

地域バイオマスを活用した堆肥づくりと除染後農地土壌の肥沃度向上

溝口 勝*

〔キーワード〕：地域バイオマス，堆肥，除染，土壌肥沃度，福島国際研究教育機構

1. はじめに

2011年3月の原発事故では放射性セシウムによって山林・農地・海洋等が広範囲に汚染された。特に、汚染された農地では数年間にわたる除染工事の結果、被災地域の農家がようやく農業再開のスタートラインに立てるようになった。筆者は原発事故の3か月後から福島県飯舘村の現地に入り、NPO法人と協働（田尾，2020）で農民自身が実施できる農地除染法の開発やイネの栽培試験を重ね、避難指示解除後の農業再生の方策を探り続けてきた（溝口，2016）。そんな中、2020年6月に浜通り地域で農業復興に関して研究してきた研究者を中心に「復興農学会」が設立された（復興農学会，2020）。一方、復興庁は福島県浜通り地域に福島国際研究教育機構²⁾（以降、機構）を新設する準備を進めている。機構では農林水産業分野の参画も期待されている。農業の基本は土づくりにある。本論では、除染後の農地土壌の課題をレビューし、課題解決のための土壌再生とカーボンニュートラルの達成にむけた復興農学研究のシナリオについて述べる。

2. 除染後の農地土壌の課題

(1) 除染土の処理

農林水産省は原発事故から1年半後に農地除染対策の技術書（農林水産省，2013）を公開した。この技術書では農地の汚染程度に応じて、①表土剥ぎ取り、②水による土壌攪拌・除去、③反転耕による対策工法が推奨された。しかし、避難区域の一部では主に表土剥ぎ取りが行われ、汚染土が詰め込まれた黒いフレコンバックが“仮仮”置場と呼ばれる農地に山積みになった。福島県飯舘村ではこの除染土を中間貯蔵施設に運び込む予定で除染工事を進めたが、工事完了後も順番待ちの状態が続き、避難指示

解除後に村に戻ってきた村民には精神的な重荷になっていた。そこで、村と環境省は除染土をセシウム濃度で分別し除染土を帰還困難区域にしてされている長泥地区に埋設し、そこで花卉などを栽培する実験を進めている（環境省，2020a）。

除染土の地中埋設に関しては様々な議論があった（環境省，2020b）。しかし、溝口は独自の現地実験により埋設した除染土からほとんど放射性セシウムは漏洩しないこと、現在は理論曲線の通りに自然崩壊の過程にあることを実証し、今では埋設除染土から環境中への二次汚染はほとんどないと考えている（溝口，2020a）。

(2) 排水不良

除染工事では先の技術書に従い重機で表土を剥ぎ取り、その上に汚染されていない山土（真砂土）を客土して低くなった地盤高を戻す公共工事が行われた。このため重機の踏圧によって客土直下5cmくらいの深さに硬盤層が形成され、水を貯めるために20cmくらいの深さに人工的に作られる水田硬盤と二層で透水性が低下し、農地全体の排水性が悪くなった（溝口，2017）。上部の硬盤は耕作時に破碎すれば透水性は戻るので問題はないが、重機による作業で水田の50-60cmの深さにあった暗渠が壊れ、それも農地の排水不良の原因になっているようである。こうした農地では改めて暗渠の埋設工事が必要である。また公共の除染工事では空間線量率を短時間で低下させることを優先したために水田の畦畔は除染されなかった。

(3) 土壌肥沃度の低下

営農的には除染工事によって肥沃な栄養分を含む表土が失われたことが最大の問題である。除染後の農地土壌では有機物の含有量が低下し、作物の健全な生育が望めない。このため土壌中の有機物含有量を増やす必要がある。

土壌の有機物は生態系の中で多くの重要な役割を果たしている（松中，2018）。土壌の化学的緩衝

*東京大学大学院農学生命科学研究科（Masaru Mizoguchi）

材となり、植物栄養を供給し、土壌の物理性（土壌硬度・排水性・保水性）を改善し、土壌微生物の餌となる。地元農家は有機炭素などの栄養分を多く含む家畜糞尿と稲わらから堆肥を作り、土に鋤き込んで何世代にわたり土づくりをしてきた。しかし、原発事故後に畜産業が再開できたところが少なく、家畜糞尿の供給量も少ない状況にある。

伊井らは、2013年と2014年に農家とNPO法人が自分たちで除染した飯舘村の実験水田で収穫された玄米と稲わらの放射性セシウム濃度を継続的に測定した結果、2015-2019年の5年間で指数関数的に減少していることも明らかにした（Iiら, 2021）。

八島らは、福島県川俣町山木屋で家畜糞尿の堆肥の代わりに緑肥を使った栽培実験を行った結果、除染された農地ではより多くの有機物を土壌に施用する必要があること、土壌に化学肥料を施しても健康な植物が育ちにくいこと、牛糞を施用することで植物の根や地上部のバイオマスが増加することを報告している³⁾。

福島県農業総合センターは「除染後農地での地力回復マニュアル」の中で、牛糞堆肥を補てんした時の地力回復データを示しながら保肥力の改善と肥料分の補てんの重要性を指摘し、作物の生育ムラを少なくするために丁寧に耕うんするよう注意している（福島県農業総合センター, 2018）。

土づくりは農業の基本である。そのため農林水産省は農業生産力の増進と農業経営の安定を図ることと目的にした地力増進法（昭和59年法律第34号）などにに基づき、全国の農地の土壌改良資材と肥沃度に関する調査を長年実施してきた（農林水産省, 2019）。最近では内閣府が推奨するSociety5.0戦略に相まって、長年蓄積してきた土壌データをデジタル化してスマート農業の推進に活用するために、農林水産省生産局が2019年に土づくりコンソーシアム（農林水産省生産局, 2019）を設立し、土壌データの収集・蓄積・利用を通じて農家が土づくりを実践できる環境を提供し始めた。

しかし、福島県浜通り地域では除染と客土により表土の性質が大きく変化してしまったために土壌データベースを単純には利用できない。また、堆肥を作る過程や堆肥を土壌に鋤き込む過程でその地域に存在する放射性セシウムがどのように挙動するのかも解明されていない。浜通り地域で営農を再

開するためには、他の都道府県にはない独自の視点での土づくりが求められている。

(4) 耕作放棄と獣害

原発事故による避難区域では、一時的に人間が住んでいなかったために深刻な獣害（イノシシやサルによる農業被害）が顕在化している。藤本は、獣害があくまで「人間活動の低下」による動物の行動変化が原因であり、避難区域で営農を再開せずに耕作放棄地が増えると野生動物にとって生活しやすい環境が生まれ、残された農地での獣害リスクが高まるという悪循環が起きることを指摘している（藤本, 2016）。浜通り地域ではこれらの点を考慮して耕作放棄問題と共に総合的な獣害対策を考える必要がある。

(5) 森林から農地への放射性セシウムの流入リスク

浜通り地域の内陸部には森林が多い。原発事故で汚染された森林は、宅地や道路などの林縁から20mだけしか除染されなかった（環境省, 2020c）。そのため、せっかく農地を除染するのに台風や大雨によって森林から放射性セシウムが河川や農業用水を經由して農地に流入し、再汚染されることが懸念された。

しかし、これまでの研究で放射性セシウムは森林内を循環していること（環境省, 2020c）が明らかになった。山崎らはGISを用いて飯舘村の森林からの土壌流出量をシミュレーションした結果、森林内の土壌流出源は水流の近くに限定され、森林外への流出量がきわめて小さいことを報告している（山崎ら, 2019）。

水文学の分野では流域の水の動きを追跡するトレーサーとして放射性セシウムが使われていた。浜通り地域の森林には図らずも原発事故によりこのトレーサーがばらまかれたことになるが、逆に流域内のいたるところで放射性セシウム濃度を長期的にモニタリングする観測点を設置すれば世界の研究者がうらやむ森林水文学の実験フィールドになると思われる。

(6) 農業基盤の整備と農村コミュニティの崩壊

農業に水は不可欠である。そのため土地改良や圃場整備事業によって山に降った雨や雪がダムやため池に貯められ、農業用水として農業用水路を經由して農地に届けられる。また、大雨の際には余分な

水を農地から排水路に流すことで水田などの水管理が行われている。日本の農村ではこうした農業水利施設と農地がセットで整備された農業基盤によって農業生産が支えられ、洪水などの災害から農村地域が守られている。しかし、原発事故により農業水利施設も放射性セシウムに汚染された。森林に降った雨は森林の放射性セシウムを泥と一緒にダムやため池に運び、水底に堆積させた。また、除染工事の際に発生した汚染土は雨水と一緒に農業用水路や排水路の底に溜まった。農地の除染工事は終了したものの農村地域内の農業用水路や排水路には大雨のたびに土砂や泥が溜るリスクがある。自然減衰で濃度が低下したとはいえ、泥には放射性セシウムを固定した粘土分が多く含まれる。毎年春先に農家は自分でこの泥上げ作業をしなければならない。

原発事故前には農業用排水路の泥上げ作業や畦畔の草刈り作業など、農業基盤を含む農村地域の環境は集落単位の共同活動により保管理されてきた。しかし、原発事故で避難生活が続き、避難指示解除後も戻らない農家がいるために、何世代にもわたって形成された農村コミュニティが崩壊してしまった。近所に共に頑張る仲間がいることは農業復興には不可欠である。農業の担い手の問題も含めて農業基盤の維持管理と農村コミュニティの維持をどのように再構築すべきか頭の痛い問題である。

3. 土壌再生研究に基づく福島の農業復興シナリオ

農業の基本は土づくりにある。福島県には会津農書（1684年）に基づく堆肥づくりを実践するなど、伝統的な現場知を持つ農家も多い。また、最近では世界的に有機栽培に対する消費者の関心も高く、そうした時代の流れを酌んで農林水産省も2006年に有機農業推進法（農林水産省、2006）を制定し、日本国内における有機農業の推進を図り、堆肥による土づくりを推奨している。2021年5月には2050年までに有機農業の取組面積の割合を25%に拡大するという「みどりの食料システム戦略⁴⁾」を策定した。

2. (3) で指摘したように、浜通り地域の農地では除染工事により表土の栄養分（肥沃度）が失われた。この肥沃度を化学肥料で回復するには限界があるため長期的に地域内で発生する家畜糞尿と稲わらによる堆肥の投入が不可欠である。また、福島県は地形的に中山間地が多いという土地柄を考慮しな

がら伝統的な農業と新しい農業の融合技術の開発が必要である。

図1は、こうした背景を踏まえて筆者が試作した「土壌再生研究に基づく福島の農業復興シナリオ」である。以下ではこの図の内容を具体的に説明する。

(1) 土壌再生技術の開発

これは、表土剥ぎ等の除染工事で失われた地力を回復するために、地域内で産出・排出される落葉・木材・稲わら・家畜糞尿などのバイオマスを活用して堆肥をつくり、農地の初期栄養分や作目に応じて土壌に鋤き込み、最適な土壌（テラーメイド土壌）をつくる技術である。堆肥づくりでは、どのような有機質資材を、いつ、どのくらい、どのような方法で土壌に投入するかなどの因子に基づき、どのような機能や土壌改良効果を期待するのかを明確にすることが必要である（谷、2013）。それを具体的に実現する方法として、IoT土壌センサを用いた堆肥の熟度診断技術を開発することを提案したい。すなわち、堆肥づくりのノウハウを持つ農家を「堆肥ソムリエ」として認定し、そのソムリエが持つ経験知（水分量や温度、堆肥を混ぜ合わせるタイミングなど）をIoTセンサで数値化し、データを蓄積し、その経験知とデータを融合し、AIなどの最先端技術と組み合わせて堆肥生産を自動化するシステムを開発する。

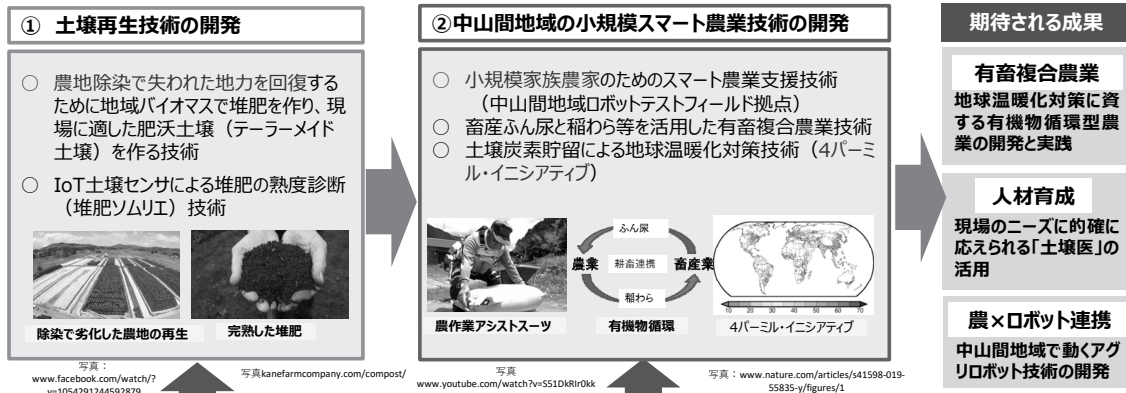
図2は堆肥の熟成過程の温度と水分量をIoTセンサで遠隔モニタリングした一例⁵⁾である。IoTセンサを活用することにより堆肥の温度と水分量が可視化され、非専門家でも切り返しのタイミングを判断できる可能性があることを示している。

(2) 中山間地域の小規模スマート農業技術の開発

農林水産省と内閣府はこれからの日本の農業を展開するための切り札として大規模な土地の集約とスマート農業を推進している。しかしながら中山間地の多い日本国内の一般農地では大規模なスマート農業を展開するのが難しい（溝口、2020b）。そこで、大規模なスマート農業ではなく中山間地でも適応できる小規模なスマート農業技術の開発が必要である。幸いなことに、機構の設置に先立ち、南相馬市では福島ロボットテストフィールドの整備が進められている。そこで、ロボット分野と農業分野とが連携して中山間地域にロボットテストフィールドを展開し、ここで小規模スマート農業を

SDGsはもう古い!

環境再生型農業 (Regenerative Agriculture)



研究拠点と大学との国際的連携による卓越した研究と教育、および研究を支える規制緩和

国際教育研究

復興農学分野

堆肥の熟度診断と放射性Csの作物吸収抑制技術に基づく有畜循環農業システムの構築

土壌科学分野

土壌の物理・化学・微生物の基礎に立脚したテラーメイド土壌の作出と応用技術の開発

規制緩和環境

- ★ 電波特区を活用してデジタル田園都市国家構想の実現 → 通信インフラ・地域バイオマス循環・獣害対策を完備した地方創生
- ★ 短半減期放射性物質を利用した放射線育種フィールド → 新機能をもつ土壌微生物・農作物・薬草・山菜きのご等の探索と作出等

研究交流・人的交流



国内外の大学

復興農学会参画大学
アメリカの大学との連携
・ワシントン州立大学
・オクラホマ州立大学
農村再生研究所 (Rural Renewal Institute)

国内外の研究所

農研機構の各研究所

篤農家・企業・NPO等

日本型シリコンバレー企業
省庁間の縦割り撤廃に期待

みどりの食料システム戦略 (農水省) との差別化を図る

図1 土壌再生研究に基づく福島の農業復興シナリオ (文献1の図を一部改変)

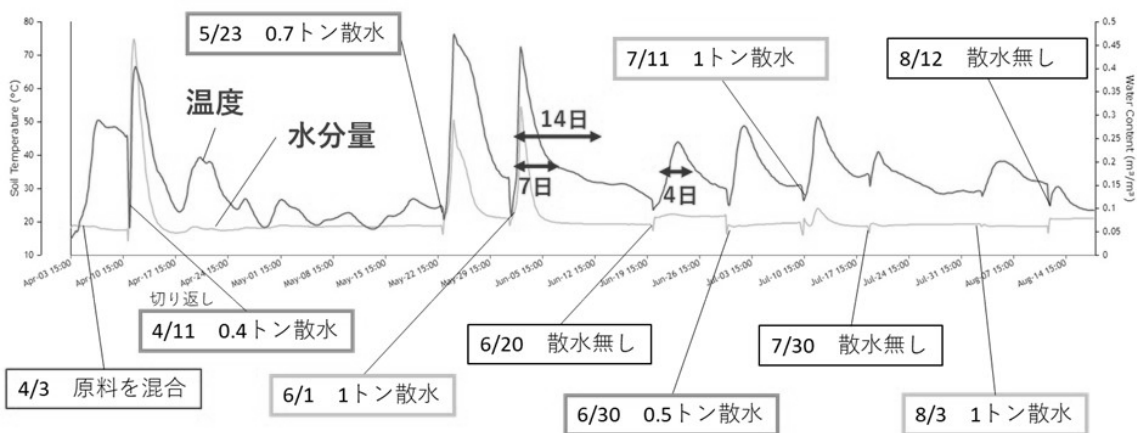


図2 堆肥の熟成過程の堆肥中の温度と水分量の遠隔モニタリング例⁵⁾

支援する技術を開発してはどうだろうか。

浜通り地区の中山間地には携帯電話すら入らない地域も多い。総務省は日本国内のすべてに 10km グリッドで 5G 基地局設置を展開しているが、山林

の多い浜通りで 5G などの高速大容量のインターネットサービスは使えない。そのために、木などの障害物があっても通信ができる補助的な技術開発が必要である。例えば、圃場整備事業の際に農業用

排水路に光ケーブルを敷設し、あるいは浜通り地域で電波特区を申請して山林でも利用可能な周波数帯を使って、中山間地域でも情報のやりとりができる小規模スマート農業の基盤技術の研究開発を行うのである。そこで開発されたロボットと通信の技術を使って、水田の水管理、畦畔の草刈り、獣害対策などができたら面白いだろう。こうした高度通信インフラが整備された新技術の開発拠点が浜通りの中山間地域にできれば、首都圏に住む若者も新しい価値観と夢を求めて集まってくる可能性がある。

(3) 国際的連携

堆肥による土壌再生は地球温暖化対策（カーボンニュートラル）にも貢献する。現在土壌科学の分野では土壌中の炭素蓄積に関する研究が注目されている（白戸, 2018）。「世界の土壌炭素を毎年 0.4% 増加させることができれば、大気 CO₂ 濃度の上昇を止められる」という計算に基づいて 2015 年の COP21 でフランス政府が提案した「4 パーミル・イニシアティブ」が採択されたからである。このように土壌再生研究には土壌科学分野との連携が不可欠である。

国際教育研究拠点（機構の前の呼称）構想ではアメリカのハンフォードサイトをモデルにした地域づくりが提案されていた。この地域には土壌浄化に取り組む科学技術研究所と関連する教育機関に加えて、ブドウ栽培農家やワイン関連の食産業企業が集まり、それらの相乗効果で地域全体が活気づいている。同様のことを福島県浜通り地域で行うとすれば、ワインに加えて、日本酒が有望である。福島県には酒蔵が多く、日本酒の品評会で毎年優勝している実績があるからである。そして、発酵醸造系の研究分野が新設される福島大学食農学類がこの地域連携に加わることで、福島はハンフォードサイト以上の「究極の地方創生モデル」になるだろう。

4. おわりに

福島国際研究教育機構は 2023 年 4 月に新設される。復興庁は 2030 年で解体されるが、機構で実施される研究開発テーマは福島復興再生特別措置法

に基づく「新産業創出等研究開発基本計画²⁾」（令和 4 年 8 月 26 日内閣総理大臣決定）に準じて決まろうとしている。この基本計画には重点 5 分野の一つを占める農林水産業の研究開発の内容として「スマート農業やカーボンニュートラル等を通じた地域循環型経済モデルの構築を目指し、……」という記述があるが、不思議なことに福島県の農業復興にとって最優先課題と思われる農地土壌の肥沃度向上に関する言及が一切ない。省庁間の調整の難しさが伺える。

本論で提案した農業復興のシナリオは復興農学会誌（創刊号）に掲載された。日本農学会の皆様が省庁間の綱引きに囚われることなく、現地農家の切実なる要望を素直に受け入れ「除染工事で失われた農地土壌の肥沃度向上×カーボンニュートラル」を意識しながら、福島県の農業復興を実現する新しい農学研究を創出してしてくれることに期待したい。

引用文献

本論文は復興農学会誌（電子版）に掲載された総説¹⁾の一部を改変し、そこに最新情報を追記したものである。そのため、重複した表現が多々あることをご容赦いただきたい。また本文中で“(溝口, 2020a)”のように記した文献については 1) の引用文献を参照されたい。

- 1) 溝口勝：原発事故で失われた土壌の再生に向けて－除染後農地の問題と復興農学－，復興農学会誌，Vol.1 No.1, p.28-34 (2021)。
- 2) 復興庁：福島国際研究教育機構，<https://www.reconstruction.go.jp/topics/main-cat1/sub-cat1-21/20210202160535.html> (2022 年 9 月 14 日閲覧)
- 3) 八島未和・斎藤葉瑠佳・菊地悠汰：除染による土壌肥沃度低下とその回復に向けた取り組み（第 1 報）－山木屋地区除染後農地における緑肥の分解と土壌微生物バイオマス炭素量への影響－，復興農学会誌，Vol.2 No.1, p.11-23 (2022)。
- 4) 農林水産省：みどりの食料システム戦略トップページ，<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/> (2022 年 9 月 14 日閲覧)
- 5) 内山健太郎・溝口勝・原拓朗：完熟堆肥製造における温度・水分・マトリックポテンシャル等の連続リモートモニタリングの有効性，2021 年度（第 1 回）復興農学研究会，<http://fukkou-nougaku.com/conf/> (2022 年 9 月 14 日閲覧)。