

放射線検出器から 宇宙線生成核種へ



櫻井 敬久
Sakurai Hirohisa

ローリッツエン電気計が、私の放射線へのキタ・セクスアリスだったのだろうか。私は1967年に埼玉大学理工学部物理学科に入学している。ローリッツエン電気計は、1年生の物理実験科目のテーマの1つであったが、顕微鏡のようなものを覗いて指針の目盛り位置を馬鹿に一生懸命に読んで繰り返し記録をとったことを覚えている。今になって思えば箔検電器の精密目盛り版であり積分型空気電離箱の実験である。どんな放射線源を使ったかは残念だが思い出せない。ローリッツエン電気計に荷電した後、線源により指針の目盛り変化の具合が1回1回異なっていたこととバックグランドに興味を持って、しつこく測定を繰り返していたようだ。なぜか、他のテーマより強い印象が残っている。目に見えない放射線を初めて測ることができることに興奮したのだろうか。

1. 宇宙線・放射線へのきっかけ（埼玉大学の頃）

大学紛争の最中にあったが、大学3年の物理学実験で結晶によるX線の回折写真を撮ったのがX線との出会いであった。このときも見えないX線を使って結晶を可視化できたことが嬉しかったのだろう、かなり熱心に写真を撮ったようだ。物理の成績が良い学生ではなかったが、物性の先生に褒められ先生の研究室へ進むものだと思われておられたと友人が言っていた。この実験で初めて放射線被ばくへの注意が必要であることを具体的にお聞きした。

大学4年では宇宙線の研究室に入った。空気シャワー研究の俣野恒夫先生や町田勝先生がおられた。宇宙線のことは何も知らなかったが、友人との雑談や雑誌「自然」（中央公論社）の購読から何となく宇宙への興味をもったようだ。また、当時の物理学科は宇宙線関係の先生が新たに着任して来ており、

その雰囲気も影響したのだと思う。

ゼミではBruno Rossi “High-Energy Particles”を読まされたがチンプンカンプンであった。後年、電離損失の式等が載っていたと分かったが完全な研究専門書であった。卒業研究は光電子増倍管の特性を調べるためのパルス発光回路の作成であったが上手くできたかどうか思い出せない。光電子増倍管に触る初体験であった。

夏休みに、鉛ブロック運びのお手伝いに東京大学宇宙線乗鞍観測所（高度約2,800 m）に上った。食堂で他大学の先生や大学院生の雑談を伺っていると、自分も研究活動に触れているようでかなり刺激を受けた。

2. 初めてのRI線源（大阪市立大学大学院の頃）

1971年大阪市立大学大学院物理学専攻（大阪市大）に進学し、宇宙線研究グループの研究室に入った。当時から大阪市大は宇宙線研究が活発な大学であり、尾崎誠之助先生、東茂先生、北村崇先生等々、錚々たるメンバーが揃っていて宇宙線によるミュー中間子の研究等宇宙線の先端的研究を精力的に進めておられた。

大学院での研究テーマは、宇宙X線の気球観測と宇宙X線検出器の開発であった。1962年の宇宙X線源天体の発見は高エネルギー宇宙物理学の観測的幕開けであり、当時宇宙X線の研究は黎明期にあった。日本においても、宇宙線研究の指導的立場におられていた東京大学宇宙航空研究所の小田稔先生、同研究所気球部門の西村純先生、名古屋大学理学部の早川幸男先生がロケットや気球による宇宙X線の観測研究を開始し主導しておられた。大阪市大にあっても若手の助手の中川道夫先生が中心となって気球観測を進めておられ、先生のご指導のもとに

研究を始めた。

宇宙 X 線源天体からの X 線エネルギースペクトラムは、硬い (hard) か軟らかい (soft) か、宇宙 X 線源によって異なるかが問題であった。10 keV 以上の X 線を硬 X 線と呼び約 100 keV ぐらいまでのスペクトラムと強度の時間変動が観測目的であった。

大気高度 35 km 程度まで上昇すれば、30 keV 以上の X 線を大気吸収の影響を少なくして測ることができる。そのために大気頂上で直径約 50 m にもなる大気球が使われた。X 線測定には NaI(Tl) シンチレータと荷電粒子バックグラウンドを除去するためのプラスチックシンチレータをサンドイッチしたフォスウィッチシンチレーション検出器が使われた。

測定器は軽量化と温度 (−40℃) 対策、光電子増倍管の真空放電対策が求められ、データ転送の回路系まで含めてすべてトランジスタ素子による手作りであった。徹夜で準備していて半田ごてをズボンの上においたまま居眠りしてしまい、熱さで目を覚ましたこともあった。岩手県三陸町の基地から気球は放球された。飛び道具 (気球飛翔体) を使う観測実験は、気球飛翔そのものの失敗もあった。観測した宇宙 X 線源天体は Cyg X-1 であり X 線強度時間変動の解析をまとめた。ちなみに Cyg X-1 は、当時から連星型ブラックホール天体候補として注目されていた。

^{109}Cd (22.2 keV, 88.0 keV) と ^{241}Am (59.5 keV) の密封小線源を検出器のエネルギー較正に使用した。大学院修士 1 年のときに初めて RI 線源を手にした。波高分析器を用いて線 γ 線のガウススペクトルを見たとき感動を覚えた。

研究室では非密封線源は扱っていなかった。1 度だったと思うが、大阪市大医学部だったか定かではないが病院で RI 健康診断を受けた記憶がある。その時、お医者さんに全身素っ裸になれと言われ、身体の隅々まで隈なく調べられた。皮膚の検査だと思うが、このような RI 健康診断は、あとにもさきにもこの時限りである。未だ 20 代であったので恥ずかしかった。

3. 東大宇宙線研の 2 年間

1979 年から 2 年間、特別研究員 (教務補佐員) として東京大学宇宙線研究所にお世話になった。大

阪市大で気球実験と宇宙 X 線検出器としてのガス比例計数管の開発を行っていたことが繋がった。宇宙線研 1 次線グループ (宇宙空間から地球大気に侵入してくる宇宙線を 1 次宇宙線、1 次宇宙線が大気と衝突して生成する粒子を 2 次宇宙線と呼んでいる) では近藤一郎先生と若手の斎藤威さんが中心となり高エネルギー 1 次宇宙線重粒子 (原子核組成) の気球観測を進めていて、そのチームに加わった。

入射荷電粒子のエネルギー損失を測るとき入射粒子の飛跡入射角を同定するための大面積位置検出器が観測機器に不可欠であった。高エネルギー加速器実験では多重線型比例計数管 (MWPC) が位置検出器として使われていたが、そのままでは大型压力容器が必要となり気球実験にはそぐわない。

そこで 1 cm 角 $\times$ 1 m のアルミチューブを約 100 本並べた X 方向と Y 方向の位置検出器を作製した。チューブ 1 本 1 本が芯線を張った比例計数管になっている。多管型比例計数管 (MTPC) と名付けた。気球実験においても正常に動作した。

MTPC の動作チェックには、 ^{109}Cd の 22 KeV X 線を用いた。Z=3.6 の高エネルギー荷電粒子がチューブを通過するときの電離損失エネルギーにほぼ同等であったためである。100 本 $\times$ (X-Y) $\times$ 2 層 = 400 本の芯線張りとは比例計数管動作チェックは、やはり徹夜続きの作業であった。若かったからできたのであろう。

4. 山形大学にて

1981 年 10 月に山形大学理学部に助手の職を得ることができた。静岡県に生まれ川崎市に育ち大阪、東京を経て、山形市に 39 年暮らしている。ご飯とは、こんなに美味しいものなのか、山形に着任しての最初の感動であった。新幹線が開通してから駅弁のご飯の味が平準化されたように感じる。着任してしばらくは雪国であったが、いつのまにか山形は雪国でなくなったようだ。

物理学科の電磁気学講座 (教授 1, 助教授 1, 助手 1) への配属であった (その後、大学改革で講座制は無くなった)。原研で原子核実験をされていた新関八郎先生、宇宙線と環境放射能の研究をされていた野間元作先生がおられた。両先生は、東大宇宙線研の 1 次線グループで宇宙塵の研究をされていた

パイオニアである山越和雄先生と共同で雪中の宇宙塵探索もされておられた。このような研究環境に身をおけたことは、その後の私の研究に貴重で大きな示唆を与えることになる。物故された両先生に改めて深く感謝を申し上げます。

5. 放射線取扱主任者

山形大学理学部に隣接して独立した立派な山形大学放射性同位元素総合実験室(RI 実験室)があった。承認証には、承認年月日が昭和 35 年 5 月 2 日、承とある。障害防止法が制定されて間もなく承認された非密封線源も扱える施設である。

施設設置にあたり電磁気学講座の初代の教授の尽力が大きかったと聞く。研究室には 100 枚を超える総重量約 5 t の鉄板で囲まれたトリチウム測定用大型比例計数管が置かれていた。初代の教授が作製したとのことであった。その後、鉄板は Ge 検出器の遮蔽体に使わせていただいた。鉄板は現役である。

電磁気講座が放射線取扱主任者を出すことになっていると着任した後に聞かされ、受験せざるを得ない雰囲気であった。着任の翌年の夏、大面積パルス型電離箱(直径 40 cm だったか?)を使って鉛中の微量放射性同位元素 ^{210}Po の α 線の測定を一緒に行っていた修士の院生と共に受験することになった。

直前 1 か月の受験勉強は無謀であった。物理はともかく化学、生物、法令は無残であった。院生は合格していた。教官(助手は教員では無いらしい)であったので、その次の年は落ちるわけにはいかなかった。かなりの重圧であったが、受験勉強に耐えられる限界未満年齢であったのだろう。それと山形大学の化学の修士を出たばかりの RI 実験室の教務職員の女性と受験勉強をしたこともあって、合格できた。使った参考書は山県登編「放射線主任者必携」(産業図書)である。今でも見ることがある。良書である。法令集は難しかったので「概説と要点」(日本アイソトープ協会)を使った。

山形大学の放射線主任者になって数年目だったか廃棄作業室と廃棄保管室の増築をすることになり、許可申請をした。このときすべての計算と申請書作成の実務を初めて経験した。研究と並行しての作業でかなりストレスが溜まったが、主任者試験の勉強と申請作業経験は法令と実務の関係の理解を深め

た。また、大学の管理・運営の仕組みに触れることができた。後々役立った。

6. 放射線の教育と研究

教育については紙幅の関係で 1 例だけに止める。物理学科の学部生向けとして「放射線物理学」を講義した。最も意識したのは、スペクトラムの概念と電離損失の式の導出であった。フェルミの「原子核物理学」(吉岡書店)と小田稔「宇宙線」(裳華房)を参考にしたが、肝心のところがスルーされていたので電磁気学を使って補足した(と思っている)。

研究テーマは、大きく分けて放射線検出器と宇宙線生成核種の研究の 2 つである。

6.1 放射線検出器

(1)散乱型 X 線偏向検出器の開発

山形大学に着任して 2 年目であったか、初めて採択された科研費研究テーマである。偏向 X 線が散乱されるとき指向性を持つことを利用する検出方法である。入射部にプラスチックシンチレータを置き四方の NaI(Tl) シンチレータにより散乱 X 線を測定する。未知の領域であった宇宙 X 線の偏向観測に名古屋大学グループが試した方式であるが、基礎特性データが無かったので、どこまで偏向 X 線の測定が可能かを調べた。

このとき、散乱偏向 X 線を得るため RI 実験室で ^{241}Am の電着作業を行った。非密封 RI の初体験であった。基本特性をとることができ 1990 年に米国での国際会議に論文発表をした。

その後、山形大学に着任した郡司修一さん(現教授)が新しい方式を導入し人工衛星観測を目指している。

(2) NASA/MSFC での X 線検出器の研究

在職中の 1989 年の暮れから約 1 年半 NAS/NRC の客員研究員としての Award を受け NASA/MSFC に滞在した。MSFC (Marshall Space Flight Center) はアラバマ州ハンツビルにあり 8 マイル四方の広大な敷地の中にあった。宇宙飛行士の水槽訓練等の施設もあったようだ。

夜、MSFC の敷地内でスピード違反してしまった。

拳銃をもったセキュリティポリスのパトカーに後ろから停止を命ぜられた。停止して車からドアを開けて出ようしたら腰の拳銃に手をやり制止させられた。危うく撃たれるところだった。車から出てはいけないということを後で知った。罰金は 100 \$ であった。今までスピード違反は、国内外を含めてこの 1 回だけである。

MSFC の X 線天文学グループで X 線検出器の開発研究を行った。グループのボスは X 線偏向観測のパイオニアである M.C. Weisskopf であった。ガス放射線検出器の専門家であった英国人の B.D. Ramsey と共同研究を進めた。

研究テーマは、高圧 Xe ガス比例計数管の研究であった。X 線検出器を作製するときガス検出器は大面積化が簡便であるため有用であった。しかし硬 X 線を検出するためには光電吸収断面積が大きい Xe ガスを高圧で使用する必要がある。しかし、当時、ガス圧を高くすると X 線のエネルギー分解能が悪くなるという報告があり、ガス純度の問題であろうと簡単に考えられていた。

そこで、ガス増幅度と電子増殖領域の電場の関係を 10 気圧まで系統的に調べ、ガス圧が高くなると電場が弱い領域で電子増殖をさせられてしまうことを明らかにした。また、10 気圧であっても NaI(Tl) シンチレータに比べ約 3 倍良いエネルギー分解能を得られることを示した。

研究グループに入って 2 週間後であったか研究紹介をさせられた。国際会議での発表経験は少々あったが英語も含めてボロボロであった。約半年後に、件の研究成果の一部をセミナーで報告したところ、普段はほとんど口もきいてくれなかった連中から good と言われ気を良くした。この 1 年半の滞在は、今までで 100% 研究生活に没頭できた唯一の期間であり貴重な経験であった。

ちなみに使用した RI 線源は ^{109}Cd と ^{241}Am である。強度は、日本で使っていたものより強いと思うが、忘れてしまった。

(3) キャピラリープレート比例計数管の発明

院生（修士）の頃、小田先生が宇宙 X 線研究における偏向度観測の重要性について話されたのを聞いて、X 線偏向度の検出に光電効果の光電子の射出の指向性を利用できるのではないかとずっと思っ

ていた。Ramsey 達が開発していたメッシュ型 X 線撮像ガス検出器がヒントになったと思うが、光電子飛跡を撮像すれば X 線偏向検出器ができると考えた。しかし、気体中と雖も光電子飛跡のサイズは数 mm にも満たない。

ふと、電子の増殖を細い管の中でできないものかと考えた。浜松ホトニクス株式会社がマイクロチャンネルプレート用にガラスキャピラリープレートを作っているということを知り早速直径が $100\text{ }\mu\text{m}$ の管の束からなるプレートを使って試した。夜中、院生と実験をしていてガス電子増殖をしている信号を見つけたときの感激は何とも表現できないものであった。特許も考えたが論文を優先して 1995 年 10 月に投稿した。

念願の光電子の飛跡は、各管内でのガス増殖時の発光を捉える装置を開発して ^{109}Cd 22 keV X 線の光電子の飛跡の撮像に成功した。これらの研究成果によりスウェーデンのストックホルムで開催されたイメージング検出器の国際会議の International Advisory Committee のメンバーに選ばれ 2003 年と 2006 年に招待講演を行った。時季は 6 月だったと思うが、晩餐会が夜 8 時から始まり 12 時頃まで続きホテルに夜中の 2 時に戻り朝 9 時に講演するのは辛かった。北欧の人達は平気なようであった。

山形大学に着任してきた門叶冬樹さん（現教授）が種々の応用研究を進めている。

6.2 宇宙線生成核種

(1) ^{14}C と年輪

1995 年に概算要求特別設備費が認められ、極低レベル液体シンチレーションカウンター Quntulus が設置された。

^{14}C は、半減期が 5730 年の β 線核種である。宇宙線が大気元素と衝突して主に対流圏上部と成層圏下部で生成される宇宙線生成核種である。 ^{14}C は CO_2 となって大気及び海洋と炭素循環を行い地表の樹木年輪に光合成により取り込まれる。年輪の骨格成分であるアルファセルロースは年輪間移動をせず年輪に固定される。そのため、年輪中 ^{14}C はその年の大気中 ^{14}C 濃度を示している。したがって、年輪中 ^{14}C 濃度変動は、年々の宇宙線強度変動を示す。

半減期から約 5 万年程度まで過去の ^{14}C 濃度変動を測定することが可能である。宇宙線強度は太陽

活動によって変動されるが、 ^{14}C 濃度の 11 年変動は 0.4% 程度とかなり小さい。

そこで、過去の宇宙線強度変動を測定するために大量の年輪試料（1 年輪当たり 100 g）を化学処理してアルファセルローズを抽出し大量ベンゼン試料（10.5 g）を作製することにした。Quntulus のバックグラウンドレベルは 0.09 cpm/g で 0.2% の高精度測定が実現できた。

化学処理法は、 ^{14}C 研究の先駆者で権威であるワシントン大学の Prof. M. Stuiver にシアトルまで行って教えを乞うた。未だ ^{14}C 研究について何も分からない若造にも応対してくれ丁寧に教えていただいた。感謝である。

主な年輪試料は BC466 年に山体崩壊により埋没したと考えられる直径 1 m を超える鳥海神大杉年輪であった。この年輪試料は、Quantulus 設置時に大学院生と鶴岡市の銘木店の前を通りかかったとき、偶然に出会ったものである。鳥海山麓では大木を掘り当てて、関西方面の料亭に供する商売があるのだと言っていた。

多くの学生、大学院生が忍耐強く実験を行い多くの研究成果を上げた。詳細は割愛させていただく。

非密封試料を扱える RI 実験室の役割は大変大きかった。

2011 年に山形大学高感度加速器質量分析センターが結城章夫学長（当時）のご理解とご尽力により設置された。微量の ^{14}C 試料が測れるようになりファシリティとして学内外の多用な研究に貢献している。

(2) ^7Be の長期観測

2000 年の夏頃だったと思う。遮蔽体付き高純度 Ge 半導体検出器システム（HpGe）が設置された。

記憶が定かではないが、1999 年の JCO 事故を受けて文科省が全国の国公立理工系学生への原子力関係教育の予算措置により整備されたと聞いている。山形大学理学部学生の環境放射能測定実習に使用してきた。

ハンディ空気サンプラーにガラスろ紙をセットして吸引し、ろ紙を HpGe で γ 線測定を行い空气中自然放射性核種の同定を行う学生実験である。今でも続いていると思う。

学生実験にだけでは Ge 冷却用液体窒素がもった

いないと考え、4 年生の卒業実験及び修士の院生のテーマとして大気中宇宙線生成核種の長期時間変動観測にも使用することとした。理学部屋上に 1000 L/min. のハイボリウム空気サンプラーを設置し毎日ろ紙交換をして大気中 ^7Be 濃度変動を観測するものである。

宇宙線生成核種 ^7Be の生成は ^{14}C と同様な高度で生成されるが、半減期が 53.5 日と短くエアロゾルに付着して降下してくる。そのため、宇宙線強度の短時間変動（例えば太陽の 27 日自転周期）や太陽 11 年周期活動との関係を調べることができる。約 19 年間のデータの蓄積ができた。

地球規模での大気中 ^7Be 濃度と比較するために、高緯度のアイスランド、中緯度のユタ、低緯度のケニア、バンコク、高度 5200 m のボリビアのチャカルタヤでもサンプリングを行った。チャカルタヤ観測所に上る時はラパス市内で 3 日ほど体を慣らす、初めての夜急に心拍が激しくなり急遽ラパスに降ろされ難を逃れた。裕福な人は市内の低地（それでも富士山高度）に居を構えたとのことだった。

これらの試料は、共同利用研究設備である東大宇宙線研究所の地下 20 m の柏微弱放射能測定設備（HpGe）により測定している。海外サンプリングにあたっては、名古屋大学太陽地球環境研究所（当時）、国立極地研究所、東大宇宙線研究所の皆様のご協力とご支援により実現できた。感謝を申し上げます。

2004 年だったと思う。この頃、東大宇宙線研究所の客員教授を併任していたこともあり、金沢大学の小村和久先生に日本アイソトープ協会理工学部会超低レベル放射能測定専門委員会の委員にお誘いされた。青山道夫先生（気象研）をはじめ低レベル放射能測定のご専門の先生方が色々な研究をされていることを生でお聞きすることができ大変勉強になった。

7. 福島第一原発事故と山形県

定年退職のほぼ 1 年前に福島第一原発事故が起こった。東日本大震災の地震が発生したとき、東大宇宙線研 6 階で会議を行っていた。偶然、物性研にきていた山大的先生に車に乗せていただき 17 時頃柏キャンパスを出発した。高速道路は閉鎖されていて山形市の自宅に着いたのが 3 月 12 日の 15 時頃で

あった。

停電のため屋上サンプラーは止まっていた。事務の方に無理を言って発電機をお借りし3月12日の20時からサンプリングを再開した。

当時、山形県では、HpGeが山形県衛生研究所に1台あるのみであった。急遽、緊急時対応で水道水測定に山大のHpGeを使用することになった。また、結城章夫学長（当時）にお願いして休眠していた古いHpGe（相対効率40%）を修理して食肉等の測定に協力した。

山形県内への放射性物質の降下分布を調べておくことは重要と考え山形県水大気環境課と協議して2012年、2013年の2年間をかけて県内全域233か所の土壤中放射性セシウム濃度を測定し県内放射性セシウム分布地図の作成を行った。土壌試料採取は山形県が受け持ち、測定は山形県環境科学研究センターに新たに設置されたHpGeと山形大学のHpGeにより分担した。

この事業は山形大学の結城章夫学長、小山清人学長、そして山形県の関係各位のご尽力により実現したものです。事業を進めるに当たりRI実験室の乾恵美子教務職員の活躍があった。この場を借りて感謝申し上げます。

大気圏核実験、チェルノブイリ原発事故、福島第一原発事故と約四半世紀（25年）の間隔で放射性

降下物を経験した。測定記録をきちんと残すことが責務だと思っている。

8. おわりに

気がつけば50年近くをRIに触れて過ごしてきた。半減期は厄介なものでもあるがRIの魅力でもあると思っている。

山形大学を退職して2年間を山形大学プロジェクト教員、その後3年間を放送大学山形学習センター所長として教育・研究に関わって勤めさせていただいた。今は、採択された科研費の研究に苦楽している。しつこさだけが取り柄かもしれない。

齢70まで無事勤めてこれたのは、多くの先生方、教育・研究に付き合ってくれた学生、院生の皆さん、種々のサポートをして下さった職員の皆様のご指導、ご協力、ご支援によるものです。とりわけ山形大学理学部の郡司修一さん、門叶冬樹さん、RI実験室の乾恵美子さんには、在職中から現在に至るまで大変お世話になっています。

改めてみなさまに、深く感謝を申し上げます。

（山形大学客員教授・山形大学名誉教授）