

資料

シンポジウム「復興農学－東日本大震災からの復興への土壤科学の貢献と課題」

三輪睿太郎¹・宮崎 豊²・南條正巳³・後藤逸男⁴・菅野宗夫⁵・溝口 勝⁶・
中尾 淳⁷・椿淳一郎⁸・中村道人⁹・三枝正彦¹⁰・木村眞人¹¹

1. 序—シンポジウムの狙い

東日本大震災の津波被災地域では流失・損傷した多数の水利施設の修復、再建が課題として残された地域がある一方、荒涼たる被災田地に地域内外の学術・技術の集中支援を得て、稲作を途切れさせず、その実績から復興の先にある将来の組織・経営革新の手ごたえを得た事例がある。さらに既存の農地所有と利用の拘束を排した農地生産基盤の整備、新作物と大型施設生産の導入などによる将来を切り開く新たな農業経営の造成への萌芽もみられるようになった。

一方、原発事故による放射能汚染地域では復興はおろか復旧の達成すらほど遠い状況にある。帰還困難区域、居住制限区域などを対象とした除染モデル実証事業の結果をみても年間 40 mSv を超える区域では 40 ~ 60 % の線量低減

にとどまり、一回の除染で空間線量率を一気に安全基準値以下に下げるることはできない。これに対する有効な対策はいまだ見出されていないうえに、表土除去の結果大量に発生する廃土の処理についても見通しがたっていない。また、高線量地域（居住制限地域など）に広く存在するほか、避難指示解除地域内に混在する空間線量率が 5 mSv year^{-1} を超える森林の大規模な除染は現実的に困難であり、森林への立ち入りの制限などの長期的な管理対策やそれに伴う補償など一つ一つ現実的に解決されなければならない課題が山積しており、ここでも学術・技術による継続的な支援が求められている。このような状況を踏まえ、日本学術会議農学委員会土壤科学分科会では農学各分野、産学官の学術・技術を集中し、政策、行政、地域の自主的努力を支援する「復興農学」とその計画を策定・提案している。

本シンポジウムは、津波被災と復興における土壤科学の貢献、放射能汚染被災者とすすめた稲作復興、放射能汚染土壤でのセシウムの固定機構、「村学連携」による調査と除染、高度な除染法と廃土の減容技術、森林の放射能汚染の実態と対策について話題提供をしていただき、「復興農学」に土壤科学が果たしうる役割を明らかにすることを狙いとしたものである。

(三輪睿太郎・宮崎 豊)

2. 宮城県の状況と土壤科学の課題

1) 宮城県の農地と土壤における津波被災状況

宮城県の津波による冠水農地面積は約 15,000 ha と推定され、県別に見て最大で、県中南部に広がる仙台平野には津波が数 km 内陸まで遡上した（図 1）。岩手県宮古のように黒い津波が上陸した地域もあったが、仙台平野における

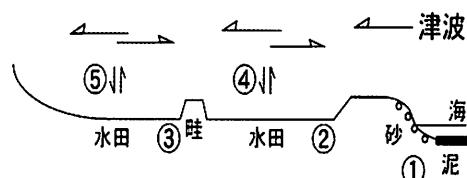


図 1 農地に対する津波（押し波、引き波）の影響の模式図
 ①海岸の侵食域、②、③津波が微高地を超えた位置の侵食域、
 ④、⑤農地平面部の相互作用（侵食、堆積、海水の浸透、イオン交換、塩類の沈殿と溶解）

Eitaro MIWA, Tsuyoshi MIYAZAKI, Masami NANZYO, Itsuo GOTO, Muneo KANNO, Masaru MIZOGUCHI, Atsushi NAKAO, JunIchiro TSUBAKI, Michito NAKAMURA, Masahiko SAIGUSA and Makoto KIMURA: Contribution of soil sciences for recovering from damages by the Great East Japan Earthquake

¹ 農林水産技術会議 (183-0014 府中市是政 5-6-6 LP803)

² 東京大学名誉教授 (113-8657 文京区弥生 1-1-1)

³ 東北大学農学研究科 (981-8555 仙台市青葉区堤通雨宮町 1-1)

⁴ 東京農業大学応用生物科学部 (156-8502 世田谷区桜丘 1-1-1)

⁵ ふくしま再生の会 (166-0004 杉並区阿佐谷南 3-37-2)

⁶ 東京大学大学院農学生命科学研究科 (113-8657 文京区弥生 1-1-1)

⁷ 京都府立大学生命環境科学研究所 (606-0823 京都市左京区下鴨半木町 1-5)

⁸ 名古屋大学名誉教授 (509-0135 各務原市鶴沼羽場町 5-72)

⁹ 林野庁技術開発推進室 (183-0011 府中市白糸台 1-5-27)

¹⁰ 豊橋技術科学大学 (441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

¹¹ 名古屋大学名誉教授 (468-0034 名古屋市天白区久方 1-43)

2014 年 1 月 26 日受付・2014 年 2 月 3 日受理

日本土壤肥料学会誌 第 85 卷 第 2 号 p.160~167 (2014)

る上陸直後の津波に強い色はなく、海岸の侵食域（図1の①）からの泥の影響は大きくなかったようである。しかし、平野部を遡上する過程で畦を超えたときに黒変し、土壌を巻き上げたように見えた。波が引いた後は水田等の区画内に海水が滞留し、懸濁物は沈降し、海水は下方浸透または蒸発し、地表付近には多量の塩分が残された。

海岸付近では地盤沈下と排水機場の被災により、水が引きにくい地域もあった。宮城県では2011年5月11日から19日にかけて県・JA・大学等の合同で津波被災農地の広域土壌調査を行った。この時点までの約2ヶ月に合計100 mm程度の雨が何回かに分けて降った。調査地点数は1 km²当たり約3圃場とし、合計344圃場から津波堆積物と土壌試料を層別に採取した。津波堆積物の下端にはごくわずかの場合もあったが、粗砂があり、その上に泥質堆積物が積層していた。堆積物が合計約1 cm以上あればそれを採取し、さらに、泥質堆積物と砂質堆積物を分別できればそれらを別々に採取した。元の地表面以下の土壌は機械的に堆積物との境界から10 cmごとに2層（第1層、第2層）を採取した。このようにして、1つの圃場内の2地点から試料を採取し、同じ層同士を同量ずつ混合し、その圃場の試料とした。これまでの調査と分析結果の要点を表1にまとめた。

2) 津波・高潮などの海水流入被害に対する土壌科学の課題

(1) 土壌科学の果たした役割

各方面から次の情報発信があった。それらは、①津波による土壌のNa飽和度の上昇は土壌の物理性悪化が顕在化する15%を超える場合も少なくないが平均的にはこの前後に留まること、②除塩過程では最初のかんがい水使用時からCa資材を使うには及ばないこと（熊本県の1999年9月の台風による高潮被害への対応なども参考）、③堆積物の重金属汚染は基準以下であること、④酸性化の可能

性、⑤津波堆積物一般の元素含量が土壌に近いことなどである。そして、除塩と農地の復旧においては水と土壌の扱いに関する農業土木技術の貢献があった。

(2) 今後の課題

今回の被災、防災に関する情報を検索しやすい形で記録することが望まれる。また、海岸付近の地盤沈下地域における表土～浅層地下水の塩濃度制御、個別の被災地における各種の土壌管理・施肥管理とそれらのステップアップや低コスト化なども重要である。
(南條正巳)

3. 福島県相馬市の津波被災地での営農再開における技術的対策

わが国未曾有の東日本大震災による農業災害に対して、2011年4月に「東京農業大学東日本支援プロジェクト」が結成された。演者らは直ちにそれに参画し、5月1日より福島県相馬市の被災地に入った。そこで目にした大津波による被災の光景は想像を絶するものであった。相馬市岩子から柏崎に至る松川浦西側の水田地帯には松川浦の砂州に植えられていた松や漁船、車などが大量のがれきとなって押し寄せていた。用排水設備も津波による被害を受けたため湛水状態の水田が広範囲に拡がっていた。しかし、9月には岩子地区の水田でがれきの撤去が終了し排水設備も回復したが、表面は厚さ10 cm程度の津波土砂で被われていた。2011年6月に発表された農水省の除塩マニュアル（農林水産省農村振興局、2011）によると、「津波により海底の土砂がほ場に堆積している場合は、ほ場外に除去することを基本とする。」としている。しかし、土砂の除去・処分には多大な労力を必要とする。相馬市内から採取した20点ほどの土砂を分析した結果、良質な粘土と肥料成分として有効な交換性KやMgを多量に含むこと、CdやAsなどの有害元素含有率は土壌と大差ないことがわかつた。そこで、被災農家と相談して三枚の水田1.7 haで津

表1 農地と土壌に対する津波等の影響（項目と要点）

物理的	化学的
1. 堤防、排水機場の破壊（津波遡上時に起こり、海岸部に海水が停滞し、内陸側でもかんがい水の使用を控えるに至った。）	7. NaClの増加（初期には表層、後に下層、地下水でも認められた。）
2. 侵食（津波遡上時に微高地から海水が落下するとき、入り江奥では引き波時にも水の落下時に起こった。平面部では耕起済みの場合に作土が失われ、耕起前の場合は軽微であった。）	8. 他の水溶性塩類の増加（Na ⁺ を除けば、海水中には植物養分となるものが多い。）
3. 堆積（津波遡上後の滞水時に粗砂の上に泥質物が積層した。排水路も埋没し、その上に瓦礫が散乱した。粗砂の堆積は海岸側、泥質物は津波の遡上した中間域で多く、それぞれ海浜域の砂、農地等の土壌が主な由来と見られた。その理由の1つは、泥質堆積物の炭素含量分布パターンが第1、2層、土壤図とほぼ一致したことにある。全S含量の高い位置は、炭素含量分布と異なり、その由来も泥質堆積物の主要部とは必ずしも同じでないと推察された。）	9. 交換性Na ⁺ の増加（物理性悪化の境界領域に達したがNa ⁺ の最大電荷割合は44%であった。広域調査時に第1、2層の電気伝導度はあまり高くなかったが、Na ⁺ の電荷割合は高めで、このときまでに濃度の高いNa ⁺ が第2層以下に到達していた可能性が考えられた。）
4. 土壌表面の固化（砂質土壌の乾燥後、大小砂粒子が密に組み合うことによる固化が認められた。）	10. 交換性Ca ²⁺ の減少（作物により、Ca不足の可能性がある。）
5. 潟り水の発生（交換性Na ⁺ の増加により、除塩後に分散性が増大する場合があった。）	11. 除塩後の土壌pHの上昇（交換性Na ⁺ 増加後の塩濃度と変異荷電量低下に伴うH ⁺ の吸着とNa ⁺ 脱離によると見られる。このpH上昇は石こう添加で軽減するとの報告がある。）
6. 地盤沈下（海岸部に海水停滞、排水不良などをもたらした。）	12. 石こうの沈殿（堆積物表面に沈殿し、数ヶ月程度で雨水等に溶解しうる。）
	13. S含量の増加、硫化物（石こうの沈殿や硫化物の混入による。文献によれば、泥質堆積物の硫化物濃度の高い地域には過去の客土中に硫化物含量が高かった地域も含まれる。）
	14. C/N比のわずかな減少（泥質堆積物で示唆された。）
	15. 重金属含量のわずかな増加（津波堆積物のCd、As、Cuの含量は汚染のほぼ基準未満と見られた。）

波土砂を元の作土と混層し、弾丸暗渠を施工した。その結果、雨水による除塩が急速に進み、津波土砂混層後に約6 dS m⁻¹ であった電気伝導率が2012年3月には0.7 dS m⁻¹まで低下した。ただし、津波土砂中に含まれていたパイライトの酸化により土壤pH(H₂O)が3.8程度にまで低下した。従来各地の干拓地で認められた酸性硫酸塩土壤対策には主に炭カルが用いられてきたが、演者らは酸性改良持続効果が高く、ケイ酸、鉄、マンガン、リン酸などを含有する転炉スラグを10 t ha⁻¹ 施用した。その結果、pH(H₂O)は6.3内外に上昇したので、5月に水稻(ヒトメボレ)を定植した。なお基肥については、転炉スラグ施用に伴うアルカリ効果により土壤中の窒素の無機化が想定された。また、転炉スラグ10 t ha⁻¹ の施用で約100 kg ha⁻¹ のリン酸が補給される。さらに、津波混層後の土壤中には700 mg kg⁻¹ 程度の交換性K₂Oが含まれていたので無施肥とした。その後の生育は順調で8月上旬に出穂し、9月26日に収穫した。玄米収量は6.3 t ha⁻¹ と、被災以前より20%程度増収した。また、食味計(静岡精器SP-500)によるタンパク質含有率は6.8%，食味値スコアは78程度であった。

津波被災水田から水稻を無事に収穫できたが、福島第一原子力発電所から約40 kmに位置する相馬市岩子地区では、水田作土の放射性Cs強度は500～1,000 Bq kg⁻¹ であったため、玄米中の放射能が懸念された。そこで、水稻の放射性Cs吸収がピークとなる幼穂形成期の稻体を7月に採取して、放射能を測定したが、検出されなかった(¹³⁴Csと¹³⁷Csの合計検出限界18 Bq kg⁻¹)。また、収穫後の玄米についても検出限界(3 Bq kg⁻¹)以下であった。CsはKと同族元素であるため、土壤中に多量のK(交換性K₂O 250 mg kg⁻¹以上)が存在すれば、拮抗的に水稻へのCs吸収が抑制されることが明らかになっている(農研機構、2012)。収穫後の水田土壤作土には約600 mg kg⁻¹の交換性K₂Oが含まれていたことから、津波土砂を混層したことが、水稻への放射性Cs吸収抑制につながった。また、有害元素である玄米中のCdとAs含有量を測定した結果、Cd: 0.02 mg kg⁻¹，As: 0.04 mg kg⁻¹ であった。Cdについては国内基準値である0.4 mg kg⁻¹を大きく下回った。Asについては国内産米の平均値である0.16 mg kg⁻¹に比べて1/4に留まった。1.7 haの復興水田から収穫した米を「そうま復興米」と名付け、本学の収穫祭などのイベントで販売した。

相馬市で津波の被害を被った農地1,311 haの内、2013年年3月までに営農が再開できた面積は140 haで、それらの多くは比較的軽度な被災地であった。大量のがれきや土砂が堆積した激甚被災農地での復興は、筆者らが地元の一軒の農家と取り組んだわずか1.7 haの水田と他にごく一部の農地に過ぎなかつたが、その大きな原因は技術的な課題というより、被災農家の営農意欲の衰退であった。しかし、復興した水田で水稻が育つ様子を目の当たりにした20軒ほどの農家が営農に取り組む意欲を復活させた。そ

こで、2013年3月には相馬市と地元のJAと農家、本学が「そうまプロジェクト」を立ち上げ、演者らが取り組んできた除塩方法で50 haの水田を復興させることになった。土砂混層・除塩後の土壤酸性化対策には大手鉄鋼メーカーからの支援による転炉スラグを10 t ha⁻¹ 施用した。2013年春には、40 haで水稻、10 haで大豆を作付け、秋には無事に収穫を迎えることができた。2014年には同様な除塩方法による200 haの水田復興が計画されている。

(後藤逸男)

4. 飯館村における村学協働：村民の手による調査と除染の努力

1) はじめに

飯館村は四季折々に自然豊かで美しい村だった。大自然の恵みの中で生命を育み、私たちは暮らしていた。主な産業は水稻と畜産(飯館牛)だった。高冷地のため、たびたび冷害に襲われてきたが、ブランド牛、花卉栽培、高原野菜の栽培などの多角化によって農業経営を安定させてきた。私個人(菅野)は、安全な食品の生産を農業従事者の使命と考え、自然農法による米作り、畜産、野菜、手作り豆腐など、循環型農業を実践し、東京の消費者へ直接販売を行なっていた。家族は90歳になった父、息子、孫、4世代が同居していた。飯館村で暮らす農家は地区ごとに土木工事や植栽などの共同作業を行うコミュニティを形成した。それが、2011年3月11日の震災で一瞬に失われた。自然災害であれば比較的短期間で復旧できるが、飯館村は目に見えない放射能に汚染された。私たちは全く手出しができずに避難を余儀なくされることになった。

2) ふくしま再生の会との出会い

避難中に耕作されない自分の農地が荒れていくことは耐え難いものだった。しかし自らやれる事もあるはずと考え、生きがいを求めて2011年4月に宮城県丸森に耕作地を借り村の仲間と共に米作りを始めた。そうしたチャレンジを始めて間もない頃に「ふくしま再生の会」と出会った。再生の会のメンバーは70歳前後の元サラリーマン・元教員・元公務員・自由業・中小企業経営者・元研究者など多彩な方々だった。彼らは原子力災害という未曾有の有事に、もう若くはない自分たちの経験や知識の中に必ず活かせるものがあるはずと考え、「この指とまれ」方式で活動を始めていた。フィールドを自分の目で見て皆で知恵を出すことを活動の方針とし、週末にボランティアで私の家に集まるようになった。

3) ふくしま再生の会の活動

再生の会では自己申告によって飯館村の各地で汚染実態の把握、除染の試み、避難先における避難民の心のケアなど、自分にできそうな活動を行い、その活動の状況を世界に向けて情報発信している。農業と生活の再生へ向けて、同じ志を持つ村の仲間と再生の会のメンバーとが協働で以下のよう活動を行っている。

①空間線量測定、②農地土壤の放射能調査、③除染効果の

検証、④イノシシの放射能測定、⑤その他

4) 国による除染への不安

2013年12月時点で国による農地除染は4%程度に過ぎない。果たして確実に除染できたのか村民の不安は尽きない。こうした不安を払拭するためにも村民自らによる除染効果の評価や検証が必要である。また、国による表土剥ぎ取り農地除染が終了しても山林除染が進まない限り、農業用水からの再汚染が懸念される。そのためにも国に任せることだけでなく農家が自分自身でできる除染法の開発が必要である。そこで重要なことは、地元農民の知恵と技術を専門家の知識と理論にうまく融合させることであろう。

放射性Csは表層5cm以内に留まっているとされる。そのため農林水産省の除染マニュアルでは土壤の汚染程度に応じて、表土剥ぎ取り、代かき、反転耕による除染が推奨されている。しかし、これらの除染法は比較的大区画の水田を対象にしたもので、飯館村の山間部に点在する小区画でイノシシが荒らしまわっている水田には適用できないように思われる。そこで、私たちは発想を変えて農家自身でできる次のような除染法の実験に取り組んだ。

①凍土剥ぎ取り法、②田車除染法、③までい工法、④イネの作付試験

5) 協働による再生への道

昨年7月に飯館村の行政区は国によって帰還困難区域、居住制限区域、避難指示解除準備区域に区分された。これにより村民の心も分断されつつある。こうした状況の中で多様な会員で構成される「ふくしま再生の会」が潤滑剤のように村民・行政・専門家の間を繋ぎ、「協働」による一連の現地実験や調査を可能にしてきた(図2)。しかしながら、正直なところ農業再生までの道のりにはまだまだ程遠いものを感じる。行政は住民の声を率先して聞いているだろうか?除染は誰の何のために実施しているのだろうか?「住民と行政」「住民と住民」の話し合いを通して、そこに住む住民の自立再生のための目標を共有することが大切である。技術面についてもイノシシによる攪乱が多い地域の農地除染を全て剥ぎ取り法で実施するのが妥当なのか?取り残しや再汚染のリスクも想定し、二次汚染防止対策も含め

た補完技術の確立が必要である。

6) おわりに

私たちは帰村したとしても決してゼロからのスタートではない。マイナスからのスタートなのである。そのことを念頭に置いて今のうちから生活再生のための作物栽培実験や継続的なモニタリング体制の確立が必要である。また帰村と同時に自然界の動植物たちとの共生が始まる。汚染された自然と動植物たちの中で放射性Csがどのように推移して行くのか村民が主体になって継続的に計測分析しながら暮らさなければならない。いずれにせよ、しっかりと前を向いて自助努力する姿を次世代に引き継ぐことが私たちの責務であると信じている。
(菅野宗夫・溝口 勝)

5. 現地土壤におけるセシウム固定

1) はじめに

表層土壤に沈着した放射性Csのその後の主要な移動経路は、植物による経根吸収および降雨に伴う下方溶脱であるが、どちらの経路も移動は起こりにくく、放射性Csの大部分が地表に留まり続ける。これは主に、土壤に沈着した放射性Csの大部分が「フレイド・エッジ（またはフレイド・エッジ・サイト）」と呼ばれる特異吸着サイトに固定され、外部からの作用によって土壤から容易に脱着されない状態になるためである。フレイド・エッジとは、層間にK⁺イオンを固定した2:1型層状ケイ酸塩鉱物（本要旨ではこれを「雲母類」とする）が、層間からK⁺を放出し外側から開いていく（膨潤する）過程で生じる、中途半端に開いた層間部分を指す。フレイド・エッジでは、空間的な制約により水和陽イオンが排除されるため、最も水和エネルギーが低いCs⁺は、脱水和した状態で極めて選択性の高い状態で固定される。この考え方によれば、放射性Csを固定する作用が土壤によって大きく異なる場合、その原因はそれぞれの土壤に存在する雲母類の量の違いに帰結されるが、既往の研究では土壤の放射性Cs固定能と雲母類の存在量との関係は明確に示されてこなかった。放射性Csを固定する物質の正体があいまいであることは、汚染農地の管理および除染対策の立案を難しくするだけでなく、汚染地域周辺に住む人々の不安感を増幅させる遠因のひとつとなるため、固定の規定要因を明確に示すことの意義はきわめて大きい。そこで、福島県広域に分布する水田土壤から粘土画分のみを単離し、放射性Cs固定能と鉱物組成との関係を明らかにすることを目的として研究を行った。

2) 材料および方法

福島県広域97地点（図3；会津36点、中通り36点、浜通り25点）の水田において事故以前に採取された土壤から粘土画分を単離した。これに対して、放射性Cs固定能の指標として放射性Cs補捉ポテンシャル（RIP）を測定し、雲母類の存在量の指標として粘土全K量の定量を行った。RIPは、特定固液系での放射性Csの固液分配係

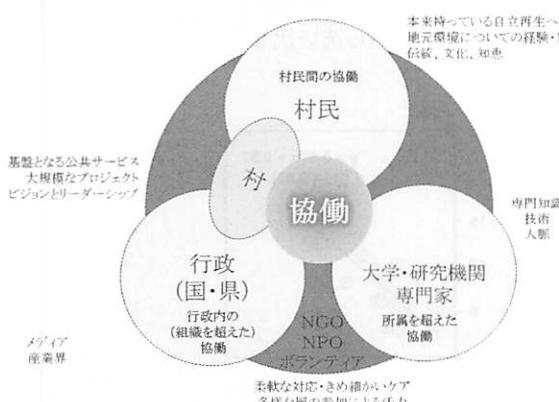


図2 協働による再生への道

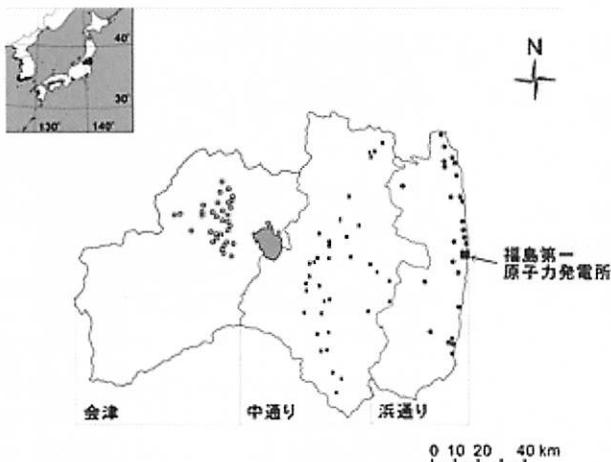


図3 土壤の採取地点

土壤は、佐野ら（2010）において供試されたものを、東北大伊藤豊彰先生のご厚意により分譲されたもの。採取時期が東北大震災以前であるため、これらの土壤は福島原発事故による汚染の影響を受けていない。

数と溶液中の K^+ 濃度を掛け合わせた値であり、フレイド・エッジ量を表す指標値として一般的に用いられる。RIP 測定の詳細についてはここでは省略するが、興味のある方は中尾・山口（2012）を参考にしてほしい。また、各粘土試料に含まれる鉱物の組成と存在割合については、佐野ら（2010）の結果を引用した。

3) 結果および考察

土壤粘土試料の RIP の平均値は、会津で $8.2 \pm 3.8 \text{ mol kg}^{-1}$ 、中通りで $7.9 \pm 3.9 \text{ mol kg}^{-1}$ 、浜通りで $7.3 \pm 3.4 \text{ mol kg}^{-1}$ とほぼ同様の値であった。これは、雲母類以外の粘土鉱物の RIP 値（カオリナイト、 0.01 mol kg^{-1} ；モンモリロナイト、 0.1 mol kg^{-1} ）と比べると著しく高い値であり、雲母類の一種であるイライトの標準物質（RIP= $10 \sim 15 \text{ mol kg}^{-1}$ ）が 50~80 % 含まれている場合に相当する。ただし、X線解析（XRD）から推定された雲母類の存在割合は $8.9 \pm 10.5\%$ であり、上記の概算とは大きく異なる。雲母類は膨潤化がすすむほどフレイド・エッジが生成し、未風化の標準物質よりも RIP 値を大きく増加させることが知られている。つまり、供試した土壤粘土試料には、膨潤化がすんだ雲母類が少量含まれているという解釈が適切である。

RIP 値は、どの地域でも粘土全 K 量と有意な正の相関を示した（図4）。この結果から、福島県に分布する水田土壤では、土壤粘土の放射性 Cs 固定能が雲母類の存在量のみによってかなり説明できることが明らかになった。これは、福島県の水田土壤における放射性 Cs の固定の実態を理解するうえで大変貴重な発見である。中通りにおいて RIP と粘土全 K 量との相関が比較的小さい理由は不明であるが、中通りは奥羽山脈と阿武隈高地にはさまれており上流地質が複雑であることから、供給される雲母類のもともとの性質が異なる可能性が考えられる。また、水田とは土壤の生成条件や母材が大きく異なる他の土壤（森林土壤や黒ボク土など）でも、今回と同様の関係が示されるかどうかは不明である。そこで、今後は土壤粘土に含まれる雲母類の構造や風化程度の違い、腐植の蓄積や团粒構造の形成による RIP の変異について調べることで、土壤の生成条件と放射性 Cs 固定能の関係を解明していく予定である。

謝 辞：本研究のベースにある知見の整理やデータ獲得の過程で、伊藤豊彰氏（東北大院農）、佐野大樹氏（岡山農総セ）、山口紀子氏（農環研）、矢内純太氏、小笠原朔氏（京府大院生命環境）、塙田祥文氏、武田晃氏（公財環境研）、原田久富美氏（畜産草地研）、鳥山和伸氏（国際農林セ）には多大なるご協力をいただきました。記してお礼申し上げます。

（中尾 淳）

6. セシウムの濃縮分離

本題についての万福裕造氏による話題提供は本会誌の p. 138~140 に詳述されているのでそちらを参照されたい。

7. 汚染土壤の減容

除染された汚染土壤の量は東京ドーム 20 倍に達し、中間貯蔵施設設置場所が決まらないことが、除染の進捗を大きく妨げており、汚染土壤の減容は喫緊の課題である。

汚染土壤の量は膨大であるため、減容化装置はできるだけ省エネ・低価格であることが望ましいだけでなく、広大な面積が汚染されているため、可搬型であることが望ましい。

放射性 Cs は粘土質粒子に固定されているため、汚染土壤から粘土質粒子だけを除去できれば減容することができる。その手順は次の 3 つの工程に分けられる。先ず、水で汚染土壤中の粘土質を砂礫から洗い出し（洗浄）、次に大きさの

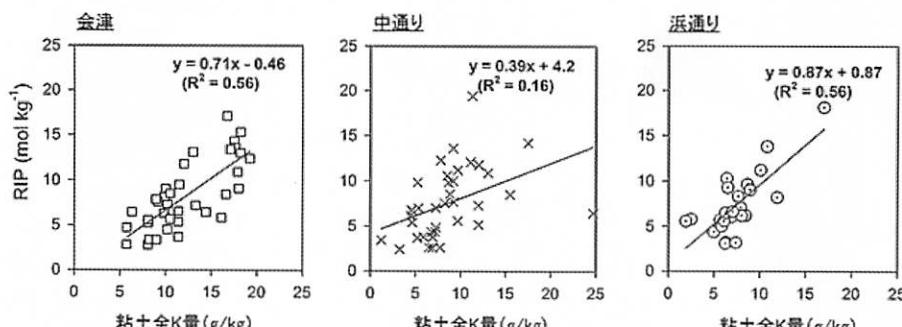


図4 セシウム固定機能の指標（RIP）と雲母の存在量の指標（粘土全 K 量）との関係

違いを利用して砂礫と粘土質泥漿に分け（分離）、最後に泥漿から粘土質粒子を固液分離操作により取り出す（汎過）。

この3工程の中で最も技術的に難しいのは、最後の汎過工程である。粘土質粒子のような微細な粒子の汎過は難しく、先ず泥漿に凝集剤を添加して粘土質粒子を凝集させて次にフィルタープレスによって、泥漿から水を絞り出すが、凝集剤による土壤汚染の可能性も無視できない。またプレス圧は高いため、装置はその圧力に耐えられる頑丈な装置でなければならない。

我々は従来にない新しい原理に基づく汎過装置（デカフと命名）を開発した。デカフでは泥漿を高流速でフィルター内を通して水を抜くので、装置は頑丈である必要がなく小型化が可能である。また凝集剤なしで高濃縮が可能なので、将来その粘土質土壤を再利用することも可能である。

我々は2011年夏から減容化装置の開発を始め、2013年の秋まで現地で6回の除染・減容化試験を行い、実用に供しうるレベルの装置を開発した。写真の装置は2013年11月に本宮市立第一中学校校庭の除染に持ち込んだもので、装置総てを4トントラックに積んで持ち運ぶことができる。処理能力は1時間に、0.3トン程度の汚染土壤を処理でき、減容化率は土壤にもよるが粘土質の土壤でも50%程度の減容が可能で、粘土質が少なければ減容化率はさらにアップする。据付型であれば、容易にスケールアップが可能である。

本宮一中では、装置の搬入・設置から撤収まで含めて一週間で10m²平方の校庭の除染・減容を行った。1.45μSvh⁻¹であった校庭の表土を7cm剥ぎ取ると、線量は0.21μSvh⁻¹まで低下した。洗浄後の砂礫（原土の50%）を戻し、不足分を客土した後の線量は0.24μSvh⁻¹となった。剥ぎ取った表土の放射線量は1,660Bqkg⁻¹で、洗浄された砂礫は316Bqkg⁻¹まで低下し、回収された粘度質土壤は3,200Bqkg⁻¹まで濃縮された。汎液は28Bqkg⁻¹であった。

本装置は、まだ少し改良の余地は残っているが、十分ご活用いただけるレベルにあるので、興味がある方はtsubaki@jhgs.jpまでご連絡ください。（椿淳一郎）



写真1 減容化装置概観

8. 汚染森林の管理の現状と課題

1) 森林内の放射性物質の挙動と森林からの流出・拡散
2011年9月時点においては、森林内の放射性物質は、

コナラ等の落葉樹林では落葉層に最も多く分布しており、スギ等の常緑樹林では、落葉層にも多く分布するが、葉や枝等の樹木部にも3~4割程度分布しているのが特徴であった。これが2012年9月には、落葉樹林、常緑樹林ともに土壤に多く分布するよう変化しており、葉や枝のCsが雨で溶脱されるなどして林床に移動するとともに、落葉層のCsが落葉の分解等に伴い土壤の表層に吸着されたものと考えられた。ただし、依然として枝葉や落葉層に多く分布している森林もあり、森林の状態による違いが大きいことも明らかとなった。また、土壤のCsは土壤表面から数cmの表層にとどまっていることや、樹木部のうち材木部分の濃度は1年前と同様に極めて低いことなど、林業の再生に期待がもてる結果も得られた。

一方、森林内の放射性物質の蓄積量の変化をみると、物理的減衰以上の減少はみられず、森林内での分布は樹木部や落葉層から土壤表層へ変化しながらも、系外への流出は多くはないと考えられた。このほか、森林からの流出に関して、浮遊砂サンプラー等を用いた一定流域からの流出率の調査、増水期間中の溪流水のCs観測などにより、いくつかの知見が得られており、森林外への流出割合は小さいこと、流出する場合は降雨に伴う増水時に、その多くが懸濁物質として流出していることなどが明らかになってきている。また、除染として行っている落葉等除去のほか、間伐などの作業に伴うCsの移動を調査した結果、間伐を行った場合は対照区と同程度で、むしろ数ヶ月後には下回る場合があること、落葉等除去を行った場合は移動量が対照区の数倍に増加し、数ヶ月かけて徐々に減少していくことが明らかとなった。これらの結果は、植生等による被覆と土砂移動量に関する従来の知見と整合しているものと考察された。

2) 森林除染や林業再生に向けた対応

除染については、放射性物質汚染対処特措法や同法基本方針に基づき、環境省を中心に関係府省が連携して取り組んでおり、森林の除染については、まずは人の健康の保護の観点から、住居等近隣の森林を最優先に、林縁から20mを目安に落葉等の除去等を実施している。林野庁では、森林除染に向けた技術の検証・開発に取り組むとともに、地方公共団体等による除染等実証事業への支援や国有林における実証事業を実施しているほか、林業再生の観点から、公的主体による間伐等の森林整備と放射性物質への対処を一体的に行う対策を今年から開始している。

こうした中で、8月27日に開催された環境省の環境回復検討会において、今後の森林除染や林業再生の方向性（図5）を政府側から示して議論が行われた。

この方向性は、1)で述べたような、これまで得られた知見を踏まえたものであり、除染については、森林内での放射性物質の分布変化を踏まえ、土壤の表層に着目した除去を追加できるようにすること、除去作業に伴い森林機能（土砂流出防備）の低下を招く場合は、土砂流出防止対策を講じること、ほど場等でも住居等近隣に準じた除染をで

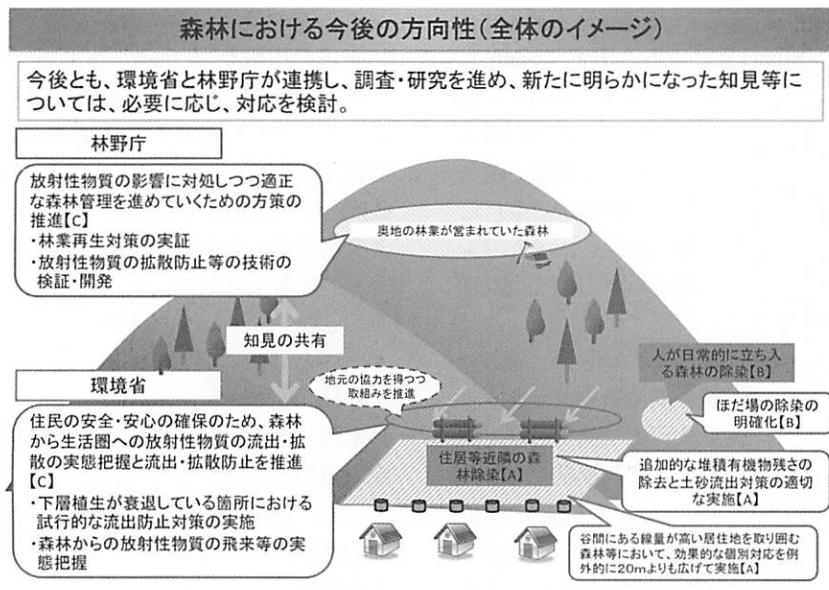


図5 森林除染や林業再生の方向性

きるようにすること等がポイントである。一方、奥地の森林については、森林からの流出は多くなく、放射性物質の多くが土壤の表層に分布していることを踏まえれば、間伐等の森林整備により土砂流出防備等の森林の機能を保全することが重要であり、前述の公的主体による間伐等の森林整備と放射性物質への対処を一体的に行う対策を推進するなど、流出・拡散抑制対策を進めるとしたことがポイントである。

今後は、まずは、これらの対策を速やかに実行に移していくことが肝要であるが、住居等近隣の森林やほど場の除染については、チップや客土での被覆など遮蔽による線量の低減方策や土砂流出が懸念される箇所での効果的な土壤保全措置を検証することに加え、奥地の森林については、林業再生対策の実施に当たり、間伐で林外へ搬出される木材や枝葉等を建築等の用材やバイオマス資源として有効利用することにより、放射性物質対策と復興の両面から推進していくことが重要と考えている。
(中村道人)

9. 終わりに

本シンポジウムは日本学術会議、日本農学アカデミー、日本土壤肥料学会の主催により、2013年9月13日（金）13時～17時に日本土壤肥料学会名古屋大会のプログラムとして名古屋大学東山キャンパス、IB電子情報館大講義室で約230名の出席者を得て開催された。

「津波からの復興」に関して2つの講演、「福島第一原子力発電所事故による放射能被害からの復興」に関する4つの講演と椿淳一郎氏によるコメントの後、4人の専門家あるいは関係者からキーノートコメントを頂いた。

西澤直子氏（日本学術会議農学委員会）からは「学術會議と復興農学」と題して、日本学術會議では、第22期学術の大型施設計画・大規模研究計画に関するマスター・プラン策定方針を公表し、学術大型研究計画の公募を行った後、

2013年6月末に「学術大型研究計画」としての採択課題が決定したこと、さらにその中から、25～30件程度を諸観点から速やかに実施すべき緊急性の高い「重点大型研究」として採択する予定で、「復興農学」研究計画の採択が大いに期待されていることが紹介された。松本聰氏（日本土壤協会）は、放射性セシウム(¹³⁷Cs)に汚染された土壤を永く地上に放置することは、人が文化を育む基盤そのものを喪失しかねず、¹³⁷Csの土壤中のこれまでの動態研究から、地表剥離した4,500万m³に達する膨大な量の土壤は、厳格なモニタリングの監視下、放射線遮蔽効果の大きい地下埋設することがもっとも安全で、現実的な方法であることを提案した。さらに、中西友子氏（東京大学大学院農学生命科学研究科）からは、東大農学部で40～50人の教員がボランティアベースで福島現地の調査研究を行っていること、牧場、圃場、演習林などで共同研究を進めており、その蓄積された成果を国内だけでなく海外に向けても発信してきたこと、さらに、3～4ヶ月ごとに開催してきた成果の報告会、講義と実習による教育プログラムの他、成果出版物[Nakanishi and Tanoi (2013)]と中西友子(2013)が報告された。森敏氏（東京大学名誉教授）からは、「復興の真実」と題して福島は、宅地も農地も除染が遅々として進まず、原子炉汚染水の排出も止まらず、14万人の避難住民の故郷帰還は進んでいない。風評被害を抑えるためには、作物や果樹の全量検査法の開発と実施を継続し、高放射線量地域は栽培禁止区域とすべきである。また、可食部へのCs吸収抑制のためには、K施用以外にCsを吸収しない作物品種を世界から導入し、またゲノム情報を駆使して国内的にも新品種を創製すべきこと、が紹介された。

加えて、質問等の時間制限を懸念し会場において事前に質問（アンケート）票を配布した。質問内容と回収した質問票からは、震災と放射線汚染による被害の解決に向けた

理系・社会系を含めた学会相互、さらには住民に始まる国民、行政、民間企業、海外研究者を加えた総合的連携の強化の重要性が浮き彫りとなった。（三枝正彦・木村眞人）

文 献

- 中西友子 2013. 土壌汚染－フクシマの放射性物質のゆくえ－. NHK ブックス, No.1208, p.224. NHK 出版、東京.
- Nakanishi T. M., and Tanoi, K. (Eds.) 2013. Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident. p. 204, SpringerJapan, Tokyo.
- 中尾 淳・山口紀子 2012. 放射性物質の土壌中での動き、最新農業技術土壌施肥、vol.4, p.49-57, 農文協、東京。

農研機構 2012. 玄米の放射性セシウム低減のためのカリ施用. 農研機構プレスリリース（2012年2月24日）. http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/press/laboratory/narc/027913.html

農林水産省農村振興局 2011. 農地の除塩マニュアル. <http://www.maff.go.jp/j/press/nousin/sekkei/pdf/110624-01.pdf>

佐野大樹・伊藤豊彰・安藤 正・南條正巳・三枝正彦 2010. 南東北地方の代表的な水田土壌の粘土鉱物組成. ペドロジスト, 54, 83-92.

参 考 资 料

- ふくしま再生の会：<http://www.fukushima-saisei.jp/>
横川華枝・溝口 勝 2013. 飯館村再生を目指す協働の取り立ち－ふくしま再生の会を事例に－. 土壌の物理性, 125, 53-54.