J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 126, p.45 ～ 49 (2014)

第 55 回土壌物理学会シンポジウム総合討論
土壌物理の放射性物質研究戦略に向けて

濱本昌一郎（シンポジウム事務局）

Discussion at the 55th symposium on the radioactive material issue

Shoichiro HAMAMOTO

本稿では，6 名の講師による講演の後に行われた総合討論（座長：溝口勝氏，吉川省子氏）の模様を，今後の研究活動の資料として掲載する．なお，討論の概略の記録を目的としたため，事務局の判断により，発言内容の一部を省略，または要約させて頂いたことをご了解願いたい．また，当日のシンポジウムの様子はホームページ（http://www.iai.ga.a.u-tokyo.ac.jp/mizo/edrp/fukushima/jssp13/）で「動画」として視聴できる．

溝口（座長）：
総合討論をこれから始める．土壌物理の放射性物質研究戦略に向けてということで，私と吉川さんで進めていきたい．進め方は，質問しきれなかったことに答える時間帯を設け，その後に研究戦略という観点から，私がいくつかの案を提示するので，それについて皆さんから意見を頂きたい．それではまず最初に，佐賀大学の長さん，次に三重大学の取出さんから質問して頂きたい．

長（佐賀大学）：
谷山さんに質問したい．3500 箇所という多くの場所での分析結果を見せて頂いた．平均的には減衰傾向にあるのが分かったが，除染という意味では，結構スポット的な高い場所が残っている気がする．汚染源としてのスポット的な高い場所をどのように減らしていくかが大事と思われる．今後のこのような場所に対する取り組みについてお聞かせ頂きたい．

谷山（農業環境技術研究所）：
農林水産省内では役割が分かれている．農環研はモニタリング，現象解析および動態予測というのが立場であって，除染については農研機構が担当している．ただ，今回現象を見てみると，特定の場所や圃場，またはミクロに見ると作物の部位など，2 次元的な変動が非常に大きく，今回のいろいろな問題を解決する難しさの 1 つと言える．乾性沈着，湿性沈着かということでも違っている．たまたまその時雨が降ってプルームから洗い流されたとか，地形など様々な問題があって，こういう場所だから高い低いとは言えない．空間線量率だとある程度平均化されているので，なかなかホットスポット的なものは出てこない．また，除染場所のデータも航空測定では難しい．そういったところでどうするかというのは，農研機構の原口さんにお話しを伺いたい．

原口（農業・食品産業技術総合研究機構）：
農地に関して言えば，今一律でやっている表土剥ぎを何センチと決めてやるのではなく，分布などに応じてやるべきだと思う．森林については，今はあんなに広大な面積でしかも機械のアクセスができないところで除染というのはちょっと考えられていないので，森林については答えが難しいかなと思う．

取出（三重大学）：
山口さんも西村さんも Cs のイオン交換の話をされていた．土壌中の Cs 移動を予測するとき，Cs のイオン交換や吸着を，現在用いられている吸着モデルでどのように扱うべきか．

江口（農業環境技術研究所）：
山口さんの講演要旨にある図が重要で，① 腐植の COOH や粘土鉱物構造末端の OH など Cs を吸着しうるが極めて離れやすいところ，② Cs を選択的に保持するが他の陽イオンとの競合により出てきてしまうところ，③ Cs を強く固定しほとんど出て来ないところ，主にこの 3 種類の負電荷を考えれば良いと思う．よく分からないのは，Cs の固定化に要する時間が，粘土鉱物の種類や様々な環境条件により変わるため，どの程度のスピードで固定態 Cs の割合が増えるかということ．チェルノブイリ事故後に欧州で開発された簡易モデルがあるが，まだ不十分な点が多い．今回，山口さんの講演では触れられていなかったが，農環研の 1960 年代以降のグローバルフォールアウト由来放射性 Cs のデータベースを用いてこの簡易モデルを適用すると，土壌から作物への放射性 Cs 移行の傾向をおよそ表現できる．しかし今回の原発事故後，福島県内各地の水田で初年目に収穫された玄米における放射性 Cs の移行係数について，この簡易モデルを適用しても全然合わない．これは，グローバルフォールアウト由来の放射性 Cs は土壌への降下後かなり時間が経っており，事故直後の福島県のようにまだ大気降下物による直接汚染や灌漑水からの流入などが存在し，土壌中の交換態の割合が高いという条件とは大きく異なるためではないかと思う．これらをモデルに組み入れないと，事故直後の福島県内の水稲や他の作物の吸収量は精度良く予測できない．今後，事故から例えば 5 年以上経ち，降下物や灌漑水の影響が無視できるようになり，固定態の割合が大きくなると，既存のモデルでも予測できるようになるのかなと思う．

取出：
移動予測における吸着モデルは，ある程度の単純化が必要と考える．溶液濃度と吸着量を与える通常のモデルでは，Cs 濃度がゼロになったら吸着量もゼロになるので，利用は限られる．イオン交換のモデルは必要と考えられるが，不可逆的な吸着も含めるとモデルが非常に複雑になる．たとえば，仮想的に選択性が非常に高いイオン交換を考えて，実質的にほぼ不可逆な吸着をモデル化するなど，現在利用されているモデルを用いた計算で乗り切ったほうがいいのかなと個人的には思う．

江口：
既存モデルで考慮されていない要因として，生物の影響がある．糸状菌類や作物によっては，強く固定されている K や Cs を吸収できるため，不可逆と思われているものを吸い上げて，新鮮有機物としてもう一度土壌へ戻してしまう．新鮮有機物が分解すると溶存態 Cs が放出され，それが土壌中で固定化される前に植物が吸収すると，そこで Cs が循環して，なかなか固定化されないことになる．そういったことも考慮してモデル化する必要がある．

取出：
そうした要因はわかるが，今までのモデルを何とか工夫しながら使う方法にしないと，どんどんモデルが複雑になって，実質的に使えないモデルになる危険性がある．

溝口：
それだけは避けたい．今は急を要するのだから最終的には工学的にどこかで見切りをつけてやるしかないと思う．今あるモデルがどこまで使えて，一方，どこで現実の現象を適切に単純化できるか，皆さんに考えていただきたいと思う．では次に，東京大学の光岡さんと北海道大学の石黒さんから質問して頂きたい．

光岡（東京大学）：
放射性 Cs が FES（Frayed edge site）に固定されるには時間を要するとのことだが，事故後数カ月で土壌から作物への移行がほとんど見られなくなったことについてはどう考えれば良いか？

石黒（北海道大学）：
Cs の固定化はゆっくり進行するようだが，RIP（Radiocaesium interception potential）は平衡を仮定した式であり，これだと矛盾が出る．固定化される場所に到達するまでの時間は遅くないと思うのだがどうなのか？

江口：
最初の点について，事故直後は土壌からの吸収よりも大気降下物による直接汚染が主体だった．また固定態への移行は，降下直後が最もドラスティックに生じ，徐々に緩慢になった．2 番目の質問について，FES への Cs 固定割合を高めるには，乾湿の繰り返しが効果的であることが経験的に知られている．非常に乾いた条件と湿潤条件を何度も繰り返すことで，固定態の割合が増える．水分が多いと交換態 Cs が土壌中で拡散しやすくなり，乾燥過程では非常に微細な孔隙に Cs が入り込みやすくなるような効果があるかもしれない．RIP を測定するときの実験条件は，懸濁液状態で非常に高濃度の放射性 Cs を用いており，平衡に達したとみなすまでに 5 日間をかける．現場土壌とはかなり条件が異なっており，放射性 Cs が FES に到達しやすい条件で測定されている．実際の土壌中では，放射性 Cs 濃度は非常に低く，土壌水分は通常不飽和であり降下物と土壌を懸濁液のように十分に混合することもない．自然のままに任せていると，なかなか FES には到達できないように思う．

石黒：
粘土鉱物層間に K イオンが固定して安定なところはもう入らないが，自然条件では，風化した粘土鉱物端面近傍で Cs が固定されやすいのか？

江口：
そういうところは，通常，K，NH_4，安定 Cs 等で優占されている．降下したばかりの放射性 Cs が，量的に何オーダーも大きいこれらの陽イオンに打ち勝ってそこに入るためには，何らかの条件変化などを利用しないと，そう簡単には入って行けないように思う．

取出：
大事なことは，予測のタイムスケールだ．Cs の移動を半減期の 30 年のタイムスケールで考えるときは，FES への拡散経路が幾ら湾曲しようが，ほとんど無視できるものなのじゃないかと思う．対象とするタイムスケールに対して，固定に要する時間は瞬間的とみなすことができる．

江口：
山口さんのデータによれば，事故直後の土壌に比べて，数カ月後には明らかに固定態が増えている．この程度の時間によって固定態が増えるのは間違いない．

溝口：
さっきの光岡さんの質問の中で，植物の根っこの話があった．実は山口さんには退席前にその辺の話を聞いてあって，それについては「場合によっては植物の根っこのところから吸われることもあり得る，ただよくわかっていない」というコメントをもらっている．それからもう 1 つ，「例えば粘土鉱物，雲母の風化を進めるということが可能なのか？風化を進めることにより多くの吸着サイトができるのでは」と質問した．それに関しては，「そういうことをやっている人もいる，しかし，なぜかすぐにもとに戻ってしまう．粘土鉱物というか雲母ができる生成と風化という表裏一体の過程を研究テーマとして取り組む必要がある」との回答を頂いている．

次は原口さんに対する質問．除染で線量を下げるためには粘土を除去したほうが良いが，一方で放射性 Cs を吸着させ作物への移行を抑えるためには粘土鉱物を残したほうが良いということになる．ダムや農地の粘土鉱物は除去したほうが良いのか残したほうが良いのか考えを伺いたい．加えて，道総研の中辻さんからも質問をお願いしたい．

中辻（北海道立総合研究機構）：
植物による Cs 吸収の話がモデルのところで出たが，植物吸収による除染は非常に難しいと聞いている．これについては全く芽がないのか？

原口：
最初の点は，粘土を浮かして剥ぐとか最初はいろいろアイデアがあったが，冒頭の溝口さんのグラフにもあったように，耕うんしていない土であそこまで集積しているのであればそのまま取るというのが私どものアイデアで，事業でもその方法で大半が進んでいる．吸着をさせるためにゼオライトなどを入れることは現場でも行われているが，表土を剥いだ後に行えば良いと思う．2 点目は，私は植物についての詳しい知識を持っていないが，当初，農水でもヒマワリの試験とか幾つか試験が行われた．しかし，植物への移行が相当小さく，たしか単純に平均して割ると 2000 年近くかかるというような数字であった．私どもは，植物による除染は，今は継続するアイデアはないという状況だ．

溝口：
植物に関する話として，商用を目的としない作物を放射性物質の影響がなくなるまで栽培することで除染することはできないのか，という質問を岐阜大学の服部さんから頂いている．

谷山：
植物でも一応吸収するので除染の可能性はある．ただしポイントは半減期の 30 年，それよりも早く吸収することができるかということだが，今のところそういった植物は無い．現地試験では除染には 100 年とか 1000 年といった結果しか出ないので，そういった意味では植物除染はあまり展望がないと思う．加えて，吸収した作物体をどうするかという非常に大きな問題がある．容積は大きく，また湿っているため，それを灰にして濃縮し，高濃度廃棄物として中間貯蔵施設や永久貯蔵施設に貯蔵しなければならない．そういった手間暇を考えても，植物除染に展望はないと思う．チェルノブイリの時も，ヒマワリとか菜種とか油糧作物を農地の荒廃化を防ぐために育てたことがある．油にはほとんど Cs が移行しないということがわかっているため，バイオディーゼルなどで利用することは可能である．しかし，そのバイオディーゼルの放射性物質の含有量は低くても，それを燃やせば大気に排出されるという不安もあり，単に科学的な問題ではないことがこの問題の難しいところだ．

溝口：
次に佐野さんから谷山さんへの質問を頂いている．

佐野（大阪府立環境農林水産総合研究所）：
リスク管理における基準値はいろいろあると思う．これは放射性物質に限らず他の有害物質，重金属や農薬などの有機物でもそうだが，やはり一般からはゼロリスクが求められているのが現状かと思う．ただ，幾らかは入っているという現状の中で，どのようにリスクを低減できたかの成果をアピールする際のうまい説明の仕方について，お考えをお聞かせ頂きたい．

谷山：
非常に難しい問題で，その方面のリスクコミュニケーションまで踏み込めないのだが，今の食品の基準値の 100 ベクレルは，年間の被曝線量を 1 ミリシーベルト以下に抑えることで決められている．たとえば，ニューヨーク出張をしてジェット機に乗れば宇宙線から 0.2 ミリシーベルト被曝する．そういったものと比較して考えれば，今の基準は本当に問題ないと考えている．ただし，同様の問題として，この前もマスコミで取り上げられていたが，がんの発生率に閾値があるかという問題がある．閾値がないとすればゼロリスクはゼロベクレルにならない限りはあり得ない．これは，カドミニウムでも何でも同じではないかと思う．しかし，どうしても放射性 Cs は特別なものと考えられていて，日本の規制の中でどうするかは非常に頭の痛いことだ．

溝口：
あと 1 件，福島県在住の阿部さんから質問を頂いている．「放射性 Cs は極めて微量であり，またどのような状態で飛散してきて，どのような状態で存在・劣化するということでわからないことが多い．パーティクルや分子レベルではいろいろと評価が違ってくる．私は今後福島県内の中通りと浜通りの 2 地区で Cs の状態や形態変化を比較することが今後重要になってくると思う．その意味では，土壌物理学会が他の学会と交流することが必要だと思う」という当学会に対する希望が寄せられている．2 地区での比較アプローチが今後重要であろうとの指摘であるが，谷山さん，この点については「そうです」という回答で良いか．

谷山：
学会ごとに分けて考えることは全く考えて無い．モニタリングであれば土壌肥料学会，農業農村工学会，その他 Cs の専門家であれば学会を隔てず色々と皆さんで協力してもらいたい．Cs を理解している専門家については，誰でも声をかけたい．

溝口：
次に話題を変えて，研究戦略に向けて議論したい (Fig. 1)．研究戦略というと，PDCA サイクル，Plan・Do・Check・Action というのを皆さんは聞いたことがあると思う．実は私がちょっと関わっている小学校では，この PDCA サイクルの前に S をつけている．この S は Standing であり，その場に立つ，まずは立ち上がることが，実は戦略をつくるときに一番大事である．そういう意味で今回の集会が，この S になってくれたらいいと期待している．S の 1 つのきっかけは，明日予定している現場見学だと思う．みんなが現場に行って，今日の議論を踏まえながら，見て，やる気になってくれれば，このSPDCA サイクルの S がまずできる．我々の土壌物理学会は，伝統的な部分もあるけれども，どちらかというと応用を余り意識せずに基礎学問を大事にしてきた．もちろん基礎は大事．これはこれからもずっと大事にしていくべきだが，実は現実問題として目の前にその基礎を今こそ活かすタイミングが来ている．今日のシンポジウムの発表ではコロイドや粘土や浸透といったキーワードが出た．ここで私は皆さんにお聞きしたいと思う．目の前にある土壌と放射性物質の問題に対して他に必要な学は何でしょうか？こういう基礎学，基礎分野がある，これを使うべきではないかという意見のある人は手を挙げて頂きたい．また方法論に関して，現場型の研究をするのか，測定技術を開発するのか，あるいは実験をするのか，データを分析・シミュレーションするのか，このスライドに示したキーワードを見ながら，こういうことを考えるべきじゃないかという意見があれば，手を挙げて発言して頂きたい．

水野（京都女子大学）：
我々は簡易型のガンマカメラを開発した．測定しながら除染だけではなく遮蔽も組み合わせて線量を減らすことを検討した．遮蔽もいろいろな方法があるが，壁を

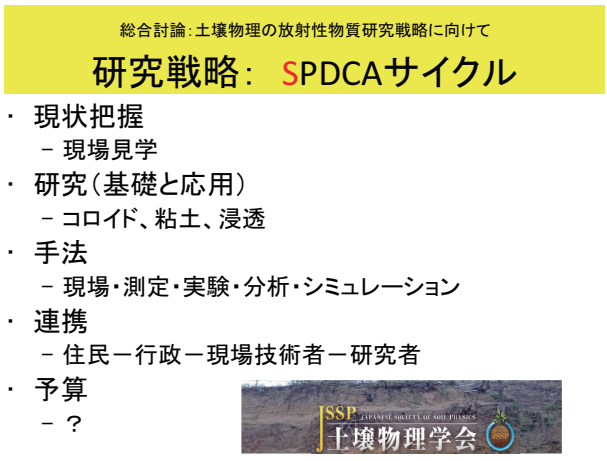


Fig. 1　土壌物理の放射性物質研究戦略．
Research strategy on radioactive material issue.



Photo. 1 総合討論の様子.

立てるだけではなくて，水平方向に広がっているものに対して水平方向に薄く覆土をするだけで，斜めから来るガンマ線の遮蔽効率が上がるという方法を土壌に対しても適用した．実際にコンピュータシミュレーションをやり，どうすれば減っていくのかを目で見ながら現場の当事者と相談しながら減らしていこうと考えている．そういう実践的な方法，それは一件一件やっていくことになるので非常に手間がかかると思うが，今のような何も考えない除染をすることによって大量の土壌が発生してしまうというよりはまだかえって現実的ではないかと思う．そういう手法を具体的に試行錯誤しながら到達してきている．

溝口：

ここで宮﨑さん（日本水土総合研究所）からコメント頂きたい．

宮﨑（日本水土総合研究所）：

チェルノブイリとか，その前の 1960 年代の大気圏内の核実験で被害が全地球にめぐっていたときに，科学者たちがそれを何とか活用して科学的に知見を得ようとして努力した．その実績を過去に持っている．今回の 3.11 についても同じように，あるいはそれ以上に被害を記憶にとどめながらも学術的な蓄積を，今何とか新しいものをつくっていこうとしている最中だと思う．土壌物理学会がやるのだというふうに突出して，姿が見える形でやりたいという願望・熱望もすばらしいと思う．全然反対する気はないのだが，他の学会と一緒にできれば，特に医学関係の人たちともう少し近づいてこの話ができたら，もっと面白いと思う．日本学術会議でもこういう会議をたくさんやっている．今日の土壌の話題が私の一番得意なところだから楽しく聞いているのだが，日本学術会議でこのテーマを議論すると，そこに距離を感じて少し違うなという気持ちでいつも聞いている．医学的であったり，魚の話であったり，地上のことばかり話が出る．今日のように地下の話がなかなか表に出てこない．この地上と地下を繋ぐことは，溝口さんが考えているとおりで大事だと思う．だから，話の流れは反対ではなくて賛成なのだが，まだ繋がっていないなという実感はある．

溝口：

医学会とか他の学会との連携も取り上げるべきだったとは思う．ただ，我々は土壌物理学会なので，やっぱり土壌物理に軸足がある．今朝のスライドでも説明したが，私自身は最終的な目的として，そこに住んでいる人たちのために何かアクションを起こしたいと思っている．飯舘村の村長さんは，「最初に原発事故があったときに一番困ったのはマスコミと研究者だった」とよく言っておられる．「マスコミは来て騒ぐだけ騒ぐ．研究者は自分の研究がここに使えると来たけれども，その結果がどうなったかを報告しないまま来なくなってしまう．そういう対応だけで大変だった」とおっしゃっていた．我々は，自分の研究テーマで何かできると思っても，最終的にはそこに住んでいる住民の方々が理解できるように，そこに還元することをいつも考えておかないといけない．そうしないとやりっ放しになったり，逆に迷惑をかけたりすることになる．我々はこのことを常に意識しておく必要がある．つまり，我々研究者は，現場技術者であったり，住民との間でいろいろと調整してくれる行政マンであったり，いろんな人たちの中で自分たちの研究を活かすことを考えておかないといけない．そういう意味で，連携というのは非常に重要だし，学会員としてそれを意識して各自が自分の研究テーマを絞り込んでいって欲しいと思う．その点について，他に何か忘れているのではないか，こういうこともやるべきだという意見があれば，手を挙げて発言して頂きたい．

水野：

私の場合はツイッターでいろいろ発言をしていた．核物理が専門だが，原子力関係の人がほとんど発言をされなかったので，放射線の基礎知識とかを皆が知っておけば判断ができると思い発言していた．2011 年の夏に学生を連れて福島に行った時にお話を聞いた方から，8 月末の勉強会の講師依頼をされたのが，その方々との出会いだった．一般論として言うと，いろいろと一般の方も見られるメディアに情報発信することによって，あの人にコンタクトをとってみようという形で直接，研究者と住民との繋がりが発生したと思う．例えば私が今行っているいわき市には，30 キロ圏内で住民と研究者が連携しているところが 2 カ所ぐらいある．そこでは，最初に住民の人たちが自分たちでいろいろ測定するということをやられた．いわき市の場合は，国に頼らず独自に除染するという形で国の除染地区からは外れた．その結果，地域の線量の高いところを先に除染して欲しいといった理由から，住民の人たちが何百カ所，千カ所ぐらいを自分達で線量をずっと測定していた．私もいろいろ勉強会の支援などをして交流を持った．現場技術者との繋がりでは，業者さんからリモナイト（褐鉄鋼，鉄の酸化鉱物）を覆土として利用することで放射線量が減ったという話を聞き，検証実験を行った．結果，先ほど述べた斜め効果が非常に大きく，薄く撒いただけでも放射線量の測定値が減少したことが分かってきた．そのかわり，測定点の高さが高い場合は広く撒かないと駄目．普通は線量計を地面に置いて測る．だから，狭く撒いただけでも，斜めに来るガンマ線が大幅に遮蔽される結果，線量率が低くなるという解釈ができた．住民・行政・現場技術者・研究者の 4 つの繋がりについて，具体的な経験から言うと，研究者が一般の方が見られるメディアに，やむにやまれず情報発信することが，やはり繋がりのきっかけだと思う．

溝口：

住民がすごく変わったという例が 1 つある．私が今活動している NPO 法人は，村民と一緒に家や田んぼの周りの放射線量を測っている．ある業者がアロカ（日立アロカメディカル株式会社）の標準線量計用に GPS データロガーを開発してくれたおかげで，それを持って移動するだけで自動的に Google Earth 上に表示された放射線

量を知ることができる．村民の方たちは関心のある場所に行って，ここはこんな風だったと納得していく．やっぱり専門家の力ってすごいと村民の方が専門家を信頼し始めて，こんなことができるのなら次はこれもできないかと積極的に言い出すようになってきた．こうした経験から，私は専門家と村民の信頼に裏打ちされた連携はすごく重要だと思っている．

最後に，研究戦略で大事なのは予算．これは知恵を出すしかない．いくら良いことを言っていても，結局予算が無いからできないということになりかねない．予算というと，いまの日本の仕組みの中では大体が競争的資金で，競争して取り合う感じになる．しかし，今回の放射性物質問題に関して言えば，競争するというよりも，協力して一緒にやっていく方法を考えるしかないと思う．そういう意味では，農研機構や農環研などが，国の予算を学会の使えそうな人に配分して，上手にその人の専門性を引き出していったらいいと思う．他に土壌物理学会としては，横の繋がりを使っていろいろな研究者を束ねて，大きな資金や予算の公募に即座に応募できるような体制を作っておくことも必要だと思うのだが，今のところは具体的なアイデアは無い．

取出：

土壌物理学会誌の編集長の立場からのお願いがある．会員や原稿が減っていくという話ばかりですごく寂しい．今回のトピックの情報発信の場など，情報誌としての役割も持たせていきたいと思う．皆さんのお力をお借りしたい．

溝口：

土壌物理学会や学会誌に対する意見をホームページ（https://js-soilphysics.com/）にあるメールアドレスを使って積極的に寄せて頂きたい．それでは総合討論をこれで終わりにしたいと思う．ご協力ありがとうございました．