放射線リスク ——確定的影響と確率的影響——

柴 田 義 貞

Radiation Risk:
Deterministic Effects and Stochastic Effects

Yoshisada SHIBATA

Health effects of radiation exposure is not easy for laymen/laywomen to understand because of numerous and complicated technical terms. First, basic notions on radiation including deterministic effects and stochastic effects are introduced. Second, the long-term cohort study on radiation effects to the atomic bomb survivors' health is introduced. Third, evaluation of health effects of radiation exposure is discussed with an illustration of misuse of linear non-threshold model. Finally, we touch briefly the fundamental issues in statistics regarding the interpretation of probability, with an introduction of the journal which recently declared to ban p -value.

Key words: excess relative risk, dose-response relationship, linear non-threshold model, Life Span Study

キーワード: 過剰相対リスク, 量反応関係, 閾値なし線形モデル, 寿命調査

1. はじめに

放射線は人体では感知できず, 被曝の有無やその程度は特別な測定器を使用しなければ知ることができない. エックス線検査や CT 検査など医療の場で放射線に被曝する機会は少なくない. 我々の体内にはカリウム 40 など天然の放射性物質も常在しているが誰も気に留めないし, ラドン温泉やラジウム温泉など, むしろ積極的に天然由来の放射性物質への外部被曝, 内部被曝を求める人も少なくない. 一方, 原発事故で放射性物質が放出されると, 核種や放出量に関係なく恐怖心を抱いてしまう. セシウムもカリウムもアルカリ金

属で化学的性質も類似し体内動態も大きく異ならないが, 前者が人工的生成物という理由だけで怖れられ, 福島産の農水産物は一切口にしないという人まで現れている.

以下では, 放射線リスクを正しく理解するために必要な基本的事項を紹介する. 第 2 章では放射線の定義と種類, 放射線の線量, 被曝の形態, 放射線の生体影響, 人体影響について述べ, 最後に副題にある確定的影響と確率的影響について述べる. この章では一々断ることはしていないが, 草間・甲斐・伴 (1995) を参考にしたところが少なくない. 第 3 章では放射線被曝の健康影響に関して国際的評価の高い原爆被爆者の寿命調査の概要とその被曝線量の推定について述べる. 第 4 章では, 因果関係のための観察的基準を紹介し, 放射線リスク評価の標準的方法, 原爆被爆者における放射線リスク, LNT モデルについて述べる. 最後の第 5 章では, 現在の仮説検定偏重に警鐘を鳴らした学術誌とそれに関連した私見を述べて纏めとする.

長崎大学原爆後障害医療研究所
(Atomic Bomb Disease Institute, Nagasaki University)

連絡先: 〒 851-2125 長崎県西彼杵郡長与町三根郷 55-82

E-mail: rsr75103@nifty.com

2. 放 射 線 被 曝

2.1. 放射線

放射線とは広義にはエネルギーの流れのことをいい、可視光線、赤外線、紫外線や携帯電話の電磁波などもその例であるが、以下では、電離を起こす高い運動エネルギーをもって流れる物質粒子（イオン、電子、中性子、陽子などの粒子放射線）と高エネルギーの電磁波（ガンマ線、エックス線）の総称として用いる。

アルファ線（ α 線）は、アルファ粒子（ α 粒子）ともよばれ、ヘリウム（He）原子核の流れである。原子核から 2 個の陽子と 2 個の中性子が放出され元の原子核は原子番号が 2、質量数が 4 だけ小さい別の原子核に変わる。 α 線は電離作用が強く、物質中の飛程が短いので線源から数センチの空気層、あるいは薄いゴムでも十分遮蔽される。

ベータ線（ β 線）は、原子核の β 壊変時に放出される電子線でベータ粒子（ β 粒子）ともよばれる。陰電子が放出される場合（ β^- ）と陽電子が放出される場合（ β^+ ）があるが、通常は β 線というとき β^- を指す。 β 線の透過力は弱く、通常のエネルギーのものは数ミリのアルミ板や 1 センチ程度のプラスチック板で十分遮蔽される。

ガンマ線（ γ 線）は励起状態（基底状態以上のエネルギーをもつ状態）にある原子核がより低い状態または基底状態（量子力学的な系の安定状態のうち、エネルギーが最低の状態）に移るとき、あるいは粒子が消滅するときに放出される電磁波である。エックス線（X 線）も電磁波であるが生成機構の違いでガンマ線とは区別されている。

2.2. 線量

対象に対して照射された線量を照射線量といい、その単位はクーロン毎キログラム（C/kg）である。照射線量は光子（X 線および γ 線）のみに対して適用される線量概念である。

対象物に対して入ったエネルギーと出たエネルギーの差（対象に対して生じたエネルギー）のことを吸収線量という。吸収線量の単位はジュール毎キログラム（J/kg）であるが、グレイ（Gy）という呼称が使われている。

同じ吸収線量の放射線に被曝しても、放射線の種類、エネルギーの違いにより生物に及ぼす効果に量的な差があり、その違いを比で表したものを生物学的効果比

（relative biological effect; RBE）という。通常、対象とする放射線と基準放射線（X 線または γ 線）とが生体に等しい変化を与えるとき、前者の吸収線量を後者の吸収線量で除した値として表す。線量当量（放射線の生物学的な影響を計算するための量）の算出に用いられる線質係数は、確率的影響に対する RBE にほぼ等しい。この場合の RBE は X 線、 γ 線、 β 線は 1、 α 線は 20、中性子はエネルギーにより 5～20 とされている。

等価線量（equivalent dose）とは、人体各組織が放射線に被曝するとき、その組織に対する生物学的効果を勘案した放射線の線量をいう。単位はシーベルト（Sv）で表される。等価線量限度は、放射線の確定的影響を考慮し、「閾値」を超えることのない線量として国際放射線防護委員会（International Commission on Radiological Protection; ICRP）が勧告している。

実効線量（effective dose）とは、身体への放射線被曝が均一または不均一に生じたときに、被曝した臓器・組織で吸収された等価線量を相対的な放射線感受性の相対値（組織荷重係数）で加重してすべてを加算したものである。単位はシーベルト（Sv）で表される。ICRP-2007 年勧告では、実効線量の職業被曝限度は「決められた 5 年間の平均値として年間 20 mSv、ただしいかなる 1 年についても 50 mSv を超えてはならない」とし、公衆被曝限度については「年間 1 mSv、特別な状況では、5 年間の平均が 1 mSv を超えないという条件の下で、1 年間当たりより高い実効線量が許容される」としている。

預託線量（committed dose）は放射性物質摂取後、体内からなくなるまでの総被曝線量を、体内摂取時に被曝したものと見なす線量として定義される量で、単位はシーベルト（Sv）である。実効線量で評価する場合は預託実効線量（committed effective dose）という。

2.3. 被曝の形態

放射線被曝は線源の場所が体外であるか体内であるかによって外部被曝（external exposure）、内部被曝（internal exposure）に二分される。

内部被曝の原因は体内への放射性物質の取り込みであるが、その経路は呼吸器を通しての摂取（吸入）、口や消化器を通しての摂取（経口摂取）、皮膚とくに傷口を通しての摂取がある。チェルノブイリ原発事故後の小児甲状腺がんの多発は、旧ソ連政府が暫く事故を隠していたために、小児が汚染乳を多飲したことによる

とされている。福島原発事故の場合は政府が汚染乳の出荷を速やかに禁止したので放射性物質の経口摂取はほとんど起こっていない。

体内に取り込まれた放射性物質の挙動はその元素の化学的性質によって異なる。たとえば、ヨウ素は選択的に甲状腺に取り込まれ沈着する。またアルカリ土類金属であるストロンチウムは骨中のアルカリ土類金属であるカルシウムと置き換わって体内に蓄積する。一方、アルカリ金属であるカリウムやセシウムは水に溶け込み全身の細胞に広がる。α線は電離作用が強いのでα線を放出する核種（ウラン 238, ラジウム 226, ラドン 222 など）の内部被曝には十分注意しなければならない。

内部被曝は体内の放射性物質を体外に排泄しない限り、固有の半減期に従って放射能は減衰しつつも放射線を出し続けるので外部被曝より危険であるという印象を一般に与える。しかし、内部被曝の影響については、そのイメージで根拠なく怖れるのではなく、預託実効線量の大きさなどに基づいて考えるべきである。

2.4. 放射線の生体影響

放射線の人体影響は、人体を構成している物質と放射線との相互作用によって、以下の(1)～(3)の過程を経て引き起こされる。

(1) 電離放射線が人体を構成する物質中を通過する際、その物質にエネルギーを付与して電離あるいは励起を起こす物理的過程。飛程の単位長さあたりに平均して失うエネルギーは線エネルギー付与 (linear energy transfer; LET) とよばれる。

(2) 電離あるいは励起により発生したイオンが細胞中の水と反応し化学的に反応性の高いフリーラジカルなどに成長する化学的過程。

(3) 放射線によって発生したフリーラジカルが、DNA 化学結合の切断など、細胞を構成する物体の元素の結合を崩す生物学的過程。

放射線の種類によっては(2)の過程を経ないで、(1)の過程から直接(3)の過程を起こす場合があり、それを直接作用という。α線や中性子線のように粒子の質量が大きくて物質と相互作用しやすい高 LET 放射線の場合がそうである。一方、β線、γ線、X線など物質との相互作用の程度が小さい低 LET 放射線の場合は直接作用で変化の起こる頻度は小さく、主として(2)の化学的過程を経て(3)に述べた生物学的作用を起こすが、それを間接作用という。

2.5. 放射線の人体影響

放射線の人体影響は、影響の出現する個体、時期、影響の程度などに注目して以下のように分類することができる。

(1) 影響の出現する個体に注目して分類すると、被曝した本人に現れる身体的影響 (somatic effects) と被曝した人の子孫に現れる遺伝的影響 (hereditary effects) に分けられる。身体的影響とは、身体の内臓・組織を構成している体細胞に起こった変化・損傷が原因で発生した影響のことをいい、生殖細胞に起こった変化・傷害が原因の影響を遺伝的影響という。身体的影響は被曝時年齢には関係なく発生する可能性があるが、遺伝的影響は、生殖能力をもっているか、将来もつ可能性のある人が被曝しない限り発生しない。

(2) 被曝から影響・障害が発生するまでの時間 (潜伏期間) によって、被曝から数週以内に現れる早期影響 (early effects) と、被曝から数か月以降に現れる晩発影響 (late effects) に分けられる。早期影響は大量の放射線を被曝しない限り出現せず、代表的なものはリンパ球数や血小板の減少、下痢、脱毛などの急性放射線症である。晩発影響の代表的なものは発がんである。

(3) 本論文のタイトルにある確定的影響 (deterministic effects) と確率的影響 (stochastic effects) は影響の発生する線量に着目した分類である。これについては次節で述べる。

2.6. 確定的影響と確率的影響

がん、あるいは遺伝的影響以外の影響は多数の細胞が放射線の影響を受けないと発生しないので確定的影響といわれ、影響の発生する最小の線量は閾線量 (threshold dose) といわれる。確定的とは閾線量を超えなければ影響の発生しないことが確かであるという意味であって、閾線量を超えれば確実に発生するという事ではない。閾線量を超えた線量で影響の発生する確率 (頻度) と影響の重篤度 (severity) が線量とともに上昇する。確定的影響に対する感受性の程度は閾線量で表されるが、閾線量の値は臓器・組織や着目する影響によって異なり、個人によっても放射線感受性は異なる。

一方、がん、および遺伝的影響については、閾線量の存在を示唆する生物学的実験データもあるが、疫学データはなく、理論上は1本の放射線でもDNAを傷つけることによって悪性腫瘍を発生させる可能性があり、現在のところ放射線防護の観点から閾線量は存在せず、重篤度も線量には関係せず、発生率のみ線量と

ともに増加すると仮定されている。

3. 原 爆 被 爆

3.1. 寿命調査

原爆傷害調査委員会 (Atomic Bomb Casualty Committee; ABCC) およびその後継である放射線影響研究所 (Radiation Effects Research Foundation; RERF) が広島・長崎の原爆被爆者約 94,000 人と原爆投下時は両市に不在で被爆を免れた約 27,000 人の計約 12 万人から成る固定集団の個々人の死亡に関する追跡調査は寿命調査 (Life Span Study; LSS) として世界に広く知られており、定期的に報告される調査結果は放射線防護基準の改訂などに利用されている。

寿命調査は、L.A. Woodbury らが ABCC で行った 1950 年から 1954 年までの広島市における被爆者と非被爆者の死亡率に関する研究に端を発している。彼らは死亡データの分析から、放射線被曝が死亡に関連していることを示唆する重要な以下の 2 点を見出し、ABCC 未公開論文で報告している。(1) 大量の放射線を受けた (爆心地から 2000 m 未満で被爆した) 人の死亡率は、少量量の放射線を受けた (爆心地から 2000～4000 m 未満で被爆した) 人の死亡率をはるかに上回っていた。(2) 両者を合わせた被爆者の死亡率も非被爆者の死亡率より高かった。

上述の報告を契機にそれまで行われていた ABCC の調査プログラムの継続に深刻な疑問が投げかけられ、この疑問に答えるために設立された、ミシガン大学疫学教授の Thomas Francis Jr を委員長とする ABCC プログラム再評価特別委員会 (通称フランス委員会) の勧告が 1955 年 11 月に NAS-NRC (米国学士院-学術会議) が招集した特別会議で原則承認された。この勧告の骨子は以下のとおりである。(ア) 原子爆弾被爆者について死亡調査を行うこと。(イ) 固定人口標本について行うこと。(ウ) 標本の各成員について、転出の有無に関わらず、追跡調査をすること。(エ) 多量の放射線を受けた人と軽度の放射線を受けた人とを比較すること。(オ) 広島と長崎両市において実施すること。

この勧告に従って 1956 年から寿命調査集団の構築が始まったが、被爆者の標本抽出は、1950 年 10 月 1 日に実施された戦後初の国勢調査の際に ABCC の要請で行われた附帯調査の結果に基づいて行われた。附帯調査では、原爆投下時に広島市・長崎市に居た家族について、その氏名、性別、生年月日、被爆都市、常

住地を記入するよう求めている。

上述の附帯調査で原爆投下時に広島市あるいは長崎市に居たと回答した約 284,000 人を被爆者とし、1950 年 - 1951 年に ABCC が実施した抽出人口調査の約 33,000 人、1950 年に長崎市が作成した世帯主名簿と消費世帯台帳および 1953 年に広島市が実施した広島市昼間人口調査から原爆投下時市内不在として抽出した約 70,000 人の計約 103,000 人を非被爆者として、以下の (i)～(v) の適格条件を満たす人たちを標本抽出の枠として標本抽出を行い、寿命調査集団を構成している。(i) 1950 年 10 月 1 日現在、広島市または長崎市に居住していた。(ii) 日本人である。(iii) 本籍地が広島市、長崎市、または所定の地域である。(iv) 市内在住か否かが確認されている。(v) 二重被爆はしていない。

上記の条件 (i) と (iv) は附帯調査の回答内容を確認するためのもの。条件 (ii) と (iii) は戸籍の情報で生死の確認を行うためのもので、法務局へ実際に出かけなければならない場合を考えて、本籍地を両市あるいはその近郊に限定している。条件 (v) は広島で被爆し、避難先の長崎でも被爆した人は除外するということがある。

上記の標本抽出の枠から、爆心から 2500 m 未満で被爆した近距離被爆者は全員抽出し、さらに 2000 m 未満で被爆した人たちから成る群 I (内近距離被爆群) と 2000 m から 2500 m 未満で被爆した人たちから成る群 II (外近距離被爆群) に二分し、2500 m から 10,000 m 未満で被爆した人については内近距離被爆群の個々人と性・年齢でマッチングさせて抽出し、群 III (遠距離被爆群) とした。さらに、非被爆者についても、内近距離被爆群の個々人と性・年齢でマッチングさせて抽出し、群 IV (市内不在群) とした。市内不在群は NIC (Not in city) とよばれている。

その後多少の対象者の追加があり、現在は寿命調査対象者の総数は約 12 万人とされている。

3.2. 線量推定

被爆者における放射線の影響を調べるためには、結果としての死亡 (がんによる死亡、がん以外の原因による死亡) や発がんの情報の他、主たる原因になり得る放射線被曝に関しての可能な限り正確な情報が必須となる。爆心地から同じ距離で被爆しても、屋内で被爆した場合と屋外で被爆した場合では被曝線量が異なる。

ABCC は 1949 年から 1965 年にわたって個人別被

曝線量を推定するための調査をいくつか行っているが、中でも 1954 年から 1965 年にかけて行った、広島約 20,000 人、長崎約 8,000 人の近距離被爆者に対する遮蔽調査が最も詳しい。この聞き取りによる遮蔽調査では、(1) 被爆地点、(2) 家屋内または街路における被爆場所、および (3) 被爆時の爆央に対する向き、被爆時の姿勢などについて、被爆前の航空写真を利用して被爆地点を街区図に示し、屋内被爆者については家屋の間取り図や断面図平面図などを用いて、可能な限り詳細な情報を得よう努めていた。

ネバダの核実験場で、日本の木材等で実物大の日本家屋を作り、高さ約 460 m 余りに設置した剥き出しの小型原子炉からの放射線量を実測し、それに基づいていわゆる 9 パラメータモデルとよばれる線量推定式を作り出した。これは暫定 1965 年線量 (Tentative 1965 Dosimetry; T65D) とよばれ、上述の遮蔽調査で得られたデータから個人ごとの被曝線量が推定可能となった。

T65D の公表後、米国の研究者から過大推定ではないかとの指摘があり、それまでとは全く異なるコンピュータシミュレーションによる推定方式が日米共同で開発され、1986 年線量評価システム (Dosimetry System 1986; DS86) として 1986 年に公表された (DS86 で初めて臓器線量も与えられた)。さらに 2002 年、DS86 を改良した線量評価システム 2002 (Dosimetry System 2002; DS02) が公表され現在に至っている (原爆放射線の場合は、無遮蔽状態での空気中線量が爆心地からの距離の関数として推定され、その推定精度は、収集済みのコンクリート、石、金属などに残留している種々の核種の放射能を測定することによって評価できる)。

4. 放射線被曝の影響評価

4.1. 因果関係のための観察的基準

まず、特定の被爆者 A における特定の疾病 B の発生が放射線被曝に起因すると言うためには、被爆しなかった A においては疾病 B が発生しなかったということを示さなければならない (これは因果関係の定義のようなもので、Hume の反事実モデルといわれている) ことに注意しておく。しかし、実際には A は被爆しているから、前述のようなことはあり得ない。すなわち、個々人について因果関係を示すことは不可能である。

そこで、放射線被曝の人体影響は疫学的方法で研究されてきた。新薬の有効性評価の場合は患者を新薬投

与群とプラセボ (日本では標準薬) 投与群の 2 群にランダムに分け効果の大きさを両群で比較するという実験の方法が標準であるが、放射線被曝の場合は治療効果を検証するなど特別な場合を除き、観察的方法に頼らざるを得ない。因果関係のための観察的基準として以下のことが挙げられている。(1) 時間的順序、(2) 一致性、(3) 関連の強固さ、(4) 生物学的勾配 (量反応関係)、(5) 結果の特異性、(6) 傍証と生物学的妥当性。

それぞれの意味するところを以下に説明するが、簡単のため原因を特定の要因への曝露 (E と記す)、結果を特定の疾病の発生 (D と記す) としておく。(1) は、原因は結果に先行しなければいけないということで、因果関係を議論する場合は当然の要件である。しかし、必要条件ではあるが、十分条件ではない。E が D に先行しているからといって、直ちに E が D の原因であると結論づけることは、ポスト・ホックな論理として既にアリストテレスによって否定されている。(2) は、E が起こっている別の集団でも D が観察されているということである。(3) は、D は E が起こっている集団の方が起こっていない集団より高頻度であるということである。(4) は、E への曝露量が大きくなるほど疾病 D の発生率も高くなるということである。(5) は、E がなくなれば D も起こらないということである。サリドマイドとフォコメリアのように、E と D がほぼ 1 対 1 の関係になっていれば、この基準は該当するが、発がんのように種々の原因で発生するような疾病では該当しない。(6) は、生物学的勾配 (量反応関係) などが統計学的に認められたからといって直ちに因果関係の存在が示されたという訳ではなく、傍証や生物学的な検討が必要であるということである。

4.2. 放射線リスク評価の標準的方法

この節では、放射線リスク評価の標準的方法のひとつとしてよく利用される、原爆被爆者の寿命調査 (LSS) データの解析のために開発された方法についてその概略を述べる。

被曝者におけるリスクを p_1 、非被曝者におけるリスクを p_0 とするとき、両者のリスク差 $RD = p_1 - p_0$ あるいはリスク差の非被曝者におけるリスクに対する相対値 $(p_1 - p_0)/p_0$ を放射線被曝の影響評価に用いることが多い。後者は相対リスク $RR = p_1/p_0$ から 1 を引いたもので、過剰相対リスク (excess relative risk; ERR) とよばれる。すなわち、

$$ERR = \frac{p_1 - p_0}{p_0}$$

この言い方に対応して、上述のリスク差は過剰絶対リスク (excess absolute risk; EAR) とよばれる。すなわち、

$$EAR = p_1 - p_0$$

寿命調査対象者におけるがん死亡やがん発生の分析では、対象者のリスクは推定被曝線量 (d) の他に、被爆都市 (c)、性 (s)、到達年齢 (a)、出生年 (b) に依存すると仮定して、推定被曝線量が 0 の者におけるリスク p_0 を

$$p_0 = \lambda_0(c, s, a, b)$$

とし、対象者の原爆投下から時間が t 経過した時点におけるリスクは、

$$\lambda_0(c, s, a, b)[1 + ERR(s, e, a, t, d)]$$

あるいは

$$\lambda_0(c, s, a, b) + EAR(s, e, a, t, d)$$

と表せると仮定している。ところで、 e, t, a のうち二つが決まれば、残りは決まってしまうので、以下では上記のモデルにおいて原爆投下からの時間 t は明記しない。

さらに ERR, EAR はいずれも性 (s)、被爆時年齢 (e)、到達年齢 (a)、被爆からの時間 (t)、および推定被曝線量 (d) の関数として次のような形で表せると仮定している。

$$\rho(d)\beta_s \exp(\gamma e)a^\eta$$

ここに、 β_s は男女で異なり得る未知の定数、 γ, η は未知の定数、 $\rho(d)$ は線量反応関係を表す関数である。 $\rho(d)$ としては次のような関数が考えられている。

- (i) $\rho(d) = \theta d$
- (ii) $\rho(d) = \theta d + \tau d^2$
- (iii) $\rho(d) = \tau d^2$
- (iv) $\rho(d) = \begin{cases} \theta(d - d_1) & d > d_1 \\ 0 & d \leq d_1 \end{cases}$
- (v) $\rho(d) = \delta_j \quad \delta_{j-1} \leq d < \delta_j$

(i) は過剰リスクが線量の全域で直線的に増大することを表しており、閾値なし線形 (linear non-threshold; LNT) モデルとよばれている。

(ii) は過剰リスクが極めて低い線量域ではほぼ線形

図 1. 30 歳で被爆した人の到達年齢 70 歳における固形がん死亡の量反応関係 (男女の結果を平均している)。実線の直線は LNT モデルによる推定結果。黒点はそれぞれの線量区分における過剰相対リスクの推定値。破線の曲線はこれらの黒点から求めた平滑推定値を表す。二つの点線の曲線は平滑推定値に対する上側、下側の 1 標準誤差を示す。Preston, et al. (2003) の FIG.2 の引用。

に増大し、それを越えた線量域では 2 次関数的に増大することを表しており、線形-2 次 (linear-quadratic; LQ) モデルとよばれている。

(iii) は過剰リスクが線量の全域で 2 次関数的に増大することを表しており、2 次 (quadratic; Q) モデルとよばれている。

(iv) は閾値 d_1 以下では過剰リスクはなく、それを越えた線量域では超過分の線量に比例した過剰リスクの生じることを表しており、閾値のある線形 (linear-threshold) モデルとよばれている。

(v) は過剰リスクが区分的に一定であることを表しており、ノンパラメトリック (nonparametric) モデルとよばれている。

4.3. 原爆被爆者における放射線リスク

寿命調査集団におけるリスク解析は、ほとんどすべての場合、ポアソン回帰に基づいており、統計ソフト EPICURE (Preston, Lubin, McConney, 1993) を用いて行われている。

図 1 は 30 歳で被爆した人の到達年齢 70 歳におけるすべての固形がんに対する過剰相対リスクの線量反応関係を示している (Preston, Shimizu, Pierce, Suyama, and Mabuchi, 2003)。Preston, et al. (2003) は上述の (ii)~(v) のモデルも検討したが、データからはこ

表 1. 線量域別 1 Sv 当たり過剰相対リスク (ERR/Sv) の推定値*

線量	ERR/Sv (SE) ^a	P 値 ^b
0-0.05	0.93 (0.85)	0.15
0-0.1	0.64 (0.55)	0.30
0-0.125	0.74 (0.38)	0.025
0-0.15	0.56 (0.32)	0.045
0-0.2	0.76 (0.29)	0.003
0-0.5	0.44 (0.12)	<0.001
0-1	0.47 (0.10)	<0.001
0-2	0.54 (0.07)	<0.001
0-4	0.47 (0.05)	<0.001

*Preston, et al. (2003) の TABLE 4 を
 改変. SE は標準誤差 (standard error).

^a30 歳で被爆した人の 70 歳における男
 女で平均した推定値.

^b傾きが 0 であるという仮説の片側 P 値.

これらのモデルが (i) のモデルに優っているという証拠
 が得られなかったので、従来通りこのモデルを利用し
 たと述べている。

表 1 は 0 から始まる線量の上限の増大に伴う直線の
 傾きおよびその有意性の変化を示している。上限の増
 大に伴って直線の傾きの推定値が安定し有意であるこ
 とが示されており、100 mSv 以上であれば直線的に増加
 すると言えそうであるが、それ以下では判然としない。

図 2 は原爆被爆者における固形がん死亡のリスクを
 図示したものである。図 1 と同様、30 歳で被爆した人
 の到達年齢 70 歳における 1 Sv 当たりの過剰相対リス
 クの推定値 (黒点) と 90%信頼区間 (黒点を通る水平
 実線)、および量反応関係はないという仮説を検定した
 場合の P 値を示している。全固形がんの 1 Sv 当たり
 の過剰相対リスクは約 0.5 であるから、100 mSv の被
 曝では、被曝しない場合に比して全固形がんのリス
 クが $1.05 (= 1 + 0.1 \times 0.5)$ 倍であることが分かる。

4.4. LNT モデル

放射線被曝による過剰リスクは閾値がなく被曝線量
 とともに直線的に増加するという LNT (linear non-
 threshold) モデルは、放射線防護の観点からは非常に
 有用である。加算性があるので、1 人の被曝線量をそ
 の被曝歴に基づいて推定できる。発がんに関線量がない
 とする根拠は次のとおりである。(1) DNA 損傷の量

図 2. 部位別固形がん死亡の 1 Sv 当たりの過剰相対リス
 クの推定値 (黒点) と 90%信頼区間 (黒点を通る水平
 実線)、および量反応関係はないという仮説を検定し
 た場合の P 値。乳房 (breast)、卵巣 (ovary)、子宮
 (uterus)、および前立腺 (prostate) といった男女
 固有のがん以外は、推定値は男女の結果を平均して
 いる。すべての推定値と P 値は、被爆時年齢およ
 び到達年齢の影響を全固形がんをまとめた場合の推
 定値で固定したモデルに基づいている。0.0 で引いた
 点線の垂直線は過剰リスクのないことに対応し、実
 線の垂直線は男女で平均した全固形がんのリスクを
 示す。Preston, et al. (2003) の FIG. 4 の引用。

は線量に比例する。(2) DNA 損傷の修復は不完全であ
 る。(3) 低線量被曝でも突然変異は起こる。(4) 突然
 変異は発がんの原因になり得る。(1) から (3) は正し
 いが、インドや中国の高自然放射線地域に住む住民の
 疫学データは (4) を支持しない。低線量域における量
 反応関係については図 3 に示すような種々のモデルが
 提唱されており、実験データが支持するものもあるが、
 人のデータでは未だ確証は得られていない。

LNT モデルの誤用に導く典型的な推論は次のような
 ものである。いま、被曝線量 d_i の人が n_i 人いる集団
 を考える ($i = 1, \dots, K$)。被曝線量 d_i による発がんの
 確率 (リスク) を $p(d_i)$ とすると、この集団における期
 待発がん数は、 $n_1p(d_1) + n_2p(d_2) + \dots + n_Kp(d_K)$ と
 なるが、LNT モデルの下では、 $p(d_i) = \beta d_i$ であるか
 ら、期待発がん数は、 $\beta(n_1d_1 + n_2d_2 + \dots + n_Kd_K)$ 、
 すなわち、個々人の被曝線量の総和 (集団被曝線量) に
 比例する。

チェルノブイリ事故 20 周年の約 8 か月前の朝日新
 聞 (2005 年 9 月 7 日) の見出しは「チェルノブイリ 被
 曝死者 4000 人 IAEA などの専門家推計」とあったが、
 直前の同紙 (2006 年 4 月 25 日) の見出しは「チェル
 ノブイリ事故 今後の死者『9000 人』推計を集計」となっ

図 3. 低線量域における確率的健康影響の過剰リスクを表す可能性のある量反応曲線. CERRIE (2004) の Figure 2.1 を引用. Linear は LNT と同義, Sub-linear は低線量域では LNT よりも影響が小さいというモデル, Threshold は 4.2 節の linear-threshold と同義, Hormesis は低線量被曝によるホルミシス効果があるというモデル, Supra-linear は低線量域では LNT よりも影響が大というモデル, Bimodal はストロンチウム 90 など, 娘核が短寿命の放射性核種による内部被曝が極めて危険であることを説明するために, 欧州放射線リスク委員会 (European Committee on Radiation Risk; ECRR) のクリス・バズビー博士が提案した Second Event Theory に基づくモデルであるが根拠を示すデータはない.

た. この推計に利用したデータ (Bennett, Repacholi, and Carr, 2006) は, チェルノブイリ事故 10 周年の国際会議で発表されたものと同じものである. つまり, データは 10 年間で何も変わっていない. 二つの推計値は上述の集団被曝線量と LSS の結果を利用して求められたもので, 両者の違いは集団の定義の差を反映している. 4000 人は事故処理従事者 (平均線量 100 mSv), 30 km 圏からの避難者 (平均線量 10 mSv), 高汚染地域居住者 (平均線量 50 mSv) の計 60 万 5 千人を被曝者として推計したが, ウクライナ, ベラルーシ, ロシアほか環境保護団体などから予測死者数が少なすぎるとの大きな声が上がリ, 平均線量 7 mSv の「汚染」地域に居住する 690 万人を追加して推計したためである. 上述の期待発がん数の式から分かるように, 「被曝者」の範囲を広げて行けば, どんなに低線量被曝であっても期待発がん数 (期待がん死亡数) は増加する.

5. おわりに

本論文は日本行動計量学会主催の「確率論とリスク論の悩ましき関係」と題する第 100 回行動計量シンポジウムにおける発表を加筆修正したものである. 本論

文のタイトルはオーガナイザーの木下富雄先生からいただいたものを少し修正したものである. シンポジウムの趣旨である「確率論とリスク論の間の軋みが内包する学問の本質の問題」に本論文が裨益するところがあったかどうか心もとない. しかし, 統計学と確率論との関係についてはかねてより統計関連の学会等で報告していたので, 少し私見を述べて本論文の纏めとさせていただきます.

奇しくも本シンポジウムの約 1 か月後, 英国の科学雑誌 *Nature* の 2015 年 2 月 26 日号に “Psychology journal bans *P* values” と題する記事が出た. この記事自体は同年 7 月頃に知ったが, その前に日本計算機統計学会で (株) ベル・メディカルソリューションズの池田敏広氏から Trafimow, D., and Marks, M. (2015) の Editorial を紹介していただき, その後 Trafimow, D. (2014) もいただいた.

Trafimow (2014) は *Basic and Applied Social Psychology* (BASP) の編集委員長就任にあたって次のような編集の基本方針を公表している. (a) 統計的推測手法を用いなければならないとはしない; (b) 効果のない結果を出版する用意がある; (c) 公表済結果に反する研究を歓迎する; (d) 媒介分析に依存した原稿は禁止する; (e) 理論指向, 哲学指向, 方法論指向の原稿を歓迎する. Trafimow, et al. (2015) は, 猶予期間が終了したので今後は仮説検定を禁止すると宣言し, この禁止が著者にどのようなことを意味するかを Q&A として例示している.

欧米とは対蹠的に, なぜか日本では, 戦後の一時期を除き, 統計学の根幹に係る議論はほとんど行われていない. 確率論自体は既に数学の一つの分科として確立されており学派はない. 一方, 統計学は基盤とする確率の解釈に関して三つの学派がある. Bayes を祖とするベイズアン (Bayesian), Fisher の立場をとるフィッシャーアン (Fisherian), Neyman の立場をとる頻度論者 (Frequentist) の 3 学派である. 渋谷・竹内 (1962) の訳者解説には統計学の根幹に係る Fisher と Neyman の論争が簡潔に纏められている.

大型計算機しか利用できなかった時代は, 統計学を専門としない研究者の多くは統計数値表を頼りに, 有意水準 5% で有意とか, 1% で有意とかと判断していて, p 値に言及することはなく仮説検定論の枠内で論じていた. しかし, PC が普及し安価な統計ソフトでも p 値を自動的に出力するようになった今日, Fisher の有意性検定に固有の p 値を仮説検定の枠内に持ち込み,

効果の大きさには無頓着に p 値が 0.05 より小さいかどうかだけに関心进行けるピーチバラノイア患者の激増という困った問題が生じてきた。上述した BASP の Editorial はこのような患者に対するショック療法として提起されたのではないかと考えている。この雑誌へのその後の投稿状況と、どれほどの雑誌が後に続くかは興味のあるところである。なお、品質管理や治験関係の雑誌の編集方針は変わらないであろう。

参 考 文 献

- Beebe, G.W., Ishida, M., and Jablon, S. (1962). Studies of the mortality of A-bomb survivors. 1. Plan of study and mortality in the medical subsample (Selection 1), 1950–1958. *Radiation Research*, **16**, 253–280.
- Bennett, B., Repacholi, M., and Carr, Z. (editors) (2006). *Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Health Care Programmes*. World Health Organization, Geneva.
- CERRIE (2004). *Report of the Committee Examining Radiation Risks from Internal Emitters (CERRIE)*. CERRIE, London.
- 草間朋子・甲斐倫明・伴 信彦 (1995). 『放射線健康科学』杏林書院.
- Preston, D., Lubin, J., Pierce, D., and McConney, M. (1993). *Epicure Users Guide*. Hirosoft International Cooperation, Seattle.
- Preston, D.L., Shimizu, Y., Pierce, D.A., Suyama, A., and Mabuchi, K. (2003). Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality: 1950–1997. *Radiation Research*, **160**, 381–407.
- 渋谷政昭・竹内 啓 (訳) (1962). 『統計的方法と科学的推論』岩波書店. 原著は Fisher, R.A. (1959). *Statistical Methods and Scientific Inference*. Oliver and Boyd Ltd., Edinburgh.
- Trafimow, D. (2014). Editorial. *Basic and Applied Social Psychology*, **36**, 1–2.
- Trafimow, D., and Marks, M. (2015). Editorial. *Basic and Applied Social Psychology*, **37**, 1–2.

(2015年11月27日受付, 2015年11月27日最終修正)