

# ラドンを追いかけた日々



下 道國  
Shimo Michikuni

## 1. はじめに

戦時中の昭和 18 年（1943 年）2 月に大阪市内で生を受け、間もなく疎開した兵庫県川辺郡西谷村（現：宝塚市）で小学時代を過ごした。中学生になってすぐに愛知県蒲郡市に転居し、以降、中学、高校、大学、就職先も一時期を除いて愛知県内である。現在、岐阜県に住んで 25 年になるが、名古屋のベッドタウン的な住宅地なので、半分は愛知県民と言えそうである。1960 年代のわが国は、高度成長期で社会全体が大変活発な時代であったが、家庭の事情もあって早く就職することが第 1 目標であった。そのような状況であったので、電気工学や機械工学、化学工学といったいかにも工学部らしい学科を避け、少し理学的な臭いを感じとった名古屋大学工学部応用物理学科に、1962 年に入学した。

4 年次になって卒業研究の配属先を決めるに当たり、超音波関係の研究に関心を抱いたが、残念ながらその関係の研究室はなかった。翌年に原子核工学科の 1 講座を担当することになる川野実教授（当時は学部共通講座）の「観測のフィールドワークに連れて行く」との言葉に、卒業後は就職と決めていた私は気を惹かれてその研究室に入った。実際に、夏季に乗鞍岳と三重県鳥羽市の臨界実験所での観測に同行が許され、手伝うことで研究の一端を垣間見るようになった。

以下では、44 年間の研究生活の概略を述べる。

## 2. 名古屋大学時代

### 2.1 事始め

川野教授は、大気電気学の権威で、雷現象と密接に関係する大気中のイオンの発生メカニズムやその挙動解析を研究課題としていることから、自然環境

での観測が不可欠であった。大気イオンは、主に宇宙線や地殻  $\gamma$  線で生成されているが、研究室では、大気中のラドンとその子孫原子もイオン生成にかなり寄与していると推測しており、これらの観測と挙動解明も重要な課題となっていた。

卒業研究では、大型（直径 30 cm、高さ 30 cm）の液体窒素冷却式拡散霧箱で、空気中のラドンを観察するテーマを与えられた。河野紘一君とペアでこれに当たり、上・横の 2 方向からの写真を 250 組ほど撮影し、その飛跡の計測からラドンと子孫原子から出る  $\alpha$  線の飛程の頻度分布を得た結果は、後日、原子力学会誌のショートノートに採録された。

これがラドン研究の事始めであるが、卒業研究を通じて興味と関心が沸き上がり、研究室に助手として残ることで研究者としての道を歩むこととなった。

### 2.2 若き助手時代

1966 年 4 月、就職の決まっていた企業を辞退して、全国的に大学・学部・学科が増設されるラッシュの中にあって、原子力行政の一環として新設された原子核工学科の助手として採用された。本学科は、国立 7 大学に原子力関連学科として 6 番目に設置された（翌年北海道大学工学部に原子工学科が設置された）ことから、原子炉工学よりも放射線工学に力点が置かれていた。

研究テーマとしてはじめに与えられたのは、大気の渦動拡散係数を実測データから決定するというテーマであった。大気電気学、気象学の勉強と並行して、広場の中心にウインドミルという大気電場測定器を置き、それを取り巻くように医学部から移管した複数の  $^{60}\text{Co}$  を配置して、放射線によって大気中にできたイオンによる電場の変化を測定することであった。このテーマは、次に述べる原子炉研修所への出向と、川野教授の半年間のフランス出張とで

満足な成果が出ないまま終了した。

学卒の助手で、しかもおよそ縁の無かった原子力関連学科の所属であったから、まずは勉強ということで、翌1967年秋から半年間、日本原子力研究所の原子炉研修所（炉修）に入所した。半年間で大学修士課程2年分を教育するという研修所の濃密教育についていくのはなかなか大変で、特に原子炉関連の講義に追いつくのは苦勞した。炉修後に原子炉主任技術者試験を受けなくてもよいのを幸いに、北大原子工学科から来た佐藤（旧姓秋本）正氏と放射線計測の勉強を主とした。この時の経験が後年の表面障壁型半導体検出器の自作につながる。なお、当時の研究室のスタッフは川野実教授以下、池辺幸正講師、中島敬行助手、技官1名、秘書1名と私である。

炉修を終えて帰学して後、大気電気学から出発した環境放射能と放射線計測を考えるものの、前記のような状況で、未熟な私には自ら具体的なテーマを見つけられず、焦りを感じていた。この頃までのラドン研究は、わが国では、明治期から気象学や温泉調査、断層調査、地震学などの領域で濃度分布調査を中心になされてきている。欧州では、既に19世紀中葉に鉱夫の肺がんの一因としてラドンが認識されており、1950年代にはB.Hultqvistによって一般住宅内のラドンとトロンの測定とそれに基づく肺への影響も研究されている。1960年代はわが国でも人形峠でウラン採掘が行われるなど、採鉱・製錬施設での放射線防護の立場からラドン関連の測定と安全対策がなされており、多くの知見が蓄えられていた。1960年代後半の頃は、世界的にもラドン研究はあまり活発でなかったように思う。その頃であるが、学会で「今更ラドン研究をやって、何か新しいことはあるのか」との質問を受けた記憶がある。

このような状況にあった時、川野教授からトロン（ラドンの同位元素； $^{220}\text{Rn}$ ）に取り組んではどうかと示唆された。当時、国内ではトロンの測定はなかったが、折よく出たフランスの研究者によるトロン測定の論文を参考にして、まずは測定器を作ることに取り組んだ。大気中のラドン、トロンの濃度は低いことから試料空気を多く採取する必要があり、容積30ℓの大型の通気式電離箱を設計・製作した。ラドンとトロンの半減期（ $^{222}\text{Rn}$ :3.82日、 $^{220}\text{Rn}$ :55.6秒）の差に着目すると、通気時にはラドンとトロンによる電流値が得られ、非通気時にラドンのみによる電

流値となることから、両者の差を取ることでトロンの値が得られる方法を採用した。これにより、地表近傍大気中のトロンの垂直分布を得るなどして2編の論文としてまとまった。

なお、川野教授は、1973年1月に逝去され、その3年後、研究室は池辺幸正助教授、中島敬行講師、飯田孝夫助手、技官1名、秘書1名と私（助手）の体制で継続されたが、研究内容は環境放射線が主となっていた。ただ、1970年代後半まで、研究室の雰囲気は保健物理に勤しむという意識はあまりなく、私自身も学会活動は、1966年に東京で開催された大気電気国際会議を契機に設立された日本大気電気学会（放射能も対象分野）や気象学会が主で、原子力学会と保健物理学会は従であった。

### 2.3 ラドン測定器の開発と較正

これまでのラドン研究の蓄積から、過去になされていないこと、人のしないことを見つけるのは難しかったが、自然環境における長期の連続データがないこと、さまざまな自然環境を比較するデータの乏しいこと、特異現象に着目したデータと解析が見当たらないことなどから、これらを念頭に地球科学的視点でラドン・トロン及びラドン子孫原子のデータを得ることとした。この頃、海外の学術誌にウラン鉱山関連での測定器の開発や実測データ、あるいはラドンによる肺がんに関する論文が見られるようになり、大気中のラドン・トロン及びそれらの子孫原子について、地球科学とは異なる観点から問題意識を持つようになった。更に、ラドンの人体への影響の大きさを明示した1977年の国連科学委員会報告書に接するに及んで、保健物理にも関心が高まっていった。

当時、市販の測定器のないことから、ラドン測定器の製作から始め、測定器の較正、濃度測定・解析と研究を進めていった。すなわち、①連続ラドン・トロン測定器の製作及び測定技術の確立と絶対較正、②子孫原子の連続測定器、子孫原子弁別測定器及び粒径分布測定器の製作、③エアロゾル粒径分布測定器の製作、④各種環境におけるラドン、子孫原子及びエアロゾルのデータ取得、⑤ラドン及び子孫原子の大気中での挙動と付着粒子形成過程の解明、⑥ラドン子孫原子の呼吸気道沈着算定、⑦生活パターンの分析と呼吸量の関連及びそれらと線量の関

連分析，⑧ラドンによる呼吸器官の線量評価であるが，必ずしもこの順に実施したわけではない。

製作した具体的なラドン ( $^{222}\text{Rn}$ ) 測定器は，①先述した通気式電離箱，②パルス型の測定器（①より測定下限が1桁下がり，大気濃度の連続測定が可能），③測定携帯型の簡易測定器（測定精度を下げ，短時間測定用），④地表面設置型測定器（地表散逸ラドン測定用）である。ラドン子孫原子測定器は，①移動型連続測定装置（子孫3原子の空气中濃度を同一と仮定した概略値測定用），②子孫3原子弁別連続測定装置，③放射性粒子粒径分析装置である。これらの設計と解析ソフトは我々が行い，業者に製作を委託した。

濃度を正確に求めることは基本であり，重要であることは言を俟たないが，誰もが苦勞することである。測定値の較正では，検定済みのラジウム溶液から発生する既知の濃度のラドンを測定することで，測定値の絶対較正ができる。しかし，ラジウム溶液から発生したラドンを測定するまでに，ラドンガスの封入や希釈などを経ることから理論値を確定することは容易でなく，一方，測定器の制約や較正実験の一時的中断もあり，理論値と測定値の一致を見るまでに20年の年月と多くの学生の研究があった。

この一連の研究を進めるに当たっては，ラジウムから発生したラドンを使用することで，非密封線源としての取扱いの許可を得ることが必要である。ラドン発生装置，ラドン蓄積容器，ラドンガスの抽出器の配列やガスのリークのチェックなど，いわば独自の研究室仕様を作り，慣れない書類を作成して科学技術庁に申請し，放射線取扱主任者の教授から無事に許可がおりたと聞いたときは安堵した。

## 2.4 データの収集と解析

連続測定データから日変動，日日変動，季節変動の状況が分かった。屋内ラドン濃度は換気の状況と入気用のフィルタの捕集効率に依存すること，各種環境での測定から屋外では $1\sim 10\text{ Bq/m}^3$ ，屋内では $5\sim 50\text{ Bq/m}^3$ とわが国の屋内外のラドン濃度の概況を掴むことができた。これらは，測定時期と地域は違うが，日本分析センターの後の調査結果と一致している。また，ラドン子孫原子からなる自然放射性エアロゾルの粒子直径は $0.08\sim 0.2\ \mu\text{m}$ であること，またエアロゾル化する時間は $10\sim 200$ 秒であるとい

う結果も得た。これらのデータの解析から，単体原子がエアロゾルに付着する確率を表す実効付着係数を求め，それが理論値と一致することを確認した。また，ラドンの発生は陸であり，海洋での発生は無視できる程度であること，冬季における日本列島上のラドンは中国大陸で発生したラドンが多く，それらの日本列島への移動時間が $1.5\sim 2.0$ 日程度であるという知見を得た。

他方，保健物理的観点からの解析では，既存の手法による線量算定を試みた。粒径分布の測定データは直径が $0.08\sim 0.2\ \mu\text{m}$ の粒子の割合が多いことから，その結果，全体としては呼吸気道の中位部分に多く沈着すること，単体の原子は拡散係数が大きいことから，呼吸器のうち鼻咽頭，喉頭での沈着が大きく，気管支の中ほどより奥には入らないこと，逆に， $0.2\ \mu\text{m}$ ほどの粒子は拡散係数が小さく気流に乗って運ばれるために，肺の奥ほど沈着量が多くなり，この程度の粒子が最も奥まで入ること， $0.2\ \mu\text{m}$ より大きい粒子ほど鼻腔内の毛や咽頭部に気管支上部に沈着するなどの知見を得た。また，制作した呼吸器モデルを用いた実験では，部位によって沈着量が異なること，あるいは生活動態のデータからは，性別と年齢別による呼吸量の差異から呼吸器官をベースにした実効線量の違いを評価した。

以上の成果は，学位論文（論文博士）とまとめることができた。

## 2.5 テーマ以外の研究と共同研究

自己の研究とは別に，研究室で進めている大気中の電気現象に寄与する放射線の効果に関する研究に協力し，また，蓼科高原や木曾駒高原などでの大掛かりな野外観測のほか，中国核実験による空間線量の変動分析などの成果は学会発表や共著論文となった。さらに，海外からの研究者を受け入れての共同研究や，特に中国国内におけるラドン調査では，中国の研究者との交流も多年にわたり続いた。

京都大学原子炉実験所の空調設備に着目して，ラドンと子孫原子の性状と挙動に関する研究を進めた。また，京大原子炉の辻本忠助教授を首班とする原子力発電所周辺環境放射線モニタリング調査研究に参加して，モニタリングに及ぼす自然放射線の影響を調査した。科学研究費による研究の一環として，航空機による上空観測や船舶で海上観測，島嶼

での測定など、外部の共同研究に参加するなどして、さまざまな環境におけるラドン濃度のデータを得るとともに、地球科学の視点から解析を試み、論文とした。

1970, 80年代は、ラドンに関してICRPの見解が出るなど、ラドンの健康影響に関して関心が高まっていた、測定が世界的にも重要な課題となっていた時期である。共同校正プログラムでは、当時、ラドン測定技術に優れていた国内4大学（名大工学部、京大原子炉実験所、早大理工研、東理大理学部）との共同比較実験を主導して行い、4者間の値がよく一致することを確認することで、わが国のラドン測定技術のレベルの高いことを確認した。また、世界の標準3機関（米国、欧州、豪州）による国際共同比較プログラムに参加し、良好な結果を得た。さらに、国内の11の大学・研究機関をまとめて米国に赴き、米国の標準機関であるEML（Environmental Measurement Laboratory）で校正実験を実施し、数%の誤差の範囲内で一致する結果を得た。これら一連の成果は、わが国のラドン測定技術レベルの高いことを示すものであったが、今なお世界はおろか地域の標準となるべき施設を持つに至っていないことは、現在、ラドン自体とラドンを介した廃棄物の安全基準等が議論の途にあることを考えるとき、誠に残念なことである。

### 3. 名大以降の仕事

1992年4月、故森内和之先生の縁で26年間奉職した名古屋大学を辞し、神野学園岐阜医療技術短期大学（現、岐阜医療科学大学）に着任した。同学では診療放射線技師の教育に携わりながら、研究面では、水中ラドンの測定を始めるとともに、東海・近畿・四国圏内の9府県の空間線量率の測定し、地域の線量マップ図を作成した。

1997年5月に、科学技術庁放射線医学総合研究所の内部被ばく・防護研究部の部長に採用された。同部は、故松岡理先生がプルトニウム被ばく影響研究のために立ち上げられた施設で、稲葉次郎先生がラットへの暴露実験を継承してプルトニウムの発がん研究の成果を挙げていた。筆者の採用は、研究が一段落した後の研究を模索する過程で、部として同じ $\alpha$ 放射体であるラドンを使った実験を計画してい

ることと関連していた。赴任した頃は、わが国はバブル期崩壊の時期と重なる経済の激変期であった。1999年末に大型の補正予算が編成され、その恩恵でラドン研究のためのラドン棟の建設が認められ、小泉彰主任研究官、山田裕司主任研究官らを中心に内部被ばく・防護研究部員はじめ関係者の協力により設計・建設が進められ、ラドン発生装置、ラドン暴露チェンバなどが整備された。私自身は、後述の状況もあって、ほとんどノータッチであった。すなわち、この時期は、官公庁再編が行われたときであり、放医研が独立行政法人に移行するに伴い、私自身はその関連業務に時間を取られ、完成後のラドン棟で研究をする機会もなく、所内の組織再編で発足した放射線安全研究センターの責任者としての業務に追われた。放医研退職後に、外部の者としてラドン棟で校正実験等を実施することで施設を使用することができた。

2002年2月に放医研を辞し、藤田学園藤田保健衛生大学（現、藤田医科大学）衛生学部に移った。本学でも診療放射線技師の教育に携わるとともに、これまでと変わらずラドン研究と環境放射線の研究を続けた。本学においても学内改革が進められ、衛生学部が医療科学部となり、診療放射線技術学科が放射線学科となるなど、退職前の2年間は学科長としての業務やこれに関係した仕事に当たることになった。

2008年3月に退職し、現在は同学大学院の客員教授として院生の教育の一端に協力している。

### 4. 研究外で行ったこと

学術に関する活動として、1990年京都で開催された「エアロゾル国際会議」に協力した。1991年8月に京大原子炉実験所にて、国内で初めてとなる「ラドンシンポジウム」を辻本忠助教授を中心にラドン関係者が協力して開催した。1997年10月に東和大学で開催された「人間環境のラドン・トロン国際シンポジウム」に協力したほか、セミナーや研究会を立ち上げて、ラドン研究者間における研究紹介や情報交換、親睦などを図った。

研究以外では、学会の運営以外に、国の委員会（原子炉安全審査会、原子力安全委員会の専門部会、放射線審議会など）、協会や民間組織の委員会・研究

会などに専門家として関わるが増えた。中でも、ウランは環境中に存在する半減期の大変長い自然放射性物質であることから、原子力発電等におけるウラン廃棄物処分問題にも環境・保物の立場で、海外の処分施設の視察や国内での検討会等に長い間関わることとなった。

2011年3月の東京電力福島第一原子力発電所事故に際して、これまで放射線に関わる仕事をしてきた者の責務と考え、日本保健物理学会員の有志で「専門家が答える暮らしの放射線Q&A」をネット上に立ち上げ、後に学会に引き継いで2年間活動した。

## 5. おわりに

.....  
大学4年生の卒業研究から退職するまでを数えると、40数年間ほとんどラドンに関連した研究に携

わってきたことになる。測定器の開発、さまざまな環境での測定、それらのデータによる地球科学的見地と保健物理学見地からの解析など一連の研究を振り返り、系統だったラドン学として体系づけたと思っている。

仕事場は4機関に及んだが、その間、よき先輩や同輩、研究仲間、又研究熱心な学生・院生諸氏に恵まれた。環境関連の研究は一人でできるわけではなく、多くの方々に支えられて研究生活が遅れたことは、大変ありがたいことであった。ここではこれらの方々の氏名を挙げることは控えましたが、この場を借りて、不徳・未熟さゆえの非礼をご宥恕願うとともに、改めて御礼申し上げます。

(藤田医科大学 客員教授)