HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---|---|
| Title | 『経路積分法』（R. P. Feynman）の考えに基づく相互作用の実体的イメージ化の試み |
| Author(s) | 倉賀野, 志郎 |
| Citation | 北海道大學教育學部紀要, 63, 55-76 |
| Issue Date | 1994-03 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/29425 |
| Type | departmental bulletin paper |
| File Information | 63_P55-76.pdf |

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

# 『経路積分法』（R. P. Feynman）の考えに基づく相互作用の実体的イメージ化の試み

倉賀野　志　郎

# An Approach to the Model for Interaction in Terms of "Path Integrals"

Shirou KURAGANO

## 〔0〕≪層子・相互作用と階層間移行≫の視点

### (1) 教材の"群構造"

教材等のまとまりを，1つの"群構造"において把握する具体例としては，力学・電磁気・熱力学の3つの領域の教材を，≪層子・相互作用の質的発展と階層間の相互移行≫として統一的に把握したものを挙げることができる。力学・電磁気学・熱力学の物理3領域の「授業書」化を北海道大学・教育学部の高村泰雄氏を中心としてグループとして手がけ，その教材化の過程の中で，それらの3領域を≪層子・相互作用論と階層間移行≫という観点で構造的に整理できそうなことが見えてきた。この3領域の「授業書」は『物理教授法の研究』[(1)]として出版されている。

この≪層子・相互作用論と階層間移行≫という視点からするならば，

① 力学は，「層子・相互作用」一般についての科学の古典力学上での現れとして把握することができ，力学の3つの法則は構造を有するものとしてみていくことができる。

第1法則は相互作用を把握する枠組みを，第2法則は相互作用の内的形式を，第3法則は相互作用の総体としての法則をそれぞれ規定している。「相対性」は第1の枠組みの基での相互作用の"普遍性"が述べられているものである。逆の言い方をするならば，不変となる相互作用と，それを不変とする"枠組み"がセットになっているわけである。電磁的相互作用においても，この基本構造は同じである。

従前，「相対性理論」の教材化を課題とすると，より高い段階での学習を組むものと思われがちであるが，「層子」がもっている相互作用一般の形式が，慣性系において絶えず同一にとどまるという，普遍的教育課題として設定し直していく必要がある。

② 電磁気学は，とりわけその「層子・相互作用」一般についての科学の中でも「場」を媒介とする相互作用についての科学として把握することができる[(2)]。

例えば，電流の三大作用といわれている発熱作用，化学作用（電気分解），磁気作用について，この≪層子・相互作用論と階層間移行≫という視点から分析するとまず電磁的相互作用は，まず相互作用一般とのかかわりをもっている。その力学一般とのかかわりがエネルギーを媒介して，熱として現れたものが発熱作用であると捉えることができ，次の磁気作用は電磁的相互作用そのものの特質といえよう。この電磁的相互作用は，そのより複雑な発現形態である化学結合とも関係していることになる。

### (2) ≪層子・相互作用≫の視点の展開

圧力教材についても，この≪層子・相互作用≫の具体化という意味をもち得る(3)。

「力学論」も「層子－相互作用論」に一般化して展開することができた。同様にして圧力の一般化もまた可能であると考える。圧力は，この「層子」間の相互作用によってつくり出されているものであり，その変動の伝播は“圧力波”となって伝わる。「層子」の圧力として一般化すると，圧力にも階層性があることがわかる。この場合，その「層子」間相互作用の発現形態によって圧力の現れ方が異なることにもなる。圧力は，ある特定の相互作用・層子から構成されている多体系一般の問題として位置づけることができる。

ある層子・相互作用によって構成されている多体系は，それ自体として外部に対して一つの質を有している。その質への作用は，その特定の相互作用に基づかなくてはならない。圧力を問題とする時，通常はその多体系の質は，それ自体としては安定状態に達している。そこに変動（衝突）が起るわけである。変動は外部の作用が比較的小さい場合には線形応答反応として現れる。線形応答的に発現する現象としては物質の弾性などをあげることができる。この典型教材として仮説実験授業研究会の授業書≪ばねと力≫をあげることができよう(4)。そもそも物質の弾性等の物性は層子の多体系によってつくられており，通常は電磁的相互作用に基づくものを想定しているが，クォーク間力に基づく核力を考えると，原子核という質が現れる。その圧力の変動・伝播の形式・速度は，多体系の各々の層子の相互作用の形式によって異なってくる。その多体系の質を破壊するほどの作用を及ぼした時には，応答の限界を超えて「相」の転移が起る。より下の階層での「層子・相互作用」に基づく質がそこでは現れる。極端な例をあげれば，無理に電線に電子を押しこんでいけば，中性子となってやがては反発してくるようである。

このように考えていくと，気圧・水圧・電圧・物体の弾性等は「層子／相互作用」によって生じる圧力として統一的に考察していくことができる。「層子圧力」として一般化することによって，固体の圧力（抗力・弾性力），液体の圧力，気体の圧力（これについては教材化がなされている。粒子間の相互作用をイメージ化しやすいためか）などを統一的に把握していくことができるわけである。このことは，これらは教材の構成の“同型性”を予測させる。

他にも相互作用の階層性に基づく圧力の階層性が存在している。その一例が電圧である。電流の圧力は原子レベルのそれであり，他の物性（化学反応に基づく電池，水圧，分子間力等）は分子レベルのそれであり，階層が少し異なっているが，形式は同じである。現在，電流教育に関しては電子の流れという実体的イメージで把握しやすいが，電圧教育に関してはうまくはいっていない。水圧に置き換えてみても事態はあまり伸展しない。この場合，教材の構成の“同型性”は，電圧教育にも一定の示唆を与える。また「層子圧力」としての一般化はクォーク間力，重力にまで拡大していくこともできる。前者（強い相互作用として現れる）では，それは核として現れているし，後者は銀河系などの重力で結びついた多系統での圧力問題（重力によって生ずる“圧力波”としては銀河の渦状パターンを典型的なものとしてあげることができよう）として現れてくることになる。また，恒星が重力と核融合によって生ずる圧力とのバランスの上に成立していることは有名なことであろう。

この一般化を追及していくならば，フェルミ粒子一般の圧力教育を構想していくことも可能であると思われる。今，ある「＊」という累層性に基づくならば，「層子＊」に対して「相互作用＊」，「質＊」があり，その「層子」がいくつか組み合わさって構成されている物質は，「圧力＊」という他からの作用に対して応答する作用をもっている。そこでは「圧力波＊」が生ずる可能性があ

るという形でまとめられよう。

池内了氏は自然の階層構造に基づいて「私たちが知っている安定な物質階層の数は有限である」として，とりわけ密度に着目して『3つの構造系列』に整理している(5)。

「第一の構造系列：素粒子・原子核の系列，第二の構造系列：原子・分子・高分子・結晶をへて人間・惑星のスケールにいたる系列：に属する物質の階層は，ほぼ密度が一定」であるのに対して，「第三の構造系列（天体の系列）は特徴的な密度をもたずサイズの増加とともに密度が減少する」としている。この「自然の構造系列は基本単位間にはたらく結合力と反発力がなにに起因し，どのような性質をもっているかで決まっている」として，「3つの構造系列とは，3つの力：核力または強い力，電化をもつ物質間の力，重力がおのおのの主役を演ずる系列に対応している。」(5)

今までの「層子・相互作用」に対応させるならば，「層子*」に対応する「層密度*」が存在するわけである。3つだけに限定されるかどうかは不明である。

「自然の歴史性と階層性を統一するという立場」からの主系列の累層全体の特質を≪相互作用の質的発展と階層性の相互移行≫という視点でとらえることができるとすれば，「高等学校物理教育の体系をなす授業書群もこの視点で構造化する必要があろう。」(1)

### (3) ≪累層構造論≫としての見方

また，層子から系列の累層へと視点を転ずるならば，3つの系列の累層構造的見方に位置づけられるものとしては“人間と自然との社会的物質代謝”の現段階にかかわる「生」と「性」の課題とをあげることができる(1)。

③3次系列：人間としての“生”が社会的であることは当然としても，②2次系列：その“生”が他方でヒト・生物進化の産物（2次系列）であるばかりでなく，①主系列：物質代謝そのものの化学的基礎のみならず非線形非平衡熱力学に基礎が存在しているし，人間の構成原子・分子そのものが宇宙の歴史の反映である。

人間と自然との社会的物質代謝の分析を行う場合，3つの累層構造を踏まえたうえで，どの累層・局面に基づいて考察しているのかという限定が必要だろう。いわゆる“環境教育”についても，この視点から考察する必要がある。

「性」についても同様に累層構造的に考察する必要があると考えている(6)。現行の「性教育」は性情報の氾濫の中での対応に局限されているのではないだろうか。「生」と同様に「性」についても，生物としてのヒト，情報としての「性」という視点も有り得るし，その累層構造を反映した上で“人間の性”が構成されている。②遺伝情報・分子生物学的な「性」，生物固体としての「性」の営み・戦略（性の進化生態学の成果に学ぶ必要がある），③人間にかかわってはとりわけ社会的な「性」，これらの累層構造の中でひとりの人間・ヒトの「性」が，今の“我々”の中に重層的に含まれているわけである。累層構造から考察した「性」についての教育は，さらに①情報の自然史（無機的自然段階，無機から有機への質的転化，コミュニケーションの意味）へともつながる課題を有しているだろう。この視点は，生殖とは切り離してそもそも「性」が何故に一見不合理とも思えるにもかかわらず獲得したのかという課題にもつながっていくことと思われる。

田中一氏は「自然の累層性」に対応させて「情報過程の層序」として「一般的対応過程」，「恒常的対応過程」，「遺伝的情報過程」，「学習記憶過程」，「意識情報過程」，「社会情報過程」を区分

しているが，「性」もこの層序の中に組み込んで見直していく必要があろう(7)。

特に「性」の存在の意味を探るためには，とりわけ主系列段階における性とカオスとの関係についての考察をまず進めなければならないと考えている。『性』を≪カオス的進化論≫から考察するという課題となる(8)。このためには，情報の自然史にまで戻る必要がある。情報の無限進行・創造性はテューリング機械に象徴されており，性の他者媒介に着目するならば，精子と卵子（卵子はオリジナル）の差は精子（オス）は環境探査システムであり，精子（オス）は卵子（メス）の“ゲーデル的鏡”で，環境探査として精子が活用されているという表現に整理できそうではないかと考えている。脳が2分割されているのも，カオス的自己適用進化を図るためと考えられるかも知れない(9)。

### (4) 実体的イメージから量子力学に迫る

鈴木秀一氏は「教える内容になんらかの体系性，系統性を持たせるためには，その内容の構造と，その内容に働きかける学習主体の働きかけ方を分析的に明らかにする分析概念がなければならない」として，歴史教育に限定してのことではあるが，「形成される学力に，情報・知識だけでなく，情報や知識を獲得・構成・表現する方法・技能を含めて考えるべきである」ことを強調している(10)。また，「一定の……事実に関する情報から，それらをつらぬいて働いている因果関係や……諸事象の相互関係，それを通して窺（うかがい）知られる法則性を研究的に，つまり研究方法を用いて追及するような授業，生徒にとっても教師にとっても“研究”であるような授業をつくりだすことが，現在の……授業づくりの課題なのである」(11)としている。

しかし，俗に言う，追及の科学，なぜを問い続ける，論理性を探究する，必然性を模索するという形で納得の背後を探るという形で，こだわることそのものへの“こだわる”ためには，①教材の論理そのものに対する≪反作用≫を含んでいない過程の重視は本物にはならないだろう。②また，ここでは可能的に≪反作用≫（その現実化は専門家に委ねられるものとしても）を内包する視点として自然観が問われ，その教材としての展開が問われてこそ意味を有するものであると考える(12)。

「教育内容の構造は，現代科学の構造を“すべての子どもに理解可能な順序”という原理で再構成したもの」で，そこで叙述される科学の構造は「子どもの認識過程の法則性をくぐりぬけて」いる(12)。全過程を≪サイクル≫として見る時，この“くぐりぬけ”は≪反作用≫として「現代科学の構造をとらえなおす新しい視点を与え」るという一面をもっている(12)。

科学的概念等の再検討は，個別の専門研究に委ねられることであろうが，“研究的”でもある教材構成を背景とすることによって“研究的”である学力形成の土壌を形成するのである。さもなければ形式的な，自己に反作用することのない「研究」を強いるにすぎなくなる。『経済学・哲学手稿』（K. Marx）の“貨幣”においては「もし君が他の人間たちのうえに影響を及ぼそうと思うのなら，君は他の人間たちのうえに本当に刺激的促進的に働きかけるような人間であらねばならない」という部分がある。≪反作用≫は，その担い手としての現れにおいては，教授者と学習者として現れるのであるが，その一体性は，この側面においても現れている。教師自らの“手”の中で，教材の論理構造そのもの不問に付した形で，誤謬としての子どもの認識過程を配慮したり，分かりやすく実験・教具等を配慮したりだけを考慮することは，結果として教材を研究的に進めることそのものを含み込んだ形での教材を生み出すことはできないと考える。

力学・電磁気学・熱力学の3領域の論理構造の延長からすると，量子力学教育も射程に入りそうであるが，理解の仕方に不備があると判断して見合わせていた。

しかし，町田茂／並木美喜雄の両氏は，いわゆる「観測の理論」において，観測における作業仮説を公理として前提化し，その公理そのものの検討も必要であるとして，「観測」における“波束の瞬間”がいわゆる瞬間ではなく，相対的にはゆるやかな時間的な過程であることを指摘，その途中過程の考察する実験が可能であること述べて，量子力学解釈に新たな様相が生まれつつあることを指摘している(13)。量子力学の形成過程の歴史に総括を加えるものではないが，少なくとも，公理としてきたことへの反省・見直しが進行しつつある段階においては，量子論の新段階として区分されるべきものであろう(14)。

本稿は並木美喜雄氏の「量子力学は正に現代科学のミステリー」で「量子力学はまだ発展途上の学問である」(15)という言葉に甘えて，量子力学のとりわけ相互作用に関する実体的イメージは検討に値し得ると考えノートとして整理したものである。まだ，教材を全面的に展開するには至っていないが，とりわけ「経路積分法」についての考えは教材化を検討しうると判断した。

## 〔1〕「経路積分法」（P. P. Feynman）の考えに基づく相互作用の実体的イメージ化の試み

### (0) 実体的イメージの検討にあたっての留意点

量子力学教育の可能性を模索し，相互作用の実体的イメージ化に焦点をあてた形で考察する。量子力学全般についての教材の展開等は，別の機会に譲りたい。

実体的イメージを考察するにあたっての経過は本稿では省略する。（往々にしてイメージ化の形成過程は，論理展開のほぼ逆になっている。モデル化は相対性理論の相互作用による時間の絶対的遅れのイメージ化から出発している。）モデルは畠中一己君の卒業論文（1993年）にかかわって検討してきたものである。教育・理解用のモデルとしての“実在性”をここでは設定し，そのモデル上で起こり得ると予想しうる事態を考え，物理的事実と突き合わせるという展開を行う。

モデル化にあたっては次の点を考慮した。

* 実体的イメージ化は，いわゆるファインマン・ダイヤグラムにもあるように，シンプルでなおかつ現実を反映している側面が考えられるべきであろう。
* 経路積分法の考え方に依存している(16)。
* 相対論との整合性を考慮する。
* 町田・並木両氏の『観測理論』の考え方も考慮しておく。
* 定性的な考えを提起するモデルなので，定量化等の論議は避ける。

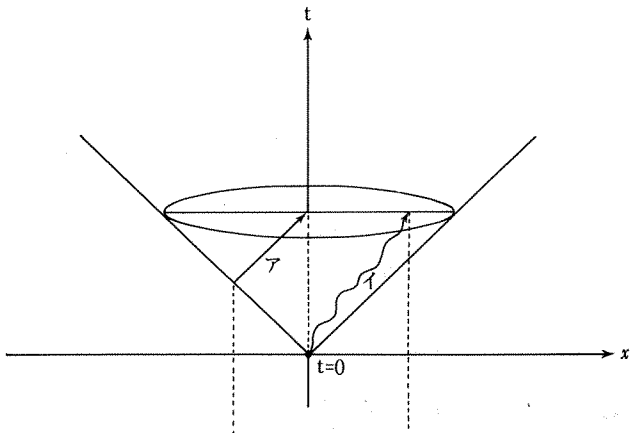
### (1) 物質の存在形態のモデル上での展開

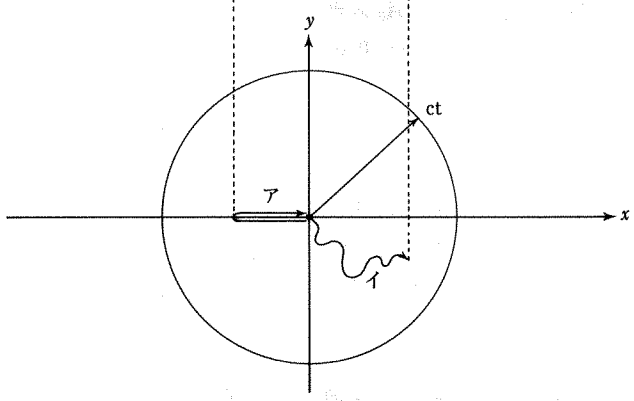
①物質の存在も含めて，空間に伝播される仮想粒子の総体を，その物質の存在として把握する(17)。“仮想粒子”の伝播速度は，質量0として光速度である。全体としてランダムウォークとなって分布している。ファインマンダイヤグラムと，相対論表現（光速度を45度で表す）の両者を加味している。

図版1では空間2次元と時間で表現してある（上は時間軸を縦に，下の図は空間に投影したものである）。一定時間内に出発点に戻ってくる粒子と，その時間内では戻れない粒子とで分割さ

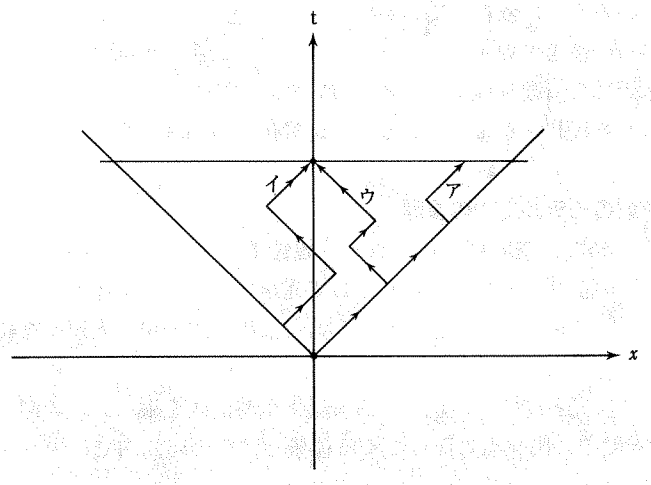
れている（図版１のア，他方のイは質量を有している。それ故，軌跡は光速度を越えないために傾きは45度を下回らない）。物質の実在を，この“仮想粒子”の総体とする。

図－1



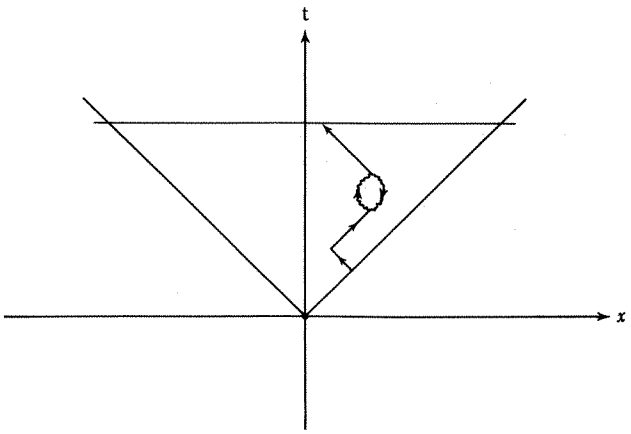

図－2



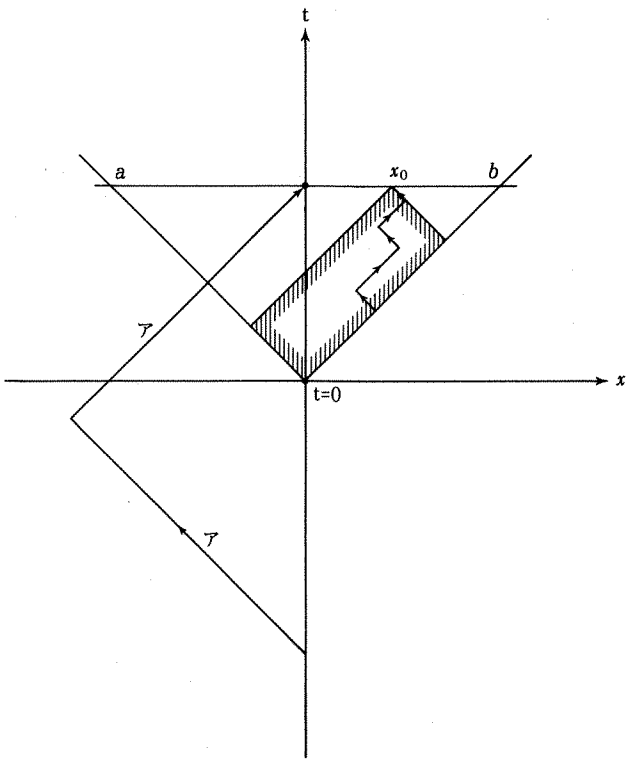
① その2次元空間表現を，時間軸を起こして1次元に限定して表現する。

3次元，もしくは2次元で表現しても繁雑しかならないし，その本質はそこなわれていないと考える。伝播経路は，実数上での表現となっているが，複素数上での経路として理解する[18]。この点では，Feynmanの経路積分法の表現を，実在のモデルとして援用するすべての経路上に分布する（図版2のア）。原点に戻るものも存在しうる（イとウ）。物質・反物質の生成・消滅も図3のように描かれる。

**図－3**




**図－4**

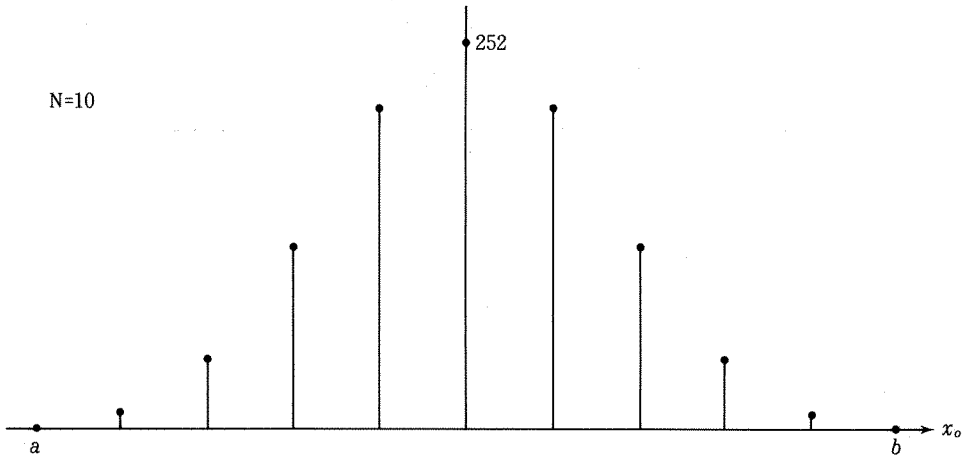


② モデル表現では，まず最初に前述のように自己場として物質の総体を考えている。

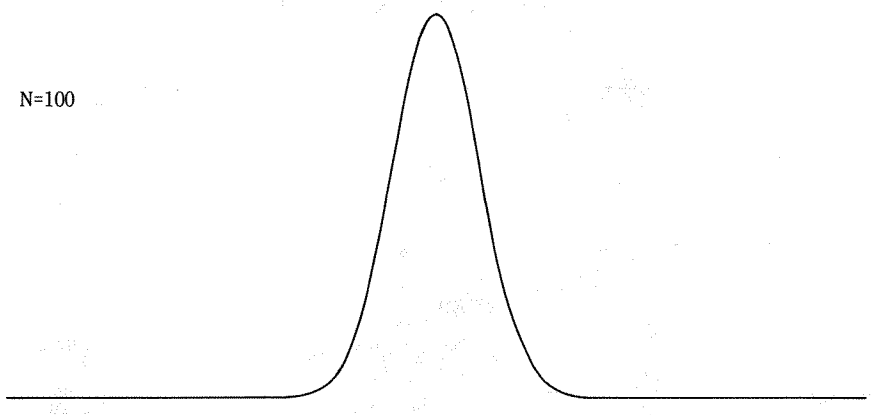
自己場表現は，時間のある時点での表現である。過去から現在までの総体の積分された存在として理解しておく必要がある（図版４のア）。ここでは，その一瞬が表現されているわけである。媒介粒子の質量が０の場合，無限遠まで相互作用が到達することと対応している。

一定時間内の断面における粒子の経路を１次元表現に限定しての粒子分布を簡単に求めることができる（図版４の斜線部分は，一定時間内で点 $x_o$ に到達可能な軌跡の総体である）。空間 ab の分割数を増やして，近似式を使用すると指数関数的に中心部に集まる経路数が相対的に増加する[19]（グラフ１）。対数表現にすると斜線部分の面積との対応を活用することができる（グラフ２）。ミクロ領域を考察しはじめると，経路の離散性が意味をもちはじめると考える。

**グラフ １** （分割数N＝10,100,1000,10000 の場合）
中央の値を基準にしている。

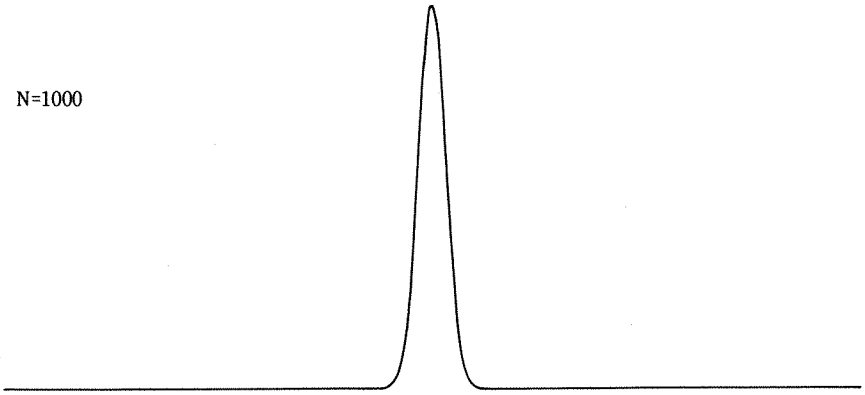



**グラフ １**



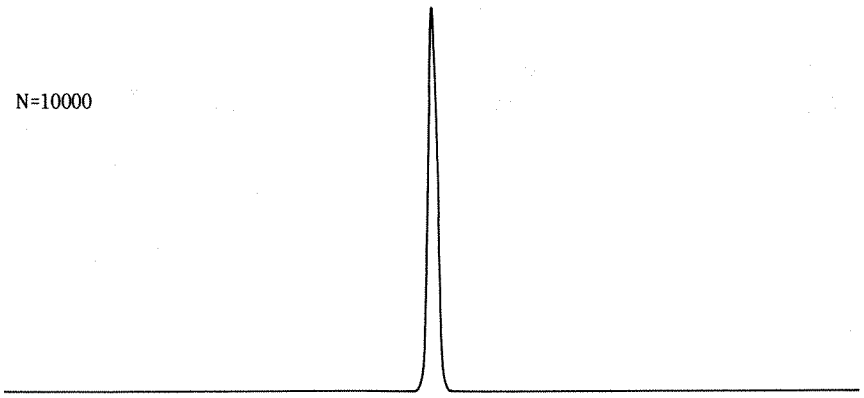
**グラフ　1**

N=1000



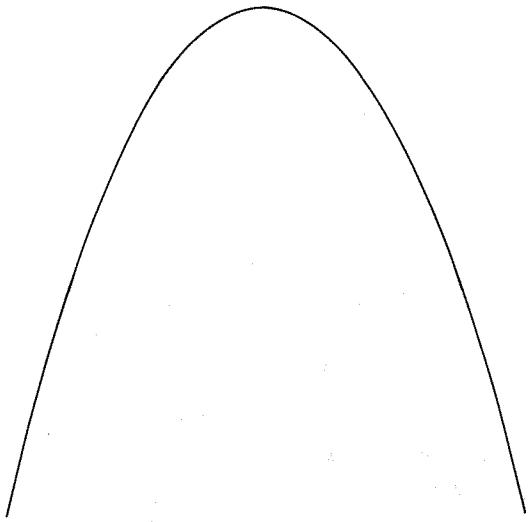
**グラフ　1**

N=10000

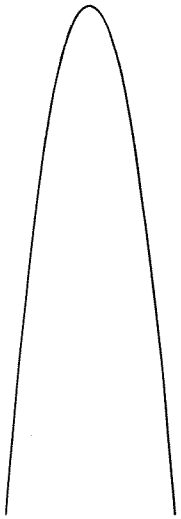


**グラフ　2**　（グラフ１の対数表現：1000と10000の場合）
1000の場合，中央値は端の部分と桁数にして約1587異なる。
10000の場合は約15949になる。

N=1000



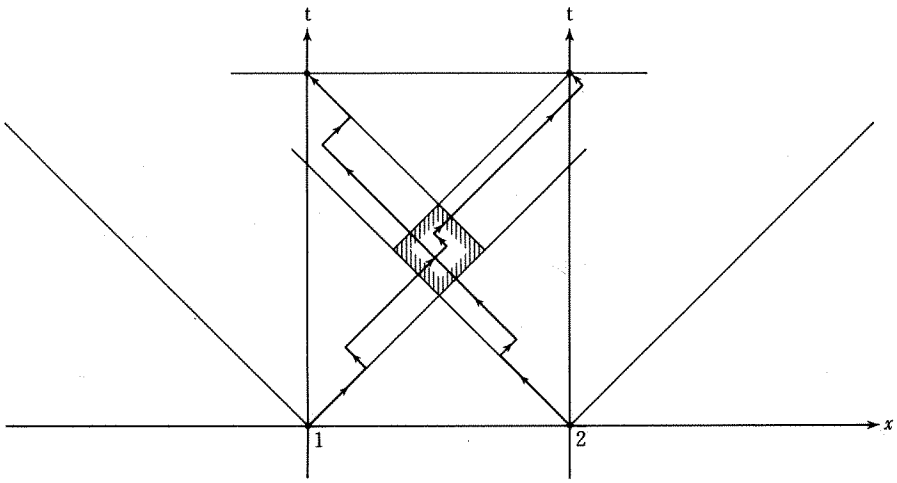
N=10000



③ 1と2との相互作用はモデルにおいては仮想粒子交換として描くことができる。

交換領域は斜線の部分である。この領域外の粒子は描かれた時間幅においては，相互作用には関与しえない。

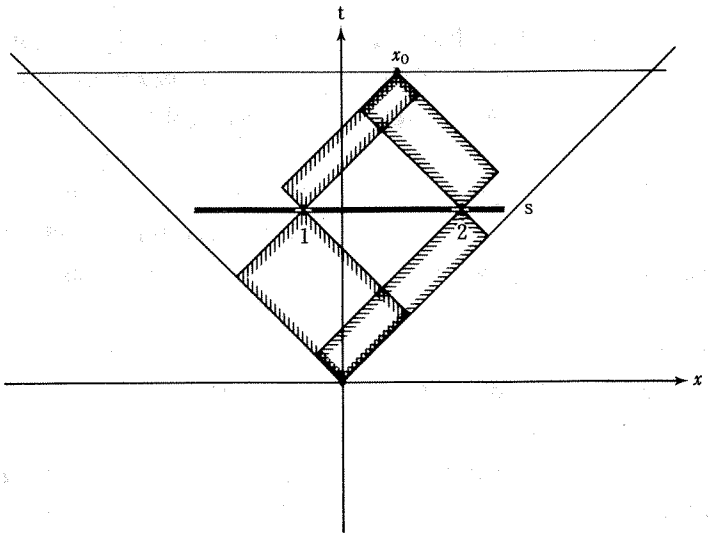
**図－5**




④ いわゆる量子力学における電子の2つのスリットに対する経路は，モデルにおいては，電子の存在を仮想粒子の総体として把握する。図版6はスリットはSの1と2である。1と2とに到達する粒子の総体は斜線部分で表現されている。いわゆる観測（点 $x_0$）においては，ミクロ領域とマクロ領域との相互作用による空間平均（必然的に時間を内包する）として観測が実行される。観測にかかわる空間積分に寄与する粒子の総数が「観測」して現れるわけである。必然的に，一粒子のみに限定しての「観測」は意味を実在の一端にしかすぎず，干渉項は消えないし，通常の意味における「観測」結果としては現れない。にもかかわらず，すべての経路積分上の経

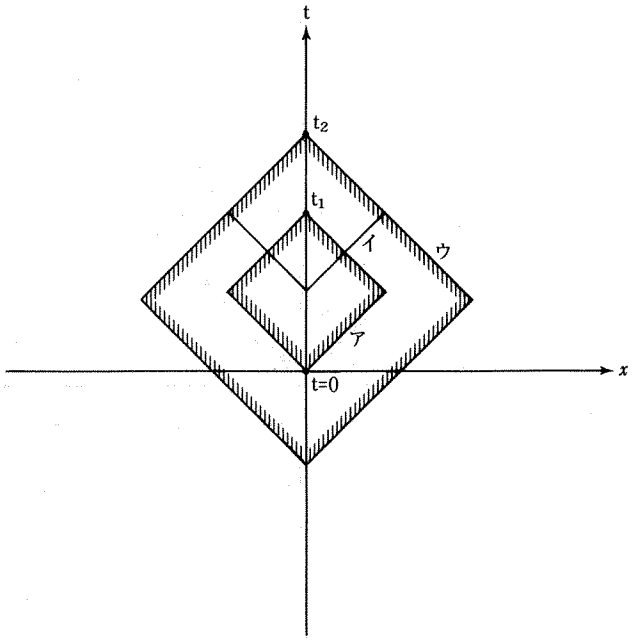
路に実在すると考える。以降，観測にかかわることはすべてこのように考える。

**図－6**




必然的に観測に現れる一定数の経路の空間積分（ミクロとマクロとの）があった上で波束の相対的にはミクロ領域に対して瞬間的な収縮が起きるとする。「観測」に「時間幅」があることが予想される。図版７では$t_1$から$t_2$の時間幅において，アからイ，及びアからウの積分結果として「観測」が実行される。実験開始を$t=0$とするならばウは現れない。

**図－7**



⑤ 自己場の分裂を考えると，相互作用による加速度・力が加えられた表現を考えることができる。(図版8のように$x_0$から$x_1$に変化する表現となる。反作用のため$x_0$の位置は反対方向にずれる。)

質量（ここでは慣性と重力）に対応させて経路数による効果を考えると，物が等しい加速度で落ちるとか，ふりこの場合に質量に依存しないで周期が等しくなるという表現はふさわしくないことがわかる。質量に対応する作用（グラビトン，もしくは寺岡英男氏の力学の授業書における“金づち”のイメージに対応する(1)）の結果として，単位質量あたりの効果が同じになると表現すべきであろう。

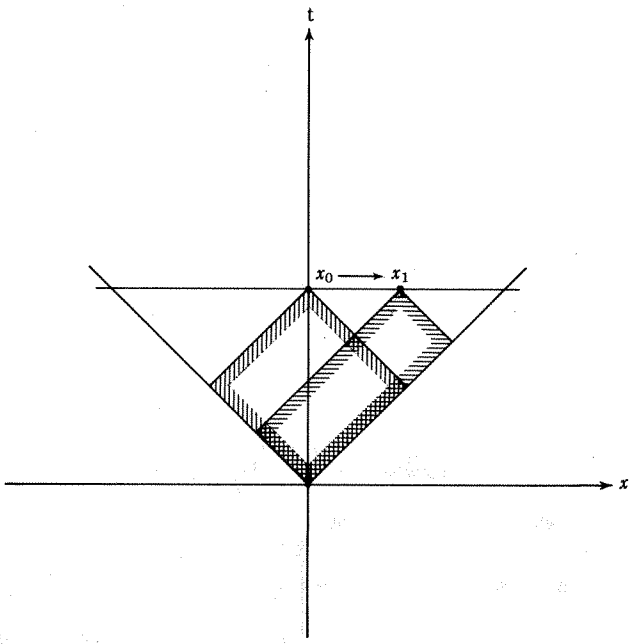
⑥ 自己場の形式の変化として相互作用による効果を考える。この場合，その相互作用のプロセスそのものはブラックボックスとしているが，結果として自己の存在形態の上における“遷移”となる。“遷移”のために，自己場の形式は変化している。この変化は過去から現在までの場の形式の積分とずれている。

ミクロ領域では，実際の“遷移”に対応している可能性もあろう。

粒子交換のアンバラス性は，そもそものファインマンダイヤグラムにも表現されている。(一方から他方への粒子移動)

⑦ このずれとして，相互作用効果を考える。この相互作用効果が一つの現れとして時間の絶対的遅れが存在すると考える。総体はアからイに移るが，この効果の現象形態として時間の絶対的な遅れを表現するモデルとする。

**図－8**



⑧　この“遷移”を2つ考えて，もとの位置に戻るとすると，相対論効果における“双子のパラドックス”の表現となっている。

相対論効果における時間の絶対的遅れを表現する“レーダー法表現”の加速度における現れは，このモデルと対応している。

⑨　これは，マクロの物質における“レーダー法表現”と接続する。

特殊相対論表現はその特殊形態であり，その時間としての現れは特殊にすぎない。この特殊表現のみで時間の遅れを考えることは困難である。通常の相対論の説明がわかりにくい理由はここにある。

一般相対論から特殊相対論としての教育を，特に「時間」に関しては展開すべきであろう。

## 〔2〕実体的イメージモデルについての簡単な説明

### (1)　経路積分について

量子力学の「経路積分法」においては，あらゆる経路過程を積分する結果として効果が生じるという展開方法を使用している。提起したFeynmanそのものは，モデルの実在性は否定しているが，ただ単なる架空モデル以上の意味がそこに付与されているように思われる[20]。ここでは，物理理論としての妥当性ではなく，物理教育上のモデルとしての組み方を問題として考察した上で，この表現の活用を課題として考察する。

並木氏は「量子力学がまだ発展途上の学問であって，これからも物理学のフロンティアの展開に応じて形式や内容を変化発展させて行くだろうことを示唆したかった」として理論形式の発展の一つとして「方法の基礎になっている考え方は大そう面白い」ところの「経路積分量子化」を紹介している[15]。「無数の経路に対応する波の和は，数学的には無限重積分というもので表現され」，ここでは「行列とか演算子などを導入する必要は一切ない。普通の数だけで構成される量子力学なのである。」[15]

量子力学の波動関数表現，行列力学表現，経路積分表現は，その物理的状況の表現方法としては結果論においては同じ物理現象を予測するものではあるのだが，力学の一般力学表現が，ただ単なる整理とのみ見るのは正しくないのと同様に量子力学表現は，その物理的背景に対するイメージは異なっており，その差異は，物理教育の実体的イメージを模索する領域での考察においては，意味をもつと考えている。

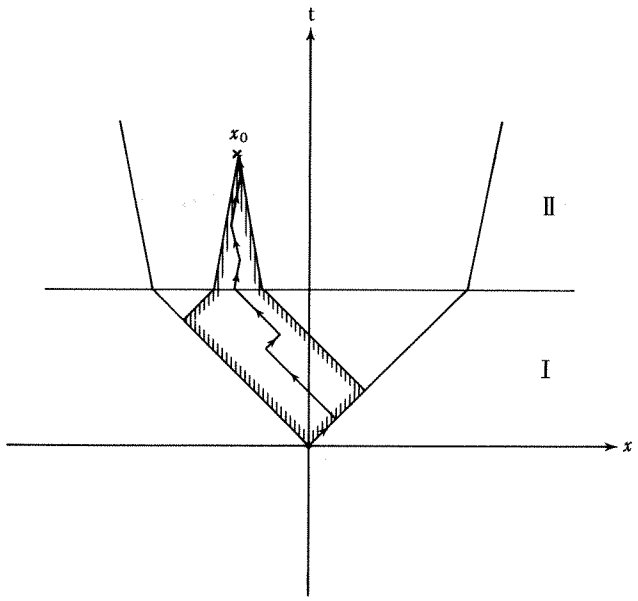
Feynmanも「量子力学のもっとも一般的な問題を解くのに，演算子の手法が深くまた有効であるように見える」が，「経路積分の方法は量子力学的振る舞いに対する直感的描像を与えるものであり，これは量子力学法則の直感的把握のために大変に重要である」と述べている[16]。確かに，場における真空揺動を含めた消滅・生成を論ずるためには，演算子の手法に反映される実在性も量子力学教育のモデルを考察する場合には検討される必要があり，「スピン演算子や他の同様な演算子を単純明瞭に議論できない」という点で「量子力学への応用については，経路積分は致命的な欠陥を持つ」。しかし「限界があるにもかかわらず，最大の価値が存在」しており，「物理的洞察と数学的解析とを結び付ける際に，われわれの直感を助けてくれるからである。」[16]

教材≪光を集める≫では最小作用原理の考えを使用して≪問題≫：A点からB点まで，鏡ではねかえって進むのに，一番速くいけるのはどのような道だと思いますかというような問題を扱かい，その教材化を試みたことがある[21]。ここでは，この最小作用原理の原理としての意味を，経路総体の積分の結果の表現としてとらえ，その微分的過程が“実在”するとしてモデル化して

いる。あらゆる経路の試みの結果として，われわれが観測している現象が出てくるとしての教材の展開となっている。

前述のモデルに基づけば，光速度が異なる領域が存在すると，経路が異なってくることを次のように表現することができる（図版9の領域Ⅰと領域Ⅱとでは“光”を表現する傾きが異なっている)。

**図－9**




**(2) 町田・並木両氏の「観測理論」**

① 「量子力学理論体系の自己完結性と無矛盾性」から検討される「観測の理論」

あらゆる経路を媒介としての物理過程を“実在”とするならば，その観測としての現れが問題となろう。量子力学の解釈がわかりにくくさせている原因一つはここにあろう。二つのスリット実験に象徴される状態において，電子は，どこに存在するのであろうか。

経路の実在性を踏まえた上で，なおかつ，そのモデルは観測の理論との接続も考慮されなければならないと考える。空間的積分による干渉項の消滅が現れない相対的に短い時間間隔での観測の場合，経路の個々の実在が問われることとなろう。

現象が起こった以降は，空間全体の経路が拡散しており，これは宇宙的な実験を考えたとしても事態に変わりはない。

もし，文字どおり，その瞬間における観測を考えるならば，一つの経路に対する実在性を要求することとなろう。経路積分の問題は，観測との整合性を内包していると思われる。「観測理論」に関して「いまだに万人を納得させるほどの理論はなく，厳しい対立と論争がある。」[(13)]。この時の「観測理論は量子力学的な観測・測定過程の物理的内容と認識論的意義を明らかにしようとするものであるが，同時に，現代物理学の基盤ともいうべき量子力学理論体系の自己完結性と無矛盾性を問うものである。」[(13)]。

まず「量子力学では測定に関する作業仮説を置いて出発し，理論を構成した後で，それを導くことを試みるのである。それに成功すれば量子力学は矛盾しない閉じた体系になり，不成功ならば矛盾を含むことになる。このような問題を研究する分野は測定あるいは観測の理論といわれる。」[22]両氏は，あえて公理とすることによって，作業仮説に遡源する形で展開して行く手法をとっているわけである。意識的に原理・公理と表現することによって，その原理・公理そのものを論理上では組み込まれないことを明確化していることになる。この点では田中一氏も「観測の理論」は「解決は量子力学の理論体系を完結させる上で欠くべからざるものであり，またこれを理解することは，量子的状態に対する認識を確立する上で避けることのできないものである」と述べている[23]。

② 「観測の理論」を≪階層間移行≫と結び付けて考える

田中一氏は「ミクロ現象という観測対象およびマクロの測定系からなる物理系は複層系」で，「観測の理論とは複層系の理論」の一つとして見ることの重要性を指摘している[23]。この「複層系にあっては，何らかの理由で……干渉項が極度に小さくなるかあるいは消失していなければならない」こととなる。この「いくつかの個々の複層系に対し近似的に混合状態を導く試み」の一つとして町田・並木の「観測の理論」があるが，しかし「極度に小さな空間領域においても量子力学が成り立つ」とは限らない[23]。

「観測の理論」が，前述の≪階層間移行≫にかかわっていることを確認することが必要であろう。

また，「量子力学をミクロの粒子などに適用するという言い方」をするが，「厳密な言い方をする場合には，量子力学の対象は，いつでも系」であることも重要である[24]。

「ある物質について知るのは他の物質との相互作用を通じてしか知り得ない点は，量子力学でなくても，また物理学でなくても，すべての認識において共通」で「観測というのは本当に，ミクロの物質と，ある特性を持ったマクロの装置との間の相互作用であり，あらゆる物質間の相互作用の一種に過ぎないことが，考慮に入れるべき一つのポイント」となる[24]。

それ故「観測理論」も「観測対象系と測定器系を相互作用させ，その全体に対して量子力学を適用することによって，測定による“波束の収縮”を導出するものでなければならない」こととなる[24]。

「波束の収縮はまた，ミクロの対象と検出装置との全系が，位相の相関があって量子力学的干渉がある相から，干渉のない完全に混合状態の相に移る相転位と見ることができ」[22]，この「混合状態が生ずるのは電子線と検出装置との相互作用によるはず」で「量子力学の作業仮説は，本来の検出装置を成す粒子の個数の無限大とする局限で正確に導かれる。また，このような推論によって，マクロ装置と相互作用するときでも，とのような条件を満たせば，量子力学的干渉を残すことができるかを知ることができる」こととなる[22]。逆に言えば「このような条件を十分よい近似で満たしている物体を測定装置と名付けるのである。」[22]

「波束の収縮を観測した“瞬間”に起こる」と言われているが，「“瞬間”というのことは，間隔が0で，その中では有限な時間を必要とするような余地はない」こととなり，このことが「波束の収縮を神秘的なように見せかける理由」となる[24]。しかし，この時間隔は「ミクロの意味では瞬間」ではなく，それどころか「ミクロの粒子の波動関数が，検出装置に入ってから出るまでの時間は，ミクロの意味では非常に大きく，要素的なミクロの相互作用に要する時間に比べて

はるかに大きいので，ふつうの計算では無限大として扱ってよい」[24]ことになる。従って「粒子の波動関数が測定器内で相互作用して位相因子を生み出せば，波束は“収縮”する……位相因子の出現，従って，“波束”は衝突時間程度の時間幅で実現する。」[13]

ここでは「サイズパラメーターの平均操作が……理論の最重要ポイント」で，ただし，ここでの「マクロ性規定はミクロ系とマクロ物体が相互作用する場合に限って効力を発揮するもの」である[13]。物理的には，観測装置の「マクロ性から乱雑位相効果が生まれたといってよい」ものとなる[13]。

柳瀬睦男氏は，この観測の理論は「量子力学における観測の理論のアド・ホックな解決法ではあるけれども，物理学における一般理論を組み立てる一つの可能性を開いていること，そしてそれを有効に組み立てる上で，従来の論理学あるいはその概念規定の拡張の必然性を示唆していることは，きわめて意義深い」と評している[25]。

③ 量子力学における本質的な偶然性に着目する

また量子力学における本質的な偶然性に着目する必要があると考える[25]。

田中氏は「観測過程では，観測対象と測定系からなる複層系の状態が，純粋状態から出発して混合状態に移る」として，「観測過程を次の二段階に分け」ている。その二つとは「複層系の状態から混合状態に変化する」と，「複層系の状態が混合状態から，その一つの（混合状態を構成する）状態になる」である。[23]

この時，「ミクロ現象に対する量子力学の予見が確率的であるのは，自然の過程の基本に偶然性が存在するため」で，「自然自身が偶然性を内臓する」という「自然に対する科学的認識」が必要であるというわけである[23]。「自然には偶然性が内臓されており，事象は偶然的確定」という二段階の後者の「過程で確定していくのである。」[23]

「その一つは量子力学の運動方程式で跡づけることができるもので，もう一つが偶然性に基づいて理解すべきものであって，この二つはそれぞれ異種の過程としてとらえたもの」である。[23]

これは「量子力学の予言は本質的に統計的であって，……個々の測定の場合の一つの測定値を予測するものではない」，従って「ERPパラドックス」を含めて，「興味ある現象を正しく記述するには統計作用素によらなければならない」ことの哲学的意味を探ることとなる[23]。

**(3) 一般相対論から特殊相対論という展開を時間から考える。**

ここではモデル表現にかかわる相対論の課題を考察する。電磁気学教育とのかかわりや，電圧指導と相対論とのかかわりについて[27]は別の機会に論じたい。

① 一般相対論から特殊相対論を考える

いわゆる“双子のパラドックス”については，パラドックスではなく物理的に存在することが確認されている。しかし，特殊相対性理論の範囲内で，このパラドックスを解決しようとする解釈は分かりにくいと考えている。

これは，時間の同時性の解釈に基づいて，時間の遅れを説明しようとするからである。そのように“見える現象”を，そのように絶対的に生ずる時間的遅れとして説明することからは納得を生み出しえないだろう。特殊相対性理論においてはいわゆる“レーダー法”を利用すると，違いに運動する系において他からは時間が遅れて“見える”ことはわかりやすく説明することができ

る[28]。しかし，この手法では，あくまでも“見える”ものでしかない。一般相対論において時間の遅れが実在する効果は，“双子のパラドックス”に対する嫌疑がかって存在したように，納得しえない論理となっていくこととなる。特殊から一般への展開の無理はここにある。

特殊相対論の解釈をめぐって“観測，観測者”という用語に代表されるようなマッハ主義的要素が入り込む余地があることについてはいろいろと指摘されている[29]。例えば，宮原将平氏は，時計を光信号により“合わせる”という操作を媒介としているため「“時間”は，時計を合わせる操作によってのみ定義されるという操作主義が生み出された」としている。こういう点で「相対性理論を受け入れたといっても非ユークリッド的な空間そのものがコンベンションなのか，観測事実の表現にすぎないのか，客観的運動法則を反映しているのか，という点では解釈がわかれる」[30]のである。

一般相対論では重力場内と同様に“絶対的に時間が遅れる”のであり，“そのように観測される”という論理ではすまされずに，“そのようなことが実際におこる”とせざるを得なくなる。この点を“見える”という立場から考えると論理は飛躍することになり，“観測者”では解決できない。だからこそ，このパラドックス自身の実在性が疑われるようなことが歴史的にもあったわけである[31]。特殊相対論は，一般とは質的に異なると位置づける考えもありうるだろうが，一般相対論が一般であり，その特殊的現れとして特殊相対論を見直したいと考える。

例えば，Lorentz 変換の実体的イメージ化という課題においても，ただ単に特殊相対論が“2つの原理（相対性と光速度不変）”に基づいて設定されていることを確認するだけではすまされないと思われる。実体性を考えることは，変化が起こるようなメカニズムを求める論理を追求することで，Lorentz は絶対静止エーテルという枠内に規定されながらも，ある意味では変換の実体性を求めている。それに対して Einstein は，そのような問題をすべて“原理”におし込めたわけで，実体的認識という点からするならば Lorentz 理論への再吟味が必要であると思われる。宮原将平氏は，いわゆるマイケルソン・モーリー実験の否定的結果を解釈する仮説として，Lorentz と Einstein を対等にあげている。Lorentz は「物体がエーテルにたいして運動する時は，その長さを変えるという仮説」で，Einstein は，「空間（時間も含めて）そのものが，ユークリッド的ではなく光速度を不変とするような計量をもつものである」とする[30]。

② 相互作用の運動学的表現としての“加速性”への着目

Lorentz 変換に於ても物理的実在性が明確に現象してくる点が重要であるとして“加速性”に着目する。

加速度運動効果（相互作用の運動学的表現）において生ずる効果を，同時性の解釈範囲内において納得するならば，その相互作用によって何が生じているのかを実体的問題は問われないこととなる。

まず相対論が絶対論（相互作用と光速度不変性の絶対性）を基礎にしていることは見落とされているのではないだろうか？　この時，遅れが何によって生じているかが問題とされなければならない。このような同時性の物理的実在性が問題となるのが加速度運動の場合で，その特殊な場合として等速直線運動を位置づけることができる。

このような視点は，加速性を，特殊と一般とを結びつける契機としておさえ，特殊相対論を一般相対論の“特殊”として展開していく論理につながっていく。事実，「ヤーノシーは，一般相対論を，フォックと同じく重力理論と見なし，特殊相対論をその特殊な場合と考え」[32]ている。

もちろん，一般の特殊としての特殊相対論の役割と，特殊から一般へと相対論が歴史的に発展していく中で特殊がはたしていった役割，とは異なっている。しかし，相対論が一般まで到達した段階では，論理的には“一般から特殊”を強調していく必要があると思われる(33)。

球対称ポテンシャルがLorentz変換を受けた時，回転楕円体の等ポテンシャル面をもつようになる(34)。この“回転楕円体”そのものができる理由を，ひとつの解釈法として，“光子の発出－吸収モデル”で考えることができる。この方法は，運動のある時点で“光子”を“発出”したものを，他の時点で“吸収”するプロセスが，運動物体における“球”であるとみなすものである。この場合，光子の往復の伝播時間の和が一定となるような閉曲面は，静止状態では回転楕円体となる。この方法は，相対論効果の説明方法として実際に“レーダー法”として使用されているが，また，このモデルは，歴史的にも，地球の絶対運動の2次効果の測定に光の往復経路を使用しているという状況を反映している。

今，このモデルをLorentzの考え方に戻って，Lorentz変換の実在的なプロセスであるとして，加速度運動における“絶対的な時間の遅れ”と関係させてみる。この“光子の発出－吸収”を実在する物理的過程とすると，その“発出－吸収”のバランスのくずれとして絶対的な時間の遅れが生じるというような解釈が可能となる。それは，加速度運動した時，電子の場合，“電磁場のはがれ”として電磁波が出るように，発出光子の一部が，“はがれ”ることによって時間の進行速度が変化すると考えることができるからである。このように考えると，“光子の発出－吸収”は量子電磁気学でのファインマンダイヤグラムのイメージとも整合しうることとなる。

③ ゲージ場での時間とエネルギーとのセットから相対論教育を考える。

相互作用によって，時間の進行速度は変化するという事実である。また時間の進行速度はエネルギーとも関係している。ここでの相互作用は，質量に基づく重力相互作用である。重力は“万有”であり，質量に普遍的に付随している。重力は，現象的には他者媒介であるが，本質的には自己場現れで，一般相対論の重力方程式が自己とのかかわりを示している。質量の存在は，本質的に重力に関係しており，かつ，時間にも関係しており，時間とエネルギーとは一つのセットである。ある一つの概念のみを対象として考察することは一般的に物理分野では困難である。例えば，温度はエントロピーとセット，運動量は空間の一様性とセット，角運動量は空間の等方性と関係している。時間とエネルギーとの積は，作用量と呼ばれていて，基本的な保存量として考えられているが，この積が保存という視点からするならば，時間の変動は，エネルギーの逆方向での変動によって，互いに効果がキャンセルされ，全体としては変化がないようになっている。

物理学の体系は，基本的にはゲージ場によって記述しうると考えられている。一般を含む相対論は，量子電磁気学とともに，その典型であろう。

このゲージ場の考え方では，各々の計測の単位（例えば時間の場合，秒で測ろうが，分で測ろうが）には関係なく，他のエネルギーの計測とセットとなって，全体としては計測の単位には関係しない保存量が決まっている。この計測単位が場所，場所によって変化するとすると，それに応じて他の量も場所，場所によって変化し，その変化の微分量を考えると，その変化をキャンセルする効果を考えないと全体の保存量は現れない。ゲージ場の考えは，この変化量をキャンセルする効果を考え，それが力の場の法則を決めるとするのである。このように考えると，力の場（例えば万有引力等）は，全体として保存量が絶えず保たれるように場所，場所の接続を行うものであると考えられる。時間にかかわって考えると，時間の進行速度の差（これとエネルギーとの積

を保存すべく）がある場合，その差を接続すべく，万有引力が働いていることになる。古典的には，位置エネルギーの差に応じて，力が働くとしているが，これは，エネルギーに着目しての表現にすぎないこととなる。

通常の論理を逆転させると，時間の進行速度の差が力であり，エネルギーの違いとしても現れることとなる。各々の物質そのものの固有時間の物理的意味は，今のところ不明であるが，時間，エネルギー，質量，力はすべてがセットであり，一つだけが解明されるという関係にはない。解明される時には，一体となって解かれるであろう。エネルギーは一見すると分かりやすいようだが，意味不明なものが多い。あえて，分かりにくいものならば，もっとも抽象的なものだけを扱い，その一点のみを承認してもらえるならば，他の物理量は，それとの関係のみで語るという方法も有り得るだろう。

〔註〕

(1) 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

(2) 相互作用の変動・伝播に着目しての電磁気学教材については「“電磁場と，その変動・伝播”を小学生に：『場』概念から“電磁石”教材に接近」（『教授学の探究』第7号　北海道大学教育学部　教育方法学研究室編　1989年）を参照されたい。

(3) 倉賀野「原子論ノート」（上／下）　北海道教育大学紀要　第38巻第2号，1988年／第40巻第2号　1990年

(4) 板倉聖宣『仮説実験授業：“ばねと力”によるその具体化』　仮説社　1974年／中村啓次郎『“力”・“回路”をどう教えるか』　日本書籍　1985年

(5) 池内了『宇宙進化の構図』　大月書店　1989年

(6) 「環境科学とは，人間生活圏の自然と人間・社会との相互作用における人間の自己認識の科学である」高村泰雄　「地球環境問題の本質と環境科学の課題」　『札幌の自然科学教育』第5号　1993年　札幌自然科学教育研究会編／倉賀野　「自然史的視点から見た≪性≫教育の構想」　『創る発達と教育』（奥山　編）　川島書店　1993年

(7) 田中一「コンピュータと情報過程の層序」　『現代と思想　33号　特集コンピュータ』　白石書店　1993年

(8) S. A. カウフマン「ダーウィンを越える“カオス的進化論”」『日経サイエンス』日経サイエンス社　1991年10月

(9) 津田一郎『カオス的脳観』　サイエンス社　1990年

(10) 鈴木秀一「学力づくりと学力論の諸問題」(8)　『現代教育科学』　明治図書　1991年11月

(11) 鈴木秀一「学力づくりと学力論の諸問題」(12)　『現代教育科学』　明治図書　1992年3月

(12) 高村泰雄「教授過程の基礎理論」　『講座：日本の教育6　教育の過程と方法』　新日本出版社　1976年／≪反作用≫を内包しない構成は不十分さを免れないであろう。認識というレベルに投影された限りでの“構成”は“子ども達の自然認識”に対する知見を深めるが，≪反作用≫に対する視点の有無に対抗して処理方法に差が現れる。例えばR. オズボーン『子ども達はいかに科学理論を構成するか』（東洋館出版　1988年）丸山博「構成主義に基づく科学的概念形成論の批判的検討：熱と温度の概念を中心に」『教授学の探究』第10号　1992年

(13) 町田茂／並木美喜雄『量子力学における観測の理論Ⅰ，Ⅱ』『科学』1980年　Vo 50，No 12/1981年

Vo 151 No 1 岩波書店

読み易いものとしては町田茂“「観測」したとき何かが起こる？”(『いまさら量子力学』丸善 1990年)も出版されている。また町田茂「量子力学と唯物論：観測の問題」(『現代科学と物質概念』 青木書店 1983年)も参考になる。

(14) 町田氏も「哲学的側面については異論がある」が,「研究の現状を概観し，進むべき方向の参考になる総合報告」としてはB. デスパーニア：『量子力学における観測の理論』(岩波書店1980年)がある。また，並木氏は「異端の書」で「必ずしも賛成するわけではない」と評しているが,「コペンハーゲン解釈を乗り越えようとする試み」としてはフランコ・セレリ：『量子力学論争』(共立出版社1986年)もある。

(15) 並木美喜雄『量子力学入門：現代科学のミステリー』岩波書店 1992年

(16) R. P. ファインマン『ファインマン経路積分と量子力学』 マグロウヒル

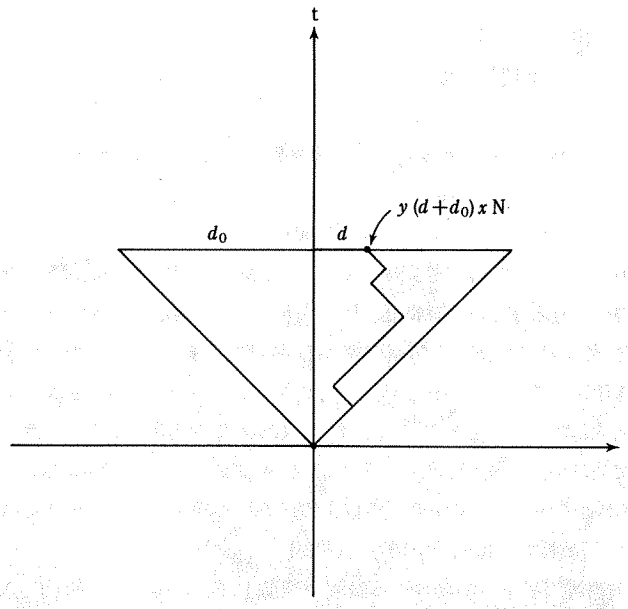
(17) デスパーニア『現代物理学にとって実在とは何か』 培風館 1988年

(18) 虚数／複素数の“実在性”と，実数の“架空性”

虚数が形成されてきた数の歴史を見れば，複素数の果たした役割は“虚”というような架空のものではないことがわかる。対象が，数の構造を反映した性質を有していれば，その対象を，その“数”によって表現することができる。例えばインピーダンスは複素数表現となっているが，その実在性を承認する必要がある。また，その実在性を虚であるが故に否定し，実数であるが故に“実在”であるとするならば，自然科学で見れば連続体としての性質を対象が有していない方が多く，架空であるとも言い得るであろう。

(19) $\alpha_0$をN/2に分割して，x軸のプラス方向，マイナス方向の選択確率を1/2とした上で，$\alpha$の位置に到達する確率$\phi$（$\alpha$）は次のようになる。

図－10



$x=(\alpha+\alpha_0)/\alpha_0\cdot(N/2)$とすると$\phi(\alpha+\alpha_0)=N!\cdot(N-x)!$)となる。$\alpha=0$すなわち，中心部分では$\phi(\alpha_0)=N!\cdot(N/2)!$)となり極大になる。

プラス・マイナス方向の確率分配が1/2から$\beta$だけずれて，$(1/2+\beta)$と$(1/2-\beta)$とすると，簡単な計算から分かるが，極大の場所は$\alpha_0$から$\alpha_0(1-2\beta)$だけずれる。

(20) わかりやすい説明は『光と物質の不思議な理論：私の量子電磁気学』（岩波書店：1987年）に書かれている。

(21) 倉賀野　編『"なぜ"に"こだわる"おもしろ理科教材60』　学事出版　1993年

(22) 町田茂『基礎量子力学』　"18　測定の作業仮説を導くこと"／"19　ERP現象"丸善　1990年

(23) 田中一『動画付き量子力学』　"8　観測の理論"　近代科学社　1991年

(24) 町田茂『量子論の新段階：問い直されるミクロの構造』　丸善　1986年

(25) 柳瀬睦男『現代物理学と新しい世界像』　"MNA理論"（町田・並木・荒木不二洋氏の三氏のイニシャル）　岩波現代選書　1984年

(26) ここで問題とされている「自然に内臓する偶然性」とのかかりはないのかも知れないが，「カオス」においても「偶然性」が現れることは興味深い。例えばD. ルエール『偶然とカオス』　岩波書店　1993年

(27) 相対論効果の電流での現れ

"電線に直流電流を流すと，その電流のまわりに磁場が生じ，その磁場中に他方の電線電流が置かれると力（ローレンツ力）を受ける，それ故，電線電流間に互いに作用が働き，電線は動く"という説明で何が起こっているのかを納得を得る形で理解することはできるのだろうか？

電池のマイナス・プラス極から電子を押し出し，引き入れるという"パンパン・スカスカ"モデル（ギューギュースカスカモデル，略してギュースカモデルと命名）を採用すると，つぎのような事が起きると予測される。

電子の張り具合の密度差ゆえに，電子が動き始め電流が流れるとすると，マイナス極側では，マイナス過剰となると，一方プラス極側では相対的にプラス過剰（マイナス不足のため）ことになる。電線のまわりは本来±がぴったり一致しており（プラス陽子，マイナス電子）何も起きない。しかし，ギュースカモデルが事実だとすると，電線のまわりには荷電のために異常な状態が生ずることになる。

たかがモデル，説明の便法にすぎないならば，それまでのことでしかない。しかし，確かに異常としかおもえない実験事実が存在する。誰でも知っている電線電流のまわりでは，方位磁針が生ずる，というAならばBが起きるという現象法則的説明しか普通なされていない。その背後にはモデルに対応する物理現象が起きていることが予測される。

また，電線電流が互いに作用するのである。この実験は簡単にしめすことができる。同方向に流れている電線電流の場合，引き合い，異方向に流れている場合，反発するのである。ギュースカモデルからすると，異なる方向の電線電流の場合，プラス・マイナスの過剰のため，引き合いそうである。流れている場合，過剰分によって生ずる相互作用（今の場合，引力）は動いているために作用するのに時間がかかり，ほんのわずかだが通常よりも弱くなるのである。電子のまわりには陽子もあり，＋＋，－－の反発，＋－の引力を全部計算しないと結果はわからない。今の場合，引力が弱まると，結果的に反発が相対的に大きくなり，電線は反発しあうのである。同様に同方向の電線電流の場合，反発が弱まり相対的に引力が大きくなり，引き合う。これは，運動による相対論効果であり，ほんの僅かの荷電バランスのずれが，ささやかな運動によって，ささやかな相対論効果が生まれる。普通ならば実験にはかからないが，電子はあまりあるほど多い（アボガドロ数ほど）。結果としてはほどほど

の実験事実に示される現象が起きているのである。

たかが電線電流でも奥が深い。小学校で行っている実験の中に相対論さえも潜んでいるのであるギュースカモデルは，現実を反映しているが故に，なにが起きうるかの予測さえも行いえるのである。淀野（旧姓：中村）美保／倉賀野「授業書≪電圧≫の構想と，授業記録：『』層子間相互作用”の変動の実体的イメージ化に基づく“圧力”の教材化の試み」『教授学の探究』No 6 1988年

(28) 例えば，W. G. V. Rosserの『相対論と高エネルギー物理』（三島信彦訳）“第4章 特殊相対性原理とローレンツ変換” 共立出版 1972年

(29) 「マッハのアインシュタインへの影響については，……その実証主義的な考え方がエーテルの否定や時空概念のつくり変えに貢献した」ということがほとんど自明とされてきている状況で，相対論と実証主義との連関は論理構成上だけの問題ではない。広重徹「相対性理論の起源」 西尾成子編『相対論の形成』 みすず書房 1980年 p.321

(30) 宮原将平「現代物理学の哲学的問題」『現代と思想』No23 青木書店 1976年3月 p.32

(31) フランクフルト『特殊および一般相対性理論』（笠原克昌訳） “時計のパラドックス” 1971年東京図書 p.173～183

(32) 宮原将平 前掲書 p.35

V. Fockの主張は一般相対性理論を重力理論として特徴づけるものである。

V. Fock “The Theory of Space, Time, and Gravitation” 1964年 Pergamon Press.

(33) 鐸木康孝「相対論入門・三つの問題」『日本物理学会誌 第27巻 第5号』1972年

(34) 倉賀野志郎「“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考察」釧路論集 1980年12月