

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02938

研究課題名（和文）作物の放射性セシウム吸収に関わる地質学的要因の解明

研究課題名（英文）Elucidation of geological factors related to radiocesium absorption by crops

研究代表者

根本 圭介（Nemoto, Keisuke）

東京大学・大学院農学生命科学研究科（農学部）・教授

研究者番号：40211461

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：2011年の福島原発事故によるフォールアウトにより、阿武隈地域を中心に各種作物の放射性セシウム吸収が問題となってきた。事故直後から継続してきたモニタリングを通じて、作物の放射性セシウム吸収が土壌の母材の影響を強く受けることがあることが明らかとなったことから、本研究では、この問題をより深く考究した。母材の違いが放射性セシウム吸収に与える影響はイネ・トウモロコシで顕著である一方で、ソバ・ワラビでは軽微であった。母材の違いは、母材からのカリウムの放出と、放出されたカリウムの粘土粒子による保持のバランスに大きく影響していた。最後に、イネの放射性セシウム吸収の機構を、QTLの候補遺伝子から推定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1) 原子力発電所事故による放射性物質のフォールアウトという未曾有の状況と環境を対象として、水田と森林における土壌-植物間の放射性セシウムの移行を、地質条件（土壌の母材の違い）に結びつけて解析した。
2) 得られた知見を踏まえ、セシウム吸収抑制対策としてのカリウム増肥を止めた後の稲の放射性セシウム吸収のリスク評価に活用すべく、福島県伊達市内水田のセシウム吸収リスクマップを作成した。
3) 現地のフォールアウト水田を使って、多様な品種組み合わせを活用しながらイネの放射性セシウム吸収に関するQTLを網羅的に同定し、そのメカニズムを推定した。

研究成果の概要（英文）：Due to the fallout from the Fukushima nuclear accident in 2011, the absorption of radioactive cesium by various crops has become an issue, particularly in the Abukuma region. Through the monitoring that has continued since immediately after the accident, it has become clear that radiocesium absorption by crops can be strongly affected by the parent material of the soil, and this issue was investigated in depth in this study. First, the influence of differences in parent material on radiocesium absorption was pronounced in rice and maize, while it was minor in buckwheat and bracken. The difference in the parent material had a significant effect on the balance between the release of potassium from the parent material and the retention of the released potassium by the clay particles. Finally, the mechanism of radiocesium absorption in rice was inferred from candidate genes for QTL.

研究分野：栽培学

キーワード：作物 放射性セシウム 地質的要因

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

福島原発事故から8年が過ぎ、セシウム吸収抑制対策としての水田へのカリウム無償散布が打ち切れようとしている一方で、避難区域への帰還が始まり、予期せぬ作物のセシウム吸収被害の発生への懸念が集積、地域ごとの作物のセシウム吸収リスクを評価し、被災地をゾーニング(区分け)した上で、ピンポイントの対策を講じていくことが喫緊の課題となっていた。

2. 研究の目的

本研究の代表者は、2013年度～2017年度に実施した基盤研究(A)「水田生態系における放射性セシウムの動態とイネへの移行の解明」(代表者：根本圭介)において、今回の原発被害の主要被災地である阿武隈地域の各所の土壌からの「放射性セシウム吸収リスク」をイネやソバのポット試験で生物検定したところ、ある作物が放射性セシウムを吸収し易いかどうかは「作物と土壌タイプの組合せ」で決まり、その場合の土壌タイプを決める主要な要因として「土壌の母岩」の種類(花崗岩や玄武岩など)が重要な役割を果たしていることを知った。本研究では、このメカニズム解明を試みるとともに、地質情報と作物別の放射性セシウム吸収リスクから被災地の農地のゾーニングを行い、震災復興に向けた農政や営農に資することを目的とした。

3. 研究の方法

- (1) 各種作物の放射性セシウム吸収に関する土壌特性の探索：ソバ、トウモロコシ、イネ、ワラビを用い、土壌から植物体への放射性セシウムの移行と土壌特性との関係を、阿武隈地域を対象に、表層地質の異なる多様な山林土壌を用いたポット試験によって比較・検討する。
- (2) 阿武隈地域の山林土壌中のカリウムの動態の解明：阿武隈各所の森林土壌の交換性カリウム濃度の決定機構を、母材からのカリウムの放出と、放出されたカリウムの粘土粒子による保持のバランスから考究する。また、その結果を踏まえて、作物吸収のリスクマップを作成。
- (3) QTL解析を用いたイネのセシウム吸収機構の解明：様々なイネ品種に由来するQTLマッピング集団を用いて、イネにおける放射性セシウム吸収の解析を試みる。事故当年に暫定規制値を超える玄米が収穫された現地水田を使い、マッピング実験を行う。

4. 研究成果

(1) 各種作物のセシウム吸収に関する土壌特性の探索：阿武隈地域は、白亜紀花崗岩を表層地質とする地域と第三期玄武岩からなる地域があり、これらの母材から形成された山林土壌は大きく異なる土壌特性を持つ。基盤研究(A)「水田生態系における放射性セシウムの動態とイネへの移行の解明」(2013年度～2017年度)で調べてきたイネでは、土壌の交換性カリウム濃度が同じであればイネへの移行係数は玄武岩由来の土壌のほうが明らかに高くなる。そこで、ソバ、トウモロコシ、イネ、ワラビを用い、土壌から植物体への放射性セシウムの移行と土壌特性との関係を、阿武隈各所の山林土壌を用いてポット試験によって検討した。その結果、トウモロコシはイネと同一傾向を示す一方で、ソバ・ワラビへの放射性セシウムの移行には土壌の母材の種類に関わらず、土壌中の交換性カリウムの濃度が一義的に重要であることが明らかとなった。

(2) 阿武隈地域の山林土壌中のカリウムの動態の解明：伊達市内の山林土壌の交換性カリウムの様相を、上記のポット試験に使った土壌を含む67地点の山林土壌を対象に検討した。交換性陽イオンは粘土鉱物の負電荷によって可逆的に保持され、アンモニウムイオン以外は土壌中の鉱物体から放出される。67地点の山林土壌の交換性カリウム濃度は、乾燥土壌100gあたり8mg～140mg K₂O/乾燥土壌100gにわたっていた。このような変異が、“鉱物体から放出されるカリウムイオンのうち、どの程度が雨水による溶脱に耐えて粘土鉱物の表面に保持され続けるか”という観点から整理できないかと考えた。熱硝酸処理によって土壌から遊離するカリウムイオン(緩効性カリウム)を、“粘土鉱物から放出されるカリウムイオンの量”の指標と見なし、交換性カリウム量との関係を調べると、67地点は明確な2グループに分かれた。1つは、玄武岩を表層地質とする地域の土壌で、緩効性カリウムは5～50mgと低かったが、交換性カリウムは緩効性カリウムに比例し9～140mgと大きく変化していた。もう1つは花崗岩が表層地質の地域から得られた土壌で、緩効性カリウムは50～380mgと高かったが、交換性カリウムは緩効性カリウムとは関係を示さず、40mgを超えなかった。なお、緩効性カリウムが低い地点の大半は玄武岩地帯と花崗岩地帯の境界の土壌だった。このように、玄武岩質土壌と花崗岩質土壌はどちらも交換性カリウム濃度が低い値を取り得るものの、玄武岩質土壌では土壌の交換性カリウム濃度には粘土鉱物からのカリウムイオンの放出量が、一方花崗岩質土壌では粘土鉱物の陽イオン保持能力が重要である、つまり、土壌の交換性カリウム濃度の律速要因は土壌の母材によって異なると考えられた。



図1 土壌採取地点の様子 左：伊達市うるしばう（花崗岩）；右：伊達市足駄木（玄武岩）

なお 2020 年度には、福島県伊達市と連携し、同市内の水田 90 カ所および山林 70 カ所を対象として土壌の緩効性カリウムと交換性カリウム濃度を指標として母材を推定、セシウム吸収リスク評価を行った。その結果を事故当年の伊達市における玄米のセシウム吸収被害の分布と比較したところ、事故当年に 300Bq/kg を超える玄米が収穫された水田の分布は、今回の分析によりリスクが高いと判断された地域とよく一致しており、本リスクマップの有用性が確認できた。

(3) QTL 解析を用いたイネのセシウム吸収機構の解明：セシウムは植物にとって必須元素ではなく、同族の必須元素の一つであるカリウムの吸収機構によって吸収されると考えられてきた。代表的なカリウム吸収機構には、能動的なトランスポーターを介した経路と、受動的なチャンネルを介した経路がある。しかし、これらの機構がイネのセシウム蓄積とどのように関わっているかを、品種間差異を利用して遺伝的に検討した研究はない。そこで、様々な品種に由来する QTL マッピング集団を用いて、イネにおける放射性セシウム吸収の解析を試みた。

まず、放射性セシウム蓄積量の品種間差を調べた。用いた圃場は福島県北部の農家水田であるが、この水田は事故年に玄米 1 kg あたり 500 Bq 近くが収穫された水田であり、1) 長年にわたってカリウム施肥をほとんど行っておらず土壌中の交換態カリウム濃度が極端に低い、2) 土壌が玄武岩質であることから土壌中の雲母鉱物の含有量が少ないなど、土壌から植物への放射性セシウムの移行を促す多くの条件が備わっていた。この水田でジャポニカ 8 品種、改良インディカ 5 品種、アウス 2 品種) を 2 年間栽培した。収穫した玄米の放射性セシウム濃度は 15 品種の間で約 4 倍の差異を示した。改良インディカ品種は最も高いセシウム蓄積量を示し、ジャポニカとアウスは、多少のばらつきはあるものの全体的に蓄積量が低かった。

まず、改良インディカ品種のセシウム蓄積量が高い原因を明らかにするために、インディカ改良品種タカナリとジャポニカ品種 Lemont の組み合わせでセシウム蓄積量の QTL 解析を行っている。両品種の交配に由来する組換え近交系を上記の圃場で栽培し、玄米中の放射性セシウム濃度の QTL を調査した結果、第 4 染色体上の高親和性カリウムトランスポーター遺伝子 *OsSHAK1* の近傍に QTL が検出された。実際、*OsSHAK1* 遺伝子のハプロタイプを調べたところ、Lemont は 1 個のアミノ酸変異を持っていることが確認されたが、上記 15 品種全体について *OsSHAK1* のハプロタイプとセシウム蓄積量との関係を調べたところ、多様な品種におけるセシウム蓄積の大枠を決めるほど、その対立遺伝子間の機能の違いは大きくないと考えられた。

つづいて、このような疑問を、同じく改良インディカとジャポニカの組み合わせである伽耶と熱研 2 号の組み合わせを使って検討した。前章と同一の水田で組換え近交系を栽培し、玄米の放射性セシウム濃度の QTL を調べた。予想通り、4 番染色体上の高親和性カリウムトランスポーター遺伝子 *OsSHAK1* の近傍に QTL が検出されたが、さらに大きな作用力をもつ QTL が第 6 染色体に検出された。この QTL 領域を部分染色体置換系統で絞り込んだところ、候補領域には、カリウム/ナトリウム共輸送体をコードする *HKT* グループ II 遺伝子が少なくとも 2 つ含まれていることが判明した。

最後に、アウスとジャポニカの間で QTL 解析を行った。前述の水田で、Kasalath と Gharib の交配に由来する組換え近交配系を栽培し、玄米の放射性セシウム濃度の QTL を調べたところ、第 2 染色体上に作用力の強い QTL が検出された。QTL-seq 解析によって狭めた候補領域には、ともに陽イオンチャンネルをコードする *OsKAT3* と *OsCNGC1* の 2 遺伝子が座乗していた。植物体のイオノームを対象とした QTL 解析を同時に行ったところ、この候補領域には、カリウムではなくナトリウム蓄積の QTL が検出された。両遺伝子のハプロタイプを調べたところ、Kasalath は、Gharib を含めた他品種には見られないアミノ酸変異を両遺伝子にそれぞれ有していたが、どちらが原因遺伝子かについては将来の課題として残った。

以上のように、イネは、カリウム以外の陽イオンを含む様々なイオンの吸収機構によってセシウムを吸収していることが示唆された。最終的な遺伝子の特定にはなお多くの実験が必要であるが、実際に高度の放射性セシウム汚染米が収穫された現地水田で、特別な許可のもとに低カリウム条件を維持して得られた唯一無二の調査であることを最後に強調しておきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Siyu Gong, Hideki Ishii and Keisuke Nemoto	4. 巻 24
2. 論文標題 Radiocaesium accumulation in rice cultivars in a low-potassium paddy field in Fukushima	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plant Production Science	6. 最初と最後の頁 530-535
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/1343943X.2021.1886590	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 根本圭介
2. 発表標題 被災地水田におけるイネのセシウム吸収被害のモニタリング
3. 学会等名 日本作物学会 第254回講演会シンポジウム「被災農耕地をみて地域と一緒に考える農業と作物生産 農耕地の回復・作物生産技術展開とマーケットの課題」(招待講演)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	藤本 優 (Fujimoto masaru) (60554475)	東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・准教授 (12601)	
研究分担者	廣瀬 農 (Hirose atsushi) (90708372)	東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・特任講師 (12601)	異動および分担課題の終了のため、2019年度をもって分担終了。

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------