。森毅氏は1970年に既に、この問題について次のように述べている。

「小学校で量の理論というとはほ素材は出そろって」いるが、「高校・大学となると皆目見当がつかない。」そこでは「たとえば、基礎工学に現われる数学的構造の定式化、いわば、基礎工学における量の理論といったものが望」まれる。ここで「手がかり」になるものは高橋利衛氏の著書にある考え方で、「その基本概念は流通量と位差量のキルヒホッフ双対性」で、「遠からず、数学教育協議会の〔量の理論〕に新しい視点のつけ加わるであろうことを予言しておく。」(銀林浩・森毅「現代数学への道」国土社 1970年 p. 160)

「課題3」について

「現実世界というカテゴリー」を考えていくためには、まず物理学の次のような状況を理解しておく必要がある。

「かつて数学者のクラインは〔エルランゲン目録〕で、〔幾何学とは与えられた変換群に属する任意の変換で不変な図形の性質を研究する学問である〕と言った」が、ここで「〔図形〕と限らず〔性質〕と一般化しておけば、その観点からみると、物理学も1つの幾何学」になりつつあるということである²⁴⁾。もちろん、「自然の法則と思うものから不変性を導くのではなく、逆に不変性によって自然法則を導き、その有効性を試そうとする」背景には「実験事実」があるということは基本前提である²⁵⁾。

ここで「変換群としては時間・空間と無関係なものでもよく、〔ある与えられた変換群に属する任意の変換に対して不変にとどまる〕というかたちで述べられている〔法則〕を表現す

る「空間」は、必ずしも時空の空間ではない。」²⁴⁾

このような視点に基づくと「不変性の原理は自然法則に対して構造と関連性を与え」²⁵⁾、「ある階層の諸法則はそのパラメータにもかかわらず量の変換——量空間の間の写像——としてとらえられる」²⁶⁾ことになる。

例えばローレンツ変換ということを考えて、これは「この〔変換によって法則が不変に保たれる〕ということ」で、これは「物理現象を記述するのにベクトルとかテンソル量を用いるが、それらの成分自体はこの変換で変わっても、ひきおこされる現象自体は不変だという意味」をもっている。「〔長さ〕とか〔角度〕とかで語れるユークリッド幾何学の〔現象〕を問題にする段になると——座標系の任意さは姿を消し、それらは「座標系の回転や並進運動といった運動群の変換に対して不変な性質だということ」で特徴づけられる。これはちょうど物理学はローレンツ変換に対して不変な現象を扱うというのに対応する。」²⁴⁾

このことは物理的な「量」に関して次のようなことを意味している。

あるひとつの「物理量」が、スカラー、ベクトル、テンソル量等によって「表現」される時、その物理量が、ある理論体系において、対象としている自然の性質の反映として、どのような変換に対して保存される量として、当の「表現」をとっているのかを個々の「量」に即して分析していく必要がある。理論体系がより包括的になり一般化していく時や自然のより深い「対称性」が明らかになってくる時、当の「表現」そのものの妥当性はたえず吟味される。

例えば、あるひとつの物理量が「ベクトル」で表現されるとすると、その「ベクトルなるものが実在を反映するからには、方向の異なった二つの座標系からの記述内容が、一定の変換法則で結ばれていなければ」ならず、したがって「変換法則は単なる公式ではなく、ベクトル量の本質規定」ということになる。物理法則の不変性を回転変換という操作で考えるならば、それはすでに「ガリレオ＝ニュートンの時空構造観を、根底的に反映している」ということになる²⁷⁾。

このように考えてくると、すべての物理「量」が吟味の対象となる。例えば角運動量は「ベクトル量」であるかどうか——角運動量などが「擬ベクトル」として「表現」しうるのは、我々の世界の空間部分が3次元であるという「特殊性」に依存している。 N 次元空間の各々の要素の関係が nC_2 あるものが、 nC_1 とたまたま等しくなる $N=3$ の場合に限られている。「面積」はこの意味で本来、「テンソル量」である²⁸⁾。

同様に「磁場」が「ベクトル量」であるか、どうかという問題なども考えていくことができる。電磁気学に限って考えるならば、電磁気学上の「諸量」をどのような「量」とみなすか、という問題は、電磁気学の全体構成にかかわった問題であり、「単位系の問題」にもつながっている²⁹⁾。

さらに日常的なものに対しても疑問を提出していくことができる。時間をスカラーとして「表現」することは、どのような前提の基にはじめて妥当でありうるのか、そもそもそれは「スカラー」なのか、といった問題がある。後述するが、「時間」という物理「量」が変更されるようなことがあると、「エネルギー」もそれに対応して変わる。「時間」そのものは「不変量」を構成してはいないのである。

高橋利衛氏は、このような背景に基づいて、次のような物理的「量」理論を提起している。「〔量の理論〕はあれこれの量に名前をつけて分類するのが主眼ではなく量規定の分析を媒介

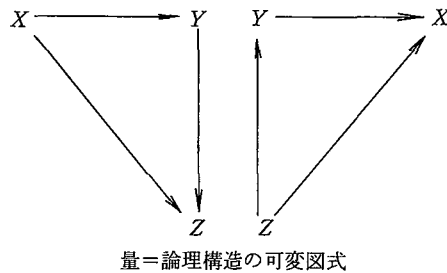
として、〔現象の論理と法則の構造〕の把握を最低限綱領にしている。

「パワーが座標変換に対して不変量(スカラー)であるという物理学的事実に居直った上、その双1次形式としての表現が座標変換に対して不変式であることを要請することにより、量の中に〔変換群〕を導入したい。」「〔テンソル解析〕はこれを可能にする」。そして「任意の物理量が法則体系の構造連関の中で表現される無数に多数のマトリクス中の任意の一つを、必要に応じていつでも取り出しうることとなる。」³⁰⁾

「このような操作の体系を私達が手にしたとき、有意味な量の定義がなされたというべきであって、〔量とは——〕という形で——哲学的に叙述されただけでは無意味ではないまでも——ほとんどなにものをも寄与しないであろう。」³⁰⁾

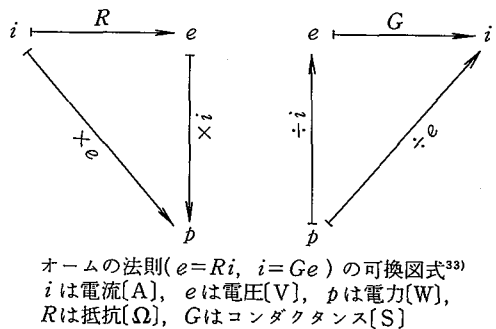
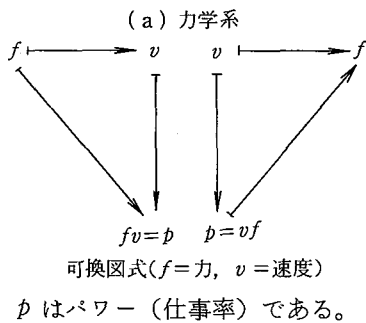
この上で、「量理論」の中核的な部分を次のように設定している。

「量の有限次元線型空間 X とその双対線形空間 Y とを設定し、その間の型射 (morphism) として諸物理法則をあん配し、両者からの不変量 (パワー・エネルギー・作用量など) の体 Z への双線形写像を設定することにより、集合と型射をワンセットとして考える圏論的思想」に基づく。「流通量・位差量・不変量という三つ組ワンセットであって、前2者の属する線形空間が前記の X, Y 、後者に属する体が Z である」³¹⁾。

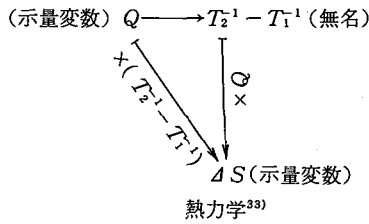


例えば、次のような展開となる。

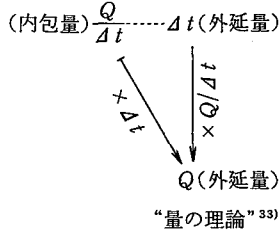
「線形の力学回路および電気回路などは、量の空間を〔対象〕とし、現象法則を〔射〕とする〔圏〕の、素朴な例にすぎない。」³²⁾



熱力学についても次のような図式となる。



「量の両規定性（外延量と内包量，——流通量／位差量など）も，不変式と変換群の視座からみる時は，反変性／共変性として立ち現われてくる。」³⁹⁾



例えば，熱力学で考えるならば「温度」という物理量は，それ自身のみで規定されるものではなく，エネルギー，エントロピーという概念のかかわりの中で構成されているわけである。その3つの概念間で，何が「不変量」となり，またそれがいかなる条件の基で「不変」であるのかといったことが熱力学の内容となってくる。

位差量，流通量，不変量をワンセットとしてとらえる高橋氏は，不変量の例としてパワー，エネルギー，作用量という3つをあげている。前2者は作用量から導出される式の時間にかかわる部分を無視することによって近似的に成立する「不変量」なので論理的には「作用量」に限定しても一般性を失わない。

作用量を規定するラグランジアンを一般的に次のようなものだとし，それが，その世界に対する「不変時」（ここでは θ としている）によって与えられているとする。流通量，位差量のひとつの一般的な形式がここにしめされる³⁴⁾。この形式はニュートン力学の特殊な表現だけのように思われるかもしれないが，「古典物理学，古典電磁気学，相対性理論，量子力学，場の量子論」など，「すべての理論がラグランジュ形式あるいはハミルトン形式によって理論化されることは，自然の基本的な運動形態の本質をこれらの理論形式がとらえていることを示している。」（町田茂）

ラグランジアン L は，位置 ϕ^i と ψ^j に対する変化量 $\frac{\partial \phi^i}{\partial \psi^j}$ とに依存するとする。世界に対する「不変時」を θ とすると，「作用量」(S) は

$$S = \int L d\theta = \int L \left(\phi^i, \frac{\partial \phi^i}{\partial \psi^j} \right) d\theta$$

となる。

故に

$$\begin{aligned} \delta S &= \int \left[\frac{\partial L}{\partial \phi^i} \delta \phi^i + \frac{\partial L}{\partial \left(\frac{\partial \phi^i}{\partial \psi^j} \right)} \delta \left(\frac{\partial \phi^i}{\partial \psi^j} \right) \right] d\theta \\ &= \int \left[\frac{\partial L}{\partial \phi^i} \delta \phi^i + \frac{\partial}{\partial \psi^j} \left\{ \frac{\partial L}{\partial \left(\frac{\partial \phi^i}{\partial \psi^j} \right)} \delta \phi^i \right\} - \frac{\partial}{\partial \psi^j} \left\{ \frac{\partial L}{\partial \left(\frac{\partial \phi^i}{\partial \psi^j} \right)} \right\} \delta \phi^i \right] d\theta \end{aligned}$$

$\delta \phi^i$ の任意性から第2項の全空間での積分は0となり，式は次のようになる。

$$\delta S = \int \left[\frac{\partial L}{\partial \phi^i} - \frac{\partial}{\partial \psi^j} \frac{\partial L}{\partial \left(\frac{\partial \phi^i}{\partial \psi^j} \right)} \right] \delta \phi^i d\theta$$

$$\therefore \frac{\partial}{\partial \psi^j} \frac{\partial L}{\partial \left(\frac{\partial \phi^i}{\partial \psi^j} \right)} = \frac{\partial L}{\partial \phi^i}$$

$\frac{\partial L}{\partial (\quad)}$ を高橋氏にならって「流通量」として、 P_i^j と表現すると(上つきを「反変」, 下つきを「共変」とする³⁵⁾), 次のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial \psi^j} P_i^j = \frac{\partial L}{\partial \phi^i} \quad \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

また H^k を次のように定義すると

$$H^k = P_i^k \cdot \frac{\partial \phi^i}{\partial \psi^j} - L \delta_j^k$$

$$H_j^k \cdot \frac{\partial}{\partial \psi^k} = \frac{\partial}{\partial \psi^k} (P_i^k) \cdot \frac{\partial \phi^i}{\partial \psi^j} + P_i^k \cdot \frac{\partial}{\partial \psi^k} \left(\frac{\partial \phi^i}{\partial \psi^j} \right) - \frac{\partial L}{\partial \psi^k} \delta_j^k$$

一方 $\frac{\partial L}{\partial \psi^k} \delta_j^k = \frac{\partial L}{\partial \phi^i} \frac{\partial \phi^i}{\partial \psi^k} \delta_j^k + P_l^m \cdot \frac{\partial}{\partial \psi^k} \left(\frac{\partial \phi^l}{\partial \psi^m} \right)$ なので

故に

$$H_j^k \cdot \frac{\partial}{\partial \psi^k} = \left\{ -\frac{\partial L}{\partial \phi^i} + \frac{\partial}{\partial \psi^k} (P_l^k) \right\} \frac{\partial \phi^l}{\partial \psi^j}$$

①式により

$$H_j^k \cdot \frac{\partial}{\partial \psi^k} = 0$$

H^k は ψ^k に対して, 系における「保存量」となる。

この H^k を使って L を表わすと次のようになる。

$$L \delta_j^k = P_i^k \cdot \frac{\partial \phi^i}{\partial \psi^j} - H^k$$

ψ^j を, 今, 世界時 θ と同じだとすると, ラグランジアンは次のようになる。($i=1$ から n まで, とする)

$$\begin{aligned} dS &= L d\theta \\ &= \left[\sum_{i=1}^n P_i \frac{d\phi^i}{d\theta} - H \right] d\theta \\ &= \left[\sum_{i=1}^n P_i d\phi^i - H d\theta \right] \dots\dots\dots \textcircled{2} \end{aligned}$$

第0成分を拡張して, $P_0 = HI$, $d\phi^0 = I \cdot d\theta$ ($I \times I = -1$) とすると, 次のようになる。

$$dS = \sum_{i=0}^n P_i d\phi^i \quad \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

「流通量」 P_i と θ に対する「位差量」 $d\phi^i$ とに対する次のような「表現」のテンソル変換(A)に対して, 「作用量」は不変量となる。(不変量としての「作用量」と, H の「保存量」とは質的に区分される。)

$$\begin{aligned} P_i &\rightarrow P_i \cdot A \\ d\phi^i &\rightarrow d(A \cdot \phi^i) \end{aligned}$$

「流通量」, 「位差量」, 「不変量」は, 高橋氏の「図式」を転用するならば次のようになるわけ

である。



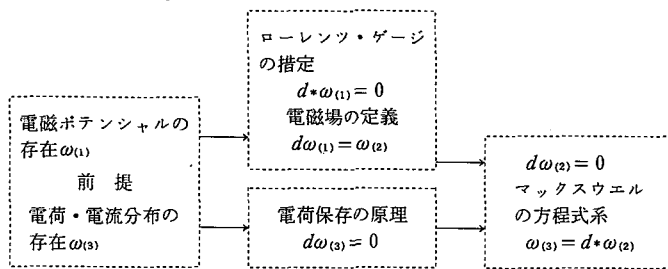
(通常では $dA \cdot \phi^i$ まで是一般化する必要はないが、時空の各点において A が異なることによって、この項を相殺する「ゲージ場」が生ずる。ここまでくると「星」は「相互作用」とのかかわりをもっていることになる。)

この作用量を不変に保つ「変換群」に対して物理法則は変わらない。高橋氏は一般的な形式ではなく、パワー・エネルギー等の条件的な不変量に基づいた形ではあれ、物理法則を作用量に基づく形式において把握することによって、変換群、不変量、そしてさらには、そこで物理量を「表現」するために使われる諸量が従うべき諸変換法則を物理的意味を明確にした形で明らかにすることができる、という主張は重要な提起だと考えている。

しかし作用量が流通量と位差量とから構成され、作用量が不変に保たれるような流通量と位差量とをワンセットとした変換が、そこで表現される物理法則を不変に保つ、といった状況は、「工学」という入り組んだものにその例を見出すことは、あまり「典型的」ではないと考える。

高橋氏の量理論では近似的・条件的なものとしてのパワー・エネルギーなども不変量の中に入れてられている。日常的な現象としては、それらは充分不変量として扱おうが、一般性に基づいた議論の上に、それらの特殊性を考察しないと物理的「量」理論の本質を的確に表わしたもとはなりにくいのではないだろうか。氏の著作では、例えば電磁気学の諸量にかかわる分析では、パワー・エネルギーという非相対論的な諸量にこだわりすぎたため、電磁気学における不変量としての作用量という視角から、電磁気学の諸量を特徴づけることがおろそかになっていると思われる。この点、「微分形式の理論」に基づく電磁気学の諸方程式の展開は、高橋氏の立論にとって本質的な意味をもっているものと思われる。

「微分形式」表現は「座標系」に依存しない形で当の事象を表わしているのだから、何が本質であるかをわかりやすくするからである。しかし、そのような本質がしめされるのは、この形式だけに限定されるものでもない³⁶⁾。



マックスウェルの方程式系に対する微分形式の理論による整理⁽³⁷⁾

高橋氏も「ベクトル解析による表現行為の後には、微分形式による取扱いを、電・磁気に対しても施して行きたい」として、そのことが課題であるとしている。また、それに関係させて「[量の理論]としては、原則的には微分可能多様体のカレント論まで、行き着かざるをえない」ともしている³⁸⁾。

もとより氏の提起そのものが工学という仕事から発しており、量の理論史という視角より物

理学史に取り組むという試みに挑戦しているものであり、その問題提起の整備、各論での展開は残されている大きな課題と考えるべきものであろう。

「課題4」に関して

高橋氏は「量」を「測定手段」によって規定するという点について次のように述べている。

「測定器を端緒にすえたからといって、私は極端な操作主義に組する者ではない。測定法の数だけ、測定対象量の概念や定義があってはならないし、第一、対象量に関する何らかの理念や、測定法を包みこんだ法則体系の構想抜きでは、測定しようという気さえ起こるはずがない」。しかし日常的には「量は何らかの関係において現前」しており、「量が関係性を座とする以上、あらかじめ主語として固定しておくことは不毛であろう」³⁹⁾。

「単位の制定史の基本的部分は、量の理論史の制度的側面になっている」という「動かせない事実」に基づく時、「量」概念の形成史を分析していくにあたって、測定史にも認識論的な視角から考察を加えていく必要があると思われる。例えば「オームの法則」などを考えてみる時、現在の電流計、電圧計を前提としてのこの実験は、実に単純（これ自身、本当は単純ではないのだが）に学校教育では扱われている。しかし、オーム自身が最初に行なった実験は、実はその実験によって「電流」概念、「電圧」概念を区分して確立させたところに意味があるのであって、概念形成という視点より考察する必要があるものであろう⁴⁰⁾。

測定史の再吟味ということは以上のようなことを含んでいる。

II章 とりわけ「時間」に関して

物理的「量理論」は、それ自身が自然科学の諸量、とりわけ物理量を対象とするものである以上、具体的に個々の物理量で個別的に展開されていかなければ意味がない。

この部分では、しかし、まださらに展開していただくものをそろえるに到っていないので、とりわけ「時間」に関して課題を列記するのみにとどめておく。

まず、「時間」そのものが田中一氏の指摘にあるように次のような性格をもつことを把握しておく必要がある。

R. カルナップは「どれか2つの過程を比較する時、等値であることがわかる過程は、自然のなかで非常に大きなクラスをなしていることが見いだされ」、「わたくしたちが知っているかぎりでは、この種の大きなクラスはただ1つだけ存在する」と述べている⁴¹⁾。田中一氏はこの背景を次のように指摘している。

「私たちが一つの時間にもとづいていろいろな現象を矛盾なく理解しうるのは、これらの現象全体の運動が互いによく対応しているためである。このような対応性は、全物質の運動がまったくばらばらで統一を欠いているときにはあらわれまいだろう。この意味で、時間は全物質の運動の統一性にあると考えるべきである。」

「時間が自然の全物質の運動の統一性にある——とすれば、時間の進み方自身もまた自然の研究の進行とともにしだいに研究されて一段一段と深く認識されていくべきものである。」それは「自然の研究とともにしだいに深く認識していくべきもの、すなわち研究の対象である。」

「時間は、自然を外から自然にあたえられたわくでもなく、また超自然的な観念でもなく、物質の運動の対応性という全物質の運動の仕方にあるのであって、この意味で時間もまた認識の対象である」⁴²⁾。

「時間」もまた研究の対象であり、歴史的に深化してきたことは「時間測定」の「精度史」のうちにも現われている。「精度」のうちに見われてくる「時間」についての概念形成史がその背後にあり、精度のオーダーが上がるごとに自然の「質」にかかわる「時間」の新しい、より豊富な局面が現われてきている⁴³⁾。

このような基本的前提に基づきつつ、「時間」という物理量そのものの吟味が必要となってくる。

その基本は、前述の②式に見られるように「時間はエネルギーと互いに双対」(高橋利衛)⁴⁴⁾であるということである。

「時間」そのものは「不変量」とはなっておらず、「エネルギー」という「流通量」に対する「位差量」(ΔT)として位置づく。この事態は量子力学においても本質的に変わらない。この意味で、ピアジエが「時間はいつもそうであるように——本質的には——諸項の間に練り上げられる一つの比から成っている」として、量子力学における時間概念を「(状態の) 諸変化が諸事情の順序を構成する」として「時間の経過について言えば、それは比 $dt = d\psi / H\psi$ の $\langle d\psi \rangle$ の他の項 $\langle H\psi \rangle$ によって保証され——状態の諸変化のリズムを決定する全エネルギーによって保障される」という分析を行なっていることは示唆的であろう⁴⁵⁾。「この式を〔全エネルギーの配序によって時間が決定されている〕という形で読みとる時、時間の進行速度がエネルギー状態に依存しているという事実」に基づく認識論的な局面での主張となる⁴⁶⁾。

相対論における時間概念は当然のことながら②式に包括されているので、ここでは割愛する⁴⁷⁾。

また、「時間」の表現は、「エネルギー」という物理量と対になっており、両者を含めた形で、作用量を変換群をはじめと考えることができる。

また、もう一点、「時間は——作用量などととも、量の両規定(流通量・位差量)の枠外に置かれ」と高橋氏が述べていることにも留意しておく必要がある。高橋氏はエネルギー作用量などは不変量として、量の両規定の媒介者(双線型写像のターゲット)として機能したのに対し「時間は」と自問しながら「非相対論的物理の枠内では、もしエネルギーを量の両規定から脱す立場をとるならば、時間もまったく同様に扱わなければ、首尾一貫しなくなる」と述べている⁴⁴⁾。

高橋氏の「枠外」に「時間」を置く考え方は、相対論まで拡張するならば解消する。「エネルギー」は相対論的な枠まで考える時、高橋氏の言う「不変量」とはならず、この意味でも一般的な形式に基づいて立論することの重要性がある。

しかし、このことを押さえた上でも、なおかつ「時間」については考慮しておくべき事情があると考えられる。

前述の②式において、全系において保存されるハミルトニアン H は、そこでの「世界時」 θ に対して成立するものとなっている。これは「表現」としては③式のように組みこむことも可能である。このような変形はただ単に式上のものでしかないが、認識の深化という問題をそこに読みとると、次のように考えていくことができる。

ある物理系において「不変量」、「保存量」と考えられていたものが、より広範囲な物理現象を客体としていくなかで、その条件性・近似性が明らかになる、ということはよくある。その、より広範囲な物理系において「不変量」、「保存量」が成立するように概念は深化する。「エネルギー」概念は、より広範囲に妥当するように深化する。

この時、全系に対する「時間」概念も、それにつれて深化せざるをえないことを③式は意味している。この意味で、ある認識段階において、その時点において「エネルギー」と考えられているものに対する「時間」は、「量の両規定」の「枠外」に、「作用量」、「保存量」とも異なる特別の位置を占めることとなる。

〈注〉

- 1) 遠山 啓 「量について」『数学教室』1959年6月号 『遠山啓著作集 数学教育論シリーズ』No. 5『量とはなにか』I所収 太郎次郎社 1978年 p. 24
- 2) 遠山 啓 「量の体系はなぜ必要か」『数学教室』1960年11月増刊号(原題「量の体系」)前掲著作集 シリーズ No. 6『量とはなにか』II所収 p. 11
- 3) 遠山 啓・長妻克亘 『量の理論』 明治図書
他に銀林浩氏に「構造主義的」と称されている視点に基づく『量の世界』(むぎ書房 1975年)の著作等がある。
- 4) 主要ないくつかのものを掲げておく。
 - 小島 順 『線型代数』 日本放送出版協会 1976年
 - 「数学セミナー」日本評論社
1977年7月号 小島 順 「量の計算と線型代数」
小島 順, 斎藤正彦, 森 毅 「量・線型代数・数学教育」
1977年8月号~78年1月号 小島 順 「[量の計算]を見直す」
1978年2月号 銀林 浩 「発生的立場からも考えよう」
1978年3月~6月 田村二郎 「量と数の理論」
 - 田村二郎 『量と数の理論』 日本評論社 1978年
 - 小島 順 「量の理論」 数学セミナー増刊『数学と教育』 1980年
 - 高橋利衛 『基礎工学セミナー』——量の理論/現象の論理と法則の構造をめぐる討論—— 現代数学社 1974年
 - 高橋利衛 『図説基礎工学対話』——どのようにして量は捉えられたか、その歴史と論理と人物と—— 現代数学社 1979年
- 5) 小島 順 前掲「量の理論」 p. 141~150
- 6) 高橋利衛 前掲「図説基礎工学対話」 p. 2
- 7) 高橋利衛 前掲「基礎工学セミナー」 p. 9
- 8) “ ” “ ” p. 37
- 9) 「圏」とは「構造をもつ数学的体系間の構造写像の理論を抽象化」したもので、集合の圏、代数系の圏、群の圏、順序集合の圏、位相空間の圏、線型空間の圏、測度空間の圏などが定義される。
大熊 正 「数学選書 圏論(カテゴリー)」 槇書店 1979年
J. ピアジェは何箇所かで「圏」について語っている。
「次つぎに生じる段階に固有な構造——たとえば前操作的構造や操作的構造——を形式化するのには論理学者の仕事で、そのなかでも「前操作的構造は、可逆性も推移性も保存もないけれども、質的同一性とやはり質的な方向をもつ関数とを伴っている。この——関数とは——[圏](カテゴリー)の種類——に対応している。」「発生的認識論」(滝沢武久 訳)誠信ピアジェ選書『心理学と認識論』所収 誠信書房 1977年 p. 11
「ブルバキの三つの[母構造]は「子どもの具体的操作の段階以来初歩的な形で、しかしはっきりとした形で、みられるし、[構成途上の関係]の水準以来——[圏](カテゴリー)について語る事ができる。」『発生的認識論』(滝沢武久・他訳) 白水社 1972年。
「ブルバキの構造主義が、ある潮流の影響下で、変化しつつある」。「この影響を指摘することは、有益」で、

「新しい構造の形成とまでいなくても、その発見の様式を、みせてくれ」、「ここで問題となる」のが「[カテゴリー]の創造である」。『構造主義』（滝沢・佐々木明 訳）白水社 1970年 p. 34

- 10) 遠山 啓氏は、かつて障害児教育にかかわらせて「原数学」という構想を提出したことがある。この「原数学」の内容そのものは大幅に再吟味しなければならないと思われるが、高村泰雄氏は、この「原数学」・「原教科」の構想を受けて、低学年理科を考えていく手がかりとして「原科学」という領域が存在しうるのではないかと問題提起している。高村泰雄 「科学教育の原則と方法」〔原科学にもふれて〕『自然と進化』No. 17 1982年 科学教育研究協議会北海道ブロック機関紙・拙稿 「科学教育学と科学観」『札幌・唯物論』No. 28 1983年 札幌唯物論研究編

- 11) 岩崎允胤・宮原将平 『科学的認識の理論』大月書店 1976年 p. 33

- 12) 例えば T. ゴルンシュタインは、エンゲルスの「数学は量の科学である」（「自然の弁証法」）、「純粹数学は現実の世界の空間形式や量関係を対象とする」（「反デューリング論」）を紹介して、「エンゲルスに依れば数学は量の科学として現実の世界における一つの、特定の側面を、他の科学の研究する他の側面から抽象して研究する」ものであると規定している。（『弁証法的自然科学概論』相馬春男 他訳 白揚社 昭和8年）本稿で問題としているのは物理的「量」に関するものであるが、「量」規定そのものの妥当性と合わせて、エンゲルスの「量」概念をこのような形で概括してよいものかは吟味に値すると思われる。高橋利衛氏は「ヘーゲル哲学を避けて「量の理論」史を語ることは不可能」（前掲「図説基礎工学対話」p. 263）と述べているが、ここまでもどって考察せざるをえないだろう。

- 13) 岩崎允胤・宮原将平 「現代自然科学と唯物弁証法」大月書店 1972年 補論II 数学

- 14) 是永純弘氏は、関 恒義氏を批判して、経済諸量の〔質〕的性格を強調している。そこで是永氏は「数学にとっては——等質か異質かは問題にすらなりえない」として数学の「質的無関与性」を強調しているが、数学にとっても、「価値形態論」での理論と同様に、その抽象化の過程では等式の両辺の異質を考えていくべきではないだろうか。

是永純弘 「〔政策科学〕は可能か」『現代と思想』No. 36 1979年6月 青木書店 P. 51: 関 恒義 『経済学と数学利用』1979年 大月書店 p. 63~64

この視角から「力学の論理構造」を吟味したことがある。拙稿「〔力学の矛盾〕と力学教育」北海道教育大学紀要 32巻 1981年

- 15) 高橋利衛 前掲「図説基礎工学対話」〔マルクスと微分形式〕 p. 273~276

- 16) 小島 順 前掲「線型代数」"まえがき、

- 17) 小島 順 前掲「量の計算と線型代数」 p. 21

- 18) 小島 順 前掲「〔量の計算〕を見直す」4, 量のテンソル積 1977年11月 p. 61

- 19) 小島 順 前掲「線型代数」 p. 44

田村二郎氏も、小島 順氏と同様に「〔数学〕のわくのなかで、〔量の理論〕を構成」し、「量の公理（基本的性質）によって、量の概念を明確に定義してから、これに基づいて厳密な議論を展開する」という立場をとっているが、「数」は「量空間の倍変換」であり、「数概念の拡張は倍概念の拡張にはかならない」としている。田村二郎 前掲「量と数の理論」 p. 21

- 20) 銀林 浩 前掲「発生的立場からも考えよう」

- 21) 銀林 浩 「ピアジェ理論と数学教育」ピアジェ双書『ピアジェ理論と教育』所収 国土社 1982年 p. 72

- 22) 銀林 浩 前掲『量の世界』 p. 18, 161

- 23) 銀林 浩 「数学の構造と認識の構造」柴田義松他編『授業と教材研究』所収 有斐閣双書 1980年
銀林氏は、ここで「4つのカテゴリーと3つのファンクタ」を紹介している。「数学教育にとって大事なものは、4つのカテゴリー

N: 数と演算

Q: 量と関数

P: 位置と変換

S: 確率・統計」であるとして

「4つのカテゴリーの論理的・認知的な展開を計ることが教材（教育内容）を系統化する手だてである」としている。

- 24) 佐藤文隆 『相対論と宇宙論』〔ゲージ理論と重力〕サイエンス社 1981年 p. 218-219
- 25) E. P. ウィグナー 『自然法則と不変性』ダイヤモンド社 1974年 p. 9
ウィグナーは、次の2つの「不変性」を区分している。
「不変性の幾何学原理と力学的原理」
「幾何学的不変性の原理は、自然法則に構造を与えるものだが、事象そのものを用いて定式化される。」「この原理はポアンカレによって最初に認識され」、「この群はまず、時間と空間のずらしを含んでいる」「第二の対称性は——すべての方向の同等性を要請するものである。」「最後の対称性」は「等速直線運動であるかぎり、動いているどんな系から観測されても自然法則は同じに見える」ということである。
「幾何学的不変性の群の演算は必然的に保存法則を伴う。」
「力学的不変性」——「〔新しい不変性〕は幾何学的ではない不変性と呼ぶほうがたぶんよい。」「おもな違いは——新しい不変性が特定の相互作用に対する表式の不変性であって、すべての自然法則に対するものではないという点にあります。」「不変性の群から相互作用の型が定まってしまう。」
- 26) 高橋利衛 前掲「基礎工学セミナー」 p. 38
- 27) 高橋利衛 前掲「図説基礎工学対話」 p. 133
- 28) 高橋利衛 前掲「図説基礎工学対話」 極性ベクトルと軸性ベクトル
- 29) 鐸木康孝 他 『初等電磁気学の諸問題』1966年「千葉大学文理学部紀要 第4巻第4号」 p. 442-443
- 30) 高橋利衛 前掲「基礎工学セミナー」 p. 47
- 31) 高橋利衛 前掲「図説基礎工学対話」 p. 3
- 32) 高橋利衛 前掲「基礎工学セミナー」 p. 427
- 33) 高橋利衛 前掲「図説基礎工学対話」 p. 42, 49
- 34) ランダウ・リフシッツ 『場の古典論』1964年 東京図書 p. 91
- 35) 高橋利衛 前掲「基礎工学セミナー」 13. 3 共変ベクトル
- 36) 拙稿 「学校教育における電磁気学指導の諸問題」(I) 北海道教育大学紀要 第34巻第1号 1983年
H. フランダース 『微分形式の理論』1967年 岩波書店
前原昭二 『線形代数と特殊相対論』1981年 日本評論社などが参考となる。
- 37) 高橋利衛 前掲「図説基礎工学対話」 p. 362
- 38) " " p. 295
- 39) " " p. 13
- 40) 拙稿 「科学史上の実験の原理的再現について」『自然と進化』No. 16 科教協北海道ブロック機関紙 1981年
- 41) ルドルフ・カルナップ 『物理学の哲学的基礎』1969年 岩波書店 p. 86
- 42) 田中 一 『自然の哲学』(上) 1973年 新日本新書 時間について
- 43) 青木信仰 「時間測定の歴史」村上陽一郎編 『時間と人間』1981年 東京大学出版会
- 44) 高橋利衛 前掲「図説基礎工学対話」 時間とエネルギー
- 45) J. ピアジェ 『発生的認識論序説』第II巻 物理学思想 (田辺振太郎 他訳) 1975年 三省堂 p. 59
- 46) 拙稿 「教授学の構想」北海道教育大学釧路分校編 『釧路論集』第11号 1979年
- 47) 拙稿 「〔電磁気学〕教育についての一考察」——特殊相対論的視点からの分析—— 『釧路論集』第12号 1980年

エネルギーとの「双対」において「時間」を考えることは、相対論における「時間」概念を一般相対論から、その特殊として特殊相対論を位置づけて考察していくこととつながっている。ここで「時間」の実在性へと認識を組み直していく「契機」となるのは「相互作用」(運動学的には加速度運動)による「時間」の絶対的な意味での遅れである。