

閉鎖システムの中からわかっていくこと

環境シミュレーション研究部 遠藤 政 弘



閉鎖システムと聞いて、何を想像するでしょうか？ システムとは、多くの部分が集まって、全体としてまとまった機能を発揮している集合体といえます。このシステムにおいて、ある注目した対象が、外部とのやり取りがない閉じた状態である場合を、その対象にとって閉鎖システムということが出来ます。潜水艦のように水にもぐったまま、外界との物質のやり取りを出来るだけ制限して、内部でやりくりするようなシステムが良い例です。

閉鎖システムを使って物質循環のデータを得る

閉鎖システムを作って、その中で生活することを考えてみると、地球上では潜水艦での生活、地球外では宇宙ステーションが代表例だと思います。両者の大きな違いとして、空気と水の供給方法、廃棄物の処理方法が挙げられます。システムといっても、地球上か否かで機器の構成から違ってきます。空気と水の循環、食料となる作物の生産、そして廃棄物の処理再利用といった機能を持たせ、その中で生活できる閉鎖システムを、環境研は地上に建設しました。閉鎖型生態系実験施設といいます。

実験施設内で作物を栽培し、発生した酸素と作物を実験施設内で生活するヒトと家畜が利用する。水は浄化して再利用する。廃棄物は酸化処理により二酸化炭素とミネラルにして再利用する。このような実験施設は、単に外界と隔てた空間で生活するとどうなるか、ということを知るだけでなく、空気や植物中に含まれる微量の物質が閉鎖システム内の生物の間で、どのように移行・蓄積・循環するのかという定量的なデータを得るために必要です。

環境中の炭素の動きの予測へ

原子力発電所で使用した燃料を再処理する施設からは、放射性の炭素が二酸化炭素の形態で大気中に出てきます。天然にも宇宙線と大気中の窒素との核反応でできる微量の放射性炭素があります。これらの放射性炭素は、光合成によって植物に取り込まれ、それを食べたヒトや家畜の体の中に取り込まれます。炭素は生体の主要な構成元素なので、被ばく線量評価の上で、放射性炭素のヒトおよび環境中での動きを予測できるようにする事が重要です。外界と隔離した条件下で、放射性炭素をトレーサーとして使えない場合は、性質の類似している安定同位体炭素を実験施設に入れ、その動きを追跡することにより炭素の移行の定量的なデータを得ることが出来ます。また、非食用の植物に対しても、外界と隔離した条件下で光合成による炭素の取り込み量、植物と土壌からの二酸化炭素の放出量を調べることによって、植物や土壌への蓄積量を知ることが出来ます。

これらのデータに基づいて、生態系における炭素移行のモデルを作ります。これを使用することによって、環境中に放出された放射性炭素が生態系の中でどのように移行・蓄積するのかを予測することが可能になります。

地球の将来に備えるための実験施設の活用

宇宙のスケールで見ると、地球はひとつの大きな閉鎖システムです。太陽からの光エネルギーを植物が受けて有機物を生産し、動物は有機物を摂取しエネルギーを得て生活しています。植物や動物から発生する有機物は、主として微生物によって分解され、二酸化炭素やミネラルとなってまた植物に利用されます。この物質循環のバランスにより、地球の現在の状態が維持されていることとなります。今、この物質循環のバランスを保ちながら人類が将来にわたって生存できる循環型社会の必要性が認識されてきました。また温暖化の影響について、調査・分析が盛んに行われていますが、高速の計算機を駆使して将来予測を行う上では、入力するデータが将来予測の信憑性を左右します。

実験施設で検討している、酸素や二酸化炭素のバランスの維持や有害ガス処理、水の循環、作物生産や廃棄（排泄）物処理、そして実験施設内での資源の有効活用と排出抑制の生活スタイルは、将来の循環型社会作りに役立つ可能性があります。また実験施設は、ある程度、環境条件を変化させることが出来る機能があります。温暖化の影響や、二酸化炭素上昇、酸性雨、環境ホルモンなどの汚染物質の影響を解析し、環境変化が生態系へどう影響するのかの定量的なデータを提供できれば、地球環境変化に対応した対策の立案に大きな力となるのではと考えています。さらに砂漠、極地、そして宇宙のような、生存に不適な環境で生活するための技術開発にも役立つものと考えます。

閉鎖型生態系実験施設は原子力の環境安全研究用に開発された実験施設ですが、それ以外の分野にも利用できる可能性を秘めています。

放射性核種の土壌——農作物間移行を予測する

環境動態研究部 武田 晃



土壌は、岩石が風化した鉱物等の無機物や腐植物質等の有機物といった固体成分の間に空隙があり、その空隙に水分や空気が入った構成になっています。土壌に放射性核種が沈着した場合、有機物や粘土鉱物の表面に付着したり内部に取り込まれたり、多様な存在形態をとりますが、その違いによって、放射性核種の土壌中での移動性や生物への取り込まれ易さは大きく異なります。植物は土壌に含まれる養分を根から吸収して生育しますが、その際に土壌中に存在する放射性核種も吸収します。したがって、土壌に含まれる放射性核種の量が同じであっても、植物が吸収し易い状態にあるかどうかによって吸収量は異なります。そのため、土壌中の放射性核種の挙動を予測するためには、土壌に含まれる量だけではなく、どのような存在形態にあるのかを理解することが重要になります。

土壌に含まれる放射性核種が農作物にどのくらい移行するかを示すために、移行係数という指標が使われます。これは放射性核種の土壌中濃度に対する農作物中濃度の比として表されるもので、放射性同位元素の土壌への添加実験、あるいは、農地から採取した土壌や農作物中のフォールアウト核種や安定元素の分析から求めることができます。しかしながら、土壌中での放射性核種がどのような存在形態かは考慮されていないことから、この指標を用いた移行予測はあまり精度が高くないことが知られています。

土壌から農作物への放射性核種の移行を精度よく予測するために、環境動態研究部では、土壌中の元素の存在形態と農作物の元素濃度の関係について調査してきました。青森県の農耕地から採取した様々な種類の土壌を用いて、人工気象実験施設内でコマツナ、ハツカダイコン、牧草の栽培試験を行い、酸や塩溶液等によって抽出される土壌中元素濃度と植物中の元素濃度を比較しました。得られた関係を用いて、ストロンチウム、希土類元素、亜鉛等については、従来の方法よりも高精度な予測が可能であることが分かりました。

放射性核種が土壌に沈着した後、一般には、時間が経過するにつれて植物に吸収されにくい形態に変化することが知られています。今後は、六ヶ所村内の土壌を対象として、土壌中の放射性核種の時間経過に伴う存在形態の変化や、農作物による吸収量の変化を明らかにしていく予定です。



人工気象実験施設における栽培試験

研究発表解説

マウス悪性リンパ腫のアレイ CGH 解析：低線量率ガンマ線長期間照射がリンパ腫発生にどのような影響を及ぼしたのかについてゲノム上に残された手掛かり

(ラディエーション リサーチ誌 第166巻 2006年に掲載)

高島貴志、藤川勝義、田中聡、廣内篤久、中村正子、中村慎吾、タナカ イグナシア III プラガ、一戸一晃、齋藤幹男、柿沼志津子、西村まゆみ、島田義也、小木曾洋一、田中公夫

1. 4,000匹のマウスを用いた寿命試験

環境研では、平成7年から平成15年にかけて、総数4,000匹のマウスを用い、1日(22時間)当り21ミリグレイ(mGy)、1.1mGy、0.05mGyの低線量率放射線を400日間照射して、マウスの寿命等への影響について調べました。0.05mGy/22時間/日(自然放射線の約20倍)の照射では、寿命への有意な影響は認められませんでした。21mGy/22時間/日(自然放射線の約8,000倍)では、悪性リンパ腫などを死因としたマウスの死亡日齢が平均的に短くなり、平均寿命が約100日短縮すると考えられる結果を得ました。

今回の論文は、21mGy/22時間/日によりマウスに発生した悪性リンパ腫のゲノム構造の変化や異常を調べ、非照射群に自然発生した悪性リンパ腫の場合とアレイCGH法という最先端の精度の高いゲノム解析技術を用いて比較し、各々の特徴を報告したものです。

2. 悪性リンパ腫のゲノム異常

発生した悪性リンパ腫の多くは、照射・非照射群ともにB細胞起源であると考えることができ、高線量率(約0.7Gy/分)の放射線を照射した場合に誘発されるT細胞性悪性リンパ腫と発生機構が異なっていると考えられます。また、高頻度な異常が認められた染色体領域に存在するがん関連遺伝子の多くは、ヒトのB細胞性悪性リンパ腫の原因と考えられている遺伝子と同じものでした。このことから、マウスとヒトとの間で共通の発がんメカニズムが関与している可能性が高いと考えました。

異常を検出した染色体領域を照射・非照射群に分けて比較した結果、照射群で度々異常を示す染色体領域には、がん遺伝子の*Bcl11a*や*c-myc*、がん抑制遺伝子の*Cdkn2a*、*Cdkn2b*、*p73*や*Rb1*遺

伝子が存在していました。これらのがん遺伝子が増加する、もしくは、がん抑制遺伝子が欠失するという異常は、ヒトのB細胞性悪性リンパ腫の中でも特に増殖が速く悪性度の高いタイプのリンパ腫に頻発する異常です。このことから、低線量率連続照射マウスでも、進行の速い悪性リンパ腫が多く出現した可能性があると考えました。

3. ヒトの低線量率放射線影響考察の根拠

低線量率での長期放射線被ばくが、どのようなメカニズムで、どの程度がん等ヒトの健康に影響を及ぼすのかまだ十分に解明されていません。この研究でマウスとヒトとの間で共通の発がんメカニズムが関与することを示唆する結果を得たことは、マウスの実験解析からヒトでの放射線のリスクを考察する研究に、一定の科学的根拠を与えるという重要な意義があります。

4. 照射の影響が生じる仕組みの解明をめざす

この論文では、照射群で発生した悪性リンパ腫のゲノム異常に特徴があることを報告しました。今後、ゲノム異常の頻発する領域が低線量率連続照射によりなぜ変化するのかを明らかにすることが必要です。

法で定める放射線作業従事者や一般公衆の実効線量の線量限度は、この論文で悪性リンパ腫を解析した照射群での照射条件(400日間に集積線量が8Gyの照射)と比較すると、数百から数千倍程度低い値です。そのような非常に低い線量・線量率での放射線被ばくの影響の有無や程度を寿命や発がん率等目に見える現象の統計的な比較だけで判定することには正確さに限界があります。今後、低線量率での放射線照射がゲノムに影響を及ぼす仕組みについて解明することができれば、低線量率放射線のリスク評価をより精度良く行う上で役立つものと期待されます。

Array-CGH analyses of murine malignant lymphomas: genomic clues to understanding the effects of chronic exposure to low-dose-rate gamma rays on lymphomagenesis. *Radiat. Res.*, 166, 61-72. (2006)

第143回環境研セミナー

日時：平成18年6月29日

講師：放射線医学総合研究所

武田 洋 氏

演題：放射性炭素（C-14）に関する最近の話題と
その線量評価法について

講演内容：

体内における炭素やトリチウムの動態の研究をされてきた放射線医学総合研究所の武田洋先生をお招きし、人体におけるC-14による内部被ばく線量評価法の現状と、動物実験によるC-14生体内動態の解析に関する研究を紹介していただいた。

現在のICRPの考え方としては、作業者についてCO₂としてC-14を吸入した場合、その全てが吸収され、18%が5分、81%が60分、1%が40日の半減期で排出されるとしている。また、公衆については有機化合物でC-14を摂取した場合、その全てが吸収され40日の半減期で排出されるとしている。被ばく線量の算定はこのICRPモデルにより行われているが、これらの数値は人体を16kgの炭素を含有する1つのものに単純化し、そこに毎日300gの炭素を取り入れ、同じ量を排出しているとする線量評価モデルによる数値である。これに対し、武田氏等のグループは、ラットを用いた動物実験から、投与したC-14の各臓器への分布及び排泄を測定する事により線量評価を行ってきた。その結果、臓器により線量が異なるばかりでなく、投与した化合物や食餌の形態により、C-14の動態が異なる事も明らかにしてきている。今後は、C-14のヒト体内動態モデルの開発を進め、既に環境放射性核種の動態を解析するシステムとして構築されているシステム（ERMA）へ入力し、環境移行と統合したC-14の体内動態モデルの開発を試みていくとのことである。この研究により、より信頼性の高い被ばく線量評価ができるようになることが期待される。

（増田 毅）



武田 洋 先生

第144回環境研セミナー

日時：平成18年8月9日

講師：旭川医科大学 生物学教室 教授

上口 勇次郎 氏

演題：生殖細胞（卵子・精子）の染色体に及ぼす
放射線の影響

講演内容：

精子や卵子に生じる染色体異常頻度を調べることで放射線の遺伝的影響を明らかにする研究は、1980年代になって上口先生らが開発した、精子や卵子から染色体標本を作製する技術によって進展した。卵子染色体に対する影響では、排卵直前の卵細胞がもっとも放射線感受性が高く、染色体異常頻度も高いものの、卵子の受精能力は低下しなかった。精子染色体に対する影響は、ヒト精子をゴールデンハムスター卵と体外受精させて分析すると、放射線照射したヒトの成熟精子には高い頻度で染色体異常がみられた。精子の場合、細胞質を持たないので放射線で生じたDNAの傷を修復する酵素がないことが高頻度異常の原因であるが、精子の受精能力や運動能力は全く低下しなかった。したがって、排卵直前の成熟卵子や成熟精子は放射線被ばくを受けても、受精の際には淘汰されずに胚発生するリスクが高いことになる。一方、マウスの卵子、精子にガンマ線を照射して受

精後の過程をみると、受精後の1細胞期、胚盤胞期等では多くの染色体異常と胚発生の遅れがみられ、着床直後までに効率よく淘汰され発生後期まで生存するものは殆どいなかった。しかし、これには種差があり、チャイニーズハムスターでは染色体異常を保有している胎仔が9%存在した。ヒト胚の研究は倫理規制の関係で調べられていないので、ヒトの放射線被ばくで染色体異常が次世代に伝わるかは現在のところ不明である。

(田中 公夫)



上 口 勇次郎 先生

新 職 員 紹 介

環境動態研究部

研究員

大 野 たけし 剛



平成18年7月1日から環境動態研究部形態研究グループの任期付研究員として勤務しております大野 剛と申します。今年の3月に東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻の博士課程を修了し、6月まで学術振興会の研究員として同専攻に所属しておりました。これまでの研究では、環境試料中に含まれる遷移金属元素や希土類元素

の同位体比から物質循環や古環境を推定するという研究をおこなってきました。

環境動態研究部に所属してからは放射性核種の形態間移行速度に対する環境要因の影響について研究をおこなっております。

赴任が7月だったので“三八上北地方の厳寒”の洗礼を受けることもなく、秋のように過ごしやすいい夏になんていい環境で働けるのだとただただ感動しております。社会人1年目の“ひよっこ”ではありますが、一構成員として職務を全うし組織に貢献できるようがんばって参りますのでご指導ご支援のほどよろしくお願い申し上げます。

環境研ニュース 第55号 2006年10月

〔編集発行〕 財団法人 環境科学技術研究所

〔編集責任者〕 広報連絡委員会委員長 武山 謙一

青森県上北郡六ヶ所村大字尾駈字家ノ前1番7

☎ 0175-71-1200(代) FAX 0175-72-3690 URL : <http://www.ies.or.jp>

〔印刷〕 (有)アート印刷