

放射線防護とリスク学を追いかけて



甲斐 倫明
Kai Michiaki

1. はじめに

大学進路選択は未熟な高校生にとって山頂も見えずとも道を選ぶ登山の一步のようだ。多くの同級生が医学部を選択する中、私は当時の炭鉱事故から「安全」とは何かに心が動いた。ある時、新聞の社説に影響を受けたことがきっかけでなぜか原子力の道を選んだ。エネルギー源ではなく安全問題としての原子力に関心をもっただけに原子力の講義から遠ざかっていた頃、医学部から講義にきていた吉澤康雄教授との出会いがまさに放射線防護への登山口となった。工学や医学などの総合科学の色彩を帯びた放射線防護（放射線健康管理学）という学問に心惹かれ、東京大学工学部原子力工学科の協力講座であった医学部の吉澤研究室に大学院進学したのが放射線防護の第一歩であった。当時 ICRP 委員（第4専門委員会）であった吉澤教授は ICRP の歴史と哲学を語り、放射線防護の学問としての広さと深さに面白さを感じた。

2. SPEEDI の開発（原研時代）

大学院時代に米国 TMI 事故が起き、原子力安全の論争が沸き起こっていた。我が国でも緊急時対応の研究が開始されるようになり、私は東海村の日本原子力研究所（現在の JAEA）環境安全研究部に所属し研究者としての歩みをはじめた。事故で大量に放出された放射性物質からの環境での拡散移行、また人の被ばく線量を予測するシステムが開発されるプロジェクトに参加することになる。従来の定常の拡散モデルではなく、緊急時の気象条件に応じた拡散モデルを開発すること、それによる線量計算方法の開発、さらに、環境モニタリングと連動して逆計

算によって放射性物質の放出量を推定する研究が行われた。この研究プロジェクトでは大型計算機によるシステム開発から実用的な小型化（当時のミニコン）を進め、当時の放射線安全分野としては破格の予算で進められた。

原子炉事故特有の問題である放射性ヨウ素が甲状腺被ばくに至る放射性ヨウ素の体内動態は当時の放射線医学総合研究所でも取り組んでいた研究課題であった。日本人の放射性ヨウ素の体内動態である甲状腺移行率や生物学的半減期が欧米人データに比べてなぜ低いのか、日常的な安定ヨウ素摂取がどのような機構から影響しているのか、我が国の甲状腺機能の臨床研究を網羅的にレビューして仮説を立てて数理モデルによって検証する方法をとった。これによって量的な推定ができることを示した。また、胎児に対する線量評価など新しい課題にも挑戦し、研究の基礎を学ぶ時代となった。5年間の原研時代は、原子力事故・緊急時対応や環境放射線研究を行う同年代の研究仲間を得た20代であった。

3. 緊急時対応と放射線リスク（東大時代）

5年の原研時代を経て、東大の研究室（医学部放射線健康管理学教室）の助手（現在の助教）として戻ったのが1986年であった。その年の4月26日にチェルノブイリ事故が起きた。東大に戻ったばかりに事故と向き合うことになる。対岸の火事と思ったら、日本の技術者4名がモギレフから帰国するので体内放射能を測定する依頼が吉澤教授に入り、早速4名を東大のヒューマンカウンタ（全身放射能カウンター「WBC」を東大ではこう呼んでいた）で測定することになる。チェルノブイリ原発サイトから北に約300 km離れた町からの帰国と聞いていたの

で検出しないことで安心してもらおうという狙いもあった。しかし、測ってみると、 ^{123}Te と ^{123}I からの多くのフォトピークが見えてきた。

チヨルノービリ事故がもたらした我が国への影響は WBC を全国のサイト周辺の医療機関に設置して、万が一の時には体内放射能を測定するという方針がとられた。そのために緊急時に測定者となる医療関係者の教育・訓練を手伝うことになった。このとき得た教訓が固定型の WBC では技術的には対応できないことであった。そこで私たちの研究室で提案したのが測定できる人材を乗せた移動型 WBC であった。実際、福島ではこれが機能した。

原子力事故時の線量評価から内部被ばくの研究にシフトしていたその頃、米国アカデミーの BEIR-III 報告書が 1980 年に出版されて放射線関係者の間で関心をもたれるようになっていた。私がこの報告書に関心をもったきっかけは、放射線のリスク推定が数理モデルによって大きく変わることに関心をもったことである。また、放射線科学者の論争になっていることが私たちの放射線防護・影響を研究している研究室として注目しておく必要があると考えたからでもあった。論争は 10 mSv 程度のリスク推定に必要な線量反応関係のモデルに対するもので、マイクロドシメトリ論を基礎に Q モデルを主張する Rossi に対して、疫学データを基礎に L モデルを主張する Radford との論争は報告書で両論併記になっていた。私に関心をもったのはこの論争ではなく、あまり注目されていない相対リスクと絶対リスクという 2 つの生涯予測モデルについてであった。放射線によって誘発するがんのリスクはベースラインと独立なのか、依存するのかという対立するモデル論争であった。ICRP の 1977 年報告や UNSCEAR 報告では絶対リスクモデルを用いて推定していて、ベースラインに比例すると仮定する相対リスクモデルは新しいリスク推定法であった。東大の研究室では動物実験も行っていたので、生物影響（胎児影響）と向きあう中でリスクは私の研究テーマとなっていた。ベースラインと独立かどうかを解明するには、放射線発がんの仕組みそのものに関係していることから、放射線発がんではそれまで研究されてこなかった発がん数理モデルを研究するようになる。BEIR-III のモデルを解析していくことでわかったことは、人の疫学データや動物実験データは相対リス

クモデルや絶対リスクモデルと比べた場合、時間的変化は相対リスクモデルのほうが適合する傾向にあったが、強く支持する証拠はなかった。2 つのモデルが簡便さに限界があるためで、実際の発がん機構の解明を待たなくとも、より多くの証拠に支持されるモデルの開発を行うために、米国で研究されていた発がんモデルに注目するようになった。米国のシアトルにあるフレッドハッチソンがん研究センター（FHCRC、現在は Fred Huch Cancer Center）の Moolgavkar をリーダーとする研究グループが行っていた発がんモデルを深く学ぶべく研究室の扉を叩いた。放射線分野ではないため、全く面識やつながりがなく、当時は手紙で受け入れを依頼した。その結果、客員研究員として留学することになった。

4. 発がん数理モデル（シアトル留学）

シアトルを訪れたのは 1 月初頭で珍しく雪に覆われていた。カナダのバンクーバーに隣接する都市で北海道よりも緯度が上にあったが、海流の影響で雪が降ることはないと聞いていたので、予想していなかった天候のせいで新しい研究生活の始まりに少し不安を覚えた。しかし、研究室の Suresh Moolgavkar と Georg Luebeck は快く迎え入れてくれた。インド人で医師である Suresh は米国で数学（微分幾何）を専攻した異色の経歴の研究者だった。ドイツ人の Georg は私と同じ年でワシントン大学大学院の原子核物理を専攻して PhD 取得後に、FHCRC の公衆衛生部の Suresh の研究室で数理モデルに取り組んでいた異色の研究者であった。その後、Georg は FHCRC の Computational Biology Program の責任者になった。日本でのワークショップに招待し、大分の我が家にも来て、家族ぐるみで親交を温めてきた。アメリカ人とは違い日本人に近い心遣いを感じた友人との出会いは留学生活で得た最大の宝であった。シアトルでの研究生活は Suresh や Georg も会議にでることはなく、研究以外に時間を使っていることを全く見ることはなかった。ランチと 3 時のお茶をいつも一緒に過ごし、ほとんどが研究の話であった。3 時のコーヒーブレイクでは 1 階にあったスタバ（まだ日本に入っていない時代）に行き、コーヒーでなくオレンジジュースを頼むことが多かったので店員の女性に「ジュースガイ」と親しみを込めて呼ばれ

ていたことが懐かしい。

私が日本の学会で発がんモデルの計算結果を発表したとき、ある高名な医学者から「がんはそんな簡単なモデルではない」と批判を受けた。物理系の研究者からの理解はあったが生物研究者からの応援は少なかった。Suresh はもともと医学から数学の道に進んだ研究者で、網膜芽細胞腫（小児の網膜に発生する悪性腫瘍）の研究からがん抑制遺伝子の発見につなげた Alfred Knudson と一緒に研究をしていた。その時の 2 ヒット仮説を数理モデルへの展開に貢献したのが Suresh であった。成人のがんが同じ構造にあるとは限らないという議論は私たちの間でも頻繁に行った。しかし、根拠もなく複雑化することは科学的な方法とはいえない。単純なモデルで説明できない点を明らかにしてモデルの要素を増やしていく戦略をとっていた。

私は、ベースラインに比例すると仮定する相対リスクモデルの科学的な議論をするべく、原爆生存者の疫学データをモデル解析することで見えてくるものは何かを調べていた。なぜなら Suresh たちのモデルは確率論的な導出であり、数個から始まるがん細胞の増殖を決定論的に扱うことができないためである。確率的にはある場合には初期のがん細胞は消滅することが組み込まれたモデルである。Suresh と Georg は liver foci の実験データを確率モデルで解析することでその妥当性を検証していた。放射線被ばくが何を起こすのか、当時の定説であった DNA 損傷からの変異がイニシエーションとなって他の生活習慣等による加齢因子によってがん化に進むとする仮説を基にモデルを構築した。それまで、放射線疫学分野では統計モデルが主流であり、生物仮説に基づいた数理モデルを用いて分析した研究はなかった。放射線発がん初めて 2 段階モデルを適用して何がみえてくるかという探究心を刺激した。シンプルな過程でも原爆データの相対リスクの被ばく時年齢効果と到達年齢の傾向を表現できたことに驚いた。HPRT 遺伝子の変異率をモデルで推定されたものと実験的に報告されたデータを比較したが整合的であった。実は乳癌モデルは少し複雑にして分析し別の論文原稿をまとめたが、Suresh がゴーサインをださなかった。まずは初めての放射線の生物モデルでの解析の評価を待つべきだという考えだったのであろう。その後、Georg たちは 2 段階モデルを大腸

癌の多段階性を反映した 3 段階から 5 段階のモデルまで数学的に拡張した。彼らのがんの進化の多段階モデルはがん検診のスクリーニング体制の最適化に適用されるなど、種々の分野に影響を与えている。

5. 医療被ばくのリスク（大分県立看護科学大学）

1998 年に歴史のあった東大の放射線健康管理学教室から教室メンバー全員が大分県立看護科学大学の新設と共に移ることになる。背景には東大医学部特有の構造があり、さらに草間朋子先生（東大医学部初の女性の助教授）が学長に推されたこともあって私たちは新天地を求めた。従来の看護系大学とは違う新しい大学を求めて、基礎系研究室の充実、看護系との協力体制のもとに新しい試みを学長のリーダーシップで進められた。

大分県立看護科学大学から初めた研究は医療被ばく問題であった。看護系大学として向き合うべきテーマと考えた。ちょうどその頃、オックスフォード大学の研究グループの論文が英国医学誌 *Lancet* に掲載され、世界の医療被ばくを分析した結果、日本の医療被ばくがトップであり、放射線診断ががん死亡の 3.2% に寄与しているとする研究結果が読売新聞の一面を飾った。この論文は社会的に影響が大きいことが予想されたので、放射線影響学会は検討グループを設置して論文の評価と解説を行った。私もメンバーとして活動したが、日本から発信しているデータの不足や医療被ばく研究の弱さを感じ、科研費を取得して CT からの医療被ばくに取り組むことにした。*Lancet* の論文が実際には日本の CT データを使っていなかったことから、日本の現状について全国調査とモデルを用いて成人と小児の検査頻度を明らかにした。検査件数は施設のベッド数と綺麗な相関関係があり、人口あたりの検査件数は米国よりも少ないことが初めてわかった。その後、診療放射線技師を博士課程で指導する機会が増えて、患者の個別化した線量評価を行うなど研究を進めた。小児 CT の線量がもたらす健康リスクの議論についての論文が米国コロンビア大学の D.J. Brenner から発表されると、健康リスクの評価やそこに存在する「適応による交絡、逆因果関係」の疫学結果への影響に関心を持つようになった。この研究も院生と一緒に科研費で取り組んだ。CT 検査を繰り返す小児患者

の背景は交絡因子となっているのではないかという仮説で検査理由の調査と分析を国立成育医療センターの放射線小児科医と共同して進めた。その結果、頭部の手術をした小児は検査件数が多くなることを発見し、手術をした疾患の背景に素因がある可能性を疑うことで逆因果関係を検証することができるのではないかという結論になった。残念ながら、倫理的な限界や定年を迎えたことでさらに発展をすることができなかった。

6. ICRP 活動

2005 年には ICRP（国際放射線防護委員会）の第 4 専門委員会（C4）の委員に就任する。UNSCEAR や IAEA などの国連機関とは違い、日本政府を代表するものではなく、ひとりの専門家として選ばれて活動するので、完全なボランティアではあるが自由に発言し貢献することが求められた。当時の C4 の委員長はフランスの Annie Sujie であった。その後フランスの Jack Lochard の時代になり、彼の求める考えがわかってくると、それをサポートすべく WP にも積極的に参加した。WP は C4 内でのグループであり、進捗を毎年の C4 会議で報告する。当時は 2007 年勧告が完成したばかりであったので、その勧告を基本とした放射線防護の実践的な適用についての議論が行われていた。2009 年 11 月ポルトガルのポルトで行われた C4 会議（2 年に 1 回の全体会議も行われた）は、ラドンの最新科学を反映した作業グループの新設やそれを受けた ICRP ラドン声明を準備していたときであった。ICRP の議論の中では忘れられない白熱した議論だった。ラドンの健康影響はウラン鉱山における鉱夫の疫学調査が中心で、比較的高い濃度環境での作業に伴う健康影響であった。一般家屋のラドン問題が社会的に注目される中、多くのケースコントロール研究が行われていた。肺がんとラドン濃度との関係についての多くの研究を統合したプール研究の結果が注目された。単独のケースコントロール研究ではサンプル数が小さいために統計的検出力が足りないため採用された方法であった。WHO はこの結果を受けてラドンプロジェクトを立ち上げ、報告書を早々に出す準備をしており、ICRP のラドン声明よりも先に Web 公開し「the chosen reference level should not exceed

300 Bq/m³ which represents approximately 10 mSv per year according to recent calculations by the ICRP」と記載した。まだ公表されていない ICRP のラドンドラフトを引用して混乱をもたらした。私の関心は、リスク評価値を変える背景となった研究の科学的な問題点を辿る過程で、ラドンと喫煙習慣との関係について放射線防護の点からの適切な議論が行われてきていないことに気付いたことであった。ラドンの肺がんリスクが喫煙者と非喫煙者で大きく異なることをなぜこれまで問題にしないのか、ラドンの基準のあり方に影響する課題であった。私の中では、喫煙は放射線よりもはるかに大きなリスクを与える公衆衛生上の重要なリスク因子であることから、喫煙者と非喫煙者の差を勧告の中で考慮する必要があるのではないかと訴えた。それに対して C4 の副委員長のドイツの W. Weiss が「No」と切り捨てた。喫煙の有無は個人の自由であり、それを考慮した放射線防護のあり方は倫理的には望ましくないというのである。科学的観点からリスクを低減することよりも倫理が優先される判断を ICRP は明確にした。ラドンリスクの異なる喫煙者と非喫煙者を放射線防護上は区別しないと記載された。しかし、私の中では十分な納得がいかないままであった。ラドンの管理の Publication 126 が作成されるときに、喫煙問題は詳しく記載され、次の文章を加えることでこの問題は区切りがついた。「集団に対するリスクの発生源は、ラドン被ばくだけではない。……ラドン防護戦略と、禁煙や室内空気質などその他の公衆衛生に関する方策を比較し、そして統合することで矛盾が発生しないようにして有効性を向上させる努力をすべきである (Pub.126(44))」

2017 年から 8 年間、ICRP の主委員会（MC）委員となり、ICRP 活動の運営全体を統括する立場となり、ICRP の立場についての議論をする機会を得た。2031 年頃の完成を目指す次期 ICRP 主勧告に向けた改訂作業が始まり、2023 年 11 月には東京お台場で ICRP シンポジウムを開催し、2024 年 11 月にいわきで MC 会議を開催することができたことは、長い ICRP 活動の区切りの貢献となった。

7. 福島第一原子力発電所事故

福島第一原子力発電所事故で SPEEDI（緊急時遅

速放射能影響予測ネットワーク）が使われた。その顛末は SPEEDI の機能や役割が十分に理解されないまま利用された結果の公表となったようで、SPEEDI は汚名を着せられることになる。残念ながらこの結果になぜ至ったのか検証もなく、社会からの批判に耐えられず表舞台から消える。事故後 10 年ほど経ってから私を含む開発メンバーの 3 人で事故を想定した SPEEDI の活用を提言した。名前は消えたがシステム機能は引き継がれていると信じている。

福島第一原子力発電所事故の教訓は、計画的に放射線を利用する際に使用する防護基準の遵守が放射線防護であるとの関係者が認識していた点である。ICRP の現存被ばく状況の考え方を確立し、社会に浸透させるのが放射線防護の課題といえる。つまり低線量の長期被ばくリスクへの向きあい方を構築し、それを放射線規制に落とし込んでいくことが求められている。その試みは放射線審議会の会長として活動した時の姿勢として表れていたと思う。これらの活動は、私の放射線防護の研究と社会貢献の活動において重要な時間を占めていたが、この狭い紙面には書くことができなかった。別な機会を探りたい。

8. おわりに

放射線防護に飛び込んだ少年は昨年古希を迎え、眺望のきく山頂にたどり着いたのかもしれない。見えているのは複雑な人間社会と自然の構造、さらには様々な価値観に支えられた人の社会や生活である。ここ数年 AI が長足の進歩によって膨大な情報を操ることで適用が拡大しつつあるが、ICRP は科学、経験そして倫理を基礎にして放射線防護の基本勧告を作成する必要性を強調しているので簡単には AI に置き換わることはできない。放射線の科学としての面白さから飛び込んだ研究分野ではなかったが、数々の先輩や仲間と出会い、それを通して発見したのは、放射線防護の科学としての放射線を超えた魅力と学問としての一般性であった。放射線以外のハザードに通じる知見や議論はさらに発展することで安全を科学的に議論するリスク科学として成長することを期待している。2025 年 6 月には一般公益財団法人放射線影響協会の理事長となり、新たな挑戦課題に向けて歩みを進めている。

(日本文理大学保健医療学部、(公財)放射線影響協会)