BUNSEKI KAGAKU Vol. 66, No. 4, pp. 217–222（2017）

© 2017 The Japan Society for Analytical Chemistry

総合論文

福島第一原子力発電所事故から5年を経過して農業面で何が分かってきたのか
―東大大学院農学生命科学研究科の放射能汚染調査を中心に―

中西　友子[1]

2011年の福島原発事故直後から，東京大学大学院農学生命科学研究科では40～50人ほどの教員が，原発事故により飛散した放射性核種の現場における動態についての調査研究を開始した．汚染地域の8割が森林を含む農業関連地であり，その活動は現在でも継続して行われている．東京大学大学院農学生命科学研究科は，演習林，圃(ほ)場，牧場を始めとする多くの附属施設を保有していることから，これらの施設における研究ならびに，福島県農業総合センターや市町村，地域NPOなどとの共同研究も行ってきた．これらの調査研究を通して最も重要な知見の一つは，フォールアウトは，事故当時空気中にさらされていたものの表面に強く吸着されたことである．そして，現在測定される主な核種は^{134}Csと^{137}Csであるものの，フォールアウトは最初に吸着した場所からほとんど動いていない．このようなフリーのセシウムの化学的挙動は通常理解されているセシウムの化学的挙動とは異なる．研究開始から5年以上が経過したが，本論文ではこの間，私共が行ってきた研究の中から，現場における放射性セシウムの動きに関する成果をまとめて紹介する．

1　はじめに

2011年の福島原発事故から5年が経過し，農業においては農地にカリウム施肥を施すことにより，農作物へのセシウムの移行が格段に抑えられるようになった．特にコメについては福島県が，毎年生産される1000万袋（各袋：30 kg）以上にのぼるコメについて全袋調査を実施し，100 Bq kg^{-1}という基準値を超えた袋の数は，2012年に71袋，2013年に28袋だったのが2014年には2袋となり，2015年以降には基準値を超えるコメの生産は0となった．また他の農作物についても出荷されるすべての品種について放射能のモニタリング調査が行われており，市場には基準値を超えた農作物は出回っていない状況である．放射能汚染については航空機などによる上空からの調査測定が定期的に行われてきているものの，汚染地域の8割が森林も含め農業関連地であることから，まだ地上に降り注いだフォールアウトの動態についてはあまり解明されていないことが多い．東京大学大学院農学生命科学研究科では，事故直後から，東京の弥生キャンパス内の研究室と，圃(ほ)場・牧場・演習林などの附属施設に所属する教員40～50人ほどが協力してグループを作り，これまで馴染が薄かった異分野の研究者が共同で復興支援のための研究を開始した．フォールアウト動態の対象は環境そのものであり，ひとつの専門からだけでは議論できないことが多い．例えば農地についてでは，土壌，作物育種，水利など複数の専門家が集まって初めてフォールアウト動態の全体像が少しずつ分かってくるのである．研究科で取り組んでいる研究プロジェクトは，土壌・水・植物・魚類・野生生物・家畜など多岐に渡っており，福島県農業総合センターとの農作物についての共同研究を始めとして，地域のNPOなどの組織や個別の農家の方たちとも一緒になった研究も進めている．そこで今まで分かってきたことの主な点をまとめて紹介したい[1)～3)]．

2　フォールアウトの特徴

福島原発事故では，チェルノブイリ原発事故と比較して爆発時の温度が低かったため，放射性セシウム量と比較したストロンチウム−90量は1/10以下と少なかった[4)]．また8日の半減期であるヨウ素−131の量もチェルノブイリ原発事故の際と比較して1/10以下であった[4)]．そこで，福島事故からのフォールアウトの中で，その存在量ならびに半減期の長さから農業上，放射能汚染として最も問題となってきた核種は^{137}Cs（半減期：30年）と^{134}Cs（半減期：2年）である．しかしここで化学動態として重要なことは，放射性核種がキャリアーフリー（担体が無い）の状態で降ってきたということである．そのため，各々の核種について通常考えられるセシウムの化学的挙動とはかなり異なる挙動が見られるのである．

E-mail：atomoko@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp
[1] 東京大学大学院農学生命科学研究科：113-8657　東京都文京区弥生1-1-1

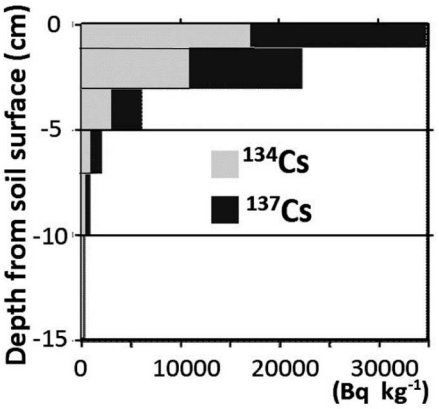

Fig. 1 Radioactive cesium distribution in soil
The radioactivity along the depth from the surface was measured at Fukushima-prefecture immediately after the accident. (S. Shiozawa, Nature news July 12, 2011).

放射能測定でトレースできるキャリアーフリーの放射性核種の量とは，通常の化学反応で扱う量とは桁外れの極めて少ない量であり，その挙動は知られている化学的挙動とは大きく異なる．例えば，キャリアーフリーの放射性核種の溶液を作成しても通常は溶解しているはずの核種が，ろ過をすることによりろ紙にトラップされてしまう．これは放射性核種の量があまりにも少量であるためラジオコロイドが生成されているためと説明されているが実態はまだよく分かっていない．

福島原発事故により飛散した放射性核種は，事故当時，空気中にさらされていたすべての物質表面に吸着して動かなくなった．その挙動は瞬間接着剤の付いた花粉に例えられるだろう．しかも飛散してから5年経ってもそのほとんどがあまり動いていない．そしてその吸着のされ方も事故直後の数か月と比較して次第に強くなってきている．マクロなセシウムの挙動からは考えられない挙動であるフォールアウトの放射性セシウム量と通常私たちが考える元素量がどの位異なるかと言うと，例えば土壌で5000 Bq kg^{-1} の放射セシウムが測定されたとすると，そのキャリアーフリーのセシウム量は 10^{-6} mg kg^{-1} レベルであり，土壌中の土壌中の安定セシウムの量，数 mg kg^{-1} レベルとはほど遠い．そのため，土壌に吸着した放射性セシウムの挙動を通常知られているセシウムの化学的性質と同様に考えにくく，例えば化学処理による土壌の除染を考える上でも非常に困難が伴うことになる．

しかし，飛散してきた ^{137}Cs と ^{134}Cs については，マクロとミクロのセシウムの化学的挙動との比較の際だけではなく，カリウムとの挙動の類似性を論じる場合にも注意を要する．一般にセシウムはカリウムと同様な化学挙動を示すと言われているものの，植物中での動態や土壌の吸着状況など，カリウムとは異なる挙動が明らかとなってきている．

3 土　　壌

福島事故は3月初旬という冬の終わりに起きたため，畑には作物がほとんど生育していなかった．そこで，降ってきたフォールアウトは土壌表面に到達するとそのまま土壌に吸着され動かなくなった．土壌に降ったフォールアウトの動態としてはまず，土壌表面からどの位の速度で放射性セシウムが降下するのかが問題となる．塩沢ら[5]は，郡山市の汚染農地にパイプを埋め込み，改良した放射線測定プローブをそのパイプ内で下方にずらしながら測定し，15 cm の深度までの放射線量の深度別プロファイルを定期的に測定してきた（Fig. 1）．その結果，当初，3～5 cm の土壌表面に吸着していた放射性セシウムが時間と共にどのように下向へ移動するかが測定された．最初の3か月で土壌中の深度別放射性セシウムプロファイルは2 cm 下がったものの，次の3か月ではその間の雨量が3倍に増加したにもかかわらず，5.6 mm となり，次第に動かなくなった．現在では年間1～2 mm ほど下方に移動しており，この速度はチェルノブイリにおける放射性セシウムの下方移動速度とほぼ同程度である．

次に問題となることはでは土壌中のどこに放射性セシウムが吸着しているかということである．土壌を篩（ふるい）で大きさごとに分けイメージングプレートを用いた放射線像からは，有機層，ならびに最も小さな粘土層に放射性セシウムのほとんどが吸着していることが判る．礫（れき）や砂などの比較的大きな土壌構成物からは放射線は検出されなかったのである．そして木暮らは8種類の粘土鉱物を用いた分析結果から，風化黒雲母（weathered biotite）に放射性セシウムが強く吸着すること，また一度吸着した放射性セシウムは特にこの粘土鉱物から脱着しにくいことを示した[6]．さらに，収束イオンビームを用いて粘土鉱物を再分割し各部分の放射能を測定したところ，分割に応じて放射線量は減少した，つまり粘土鉱物内に一様に放射性セシウムが分布していることを見いだしたのである．これは，セシウムがフレッジエッドと呼ばれる層状粘土の端に吸着する，つまり，鉱物の端に吸着するという，一般に説明されてきた結果とは大きく異なる．セシウムの量が極端に少量であるため，今まで分かってきた結果とは異なる挙動と考えられる．

4 水田とイネ

最初に記述したように，イネについては土壌へのK施肥により放射性セシウムの吸収量はかなり抑えることができ，基準値を超える放射性セシウムを含むコメは出荷されなくなった．そして玄米の汚染についてはおおよそ土壌中

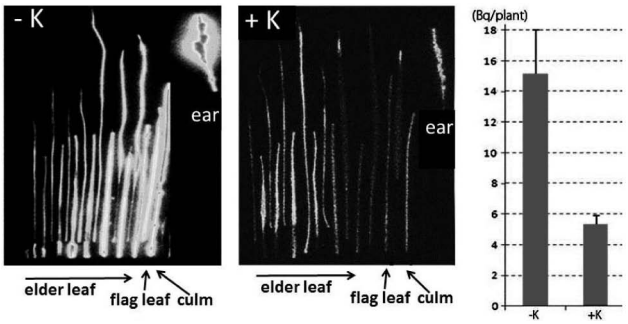

Fig. 2　^{137}Cs distribution in a rice plant under a K deficient condition

The ^{137}Cs distribution was obtained using an imaging plate.　The relative ^{137}Cs amount in a rice plant was measured by a Na(Tl)I counter.　–K, K-deficient; +K, control.

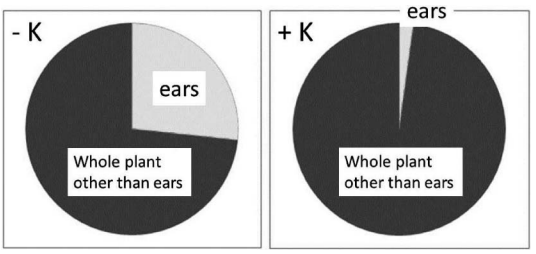

Fig. 3　^{137}Cs accumulation in a rice plant under the K deficient condition

The ^{137}Cs accumulation ratio between an ear and the other part is shown.　–K, K-deficient; +K, control.

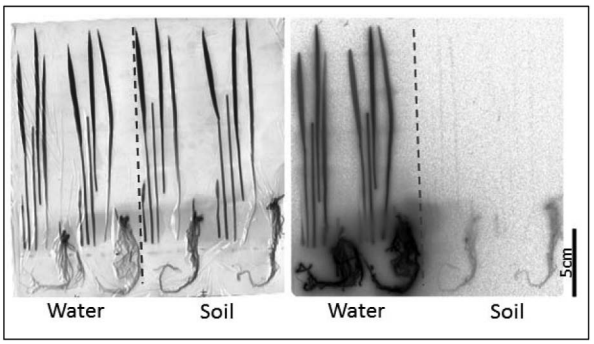

Fig. 4　^{137}Cs absorption by a rice plant under soil and water culture

^{137}Cs was supplied to a water culture solution and soil. Then, the ^{137}Cs distribution image in the plants was obtained by an imaging plate.

のカリウム濃度がある程度高いところではイネのセシウム吸収が抑えられることが示されている．

実験室で行った実験でもカリウムを与えない場合には ^{137}Cs の吸収量が高くなり，また植物体内での ^{137}Cs の分布も異なってくる（Fig. 2）．生育段階で ^{137}Cs の蓄積量を組織ごとに調べてみると，カリウム不足の場合には，イネが生育するに従って新しい葉や穂への ^{137}Cs 移行が増加し，穂への ^{137}Cs の蓄積量は非常に高くなる（Fig. 3）．

実際の土壌でイネを生育させる場合には，^{137}Cs は土壌に吸着されイネはほとんど吸収することができない．Fig. 4 に示されるように水耕ではイオンとして溶解している ^{137}Cs はイネに良く吸収されるものの，土壌がある場合には ^{137}Cs はほとんどイネに吸収されないことが示された．

一方，事故直後，カリウム施肥など何も対策を立てなかった場所で，玄米中の放射性セシウム濃度が当時の基準値（500 Bq kg^{-1}）よりも高いイネがみつかった．非常に特殊な例ではあったが根本ら[7]はその原因として水田に引いていたため池からの水が原因であることを突き止めた．そこのため池では水そのものには放射性セシウムはほとんど溶解していない．しかし，夏に近くなると放射性セシウムを含むコロイド状のものが生成され，この状態の放射性セシウムは植物に吸収される．つまり穂の生育期に放射性セシウムが吸収されるので，穂ができる頃の若い葉や穂に放射性セシウムが蓄積される．通常イネが放射性セシウムを吸収すると古い葉に蓄積され，若い葉になるほど蓄積量が減少することが知られているが，このケースは逆であった．何故，このため池だけがこのようなコロイド状のものを生成するのかは不明であるが，放射性セシウムは簡単なろ過で除去できることが分かっている．

その後，いくつかのため池の水が調べられ，夏場だけ放射性セシウムが吸着した浮遊物が生じる場合が見つかっているものの，浮遊物の大きさならびに色はため池の場所により異なっている．

セシウムとカリウムは周期表で同族であることから，化学的性質が酷似しているため挙動は同様だと考えられがちである．しかし植物の生育における両元素の動態を調べるとかなり異なる挙動が見えてくる．小林らは，イネを用いた実験でカリウム欠乏下では Ca や Mg と比較して Cs の吸収量が特に高くなることを確かめた．そして溶液と根中の K/Cs の濃度比を比較すると，根の方が 5 倍高くなり，更に地上部での比は根よりさらに 5 倍高くなることが分かった．つまり，Cs と比較して，K は根への移行は 5 倍，地上部への移行はさらに 5 倍の選択性を持っていることになる．また植物体内での転流についても挙動は異なり，イネのすべての葉における K/Cs の濃度比が異なることを見いだしている．

玄米中の放射性セシウムの分布は，廣瀬らの実験により[2]イメージングプレートを用いた画像から胚芽と表皮にそのほとんどが存在することが示された（Fig. 5）．

玄米中の ^{137}Cs の分布から判るように，玄米を精米するとまず玄米の表皮の放射性セシウムが除去され，濃度は約 50 % に減少する．玄米には表皮に多くの ^{137}Cs が蓄積して

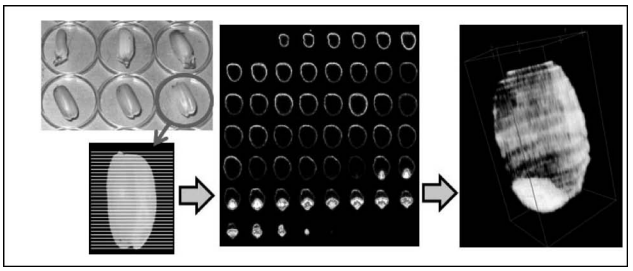

Fig. 5 Three-dimensional image of the ^{137}Cs distribution in a rice grain
^{137}Cs was accumulated in the embryo and the periphery of endosperm (these parts are removed as bran through thrashing).

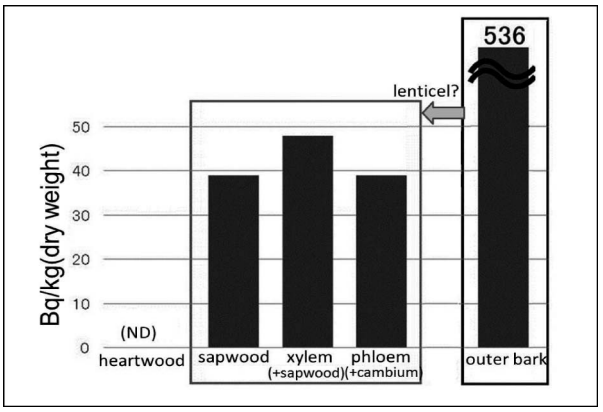

Fig. 6 ^{137}Cs distribution in peach tree bark

いるからであり，除去されたぬかの ^{137}Cs 濃度は非常に高い．そしてその後の洗米により，^{137}Cs の濃度はさらに 50 % 減少し，さらに水を加えて炊くとまた半減するので，当初，仮に玄米に 500 Bq kg^{-1} の放射性セシウムが存在していても，ご飯となるとその濃度は 100 Bq kg^{-1} 以下になることが分かった．

5 果　　樹

果樹については高田らが汚染の状況を詳しく調べている[1)2)]．まず，事故前にたまたま樹木の根の周りの土壌を覆ったモモと覆っていなかった樹木が生育させた果実中の放射線量が低いものの，ほぼ同じ値であったことから研究が始まった．果樹中の放射性核種が根から吸収されたのではないと予想されたからである．つまり，果樹の生育する土壌では放射能汚染は表面だけであったため，根が活発に養分を吸収している少し深いところには放射性物質は無い．そこで，まず，どこから果実へ放射性核種が動くかが調査対象となった．その結果，樹木内部へは樹皮から放射性セシウムが移動していることが示された．放射性セシウムの濃度としては依然として樹皮が最も高いものの，放射性セシウムの総量としては 1 年間で樹皮に吸着した量の約半分ほどが内部へと移行したことが分かった（Fig. 6）．モモの幹似は皮目と呼ばれる小さな通気口のような組織があり，そこから ^{137}Cs が内部に入ったのではないかと考えられた．しかし，リンゴ，マツやスギなど他の樹木でも樹皮から内部へと ^{137}Cs が移行したことが示され，モモの場合，必ずしも皮目を通らなくても ^{137}Cs が樹木内部へ移行した可能性もある．

次に高田らは一旦内部へ移行した放射性セシウムが次の年にどの位樹木内を移動するかが調べられた．汚染したモモの樹木の枝や葉を除去し，汚染されていない土壌に植え替えて生育させ，次の年に果実が成熟したのちに樹木の各組織をすべて採取し，蓄積した放射性セシウムの移動と分布を測定した．その結果，樹木の内部に取り込まれた放射性セシウムの内，新たに生育した組織には僅か 3 % しか移動しなかった．果実には実に 0.3 % しか移動蓄積しなかったのである．つまり，果樹の幹表面から内部に移動したものの，そのまま大部分は動かなくなったことになる．

根の生育が地中の深度に至るブドウと浅いイチジクを用い，根の周辺土壌の汚染度が異なる場合には，根の放射性セシウムの吸収量が異なり生育する果実の汚染度も異なることも示された[2)]．また枝の選定により 15 % ほど放射能の汚染量が減少することなど果樹について色々な知見が得られている．しかし樹木の生育には季節変化があり，樹木に吸着ならびに取り込まれた放射性セシウムの動きのトレースには年単位の測定が不可欠である．

6 森　　林

福島県はその面積の 7 割以上が森林であるため，事故からの時間経過と共に，次第に森林の汚染がクローズアップされてきている．事故当時，森林では落葉樹の葉はすべて落ちており常緑樹のみ葉をつけていた．この針状の細い葉がフォールアウトをかなり受け止めたこともあり，樹木では高いところほど放射線量が高くなった．そのため常緑樹の生育した土壌よりも落葉樹の生育した土壌表面の放射線量が高くなった．また枝では上半分の方が下半分よりも放射線量が高く，森林でも降ってきたフォールアウトがまず接触したところに吸着したことが判る．しかし年数を経るにつれて常緑樹の葉も次第に落葉し，地表で落ち葉が微生物により分解され始めた．その結果，葉に吸着していた放射性セシウムは土壌へと移り，次第に吸着される場所が変化して土壌の放射線量が高くなってきている．

森林の樹木については，益守らが事故の翌年，20 m を越えるスギ及びマツについて，樹木の内部汚染状況を調べた[2)]．樹木を伐採したのち，地表から数 m ごとの高さにおける小口材を切り出し，イメージングプレートを用いて小

口材中の放射性セシウムの分布像を求めた．マツの場合には樹木の幹表面に吸着した放射性セシウムはあまり内部へは移行していなかったものの，スギの場合には心材部にかなり移行していたことが分かった．興味深いことには，事故当時，根元から切り倒されていたままの同様な大きさのスギでも，横になったままのスギの幹内部へ表面に降ってきた放射性セシウムが動いていたのである．スギの内部の水分布像はマツとは異なることが知られている．特に辺材部と心材部の間には水分量の少ない白線帯と呼ばれる層が存在する．樹木の生育に従ってこの白線帯は次第に外側へと動いていくため，マツと比較してスギは樹木内の水の動きが大きいのではないかと予想される．この水の動きが放射性セシウムの幹表面から心材部への蓄積の原因のひとつではないかと考えられる．

森林に生育するキノコについては，事故の起きた年に北海道演習林を始め，全国の演習林からキノコが採取され放射線量が測定された[1]．枯葉などに生育する腐朽菌の方が，生きた組織に生育する菌根菌よりも放射能濃度が高いことが示された．これは枯葉の方が生きた組織よりも放射性セシウム濃度が高いためだと考えられた．しかし，さらに興味深いことは，事故によりフォールアウトとして飛散した^{137}Csと^{134}Csの比は1：1とほぼ等しかったにもかかわらず，キノコ中のこれらの放射性核種の比が異なったものがあった点である．それも北海道や静岡県など，今回の事故の場所からかなり遠く，フォールアウトの飛散量が非常に低いと予想される地点で生育していたキノコで放射性セシウムがかなり高いものが採取されたからである．そして採取されたキノコの放射線量を測定してみると，^{137}C量が^{134}Cs量よりもはるかに多いものが検出された．^{137}Csの半減期は30年であり，^{134}Csの半減期は2年と短い．そこで，^{137}Csのみ測定されたキノコでは^{134}Csが既に崩壊してしまっている，つまり今回の福島事故よりも前に降ったフォールアウトに起因する放射性セシウムが蓄積されていることとなる[1]．

調べてみると，1960年代に米ソが競って核実験をしていた頃，日本にかなりの量の放射性核種がフォールアウトとして降って来ていた．日本人男性一人当たりの体内の放射性セシウム濃度は500 Bqを越えていたという報告もある．つまり，その頃に降ってきた放射性セシウムをキノコの周辺の環境はまだ維持していたということになる．

7　動　　物

家畜への放射性物質の影響については，真鍋昇らを中心に，笠間市の附属牧場で調査研究が進められた[1)2)]．まず，汚染した牧草を家畜飼料として調製し，これを牛に給与することにより，どのように放射性核種が牛のミルクに検出されるかという研究が行われた．その結果，汚染した干し草を食べると，即，牛のミルクには放射性セシウムが検出されることが分かったが，2週間ほど汚染食を与えたのち，汚染していない餌に変えたところ，約2週間後には放射性セシウムが検出されなくなった．このことは，放射性セシウムを含むミルクが生産されても，牛に放射性セシウムを含まない飼料を与え続ければ，ミルクの汚染は減少し非汚染飲料になるということを示している．

事故後，ヤギや豚などの家畜が野山で野生化している．ヤギの場合，放射線量率が高いところで活動していたにもかかわらず，体内の放射性物質の濃度は非常に低かった．その理由は，植物は汚染土壌からほとんど放射性セシウムを吸収できないので，結果として放射性物質を含む植物は育たず，ヤギは放射性植物を食さなかったためだと考えられた[8]．

一方，現地では野生のイノシシと野生化した豚が交配し，イノブタが繁殖している．イノシシや豚類は鼻で田畑を掘り返すので，土壌表面の放射性セシウムも食べてしまう可能性があり，実際に調べたところ，ヤギとは異なり体内の放射性セシウム濃度が高いことが分かった．現在は汚染した動物について，血液と筋肉や各臓器間の放射能濃度の関係を測定している[2]．一般に，動物の場合には，体内に入っても通常は放射性セシウムは代謝によって体外に排出される．放射性セシウムの「生物学的」半減期は，魚や鳥や動物の場合には長くても100日ほどと見積もられている[8]．

8　お わ り に

私共の現場の放射能汚染についての調査研究活動は事故直後から始まり，現在もずっと継続している．得られた成果は，4～5か月ごとに定期的に開催した報告会で一般公開してきており，2017年1月で第13回目となった．また大学の学部学生や大学院生への講義や現場実習も並行して開催してきており，2017年で5年目を迎えた．

今回，私たちの調査結果の一端を紹介したが，これら以外にも得られてきた知見は多く蓄積されてきており，それらは本論文の引用内容を含め，文献1)，2）にまとめられている．またここでは触れなかった鳥類を含む野生動物，作物，魚など放射能汚染について興味のある方は，これらの文献を参照していただければ幸いである．

謝　　辞

上述したように本研究は，東京大学大学院農学生命科学研究科の多数の教員・研究員ならびに学生がかかわって得られた結果であり，これらの結果をまとめるにあたり，全員の方々の絶え間ない調査・研究に深く敬意ならびに謝辞を表します．

文　献

1) T. M. Nakanishi, K. Tanoi (Ed.) : "*Agricultural Implications of Fukushima Nuclear Accident*", (2013), (e-publish), (Springer).
2) T. M. Nakanishi, K. Tanoi (Ed.) : "*Agricultural Implications of Fukushima Nuclear Accident. The first three years*", (2016), (e-publish), (Springer).
3) 中西友子："土壌汚染―フクシマの放射能のゆくえ", (2013), (NHKブックス).
4) 今中哲二：科学, **86**, 252 (2016).
5) Nature news July 12, (2011).
6) H. Mukai, A. Hirose, S. Motai, R. Kikuchi, K. Tanoi, T. M. Nakanishi, T. Yaita, T. Kogure : *Sci. Rep.*, **6**, 21543 (2016).
7) K. Nemoto : private communication.
8) N. Manabe : private communication.

What Has Become Obvious from an Agricultural Perspective in These 5 Years after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident

Tomoko M. Nakanishi[1]

E-mail : atomoko@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

[1] Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657

(Received November 29, 2016; Accepted February 6, 2017)

Five years have passed since the Fukushima nuclear accident. Immediately after the accident, 40 to 50 academic staff members of Agricultural Dept. of The University of Tokyo started to study the movement of radioactive materials emitted from the nuclear reactor, since most of the contaminated area in Fukushima is related to agriculture. They are still continuing their research to find out the effects of the accident in agricultural fields. Our Graduate School holds many research fields, and there are many facilities attached to the School, such as meadows, experimental forests, farming fields, *etc.* Together with these facilities a lot of on-site studies have been conducted in Fukushima. One of the most important findings was that the fallout was found at the surface of anything exposed to air at the time of the accident. The main radioactive nuclides are now ^{137}Cs and ^{134}Cs. However, the radioactive nuclides were hardly moved from the original point that they touched, which was very difficult to estimate from our understanding of the chemical behavior of cesium. Since the carrier free Cs amount is extremely small, there is an obvious difference between the behavior of the fallout and that of the macroscopic Cs.

***Keywords*:** Fukushima Daiichi nuclear accident; fallout; radioactive cesium; ^{137}Cs; ^{134}Cs; agricultural effect; soil; rice; animal; tree; forest.