

## 環境放射能・放射線と粒子放射線の生物影響及び線量率効果に関する研究

吉川 勲, 高辻俊宏, 中沢由華, 藤安得博, 松瀬美智子, 中村成孝, 高柳浩紀, 森下佳奈, 山元健輔, 船元洋子, 石井保裕, 伊地知豊美, 河野公彦, 越竹真弓, 山本健太, 佐々野寛子, 柿本知香, 赤松さくら, 佛坂さおり, 古賀健作, 早瀬利博, 柿菌裕介, 田浦慎太郎

放射能を大村湾海底堆積物, 雨水, 陸上の土壌について測定し, はっきりとした分布傾向を得た。放射能の分布は, 大気からの降下, 海底への土砂の堆積, 海底から海水への溶出などが関係しており, 大気の流れ, 降雨, 湾への土砂の流入と堆積, 海底の酸化還元状態等に影響されていると推測される。粒子放射線の生物影響は, 放射線の生物効果の理論的検討に重要なデータである。ショウジョウバエ幼虫と発芽タマネギ種子の根端細胞への粒子放射線照射を行い, 実験的に検討するとともに, damage-interaction の考えに基づく理論的検討を行った。

### 成 果

#### 1. 環境放射能

Cs-137 は核実験由来の人工放射性物質であるが, 今や地球表面全体に分布しており, 明確な人的要因としてその挙動が注目されている。一方, Pb-210 は, 天然放射性物質であって, 天然ウランから発生したラドンの崩壊によってもたらされるが, 自然放射線による被ばくの大要因であり, 重要である。いずれも大気中の微粒子に付着し, 降雨などによって地上に降り注ぐため, その分布が類似している (図 1)。大村湾の海底堆積物中の Pb-210 濃度は表層で最も大きく, 下層に行くに従い減少し, その減少は指数関数に従う傾向を示す。これは, 土砂に混入したあと, 半減期 22.3 年で崩壊減少することが主要因であると思われる。これによって推定される土砂の年間堆積量は湾中央部では小さく, 沿岸部では大きい。また, Pb-210 と Cs-137 の放射能濃度は共に, 湾中

央部では土砂の堆積量が多いほど薄くなり, 堆積量全体としてはほぼ同じと見積もられるため, 堆積土砂によって希釈されていることが示唆される。一方, 沿岸部の, 堆積量がさらに多いところでは, いずれの核種も, 堆積量が多いほど高濃度である。陸上の表層土では, 両放射能は海底より高濃度であるので, 土砂が大量に流れ込む沿岸では濃度が高くなるとも考えられるが, 海底が還元状態であると溶出しやすく, 酸化状態では溶出しにくいようなので, 湾中央部と沿岸部での酸化還元状態の差が主要因である可能性もある。堆積物中の銅, 鉛, 亜鉛の安定元素の濃度は, Pb-210, Cs-137 と同様に, 海底において地表よりも低濃度であり, 沿岸部で高濃度である。また, これらは減衰しないにもかかわらず, 海底において, 表層のほうが高濃度である。このことは, これら安定元素に加えて, Pb-210 と Cs-137 も, 海水への溶出, 酸化還元状態の影響が考慮されなければならないことを示している。したがって, Pb-210, Cs-137, 安定銅,

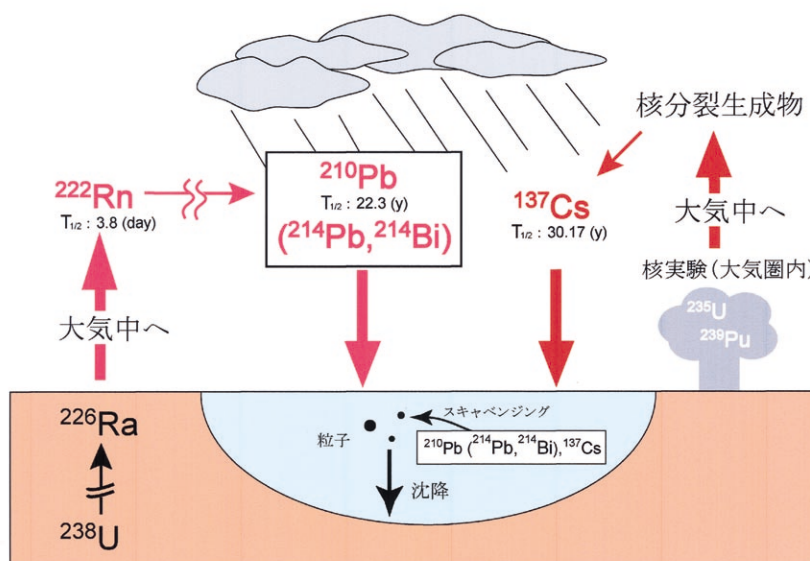


図 1. 放射性核種の海底への堆積

鉛、亜鉛いずれについても、濃度分布が明確な傾向をもっているにもかかわらず、その原因を特定するには、別の要因の検討が必要である。

## 2. 粒子放射線の生物影響

自然放射線による被ばくでは、ラドンなどからのアルファ線被ばくが影響の約50%を占めていると考えられている。また、核燃料の連鎖反応を伴うような放射線事故においては、中性子の影響が非常に大きい。したがって、粒子放射線の生物影響の知識は、理論的検討に重要なだけでなく、直接的にもきわめて重要である。そこで、放射線医学総合研究所のがん治療用加速器において主として夜間休日に行われている共同利用実験に参加し、粒子放射線の生物照射実験を行った。

ショウジョウバエ突然変異検出系においては、ハネの毛の突然変異の発生は、強いLET依存性を示した。高LETの粒子放射線では、放射線損傷が細胞核の内部の粒子の通ったごく狭い空間に高密度に生じ、そのことによって、多くの突然変異が発生すると考えられる。一方、眼色の突然変異の発生頻度は、LET依存性がほとんどないので、ほぼ放射線の吸収線量のみ、つまり損傷の数そのものだけで決まるようであった。低線量高LET放射線においては、細胞核を通過する荷電粒子が2個以上となることはまれであるので、線量率依存性があるとすれば、核の中のみで起こった現象の反映ではないと考えられ、バスタンド効果の存在が疑われる。放医研の加速器では、ビームがパルス状に出ることを利用して、0.3秒で照射を完了する極端に高線量率の低線量照射が可能である。しかし、それでも線量率依存性は認められ

なかった。

タマネギ発芽種子の根端細胞においては、小核発生が独特の線量効果を示した(図2)。荷電粒子1個あたりの小核発生は、LETの2乗に比例し、荷電粒子の通過に伴う致死損傷の発生もLETの2乗に比例すると仮定すれば、この曲線を理論的に説明できることがわかった。また、線量率効果はショウジョウバエ同様に認められなかった。

バスタンド効果は、極低線量のリスクを極端に引き上げるので、*in vivo*系での有無の検討は、放射線のリスク評価上きわめて重要である。

タマネギで見られた、放射線の生物効果がLETの2乗に比例する傾向は、よく見られる現象である。ショウジョウバエのハネの毛の突然変異、ヒト末梢血リンパ球の染色体異常発生、多くの培養細胞の致死損傷についてもそうである。このLET依存性を根拠に、放射線によって生じる一次生成物がLETに依存して変わるのだとする考えが近年広く信じられるようになった。しかし、放射線の生物効果の原因物質の大部分は放射線によって発生する高速電子であるので、LETによる1次生成物の質や量の大きな差はあり得ず、生物効果の違いは、主として一次生成物の空間的な分布の違いによるものと考えられる。1920年頃から現在に至るまで、Lea, Kellerer and Rossiらによって、多くの生物効果は電離に伴って発生する仮想的な2つの損傷が影響し合った結果(damage interaction)であるとする仮定に基づく理論的検討が行われてきた。これらは具体物によらない抽象的な議論であるにも拘わらず、定量的な取り扱いに優れており、多くの成果をあげてきた。一方、分子生物学の発展に伴い、一次生成物の質の違いを見つけようとしたり、DNA分子を標的にしたモンテカルロシミュレーションをもとにして、現象を具体物によって説明しようとする企ても試みられてきたが、大きな成果をあげているとは言い難い。しかし、古典的な考え方に基づく理論的考察も、多くの場合、損傷の数の平均値のみを解析的に取り扱っており、高LET放射線のデータへの適用が難しいため、今回は、損傷数の確率分布をモンテカルロシミュレーションで取り扱う理論構築を行い、従来の理論的な研究結果との比較を行った(投稿中)。それにより、放射線を分割して照射した場合や異なった放射線を混合して照射した場合の生物効果に関する従来の算出方法は、正当化できない不適切なものではあったが、結果には修正の必要がないことがわかった。しかし、飛跡間のdamage interactionによる細胞の致死効果は、高LETになればなるほど小さくなることがわかり、従来の計算結果は過大評価となっていることがわかった。ところが、実験結果では、従来の計算結果と同様、高LETでも小さくならず、むしろ大きくなる傾向があるので、実際の生物効果には、damage interactionの理論的な枠組み以外の要因が働いていることが推測される。

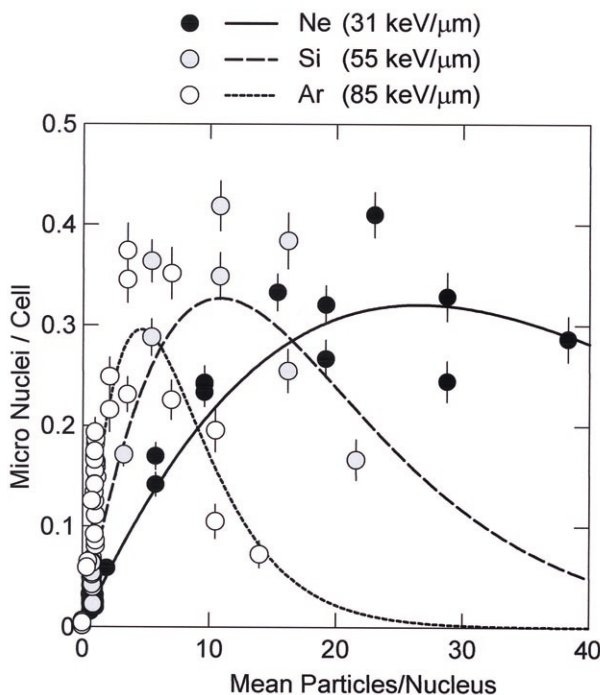


図2. 細胞核の平均通過数に対する小核発生頻度。曲線は数理モデルに従った理論曲線。