

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02438

研究課題名(和文) 土壌中の有機物に含まれる放射性セシウムの挙動に及ぼす生物的要因の解明

研究課題名(英文) Behavior of radioactive Cs in soil organic compounds by biological activity

研究代表者

信濃 卓郎 (Shinano, Takuro)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・東北農業研究センター・所長・部門長・部長・研究管理役等

研究者番号：20235542

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 28,600,000円

研究成果の概要(和文)：ルーピンを用いて根圏可視化のために地上部に $^{11}\text{C}$ を同化し、根圏に分泌される $^{11}\text{C}$ を解析する手法開発を確立した。この手法によりクラスター根の形成位置に強いシグナルが観察され、同化産物が短時間に根圏土壌に分泌されることが確認された。マメ科作物は放射性セシウム吸収能が強く、そのメカニズムに分泌化合物あるいはそれを利用した微生物活性の関与が推察された。カリウム栄養の違いによる根分泌物の解析手法の開発を進め、複数の化合物がカリウム欠乏によって分泌される可能性を示した。根圏微生物叢は同化直後に大きく変動をし、同化産物が根圏に対して直接的、間接的に強く働きかけている実態が示された。

研究成果の概要(英文)：Assimilation of  $^{11}\text{C}$  to shoot for visualization of the rhizosphere of the plant and utilized it to make clear the role of rhizosphere by the exact place of secretion to rhizosphere soil. In lupin, the signal which resisted the formation position of the cluster root was clearly observed, and it was confirmed that a part of assimilation product was secreted via a root in a short time in the rhizosphere soil translocated from the assimilated part in shoot. As for the Leguminous crops, absorbing ability of radiocesium under potassium deficient condition is known to be high. However, the detailed mechanism is unclear, but some compounds secreted by a root and/or microbial activity changed the physico/chemical properties of soil is guessed. Plural compounds except the organic acid were secreted by potassium deficient condition became clear. On the other hand, it became clear that microbial species composition was greatly fluctuated even if just after assimilation.

研究分野：土壌肥料学

キーワード：放射能対策 微生物群集構造 放射性セシウム 同化産物 根圏微生物

### 1. 研究開始当初の背景

放射性セシウムが残存している農耕地で農業を実施するためには、土壌中の交換性カリ濃度を十分に高める必要がある。しかしながら、特にマメ科などの一部の作物においては交換性カリ濃度を増強したにもかかわらず他の作物に比べて移行係数が高いことが明らかになっているが、そのメカニズムは不明であった。その原因として根圏での生物的作用が土壌の放射性セシウム動態に影響を与えていることが想定されるが、これまでメカニズム解明のための適切な手法が見出せずにいる。

### 2. 研究の目的

根圏を視覚的に明確にし、その部分を対象とした微生物群集構造解析を行う。また、カリウム栄養への応答機構として植物の根分泌物にどのような物質が含まれるのかを明らかにする。実際に汚染された圃場において、根圏における分泌活性が高いことが知られている（吸収能力が高いことが予想される）植物の栽培試験を行い、放射性セシウム吸収能の評価を行う。



図1：根圏域での物質動態の概念図を示す。根圏への分泌物は直接的あるいは間接的に土壌の元素動態に影響を与えていることが予想される。

### 3. 研究の方法

(1) 根圏を可視化する研究をポジトロンイメージング装置 (PETIS) を利用して行う。本手法は、 $^{11}\text{C}$  ( $^{11}\text{CO}_2$  (半減期 20 分)) をダイズの葉に投与すると同時に PETIS で  $^{11}\text{C}$ -光合成産物の体内移行をリアルタイムで可視化することが可能であり、更に  $^{11}\text{C}$  投与約 1 時間後に根と土壌を分離することで土壌中の  $^{11}\text{C}$ -分泌物の分布を視覚的に捉えることが可能である (図2)。当初は、ダイズ (*Glycine max*) で研究を進めていたが、根圏領域をより詳細に特定するため、2 年目より分泌活性の高いルーピン (*Lupinus albus*) を用いた試験に変更した。

(2) 根圏領域を特定して微生物群集構造を解析する。高い精度で根圏領域の特定が可能な条件のもと、栽培土壌及び非栽培土壌からそれぞれ 2cm×2cm 角の根圏土壌の採取を行った。得られた土壌から微生物核酸を取得し、その 16S rRNA のアンプリコンを作成して次世代シーケンサーで微生物群集構造の全体像を明らかにした。植物の根圏分泌物による微

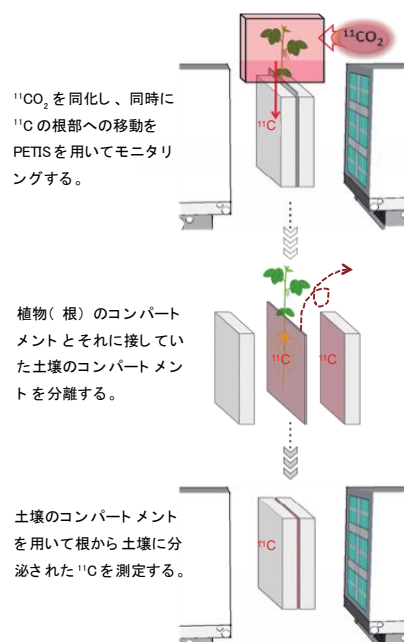


図2 PETISを用いた根分泌物の可視化方法

生物群集構造の変化について議論が可能である。

(3) カリウム栄養に対する根分泌物の応答を明らかにする。キャピラリー電気泳動/飛行時間型質量分析装置 (CE-TOF/MS) を用いて、有機酸などを含むアニオン画分を分析可能な実験手法を確立し、根からの分泌物の成分変動の解析を行った。このために人工気象器 (明期 16 時間 27°C) 内で、3 つのダイズ (*Glycine max*) 品種エンレイ、里のほほえみ (低カリウム耐性強) 及びタチナガハ (低カリウム耐性弱) をカリウム濃度が異なる 2 種類の土壌 (0(K0)及び 0.42(K2) g K kg<sup>-1</sup>) で栽培した。播種後 15 日目及び 25 日目に土壌溶液採取管を用いて根圏土壌溶液を採取し、CE-TOF/MS を用いて代謝産物を分析した。

(4) マメ科作物を用いて、放射性セシウム吸収の特徴を明らかにする。ダイズ (*Glycine max*, 品種タチナガハ) 及びルーピン (2016 年は *Lupinus hirsutus* の傘咲ルピナス (タキイ種苗)、2017 年は *Lupinus albus* の品種 Green Manure) をダイズの慣行施肥量 (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O それぞれ 5, 10, 10 kg/10a) にて栽培した。生育盛期の茎葉の放射性セシウム濃度を測定し、その蓄積性を評価した。2016 年度は単位根量あたりの茎葉における放射性セシウム濃度について比較した。区制は 3 反復の乱塊法とした。

上記と同じ圃場の土壌を用いたポット試験において、ダイズ 1 品種 (タチナガハ) 及びルーピン (*Lupinus albus*) 4 品種 (Green Manure, Energy, Luxor, Kievskij) を供試し、茎葉の放射性セシウムの濃度を比較した。3 反復の無作為化法とした。

作物による放射性セシウムの吸収は窒素施肥により促進され、その効果は硝酸態窒素に比べアンモニア態窒素の方が高いことが報告

されている。一方、カリ施肥は放射性セシウム吸収抑制に効果的であるが、ダイズなど一部の作物においては抑制効果が十分に発揮できていない。ダイズは開花期以降にカリウム放射性セシウムともに吸収量が著しく増加するため、開花期以降に根域の交換性カリウム含量を高めることができれば子実への放射性セシウムの移行を効率的に低減でき、かつカリ施肥量を減らすことができると考えられる。本課題では、2015年度にダイズの放射性セシウム吸収に及ぼす窒素施肥の影響を調査し、2016年度から2017年度にカリウム肥料の肥効発現パターンが放射性セシウム移行低減効果に与える影響を検証した。

#### 【2015年度】

福島県福島市飯野（土壌放射性セシウム濃度 1,212 Bq/kg）及び月舘（土壌放射性セシウム濃度 5,560 Bq/kg）の現地圃場に ①硫安区、②石灰窒素区(CN区)、③ウレアホルム区(UF区)、及び④硝化抑制区(UF-DCS区：硝化成抑制材 DCS 入り)の4処理区を設け、ダイズ(*Glycine max*)品種タチナガハを栽培した。②及び④では硝化が抑制されるため、土壌中のアンモニア態窒素含量が高く維持される。ダイズ子実の放射性セシウム濃度、並びに土壌の交換性カリ含量、アンモニア態窒素及び硝酸態窒素を分析した。

#### 【2016年度及び2017年度】

福島県伊達市霊山（栽培前交換性カリウム含量 9 mgK<sub>2</sub>O/100g、土壌放射性セシウム濃度 3,391 Bq/kg）の現地圃場で速効性カリ肥料（硫酸カリ）及び緩効性カリ肥料についてカリ施肥量を3水準（慣行量、慣行の2倍量及び4倍量。2016年度は4倍量区無し）設け、ダイズ(*Glycine max*)品種タチナガハを栽培した。緩効性肥料は、2016年度及び2017年度でそれぞれリニア70日タイプ（ジェイカムアグリハイコントロールカリ2038）及びシグモイド100日タイプ（ジェイカムアグリ被覆塩化加里S100）を用いた。生育ステージごとのダイズ地上部の放射性セシウム及びKの蓄積量、並びに土壌中の交換性カリウム含量及び交換性放射性セシウム含量を分析した。

#### 4. 研究成果

(1) 図3で示されているように、ルーピンを用いることで地上部に同化された<sup>11</sup>Cが根部へ移行・分配される過程と、根圏土壌に分泌された様子を明瞭に可視化できた。この時に

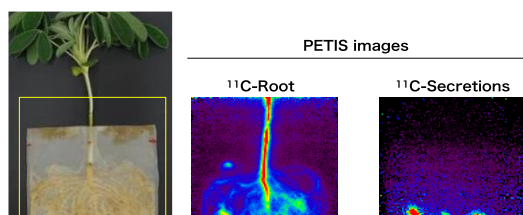


図3：ルーピン品種 Energy を用いて根のコンパートメント（中央）及び根圏土壌のコンパートメント（右）における<sup>11</sup>C-シグナルの分布を可視化した。

<sup>11</sup>C 光合成産物の根への分配量と土壌への分泌量の間に関連がないスポットが存在することから、光合成産物の根への分配と土壌への分泌は異なるメカニズムで行われていることが明らかになった。根圏土壌の<sup>11</sup>C強度は根からの単純な漏出ではなく、植物側が何らかの化合物を積極的に分泌するメカニズムが存在することが推定された。さらに根への分配量との相関が少ないスポットにおいては、呼吸によって放出された二酸化炭素が土壌に吸着されている可能性も低いと考えられる。

(2) 図4の上と中央はそれぞれ根及び根圏土壌における<sup>11</sup>C活性の分配の割合を相対的に示しており、根の活性と独立して分泌活性が高いことを数値として確認した。また、図4下はこの時点の同様の土壌画分における16S rRNAの解析から細菌の群集構造解析を行った結果の一部を示している。これは、ガンマプロテオバクテリアに属する細菌の割合を示しているが、根への<sup>11</sup>C活性の分配割合とは相関が低く、土壌へ分泌した<sup>11</sup>C活性の分配割合と相関が高かった。これらのことから、光合成産物の分泌活性が高い根圏土壌において、特定の微生物の存在割合が高まることが示された。



図4：<sup>11</sup>Cの根への分配（上）、根圏土壌への分配（中）と根圏土壌における全細菌に対するガンマプロテオバクテリアに属する細菌の割合（下）の分布をヒートマップを用いて示す。赤色度が高いほど各々の相対的割合が高いことを示す。各ブロックは、2 cm×2 cm区画を示す。図3右で示した分泌物の存在が確認される領域を対象とした。

(3) ダイズのカリウム栄養状態が根圏土壌溶液中の代謝産物に及ぼす影響に関しては、K2区（標準区）の地上部乾物重の相対値からみた低カリウム耐性は里のほほえみ>タチナガハの順であった。根圏土壌溶液から47の代謝産物が検出された。播種後15日目の里のほほえみの根圏土壌溶液ではK0区で8個の代謝産物のレベルが上昇し、4個の代謝産物のレベルが低下した。25日目では4個の代謝産物のレベルが上昇し、9個の代謝産物のレベルが低下した。播種後15日目のタチナガハの根圏土壌溶液ではK0区で6個の代謝産物のレベルが上昇し、1個の代謝産物のレベルが低下した。25日目では9個の代謝産物のレベルが上昇し、1個の代謝産物のレベルが低下した。両品種でグルタミンのレベルが上昇した。変化した代謝産物の数は里のほほえみでタチナガハより多かった。

(4) 圃場試験において、生育盛期の茎葉の放



放射性セシウム濃度はルーピンが高く、ダイズはルーピンの44%(2016年)及び11%(2017年)だった(表1)。ルーピンの茎葉の放射性セシウム濃度の年次間差は、品種の違いが影響している可能性が考えられる。単位根量あたりの茎葉放射性セシウム量はルーピンがダイズの約4倍の値を示したことから、ルーピンの根はダイズのそれと比較して高い放射性セシウム吸収能を有することが示唆された。ポット試験において、ルーピンの茎葉の放射性セシウム濃度の品種間差は判然としなかったが、いずれの品種もダイズよりも高い放射性セシウム濃度を示した(表2)。以上の結果から、ルーピンはダイズよりも高い放射性セシウムの移行性を有することが示された。

表1 圃場試験におけるダイズとルーピンの放射性セシウムの蓄積性 数値は平均値±標準誤差(n=3) \*\*、\*、+はそれぞれ1%、5%、10%水準で有意であることを示す

	2016		2017	
	茎葉 <sup>137</sup> Cs濃度 (Bq/kg)	単位根量あたり茎葉 <sup>137</sup> Cs量(Bq/g)	茎葉 <sup>137</sup> Cs濃度 (Bq/kg)	単位根量あたり茎葉 <sup>137</sup> Cs量(Bq/g)
ダイズ	243.1 ± 14.6	1.66 ± 0.21	126.6 ± 21.4	
ルーピン	555.8 ± 114.7	6.98 ± 1.38	1165 ± 72.8	
	+	*	**	

表2 ポット試験におけるダイズとルーピンの放射性セシウム濃度 数値は平均値±標準誤差(n=3) 同一の英文字間には Ryan-Einot-Gabriel-Welsch の多重検定で有意差がないことを示す

	品種名	茎葉 <sup>137</sup> Cs濃度(Bq/kg)
ダイズ	タチナガハ	486.3 ± 64.7 <sup>a</sup>
ルーピン	Energy	1375.5 ± 522.6 <sup>ab</sup>
ルーピン	Kievskij	1615.8 ± 311.6 <sup>ab</sup>
ルーピン	Luxor	2212.6 ± 175.8 <sup>b</sup>
ルーピン	Green Manure	2602.9 ± 432.3 <sup>b</sup>

大豆の圃場栽培結果については、**【2015年度】**

飯野圃場において石灰窒素区の土壌中のアンモニア態窒素含量は開花期まで他の3処理区に比べ高く、逆に硝酸態窒素含量は低く推移した(図6)。石灰窒素区における硝化抑制が確認できた一方で、硝化抑制区では肥料中に硝化抑制材 DCS が含有されていたにもかかわらず硝化抑制されなかった(図6)。いずれの圃場ともに土壌中交換性カリ含量が高く、ダイズ子実の放射性セシウム濃度に処理間で有意差がなかった(表3)。カリの移行抑制効果が十分に発揮されている条件下では、土壌中の窒素の形態はダイズ子実中の放射性セシウム濃度に明瞭な影響を与えないと考えられた。

**【2016年度及び2017年度】**

年度によらず子実の放射性セシウム濃度は肥効発現パターンよりもカリ施肥量に強い影響を受け、カリ施肥量が増えると有意に低下した(表4)。同じ施肥量で比較すると移行低減効果は緩効性よりも速効性の方が著しく高かった(表4)。生育後半のカリ供給を目的とした本試験で、想定されたほどの効果が見い

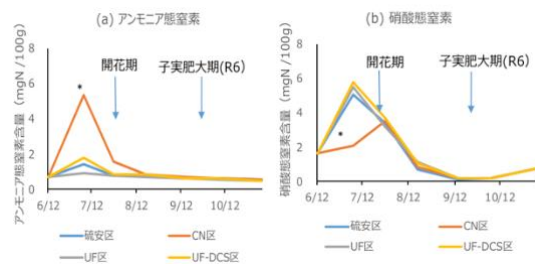


図6 生育を追ったアンモニア態窒素と硝酸態窒素の挙動

表3 ダイズ子実の放射性セシウム濃度

処理区	2016年度	2017年度
無カリ区	67.71 (100)	41.8 (100)
速効性標準区	41.63 (61)	30.9 (74)
速効性2倍量区	30.08 (44)	23.6 (57)
速効性4倍量区	-	11.8 (28)
緩効性標準区	55.65 (82)	38.8 (93)
緩効性2倍量区	41.56 (61)	35.2 (84)
緩効性4倍量区	-	27.4 (66)

緩効性肥料は、2016年度および2017年度でそれぞれリニア70日タイプ(ジェイカムアグリハイコントロール2038)およびシグモイド100日タイプ(ジェイカムアグリ被覆塩化加里S100)を用いた。表中の括弧内の数値は無カリ区を100とした場合の相対値。

表4 ダイズの放射性セシウム濃度(Bq/kg)

処理区	飯野	月舘
硫安区	1.9	16.8
CN区	1.8	-
UF区	1.7	22.2
UF-DCS区	2.3	18.9

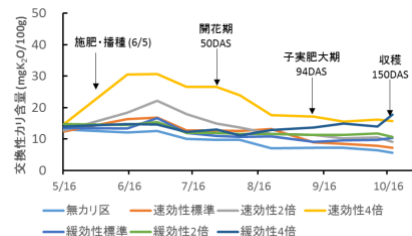


図7 土壌中の交換性カリ濃度(2017年度)

だせなかったのは、2016年度及び2017年でそれぞれ肥効発現パターンとカリウムの吸収パターンの不一致及び夏季の低温によりカリウムの肥効発現が著しく遅れたこと(図7)が要因と考えられた。

考察

以上の研究により、短半減期の放射性炭素核種である <sup>14</sup>C とルーピンを組み合わせ、図2で示したように根箱と PETIS を用いることで、実際に根からの分泌物が土壌に供給されている領域の視覚化に成功した。さらにこの領域の微生物叢解析を行ったところ、明確な違いが生じていることから、微生物群集構造のレベルにおいても極めて迅速に応答が認められ、今後の機能性解析においてもピンポイントにターゲットを絞ることが可能となった。このような特定の領域への重点的な分泌物の供給は、根による土壌の無機物・有機物からの直接的あるいは間接的な元素吸収に重要な

役割を果たしていることが推定される。実際に粘土鉱物に取り込まれたセシウムを解離して吸収するためにはなんらかの化合物による作用が想定され、今回カリウム欠乏のダイズから複数の化合物が分泌されていることが示されており、今後はその機能解析に取り組む。圃場レベルではダイズ、ルーピンの放射性セシウムの吸収能は高いことが知られているが、ルーピンでは大豆よりも3-5倍も吸収能が高いことが示された。このことから根による放射性セシウム吸収能は根の分泌能力とも密接に関係していることが推定された。これらの基礎的な知見に加えて、ダイズ栽培における子実への放射性セシウムの取り込み抑制技術の開発にカリウムの効果的な施肥方法の取り組みを行った。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

- (1) Kubo, K., Saito, T., Shinano, T. (他7名) Potassium behavior and clay mineral composition in the soil with low effectiveness of potassium application. *Soil Science and Plant Nutrition*, 62, 2017, 265-271. (査読有)  
<https://doi.org/10.1080/00380768.2017.1419830>
- (2) Shinano, T. Mitigation of radioactive contamination from farmland environment and agricultural products. *Modern Environmental Science and Engineering*, 2, 2016, 454-461. (査読有) DOI: 10.15341/mese(2333-2581)/07.02.2016/003
- (3) Watanabe, T., Shinano, T. (他8名) The ionic study of vegetable crops. *PLoS One*, 11, 2016. (査読有)  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160273>
- (4) Watanabe, T., Shinano, T., (他6名) Distribution of minerals in young and mature leaves of different leaf vegetable crops cultivated in a field. *Open Journal of Plant Science*, 1, 2016, 5-9. (査読有) DOI: 10.17352/ojps.000002
- (5) Matsunami, H., Murakami, T., Fujimura, H., Shinano, T. Evaluation of the cause of unexplained radiocaesium contamination of brown rice in Fukushima 2013 using autoradiography and gamma-ray spectrometer. *Scientific Reports*, 6, 2016. (査読有) DOI: 10.1038/srep20386
- (6) Watanabe, T., Shiano, T., 他3名. Application of ionomics to plants and soil in fields under long-term fertilizer trials. *SpringerPlus*, 4, 2015, 781. (査読有)  
<https://doi.org/10.1186/s40064-015-1562-x>
- (7) 信濃卓郎、農産物への放射性セシウムの移行抑制対策、*JATAFF*、3巻、2015、24-29 (査読無)

(8) 信濃卓郎、農業再建への研究者としての取り組み、*科学技術コミュニケーション*、17巻、2015、85-91. (査読有)

[https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/59584/1/web\\_Costep17\\_8.pdf](https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/59584/1/web_Costep17_8.pdf)

[学会発表] (計24件)

- (1) Saito, T. Effect of potassium fertilizer application method on uptake of Cs-137 in brown rice. Symposium: New aspects in Rhizosphere Research. 2018.2.26
- (2) Tawaraya, K. Detection of metabolites in rhizosphere of soybean under different potassium status. Symposium: New aspects in Rhizosphere Research. 2018.2.26
- (3) Unno, Y. Visualization and evaluation of root and secretion activities by using  $^{11}\text{CO}_2$  and PETIS and its influence on rhizosphere bacterial community structure. Symposium: New aspects in Rhizosphere Research. 2018.2.26
- (4) Yin, Y. A method for visualizing and evaluating secretions released from root to soil using  $^{11}\text{CO}_2$  and a positron-emitting tracer imaging system (PETIS). Symposium: New aspects in Rhizosphere Research. 2018.2.26
- (5) Saito, T. Verification of applying slow-release potassium fertilizer to nursery boxes a labor-saving method of lowering Cs-137 concentration in brown rice. *ICOBTE* 2017.7.16-20.
- (6) 海野佑介、 $^{11}\text{CO}_2$ とポジトロンイメージング技術による根分泌物の分布及び分泌活性の評価とその根圏微生物群集構造に与える影響、植物微生物研究会第27回研究交流会、2017.9.20-22
- (7) 海野佑介、植物根から供給される光合成産物量の違いが根圏微生物群集構造に与える影響の評価、日本土壌肥料学会、2017.9.5-7
- (8) 尹永根、RIイメージング技術による光合成産物の根への転流及び根圏への放出の可視化、日本生物環境工学会、2017.8.30-9.4
- (9) 久保堅司、そばにおける対策と問題点、農研機構シンポジウム「放射性セシウム吸収抑制対策の今後を考える」、2017.12.4
- (10) 久保堅司、ペドロジストと取り組む作物への放射性セシウム移行要因の解析、地域レベルでの放射性セシウム移行リスク評価に向けたワークショップ、2017.7.10
- (11) 久保堅司、物理的除染後圃場における放射性セシウムの土壌中の動態と畑作物への移行に影響する要因の解析、日本土壌肥料学会、2017.9.5-7
- (12) Shinano, T. Radioactive cesium behavior in agricultural land, 2<sup>nd</sup> International Caparica Conference on Pollutant Toxic Ions and Molecules, 2017.11.6-11.9

- (13) Shinano, T. Mid- and Long-term recovery of agriculture from contaminated field by radionuclides in Fukushima. ICOBTE, 2017.7.16-20
- (14) Shinano, T. Secondary contamination of radioactive cesium to the plant in coastal area of Fukushima in 2013 and aftermath. International Conference on Environmental Radioactivity, 2017.5.29-6.2
- (15) Shinano, T. The role of potassium for the remediation of radioactive cesium contaminated agricultural land: Fate aftermath in Fukushima. Frontiers of Potassium Science Conference, 2017.1.25-27
- (16) Shinano, T. Mitigation of radioactive cesium transfer from soil to plant. FAO/IAEA-NARO Technical Workshop on Remediation of Radioactive Contamination in Agriculture, 2016.10.17-18
- (17) Shinano, T. The situation of radioactive contamination in crops after five years of FDNPP accident. 日本地球惑星連合会議, 2016.6.5
- (18) 尹永根, ダイズ根が分泌した有機物のポジトロンイメージング技術による可視化と定量解析、第一回 QST 高崎研シンポジウム、2017.1.26
- (19) 齋藤隆, 福島県内における放射性物質に関する研究(第 35 報)カリ肥料の苗箱施用による放射性セシウム吸収抑制効果、日本土壌肥料学会、2016.9.20-22
- (20) 尹永根, ダイズ根が根圏土壌に分泌した有機物の可視化と定量解析 (3) 水耕培地への分泌物のリアルタイムイメージング、日本土壌肥料学会、2016.9.20-22
- (21) 尹永根, 異なる培地条件における根の分泌物のポジトロンイメージング技術による可視化、アグリ・バイオ公開シンポジウム、2016.7.28
- (22) 尹永根, ダイズ根が根圏土壌へ分泌した有機物の可視化と定量解析 (2) 異なる培地条件における分泌物の分布の比較一、日本土壌肥料学会、2015.9.9-11
- (23) 尹永根, 根系が土壌に分泌した有機物のポジトロンイメージング技術による可視化、公開シンポジウム「アグリバイオへの理工学的なアプローチを目指して」、2015.7.17
- (24) 尹永根, ポジトロンイメージング (PETIS) によるダイズ根圏分泌物の定量的解析、第 52 回アイソトープ・放射線研究会、2015.7.8-10

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

信濃 卓郎 (SHINANO, Takuro)  
国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・東北農業研究センター・所長・部門長・部長・研究管理役等  
研究者番号：20235542

### (2) 研究分担者

久保 堅司 (KUBO, Katashi)  
国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・東北農業研究センター・主任研究員  
研究者番号：20446470

### (3) 研究分担者

尹 永根 (YIN, Yonggen)  
国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所・放射線生物応用研究部・主任研究員 (定常)  
研究者番号：50609708

### (4) 研究分担者

俵谷 圭太郎 (TAWARAYA, Keitaro)  
山形大学・農学部・教授  
研究者番号：70179919

### (5) 研究分担者

松波寿弥 (MATSUNAMI, Hisaya)  
国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・東北農業研究センター・グループ長  
研究者番号：80504068

### (6) 研究分担者

海野 佑介 (UNNO, Yusuke)  
公益財団法人環境科学技術研究所・環境影響研究部・研究員  
研究者番号：00522020

### (7) 研究分担者

齋藤 隆 (SAITO, Takashi)  
福島県農業総合センター・浜地域農業再生研究センター・主任研究員  
研究者番号：30504071