

Bファクトリーの仕掛け人

小林 誠とBファクトリー

2008年のノーベル物理学賞を受賞した南部陽一郎、益川敏英、小林 誠の3氏はみな、総研大の基盤機関である高エネルギー加速器研究機構（KEK）と縁の深い方々です。なかでも小林氏は総研大とKEKの名誉教授です。受賞おめでとうございます。

総研大ジャーナルでは2002年9月発行の第2号で「世界最強の加速器 KEKB の挑戦」という特集を組み、CP対称性の破れ発見直後の興奮を伝えました。本特別号では、小林氏のノーベル賞受賞を記念して、その業績のくわしい解説をはじめとして、氏に続く研究者たちの心意気、また氏と関わりのあった人たちが語る物理学者像を紹介します。

総研大ジャーナル編集長 平田光司



ノーベル賞受賞が発表された翌々日、小林氏はKEK職員に拍手で迎えられた。

総研大ジャーナル 特別号 2008 12月
SOKENDAI Journal Special Number

Part 1 小林・益川理論の予言

Bファクトリーの仕掛け人 三田一郎	1
年表で見る 標準理論の進歩	4
小林・益川理論は どのようにして生まれたのか 話し手 小林 誠 / 聞き手 辻 篤子	5

Part 2 KEKB ファクトリーの快挙

Belle 実験による小林・益川理論の 検証と新たな成果 西田昌平	10
Bファクトリーの若手研究者 座談会	15
小林・益川理論の先にあるもの 生田勝宣 / 岡田安弘 / 山内正則 / 高橋理佳	16

Part 3 小林 誠の物理学者像

小林さんのすごさと本物を見抜く目 坂東昌子	20
素粒子と宇宙論の架け橋 佐藤勝彦	21
小林先生との共同研究の思い出 林 青司	22
小林 誠さんとモノポール 九後太一	23
天文と素粒子が協力して 宇宙の究極に迫る 海部宣男	24

表紙：高エネルギー加速器研究機構4号館のエントランスホールに立つ小林 誠氏。大理石レリーフの壁画は池邊 教さんの作品「巨大宇宙と素の領域」(縦8m、横9m)で、素粒子の飛跡に数式を組み合わせて表現されている。

三田一郎

神奈川大学工学部教授

シービー CP対称性の破れを実際に観測したBファクトリー(KEKB)には、仕掛け人がいる。小林・益川理論が正しいならば、B中間子の崩壊においては100%近い非対称性が見いだせるはずだと予言した三田一郎氏だ。

宇宙の始まりのビッグバンでは、膨大なエネルギーによって、さまざまな物質を構成する基となる素粒子と、その反対の性質をもつ反粒子とが同量生成されました。宇宙が進化する過程で反物質は失われ、私たちに見える限りでは反宇宙はありません。これは私たちの存在に関する大きなパズルで、初期宇宙での「CP対称性の破れ」なしには解明できません。この謎を解くにはまず、小林 誠さんと益川敏英さんが1972年に提唱した(73年に出版)現在私たちが知っている素粒子の間の「CP対称性の破れ」を理解することが不可欠です。

歴史を振り返ってみると、まず、1961年に南部陽一郎先生が「自発的対称性の破れ」を定式化し、それに基づいて「標準模型」が作成され、「CP対称性の破れ」に関する小林・益川理論が出され、日本人がそれを立証する実験を提案。日本のグループが加速器(KEKB)と測定器を開発し、日本で測定した結果が、今回のノー

ベル賞を呼び寄せました。文字通り、Made in JAPANの結集により、反世界が失われたメカニズムについての理解を大きく前進させるような成果が導かれたこととなります。

地球の裏側の小林・益川理論

現在は、フレーバー物理学(クォークやレプトンの物理学)において日本が世界をリードしていますが、1960~70年代は、欧米における研究が主流を占めていました。14歳で渡米した私がプリンストン大学大学院で指導を受けたゴールドバーガー(Marvin L. Goldberger)は南部先生とも共著論文がある方ですが、場の理論や基本の粒子の存在を強く否定していました。後に超弦理論を提唱したシュワルツ(John H. Schwarz)が私の実質的な指導教官でしたが、当時はやはりS行列の研究などを手がけていました。クォーク模型を提唱したゲルマン(Murray Gell-Mann)でさえ、

クォークは数学的に計算するための手段だとして、実際にはその存在を信じていない時代でした。

そのころのアメ利カから見れば、まるで地球の裏側の辺境のような名古屋では1955年、クォークの存在を信じている坂田昌一先生によって坂田模型が誕生していました。また、同僚の丹生 潔先生が71年、原子核乾板を用いた宇宙線実験を実施して、4つ目の粒子(現在のチャーム粒子)を発見されました。小林さん、益川さんをはぐくんだ名古屋には、こうした先達がいまいました。

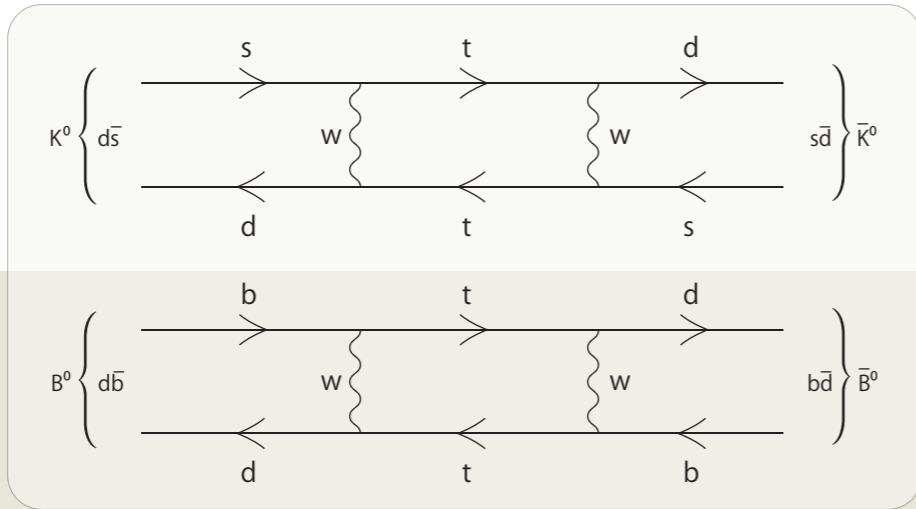
さて、1967年に、ワインバーグ(Steven Weinberg)、サラム(Abdus Salam)、グラシヨウ(Sheldon Lee Glashow)が、弱い相互作用と電磁相互作用を統一する電弱理論を打ち立てました。これは素粒子の標準理論の一部となるもので、場の量子論によって記述されていました。名古屋においては日常的に研究されていたことなのですが、主流にいたわれわれにはさほど注目を



三田一郎(さんだ・いちろう)
プリンストン大学大学院で博士号を取得。専門は素粒子物理学。ロックフェラー大学準教授などを経て、1992年名古屋大学理学部教授、2006年から現職。「B中間子系でのCP対称性の破れの理論」でJ.J. Sakurai賞(米国物理学会賞)、仁科記念賞を受賞。

中性K中間子(K^0)から反中性K中間子(\bar{K}^0)への遷移と中性B中間子(B^0)から反中性B中間子(\bar{B}^0)への遷移を起こすファイマンダイアグラム

K中間子はdクォーク(第1世代)と反sクォーク(第2世代、約150MeV)の束縛状態であり、B中間子とはsクォークをbクォーク(第3世代、5 GeV)に置き換えたコピーのような関係になる。質量は大きく違い、BはKの10倍も重い。BとKがそれぞれの反粒子に遷移するとき、Wボゾン(100GeV)を媒介してtクォーク(174GeV)と反tクォークの中間状態を通る。このときにCPの破れが生じる。軽いKは重いtクォークの影響を受けにくいのでCPの破れは小さいが、重いBではtクォークの影響を受けやすいので、CPの破れが格段に大きくなる。



引くことはありませんでした。73年に出された小林・益川理論も同様で、3つしかクォークが見つかっていない時代に、6つあることを予言するとは、もし実証できれば快挙だろうという程度の感想でした。

フェルミ研究所在職中(71~74年)に出会ったリー(Benjamin W. Lee)、藤川和男氏(現日本大学教授)とともに、電弱理論の計算を始めました。後に交通事故で早逝したリー先生は、トフット(Gerardus 't Hooft)とフェルトマン(Martinus J.G. Veltman)とともにノーベル賞(99年)を受賞したのではないかとこの方でした。ここでの経験がきっかけになって、私は、やはり場の理論やクォーク模型は必要ではないかと考えるようになったのです。

76年、リヒター(Burton Richter)とティン(Samuel Ting)が、スタンフォード線形加速器センター(SLAC)とブルックヘブ

ン国立研究所(BNL)における実験でチャームクォークを発見した業績によって、ノーベル賞を受賞しました。ティンの実験の手がかりになった実験をしながら受賞を逃したレーダーマン(Leon Max Lederman)はこれを大変悔しがり、高エネルギーの実験を重ねた末、77年にボトムクォークを発見しました。

B-反B中間子の崩壊が鍵

そのときには小林・益川理論は既知であり、計算術も身に付けていましたから、K中間子だけではなく、ボトムクォークを含むB中間子のCP対称性の破れについても難なく計算することができました。小林・益川理論から導かれる結果が面白かったために、私は他の理論を潰しにかかり、やはりCPの破れを予言していたワインバーグの模型など

も論破していきました。こうして、B-反B中間子の崩壊こそがCP非対称性の鍵を握っているとの確信を深めていったのです。

K中間子の崩壊では、CP対称性の破れは、大きくても0.2%程度であるとわかっており、小林・益川理論でも裏付けられます。両氏が予測した第3世代のトップ(147GeV)とボトム(5GeV)は、前の2世代のクォークに比べてはるかに重いものでした。このため短時間に崩壊して、第2世代、第1世代へと変化するために、大きなCPの破れが出現します。そこで81年、小林・益川理論に基づけば、B中間子の崩壊には100%近いズレが見いだせるはずだと予言したのです。B中間子が発見される前に理論的な予言ができたことで喜びはひとしおでした。

ただ、発表当初はあまり人目に付くことはなく、唯一注目してくれたのは、現在も私の共同研究者であるビギ(Ikaros Bigi)でした。これを“絵にかいた餅”で終わらせないために、どのような実験によって測定したらよいかというのが、次なる課題でした。CP対称性の破れを観測するには、B中間子の飛跡を測定しなくてはなりませんが、B中間子の寿命は1兆分の1秒で、飛跡はわずか0.02mmしか残りません。またズレを生じる反応が起こる確率は数万分の1と、

標準理論に現れる粒子

標準理論では、素粒子に働く4つの基本的な相互作用(力)のうち、重力を除いた強い相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用を「ゲージ理論」という共通の枠組みで記述する。これら3つの相互作用は、クォークとレプトンの間で力を媒介する「ゲージ粒子」を交換することによって生じる。これらの素粒子のほかに、質量の起源となるヒッグス粒子が存在すると考えられている。



稀なものでした。電子、陽電子を衝突させてエネルギーに変換し、さらにB-反B中間子を大量に生成できる加速器と測定器とが必要でした。SLAC、KEK、そしてドイツの研究所に対して、このような実験を提案してみましたが、まったく取り合ってもらえませんでした。

非対称加速器を日米に提案

プリンストン大学で同級生だったオドーネ(Pier Oddone、現フェルミ研究所所長)が、陽電子と電子とを同じエネルギーで正面衝突させるのではなく、9GeVと3GeVという異なるエネルギーでぶつけることで飛跡を10倍にできるという、非対称加速器、いわゆる現在のBファクトリーのアイデアを出してくれました。帰国した折には、KEKに出向いて、何度か提案を試みました。最初はそんなに強度なビームを非対称な加速器で衝突させたらビームが爆発すると、門前払いでした。

そのころのKEKでは、トリスタンという加速器による実験プロジェクトの真っ最中で、すぐにBファクトリー建設を受け入れられる状況ではありませんでした。トリスタンの実験が終わりつつあるとき、高崎史彦さんと生出勝宣さんがトリスタンの後継として後押ししてくれ、所長だった菅原寛孝先生のリー

ダーシップによってKEKB建設に漕ぎ着けることができました。一方、オドーネは、SLACに熱心に働きかけていました。こうして、SLACのBaBarと、高エネ研のBelleとが、競うようにして5年がかりで加速器を建設し、測定の準備が整いました。この競争は5年間のオリンピック・マラソンのようでした。

SLACは駐車場に設置したSPEARという加速器を用いた実験で、チャームとタウ粒子の発見により、すでに2つもノーベル賞を受賞していました。私はKEKB建設に関する外部評価委員を務めていたが、アメリカに勝ち目は無いのではと、はやる心もありました。SLACは競争に勝つために、リスクを冒さず、既存技術だけでBファクトリーを建設したのに対して、KEKBには、デザインにも開発者の意気込みとこだわりがありました。電子と陽電子のビームを正面から衝突させるのではなく、少し斜めに衝突させる有限角衝突を採用したことで、衝突点付近のビームの分離が簡単になるという利点が得られました。結果的には、こうした精度の高さによって、喜ばしいことに私の予想は杞憂となり、序盤の遅れをはねのけ逆転勝利が導かれたのです。

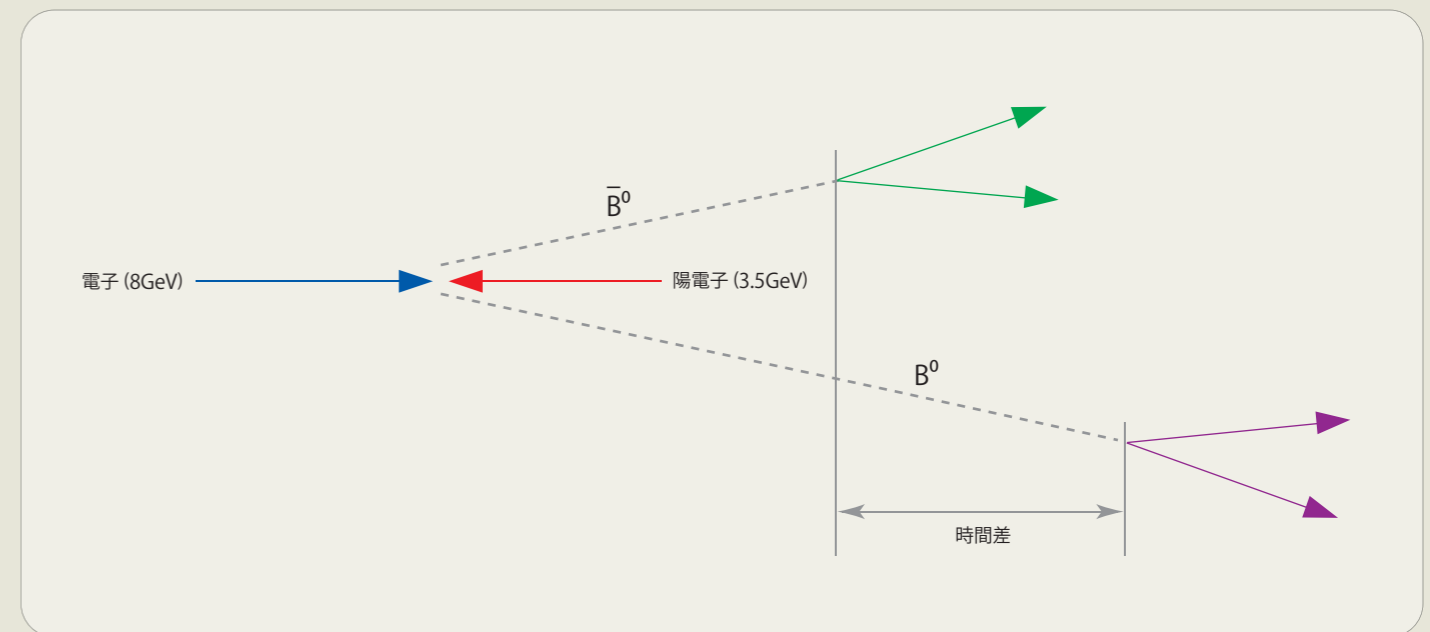
KEKBは380億円もの予算が注ぎ込まれる大プロジェクトでしたから、「この実験が

成功したあかつきには、小林、益川の両名は必ずノーベル賞を受賞するだろう」といった趣旨のことを何度となく書きました。実際に、2001年ごろから実験が軌道に乗り、KEKとSLACの双方でCP対称性の破れが観察され、KEKのほうが大きな非対称性が観測されたこともあって、受賞を確信するに至りました。しかし、そこからは毎年、待ちぼうけを食わされ続けることになり、まるで“狼少年”のような心地でした。次のプロジェクト、スーパー KEKBの橋渡しのためにも、待望久しいノーベル賞受賞になりました。

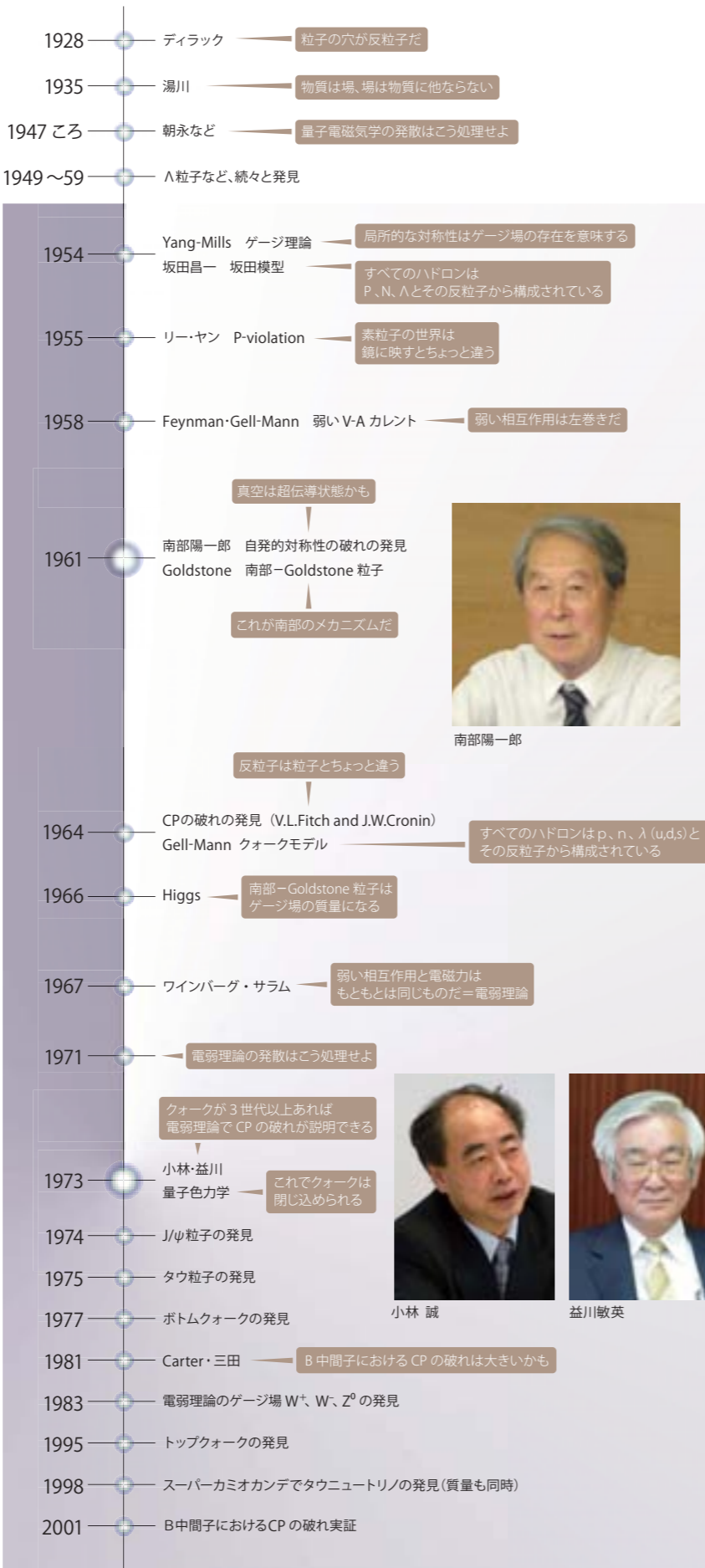
日本のお家芸に磨きをかけたい

さて、私は1992年に日本に帰国し、縁あって、坂田先生から、小林さん、益川さんへと連なる名古屋大学素粒子論研究室

BファクトリーにおけるB中間子の生成と崩壊
電子と陽電子を衝突させると、ウプシロン粒子($b\bar{b}$ の束縛状態)になり、 $B\bar{B}$ ペアが生成される。しかし、わずか0.02mm飛んだだけで崩壊してしまうので、これを測定することは技術的に不可能であった。そこで、電子のエネルギーを8GeV、陽電子を3.5GeVにして飛跡を10倍にするBファクトリー実験が考えられた。生成されたBと反Bのペアは本来電子が飛んでいくはずの方向に飛んでいき、崩壊する。それぞれの中間子が崩壊した位置と時間の差が測定される。これがCP対称性の破れに相当する。



年表で見る 標準理論の進歩



南部陽一郎



小林 誠



益川敏英

(通称 E 研) の教授になりました。着任してみると、連続と続く物理学研究の伝統に力づけられましたが、とてつもない民主主義には大変苦労しました。両氏が自分たちの考えを貫き、オリジナリティーの高い研究が開花した風土がありました。そこで、かつて主流の側から小林・益川理論を眺めていた経験も踏まえて、学生たちには、「主流ばかり追っているのは、何も新しいことは出てこない。ノーベル賞なんか取れないし、群れをなして崖を落ちてしまうこともある」と諭しています。

中間子の湯川秀樹先生、くりこみ理論の朝永振一郎先生、ニュートリノの小柴昌俊先生……。フレーバー素粒子物理学では日本がメッカであり、すでに世界的な仕事をいくつも積み重ねていますが、さらに発展させていくための努力が必要だと思っています。同時に、今回の受賞をきっかけとして、こうした歴史を継いでいく若い人々を育てることに、私たちがもっと力を注がなくてはいけないとの意を新たにしました。講演などの機会を通じて発信し続けて、若い人の科学リテラシーを涵養していくことは大切だと思います。

スーパー KEKB にとってもまたとない追い風になることを期待しています。KEKB によって達成されたルミノシティは、10 の 34 乗 $\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ でしたが、スーパー B では一気に 37 乗ぐらいに上げる必要があるというのが、私の持論です。数百億円もの血税を投入して次をめざしていくのであれば、一気に 1000 倍ぐらいの、文字通り桁違いのインパクトをめざすべきだと思います。KEKB も当時達成されていた 31 乗から一気に 34 乗まで達成できたのですから、日本の技術と加速器研究者の創造力をもってすれば、決して夢物語ではないと思います。CP 対称性の破れはもはやバックグラウンドであり、これからは、超対称性であったり、まったく新しい素粒子であったりと、何か突拍子もないものが出てくることを期待しています。

(2008年10月28日、東京で収録)
(談／構成 塚崎朝子)

小林・益川理論は どのようにして生まれたのか

【話し手】

小林 誠

総合研究大学院大学名誉教授／
高エネルギー加速器研究機構名誉教授

【聞き手】

辻 篤子

朝日新聞社論説委員

*この記事は『総研大ジャーナル』2号(2002秋)
特集「世界最強の加速器 KEKB の挑戦」から再録したものです。

小林・益川理論は標準理論の申し子であった。名古屋大学の坂田グループに代表される自由な雰囲気の中で、アイデアをじっくり育てられたのがよかった、と小林氏。理論誕生の物語を、理論が検証された翌 2002 年にお聞きした。

パラドックスのおもしろさに引かれて

——物理学をめざされたのは?

小林 名古屋大学教授だった坂田昌一先生が提唱したいわゆる坂田模型*1 のことを新聞などで読んだのが、中学校、高校のころ。地元でこんなことがあるんだと、漠然としたあこがれのようなものを持ち、名古屋大学の理学部に入りました。決まっていた科学少年ではありませんでしたが。教養では、数学がおもしろかったけれど、3年のとき、やるなら現実的なことをやりたいと物理を選びました。原理的なことに興味

あり、勝手なことをいろいろ考えて、それが自然でテストされる、というのがおもしろかった。量子力学とか相対論のパラドックスを何とかして理解したいという思いがありました。パラドックスのようなものがあると、がぜんおもしろくなってくる。

——素粒子の研究を始めたのは?

小林 修士課程に進んでからです。1967年ころ、64年に提唱されたクォーク模型はすでにできあがったものになっていて、実体を持ったものかどうか論争的でした。標準理論のように場の理論としてのダイナミクスの記述が完全にできる前の準備段階。

小林 誠 (こばやし・まこと)
名古屋大学で理学博士号を取得して京都大学へ。そこで1973年、益川敏英・同大学助手(現在は京都大学名誉教授)と共同で、CP対称性の破れを説明する「小林・益川理論」を発表した。79年から高エネルギー物理学研究所(現・高エネルギー加速器研究機構)。2003年同機構・素粒子原子核研究所長。06年から同機構名誉教授。07年、日本学術振興会理事。08年、総合研究大学院大学名誉教授。

その中で、名古屋の伝統かもしれないけど、坂田模型からクォーク模型といった模型の立場で、動力学的な問題がどう理解できるか、グループでやっていました。

——そのころの坂田先生は?

小林 僕が修士のときは、学部長だったか、忙しくて、週1回のセミナーに顔を出すくらい。僕自身は一言二言話す程度で、直接指導を受けたとは言えないけれど、研究室全体の雰囲気としては影響がありました。名古屋の素粒子の理論は、大学院生も独立した研究者というのがスローガンで、教室会議のメンバーになれば教室運営でも

*1 坂田模型

1954年、坂田昌一によって提唱され、名古屋グループが築いたハドロンの複合モデル。新型の加速器シンクロトロンによって新しいハドロンが続々と発見されたことから、その奥にある構造を研究した。「すべてのハドロンは陽子、中性子、ラムダ(Λ)粒子とその反粒子から構成されている」とした。これによる新し

いハドロンの予言にも成功する。1959年には群論による整理も行われ、クォークモデルの先駆的役割を果たした。

*2 1960年代の素粒子論とS行列

1960年代の素粒子研究は、新粒子の大量発見に続く混乱の時代であった。主流であったのはS(散乱)行列の理論と呼ばれるものだ。素粒子現象をブラッ

クボックスとみて、素粒子現象の入力(始状態)と出力(終状態)の関係をつけるのがS行列である。「実際に何が起きているか」を問わず、「観測されるもの同士を関連づける」もの。クォークの動力学を中心とする標準理論が広く信じられるようになったのは、1974年の11月革命以後のことと、それまでは実験的根拠のない「形而上学」だと思われていた傾向が強い。