

断想 くりこみ理論研究の頃

亀淵 迪

私が素粒子論研究の途に入ったのは1949年4月、旧制大学の3年生（最終学年）として名古屋の坂田（昌一）研究室（以下E研）に配属された時である。この年の秋には湯川秀樹先生のノーベル賞受賞が報じられ、先立つ戦時中の1943年には朝永振一郎先生によって“超多時間理論”が提出されていた——周知のように、この理論の最大の成果が“くりこみ理論”である。まさにわが国の素粒子論が世界をリードしていた時代であった。このような状況下で、自然と私はくりこみ理論を中心とした場の量子論を自らの研究テーマに選んだ。以下の小文では1950年前後における自らの体験を、思い出すまに認^{したた}めてみたい。大先生の名前が頻出するかと思うが、敬稱などは一切省略する。

くりこみ理論の成立には湯川・坂田の寄与があった

上記の事情については、世上、あまり知られていないと思うので、私の断想をここから始めよう、まず湯川について。朝永超多時間理論最初の論文は、正しくその冒頭に、湯川の“マルの話”が引用されている。1942年ころからの湯川は、事あるごとに、この話を持ち出していたという。場の量子論を根本的に変革するための方策として、場の定義を世界点ではなく、四次元的な拡がりを持った微小領域で置き換えたらという提案である。“マル”とはこのような領域に対する、言わばロゴマークである。まことに遠大な構想であるが、如何に定式化するかは大問題である。しかし、このことを真剣に考えたのが朝永であり、マルを“空飛ぶ円盤型”（渡辺慧の用語）に置き換えた。すなわち、円盤の上面と下面を微小な space-like な面にすることにより、場の理論を明白にローレンツ共変的な形に書き直せることに気付いたのだった——超多時間理論の誕生である。

それまでは、むしろ“現象論屋”であった朝永をして、“場の理論屋”へと転向せしめたのは、湯川のマルがあったればこそ、と私は考えたい。

次は坂田の寄与である。くりこみ理論以前の量子電磁力学（以下QED）は、何を計算しても、その輻射補正が無限大になるという全くの混乱状態にあった。しかし無限大の一部が質量型であることを朝永に示唆したのは、当時坂田が提唱していた“C中間子論”であった：電子は電磁場と同時に、質量をもった中性スカラー場とも、結合定数 f でもって相互作用していると考え。この場合、電子の自己エネルギーは、もし $f^2 = 2e^2$ ならば、二つの場からの発散項が相殺して有限になる。この事実は、結果的に、発散項に関する限り、“C中間子は電子に対して質量くりこみの役割を代行する”と解してよい。

予てより電子のクーロン場による弾性散乱の補正に現れる発散項が、電子の自己エネルギーに現れる発散項に似ていると感じていた朝永は、電子の弾性散乱をC中間子論で計算することを思い立つ——staticではなくdynamicalな場合にも、 $f^2 = 2e^2$ ならば、C中間子は上記と同様な役割を代行するだろうと期待して。いろいろと紆余曲折はあったが、予想どおり、1947年の歳末までに、“弾性散乱に対する輻射補正中の発散項は、電子の質量にくりこめる”ことを確認する。そのためのProg. Theor. Phys.へのレターの受け付け日が1947年12月30日となったのは幸いであった。と言うのも、当時は知る由もなかったが、ライバルの米国でもH. W. LewisとS. T. Epsteinが同年11月下旬に、同様な主旨のレターをPhys. Rev.に提出していたからである。もし坂田のC中間子論がなかったなら、朝永のくりこみ理論到達は、たとい可能だった

としても、かなり遅れたのではなからうか。

私の言う湯川・坂田の寄与とは、このようなものであった。

くりこみ可能性をめぐる

E 研での卒論として、私は Fermi 相互作用のくりこみ可能性を調べ、摂動の高次に進むにつれ新しい形の発散項が次々と現れるので、結局くりこみは不可能だと結論した。この事があったので、卒業後もくりこみ理論を中心にして研究を続け、くりこみに関する論文はすべて読むことにしていた。中でも F. J. Dyson の二論文は、この理論の本質を解明したもので、非常に有益であった。

とこうするうちに、1951 年、Phys. Rev. に A. Petermann と E. C. G. Stueckelberg のレター “Restrictions of Possible Interactions in Quantum Electrodynamics” が現れた。ここでの議論は QED のみならず、一般の場合にも拡張できると考えた私は、殆ど徹夜でいろいろと調べてみた。Dyson 論文を熟読していたので仕事は捗った。到達した結論は、“Petermann らの restrictions とは、くりこみ可能性に対する必要条件であるが、少なくともスピンの 0, 1/2, 1 の場よりなる系に対しては、それはまた十分条件でもあり、つまりはくりこみ可能性の判別条件でもある” であった (この結論は、勿論、対称性やその破れ等々の現れる以前の、初期的場の理論の枠内でのものである)。従ってこの条件を基に、場の相互作用一般を “くりこみ可能なもの” と “不可能なもの” とに分類できることも分かった。

この結果に興奮した私は、翌朝早々に梅沢 (博臣) の下宿を訪ねて報告した。彼はしばしば私の計算を眺めていたが、紙片に小さな計算をした後に口を開いた：「君のこの分類は W. Heisenberg の分類と同じだよ」と。これには驚いた。要するに私は相互作用の演算子部分の次元に着目していたのに対し、梅沢は結合定数の次元に着目したのであった。

因みに Heisenberg の分類についての 1939 年の論文を、私たちは坂田教授の書棚にあった謄写版刷りで読んでいたのであった。彼は相互作用定数の次元を $[L^n]$ と書くとき、 $\eta = 0$ の相互作用を “第 1 種”、 $\eta \geq 1$ のものを “第 2 種” とし、その摂動項の高エネルギーでの振舞が第 1 種では緩やかだが、第 2 種では急激になるとした。他方、くりこみ可能性の判定条件を η で表せば $\eta \leq 0$ がくりこみ可能に、 $\eta \geq 1$ がくりこみ不可能に対応する。場の量子論では、 $\eta \leq 0$ として、 $\eta = 0$ と $\eta = -1$ とが可能であり、とくに後者に対しては (擬) スカラー場 ϕ の 3 乗項 $f\phi\phi'\phi''$ (ϕ 's は同種でなくても可) のみが許される：この場合は “super-renormalizable” と言われ、発散項は摂動の 2 次までで、それを繰り返しておけば、3 次以上ではすべて有限となる。Heisenberg はこの場合を見落としていた。

当日の午後、私たちは坂田教授にこの結果を報告したところ非常に喜ばれた。以後この仕事は梅沢と私の共同研究となり、いろいろと議論の精密化に務めた。梅沢の主要な寄与は、スピンの 1 より大きい場合への拡張であり、そのための方法を コンジェクチャー 予想したことである。発表する論文には、しかし、坂田教授が自らの “相互作用の構造” についての哲学を序文に入れたいと強く主張し、結局三者の共著となった (お陰でこの論文はしばしば “坂田・梅沢の研究” として引用される)。

後年、梅沢が初めて Heisenberg に会ったとき、彼はこの論文に言及し、非常に喜んでいたという。梅沢の感想では「Heisenberg は自らに先見の明があったと感じたからではなからうか」とのこと。

くりこみ可能性を素粒子論の基礎とすること

上記の仕事の直後、私は理論を QED 並みにくりこみ可能とするため、その手始め

として Fermi 相互作用 ($\eta = 2$) をくりこみ可能にすることを試みた。スピノール場 ψ の対 ($\bar{\psi}\psi$) の 2 個を (擬) スカラー場で結べばよい。対の作り方をいろいろと変え、結果を Fierz の公式を使って Fermi 相互作用の形に戻せばよい。この考えを坂田教授に話したところ、教授の曰く：「そういう模型はすでに谷川 (安孝) さんがやっている。しかし、くりこみ可能性を理論の基礎とすることには大反対である。そもそもくりこみ法とは、人間側の考え出した計算上の便法に過ぎず、自然の本質を表わすものではない。われわれの現在なすべきことは、むしろ、第 2 種相互作用の研究にある」と。教授の厳しい言葉と激しい気迫に圧倒されたあわれな院生 (旧制) は、この問題の追求を断念した。しかし現在の私なら、おそらく次のように反論したであろう：「物理理論の内容は自然に従わねばならないが、その形式は人間側が決めるものであり、自由である」と。

周知のように、歴史は坂田教授ではなく、まったく逆の方向に進んだ。1955 年には H. Bethe らが教科書 “Mesons and Fields” で私と同じ考えを主張し、下って現在の “標準模型” では、くりこみ可能性が理論の基礎的要請の一つとなっている。もし坂田が生存ならば、こうした状況をどのように観るであろうか。自らの考えは標準模型を超える際に有効となる、とでも言うであろうか。

昨年私は 3 か月にわたってベルリンの科学史家 A. Blum と、1950 年代の場の理論について議論する機会を持った。彼に上記の出来事を話したところ、彼の言うには、「すると、くりこみ可能性を理論の基礎とする考えは、あなたが初めて提唱したことになる。発表された論文はなくても下書きでもよい、何かあったら送ってほしい」と：自分では思ってもみなかったことだが、そう言えばそうなるか。しかし最初に書き下した式は覚えているが、それについて書いたものは何も残されていない。誰が何と言おうと、自分の考えは徹底的に追求すべきであった、と今にして思う。

近似によらないくりこみ法について

朝永は 1949 年から 1 年間、プリンストンの “高級研究所” に滞在したが、1950 年 1 月 10 日付で坂田に手紙を書いている (本誌 vol. 2, no. 1, p. 196 に掲載)[†]。当時 W. Pauli も研究所に来ており、セミナーで「荷電くりこみの $\delta e < 0$ ($e = |e|$) は近似ではなく、一般に成立するのではないか。何か Lenz の法則のようなものが存在するのでは」といった話をし、ながながと議論が続いた、とある。この手紙については、E 研セミナーで坂田教授から知らされていたが、さしたる影響は受けず心には残らなかったように思う。しかし結果的にはこの Pauli 問題に取り組むこととなる。

当時、もっぱら私の念頭を占めていたのは、Lenz などではなく直近の諸事実であった：すなわち (1) 真空偏極を起こす荷電粒子のスピンが 0, 1/2, 1 の場合、摂動の 2 次における誘起電流 $\delta j_\mu(x)$ が同一の公式 (梅沢・河辺六男による) に纏められ、 $\delta e < 0$ が示される；(2) スピンが 3/2 の場合にも摂動の 2 次で $\delta e < 0$ となる；(3) スピンが 1/2 の場合、摂動の 4 次でも $\delta e < 0$ となる。これらの事実から私は、 $\delta j_\mu(x)$ に対して (1) のような公式が一般的に成立するのではと感じていた。

1951 年の 2 学期、朝永ゼミに出席するため梅沢と私は東京に内地留学したが、その上京の車中で私は梅沢に上のような予想を伝えた。すると彼は紙片を取り出して式を書き始め、私は横からそれを眺め、いろいろと口出しをしていた。当時の東海道線は名

[†] 戦後の日本では生活困窮の中にありながらも人々は研究を続けていた。他方逸早く渡米した湯川らは生活のことなど気にせず研究に専念できる境遇を有難く思い、何か日本に居る人たちを助けられないかと考えた。その一環として新しい情報を次々と日本へ知らせ、これが『素粒子論研究』の “海外通信” 欄に転載された (上記はその一例)。情動的には世界から孤立していたので、この欄はまことに貴重な情報源であった。

古屋・東京間に限っても全線電化はされておらず、急行に乗っても東京まで4、5時間は掛かったのではと記憶する。そのため議論には充分の時間があり、東京に着くまでに公式導出の荒筋が出来上った。あとはその彫琢であり、東京滞在中の仕事が決った。

議論の要点を述べれば、ローレンツ・ゲージ・荷電共役の変換の下での不変性を用いて、Heisenberg 表示の演算子に対しても、上記(1)と類似の式が導かれたのである。議論の途中で、いわゆる“線型応答の公式”(後に“久保公式”と呼ばれる)や“スペクトル表示”(後に Lehmann 表示と呼ばれる)の技法を用いている。

われわれの公式は、外部電流 $j_\mu(x)^{(\text{ext})}$ を用い d'Alembertian \square で展開すると

$$\delta j_\mu(x) = \sum_{n=0,1,2,\dots} a_{n+1} \square^n j_\mu(x)^{(\text{ext})}, \quad \text{ただしすべての } a_n < 0 \quad (n = 1, 2, \dots)$$

となる。とくに第一項は荷電くりこみ項であり、 $a_1 < 0$ より $\delta e < 0$ が確認される。この事情は電磁場のくりこみ定数 Z_3 を用いれば $0 < Z_3 < 1$ となり、これは後に Lehmann によっても導出されている。

東京から名古屋に帰り、早速この仕事をレターに纏め、Phys. Rev. に送ったところ、次のような査読者のコメントと共に返却されて来た：「何ら計算することなしに、こんな結論が得られるとは到底思えない」と。査読者の言う計算とは、当時世界を風靡していた Feynman-Dyson 式近似計算のことと思われる。そこで私たちは本論文を書いて Prog. Theor. Phys. に投稿し、これは受理された。^{††}

この論文は日本では余り注目されなかったが、米国では A. S. Wightman や A. Pais、欧州では G. Källén が評価してくれた。とくに Wightman は“公理的場の理論の嚆矢”^{こうし} と言い、Källén は事ある毎にこの論文を引用・言及してくれた。

Pauli 問題を日本に紹介した朝永が、その解答論文を読んではいなかったという事実を証明して、小文の結びとする。1967年10月の第14回 Solvay 会議“素粒子物理学の基礎的諸問題”で Källén が講演し、例によって私たちの論文に言及した。講演後、朝永が傍らの梅沢に「あんたらはその論文で、いったい何をやったのか」と尋ねたという—— QED 問題は QED (証明終わり)。

これをもって私の断想を終える。文献など詳細に関しては拙著『素粒子論の始まり——湯川・朝永・坂田を中心に』日本評論社(2018);『科学』92, p. 685 (2022)を参照されたい。

(2022.11.21)

^{††} 当時は一仕事終わると、まずそれを『素粒子論研究』に投稿して一般の反応を待ち、それに応じて英文論文を書き Progress に送るのが普通であった。