

W/Z から Higgs へ (回顧録)

前筑波大学数理物質系

原 和彦

hara@hep.px.tsukuba.ac.jp

2023 年 (令和 5 年) 8 月 22 日

1 はじめに

高エネルギーニュースに回顧録文を掲載して頂けることになり、恐縮とともに、深く感謝します。KEK の 12 GeV PS で博士研究を開始し、その後は検出器開発を主な活動としてエネルギー最前線で標準模型粒子の研究をしてきた。章立てと内容がしっかりこないが、ご容赦願いたい。

2 標準模型の粒子

2.1 ストレンジ — KEK E49(Λ)

SLAC で深非弾性散乱実験をしていた近藤都登先生によって筑波大学素粒子実験室は 1977 年に立ち上げられ、原は修士学生として 1980 年に同室に加わった。

修士では検出器開発が推奨され、後述の Λ 実験装置は主な開発が終わっていたので、KEK の久寿米木先生の重液シンチレータ HELICON 開発の手伝いをした。紳士である先生からは「海外に行く場合は、女性との手切れはしっかりと」との助言を頂いたが、海外へは学生結婚後だったので面倒な手切れは体験していない。測定室の隣のプールでは鈴木厚人氏が大型 PMT の耐水実験をしていた。

12GeV 陽子ビームを取り出し Λ 粒子の偏極度等の測定をする KEK E49 実験は、東洋で唯一ストレンジバリオンを生成するものだ。原は MWPC のメンテを分担し、 K_s と Λ の生成断面積を比較し、ストレンジジョークを通して、これら粒子がどのように生成されるかを博士論文とした[1]。データ解析は KEK の大型計算機でバンチカードと磁気テープを用いて行った。他大学の院生らともひとつの解析部屋で過ごし、そこで知己となった人々は、その後に各方面で活躍している。

Λ 実験代表は、実験準備が終わる段階で近藤先生から滝川紘治先生に交代となり、安岡・阿部を最初に安田、田中、原の 5 名が博士号を取得した。近藤先生と知己のあったスイスベルン大学 B. Hahn 先生の研究所に 1985 年に手取り 5 千 CHF で就職し UA2 実験に参加した。就職にあたり滝川先生からは「解析は良くできるので検出器を頑張ると」、また、近藤先生からは「実験はひとつ最低 5 年かかるので、どの実験をするのかは良く選択して」との言葉を頂いた。

2.2 W/Z — CERN UA2

UA2 は UA1 とともに前年までに W/Z 粒子を CERN Sp \bar{p} S 加速器で発見していた。ベルン大学では UA2 検出器増強として、最初の 2 年はエンドキャッププリシャワー検出器 ECPT を設計・製作し、後半 2 年はシリコンパッド検出器製作に携わった。UA2 は発見した W/Z 粒子の詳細な評価を継続[2] し、W 粒子質量について最も信頼できる測定値を与え続けた。それ以前の CERN の目ぼしい成果は「中性カレント」だけでアメリカに引け目を感じていたが Hahn 先生は“*There is nothing more to learn from the UA*”と何度か言っていた。W/Z の成果は彼らに大きな自信を与えた。

ECPT [3] はパビア大学とベルン大学の共同製作で、イタリアでアルミ製管体を製造し、ベルン大でワイヤー張り+試験、バビアで XUV 層 2 組+タングステン層+XUV 1 組のものを組み立てた。ベルン大の K. Borer 氏が読み出しを分担し、原はワイヤー試験から、テストビーム評価、コライダーでの初期性能評価を行った。 Λ 実験の MWPC や HELICON での電磁シャワーの経験がそのまま活かしたが、この間、イタリア人の押しの強さとスイス人の性格の穏やかさを目の当たりにした。

ECPT の設置が終わるとシリコンパッド検出器 [4] のセンサー評価を始めた。プロジェクトリーダーは C. Gößling である。当時シリコンセンサー自体はすでに何例かあったが、これは、VLSI を搭載する初めてのハドロン衝突器用検出器である。週 3 回は愛車のボルボ 240 でベルンから CERN に通い、Micron や SINTEF 製センサーの暗電流や静電容量、ノイズなどの基本特性評価を行った。

ヨーロッパでは、少なくともスイス人は、ハードかソフトかに専門化し他人への干渉も最小とする研究スタイルで勤務時間も守り休日を楽しむ。こうした価値観はそれに従うかどうかは別として体験すべきものと感じた。尚、現 CERN 所長の F. Gianotti 氏は UA2 カロリメータグループに属す学生で、美しい姿は遠目からも際立つ存在であった。

ベルン大学からは慰留されたが、Hahn 先生の退職を機に、滝川先生に誘われて消費税が始まった 1989 年 (平成元年) に筑波大学に戻った。

2.3 トップ – FNAL CDF

1976年のC. Rubbia, P. McIntyre, D. Clineによる既存加速器での実験提案 [5] を受け入れずに、米国フェルミ研究所はTevatron加速器への増強を行い、CDF実験は1982年に初衝突を観測していた。CDFは日米伊の3国協力により始められ、日本代表は近藤先生が勤めた。この時期は最初の検出器増強が計画され、原は中野逸夫氏らと中央ミュー粒子検出器増強CMP（プロジェクト代表T. Lyss）に携わった。6インチ幅アルミ枠のドリフトチューブを4層スタックし60cm厚の鉄吸収体の外周に設置するもので、本体の製作をイリノイ大学で行い、その検査システムを筑波大が構築した。大学院生の下島真とともにイリノイ大学に滞在し、電極用PCB製作・接着やワイヤー張りを現地のアルバイト学生らとともに行った。黒人の学生が「日本にraceがあるか」と聞いてきたのが印象に残る。

CDFは1994年にトップクォーク存在の兆候を発表し、1995年3月にDØとともに発見報告をした。崩壊生成物である2つのW粒子の検出が発見のキイであった。日本側の解析は近藤・金信弘氏や院生により進められ、近藤先生からは「CMPを作った原くんのおかげで発見できた」と感謝されたが、この解析への貢献がなかった皮肉だったのであろうな。

CDFではRun2（2001年衝突開始）用増強として、内部飛跡検出器とエンドキャップ（EC）部カロリメータの置換えが検討された。EC電磁カロリメータの検出層は筑波大が3.1章で紹介するタイルファイバー形式で作製した。原は内部飛跡検出器として、シンチファイバのトラッカーを提案したがイタリアグループ等のシリコントラッカーが採用されたため、1997年より浜松ホトニクス（HPK）製のセンサー担当になった。このISL（Intermediate Silicon Layers）[5]は衝突点シリコンと大部分を占めるドリフト検出器CDTの中間に位置し飛跡再構成のアンカー飛跡を与えるもので、4"ウェハに小ステレオの両面ストリップセンサーDSSDで構成された。UA2時のセンサーと比べるとはるかに暗電流安定性が良く、特に表面状態がきれい、逆に一度酸化膜が帯電すると回復に時間がかかることが分かった。N. Bacchettaらイタリアグループから（後にDØグループからも）ストリップ電極分離劣化を指摘されたが、センサーハンドリングの問題であることを逸早く指摘した。プローブ試験をするにあたり、HPKからは納品とは別にCグレード品を無償で送るのでそちらを触ってください、と提案を頂き、シリコンセンサーの様々な性質の評価法を標準化することとなった。指針：物理屋はセンサーに触るな！

衝突点シリコンの放射線損傷が懸念され、2000年から新たにRun2bシリコン[6]の製作を開始した（プロジェクト代表J. Incandela）。これは6"ウェハの片面プロセスで、1kVまで耐圧のあるセンサー製造がHPKは可能であることを示し

た。2005年までにはセンサー製造が完了したが、LHC稼働を見据えTevatronをシャットダウンしている時間的余裕がない、との判断で設置は見送られた。パネルを努めたKEK近藤敬比古氏からは日本側の主張が足りないと言われたが、現行検出器が最後まで動作したのだから結果的に正しい判断だったと言うしかない。CDFとDØは最終的にHiggsに関して 3.1σ に迫る報告を2012年7月に発表した [7]。

2011年のHiroshima Symposium HSTD8では、長年シリコンに携わってこられた広島大の大杉節氏の退職を記念してCDFシリコンの歴史を発表させて頂いた [8]。

2.4 Higgs – CERN ATLAS

ATLASにはスポークスのP. Jenniから参加の誘いを受けていたが、シリコン検出器SCT建設に貢献することで、3年の事前活動の後に筑波大は2000年にATLAS-Japanの正式メンバーとなった。SCTは近藤敬比古氏や海野義信氏らを中心に進められ、この時点で基本設計はほぼ終わっていた。CDFシリコンの経験から量産センサー試験、さらにモジュールの組立や試験に取り組んだ。敬比古氏から「これを超えてみる」と自分が以前に測定したベータ線応答高分布を渡されたが、すぐに凌駕するものを得ることができた。モジュール組立は高力孝氏らが設計し、筑波大の加藤陽一がプログラム化を進めた。丁寧な計測とフィードバック方式により最初にモジュール組立サイトに認定され、しかも最も優れた組立精度を実現した。日本グループ独自の取り組みとして全ストリップを赤外レーザーで全モジュール試験し、読出しASICを含めた総合試験をした[9]。CERNではケーブルリングなどの設置作業も行った。現地の技術者から物理屋がこうした作業を一緒することがとてもうれしいと言われ、印象に残る。

ATLASはCMSとともに2012年7月にHiggsらしき新粒子発見を報告した。代表のGianottiもIncandelaも旧知の間柄でありうれしく思った。筑波大学では広報室主催で9月1日に金氏とともに講演会を行った。「ヒッグス発見」の講演会タイトル原案をヒッグスと断定していない理由から「ヒッグス粒子って何？」に変更してもらった。

2005年からは放射線耐性に優れたp型バルクシリコンの開発を海野氏らと始め、東北大CYRICでの照射試験などを経てストリップ型センサーの設計をすすめた [10]。この成果は高輝度LHC用のセンサーに採用され、HPKがATLASの全ストリップセンサーを製造することとなった。日本グループはピクセル型が主な興味であったため、筑波大がSCT以来の関連からストリップセンサーの品質管理を分担した。原の退職年にセンサー製造が完了する予定であったことも引き受けた理由である。実際はコロナのために予定が延び、現在は筑波大の廣瀬茂輝氏が主導している。ピクセル型で

はセンサー設計やセンサー・モジュールの品質管理に学生が貢献し、KEKの中村浩二氏が丁寧に指導している。

3 検出器開発

既に検出器開発ばかり触れているが、これら以外に新しい、または実らなかった実験のための研究も行った。

3.1 SSC用タイルファイバーカロリメータ

CDFの次の実験としてSSC加速器(40 TeVのpp衝突器)計画が始動した。国内のいくつかの大学とKEKは、1989年10月25日にSDCグループへの参加を呼びかけた。

CMPの関連で最初はミュオン粒子の発生レートなどの算定を行ったが、すぐに筑波大が進めていたシンチレータ光を波長変換(WLS)ファイバーで読み出すサンプリング型カロリメータ(タイルファイバー)の設計を開始した。10 cm角程度のシンチ板にWLSファイバーを埋め込む際の溝形状、WLSファイバー端面の鏡面処理、WLSファイバーと透明ファイバーの融着、多芯ファイバーコネクタなどを新技術として開発した。どれも当時の水準を超える性能で一様性がキイとなるカロリメータ製作の重要技術を確立した[11]。SDCへの適用については放射線損傷が懸念されていたが、KEKの電子入射器を用いて損傷実験をするなどを経て、損傷が深さに依存する系統的なものなので補正可能でエネルギー分解能の劣化は抑えられる、また高速応答性に優れていることからSDC用に採用された。カロリメータ開発は、タイルファイバーを筑波大が主導し、他のSDC日本グループは液体Arを押していたので、敬比古氏からTT(筑波-反筑波)状態と擲擄されたが、採用を受けてANLと共同で中央電磁カロリメータの実機設計を進めた。

1993年10月18-22日に、9th pp workshopが筑波大で開催されていたが、会期中にSSC中止の報がもたらされた。SSCトンネルの約1/4は掘削済みであったが、建設費の不確実性から中止に追い込まれた。開発した一連のタイルファイバー基礎技術はそのままCDFのECカロリメータに転用されたので無駄にはならなかった。

3.2 高速結晶シンチレータの研究

SDC解散後にCDFの後継実験をどうするかで模索があり、近藤先生はCMSへの参加可能性を探り、1995年からはKEKの小林正明氏の下で高速結晶シンチレータとしてPWOの改良やGSO [12]の新開発に取り組んだ。結局、文科省はATLASとCMS両方をサポートせず、近藤先生の筑波大学退職を機に3年弱の活動を終えた。結晶成長の実験を体験し、またGSOは今でもPETに使われるシンチレータでもあり、この間は有益な期間であった。

3.3 ILC用カロリメータの研究

SDC解散後実験のもうひとつの可能性として1995年からILC用カロリメータ開発にも取り組んだ。最初にタイルファイバー技術を用いてハドロンシャワーの成長を調べるハンギングフィル(懸架式)カロリメータをKEKの藤井啓昭氏らと作製した。これは1 m角のプラスチックシンチ板を6本のWLSファイバーで読み出すサンプリング型で、層毎にハドロンシャワー信号を記録することで詳細なシャワー発達を調べられ、懸架式によりシンチと吸収体の構成を簡単に変えられる。ハドロンシャワーのエネルギー分解能は、電磁成分とハドロン成分への応答比が1でない劣化するが、吸収材(鉄または鉛)の厚さとシンチの厚さを適切に選ぶことで1に近づけられることを示した[13]。

その後信州大学のグループらとともに電磁カロリメータの開発やMPPCに着手したが、2000年にATLAS筑波大の代表になってからは活動の重点をSCTに移行した。

3.4 モノリシックSOIピクセル

SCTのATLASへの設置完了後、海野氏に誘われ、2005年にKEKに新設された測定器開発室のSOIグループ立ち上げのメンバーとなった。SOI(silicon-on-insulator)のピクセルセンサーへの応用はKEK新井康夫氏によるイニシアティブで進められた。

まず放射線耐性の評価に取り組んだ。元々はATLASに設置できるモノリシックピクセルの候補と想定していたが、裏面バイアスが回路層に影響を与えるバックゲート効果やFETを取り囲む酸化膜への正孔蓄積のTID(Total Ionizing Dose)効果が顕著で、要求に程遠い性能であった。しかしラピス半導体(始めは沖半導体)の技術協力のもと、埋め込み電極や2重SOIウェハの導入により飛躍的な改善がされた。数kGyで動作不能になるデバイスが2重SOIの下層電極に適切な負電圧を加えることでFET層直下の酸化膜のTID効果を相殺でき、1MGy照射後でも動作することを示した[14]。LHCには不足であるがILC等には十分な耐性である。

SOIモノリシックではピクセル電極面積を小さくできる利点があり、8 μm四方にアナログバッファまで組み込んだFPIXを新井氏やKEKの三好敏喜氏が設計し院生の本多俊介がVLSI実装をした。2017年には世界最高の位置分解能0.65 μmを記録し、半導体検出器にあった1 μmの壁を簡単に破ることに成功した[15]。

ILC実験への適用として1 μs程度の時間情報をもつセンサーSOFISTに取り組み、2020年までに目標を満たす分解能を実現した[16]。この開発では20 μm四方のピクセルに3ヒット分の時間・位置情報を保持するために金のマイクロバンプを用いて3次元積層したセンサーをKEKの小野峻氏や山田美帆氏が設計し、SOIの高機能化も実現した。ILCには消費電力の要求を満たす取り組みが必要である。

3.4 福島第一燃料デブリ

東京電力福島第一原発の核燃料の状態を宇宙線ミュー粒子で透視調査するというアイデアをKEKの永峯兼忠氏が事故直後に提案し、KEKの高崎史彦氏の下に実働チームが作られた。筑波大からは金氏と2名の学生（橋本就吾、高橋優）が参加し、2011年9月に検出器のミーティングを持った。そこで1m長で1cm幅シンチレータ棒を100本並べ、これをXYに2層重ねることで位置検出面とし、これを2組もしくは3組配置することで宇宙線の飛来方向を測定する方式を決定した。年内に東海村原発の原子炉で実証実験をすることとなり、短期間にシンチ-ファイバー系、読み出しMPPC、アンプとFPGAデータ収集系を整備した。MPPCまでは今までの経験ですぐに設計製作に入れたが、FPGA系はBee Beans Technologies社に製作依頼し、読み出しソフトはA実験以来知己のKEK安芳治氏に橋本を指導してもらって整備した。東海村に運び込む前日にシンチの反射塗料を塗り終えるというタイトなスケジュールであった。

東海村での試験からは原子炉水位の変動などが1週間弱で明確に検知できることが分かったが、炉心の背面に隠れている燃料棒の存在を明確にできたのはもう1セットを90度ずらして設置しステレオ観測したためである[17]。ステレオデータ解析はKEKの藤井啓文氏が主導した。

東海村での実績を評価され、東電および国際廃炉機構の支援を受けて2015年から、1号炉から3号炉までの燃料デブリを年毎に観測した。この間、シンチ棒は板の削り出しからFNALでの押し出し成形に変え、2、3号炉ではシンチ棒を互いに5mmずらして2層にすることで位置分解能を上げXY層間を0.5mに半減することで装置全体をダウンサイズした。これは廃炉作業の邪魔にならず、かつ、原子炉建屋に近接設置することを可能にした。どの原子炉も所定の位置に燃料はほぼ残らず、2号炉については压力容器下部にデブリがあることを示した[18]。測定が終わる頃には原子炉内部にカメラが入るようになったが、デブリ量を定量的に評価できる唯一の測定であったことは特筆できる。

3.5 4次元飛跡検出器 AC-LGAD

時間分解能に優れたLow-gain avalanche diode (LGAD) 半導体検出器の開発研究を中村浩二氏らと2017年から始めた。LGADは欧州を中心に開発が始まっていたが、電極を細分化し位置と時間分解能がともに優れた4次元飛跡検出器を実現する事が我々の目標である。細分化方式として、トレンチ分離とAC接合方式をそれぞれ院生の和田冨と大鳴匡史がTCADシミュレーション設計をし、2020年にAC-LGADをHPKで最初に試作した。最適なドーピング濃度を得るために中村氏が主導して試作を重ね、院生の北彩友海を中心とした丁寧な測定で2022年までに時間分解能30psの100 μ m角ピクセルを完成させた[19]。現在は放射線耐性の強化と読出

しASICの設計を進めている。

4 おわりに

研究生生活の区切りを迎えた。UA1を意識しながら活気に満ちたUA2、最高の研究者集団であるCDFやATLAS。これらでの体験は掛け替えなく、常に興味深い研究テーマに取り組みられた。大学事務が作成した原のwikiによるとインパクトファクターを含めた論文数(h指数)が日本一だそう。口の悪い後輩から小林益川より高い、と揶揄されるが、長年、最前線の実験をした記録であり、先輩、後輩諸氏、特に熱心に研究に取り組む筑波大学生に負うところが多い。退職の3月にはつくばエポカルに多くの卒業生に参集してもらった。

人名の所属は当時のものを用いた。この原稿機会を与えて頂いたHEPnews編集部に感謝する。

参考文献

- [1] K. Hara *et al.*, Phys. Rev. D **36**, 1302 (1987).
- [2] R. Ansari *et al.*, Phys. Lett. B **186**, 440 (1987).
- [3] K. Borer *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **286**, 128 (1990).
- [4] C. Rubbia *et al.*, Proc. Int. Neutrino Conf. Aachen 1976, 683.
- [5] A. Affolder *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **453**, 84 (2000).
- [6] M. Aoki *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **518**, 270 (2004).
- [7] T. Aaltonen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **109**, 071804 (2012).
- [8] K. Hara *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **699**, 84 (2013).
- [9] K. Hara *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **541**, 122 (2005).
- [10] K. Hara *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **565**, 538 (2006).
- [11] 原和彦, 放射線 **20-2**, 53 (1994).
- [12] M. Tanaka *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **404**, 283 (1998).
- [13] T. Suzuki *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **432**, 48 (1999).
- [14] M. Asano *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **831**, 315 (2016).
- [15] D. Sekigawa *et al.*, Springer Proc. Phys. **213** (2018).
- [16] H. Murayama *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **978**, 164417 (2020).
- [17] H. Fujii *et al.*, PTEP **2013-7** 073C01(2013); H. Fujii *et al.*, PTEP **2019-5** 053C01(2019).
- [18] H. Fujii *et al.*, PTEP **2021-2** 023C01(2021).
- [19] S. Kita *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **1048**, 168009 (2023).



2023年3月25日エポカルでの会（写真提供 森田洋平氏）