会期:2003年 4 月12日
会場:パシフィコ横浜会議センター

100mGy以下の被曝線量に対する考え方—LNT仮説を中心として—

土居雅広

放射線医学総合研究所比較環境影響研究グループ

Implications of Health Risk of Radiation Exposures Less Than 100 mGy: Focused on the Linear Non-threshold Hypothesis

Masahiro Doi

Environmental and Toxicological Sciences Research Group,
National Institute of Radiological Sciences

1. 放射線被曝全体における「医療被曝」の意味合い

わが国では、放射線診断や放射線治療は、ごく日常の医療になっており、医療被曝は、国民が受ける人工放射線被曝の大半を占めている。丸山が行ったレビュー¹⁾では、国民一人当たりの平均医療被曝線量は、年間2.375mSvと見積もられている。うち、一般X線診断は1.47mSv、X線CTは0.8mSv、胃の集団検診が0.038mSv、胸部の集団検診が0.0097mSv、歯科X線診断が0.023mSv、核医学診断が0.034mSvとなっている。これに対して、原子力施設等からの放射線や、工業製品等で使用されている放射性物質等からの被曝は、医療放射線被曝の1%にも満たないと推定されている。

他方、自然界から受ける放射線では、国民一人当たりの平均被曝線量として、1.43mSvと見積もられている。その内訳は、地面からの地殻 γ 線被曝が0.32mSv、宇宙線被曝が0.27mSv、放射性カリウムによる内部被曝が0.41mSv、空気中のラドンおよび壊変生成物の吸入等による被曝が0.43mSvとなっている(ラドンについては、わが国の家屋内ラドン濃度は、世界平均と比較して3分の1程度である)。したがって、わが国の国民が年間に受ける放射線の総被曝線量は、医療被曝の2.375mSvと、自然放射線被曝の1.43mSvを合わせた3.805mSvとなり、医療被曝が62%を占めることになる。

わが国の医療被曝は、世界有数の高い水準にある。原子放射線の影響に関する国連科学委員会(UNSCEAR)のまとめでは、わが国の一人当たりの医療被曝は、世界平均の6倍であり、世界人口の2.3%の人口ながら、世界の医療被曝全体の約17%を占めていることになるという²⁾。

医療の現場で起きていることは、臨床で放射線診断や治療に直接かかわっている方々が、すでに十分に承

知されていることであろう。わが国における医療被曝が大きい理由には、世界でも有数の高齢化社会であることから、高齢者を中心として放射線診断、治療の頻度が多いことも一因であろう。それだけでなく、近年の先進医療において、臨床の放射線利用における高線量化、放射線発生装置の高出力化が進んでいることも、大きな理由の一つであろう。マンモグラフィ(乳房撮影)、CT(コンピュータ断層撮影)、IVR(インターベンショナル・ラジオロジー)、CR(コンピュータラジオグラフィ)等の高度な医療技術は、診断や治療の水準を飛躍的に高める一方で、必ずしも患者の受ける医療被曝線量の低減化にはつながらず、使い方によっては、被曝線量を増大させることが指摘されている³⁾。

特に、放射線診断と治療の両面を持つIVRでは、総線量が数Gy以上に及ぶ場合もあり、重篤な放射線皮膚障害を伴う事例や、医療従事者の被曝線量が放射線管理において問題となる事例もある。IVRには、低侵襲手技として、さまざまな面で患者への負担が少なく、術後の予後が良いという便益がある。生命を脅かす目前の疾患の診断、治療としてIVRが選択されることから、放射線皮膚障害等の副作用が生じたとしても、医療行為として多くの場合は正当化されるであろう。その一方で、IVR診断・治療のために副作用として皮膚障害等の確定的な放射線影響が生じないように被曝線量を管理し、できるだけ余計な線量、無駄な線量を低減していくことの重要性が認識されるべきであろう⁴⁾。

医療放射線は、原則的に「患者」の被曝である。医療としての放射線診断や治療の決定は、疾患についての医学的な理解と、個々の症例におけるリスクと放射線診断・治療の便益とのバランスで、医学的な見地から勘案されるべきである。患者にとって生命を脅かすような当面の病気の治療として、放射線診断や治療を選

択するので、「行為の正当化」は、おおよそ自明のことである。そのうえで、医学的な効用とのバランスにおいて、無駄な被曝、余計な被曝を低減するための措置が求められる。これは、「防護の最適化」ということになる。

医療放射線には、「線量限度」に相当する考え方は適用されない。医療放射線は、医学的に明確な目的を持った計画的な意図のある被曝である。被曝する個人にとっての「正味の効用」が「リスク」を上回る限りにおいては、被曝によるリスクは、患者個人のレベルで許容されることになる。

2. 放射線被曝の制限値とリスク

一方で、職業上の被曝や、放射線施設からの放射線や、環境中に放出される放射性物質による公衆の被曝に対しては、放射線防護体系が適用され、放射線障害防止法等の法的な規制において、年間に受ける線量限度が定められている。

医療従事者の受ける放射線被曝は、職業被曝であり、放射線防護体系の適用を受ける。医療行為による患者の被曝と大きく異なるのは、被曝を伴う行為の正当化が、必ずしも自明ではないことである。放射線作業員に対する管理と同様に、医療従事者の受ける放射線被曝についても、放射線管理者といった第三者による厳格な管理がなされていなければならない。

被曝線量についても、合理的に達成できる限り低く被曝を制限する、として、社会的経済的な費用を考慮に入れながら、放射線防護の具体的な内容を最適化する必要がある。行為の正当化、防護の最適化の結果として、個人の被曝線量は線量限度を下回っていることが必要である。国際放射線防護委員会(ICRP)は、一般公衆が原子力施設などから受ける被曝線量制限値として、年当たり1mSv、放射線管理を受けている作業員の職業上の被曝線量限度としては、連続する5年間では100mSv、年当たり被曝線量では50mSvをそれぞれ勧告しており⁵⁾、わが国の放射線障害防止法も、ICRP勧告を取り入れて、同様の線量限度を採用している。

実際には、原子力発電所等では、敷地境界の自主管理規準として、公衆の被曝線量について年当たり0.05mSvまでを目標として放射線管理が行われてきている。また、国際原子力機関では、規制免除規準となる線源の被曝レベルとして年当たり0.01mSv(10 μ Sv)を提案している⁶⁾。医療被曝と比較すると、このように厳しい放射線防護規準が適用されている。

一見すると矛盾するようであるが、一般の人々のなかでは、被曝線量が大きい医療被曝や自然放射線被曝を「やむを得ないもの」として容認する一方で、被曝線

量のはるかに低い人工放射線源からの放射線被曝について、放射線発がん等を懸念し、不安になったりする人々が少なくない。

また、医療被曝であっても、胸部一般撮影による数10 μ Gy以下の被曝について、その放射線リスクに不安を持つような事例もある。胸部一般撮影は、スクリーニングとして実施されるので、がん等の疾患が早期発見された人々を除いて、大半の個人にとっては、検診における放射線被曝の便益を直接には実感しにくく、撮影時に自分の身に何が施されたのかを実感しにくいことなどが、不安を大きくしているのであろう。

しかし、人々が不安になる最も大きな理由は、「低線量、低線量率の放射線被曝によるがんや遺伝的疾患等の過剰誘発リスク」という考え方の意味合いが、直感的に理解しにくいこと、にある。「低線量放射線」、「確率的影響」をキーワードとし、インターネット等で情報検索をしてみると「低線量放射線被曝に関するしきい値なし直線仮説(Linear Non-Threshold hypothesis, 以下、LNT仮説)」について「どんなに微量の放射線被曝でも発がん等の影響を生じる恐れがある」といったような情緒的な説明が充てられている事例が多い。さらに「このLNT仮説を提唱しているのは、国際放射線防護委員会(ICRP)である」という権威の重みにより、人々の心胆を寒からしめることになる。

残念ながら、LNT仮説の意味合いについて理解するには、このような説明では明らかに不十分であり、具体的な根拠に基づいた説明が必要である。寺田寅彦が言うように「正しく怖がる」ことは、一般の人々だけでなく、医療従事者にも、「同様に難しい」ものである。

以下、低線量放射線被曝の健康影響リスクについて、LNT仮説の意味合いを中心に、国際放射線防護委員会の報告書⁵⁾に則して述べてみたい。

3. 確定的影響としきい線量

放射線障害の歴史は、放射線医学の進展とともにあり、X線発見の翌年1896年には、最初の放射線障害事例として、研究者らの目の痛みや皮膚紅斑の報告がある。黎明期の放射線障害について、Table 1に示す。極めて高い線量の被曝事例があり、発足したばかりの国際放射線防護委員会も、線量限度は、急性放射線障害(主に皮膚障害)のしきい線量を規準として勧告している。しきい線量とは、障害が発生する最小量の被曝線量のことである。人集団の放射線感受性には個人差があるので、しきい線量は、被曝した集団の1~5%に臨床的に明らかな急性放射線障害の症状が生じる線量として、定義されている。

被曝後、数週間以内に症状が現れる急性の放射線障

害は、確定的影響とされている。確定的影響には、1) 障害ごとに、異なるしきい線量が存在すること、2) 被曝線量がしきい線量を超えると、線量が増加するにつれて影響の発生率が増加し、障害の重篤度が増すことが特徴である。確定的影響としての急性放射線障害と、それぞれのしきい線量をTable 2に示す。

放射線管理の第一義的な目的は、線量限度を遵守することにより、すべての臓器・組織において被曝線量がしきい線量より低くなるように制限することによって、確定的影響としての急性放射線障害を防止することである。

4. 確率的影響の意味合い

被曝後、数カ月以降に発生する影響を晩発影響という。晩発影響には放射線誘発がん、皮膚の潰瘍や白内障等の身体的影響と、被曝した集団の次の世代における遺伝的影響とがある。線量限度が遵守されて被曝線量が低く抑えられて、確定的影響が防止されている場合であっても、身体的影響のうち「放射線誘発がん」と、「遺伝的影響」については、晩発影響として対策が必要であるというのが、現在の放射線防護の中心となる基本的な考え方である。

放射線誘発がんと遺伝的影響は、確率的影響として定義されており、1) 被曝線量に比例して直線的に影響の発生率が増加し、しきい線量が存在しないものとして扱うこと(LNT仮説)、2) 線量と障害の重篤度には関係がないことにその特徴がある。

また、放射線によって特異的ながんや遺伝的疾患が生じるわけではないこと(症状の非特異性)、被曝から影響が臨床的に発現するまでに一定の期間(潜伏期)があることが特徴である。

確率的影響は、「被曝線量に比例して増加し、しきい線量がない」という仮説に基づいて、「被曝線量を合理的に達成できる限り低く：As Low As Reasonably Achievable(ALARA)」制限することが求められている。被曝低減化のための防護の最適化においては、このALARAを実現することが目標となっている。

5. LNT仮説の理論的な根拠—実際の証拠の有無

では、LNT仮説は、どのような根拠に基づいているのであろうか。放射線の分子・細胞レベルの損傷が、臨床的な放射線障害に至るまでの過程について、現在、考えられているモデルの一つをFig. 1に示す。

まず、放射線被曝により、分子レベルにおいては、検出可能なDNA損傷が生じる。DNA損傷は、照射細胞に物理的な確率で発生するものであり、特に低線量被曝では、DNA損傷の発生確率は被曝線量に比例する。

Table 1 黎明期の放射線障害

西暦年	事例
1895年	X線発見
1896年	研究者の目の痛み、皮膚紅斑の最初の報告
1902年	皮膚がんによる死亡例の報告
1934年	国際X線ラジウム防護委員会(ICRPの前身)が耐容線量として(0.2R/日)を勧告 (→X線技師に急性皮膚障害が見られないしきい線量)
1950年代	高線量被曝による急性障害(皮膚障害、白内障、生殖能力低下、等)と放射線医療従事者の白血病の発生

DNA損傷は、細胞レベルでは、細胞死または細胞機能の喪失を生じる場合と、突然変異を生じる場合がある。

まず、細胞死が多くの細胞で生じた場合には、体細胞では組織や臓器に障害が生じ、生殖細胞で生じると不妊等を生じることになる。これらは、確定的影響であり、急性放射線障害として発現するものである。多数の細胞に細胞死が生じた場合に障害として発現するということは、少数の細胞で発現した場合には障害が発現しないことになる。このことは、「しきい線量」の存在を示唆する。また線量が高くなるに従い、体組織や臓器内のほとんどの細胞が致死や機能不全を起こすことになり、線量に応じて症状が重篤になる説明が多くののである。

次に、突然変異が生じた場合について考えたい。突然変異が体細胞に生じるとがんの前駆体となる(イニシエーションという)。突然変異は、修復される場合もあり、修復が困難な場合には細胞そのものが、アポトーシスによって排除される場合もあるが、修復されず、除去もされずに、次の段階に進展し(プロモーションという)、さらに進行して連鎖的に増殖を始める(プログレッションという)と、臨床的にがんとして発現することになる。ここまでの過程が進行するまでには、一定の時間がかかることになり、潜伏期があることを支持することになる。広島・長崎の原爆被爆生存者の疫学調査などから、最短潜伏期は、白血病では2年、白血病以外のがんでは、10年と考えられている。

照射後の長い間に、これらの多段階過程を経て、がん化するまでには、多くの内的な要因(放射線感受性の個人差等)と外的な要因(環境要因や食生活等の後生的な要因)が関与するとされており、発現するかどうかは、極めて確率的な事象である。また、起点となる突然変異は、一つの細胞に生じたものだけで、がんとして発現できると考えられている。

突然変異が生殖細胞に生じた場合には、遺伝的な影響が発現する可能性が生じる。一つの生殖細胞に生じ

Table 2 急性放射線障害としきい線量

被曝線量	被曝形態	人体影響	参考文献
超高線量		脳壊死	放射線事故の緊急医療, ソフトサイエンス社, 1986年150頁
120Gy		全身被曝例で間質性心筋炎(循環系虚脱)	放射線事故の緊急医療, ソフトサイエンス社, 1986年150頁
100Gy	γ 線, 中性子線頭部	急性中枢性ショック	放射線事故の緊急医療, ソフトサイエンス社, 1986年150頁
>50Gy		中枢神経系症状の発現により死亡 (運動失調, 興奮, 見当識障害, 痙攣, ショック, 昏睡)	放射線事故の緊急医療, ソフトサイエンス社, 1986年150頁
>50Gy		中枢神経症候群(致死率100%, 1-48時間後)	UNSCEAR報告書1988年, 付属書G, 表13
>15Gy	全身均等被曝	神経系の損傷	ICRP60, 表B-2
10Gy - 15Gy	全身均等被曝	胃腸症候群(致死率90-100%, 2週間後)	UNSCEAR報告書1988年, 付属書G, 表13
5Gy - 15Gy	全身均等被曝	胃腸管・肺の損傷	ICRP60, 表B-2
3Gy - 5Gy(半致死線量)	全身均等被曝	骨髄の損傷 LD50/60 ICRP60, 表B-2	
2Gy - 10Gy		骨髄症候群(致死率0-90%, 数週間後)	UNSCEAR報告書1988年, 付属書G, 表13
1Gy - 2Gy		骨髄(致死率0-10%, 数カ月後)	UNSCEAR報告書1988年, 付属書G, 表13
1.5Gy - 2 Gy		一過性廃疾と血液学的変化の検出	UNSCEAR報告書1988年, 付属書G, 表28
0.5Gy - 1.5Gy		被曝者の10%に嘔吐発現	UNSCEAR報告書1988年, 付属書G, 表28
0.25Gy - 0.5Gy		脳波記録修飾	UNSCEAR報告書1988年, 付属書G, 表28
0.05Gy - 0.25Gy		染色体異常と精子数減少	UNSCEAR報告書1988年, 付属書G, 表28
0.5Sv(しきい線量)	一回短時間被曝	骨髄(造血能低下)のしきい線量	ICRP60, Table B-1
0.2Sv		発がんの確率的影響の検出	ICRP60, 付属書B, B62-paragraph
0.25Gy(着床18日後)		動物実験等の奇形誘発最小線量	UNSCEAR報告書1986年, 付属書C, 表1
0.1Gy(着床1日後)		胚の致死効果は, 着床直後で誘発	ICRP60, 付属書B, B161-paragraph
0.15Gy	男性, 急性照射	一時的不妊	ICRP60, 表B-1
3.5 Gy - 6 Gy	男性, 急性照射	永久不妊	ICRP60, 表B-1
0.65Gy - 1.5Gy	女性, 急性照射	一時的不妊	ICRP60, 表B-1
2.5Gy - 6Gy	女性, 急性照射	永久不妊	ICRP60, 表B-1
2Gy		初期紅斑(皮膚, 一時的, 数時間後)	ICRP 59
3Gy		一時的脱毛(3週間後)	ICRP 59
7Gy		永久脱毛(3週間後)	ICRP 59

Fig. 1 分子・細胞レベルの損傷から臨床影響までの図式

た突然変異が生殖に関与すれば、遺伝的な影響が発現する確率があると考えられている。

このように、放射線による発がんや遺伝的影響が、一つの体細胞や生殖細胞における突然変異によって生じる可能性があるという考え方に立つと、分子・細胞レベルにおけるすべての損傷の除去が確認できない限り、安全側(予防側)の仮定を採用せざるをえず、しきい線量は認められないというのが、LNT仮説の根拠となる考え方である。

6. 実際の低線量被曝において、臨床的に確認された確率的影響の有無

放射線防護・管理が十分に行われているときには、線量限度以下の被曝について、放射線発がんや遺伝的影響のリスクを考えることになる。

低線量被曝における放射線の確率的影響を推定するための根拠としては、マウス等を用いた放射線影響評価実験データと、広島・長崎の原爆被爆者の被曝線量の遡久的な評価と寿命調査(コホート疫学研究)のデータ、その他の疫学調査データ等がある。広島・長崎の原爆被爆生存者に関する疫学調査の概要をFig. 2に、結果の概要をTable 3に示す。原爆被爆生存者に関する健康調査の詳細については、(財)放射線影響研究所のホームページに詳しい説明がある(<http://www.rerf.or.jp>)。

6-1 遺伝的影響に関するデータ

広島・長崎の原爆被爆生存者の子供集団における遺伝的疾患については、死産、出生時死亡・奇形、男女比率、染色体異常、遺伝子突然変異率、致死率等について疫学的な調査がされている。いずれにおいても、これらの遺伝的疾患について、広島・長崎の原爆被爆生存者の子供集団において自然発生率との比較では統計的に有意な増加は、認められていない。

国際放射線防護委員会⁵⁾は、遺伝的影響の発生確率を、動物実験データによる倍加線量法を用い、遺伝病の自然発生率について調査データの整っている国々(ハンガリーなど)の人口動態データに適用して、遺伝的影響のリスクを推定している。倍加線量は、自然に生じる1世代当たりの突然変異と同じだけの突然変異を生じる放射線量として定義されており、動物実験データから、およそ1Gyと推定されている。遺伝的影響の発生率は、一般公衆で $1.3 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ 、職業人(成人放射線作業員)で $0.8 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ と推定されている。一般公衆の値が大きいのは、生殖可能な年齢にある人の割合が、職業人集団より大きいことを反映したものである。

放射線防護の考え方における遺伝的影響に関する歴史的な変遷については、館野がまとめている⁷⁾。現在

Fig. 2 広島・長崎の原爆被爆者の健康影響調査

Table 3 有意線量に被曝した広島・長崎原爆被爆者寿命調査対象者のがんによる死亡数(1950～1990年)

線量の範囲	がん死亡数	推定過剰死亡数	放射線によるものの割合
0.005 - 0.2Sv	3391	63	2% (=100×63/3391)
0.2 - 0.5Sv	646	76	12%
0.5 - 1Sv	342	79	23%
>1Sv	308	121	39%

の知見では、広島・長崎の原爆被爆生存者の子供集団には、統計的に有意な遺伝的影響がみられていないことを再度強調しておきたい。

6-2 発がん影響に関するデータ

広島・長崎の原爆被爆生存者の寿命調査について、被曝線量とがん致死率との関係から、線量効果関係を推定することになる。白血病の誘発率は、被曝線量に比例する低い線量域と、被曝線量の二乗に比例する高い線量域を持つ線形二次モデルによく合うとされる。また、白血病以外の固形がんについては、低い線量から高い線量まで、被曝線量に比例する直線モデルに合うとされている。しかし、ここで確認しておきたいことがある。原爆被爆生存者は、 γ 線や中性子線等の複数の種類の放射線を、大線量で一回被曝したのであり、いわゆる低LET放射線(γ 線やX線など)の低線量被曝の影響評価は、外挿推定されているということである。直線線量効果関係の概念図を、Fig. 3に示す。Fig. 3の左側の図だけを先入観なしに眺めながら、線量(横軸)と頻度(縦軸)との関係を解析するとしたら、あなたなら、どういうモデルで解析されるであろうか。

右側のモデルLはしきい値なし直線モデルであり、原点を通る直線で回帰して傾き α を得る。この傾き α がリスク係数ということになる。対して、モデルL-Q

Fig. 3 しきい値なし直線線量効果関係(Linear Non Threshold仮説)の概念

Table 4 被爆時年齢別・性別の年がん死亡に対する過剰相対リスク係数(Excess Relative Risk/Sv/年, 広島・長崎原爆被爆生存者についての一回高線量被曝に適用)[ICRP 1990, Table C-1]

固形がん, 男性

被爆時年齢	過剰相対リスク(ERR/Sv/年)
0 - 9	1.06
10 - 19	0.65
20 - 29	0.57
30 - 39	0.24
40 +	0.18

白血病, 男性

被爆時年齢	過剰相対リスク(ERR/Sv/年)
0 - 9	18.7
10 - 19	4.4
20 - 29	5.6
30 - 39	3.9
40 +	3.3

固形がん, 女性

被爆時年齢	過剰相対リスク(ERR/Sv/年)
0 - 9	2.06
10 - 19	1.27
20 - 29	1.11
30 - 39	0.48
40 +	0.34

白血病, 女性

被爆時年齢	過剰相対リスク(ERR/Sv/年)
0 - 9	19.5
10 - 19	4.6
20 - 29	5.8
30 - 39	4.1
40 +	3.4

は、原点を通過して線量に比例する直線項と線量の二乗に比例する項の線形二次モデル($Y=\alpha'D+\beta D^2$)で回帰され、傾き α' と β を得る。他にも、放射線発がんのメカニズムに関するモデルを組み込んだ複雑なモデルを考えることができるであろう。

Fig. 3には、低線量被曝のデータが含まれておらず、広島・長崎の原爆被爆生存者が受けた高線量一回被曝における放射線発がんの線量効果関係を示したものである。しきい値なし直線モデルを適用したとき、広島・長崎の原爆被爆生存者を被爆時年齢、性別に分けて推定された、年がん死亡に対する過剰相対リスク係数(ERR/Sv/年)を、Table 4に示す。Table 4は、広島・長崎の原爆被爆生存者に相当するような高線量・高線量率の一回被曝におけるリスク推定に厳密に適用

できる。全般に、被爆時年齢が若いほど、リスク係数が高い傾向にあることが分かる。

6-3 低線量・低線量率効果係数(DDREF)による補正

Fig. 3では、傾き α' は、直線モデルの傾き α より小さい値となる。特に低LET放射線で低線量被曝した場合には、分子・細胞レベルでの亜致死損傷(SLD)の修復による回復効果があることや、低線量率被曝では腫瘍発生率が低下するという動物実験データがあること等を考慮して、線形二次モデルを考えた方がよいとする考え方が出てきている。

国際放射線防護委員会は、低LET放射線で0.2Gy(200mGy)以下を「低線量」、0.05mGy/分以下を「低線量率」としており、これらの条件下でのリスク係数を

推定するには、Fig. 3の直線モデルの傾き α を低線量・低線量率効果係数(DDREF)で除することを勧告している⁵⁾。DDREFは、Fig. 3における α を α' で除した値に相当することになり、DDREF値として2から10までの値が提案されている。国際放射線防護委員会は、安全側に配慮してDDREF値として2を提案している。

7. 100mGyの被曝による「生涯過剰がん致死リスク」の推定

ここまで、放射線の確率的影響とLNT仮説について概説し、広島・長崎の原爆被爆生存者の疫学調査における年がん死亡に対する過剰相対リスク係数(被爆時年齢別、性別)をTable 4として得た。このTable 4におけるリスク係数を、がん死亡の年齢別自然発生率にかけ合わせることで、放射線被曝による生涯過剰がん致死リスクを推定できる。具体的に述べていこう。

7-1 ベースラインとなる「年齢別がん死亡確率」の計算方法

年齢別がん死亡確率 $[Ro(T)]$ は、T歳の人が、T+1歳になるまでの1年間にがんで死亡する確率のことである。これを推定するためには、厚生労働省の人口動態統計の死因統計(がん死亡)と生命表を用いる。白血病は、発症率が小さいので、ここでは年齢別の固形がんによる死亡率をFig. 4に示す。年齢別の生存確率をFig. 5に、年齢別の平均余命をFig. 6に示す。これらの図は1997年の人口動態統計データを用いて作成したものである。

Fig. 4から、がん致死が40歳を境に急激に増加することが改めて明らかになる。Fig. 5では、それぞれの年齢まで生存する確率が示されている。男性が60歳まで生存する確率は0.9(90%)ということになる。同じ生存率のところでは、女性は70歳まで生存することが分かる。Fig. 6では、0歳の平均余命をもって平均寿命といい、男女とも、大変な長寿であることが分かる。

さて、年齢別がん死亡確率 $[Ro(T)]$ を評価するためには、T歳まで生存する確率に、T歳からT+1歳の1年間にがんで死亡する確率をかけ合わせればよいことになる。つまり、年齢別の生存確率(Fig. 5)に、年齢別の固形がんによる死亡率(Fig. 4)をかけ合わせればよい。その結果をFig. 7に示す。Fig. 7をすべての年齢について積算すると、固形がんによる生涯致死確率 $[Ro]$ となる。1997年の人口動態統計データでは、男性で29.1%、女性で19.3%という結果になった。男女を平均すれば、およそ4人に1人の割合で、がんが死因で亡くなっている勘定である。

7-2 生涯リスク予測モデル

Table 4に示されたリスク係数は、相対リスクという考え方に基いており、相乗モデルというモデルで、生涯のリスクを予測(projection)するものである。

7-2-1 一回被曝の場合

まず、一回被曝の場合の全がん(白血病を除く固形がん)の生涯リスクを考えてみる。被曝する人の人口学的な特性を考慮する必要がある。ここでは、Table 4を用いるので、年齢と性別を考慮する必要がある。例として、30歳の男性で低LET放射線の100mGy(0.1Gy)を一回全身均等被曝をしたという条件で検討してみることにする。

この場合の年がん死亡に対する過剰相対リスク係数は、Table 4から0.24(ERR/Gy/年)であるので、0.1Gyの被曝による年がん死亡に対する過剰相対リスクは、両者を掛け合わせて0.024(ERR/年)となる。つまり、Fig. 7で評価した各年齢の自然がん致死確率の2.4%が、放射線によって誘発された過剰がん致死確率となる。さらに、白血病以外の全がんについて、被曝からリスクが生じるまでの最短潜伏期として10年を採用し、その後の影響は同じ相対リスク(プラトー)のまま、生涯(100年間)続くという予測モデルが提案されている。

ここでは、30歳での一回被曝であるから、Fig. 8で示したように、10年の潜伏期をへて、40歳以降、生涯にわたり、リスクが生じることになる。

白血病についても考え方は同じである。被曝からリスクが生じるまでの最短潜伏期は2年とし、その後の影響は同じ相対リスク(プラトー)のまま、40年間続くものとして、生涯過剰白血病致死リスクを予測するのである。

7-2-2 継続的な被曝の場合の遷延リスク

毎年、被曝するような場合の遷延リスクについても、基本的には同じ考え方で生涯過剰発がんリスクを推定することができる。例えば、職業上の被曝として、男性が、年間に線量限度(20mSv)の1/10の線量を、25歳から65歳まで継続して被曝する場合を考えてみる。

まず、25歳での2mSvの一回被曝の生涯過剰発がんリスクを、上述の方法と同じ考え方で推定する。この場合の年がん死亡に対する過剰相対リスク係数は、Table 4から0.57(ERR/Sv/年)である。次に26歳における2mSvの一回被曝の生涯リスクを推定する、というように次々と29歳まで推定する。30歳での2mSvの一回被曝の生涯過剰発がんリスクの推定では、年がん死亡に対する過剰相対リスク係数をTable 4から読み取って0.24(ERR/Sv/年)とする。同様に31歳、32歳と計算していき、40歳以降は、リスク係数を0.18(ERR/Sv/年)

Fig. 4 年齢別固形がん死亡率, 人口動態統計データ(1997年)

Fig. 5 年齢別生存(存命)率, 人口動態統計データ(1997年)

Fig. 6 平均余命, 人口動態統計データ(1997年)

Fig. 7 年齢別がん死亡確率、人口動態統計データ(1997年)

として、順次65歳まで推定する。そして、それらをすべて合計すればよいのである。被曝時年齢を遷延していくときに、年がん死亡に対する過剰相対リスク係数として、Table 4の各年齢に該当するリスク係数を用いるのが、重要なところである。

7-2-3 低線量・低線量率効果の補正

最後に、低LET放射線で0.2Gy(200mGy)以下は「低線量」、0.05mGy/分以下は「低線量率」に該当することになる。Table 4は、高線量一回被曝の広島・長崎原爆被爆生存者の疫学調査結果から推定したリスク係数であるから、Table 4の値を用いて推定した生涯過剰発がん致死リスクを低線量・低線量率効果係数(DDREF=2)で割ることが必要となる。

8. 「線量限度」と「受容可能なリスク」の関係について

個人については、前節のように性別や年齢で一回被曝、遷延被曝の生涯過剰発がん致死確率を推定することができる。が、男女を含めた多様な年齢構成の集団を想定し、それぞれの構成比率で荷重して平均すれば、不特定多数の個人(男女、年齢を問わず)についての、代表的なリスクを推定することができる。また、被曝時年齢を問わないことになることから、総線量が同じであれば、一回被曝でも遷延被曝でも、同等のリスクとして扱うことになる。

日本の人口動態統計データから、日本人の標準的な集団についてTable 4を用いて1Gyの低LET放射線の均等全身被曝による生涯過剰発がん致死リスクを推定す

Fig. 8 100mSvを被曝した場合の生涯がん誘発確率(被曝時年齢:30歳,性別:男性)

ると、おおむね、男性で0.08(8%)、女性で0.13(13%)が得られる。国際放射線防護委員会では、日本、米国、プエルトリコ、英国、中国について同様の推定をしており、これらの国々の平均(男女平均)として、0.101(10.1%)と推定している。

100mGy(0.1Gy)の被曝の場合、低線量・低線量率効果の補正を行うことが必要であり、DDREF(=2)で割って、日本人男性で0.004(0.4%)、女性で0.006(0.6

%)となる。男女を平均すれば、低LET放射線100mGyの均等全身被曝の生涯過剰発がん致死リスクは、0.5%ということになる。この0.5%には、どのような意味があるだろうか。

前述したとおり、わが国では、およそ4人に1人はがんで亡くなることになる。ここに100mGyの被曝をした10,000人の男女を考えると、自然発生分で、2,500人が、がんで亡くなる勘定になる。統計的には、概算として例数の平方根をとって ± 50 人程度を標準偏差として考慮する必要がある。放射線被曝により、生涯がん致死確率が0.5%増加すると、がんで死亡する人数は、2,550人になると推定されるわけであるが、この増加分は、標準偏差の範囲であり、統計的には検出することが困難である。

さらに、LNT仮説は、100mGyといった低線量の被曝の影響については、実際のデータがないところで予防原則に基づいて安全側にリスクを過大評価する放射線防護上の仮説であるので、実際に放射線被曝によってがんになる可能性は、個人としては、ほとんど問題にしないでよいレベルである。筆者は、発がんリスクでいえば、個人的には食品とか、喫煙(特に受動喫煙)のリスクの方が気になるところである。

ただし、受容可能なリスクについては、個人の内面の問題を含む問題であり、最後は個人個人の意思決定の問題であろう。

国際放射線防護委員会は、生涯に受ける放射線線量の目安として1Sv(低LET放射線で均等被曝では1Gy)を提案している。職業人の線量限度は、前述したように5年間で100mSv(年間50mSvまで)となっており、線量限度いっぱいの被曝が50年間続いた場合、ちょうど生涯線量が1Svになる勘定になっている。この場合、線量・線量率効果係数を適用して、およそ4~5%の生涯過剰発がん致死確率の増加が見込まれる。これを年当たりには、被曝期間である50年で除して平均すればよい。計算してみると、およそ年当たり1000分の1の致死リスクになる($=4\sim 5 \times 10^{-2}/50$ years)。

国際放射線防護委員会は、実際の職業人の被曝実績は、対数正規分布になり、その代表値(中央値、メディアン)は、線量限度のおよそ10分の1であるという推定をしている。この推定でいくと、職業人の被曝の実績値は、5年間で10mSvとなり、生涯(50年)で100mSvと見積もられる。この場合、0.4~0.5%の生涯過剰発がん致死確率の増加となり、これを50年で平均すると、年当たりおよそ10000分の1の致死リスクとなる勘定になる($=0.4\sim 0.5 \times 10^{-2}/50$ years)。

国際放射線防護委員会では、英国ロイヤルアカデミーの報告書を引用しつつ、職業上の死亡リスクとして「もし、リスクにさらされている個人が状況について

知っており、結果としてリスクにみあう便益があると判断し、リスク低減のための合理的なすべての手段がすでに講じられていると理解している場合には、まったく容認できないとは言い切れないレベル」として、年当たり1000分の1を提示している。

とはいえ、受容可能なリスクのレベルは、個人の認知の領域である。中谷内は、リスク認知の機微として、稀な現象や破滅的・不可逆的な結果、不可知なプロセス等がリスク過大評価に導く傾向があること、同じ内容でも誰が言っているかで信用するかどうかが異なること(話し手の信頼性と専門性)を挙げている⁸⁾。中谷内によれば、化学物質の毒性リスク等について「動物実験による結果を人間にあてはめてもよいか?」という言い回しで尋ねると、Noと答える人が、「動物実験で発がん性が見いだされた場合、その結果を人間にあてはめてもよいか?」と聞かれた場合には、Yesとなる例があるという。

あるかないか、白か黒かではなく、灰色の領域において、「正しく怖がるのは、とかく難しい」という寺田寅彦の指摘が、まさに正鵠を射ていることを思い知る事例は、筆者の身の回りでも少なくないのである。

9. さいごに

放射線は、人の五感に感じないものであり、有用性とリスクを併せ持つものである。だからこそ、医療行為として、人が人に意図的に放射線を照射することは、専門的知識を修めた資格のあるプロフェッショナルだけにしか許されていない。放射線が目に見えず、知覚することもできない以上、患者は、臨床の医師者を「丸ごと、えいやっ」と信じて身を任せているのである。

賢明な人々は、筆者のような、学者・研究者の言うことは、「話半分(以下)」くらいで聞いているものであるが、臨床の医療技術者には厚い信頼を寄せているものである。それは、医療被曝による損益は、患者自らに直接、跳ね返るからであり、医者や医療技術者が、心から信頼して任せられるプロフェッショナルであってほしいという願望の裏返しでもある。その願いの切実さは、そのまま臨床の現場にいる医療技術者の責任の重さということになるのであろう。

一般の人々は、医療に関する専門的な判断は、医療技術者を「信じてお任せする」ものであり、医療技術者に対して疑問や不安を述べることをためらってきた。しかし、昨今では、インフォームドコンセントによって、患者やその家族などの疑問や不安に寄り添ってこうとする姿勢が臨床の医療技術者に求められるようになった。人々の不安に寄り添い、低線量放射線の影響について、何がどこまで分かっている、何が分かっ

ていないか。そのうえで、どのような考え方に基づいて安全管理の原則が貫かれているか、ということについて、具体的かつ平易に説いていくなかで、患者の切なる不安をやわらげ、信頼に応えることができると信じるものである。

本稿で扱った内容は、放射線影響についての概要の一部に過ぎず、細部においては、まだまだ学術的な決着がついていない問題が数多く残されている。参考文献として挙げた資料には、本稿では割愛した有用な情報が多く記載されている。これらを読み解いていくことが必要になることもあると思われる。その手始めとして、本稿がいくらかでもお役に立つことを願っている。

る。

謝 辞

末尾になりましたが、本稿を執筆する機会を与えていただくうえでご尽力をいただいた自治医科大学RIセンター菊池 透氏、国立循環器病センター放射線診療部の粟井一夫氏、新潟大学医学部保健学科の富樫厚彦氏に心から感謝いたします。また、本稿を執筆するにあたり、放射線医学総合研究所重粒子医科学センターの西澤かな枝氏、赤羽恵一氏に御教示をいただきました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 丸山隆司 編：生活と放射線，放射線医学総合研究所環境セミナーシリーズ．実業広報社，東京，(1995)．
- 2) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (原子放射線の影響に関する国連科学委員会) 1993report, 「電離放射線の線源と影響」放射線医学総合研究所 監訳，実業広報社，(1993)．
- 3) 西澤かな枝 編：特集：医療被曝—今日の観点と展望—．医学物理，22(2)，63-117，(2002)．
- 4) International Commission on Radiological Protection (国際

- 放射線防護委員会)，Publication 85「IVRにおける放射線傷害の回避，邦訳：日本アイソトープ協会」，(2000)．
- 5) International Commission on Radiological Protection (国際放射線防護委員会)，Publication 60「国際放射線防護委員会の1990年勧告，邦訳：日本アイソトープ協会」，(1990)．
- 6) International Atomic Energy Agency (国際原子力機関)，安全シリーズNo.115，p.81，(1996)．
- 7) 舘野之男：放射線と健康．岩波新書，(2001)．
- 8) 中谷内一也：環境リスク心理学．ナカニシヤ出版，(2003)．