

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 16 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K07344

研究課題名(和文) 水稲による放射性セシウム吸収に対する収穫後の刈り株および根の寄与

研究課題名(英文) Contribution of stubble to the root uptake of radiocesium by rice plants

研究代表者

石井 伸昌 (Ishii, Nobuyoshi)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所 福島再生支援本部・主幹研究員(定常)

研究者番号：50392212

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：水田における放射性セシウムの動態を明らかにすることを目的に、汚染された刈り株から水稲への放射性セシウムの移行について調査した。放射性セシウムで汚染した刈り株(Cs-137: 383 Bq/kg-dry)を土壌にすき込み、その土で水稲を139日間栽培した。収穫した玄米のCs-137濃度は検出下限値(約1.0 Bq/kg-dry)以下であった。実際の圃場における水稲の放射性Cs吸収に対する刈り株の影響は小さいと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Transfer of Cs-137 from rice stubbles to rice plants was studied to elucidate the behavior of radiocesium in rice paddy fields. Rice stubbles were dried, powdered and then incorporated into paddy soil samples. The activity concentration of Cs-137 in the stubble was 383 Bq/kg-dry. Rice plants were harvested after 139 days of rice transplanting. Contaminations of Cs-137 in the harvested brown rice samples were under detection limit of 1.0 Bq/kg-dry. Results of this study suggested that the potential contribution of rice stubble to the transfer of radiocesium to rice plants is small.

研究分野：放射生態学

キーワード：放射性セシウム 刈り株 経根吸収 水稲 原子力発電所事故

### 1. 研究開始当初の背景

福島第一原子力発電所の事故により多量の放射性核種が環境に放出され、様々な農作物が放射能により汚染された。放射能で汚染された食品の摂取は内部被ばくの主要な経路の一つであり、この事故以降、農作物の放射能汚染に対する国民の不安が高まった。放射能による汚染は主食であるコメにおいても例外ではない。事故後に作付けされたにもかかわらず、事故のあった2011年に収穫された玄米において、当時の食品衛生法上の暫定規制値(500 Bq/kg)を超える放射性セシウムが検出された。

国民の健康および安全・安心のために、現在も放射性セシウムによる汚染低減化に資する様々な技術開発研究が行われている。その結果、カリウム施肥が玄米中の放射性セシウム濃度を低減する効果があることなどが明らかとなり、一定の成果が得られている。このような技術開発の一方で、水田生態系における放射性セシウムの動態については未だ不明な点が残っている。その一つが田植え前にすき込まれる刈り株の影響である。水田における放射性セシウムの動態を明らかにすることは、今後の予測、万が一の事故時の対応等に活用できることが期待できる。

### 2. 研究の目的

本研究では、水稲の根圏域環境における放射性セシウムの動態の解明のために、未だその役割が不明瞭な収穫後に残存する刈り株に着目した調査を行った。収穫後の水田では地力回復のために刈り株をそのまま放置し、耕起時に土壌にすき込むことが多い。そのため、放射性セシウムで汚染された土壌で栽培された水稲の刈り株は、翌年度の水稲栽培における汚染源となり得る。特に、有機物に結合した放射性セシウムは、粘土鉱物に捕捉された放射性セシウムより植物へ移行しやすいことから(Sanchez et al., 1999)、刈り株から水稲へ移行する放射性セシウム量は、土壌からの移行する量を上回る可能性もある。しかしながら、水稲による放射性セシウム吸収に対する刈り株の寄与についてこれまで十分な評価が行われてこなかった。そこで、本研究では放射性セシウムで汚染された刈り株をすき込んだ水田土壌で水稲を栽培し、収穫した玄米への放射性セシウムの移行を明らかにすることを目的とした。

また、刈り株の分解は微生物が担っており、微生物活動は温度に依存する。そのため、刈り株が分解される時期により水田の放射性セシウム濃度が異なる可能性がある。そこで、刈り株の分解に対する温度効果についても検討した。

以上の結果から、水田生態系における放射性セシウムの動態に資するデータを提供すると共に、放射性セシウムの水稲への移行に対し刈り株の効果について議論する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 分解試験

刈り株の分解について検討するために、放射性炭素( $^{14}\text{C}$ )を利用したトレーサ実験を実施した。つまり、 $^{14}\text{C}$ で標識した刈り株を土壌にすき込み、微生物により分解されることで発生する $^{14}\text{CO}_2$ ガスを測定することで刈り株の分解を評価した。

$^{14}\text{C}$ で標識された水稲は、出穂期前に $^{14}\text{C}$ 標識酢酸ナトリウム溶液を供給することにより作成した。供給した $^{14}\text{C}$ はワグネルポット(1/5000a)当たり1.6 MBqであった。この栽培は、管理区域内の人工気象装置において行った。

登熟した水稲から刈り株を回収し、乾燥、粉碎した。粉碎した刈り株(0.5g)は水田より採取した土壌(5g)と共に50 mL容量のガラス容器に封入し、脱イオン水(5 mL)を加えてプチルゴム栓で密封した。刈り株をすき込んだ湛水水田土壌試料の初期 $^{14}\text{C}$ 放射能濃度は、試料容器当たり $7.6 \times 10^2$  Bqであった。

準備した試料は、静置条件のもと5ヶ月間培養した。培養温度は高温と低温の2つの条件を設定し、培養期間中1ヶ月毎に培養温度を変えた。各月の設定温度であるが、高温条件は18°C、21°C、25°C、27°C、23°Cの順で、低温条件は17°C、20°C、23°C、18°C、11°Cの順で変更した。この温度条件は稲作期間における千葉県と北海道の平均気温を参考に決定した。この温度サイクルによる分解試験終了後、同じ試料、同じ温度サイクルで5ヶ月間、再び培養を行った。つまり合計10ヶ月間、2つの温度条件の下で $^{14}\text{CO}_2$ ガス発生量をモニタリングし続けた。

培養期間中に発生した $^{14}\text{CO}_2$ ガスは水酸化ナトリウム溶液で回収し、 $^{14}\text{C}$ の放射能は液体シンチレーションカウンタで測定した。ガスの回収方法であるが、まず試料容器の上流にポンプを接続し、20 mL/minの流速で10分間空気を流し続けた。下流側には16 gの1 mol/L水酸化ナトリウム溶液を含むガス捕集ビン(3本直列接続し、 $^{14}\text{CO}_2$ ガスを捕集した。この溶液は液体シンチレーションカクテルHionic-Fluor(PerkinElmer Japan Co., Ltd.)と混合し、 $^{14}\text{C}$ 測定試料とした。測定条件として、0-156 KeV領域を3分間測定し、測定により得られた計数値(dpm)から $^{14}\text{C}$ 濃度へ換算した。

刈り株の分解率は初期 $^{14}\text{C}$ 量に対する炭酸ガスとして放出された $^{14}\text{C}$ 量の比として見積もった。但し、2回目のサイクルの初期 $^{14}\text{C}$ 量は、初期 $^{14}\text{C}$ 量から1回目の試験で放出された $^{14}\text{C}$ 量を差し引いた量とした。

#### (2) 放射性セシウム汚染刈り株

2015年5月11日から9月30日にかけて、放射性セシウムで汚染された土壌で水稲を栽培した。水稲栽培土壌として市販の赤玉土、荒木田土、黒土、腐葉土、および有機栽培用水稲用粒状培土を混合し、これに放射性セシ

ウムの汚染源として浄水発生土（石井ら、2013）を加えた土壌（汚染土壌）を準備した。この汚染土壌 30 リットルをポリプロピレン製コンテナ（924 × 616 × 210 mm）に入れ、水稻幼苗（品種：コシヒカリ）を 16 苗植えた。苗は農家から頂いた。収穫した水稻から刈り株を回収し、付着した土壌を水で洗浄した。洗浄後、重量が一定になるまで乾燥し、そして粉碎した。これを放射性セシウム汚染刈り株（汚染刈り株）とした。

### （3）水稻苗と栽培用汚染水田土壌

充実した水稻（品種；日本晴）の種子を選別するために、塩水選および種子表面殺菌を行った。まず比重 1.13 の塩水中で沈んだ種子を選別し、これを脱イオン水で 2 倍希釈した次亜塩素酸ナトリウム溶液（ナカライテスク）に浸漬し、120 rpm で 15 分間攪拌した。攪拌後、脱イオン水で種子を 3 回洗浄し、28 °C の条件下で催芽した。幼芽が確認できたところで、市販の水稻用粒状培土（ホーネンス 1 号）を床土として播種した。本葉数が 4 枚となった苗を栽培用の稲として水田土壌に移植した。

栽培用の水田土壌は、ワグネルポット（1/5000a）およびポリプロピレン製コンテナ（520 × 320 × 120 mm）に準備した。ワグネルポットでの栽培は <sup>137</sup>Cs の移行に対する温度効果を確認する試験、コンテナでの栽培は刈り株量の効果を確認する試験に用いた。いずれの容器においても、ホーネンス 1 号に汚染刈り株をすき込んだ土壌を汚染水田土壌として用いた。

ワグネルポット試験では、まず 900 g のホーネンス 1 号に対して 40 g の汚染刈り株を混合し、これをワグネルポットに入れた後、500 g のホーネンス 1 号で覆土した。汚染刈り株を混合した土壌層は 60 mm であり、覆土層は 30 mm であった。また、コントロールとして刈り株をすき込まずホーネンス 1 号のみのポットも準備した。

コンテナ試験では 3 種類の水田土壌を準備した。コンテナ底面に 20 g、または 40 g の汚染刈り株を敷き、これを 4.0 kg のホーネンス 1 号で覆土した水田土壌、そして 4.0 kg のホーネンス 1 号のみの水田土壌、以上 3 種類である。栽培土壌入りのコンテナは、苗を移植する 19 日前から湛水状態として遮光条件のもと温度制御された温室で管理した。温度条件は、10:00 から 16:00 までは 28 °C、18:00 から翌 6:00 までは 18 °C、それ以外の時間は 24 °C であった。

### （4）<sup>137</sup>Cs の移行に対する温度効果

ワグネルポットに準備した水田土壌を用いて、汚染刈り株の <sup>137</sup>Cs による水稻への移行に対する温度効果について調査した。2016 年 5 月 9 日にワグネルポット当たり 3 苗を移植し、高温条件および低温条件で水稻を栽培した。高温条件で栽培した水稻は 9 月 13 日に、低

温条件で栽培した水稻は 9 月 20 日に収穫した。コントロールのポットは低温条件での栽培と同じ条件で栽培を行った。厳密に温度を制御のために、栽培は人工気象装置（日本医器機械製作所）内で行った。収穫後、玄米、籾殻、および茎葉部に分け、それぞれ乾燥・粉碎し、<sup>137</sup>Cs 分析試料とした。

### （5）<sup>137</sup>Cs の移行に対する刈り株量の効果

ポリプロピレン製コンテナに準備した水田土壌を用いて、<sup>137</sup>Cs の水稻への移行に対する汚染刈り株量の効果について調査した。2017 年 5 月 17 日にコンテナ当たり 7 苗を移植し、10 月 3 日に収穫した。栽培条件は、いずれのコンテナも同様であった。収穫後、玄米と汚染水田土壌を <sup>137</sup>Cs 分析試料とした。汚染水田土壌は直径 5 cm のステンレス製円筒でくり抜き、これを分析試料とした。玄米および汚染水田土壌試料とも、乾燥・粉碎し、ポリプロピレン容器（U8 容器形状）に封入した。

### （6）分析

放射性セシウムは Ge 半導体検出器を用いて分析した。Ge 半導体検出器の効率校正は放射能標準ガンマ体積線源（MX033U8PP；日本アイソトープ協会）で行い、測定精度は放射能分析用土壌認証標準物質（JSAC0471；日本分析化学会）で確認した。半減期補正は収穫時を基準に行った。

## 4. 研究成果

### （1）刈り株の分解に対する温度依存性

土壌微生物による刈り株の分解は、<sup>14</sup>C 標識刈り株から発生する <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> 量で評価した。刈り株の分解は微生物活動に依存し、微生物活動は温度に影響されることから、分解に対する温度依存性についても調査した。

図 1 に汚染刈り株の分解率を示す。土壌にすき込んだ刈り株から <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> が発生したことより、刈り株の分解が確認できた。

温度条件の違いによる分解率の差は、試験開始 95 日目から 1 回目の試験が終了する 151 日目までの期間で確認できた。91 日目から 121 日目までの温度条件は、高温が 27 °C で低温が 18 °C とその差は 9 °C であった。更に、121 日目から 151 日目までの温度差は 12 °C であった。一方、刈り株の分解率に差が認められな

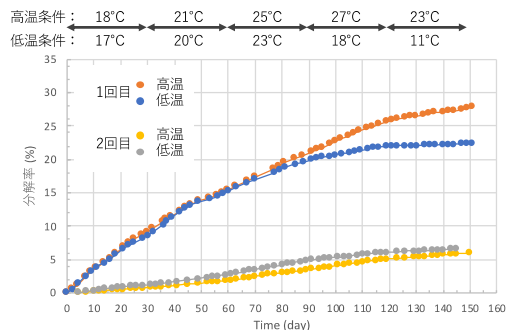


図 1 <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> ガス発生を指標とした刈り株の分解

かった30日目、60日目、および91日目までの気温差は、それぞれ1、1、および2であった。以上の結果から、気温差が2以内であれば、刈り株の分解率に差は生じないことが分かった。

一般に、有機物の分解速度は温度に依存する。そこで、高温条件と低温条件における各温度での分解速度(1日当たりの分解率)を求めた。その結果、高温条件では0.31%/day(0-30日目)、0.21%/day(30-60日目)、0.18%/day(60-91日目)、0.16%/day(91-151日目)そして0.07%/day(121-151日目)と、温度の上昇と共に分解速度が遅くなることが分かった。同様の結果は低温条件でも観察された。本実験で土壌にすき込んだ刈り株は未熟有機物であることから、易分解性有機物が分解されるに伴いリグニン等の難分解性有機物の残存割合が増加し、その結果、温度が上昇しても分解が促進されなかったと考えられる。また、121日目以降の急激な分解速度の低下は、難分解性有機物の割合増加と温度の低下が原因と考えられる。

2回目の試験では、高温条件よりも低温条件で分解率が高くなる傾向があった。この結果は易分解有機物の存在割合が影響していると考えられる。1回目の試験終了時において、刈り株の分解率は高温条件における27.9%に対して、低温条件では22.5%であった。すなわち、2回目の試験開始時点において高温条件よりも低温条件において、易分解性有機物残存割合が多かった可能性がある。そのため、分解率は低温条件で高くなる傾向にあったと考えられる。

以上の結果をまとめると、刈り株はすき込み直後に最も活発に分解され、時間の経過と共に分解が抑制される。分解は難分解性有機物の残存割合に影響されるため、すき込まれた翌年まで土壌に残留する刈り株は、ほとんど分解されない。分解に対する温度の影響であるが、全国の水稲栽培期間を考慮すれば、温度よりも難分解成分の割合が強く影響すると考えられる。刈り株のすき込み時期は一定ではないが、腐熟を促すために必ず水稲栽培前に行われる。つまり、刈り株の分解は田植え時期よりも前に活発となるため、分解に伴い溶出することが懸念される放射性セシウムは、田植え時期には既に溶出していると考えられる。セシウムイオンは粘土粒子と親和性が高く、従って、田植えの時期には水田の粘土粒子に補足され、水稲に吸収されにくい形態となっている可能性がある。

## (2) 汚染刈り株

放射性セシウムで汚染された水稲を栽培し、収穫後に刈り株を水で洗浄した。これを重量が一定になるまで乾燥し、<sup>137</sup>Cs濃度を調べたところ、383 Bq/kg-dryであった。したがって、得られた刈り株を水稲への<sup>137</sup>Cs移行試験に用いることにした。

## (3) <sup>137</sup>Csの移行に対する温度効果

栽培期間中の平均気温を図2に示す。高温および低温条件における苗の移植から収穫までの積算温度はそれぞれ2987と3041であった。積算温度の差は、高温条件で栽培した水稲の収穫日で最大となり、その値は100.2であった。

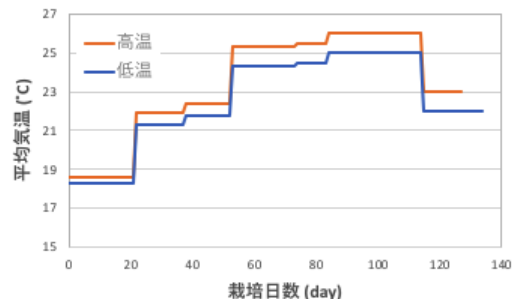


図2 水稲栽培期間中の平均気温

それぞれの栽培条件で栽培した水稲の生長を比較するために、地際から1cmの部位を収穫し、刈り取った水稲を種籾と茎葉部に分け、それぞれの乾燥重量を測定した。結果を表1に示す。刈り株をすき込んだ土壌で栽培した水稲は、コントロールと比較して明らかに収穫量が少なかった。この結果は、刈り株のすき込みが水稲の生長を抑制したことを示唆している。土壌表層を除き還元状態が発達していたことから、根の伸張が阻害され、その結果、生長抑制が生じたと考えられた。

表1 ワグネルポット栽培の水稲収穫量

部位	収穫量 (g-dry)		
	高温条件 (n=4)	低温条件 (n=4)	コントロール* (n=1)
種籾	11.9 ± 3.5	13.3 ± 2.6	33.5
茎葉部	8.9 ± 2.7	17.1 ± 2.8	42.6

\* 低温条件下で刈り株のすき込み無し土壌で栽培した水稲

収穫した種籾から玄米を回収し、<sup>137</sup>Csの分析に供した。ゲルマニウム半導体検出器で分析した結果、玄米の<sup>137</sup>Cs濃度は高温条件および低温条件とも、定量下限値(高温条件: 8.2 Bq/kg-dry、低温条件: 13 Bq/kg-dry)以下であった(表2)。検出下限値を下げるためには、分析時間を長くする方法と試料量を多くする方法がある。この分析では1試料当たり約1週間(6.0 × 10<sup>5</sup>秒)かけて測定を行った。一般に、定量下限値は1/x(xは測定時間の倍数)に比例する。従って、例えば6.3 Bq/kg-dryの定量下限値を1.0 Bq/kg-dry以下にするためには1試料当たり40週間以上かけて測定する必要がある。この測定は非現実的であるため、高温および低温条件のそれぞれ4試料をまとめることで、試料量を多くし、再度分析を行った。しかしながら、確かに検出下限値は下がったが、高温条件も低温条件も共に検出下限値(高温条件: 1.4 Bq/kg-dry、低温条件: 1.7 Bq/kg-dry)以下であった。



表2 玄米中の<sup>137</sup>Cs濃度

栽培条件	<sup>137</sup> Cs (Bq/Kg-dry)			
	#1	#2	#3	#4
高温	<6.3	<4.5	<8.2	<4.7
低温	<13	<4.4	<4.6	<4.3

この試験では、383 Bq/kg-dry の刈り株 40g を 1.4 kg のホーネンス 1 号と混合したので、栽培土壌中の<sup>137</sup>Cs濃度は 11 Bq/kg-dry と試算される。従って、刈り株を<sup>137</sup>Cs源とする<sup>137</sup>Csの土壌-玄米移行係数(玄米の<sup>137</sup>Cs濃度/土壌の<sup>137</sup>Cs濃度)は、高温条件で 0.75 以下、低温条件で 1.2 以下と見積もられた。但し、この評価において玄米の<sup>137</sup>Cs濃度は検出下限値の最大値を用いたので、見積もられた数値から低温条件より高温条件で<sup>137</sup>Csの移行が抑制されるとは結論できない。

(4) <sup>137</sup>Csの移行に対する刈り株量の効果

ワグネルポットの試験から、刈り株のすき込みは水稻の生長阻害を引き起こすことが分かった。そこで、本試験ではすき込み量の最大値を 40 g とし、できる限り土壌層を薄く、そして湛水する水は曝気を行い、根に酸素が供給されるよう工夫した。また、すき込みも苗の移植 19 日前に行い、刈り株の腐熟を促した。収穫した種籾および茎葉部の乾燥重量は、粉碎刈り株のすき込み量の増大に伴い減少したが(図3)ワグネルポットにおける減収(表1)よりも改善された。

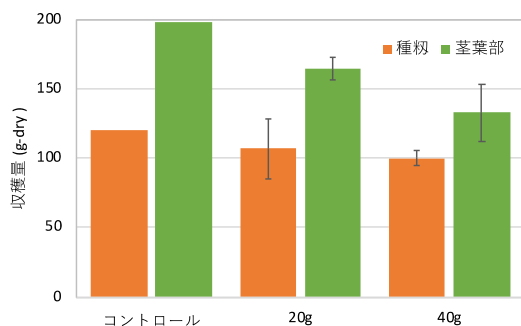


図3 収穫した種籾と茎葉部の乾燥重量

すき込み量の増加に伴う収穫重量の減少傾向は、刈り株の分解により還元環境が発達した可能性を示唆している。同時に、刈り株の分解促進は、分解に伴う放射性Csの供給量増大を意味している。しかしながら、玄米の<sup>137</sup>Cs濃度は、いずれの土壌においても検出下限値以下であった(表3)。収穫後、水田土壌の一部を採取し<sup>137</sup>Cs濃度を求めたところ、コントロールでは検出下限値以下であり、刈り株を 20 g および 40 g 含む水田土壌では、それぞれ 2.6 Bq/kg-dry および 6.7 Bq/kg-dry であった(表3)。従って、刈り株を<sup>137</sup>Cs源とする<sup>137</sup>Csの土壌-玄米移行係数は、20 g の刈り株を含む栽培では 0.42 以下、40 g の刈り株を含む栽培では 0.16 以下と見積もられた。ワグネルポットの実験と同様に、この評価において玄米の<sup>137</sup>Cs濃度は検出下限値を用いた

表3 玄米および土壌中の<sup>137</sup>Cs濃度

土壌	<sup>137</sup> Cs (Bq/Kg-dry)	
	玄米	土壌
コントロール	-	<1.2
20g	<1.1	2.6 ± 0.74
40g	<1.1	6.7 ± 2.4

ので、見積もられた数値から刈り株の量が多くなれば<sup>137</sup>Csの移行が抑制されるとは結論できない。本試験では比較的高濃度の<sup>137</sup>Csで汚染された刈り株を用い、土壌中での分解が進みやすいよう粉碎した状態で、且つ過剰量の刈り株のすき込みを行ったが、その効果は認められなかった。したがって、実際の圃場における水稻の放射性Cs吸収に対する刈り株の影響も少ないと考えられる。

<引用文献>

Sanchez AL, Wright SM, Smolders E, Nayor C, Stevens PA, Kennedy VH, Dodd BA, Singleton DL, Barnett CL (1999) High plant uptake of radiocesium from organic soils due to Cs mobility and low soil K content. Environ Sci Technol 33:2752–2757.

石井伸昌, 田上恵子, 川口勇生, 内田滋夫 (2013) 浄水発生土に含まれる<sup>137</sup>Csのコマツナによる経根吸収. Radioisotopes. 62: 447-453.

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 1件)

Ishii, N., M. Murakami, T. Suzuki, K. Tagami, S. Uchida, N. Ohte. Effects of litter feeders on the transfer of <sup>137</sup>Cs to plants. Sci Rep. 8: 6691. 2018.

[学会発表](計 1件)

石井伸昌, 田上恵子, 内田 滋夫. 水稻による放射性セシウム吸収に対する収穫後の刈り株の寄与. アイソトープ・放射線研究発表会. 2018.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石井伸昌 (ISHII, Nobuyoshi)  
国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所 福島再生支援本部・主幹研究員(定常)  
研究者番号: 50392212

(2) 研究分担者

田上恵子 (TAGAMI, Keiko)  
国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所 福島再生支援本部・上席研究員(定常)  
研究者番号: 10236375