

『就実論叢』第42号 抜刷

就実大学・就実短期大学 2013年2月28日 発行

低線量の放射線をあまり恐れないで！

Don't fear low-level radiation so much!

須 藤 鎮 世

低線量の放射線をあまり恐れないで！

Don't fear low-level radiation so much!

薬学部

須藤 鎮 世

1. 要旨

福島市市民意識調査によると、市内にいる人の半数以上は避難したいといい、避難した人の半数以上は是非戻りたいという。なぜそうしないのか。放射線に対する恐怖が原因であろう。現在、政府は極端な「安全サイド」に立ち、放射線に対する厳しい規制を敷いている。これは国際放射線防護委員会の勧告に基づいており、その基本に線形閾値なしモデル（閾値なしモデル）がある。これは「放射線はどんなに微量でも健康被害がある」とする。しかし、閾値なしモデルは仮説であって、科学的真実はない。それにも係わらず、「どんなに微量でも害がある」という考えが、真実であるかの如く一人歩きしている。この考えが無害であれば問題はない。閾値なしモデルが過剰な不安、不要な心配をあおり、精神的にはもとより、肉体にも、また、社会的、経済的にも過剰な負担を強いるので、マイナス面が大きすぎるところに問題がある。そもそも生命誕生以来、我々は放射線に曝されてきた。現に体内から毎秒7,000発の放射線を浴びている。その数倍の放射線を外部から浴びている。さらにそれに倍する医療用放射線を浴びている。我々はこれらに対抗するのに十分な防御システムを備えている。チェルノブイリの事故では汚染の割に死者は極めて少ない。福島では放射線による死者はない。一方で放射線に対する恐怖、心労、避難ストレス等で死んだ人が600人を超えるという。最大級の安全を期した閾値なしモデルの強制や過信は、安全どころか危険ですらある。ここでは主に以下を論じる。1) 原子爆弾と原子力発電所の事故は本質的に異なり、原子爆弾では放射線よりも爆風、熱線による死者が多かった。2) 瞬時の放射線被曝は損傷が大きく、同一線量でも時間をかけた被曝は影響が桁違いに低くなる。これが原子力発電所の事故で死者が少ない理由の1つである。3) 生命誕生以来放射線に曝されて来た我々は、低線量率の放射線に対し、十分に対処するだけの幾重もの防御機構を備えている。4) 閾値なしモデルでは説明し難いデータがある。現実を説明できないとき、その理論なりモデルは誤っている。これらを理解し、低線量率の放射線に対する不要で、過度の不安を消し去り、心労やストレスから解放されるよう、切に願う。

2. はじめに

筆者は第一種放射線取扱主任者であり、遺伝子組換えを主体に、放射線を用いる実験を30

年以上してきた。2011年7月に警戒区域からの避難者の一時帰宅に際し、ボランティアとして福島における放射線モニタリングに参加した。また、茨城県守谷市の自宅が関東のホットスポットに位置するため、近隣の放射線の測定にあたった^[1, 2]。得られた結果やボランティア活動の状況は日本環境変異原学会の公開シンポジウムで発表した^[3]。マスコミや一部の学者が危険性をあおり、風評被害もあり、人々が過度に放射線を恐れているのを見て、危険性は極めて低いことを伝え、少しでも心の安らぎを得て頂きたいと願う。

2012年9月16日の朝日新聞によると、福島市市民65%が今でも避難したい、あるいはしたかったという。避難した人は55%が是非戻りたい、できれば戻りたいといい、44%が戻りたくない、できれば戻りたくないという。市外避難者は7,000人以上で、その62%は別居生活で、母子による避難が多いとされる。家庭寸断は不幸である。家庭団欒に戻って頂きたい。望みを阻止するのは、放射線に対する恐怖が原因だろう。根底には原子爆弾（原爆）に対する恐怖があり、追い打ちをかけているのが、「どんなに微量でも害がある」とする「線形閾値（いきち）なしモデル」閾値なしモデルと略）に基づく厳しい政府の規制であろう。

閾値なしモデルはあくまで「モデル」であって、科学的に正しいと証明されたわけではない。放射線規制のための指針として、国際放射線防御委員会（国際防衛委）の勧告^[4]があり、政府はこれを基準に規定を定めている。勧告では低線量の放射線のリスクは不明で、有るかも知れないし、無いかもしれない。そこで、最大級の「安全サイド」に立ち、有ると「仮定」して閾値なしモデルを採用している。規制が無害であれば問題はない。しかし、「どんなに微量でも害がある」とする考えは、無視しうる程度の微量な放射線をも危険視させ、不要な心配をかけ、恐怖心を煽り、人々に過剰反応を起こさせ、多額の費用を要する過剰防衛を強要する。日々、不安を抱いた生活、中絶、失職、転職、別居、家庭の絆の崩壊、離婚、ストレス死、自殺、ふるさと放棄、微量に汚染された農産物の不買、出荷拒否、全米米検査と検査遅滞による新米の古米化など、精神的にはもとより、個肉体、社会的、経済的にも不要な過剰負担を強いている。マイナス面が大きすぎる。避難生活や恐怖はストレスを強める。ストレスは免疫力を損ない、感染症に対する抵抗力を削ぎ、発癌性を助長する。福島第一原発の事故では放射線による直接の死者はゼロである。しかし、ストレスから600人を超える人々が死亡したという。最大限の安全を期した閾値なしモデルの強制や過信は、人を守るどころか死に至らしめ、殺人幫助につながる。

3. 放射線の基礎知識

1) 放射線に関する単位

放射能を測る単位がベクレル (Bq) で、1 Bq は1秒間あたり1崩壊することを示す。放射線の量を測る単位はエネルギーが基本となり、放射線が1 kg の物質に1 ジュール (J) の

エネルギーを付与するとき、1グレイ (Gy) とする。1カロリー (cal) は1 cm³の水 (1g) を1℃あげるエネルギーで、1J = 0.238 cal である。60 kg (60,000 g) の体重のヒトが水でできていると仮定すると、1 Gy の放射線の照射で、体温が約0.000004度上昇する。

放射線の人体への影響を考えるときには、実行線量を利用し、単位はシーベルト (Sv) である。Sv は Gy に放射線の種類による加重係数と、体の組織による組織加重係数をかけあわせる。 α 線や中性子線は加重されるが、福島では関係ない。福島の汚染源である β 線と γ 線は1である。組織加重係数は組織、臓器により1～12までである。感受性の低い皮膚、脳、骨表面などは1で、感受性の高い骨髄、結腸、肺、胃、乳房などは12である。

2) 粒子線

最も小さい原子は水素である。地球の中心にリング大の陽子をおき、地球の表面にピンポン球大の電子を置くと、水素原子の模型となる。2番目に小さな原子はヘリウムで、中心の原子核に陽子が2個、中性子が2個あり、2個の電子が外の軌道を回っている。 α 線はヘリウムの原子核、 β 線は電子線である。中性子線を加えた3種が主たる粒子線である。 α 線は破壊力はあるが、飛距離は極端に短く、紙1枚で防げる。中性子も破壊力はあるが、飛距離は短い。 α 線と中性子は広島、長崎の原爆は瞬時に、多量に放出され、ヒトを殺傷した。福島では関係ない。重粒子線は癌の診断・治療に有効利用されている。

β 線は電子線であり、福島ではヨード-131およびセシウム-134、-137から放出される。ヨード-131はすでに消失した。 β 線は約1 mmのアルミニウムで遮蔽できる。セシウム由来の β 線の飛距離は水中(体内と考えてよい)で2 mm以下で、空中では1～2 mである。外部からの照射はほぼ皮膚で防ぐことができる。さいわい、皮膚は放射線への感受性が最も低い組織の1つである。 β 線の一部は直接作用としてDNAその他の成体分子を損傷することもあるが、多くは体の主要成分である水分子の電子を跳ね飛ばして電離させ、ラジカルや活性酸素を作る。活性酸素は呼吸で大量に作られる。大部分は体内で酵素や抗活性酸素剤で消去される。傷害の程度は主として放射線の量と、照射に要した時間(線量率)に依存する。ゆっくりに照射されれば害は少なくなる。現在、飲食物を通してのセシウム摂取は低く抑えられている。ホールボディカウンターによる福島県民の体内のセシウム量の測定は極めて低い値を示すので、内部被曝の心配はない。

3) 電磁波

電磁波は波長の長い順に電波、赤外線、可視光線、紫外線、X線、 γ 線に大別される。波長は連続しており、適宜上、分けて命名されている。波長が短いほどエネルギーは強くなる。東京スカイツリーの主役は展望台でなく、電波の発信にある。電波は波長に応じて電波時計、

ラジオ放送、FM放送、テレビ、電子レンジ、携帯電話等に利用されている。

遠赤外線サウナは通常のサウナより熱線の透過性が高く、より低温で体を暖める。赤外線の利用では赤外線コタツや電気コンロが身近にある。我々の体からも放射されている。目で見えないが、近寄れば暖かい。赤外線サーモグラフィで写真にとれば、暖かいところは赤く、冷たいところは青く写る。原爆で放射される強力な赤外線はヒトを瞬時に焼き殺し、生存しても皮膚を爛れさせ、後に、肥厚性瘢痕が残る。善悪は線量に依存する。

太陽光は無色の可視光に見えるが、水滴のプリズムで分解すると七色の虹となる。緑色植物が緑に見えるのは、光合成を行う色素タンパク質が波長の短い紫と、波長の長い赤の光を吸収するからで、残った緑が目に見える。我々は光合成の賜物を享受することで生存できる。恵みの可視光とはいえ、日食を肉眼で観察すると視細胞を痛み、日食網膜症となる。レンズで集光すれば、放火ができる。光量により、善にも悪にもなる。

布団を干すと、細菌やカビは紫外線により DNA に傷害をうけ、死ぬ。彼らは燦々と照る日光を好まず、ジメジメとした所を好む。我々にとっては適量の紫外線はビタミンDの合成に必須である。一方、紫外線は遺伝子の担体である DNA に傷をつける。生命の歴史を通して何十億年もの間、紫外線に曝らされてきたので、生物は修復系を進化させた。修復できない色素性乾皮症とよばれる希な遺伝病がある。紫外線を浴びると癌になる。修復系が癌を予防していることが分かる。紫外線量が多いとメラニン色素を作り、紫外線の防御に努める。しかし、限界を超えると細胞は死に、皮がむける。運が悪いと皮膚癌になる。紫外線の多くはオゾン層で吸収されるが、オゾンホールができると直接地上に注ぐ。悪性の黒色腫にかかる日本人は10万人あたり1～2人だが、欧米人は紫外線に敏感で、20人前後である。彼らは率先して、オゾンホールを破壊するフロンガス等の製造・使用を禁止した。

X線は透過力が強く、多くは我々の体を光速で素通りする。素通りでは何の影響もない。一部は直接的にあるいは間接的に DNA 等に傷をつける。多くは生体の主成分である水分子を電離し、活性酸素を作るので、作用はβ線と同じことになる。X線は福島のパollutionには関係ない。X線は人体に有害であるが、一方で透過力を利用して胃や胸の検診、CTスキャンなど、医学的検診には不可欠である。ただし、医学用のX線だから善玉というわけでない。

X線同様にγ線は分子を電離する力をもつ。一部は直接的に DNA を切断したり、塩基に傷を付けたりする。多くはβ線を発生させるので、生物作用は本質的にβ線と同じとなる。しかし、電離能はずっと低い。γ線の多くは体を素通りする。その分は無害である。福島ではセシウム-137からβ線がでた後すぐにγ線を放出し、安定なバリウムとなる。福島では

体内のセシウムは無視できるほど低いので、内部被曝は問題にならない。外部被曝による β 線と γ 線が問題となる。その作用は原爆と異なり、低線量率での影響であり、害は少ない。福島では外部照射の β 線はほぼ皮膚で防御され、その影響は垢とともに消える。

3. 原爆と原子力発電所の事故は本質的に異なる

原爆と原子力発電所（原電）の爆発には「原子」、「ウラン-235が燃料」、「爆発」という共通項があるので、福島の原電の爆発と広島原爆を同一視あるいは混同している人がいるかもしれない。しかし、両者は本質的に異なる。

1) 原爆と原電の「爆発」は本質的に異なる

ウラン235は約7億年の半減期をもつ放射性同位元素である。これは原子量が130前後と90前後の原子に自然崩壊する。このとき、2～3個の高速の中性子を放出する。この中性子が隣の原子に衝突すると、この分子がまた分裂する。「純度90%以上のウラン-235」が一定量（臨界量）あると、連鎖反応が瞬時（百万分の1程度）におき、爆発する。このとき爆発の前後で質量に差ができ、その差がアインシュタインの有名な $E = mc^2$ という式に則り、膨大なエネルギーが放出される。原爆はこの「原子の分裂」という原理による。

一方、原電では「濃縮度が数%のウラン-235」を使用する。この濃度では連鎖反応が進行しないので、中性子を減速し、隣の原子に衝突し易い熱中性子に変える。すると純度が低くてもゆっくりと連鎖反応がおこる（臨界）。原電でも原爆同様に膨大なエネルギーが発生するので、蒸気を作り、タービンを回し、発電する。これが原電である。中性子を制御棒で吸収してしまえば、連鎖反応は止まる。福島ではここまでは成功した。

原爆も原電も核分裂で生じるエネルギーを使用していることは同じである。しかし、原電のウラン-235の純度は低いので、原電が原爆の1,000倍のウラン-235を格納していても、原爆同様に瞬時に連鎖反応をおこして爆発することは、「決して無い」。たとえ「再臨界」に達し、連鎖反応が再開されても、温度が上昇し、メルトダウンは起こすかもしれないが、「原爆として瞬時の核反応」で爆発することはない。チェルノブイリの事故も原爆として爆発したのではない。ウラン-235の濃度の差が原爆と原電の「第一の本質的な差」となる。北朝鮮などがウラン-235の高濃縮を試み、国際的非難を浴びるのは、原電だけなら低濃度で十分なのに、高濃縮という原爆製造の意図が丸見えだからである。

核分裂で生じた不安定な核種は α 線や β 線を出しつつ崩壊し、そのエネルギーは熱に変換される（熱崩壊）。そこで原子炉停止後も核燃料を冷やし続ける必要がある。ところが福島ではこの冷却に失敗したため、燃料棒がむき出になり、温度が上がり、水が酸素と水素に分

解された。水素が空気組成の4%に達する爆鳴気となり、ちょっとした弾みで爆発する。これが福島原発の水素爆発という「化学反応」であり、原爆の「核反応」とは本質的に違う。これが原爆と原発の「爆発」における「第二の本質的な差」である。

2) 広島原発

広島原発のエネルギーは爆風50%、熱線35%、放射線15%となって放出された。爆発点の気圧は数十万気圧、爆心地における爆風速は440 m/s 以上という。赤外線として放射された熱線は、爆心地の地表温度を3,000~6,000℃にした。これは人を焼き殺し、水を蒸発させ、黒い雨の元となった。圧死・焼死・放射線による原爆の犠牲者約10万人のうち、約10%が放射線によるものとする、その数は10,000人に達する。注意すべきは9割は放射線以外の爆風や熱線による死者である。原爆の火の玉が大膨張した直後に、死の灰、水蒸気、煤などの塵埃等を含んだ怒濤の風が、真空状態の中心にむけ一気に吹き寄せ、キノコ雲としなして天空に突きあげ、上空で冷却されて、たちまち黒い集中豪雨となって降り注いだ。これは高線量率の放射線として被害を増強した。

2012年9月17日の日経新聞記事は、原爆投下当日から2週間以内に半径2 km 以内に入市した男女47,144人のうち、1970~2009年の間の固形癌による死亡者数を伝えている。3日以内の入市者は計4,830人で、8割を占めた。残りは4~14日に遅れて入市した人達で、計1,309人であった。原爆のエネルギーの放射線15%のうち5%は瞬時に放射され、残りの10%は死の灰のような残留性のものとされる。上記のことから、残留性の放射能とはいえ、爆発直後は黒い雨を初め、極めて高い線量率の放射能があったことが分かる。

3) チェルノブイリの事故

ここでは制御ミスにより急激な温度上昇（核暴走、福島では無し）を起こし、炉心が溶融し、冷却水中に落下し、水蒸気爆発した。水蒸気爆発は水が熱せられて水蒸気になるとき、体積が膨張する現象で、常温では約1,700倍に増加する。これは液体が気体へ相転移する物理的な現象である（福島では無し）。核暴走に続いて、高温の金属と水が反応し（化学反応）、酸素と水素に分解され、水素爆発も起った（これは福島も同じ）。こうして核燃料を含め、原子炉を吹き飛ばした（福島では無し）。さらに制御棒に黒鉛を利用したので、これが火災をおこし、広範な放射能飛散の元凶となった（福島では無し）。TNT火薬1万5千トンの広島原爆の400倍の放射性物質を飛散させたといわれる（福島はその1/10）。

134人の緊急作業員は4か月以内に28人が放射線の影響で死亡した。さらに25年以内に22人が種々の原因で死亡した。彼らは建家内への進入を命ぜられた、いわば人災である。広島の400倍の汚染とはいえ、爆風や熱線による死を伴わなかったので、犠牲者はもっぱら放射

線障害に限られる。チェルノブイリフォーラムによる事故の20年後の総括は「白血病あるいは（甲状腺癌以外の）固形癌が増加したという明確な証拠はない」^[5]。癌以外では「公衆への最大のインパクトは心理的な影響である」。唯一、甲状腺癌が問題となる。しかし、甲状腺癌は悪性なものは希で、長い間大きくならないから、結節や病巣が見つかったも、1 cm 以下なら経過観察でよい。事故に係わる小児甲状腺癌患者6,848人で、死者は15名という。日本人の1/2が癌にかかり、1/3が死ぬことを考えると、いかに「良性」かが分かる。しかも小児甲状腺癌が増えたのは、旧ソ連が事故の存在を認めずに隠蔽したため、放射性ヨウ素で汚染した牛乳を飲み続けたことが、主因である。ヨード不足の内陸部ではヨードは効率よく甲状腺に集まり、被害を増強した。福島では甲状腺癌の増加は考えられない。

皮肉なことに、ヨード-131が甲状腺癌の治療に用いられる。その際には、100万 Bqの1,000倍のヨード-131が投与される。これは全身で100~200 mSvの被曝になる。

4) 福島の事故

中程度の規模の原電は100万キロワットの発電を行う。あの壮大な黒部ダム発電量は34万キロワット程度なので、原電1基が黒部ダム3基に相当する。これが原子力発電の圧倒的な力である。福島では事故により燃料棒の冷却に失敗した。加熱した燃料棒で水が加水分解され、水素が発生し、水素爆発を起こした。3月11~14日は西風により大部分の放射能が太平洋上に流された^[6]。これは極めて幸運なことであった。福島その他が汚染されたのは、風向きが変わった3月15日以降と考えられる。実際には3月15~16日の降雨、降雪が汚染の元凶と考えられる^[7]。福島ではチェルノブイリの1割の汚染とすると、癌の増加を検出するのは困難である。強調すべきは福島では放射線による死者はない。

4. 線量率が低いと生物への影響は桁違いに低くなる、あるいは量は質を変える

広島では百万分の1秒程度の短時間に大量の放射線が放出された。黒い雨は高い線量率を示した。高線量率による大量の放射線で死者が多くなった。その400倍の汚染を起こしたチェルノブイリでは、広範な汚染であり、線量率が低かったため、死者は少なかった。40倍の広島では死者はなかった。どんな毒物でも微量ずつ摂れば死なないが、まとめて飲むと死ぬ。酒の一気に飲みは中毒死につながるが、適度な晩酌は百薬の長となる。空中の炭酸ガス濃度は0.03%程度であり、我々の呼気中の炭酸ガスは3%程度であるが、30%の炭酸ガスを吸うとほぼ即死する。一部の屠畜場ではこれを利用して、ブタを安楽死させている。せせらぎの川の流れは美しい。一気に濁流は凶暴である。毒になるか否かは量と量率による。放射線の影響も最終的に生体を構成する物質の変化に帰着するので、化学物質による一般毒性と同様に閾値があるとするのが妥当である。放射線による発癌は、広島、長崎のデータを元にしては、これは瞬時の被曝である。同じ線量をゆっくり被曝した場合、発癌率はずっと少なく

なる。50以上の実験データを解析すると、同じ線量でも線量率が低いと10~100倍、発癌率が下がる^[8]。国際防衛委は安全サイドに立ち、2という値を採用している。これは高線量率で照射したときの発癌率を低線量率で実現するには、その2倍の線量を要することを意味する。実験データはその10~100倍の線量を要するという。

5. 低線量率の放射線に対し、我々は十分に対処するだけの機構を備えている

1) 放射線で生じるフリーラジカルに対する生体の防御：ラジカルスカベンジャー

放射線は直接的に生体分子を損傷するよりは、電子を蹴飛ばしてラジカルを作るのが主体で、特に水から水酸化ラジカルのような活性酸素を作って作用する。呼吸や代謝により1日に細胞あたり10億個の活性酸素が作られるので、我々は活性酸素の処理システムがなければ生きてゆけない。何種類ものスーパーオキシドデスムターゼという酵素や、グルタチオン、ビタミンA、C、E、尿酸などの低分子を利用し、活性酸素を消す。βカロテン、ポリフェノール、フラボノイド、カテキン類も有効である。チェルノブイリの森で強い放射線の地表を、元気に這い回るネズミのDNAに損傷は見当たらなかった。DNAの修復系も亢進していなかった。高かったのはラジカルスカベンジャーの濃度であった^[9]。DNAが損傷される前に原因物質を消去するのであるから、最も効果的、かつ、安全な防御法である。

2) 大部分のDNAの損傷は修復系が直す

活性酸素は通常、細胞あたり1日に10億個作られ、数十万個のDNA損傷をうける。ほとんどは効率良く修復される。癌の発生を5%上げるという1 SvでDNA損傷数は2,000個、1 mSvでは2個にすぎない^[10]。通常の生活に由来する損傷に比べ、圧倒的に少ない。これが核実験による地球汚染や、原電の事故による発がん率が低いことの主たる理由であり、他の理由は線量率が低いことである。我々は日常、放射線によるDNA損傷よりも遥かに多くの損傷を効率よく修復し、ゲノムを保全、維持、管理している。

3) 損傷の激しい細胞は自殺系で処理される

DNAが直接切断されたり、未処理の活性酸素でDNAに傷がつくと、細胞はすぐに修復する。傷が多いと、分裂細胞であれば分裂を休止し、長い時間をかけて修復を試みる。それでも修復できないとき、ゲノムの守護神とも呼ばれる遺伝子等が働き、細胞を自殺に導く。このアポトーシスと呼ばれる細胞の自殺現象は、正常な個体発生や、成体を正常に保つ上で必須である。例えば、我々は発生初期の胎児のとき、尾があり、手足には水掻きがあるが、アポトーシスの結果、出生時には消える。アポトーシスという機構は、巧妙な生体の防御機構である。むろん、放射線に対しても有効に働く。

4) 死んだ細胞を補充する再生系

アポトーシスあるいは他の原因、例えば放射線で細胞が死ぬと、幹細胞あるいは類似の細胞が分裂して、補償する系がある。男性は放射線照射により一時的な不妊となることがあるが、やがて幹細胞から精子形成系が再生され、生殖が可能となる。また、肝臓を半分程度切除すると、1週間ほどで元の大きさに戻る（再生肝）。皮膚では絶えず垢となって細胞が剥落してゆく。腸管では消化とともに上皮細胞が脱落してゆく。剥落・脱落した分は再生系が補充する。骨髄での造血系も同様である。全ての細胞が再性能を有するわけではないが、一般に、若く未分化な細胞ほど、再生し易い。放射線で細胞が死んでも、一部の組織では再生が可能である。

5) 生体を監視する免疫系

日本は高齢化社会になり、半数が癌に罹患し、1/3が癌で死ぬ。老化とともに免疫系が衰えることに起因している。免疫系で重要な働きをする胸腺は、成長するにつれ萎縮してゆく。フランス料理のリードボーは仔牛の胸腺で作る。成長すると胸腺が萎縮してしまうので、材料は仔牛からしか取れない。業界用語で「のどしびれ」という。しびれとは英語のsweetbread由来らしい。現在、癌に対する抗体医薬品が盛んに研究され、使用されているが、若く元気な時には、自前の抗体を作り、自前の癌特攻リンパ細胞が活躍し、癌細胞の跳梁を抑制している。

子供は分裂細胞が多いから、放射線に感度が高いといわれが、活性酸素を消去する活性も強い。修復系や免疫系の活性も高い。細胞の再生能力も高い。体を再構築しつつ成長する。半減期30年のセシウム-137の半減期は成人で100日程度、子供は年齢にもよるが、10日～1ヶ月程度である。よって子供の方が放射線に強く、再生力や免疫力の衰えた老人の方が弱いという考えも成り立つ。発癌には10年、20年を要し、老人はこの間に寿命となる。

6. 放射線による確定的影響と確率的影響

1) 放射線による確定的影響

放射線の影響は高線量による確定的影響と低線量による確率的影響に大別される。確定的影響は実効線量10 Svを「急激に（高い線量率）」浴びればヒトは確実に死に、1 Svであれば吐き気や嘔吐を催し、0.25 Svであれば白血球の減少がおこる。それ以下では明確な異常は観察できない。よって、0.25 Svが閾値となる。高線量を「急激に」浴びれば害がでる。高線量の害は議論の余地はなく、これは正当に恐れる必要がある。

2) 放射線による遺伝的影響は無視できる

より低い用量では確実な影響は見られず、確率的影響が問題となる。生殖細胞経由の遺伝的影響と体細胞の変異による癌とが対象となる。遺伝的影響に関しては広島・長崎での被爆

者の子孫につき何万人も調べ、性比、染色体異常、生化学的タンパク質調査、死亡率調査、臨床健康調査等で、対照群に比べ何ら異常が検出されていない。さらに測定数を増やせば有意差が出てくる可能性は無いとは断定できないが、数を増やしても差は出てこないだろうというのが、専門家の見方である。実際問題として、遺伝的影響は無視してよい。

3) 放射線による確率的影響：癌の誘発

確率的影響では体細胞の異常、すなわち発癌が問題になる。広島・長崎での調査で、急激な放射線をあびると、0.2 Sv までは固形癌が誘発されることが判明している。これについては議論の余地はない。問題は0.2 Sv 以下で線量に比例して癌が誘発されるのか否かである。答え：0.2 Sv が閾値なら癌は増えない。閾値がなくても対照群と区別がつかず、検出できない程にしか誘発されない。

閾値なしモデルではどんなに微量でも癌が起こるとする。国際防御委は癌死のリスクを1 Sv 当り0.05と見積もっている(100人あたり5人)。一般人の通常の線量限度は1 mSv なので、10万人あたり5人が癌死する計算になる(閾値なしモデルに基づくので、本当は0かもしれない)。生涯では日本人の1/2が癌にかかり、1/3が癌で死ぬので、10万人あたり3万人が癌で死ぬ。3万人中の5人を、あなたは1 mSv の放射線を浴びて癌になりましたとは同定できない。ともかく、閾値なしモデルに従えば、日本人は診断用に平均3.87 mSv のX線を被曝するので^[11]、人口1億2,700万人では約24,575人が癌で死ぬ。日本人は年間27万人が癌で死ぬので、その1割近くが診断用X線により死ぬと計算される。日本は世界一の検診国で、寿命もほぼ世界一である。国際防御委はこのモデルを大集団に対する集団実効線量として、癌のリスク予測に利用するのは不適である、と述べている。自己矛盾しており、閾値なしモデルは誤りであると告白しているようだ。

7. 生体反応に閾値が存在する理由、あるいは非線形システムの生体

1) 生物の進化とともにあった放射線、活性酸素への対処は十分にできる

生物は異物、活性酸素、熱、低酸素、紫外線、放射線などのストレスに対し、ストレス応答系を発達させて来た。酸素を吸えば活性酸素が生じる。地球上に生まれれば放射線を避けて通れない。放射線の一部はラジカルを形成させたり、生体分子を切断したりするが、多くは活性酸素をとおして2次的に作用する。我々は進化の過程で、活性酸素の処理法を獲得した。通常レベルの放射線による活性酸素の発生は、呼吸に比べ圧倒的に少なく、消去される。放射線の影響の大部分を消去しようところに、閾値が生じる理由がある。

2) 細胞内に多数ある同じ種類のタンパク質、酵素

放射線の一部は生体成分を直接的に傷害する。このとき、機能を失った分子、タンパク質

や酵素が生じたとする。しかし、細胞内には多数の同一の分子があるので（少なくとも数百はあるだろう）、無慮、半数以上の分子が正常であれば、役割が遂行でき、影響は現れない。照射されても影響がでるまでに余裕があるところに、閾値が生じる理由がある。

3) タンパク質の修理屋シャペロン、異常タンパク質分解系

生体を構成し、運営する主要構成成分はタンパク質・酵素である。ゲノム上の情報とは、ほぼタンパク質・酵素を構成するアミノ酸の配列情報である。放射線、熱、その他の影響でタンパク質が変形すると、シャペロンと呼ばれる修理タンパク質が働き、正常な元の形態に戻す。放射線の影響を修理してしまうところに、閾値が生じる理由がある。さらに、修理できない時、ダメという烙印を押し、ダメ印がつくとタンパク質分解系が分解する。異常タンパク質・酵素を分解してしまうところに、閾値が生じる第2の理由がある。修正・処理の限度を超すと細胞は死ぬが、死んだ細胞は貪食細胞系がきれいに食べる。その後、失せた細胞を再生系が補うことがある。この時、閾値が生じる第3の理由ができる。

4) 何度でも使える酵素

化学反応では水素2個 (2H_2) と酸素1個 (O_2) が反応して2分子の水 ($2\text{H}_2\text{O}$) になれば、それで終わりである。一方、生体ではカタラーゼは過酸化水素 ($2\text{H}_2\text{O}_2$) を水 ($2\text{H}_2\text{O}$) と酸素 (O_2) に分解する。このとき毎秒4,000万回も稼働する。だから、1日に細胞あたり10億個の H_2O_2 が生じても、1分も経ないで1個の酵素で処理できる計算になる。全ての活性酸素が H_2O_2 ではないが、 H_2O_2 に変換する反応がある。しかし、 H_2O_2 の生じる場所に必ずカタラーゼが控えているとは限らないので、その分は割り引いて考える必要がある。日本薬局方のオキシドールには H_2O_2 が3%含まれており、傷口にぬると、瞬時に酸素の白い泡がでるので、酵素活性が強いと納得できる。生体反応の主役である酵素は、このように何回でも繰り返し使えるところに特長がある。しかも、細胞内には多数あり、変形しても修理できる。線形モデルでは一度使えば終わり、修理もしない。

5) 生体反応のシグモイド曲線 (S字曲線)

赤血球は酸素を運ぶヘモグロビンの袋詰めである。ヘモグロビン1個で4つの酸素を運べる。ヘモグロビンと酸素と結合は酸素分圧で決まり、分圧が高いと飽和し(酸素4個が結合)、低いと酸素を解離する。飽和度を縦軸に、酸素分圧を横軸にとると、シグモイド曲線といい、S字型の曲線となる。だから、酸素の多い肺では酸素を結合し、酸素の少ない末端組織では酸素を解離する。その背景にあるのは酸素との結合により、ヘモグロビン分子の形状が変化するという「アロステリック効果」である。ヘモグロビンのみならず、酵素類、遺伝子の制御因子等にも、形状を変化させて活性を上げ、情報伝達のスイッチをオン・オフする例が、多々見られる。神経の興奮伝導も閾値を超えると1、それ以下は0である(悉無律)。生体系は

線形モデルでなく、閾値や飽和を取り入れたシステムである。

6) 生体反応における同調的増幅系

赤血球の90%以上を占めるヘモグロビンは1対=2個の遺伝子に由来し、多数の mRNA に転写され、1つの mRNA から多数のタンパク質分子が増幅される。筋肉なども同様に大増幅される。少しのストレスがくれば、多数の関連遺伝子が同調的に、秩序だって連鎖反動的（カスケード）に増幅される。活性酸素（≒放射線）に対しても、応答系が働く。

7) 一般毒性における閾値

青酸カリ（シアン化カリウム）は猛毒である。シアンがヘモグロビンに強固に結合し、酸素の結合を阻止する。それで、呼吸をしても酸素が運べないから、全細胞が窒息死する。シアン化ヘモグロビン自体が毒作用を示すわけではないから、細胞が窒息しない濃度であれば、害がない。それで最小中毒量（TDL₀）が設定できる。TDL₀は毒性の閾値といえる。一酸化炭素もヘモグロビンに強固に結合する同様な毒物である。タンパク質や酵素が変化して機能が損なわれても、その影響が現れるまでには一定の蓄積が必要である。生体系の基本は酵素反応である。酵素阻害剤が阻害作用を発揮するには、基質に対し一定の割合を占める必要がある。これは医薬品でも同じで、用量が少ないと何の効果も期待できない。多すぎると毒性がでる。一定の濃度範囲でのみ、薬効を表す。このように物質レベルでは閾値が設定できる。放射線の影響は最終的に生体の物質に還元されるので、閾値が生じる。

8) 生体のフィードバック制御機構

チベットの首都ラサは富士山頂の高度で、普通に歩くものならフーハードキドキと苦しい。体を動かすと酸素が余分に必要となる。酸素が希薄だと必要量が供給するため、心拍数を増し、血流量を多くする。平地でも早く走れば経験できる。平地と違い、高地では1週間もすれば赤血球が増える。この環境と対話して順応するのが、生体系の特長である。2つある腎臓の片方を摘出すると、他方の腎が機能肥大して、2倍の機能を営む。暑いと汗腺を開き、気化熱で体を冷やす。寒いと汗腺を閉じ、神経系やホルモンを動員して発熱させる。体温、呼吸数、心拍数、体液の pH 等、体の「恒常性」を一定に保つためのフィードバック制御系こそが、生命系の真骨頂である。多すぎれば少なく、少なければ多くする。

9) 細胞に2分子しかない DNA 分子に基づく発癌と閾値なしモデル

放射線が生体成分の低分子やタンパク質・酵素に傷害を与えても、あるレベルまでは害がなく、閾値が設定できる。しかし、細胞内に父由来、母由来の合計2分子しかない DNA の場合、代替えが難しいのではないか。大事な分子であるからこそ、幾重にも修復系が用意されており、放射線による損傷の大部分は修復できる。タンパク質・酵素をコードする領域はゲノム

の2%以下なので、うまく修復できずに変異が残っても、タンパク質・酵素に影響を及ぼすケースはむしろ希である。

8. 癌について

1) 癌発生の3段階説

発癌機構としてイニシエーション、プロモーション、プログレッションという段階をへるという3段階説が有名である。イニシエーターはゲノムDNAに傷をつける最初の段階で、放射線は主にこの段階で作用する。プロモーターはDNAを障害する因子ではないが、細胞分裂を促し、発癌に深く係わる。食塩は癌のプロモーターである。電気冷蔵庫が普及していなかった頃、塩漬けによる食品の保存が図られた。当時、胃癌が多かったのは塩辛い食べ物に起因すると考えられる。ヘリコバクター・ピロリ菌は毒素を生産し、胃壁細胞を障害し、胃癌のプロモーターとなる。胃癌は現在、減少あるいは横ばいの傾向にある。

プログレッションの段階で、悪性化した癌細胞が選択されて、ここでは単に無限増殖だけでなく、転移し、浸潤し、正常組織を食い破ってゆく。この段階はゲノムの不安定性に基づく変異、欠失、増幅、組換えなどを持つ多種多様な癌細胞の中から、増殖に至適な癌細胞が「進化的」に選択されてくるようだ。プログレッションの段階まで何十年を要する。この段階は初期のDNAの損傷を主体とする閾値なしモデルと関連が少ないと考えられる。

2) 癌の原因は種々ある

癌の原因には、外部因子と内部因子が考えられる。外部因子としては喫煙が有名で、その他、栄養、肥満、運動不足、化学物質、細菌やウイルス（B型肝炎、C型肝炎、ヒトパピローマウイルス、エイズウイルス、ピロリ菌）などがあり、ここに放射線が加わる。内部因子としては、遺伝、遺伝子変異、テロメアの長さ、ホルモン、免疫機構などが上げられる。被曝後、癌の発生に長い期間を要するのは、上述の内部、外部の多数の要因が主として関与しているからである。放射線はDNAに傷をつけることで、主に初期段階で寄与する。

3) DNAの損傷が必ずしも発癌に結びつかない

医薬品等の開発には変異原性試験が必須であるが、「非変異原性である発癌剤」や、「変異原性を示す非発癌剤」が見いだされている。さらに、植物のフラボノイドであるケルセチンのように「変異原性を示す抗癌剤」もある。閾値なしモデルの反証となる。

4) 癌遺伝子と癌抑制遺伝子

受精卵から出発して成体になるまで、細胞分裂を繰り返す必要がある。このためには成長因子、その受容体、遺伝子発現を制御する転写因子、シグナル伝達因子など、様々な遺伝子

が動員され、必要な時に必要なだけ、遺伝子が発現される。こうした正常で必須な遺伝子が変異をうけ、制御を逸脱したとき、細胞分裂の暴走がおこり、癌化する。この変異した遺伝子を癌遺伝子とよび、数十個が知られている。もとの正常な遺伝子は癌原遺伝子とよばれる。癌原遺伝子が23,000あるヒトの遺伝子の1%とすれば、ランダムに遺伝子が損傷されるとき、これに的中する確率は低い。発癌に係わる遺伝子は全遺伝子のごく一部すぎないことが、遺伝子の傷害が直ちに発癌に結びつかない理由の一つであろう。

5) 体細胞の一部しか癌になれない

人体は60兆個の細胞からできている。絶えず酸素、化学物質、放射線などに暴露されると、突然変異が誘起される。しかし、赤血球のような核のない細胞ではDNAに傷の付けようがなく、白血病はあっても、赤血病はない。腸や皮膚の分化した上皮細胞は、順次脱落してゆく運命にある。これらの細胞では癌遺伝子が活性化されても直ぐに死ぬので、癌細胞にはなれない。癌細胞になれるのは組織の基底にある幹細胞や、それに相当する再生能のある細胞である。こう考えてみると、肝や肺のように癌にかかり易い臓器と、心臓のように癌にかかりにくい臓器があることに納得がいく。筋肉は細胞が融合した巨大な塊で、細胞は独立していないし、ある種ホルモンが癌細胞の浸潤を防いでいる。

6) 癌とエピジェネティクス

エピジェネティクスとって、遺伝子の配列には変化がないが、DNAの一部のメチル化や、ヒストンというDNAと結合しているタンパク質の化学的修飾により、遺伝子発現が制御されていることが分かってきた。現在、発癌との関連が勢力的に研究されており、関連が解明されつつある。遺伝子の変化が蓄積して癌化するという考えは古い。放射線を浴びてから数十年後にエピジェネティックな変化を起こすとは考えにくい。遺伝子の変異に主体をおく閾値なしモデルも、新しい発癌機構をもとに検証し直す必要がある。

9. 現実を説明できないとき、その理論なりモデルは誤っている

1) 放射線は皮膚という防御壁で守られる

福島では内部被曝は問題にならない。外部被曝のうちβ線は皮膚という城壁を超えない。傷害を受けた皮膚は垢となって落剥する。γ線は本来、電離能が小さく、強い透過力で体を素通りすれば、無害である。放射線の一部しか害を及ぼすことができないところに、閾値が生じる理由がある。

2) 骨の髄からの放射線

我々はカリウム-40から毎秒3,000~4,000個の放射線を浴びている。カリウム-40がゼロの食品を捜すのは難しい。その他、炭素などを含め、7,000 Bq位の放射線を内部から浴びてい

る。こうして日本人は毎年、食品0.4 mSv、宇宙線から0.3 mSv 大地から0.4 mSv、空中のラドンから0.4 mSv、合計1.5 mSv を被曝している。我々の体はこれらに対処できる。

3) 自然放射能の強い地域

自然放射能の世界の平均は2.5 mSv とされ、日本の倍近い。発癌率が海外で日本の倍というデータはない。中国、イラン、インド、ブラジルにはこの数倍あるいはそれ以上の自然放射線を浴びて暮らしている人々がいる。しかし、癌の発生率や健康障害は対照群に比較して差はない。かえって長生きというデータもある。鳥取県の三朝温泉でラドン量が他に比べ数倍多いが、特に健康被害は無い。放射線が10倍増えた程度では、十分に対処できるということだろう。閾値なしモデルでは説明し難いデータである。

4) 地球はもっともっと汚染されていた

1945-1980年の543回の核爆発で、地球は大いに汚染された。放射性セシウムによる日本の国土の汚染は通常0.02~0.2 Bq/m²であるが、当時200~2,000 Bqであったから、1000~100,000倍汚染されていた計算になる。これは核実験が禁止されるまで10年位続いた。これにより、発癌率が上昇し、その10年後に減衰したというデータはない。汚染が広範囲に及び、線量が少なく、かつ線量率が低いからである。

5) 医療被曝

胃や胸のX線検診、CT スキャンを受け、日本人は平均して3.87 mSv の医療被曝をうけている。既述のように、閾値なしモデルによる単純計算では、25,000人が癌で死ぬことになる。前述したように、国際防衛委はこれに閾値なしモデルを適用するのは不適としている。閾値なしモデルを自己否定しているようにみえる。

6) 原爆による被害とチェルノブイリ・福島事故による被害の差

広島原爆に比べ、その400倍の規模で汚染されたチェルノブイリ事故では、放射線による死者数は極端に少ない。福島に至ってはゼロである。これも閾値なしモデルでは説明し難い。原爆では爆風、熱線による死が主体で、放射線による死者は一部にすぎないこと、市街地での局所的集中被曝であること、瞬時の被曝であることがあげられる。原電の事故では、爆風、熱線がなく、汚染が広範囲で、低線量で、長時間をかけた低線量率の被曝である。これが決定的な理由と思われる。長い時間をかける間に、修復系が効率よく働く。

7) ホルミシス効果

微量の放射線をかけておくと、刺激効果（ホルミシス効果）や後から強めの放射線をかけても抵抗性を示すという現象がある。ある種の薬物を反復して飲むと、薬物代謝酵素が誘導

され、より多く飲まないと効かなくなる現象を彷彿とさせる。疫学的にも実験的にも、ホルミシス効果の存在を示すデータが多数ある。基本的には低線量放射線に対する生体の防御機構の現れであろう。ホルミシス効果は閾値の存在を示している可能性が高い。実験データがある分、仮説である閾値なし「モデル」より実証性があり、信頼がおける。

8) 宇宙飛行士

宇宙空間では1日に1 mSv被曝するという。宇宙船に100日滞在すれば100 mSvとなる。古川聡飛行士は167 mSv、野口聡一飛行士は163 mSvを浴びたことになる。飛行機で高いところを飛ぶと、やはり、地上よりは高い放射線を浴びる。しかし、宇宙飛行士やパイロットが癌になり易いというデータはない。月に人類最初の一步を踏んだアームストロング船長は長いこと、パイロットとして空飛ぶ人生を送った。2012年の7月に82歳で亡くなったが、死因は心臓のバイパス手術の合併症であった^[12]。

10. おわりに

1958年、国連科学委員会はどんなに微量な放射線でも人類に遺伝的影響、ことにより体細胞に障害（癌のこと）を及ぼす可能性があるとして決議した。しかし、データが少ないから、詳細は今後の研究に託そうとした。放射線防御委はこれを閾値なしモデルとして受け継ぎ、半世紀を経た今も、この考えを墨守している。放射線による確率的影響のうち遺伝的影響は無視できるので、実際には発癌が問題となる。発癌機構が分子レベルで解明されつつあり、単なるDNAの損傷だけで癌は説明できない。閾値なしモデルは物理的な線形モデルに基礎をおく。生体特有のラジカル消去系、修復系、アポトーシス、再生系、免疫系、発癌機構などの新しい知見を取り入れ、「どんなに微量でも害がある」という人心を惑わし続ける、殺人補助的閾値なしモデルは見直す必要がある。フランス医学アカデミーは生体の修復機構、免疫監視体制、ホルミシス効果などを検討し、閾値なしモデルは誤りで、閾値は存在するといっている^[13]。

勧告は放射線防御のための基本原理として、正当化、最適化、線量制限の適用をあげている。防御の最適化の原則は、被曝の可能性、被曝するヒトの数、個人の線量の大きさにつき、社会的、経済的要因を考慮して、できる限り低く抑えるべしという。今春の食品・飲料の汚染基準大幅引き下げは、そもそも害のない値をさらに厳しくすることで、不安をつのらせ、利よりも害を大きくしている。読売新聞2012年4月23日夕刊から、日本の放射線基準がいかに厳しいかを引用する。値は食品1 kgあたりのBq数である。食品一般100 (EU:1,250; 米国:1,200)、乳児用食品50 (EU:400; 米国:1,200)、牛乳・飲料水50 (EU:1,000; 米国:1,200)。欧米に比べ、1桁以上厳しい。放射線は危険だというメッセージになる。欧米基準で問題はない。汚染飲食物の摂取と内部被曝の実効線量について、前回、図示したので、要すれば参

照されたい^[1]。例えば、1,000 Bq/kg で汚染されたステーキを毎日200g ずつ1年間摂取すると1 mSv となり、やっと一般人の許容線量に達する。

放射線は農業分野ではジャガイモ発芽防止、野菜や果実など品種改良、成熟制御などに利用されている。工業的には強化プラスチックの作製、流速・流量の調節、非破壊検査、溶接検査、厚みの測定などに利用されている。身近なところでは煙感知器や時計の文字盤が上げられる。生物関連ではよくトレーサー実験に使用される。医学・薬学関係では、癌の治療、CT スキャン、X 検査、PET 検査など、特に癌の検診、治療には不可欠である。PET 検査では癌組織によく集まる放射性化合物を合成し、患者に投与し、癌の位置や大きさなどを知ることができる。その合成には薬剤師が係わる。甲状腺癌の治療にヨード-131を用いる。1977年に打ち上げられたボイジャー1号、2号機は、種々の観測をしつつ、現在、約180億 km の彼方において、2012年末には太陽圏から脱出する。光のほとんどない遠方の星間空間から原子力電池を用いてデータを送ってくる。夢のある話である。このように放射線や原子力は、発電のみならず、多方面で利用されている。放射線を恐れるあまり、学生達が原子物理学や放射線学などへの興味を失い、学問領域が衰退することを恐れる。人材、知識、技術が継承されなければ、廃炉処理にしても頓挫することになる。畑村は如何なる技術も確立までに200年を要するという^[14]。数十年の原発はまだ未熟だ。

概してマスコミの報道・論調は放射線の危険性をあおり、安全であるとする論調は少ない。そう論じると、御用学者とか、政府の回し者と名指しされかねない。そこで、成書^[15]からOxford大学のアリソン名誉教授の主張を引用しておく。

- ① 福島の悲劇は放射線自身の危険性でなく、放射線に対する恐怖にある。
- ② 現在の基準はあまりにも低く設定されている：国際防衛委の基準は誤りである。
- ③ この誤った基準で土の除染をすれば100兆円の税金を無駄に使う。

人によりDNAの配列は数百塩基に1個程度の割合で異なる。放射線で変異が起こるのは数十万、百万に1個程度だから、福島県民200万人の全ゲノム配列を決定しても、変異は同定できないだろう。安全、安心にはコストがかかる。逼迫した予算は有益に使うべきだ。

文献

- [1] 須藤鎮世他、一時帰宅者に対する放射能スクリーニングのボランティア活動と一部汚染地域の実態調査、就実論叢、41巻、221-237頁、2011。
- [2] Shizuyo Sutou. Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant disaster: generally applicable implications from measurements of radioactive contaminations in some areas of Ibaraki and Fukushima. Genes Environ. 2013 (in press) .
- [3] 須藤鎮世、警戒区域への一時帰宅者に対する放射線モニタリングおよび一部汚染地

域の実態調査、日本環境変異原学会平成24年度公開シンポジウム、「放射線のリスクを科学的に考える」、2011年5月26日。(http://www.j-ems.org/ray/symposium/new/5_sutou/Player.html)

- [4] 日本アイソトープ協会、ICRP Publ.103 国際放射線防護委員会の2007年勧告、丸善、2009。
- [5] チェルノブイリフォーラム：2003-2005、チェルノブイリの経験：健康・環境・社会経済的影響、第2改訂版、2006。(http://nuqwatch.files.wordpress.com/2011/07/chernobylforuminjapanesever1-2.pdf)
- [6] Brumfiel G. Fallout forensics hike radiation toll. *Nature*. 2011; 478: 435-6.
- [7] Kinoshita N et al. Assessment of individual radionuclide distributions from the Fukushima nuclear accident covering central-east Japan. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2011; 108: 19526-9.
- [8] Tanooka H. Meta-analysis of non-tumour doses for radiation-induced cancer on the basis of dose-rate. *Int J Radiat Biol*. 2011; 87: 645-52.
- [9] NHK、チェルノブイリ事故25年、「被曝の森はいま」、2011年7月5日放映。
- [10] 中村仁信、放射線と発癌～福島原発放射能漏れを考える～、癌と人、別冊、大阪癌研究会、pp.1-5、2011。
- [11] 原子力安全研究協会、新版・生活環境放射線（国民線量の算定）、2011。
- [12] Launius RD. Neil Armstrong. *Nature*. 2012; 489: 368.
- [13] Aurengo A et al. Dose-effect relationships and estimation of the carcinogenic effects of low doses of ionizing radiation. 2005. http://www.radschihealth.org/rsh/Papers/FrenchAcadsFinal07_04_05.pdf
- [14] 畑村洋太郎、未曾有と想定外 東日本大震災に学ぶ、講談社新書、2011。
- [15] 杉本正信、ヒトは120歳まで生きられる—寿命の分子生物学、ちくま書房、2012。