

リサイクル稲ワラによる農地の炭素挙動を調べる

環境シミュレーション研究部 坂田 洋



大型再処理施設の稼動に伴って、微量ながら環境中にはいろいろな放射性物質が放出されます。その中で、大気中に二酸化炭素のかたちで存在する放射性炭素 (^{14}C) は光合成によって米や野菜に取り込まれることとなります。近年、収穫後の稲ワラについては、水田土壌中に鋤き込んでリサイクルすることも推奨されています。このように、葉や茎など作物の非可食部が鋤き込みや堆肥化により農地へ戻されれば、土壌に ^{14}C が蓄積する可能性が考えられるため、農地での ^{14}C 挙動に関する調査は、地域住民の安全と安心に資するうえで重要と考えられます。



この調査では、 ^{14}C を取り込んだ稲ワラが農地へ戻された場合、稲ワラに取り込まれた ^{14}C が土壌中でいつまで残留するのか、あるいは分解してどの程度大気に放出されるかを評価します。私達は、環境研の施設内で稲を栽培する際に ^{14}C の代わりに安定同位体炭素 (^{13}C) を取り込ませた稲ワラを作り、この稲ワラを鋤き込んだ水田、及び稲ワラを原料とした牛糞堆肥を施用した畑地について、土壌や土壌から放出されるガス（二酸化炭素、メタン）に含まれる全炭素量と ^{13}C 同位体比を定期的に調査しています。



農地では毎年、作物未利用部の鋤き込みや堆肥等では有機物が施肥されるため、水田、畑地の作土層（10～15cm）には、それぞれ $2\text{kgC}/\text{m}^2$ 、 $5\text{kgC}/\text{m}^2$ 程度の炭素が含まれています。この調査では一般的な農業と同じように、水田では乾燥量で約 $600\text{g}/\text{m}^2$ の稲ワラを4月に、畑地では乾燥量で $1\text{kg}/\text{m}^2$ の堆肥を7月に施用しました。稲ワラおよび堆肥に占める全炭素の割合は約4割のため、毎年1割程度の炭素

が土壌に付加されることとなります。堆肥については全炭素量の1/3程度が稲ワラに由来します。稲ワラまたは堆肥に由来する炭素は、水田、畑地とも施用から作物の収穫時期までに、ほぼ半減する結果となりました。また1年間に土壌から二酸化炭素で放出された全炭素量は、水田、畑地でそれぞれ250 g C / m²、110 g C / m²と見積もることができました。なお、¹³C を多く含む稲ワラを使用したことにより、農地に施用した稲ワラや堆肥由来の炭素が、そこで栽培された作物へ移行する現象を確認することができました。土壌に施用された稲ワラ、堆肥中炭素の一部が作物に吸収される可能性が考えられます。1年目に施用した稲ワラや堆肥が、2年目でさらにどの程度分解するかを調査することで、土壌中の稲ワラ由来炭素の蓄積速度を評価したいと考えています。

〔研究者に聞く〕

Q. 水田や畑地を使った実験は、どこで、どのくらいの規模で行っているのですか。

A. 水田、畑地とも青森県産業技術研究センターから借りています。水田での実験は、県西側の黒石市にある農業総合研究所内に約90m²の専用区域を作り、青森県内で一般的に栽培されている品種の「つがるロマン」を植えて行っています。畑地での実験は、県東側の六戸町にある野菜研究所内で約500m²の土地にニンジン栽培を行っています。その品種は、青森県内で一般的に栽培されている「向陽2号」というものです。

Q. 水田、畑では、どのようにしてガスの測定をするのでしょうか。

A. 土壌から放出されるガスを採取するために、ガスチャンバーという容器を作物間の土壌部分に設置して、その容器に二酸化炭素濃度を測定・記録する装置を取り付けて測定します。そのデータを処理して二酸化炭素発生量を求めます。ただし、発生した二酸化炭素中の¹³C濃度はその場では測定できませんので、チャンバー内の

空気を採取して環境研に持ち帰り、質量分析装置によって測定しています。

Q. 施用された稲ワラ由来の炭素の作物への移行には、どのような経路が考えられるのでしょうか。

A. 分解された稲ワラの炭素の一部は二酸化炭素となり、水に溶けたり、土壌から大気に放出されたりします。一般的に植物は二酸化炭素を葉から吸収して光合成に利用し、炭素を固定します。農地から大気に放出された炭素は勿論、根から水と一緒に吸収された炭素も光合成に利用されていると考えられます。

Q. 水田では鋤き込んだ稲ワラが分解するにはどのくらいの時間がかかるのでしょうか。

A. 作業をしている感じや見た目判断すると半年程度で稲ワラはなくなります。しかし、土壌中の¹³C濃度の測定結果を解析すると、半年経過しても「有機物」として半分程度は残っており、完全な分解には更に時間を必要とすると考えられます。

平成20年度の環境研事業報告は、6月5日に開催された理事会及び評議員会において了承されました。報告の概要は次のとおりです。

〔 調査研究活動 〕

1. 天然放射能による被ばく線量に関する調査研究

六ヶ所村及び青森県において収集した日常食や食品の放射化学分析を行い、内部被ばく線量を推定した。更に、六ヶ所村内の針葉樹林に生息する小型哺乳類が受ける内部被ばく線量を推定した。

2. 放出放射能の環境分布に関する調査研究

(1) 環境移行・線量評価モデルとパラメータの検証

大型再処理施設アクティブ試験に伴って排出された放射性核種（トリチウム： ^3H 、クリプトン85： ^{85}Kr 、ヨウ素129： ^{129}I ）のうち、尾駱沼湖水中で測定した ^{129}I 濃度を使ってモデルとパラメータの検証を行った。モデルでの計算結果は比較的良好に実測値を説明できたが、やや過大評価となった。

(2) 環境移行・線量評価モデルの高度化

前年度までに構築したモデルに、気象モデルを導入し大気拡散過程の精度向上を図った。また、尾駱沼に関するモデルのうち、「尾駱沼集水域放射性核種移行モデル」の栄養塩に関する部分及び「尾駱沼高次栄養段階生態系放射性核種移行モデル」の藻場の部分を構築し高度化を図った。更に、海洋放出口と尾駱沼河口域を含む六ヶ所沿岸海域モデルの基本設計を行った。

(3) パラメータの充実

牧草地から採取した土壤にセシウム（Cs）、ヨウ素（I）を添加して、それらの形態変化と植物吸収との関連を調査した。Iでは添加する

化学形により土壤-植物間移行に変化がみられた。また、野外から採取した汽水に添加したランタノイド、アクチノイド及びIの形態変化を調査したところ、いずれの変化も極めて迅速であることが判明した。

植物の葉面に安定ヨウ素の塩を含むエアロゾルを沈着させ、大型人工気象室内において気象条件をコントロールした実験を行った。 IO_3^- の葉面吸収率は I^- に比較して極めて低く、風による IO_3^- のウエザリングは認められなかった。

3. 植物の元素集積性に関する調査研究

栽培植物の中で、土壤からのCs、ストロンチウム（Sr）及びIの除去効率（面積当たりの収奪量）が高いものを選択するとともに、野生植物の中からそれらの元素濃度の高い植物を見出した。また、既に得られているCs耐性を持つモデル植物の2株について、耐性を制御する遺伝子を決定した。更に、葉緑素合成系の酵素遺伝子をノックアウトした植物にCs耐性を認めた。これにより、環境中Csの浄化用組み換え植物を開発できる可能性が示された。

4. 閉鎖系植物及び動物・居住実験施設における炭素移行に関する調査研究

(1) 炭素移行モデル作成試験

ジャガイモと飼料作物に ^{13}C をばく露し、生育時期による ^{13}C 固定量の違い、作物の成長における作物内の炭素転流の寄与を明らかにした。また、前年度までに得られたイネ、コマツナ、ダイズ及びダイコンでの実験に基づき、大気中の ^{14}C 濃度からイネ、葉菜、豆類及び根菜の可食部中の ^{14}C 濃度を予測する数学モデルを構築した。

牛肉への牧草を介した¹⁴C 移行を評価する予測モデルを構築するため、¹³C で標識した牧草を経口摂取させ、呼気、尿、糞、血液及び筋肉への炭素移行データを収集した。また、前年度までに得られた小型反芻動物（ヤギ）における乳汁への炭素移行データに基づき、経口摂取された¹⁴C の乳汁への移行を予測する数学モデルの基本設計を行った。

¹³C を標識したパルミチン酸及びラッカセイ油をヒトに経口投与して、呼気、尿、便及び血液中の¹³C 同位体比を4ヶ月間計測し、脂質摂取時の炭素の短期及び長期の体外排出データを収集した。また、前年度までに収集した試験データに基づき、経口摂取した¹⁴C の人体内における残留量を、炭素の摂取形態（3大栄養素構成比）から予測する数学基本モデルを作成した。

(2) 実験系の運用技術開発

植物実験施設内の大気中¹³CO₂濃度を任意の値に調整することができるよう、植物栽培室内の大気¹³CO₂/¹²CO₂濃度比の時間的・空間的変動を抑え、植物に供給するCO₂のδ¹³C値を十分な精度で調整する方法を確立した。

ウシとヒトにおける炭素代謝モデルの作成に必要な全排出炭素量を簡便かつ効率的に測定する方法として、実験施設の廃棄物処理設備による排泄物中炭素量測定及び居住実験施設における人の呼気中CO₂ガス排出量測定の有効性を検証するとともに最適な実験条件を求めた。

5. 閉鎖系陸・水圏実験施設における炭素等移行に関する調査研究

(1) 湿地生態系における炭素移行に関する試験

実験施設内に構築した湿地生態系において、生態系の炭素交換速度、植物の地上部及び地下部のバイオマス炭素量、土壤微生物バイオマス炭素量等のデータを得、それらを用いて湿地生態系における炭素移行・蓄積基本モデ

ルのパラメータを求めた。このモデルで計算した各炭素リザーバー量や生態系呼吸速度等の変動予測値は、実測値と概ね一致した。また、生態系からのメタン放出量については、短期変動予測で違いがあったものの、長期変動予測ではよい一致がみられた。

(2) 海草群落生態系における炭素移行に関する試験

実験施設内に構築したアマモ群落で、主要な腐植質食者（マナモコ）の有機物消化率、堆積物への炭素移行に関連する有機物（枯死海草及びウニ）の分解速度等を調べた。更に、これまでに得られた個体レベルでのデータを基に、海草群落生態系での炭素移行に関する基本モデルを作成し、実験施設内の海草群落におけるアマモの全炭素量、枯死量等について予測値と実験データとを比較した。

海水から海産生物へのトリチウム移行に関する試験を、青森県の太平洋沿岸海域に生息する海産生物を対象とし、重水（D₂O）を使って開始した。海水－海産生物間におけるD₂O移行・交換速度を求めたところ、魚類以外の生物（ウニ、ナマコ、ホタテ等）では魚類より速い交換速度が得られた。

6. 微生物系物質循環に関する調査研究（土壌における炭素の蓄積と放出の調査）

¹³C 標識稲ワラを水田に鋤き込んで炭素挙動を調べた。土壌中での有機物分解により、8ヶ月後までに約18%が二酸化炭素として大気中に放出された。また、鋤き込んだ稲ワラ中炭素が稲に再吸収される可能性が示された。

¹³C 標識稲ワラと牛糞を主原料とする堆肥では、発酵後の堆肥中炭素の組成が稲ワラ由来33%牛糞由来67%であり、有機物分解速度は稲ワラ中の方が牛糞中のものより約2.4倍速いと推定した。また、畑地に熟成した¹³C 標識堆肥を施した場合、施肥後4ヶ月間に堆肥中の炭素の約17%が二酸化炭素として放出され、その一部

が栽培した野菜（ニンジン）へと移行した。

7. 低線量放射線の生物影響に関する調査研究

(1) 低線量放射線生物影響実験調査（継世代影響とその遺伝子変異に係る実験）

低線量率（0.05mGy / 22時間/日、1mGy / 22時間/日、20mGy / 22時間/日） γ 線を約400日間オスマウスに連続照射し、非照射メスマウスと交配して得た仔、その仔同士の交配によって得た孫を終生飼育して、生存日数、死因、発がん及び遺伝子変異等を前年度に引き続いて調べた。平成20年度末までの5年間にオス親への照射を4回分（100匹）終了し、仔と孫を含む3世代の妊娠率、出産匹数等のデータ収集・蓄積、死亡個体の病理学的検索及び遺伝子解析用組織試料の凍結保存を行った。

親マウスに蓄積されている変異と新規突然変異とを分別する方法について検討するため、高線量率（900mGy / 分）・高線量（8000mGy）のガンマ線をオス親マウスに照射し、非照射メスマウスとの交配によって胎子を得た。両親の尾組織、胎子の全組織から抽出・精製したゲノムDNAを用いてオリゴマイクロアレイCGH法による解析を行った。

(2) 低線量放射線の生体防御機能に与える影響調査

低線量率放射線の連続照射が免疫系に及ぼす影響について、低線量率（20mGy / 22時間/日、1mGy / 22時間/日。以下それぞれ20mGy / 日、1mGy / 日と記す。） γ 線をマウスに連続照射し、脾臓リンパ球の比率と増殖能の変化を経時的に調べて同じ日齢の非照射マウスと比較して調べた。低線量率（20mGy / 日）・高線量（1000～8000mGy） γ 線連続照射マウスでは、脾CD8リンパ球数の低下傾向、Th2リンパ球比率の増加及びTリンパ球増殖の低下が認められたが、低線量率（1mGy / 日）・中線量（400mGy）の場合にはこ

のような変化は認められなかった。上述の免疫細胞の比率や増殖応答能の変化は、免疫機能の低下あるいは変調につながり、寿命試験で認められた低線量率・高線量放射線照射マウスの早期腫瘍死、一部腫瘍の発生率上昇等にも関わっている可能性が考えられる。

低線量率放射線連続照射による寿命試験で認められたメスマウスの体重増加要因について、低線量率（20mGy / 日） γ 線連続照射マウスでの再現性確認、マウス血清中の生理活性物質解析を行った。体重増加の再現が認められ、肝・脂肪組織中脂肪含有量も同じ日齢の非照射マウスと比較して有意に増加した。また、ヒトの肥満、脂肪肝、糖尿病及び高脂血症に関連して変動することが知られている因子群が、照射肥満マウスでも変動することがわかった。マウスの摂餌量調査から、体重増加と組織の脂肪化は摂餌量の増加によらないこととともに、摂餌量あたりの体重増加量が非照射マウスと比較して大きくなる時期がわかった。一方、中線量率（400mGy / 22時間/日。以下400mGy / 日と記す。） γ 線連続照射マウスでは、摂餌量の減少、体重増加及び組織の脂肪化の抑制等の反応が認められ、脂質代謝機能に及ぼす放射線の影響が線量率によって異なることが示唆された。

(3) 低線量放射線のがん関連遺伝子に与える影響調査

低線量率（20mGy / 日）・高線量（8000mGy） γ 線連続照射マウスで発生した悪性リンパ腫について、悪性リンパ腫の遺伝子発現変化をマイクロアレイ法を用いて網羅的に調べた。低線量率照射マウスでは、非照射マウスに比べてシグナル伝達に関わる *Alk* 遺伝子の高発現と、細胞死に関わる *Bax* 遺伝子の低発現という特徴的な発現変化を示す悪性リンパ腫が有意に多かった。

低線量率（20mGy / 日）・高線量（8000

mGy) γ 線連続照射マウスで発生した白血病について、白血病細胞のゲノム異常と細胞分化段階の解析を行った。中線量率(400mGy/日)・高線量(4000mGy)照射、高線量率(900mGy/分)・高線量(3000mGy)照射マウスの場合と比較したところ、低線量率照射マウスと中線量率照射マウスでは、2番染色体欠失の有無、白血病細胞に分化する前駆細胞の種類に違いが認められた。これらのことから、線量率の違いにより、ゲノム異常と細胞分化段階が異なる造血幹細胞・前駆細胞から白血病細胞が発生してくる可能性が示唆された。

低線量率(20mGy/日) γ 線を最大100日間連続照射したマウスの脾臓 T リンパ球の遺伝子発現を調べた。p53 依存的に発現する遺伝子のうち、p21 遺伝子の高発現が観察されたが、中線量率(400mGy/日)照射マウスの脾臓 T リンパ球と異なり、Cyclin G1 等遺伝子の発現量増加はみられなかった。これらのことから、線量率の違いにより p53 による遺伝子発現制御機能が異なる可能性が示唆された。

8. 生物学的線量評価に関する調査研究

低線量率・低線量放射線被ばく時の被ばく線量を、染色体異常を指標として推定する生物学的線量評価法を確立するため、1mGy/日の線量率(第I期調査での照射線量率の1/20)で γ 線を長期連続照射したマウスの脾臓細胞に生じた染色体異常頻度について調べた。二動原体異常頻度と転座型染色体異常頻度のいずれも第I期調査での染色体異常頻度より低かった。クローンの出現は、300日間連続照射終了時点(集積線

量300mGy)では認められていない。また、低線量率トリチウム β 線によるヒトリンパ球の染色体への影響を調べるため、リンパ球の培養技術等の検討を行った。

〔普及啓発活動〕

- (1) 排出放射性物質影響調査研究情報発信活動
平成19年度までに環境研で実施した「排出放射性物質影響調査」(前述の調査研究活動)の内容、成果等を紹介する報告会を、青森市、六ヶ所村、弘前市及び八戸市で開催した。放射性物質の環境中、人体中での動きを評価する計算モデル、染色体異常から被ばく線量を推定する生物学的線量評価等について紹介した。

地域の公民館等に出向いて、または、環境研見学団体に対して前年度の報告会で紹介した内容を基に、青森県内の環境中の自然放射線と天然放射性物質について及び低線量放射線の生物影響について説明した。また、青森市内の大学学園祭において、成果とともに放射線に関する基礎的な内容を説明した。

専用のホームページに用語解説、報告会配布資料の掲載等をして充実を図るとともに、放射線に関する基礎知識をまとめたパンフレットを作成した。

- (2) その他の活動

環境研の活動等の情報を発信するため年報及び環境研ニュースを発行した。また、自然科学に対する関心を高めるため六ヶ所村の小学生等を対象とした理科教室を開催した。

編集・発行 財団法人 環境科学技術研究所(広報連絡委員会)

〒039-3212 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駮字家ノ前1番7

電話 0175-71-1200(代) ファックス 0175-71-1270 URL: <http://www.ies.or.jp>