

委託プロジェクト研究
「営農再開のための放射性物質対策技術の開発」
平成29年度 最終年度報告書

15653590

中課題（契約課題）名 放射性セシウム吸収抑制メカニズムの解明

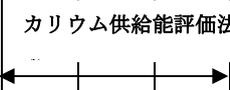
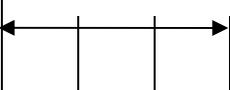
研究実施期間	平成27年度～平成29年度（3年間）
代表機関	国立大学法人 東京農工大学
研究開発責任者	横山 正
共同研究機関	福島県農業総合センター（生産環境部、作物園芸部）
	公益財団法人 岩手生物工学研究センター
	朝日工業株式会社
	特定非営利活動法人 ゆうきの里東和ふるさとづくり協議会
普及・実用化支援組織	福島県農業総合センター（生産環境部、作物園芸部）
	特定非営利活動法人 ゆうきの里東和ふるさとづくり協議会
研究開発責任者 連絡先	TEL : 042-367-5878 FAX : 042-367-5878 E-mail : tadashiy@cc.tuat.ac.jp

別紙様式3. 最終年度報告書 1頁 ～ 71頁

<別紙様式3. 最終年度報告書>

I-1. 年次計画

研究課題	研究年度					担当研究機関・研究室	
	27	28	29	30	31	機関	研究室
1. 放射性Cs吸収の低減に貢献する遺伝子の特定							
(1) イネの放射性Cs吸収に関する、根での吸収遺伝子、茎葉部、籾・玄米への輸送に関する遺伝子等をさらに網羅的に探索	イネの放射性Cs吸収抑制遺伝子の網羅的な探索					東京農工大学 特定非営利活動法人ゆうきの里東和ふるさとづくり協議会	植物栄養学研究室 ・植物生態生物学研究室
(2) 放射性Cs吸収の低減に貢献する遺伝子の特定	イネの放射性Cs吸収抑制遺伝子の特定					公益財団法人岩手 生物工学研究センター	ゲノム育種研究部
(3) 特定した放射性Cs吸収抑制遺伝子に関わるDNAマーカーの作出とその知的財産権の利用を広く許諾	イネの放射性Cs吸収抑制遺伝子のDNAマーカーの作成					公益財団法人岩手 生物工学研究センター	ゲノム育種研究部
(4) 放射性Cs吸収の低減に貢献する遺伝子の特性解明	イネの放射性Cs吸収抑制遺伝子の放射性Cs吸収特性の解明					東京農工大学	植物栄養学研究室・細胞分子生物学研究室
(5) 放射性Csを子実へ蓄積しないダイズ系統の探索と特性解明	放射性Cs吸収抑制型ダイズ系統の探索					東京農工大学 農研機構	植物栄養学研究室 遺伝資源センター
2. 農作物に関する放射性Cs吸収抑制技術の高度化							
(1) 放射性Cs吸収抑制型アレルをもつ改良型ひとめぼれ系統の作出とそれの提供	放射性Cs吸収抑制型アレルをもつ改良型ひとめぼれ系統の					東京農工大学 特定非営利活動法人ゆうきの里東和ふるさとづくり協議会	植物生態生物学研究室・植物栄養学研究室
(2) イネに対する生育期ごとの土壌溶液から植物根への放射性Cs吸収モデルの構築	土壌溶液から植物根への放射性Cs吸収モデルの					東京農工大学 特定非営利活動法人ゆうきの里東和	グローバルイノベーション研究院・環境土壌学研究室・植物栄養学研

<p>(3) 除染後水田におけるカリウム供給能評価法の開発</p>	<p>カリウム供給能評価法の開発</p> 	<p>ふるさとづくり協議会 福島県農業総合センター</p>	<p>研究室 生産環境部・環境作物栄養科</p>
<p>(4) 稲わら施用による放射性Cs吸収抑制対策の高度化</p>	<p>稲わら施用による放射性Cs吸収抑制技術開発</p> 	<p>福島県農業総合センター</p>	<p>作物園芸部・稲作科</p>
<p>(5) イネやダイズの放射性Cs吸収抑制技術の高度化に資する緩効性カリ肥料利用の有効性の検証</p>	<p>イネやダイズの放射性Cs吸収抑制技術の高度化に資する緩効性カリ肥料利用の有効性の検証</p> 	<p>朝日工業株式会社</p>	<p>開発部</p>
<p>(6) 新規の緩効性カリ肥料の探索と開発</p>	<p>新規の緩効性カリ肥料の探索と開発</p> 	<p>朝日工業株式会社</p>	<p>開発部</p>
<p>(7) Cs吸収抑制が困難な圃場における緩効性カリ肥料の有効性検証</p>	<p>Cs吸収抑制が困難な圃場における緩効性カリ肥料の有効性検証</p> 	<p>朝日工業株式会社</p>	<p>開発部</p>

I-2. 実施体制

研究項目	担当研究機関・研究室		研究担当者
	機関	研究室	
研究開発責任者	東京農工大学	植物栄養学	◎ 横山 正
1. 放射性Cs吸収の低減に貢献する遺伝子の特定 (小課題100) イネの放射性Cs吸収に関する、根での吸収遺伝子、茎葉部、籾・玄米への輸送に関する遺伝子等をさらに網羅的に探索	東京農工大学 特定非営利活動法人ゆうきの里東和ふるさとづくり協議会	植物生態生物学研究室・植物栄養学研究室	○ 大川泰一郎 横山 正 武藤一夫 大野達弘 武藤正敏
(小課題101) 放射性Cs吸収の低減に貢献する遺伝子の特定	公益財団法人岩手生物工学研究センター	ゲノム育種研究部	○ 阿部 陽
(小課題102) 特定した放射性Cs吸収抑制遺伝子に関わるDNAマーカーの作出とその知的財産権の利用を広く許諾	公益財団法人岩手生物工学研究センター	ゲノム育種研究部	○ 阿部 陽
(小課題103) 放射性Cs吸収の低減に貢献する遺伝子の特性解明	東京農工大学	植物栄養学研究室 細胞分子生物学研究室	○ 大津直子 横山 正 福原いずみ 森山裕充
(小課題104) 放射性Csを子実へ蓄積しないダイズ系統の探索と特性解明	東京農工大学	植物栄養学研究室 グローバルイノベーション研究院	○ 横山 正 大津直子 小島克洋
2. 農作物に関する放射性Cs吸収抑制技術の高度化 (小課題200) 放射性Cs吸収抑制型アレルをもつ改良型ひとめぼれ系統の作出とその提供	東京農工大学	植物生態生物学研究室・植物栄養学研究室	○ 大川泰一郎 横山 正

<p>(小課題201) イネに対する生育期ごとの土壌溶液から植物根への放射性Cs吸収モデルの構築</p> <p>(小課題202) 除染後水田におけるカリウム供給能評価法の開発</p> <p>(小課題203) 稲わら施用による放射性Cs吸収抑制対策の高度化</p> <p>(小課題204-1) イネやダイズの放射性Cs吸収抑制技術の高度化に資する緩効性カリ肥料利用の有効性の検証</p> <p>(小課題204-2) 新規の緩効性カリ肥料の探索と開発</p> <p>(小課題204-3) Cs吸収抑制が困難な圃場に於ける緩効性カリ肥料の有効性検証</p>	<p>特定非営利活動法人ゆうきの里東和ふるさとづくり協議会</p>		<p>武藤一夫 大野達弘 武藤正敏</p>	
	<p>東京農工大学</p>	<p>グローバルイノベーション研究院 植物栄養学</p>	<p>○ 小島克洋</p> <p>横山 正</p>	
		<p>特定非営利活動法人ゆうきの里東和ふるさとづくり協議会</p>		<p>武藤一夫 大野達弘 武藤正敏</p>
		<p>福島県農業総合センター</p>	<p>生産環境部・環境作物栄養科</p>	<p>○ 前任者荒井義光（～2017.3）、後任者鈴木芳成（2017.4～）</p>
				<p>△ 松岡宏明</p>
		<p>福島県農業総合センター</p>	<p>作物園芸部・稲作科</p>	<p>○ 新妻和敏</p>
	<p>朝日工業株式会社</p>	<p>開発部</p>	<p>○ 浅野智孝 △ 石川伸二 見城貴志 松岡英紀 飯塚美由紀</p>	
	<p>朝日工業株式会社</p>	<p>開発部</p>	<p>○ 浅野智孝 △ 石川伸二 見城貴志 松岡英紀 飯塚美由紀</p>	
	<p>朝日工業株式会社</p>	<p>開発部</p>	<p>○ 浅野智孝 △ 石川伸二</p>	

(注1) 研究開発責任者には◎、小課題責任者には○、実行課題責任者には△を付すこと。

中課題番号(e-Radシステム課題 ID8 桁)	15653590	研究期間	平成27～29年度
大課題名 (委託プロジェクト名)	営農再開のための放射性物質対策技術の開発		
中課題名 (契約課題名)	放射性セシウム吸収抑制メカニズムの解明		
代表機関・研究開発責任者名	東京農工大学・横山 正		

I-1. 研究目的

1) 放射性Cs低吸収性品種の育成に対するニーズが高いと考えられるイネについて、放射性Cs吸収の低減に貢献する遺伝子を特定すると共に、放射性Csの吸収低減に関わるDNAマーカーと育種母本を確立する。

2) 植物根による放射性Cs吸収量と土壤溶液中のカリ濃度との相関関係を明らかにすると共に、それが植物の生育ステージ毎にどのように変化するか明らかにし、土壤溶液から根・地上部・穂へのCs吸収モデルを構築する。

このため、本研究では、

中課題1：放射性Cs吸収の低減に貢献する遺伝子の特定に関しては、1)イネの放射性Cs吸収に関する、根での吸収遺伝子、茎葉部、籾・玄米への輸送に関する遺伝子等をさらに網羅的に探索、2)放射性Cs吸収の低減に貢献する遺伝子の特定、3)特定した放射性Cs吸収抑制遺伝子に関わるDNAマーカーの作出とその知的財産権の利用を広く許諾、4)放射性Cs吸収の低減に貢献する遺伝子の特性解明、5)放射性Csを子実へ蓄積しないダイズ系統の探索と特性解明を行う。

中課題2：農作物に関する放射性Cs吸収抑制技術の高度化では、1)放射性Cs吸収抑制型アレルをもつ改良型ひとめぼれ系統の作出とその提供、2)イネに対する生育期ごとの土壤溶液から植物根への放射性Cs吸収モデルの構築、3)除染後水田におけるカリウム供給能評価法の開発、4)稲わら施用による放射性Cs吸収抑制対策の高度化、5)放射性Cs吸収抑制が困難な圃場に於ける緩効性カリ肥料の有効性検証を行う。

その結果、

1. イネの放射性Cs吸収抑制遺伝子に関わるDNAマーカーや育種母本が作出される。
2. 土壤溶液カリの新規の供給法や評価法が出来ると共に、土壤溶液中のカリ濃度等から玄米の放射性Cs量を推定する手法が開発される。
3. 標準施肥に上乘せするカリ肥料の代替え物による、持続的なカリ供給法を開発し、玄米への放射性Csの移行を抑制する技術が開発される。

これらから、農業再開に向けた地域において、農業生産者の営農再開に大きく貢献する。

I-2. 研究結果

2013年度より福島県二本松市東和地区で、NPO法人ゆうきの里東和ふるさとづくり協議会と岩手生物工学研究センターの協力を得て、これまでに、約32,000点の水稲品種が持つ遺伝背景をほぼカバーしている世界のイネコアコレクション69品種と、日本のコアコレクション50品種、さらに農工大が保有・育成した品種・系統を用い、水稲各系統が保有する放射性Cs吸収、子実蓄積特性の評価を行い、茎葉部および子実の放射性Cs濃度の異なる品種・系統を選定した(写真1)。その結果、「ひとめぼれ」は放射性Cs吸収が低い品種であり、先祖親の「戦捷」、「初星」、「愛知旭」等から放射性Cs吸収を抑制する遺伝因子を受け継いでいた(図1)。



写真1 圃場での各種イネ系統の栽培試験
(2013年~2017年、福島県二本松市)

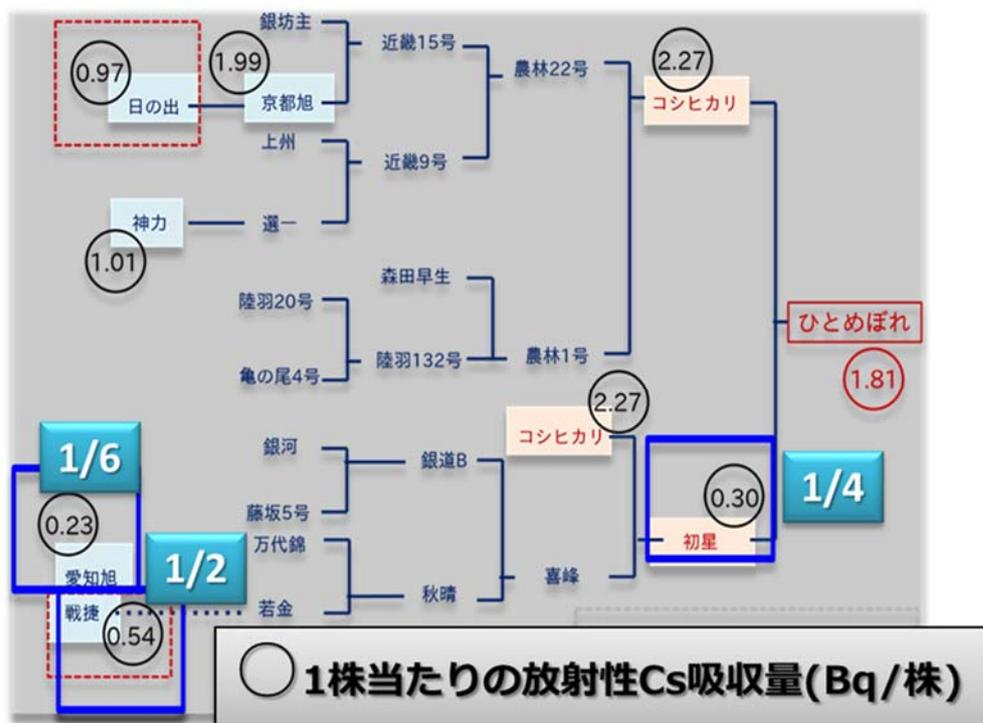


図1 ひとめぼれの祖先親の1株当たりの放射性Cs吸収量

2013年~2014年にかけて、「ひとめぼれ」に着目し、「ひとめぼれ-カサラス」「ひとめぼれ-タカナリ」の組換え自殖系統群318系統を栽培し、それらの放射性Cs吸収特性に基づくQTL解析から、放射性Cs吸収を抑制する遺伝因子の探索を行った。さらに、放射性Cs分布を均質化したモデル水田も用意し、水田内の環境変動を最小にした、栽培試験を行った(写

真2)。



写真2 放射性Cs分布を均質化したモデル水田を用いたQTL解析用栽培試験 (2016年～2017年度)

その結果、ひとめぼれとタカナリの組換え自殖系統の解析から、玄米への低放射性Cs蓄積系統と高蓄積系統を見いだした。その解析からひとめぼれの対立遺伝子により放射性Cs濃度が低下する有意なQTLを第1, 6染色体に、またタカナリの対立遺伝子により放射性Cs濃度が低下するQTLを第3染色体に検出した (図2)。

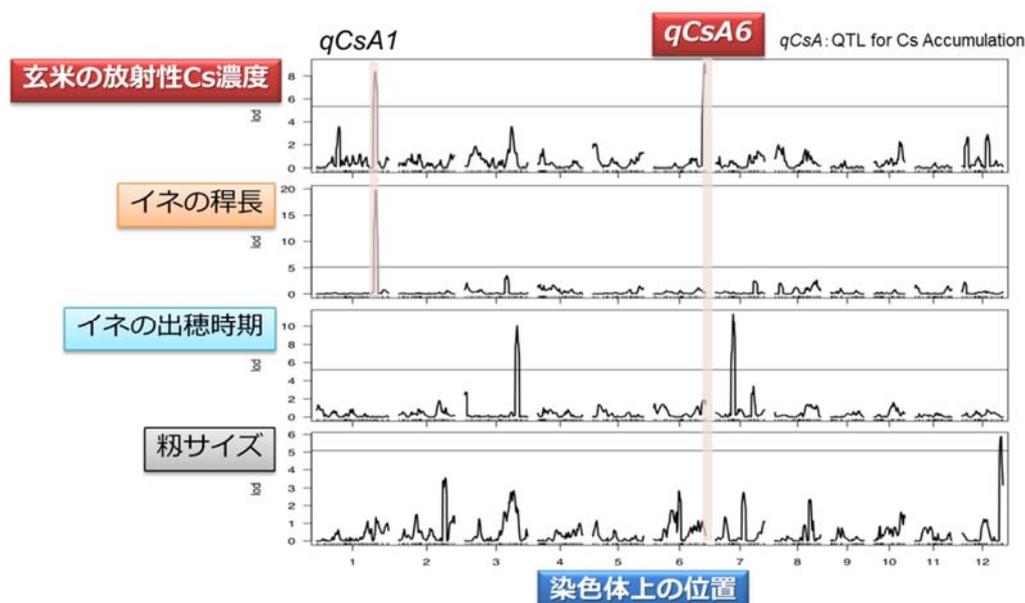


図2 qCsA6:Cs濃度に関するメジャーQTLと、「玄米への放射性Cs吸収抑制形質」以外の形質のQTLとの染色体の座乗位置の比較

qCsA1 : 稈長の QTL と同一 → 草型の違いが Cs 濃度に寄与 (*sd1*)
qCsA6 : 他の形質と無関係 → **Cs 濃度に関与するメジャーQTL**

玄米への放射性Cs吸収抑制QTLの正逆集積系統における¹³⁷Cs濃度とTF値の比較から、Chr.1がひとめぼれ型、Chr.3がタカナリ型、Chr.6がひとめぼれ型の17-34系統は玄米への放射性Cs蓄積量を、「ひとめぼれ」よりさらに、約60%低減させることが分かった (図3)。また、放射性Cs低集積系統は、コシヒカリと同じ良食味を有していた。

	選抜系統	Chr.1 QTL	Chr.3 QTL	Chr.6 QTL	¹³⁷ Cs濃度(Bq/kg)	TF	良食味
玄米低放射性Cs蓄積QTL集積系統	17-34	ひとめぼれ型	タカナリ型	ひとめぼれ型	360.8	0.076	○
	17-49	ひとめぼれ型	タカナリ型	ひとめぼれ型	531.9	0.115	○
	17-22	ひとめぼれ型	タカナリ型	ひとめぼれ型	549.9	0.122	○
	17-101	ひとめぼれ型	タカナリ型	ひとめぼれ型	552.1	0.120	○
玄米高放射性Cs蓄積QTL集積系統	17-76	タカナリ型	ひとめぼれ型	タカナリ型	1378.9	0.300	
	17-115	タカナリ型	ひとめぼれ型	タカナリ型	1352.9	0.281	
	17-72	タカナリ型	ひとめぼれ型	タカナリ型	1268.7	0.264	
	17-93	タカナリ型	ひとめぼれ型	タカナリ型	1208.9	0.269	
ひとめぼれ		ひとめぼれ型	ひとめぼれ型	ひとめぼれ型	916.0	0.190	

図3 玄米への放射性Cs吸収抑制QTLの正逆集積系統における¹³⁷Cs濃度とTF値の比較

玄米の放射性Cs濃度に関するメジャーQTL”qCsA6”から、放射性セシウム吸収抑制候補遺伝子としてHKT2:1を見出した。

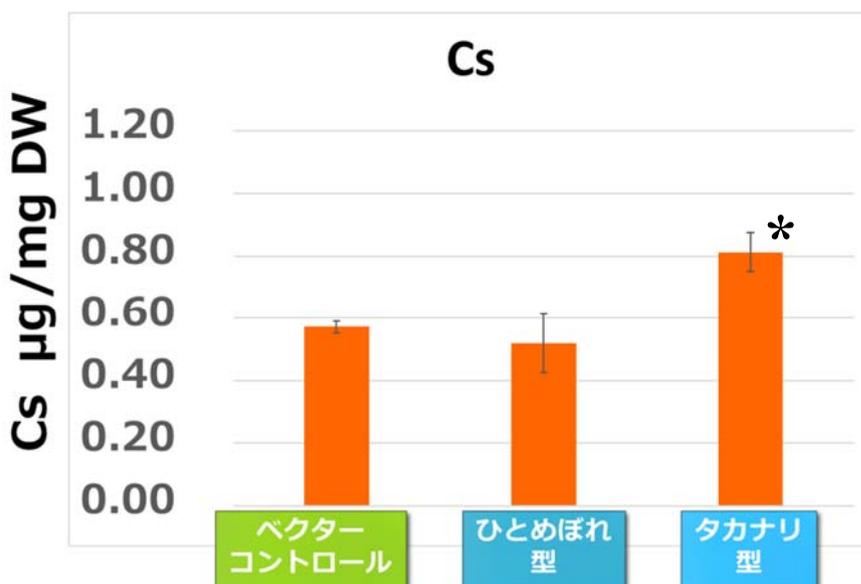


図4 ひとめぼれ型とタカナリ型のOsHKT1遺伝子のCs取り込み活性の違い

本遺伝子を酵母に組み込むと、タカナリ型では酵母細胞内のCs含量がひとめぼれ型のそれより高くなり、これが玄米中の放射性セシウム含量の増加の原因である可能性が推定された。

これらに基づき、放射性Csの吸収低減に関わる育種用DNAマーカー(図5)と育種母本としての改良型ひとめぼれ(写真3)を確立した。

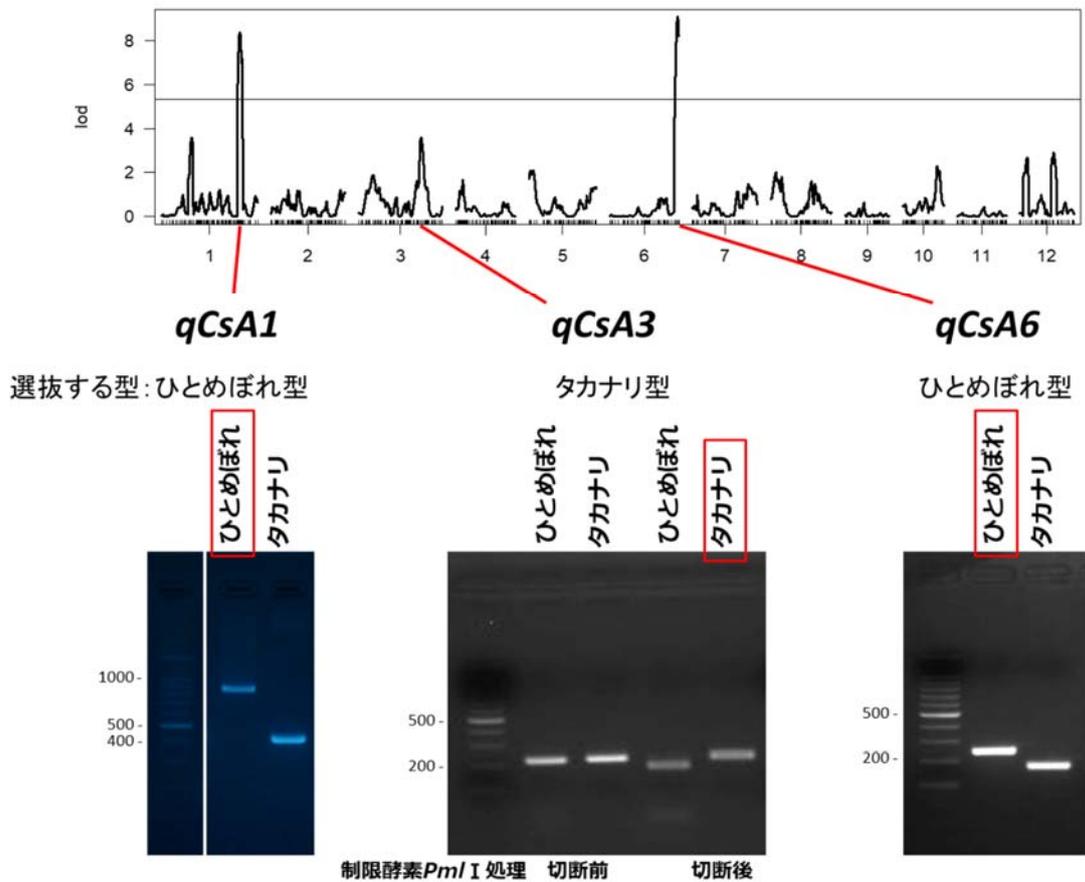


図5 放射性セシウム玄米蓄積を低減させる育種選抜用DNAマーカー



ひとめぼれ

改良型ひとめぼれ

写真3 中生、良食味の「ひとめぼれ」を放射性セシウム蓄積の少ない品種に改良することを目的に、「ひとめぼれ」を母、放射性セシウム吸収の少ない「タカナリ」を父とする組合せの後代より、マーカー選抜により、早生、良食味、米の低セシウム蓄積の「改良型ひとめぼれ」を育種母本として育成した。

福島県によるダイズの放射性Cs検査の結果、平成23年産では211点のうち12点が、平成24年産では847点のうち21点が基準値を超過していた。この数値を玄米のそれと比較すると、ダイズは玄米より基準値超えの出現頻度は1,700倍も高い性質を有していた。現地調査の結果から、

土壌の交換性カリ含量が少ないことや土壌酸度がやや低いなどという原因が報告されているが、要因が十分に説明できないものもあるため、ダイズに関してはCsを吸収しにくい品種の育成の可能性も検討する必要がある。そこで、放射性Csを子実へ蓄積しないダイズ系統の探索と特性解明に関して、2012年から2013年の2年間、二本松市の同一圃場で日本のダイズコアコレクション96品種を栽培し、子実中の放射性Cs量を測定比較した。2年間の試験で、ダイズには、放射性Csの高集積系統と低集積系統が存在し、高集積系統は可給態の放射性Csを良く吸収し、一方、低集積系統は大量に放射性Csは取り込まないが、根からの有機酸等の分泌で粘土鉱物に固定された放射性Csを可動化して吸収することが示唆された（図6）。

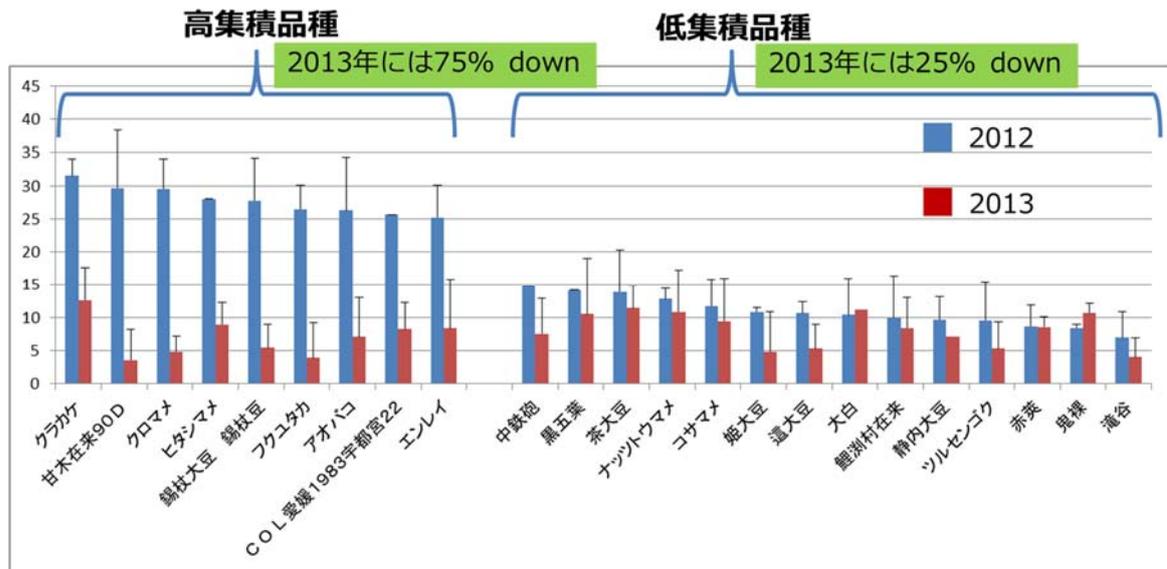


図6 放射性Csが土壌粘土へ固定されるエイジング効果とダイズが子実へ蓄積する放射性Cs量との関係

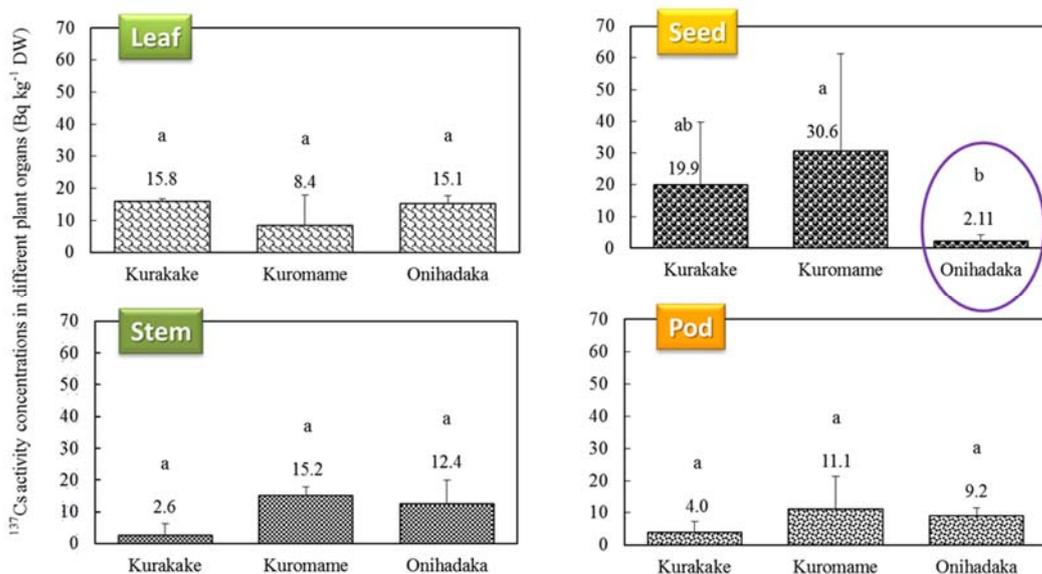


図7 ダイズ子実への放射性Cs高蓄積系統と区分されたクラカケ・クロマメと低蓄積系統に区分された鬼裸間の各器官への放射性Cs蓄積量（二本松市黒ぼく圃場での結果）

そこで、上記の高蓄積と低蓄積系統に分類されたダイズ品種に関して子実への放射性Cs蓄積量に違いが存在するか圃場試験とポット試験で調べ、子実への放射性Cs高蓄積と区分されたクラカケ・クロマメと低蓄積と区分された鬼裸間には、子実への放射性Csの集積程度が異なることを見いだした（図7）。また、鬼裸・赤莢の根からのリンゴ酸の分泌量はクラカケ・クロマメのそれより有意に高い傾向があることを見だし、両系統の根の有機酸分泌特性が異なることを見出した。高蓄積系統と低蓄積系統の品種をKagaら（2012）が報告した日本と世界のダイズの系統樹に当てはめると、これらの品種は独立した系統に分布した。

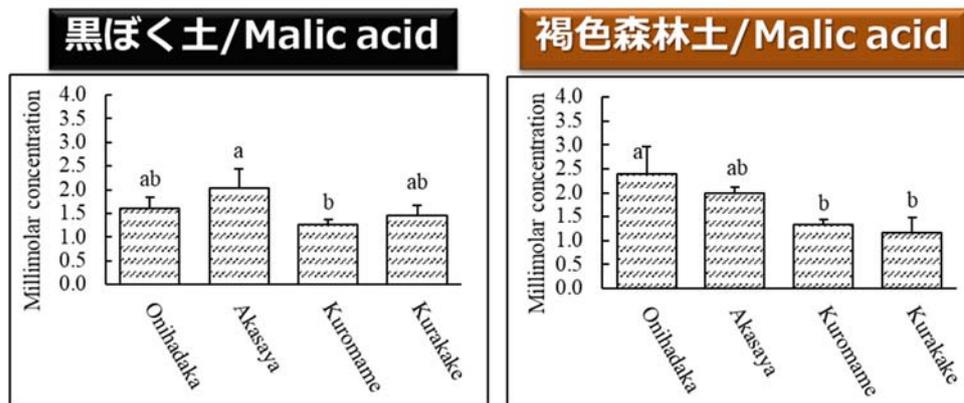


図8 福島県の黒ぼく土と褐色森林土を用いて栽培した各ダイズ品種の根からのリンゴ酸の総分泌量の違い

そのため、ダイズの子実への放射性Cs集積量には系統間差違が存在する可能性が示唆され、トランスポーター等、形態に表れない遺伝因子がCs吸収に関与している可能性予想された。この解析のために、子実への放射性Cs高蓄積系統のエンレイと低蓄積系統の鬼裸間で、交配を行い、組替え自殖系統を作成し現在F3世代になり、遺伝解析が可能な材料になってきた。

イネに対する生育期ごとの土壌溶液から植物根への放射性Cs吸収モデルの構築では、土壌溶液中のカリウムイオンならびに主要な陽イオンの存在量と交換態カリの測定値がイネ玄米中の放射性Cs量とどのような関係性を有するかに関して、異なる土壌目について調査を実施し、土壌目ごとにこれらの関係性を明らかにする。

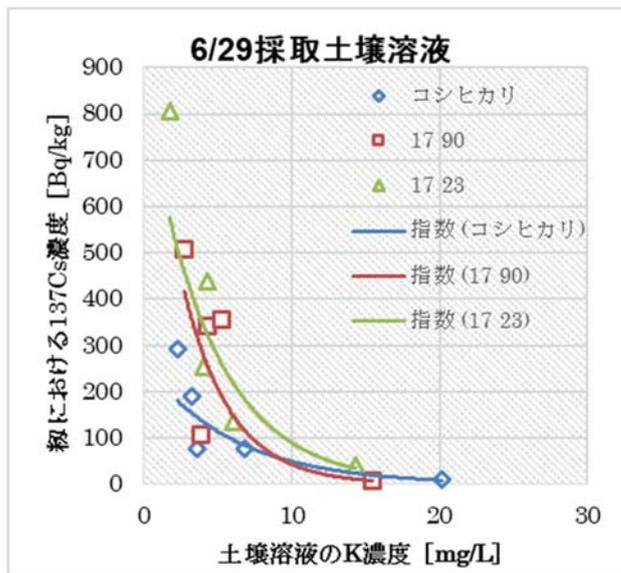


図9 福島県伊達市月舘地区の水田において栽培した水稻の粒中の放射性Cs量とその土壌溶液中のカリウム濃度の関係（2017年6月29日に採取した土壌溶液のK濃度を用いた場合）

現在までに、放射性Cs吸収能の異なるイネ系統について、土壌溶液の陽イオン濃度と植物体

の放射性Cs濃度の関係性を重回帰分析した結果、土壌溶液のK、Ca、Mgを説明変数として用いたときに茎葉部中の放射性Cs濃度が最も説明可能であることが分かった（図9）。

平成29年3月末には飯館村や川俣町の避難指示解除準備地域および居住制限区域が解除され、営農再開に向けた準備が加速しているが、表土剥ぎ取りにより水田表層の放射性Csを除染した水田では、剥ぎ取った作土の代わりに多種多様な客土材が投入されている。この作業により地力低下や透水性の変化による土壌中のカリウム流出等による土壌中のカリウムの存在量の低下が懸念される。そこで、長期的に土壌へカリウムを供給できる資材・肥料の水田における土壌溶液中カリウムイオン（K⁺）の保持効果を検証するとともに、作物中放射性セシウム濃度と相関が高いカリウム抽出条件を見いだすことを目的に研究を進めた。

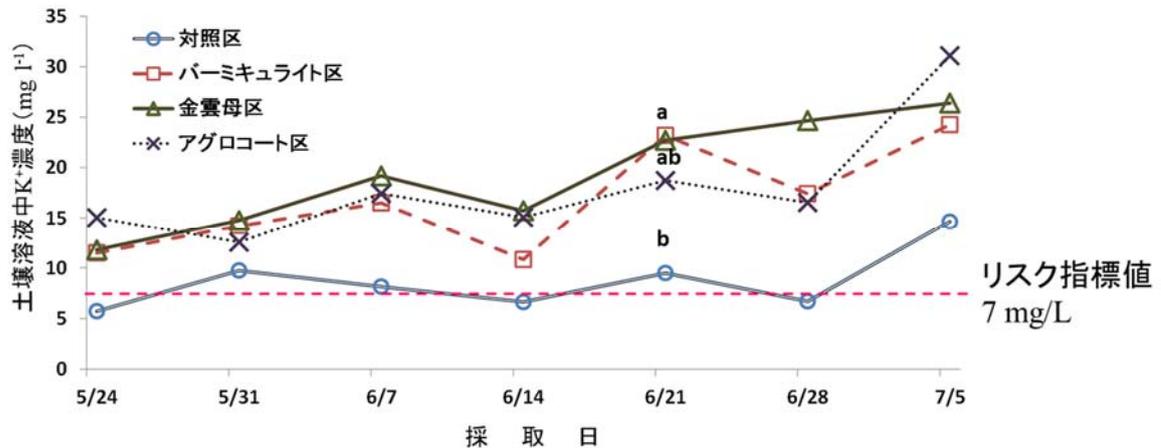


図10 平成28年の山木屋の各処理区における土壌溶液中のK⁺濃度の推移
Tukeyの多重比較検定により、異なるアルファベット間には有意差あり
($p < 0.05$)

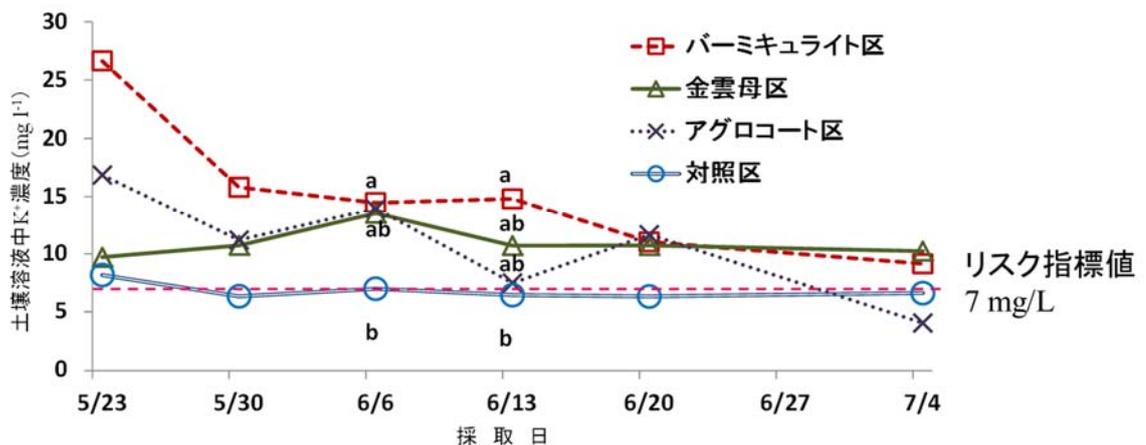


図11 平成29年の山木屋の各処理区における土壌溶液中のK⁺濃度の推移
Tukeyの多重比較検定により、異なるアルファベット間には有意差あり
($p < 0.05$)

その結果、雲母、パーミキュライト及び緩効性カリの一発施用は、土壌溶液中のK⁺濃度を3年目までは高く維持できることが分かった（図10および図11）。

水稻の玄米中への放射性セシウム吸収抑制対策としてカリの増量施用が行われている。とこ

ろで、稲わらには2%前後のカリが含まれ、県内の7割超で圃場に還元されている。しかしながら、水田へ稲わらを還元したときに、それによるカリの供給量や放射性セシウム吸収抑制効果に関しては十分には検討されていない。そこで、水田へ稲わらを還元したときに放射性セシウム吸収抑制効果や土壌中のカリ存在量への影響を調査し、玄米中への放射性セシウム吸収抑制対策における水田への稲わら還元を組み込んだ効率的なカリ施用技術の開発に挑戦した。

その結果、初年目のみカリ上乘せ施用後、稲わら連用3年目の移植時期まで土壌中交換性カリ含量25mg/100g以上に維持でき(図12および図13)、玄米中¹³⁷Cs濃度は、カリ上乘せ施用による吸収抑制対策と差が無いことが確認できた(図14)。

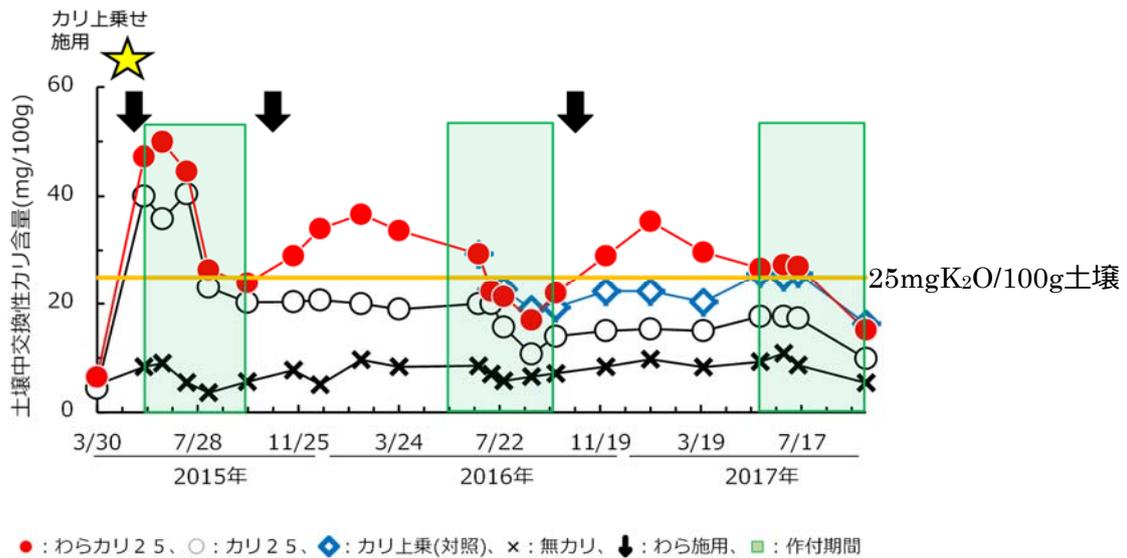


図12 初年目のみカリ上乘せ施用後の土壌中交換性カリ含量の推移

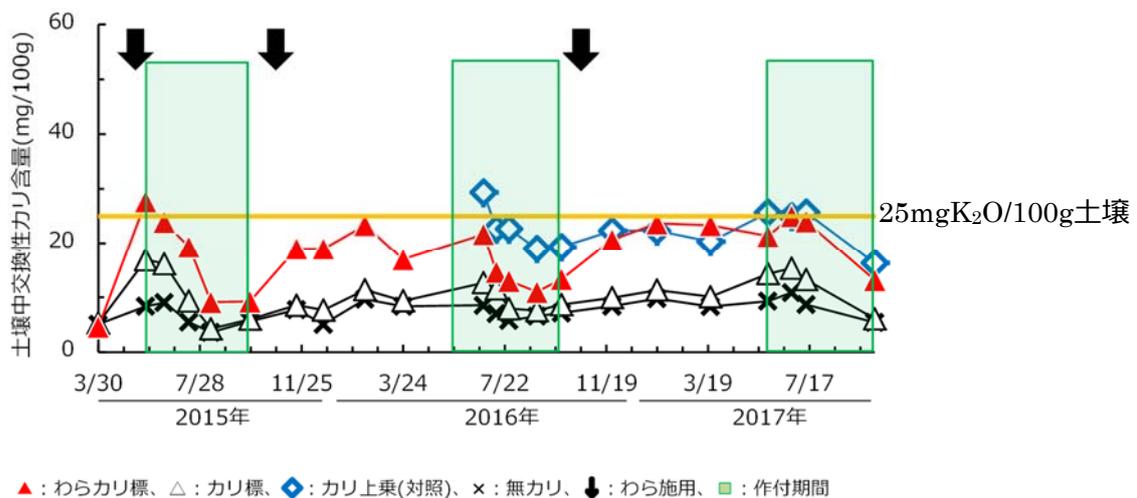
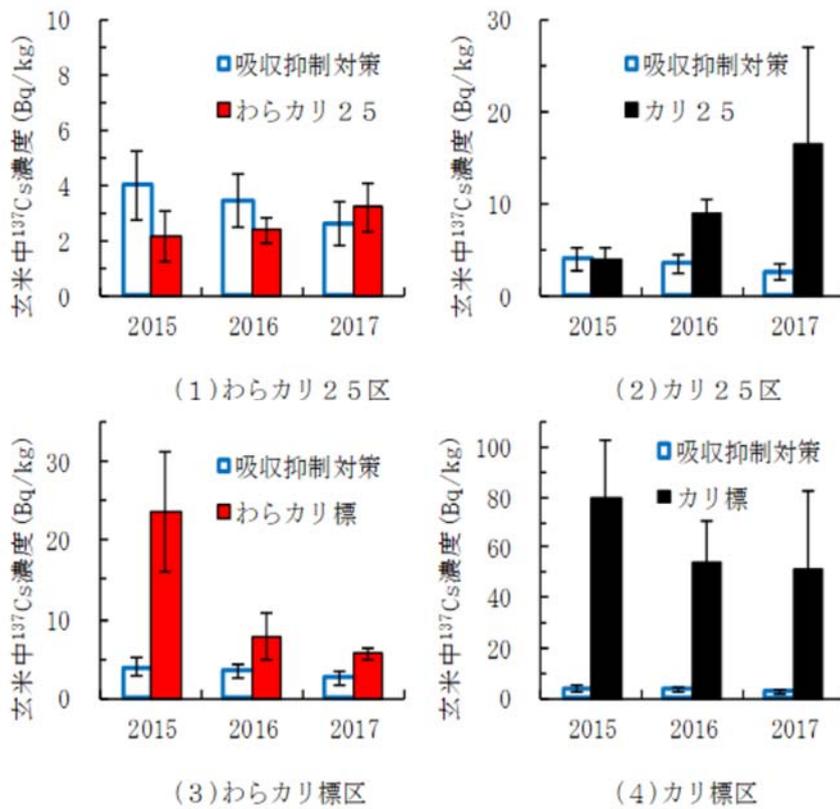


図13 カリ上乘せ施用無しの場合の土壌中交換性カリ含量の推移



137
 図 14 各処理区の玄米中 ^{137}Cs 濃度

※吸収抑制対策は、2015年はカリ 25 区、2016、2017年はカリ上乘せ(対照)。

※無カリ区の ^{137}Cs 濃度(Bq/kg)：2015年:189、2016年:143、2017年:126。

※エラーバーは標準偏差。

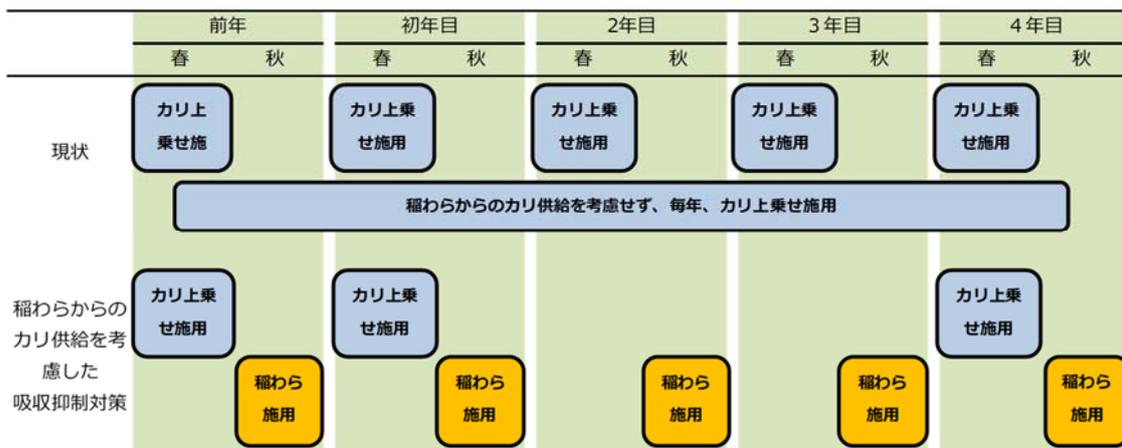


図 15 玄米中への放射性セシウム吸収抑制対策における水田への稲わら還元を組み込んだ効率的なカリ施用技術の例

※稲わら施用がない場合には、カリ上乘せ施用は必須である！

このことから、試験した水田での吸収抑制対策は、カリ上乗せ施用を毎年実施するのではなく、稲わら連用を前提としてカリ上乗せ施用を3年ごとに実施することで可能であることが示された（図15）。

イネ・ダイズの放射性Cs吸収抑制技術としてはカリウムの施用が有効であり、土壌診断と合わせて行うことで放射性Cs濃度が低減されている。しかし、過剰なカリウム施用は、土壌塩基バランスの大きな変化を引き起こす可能性がある。一方で、保肥力の弱い圃場では、交換態カリウム含量が低くなると考えられる為、可食部への放射性Cs蓄積を防ぐためには十分な量のカリウム施用が必要である。そこで、福島県内のカリウムの溶脱しやすい圃場を探索し、被覆カリウム肥料（被覆塩化カリウム）を用いて被覆カリウム肥料の有効性とカリウム施用量の低減が可能であるかについて、イネ・ダイズを用いて検証した。イネに関しては、2015年度は二本松市（図16）、2017年は西郷村の水田を用いて試験を行った（図17）。被覆カリ資材からのカリウムの溶出程度は、2015年は作付け期間（5月～9月）で約70%であった。一方、2017年度は作付け期間（5月～9月）で約80%であった。

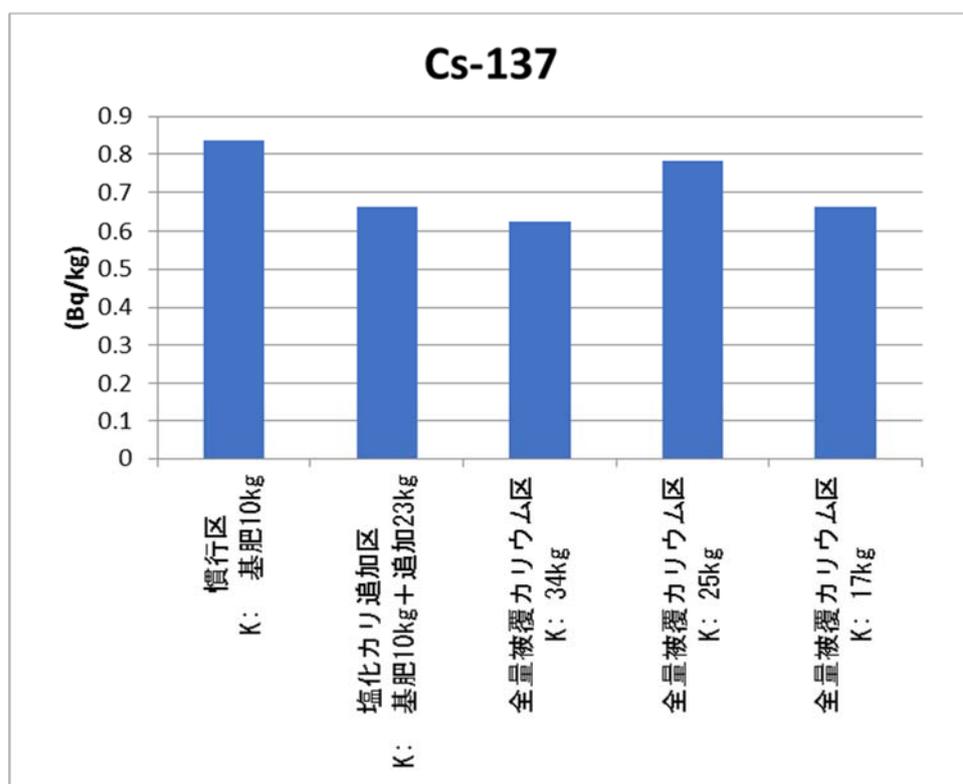


図16 塩化カリウムと被覆塩化カリウムが水稻の玄米中への放射性Cs量に与える効果（平成28年福島県内水田）

（作付け期間中に塩化カリ追加区は、全てのカリウムが土壌中へ溶出した。全量被覆カリ区のカリウムの溶出割合は、水中溶出の結果から約80%と推定され、それぞれ、図4の左から、27.2Kg、20.0Kg、13.6Kgとなると考えられた。）

塩化カリ追加区と、全量被覆カリ34kg区は、カリウムの総施用量がほぼ同等であり、両区の玄米中の放射性Cs抑制程度もほぼ同じと推定された。全量被覆カリ34kg区では、栽培期間中にカリウムが27.2kg程度溶出継続的に溶出し、かつ可食部へのCs吸収を抑制したと推定されることから、土壌への一過的なカリウム供給が低減できたと考えられた。以上のことから、継続的なカリ供給によるCs吸収抑制の可能性が示唆された。

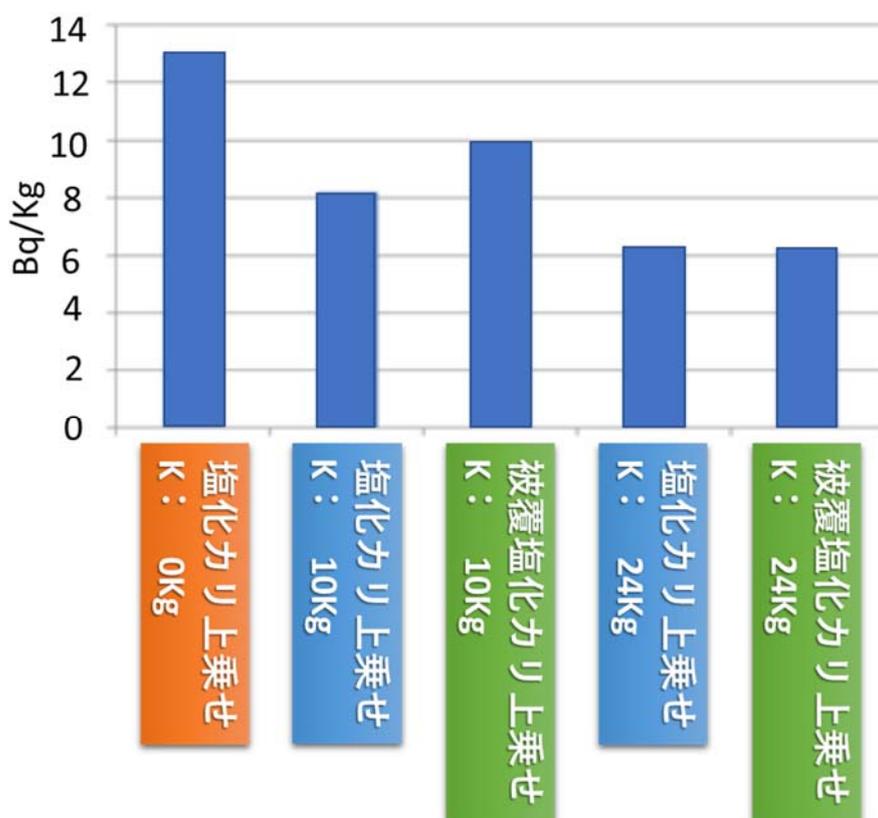


図17 福島県西白河郡西郷村の黒ボク土水田における塩化カリウムと被覆塩化カリウムが水稲の玄米中への放射性Cs量に与える効果（2017年）

（作付け期間中に塩化カリ上乗せ区は、すべてのカリウムが土壤中へ溶出、一方、被覆塩化カリ上乗せ区のカリウムの溶出割合は約80%で、それぞれ、図17の左から、8Kg、16Kgとなる。）

2017年度の試験では、塩化カリ上乗せ10Kg区と被覆塩化カリ上乗せ10Kg区を比較した場合、被覆塩化カリの溶出程度は約80%と推定されたので、栽培期間中に8kgのカリウムが土壤に添加されたことになる。この場合、玄米への放射性Cs蓄積の抑制程度も20%落ちていた。一方、倍量上乗せでは、量資材とも、玄米中の放射性Cs蓄積量は10Kg区より約25%抑制した。この場合、被覆塩化カリ上乗せ24Kg区では、実質的に16Kgのカリウムで塩化カリ上乗せ24Kg区と同等であったことになり、水田土壤へのカリウム供給を低減した。

以上により、2015年度と2017年度の水稲を対象にした水田への被覆塩化カリの施用試験は、塩化カリウム上乗せに比べ、土壤中へのカリウム添加量を低減できる可能性が示された。被覆塩化カリの場合、低減分は翌年に持ち越すことが可能で、長期的なカリウム施用計画が確立できれば、玄米中の放射性Cs蓄積量を上昇させずに、土壤中のカリウム存在量を効率的に制御できる可能性が示唆された。

ダイズを対象にした放射性Cs吸収抑制が困難な圃場に於ける緩効性カリ肥料の有効性に関しては、二本松市の畑において、慣行区（K:10Kg）と塩化カリ上乗せ区（K:18Kg）や全量被覆カリ区（2016年度のカリ溶出割合が約70%で、土壤へのカリウム付加量がそれぞれK:12.6Kg

区、9.8Kg区、7.0Kg区、3.5Kg区)でダイズを栽培し、子実中の放射性Cs蓄積量を比較したが、全量被覆カリ区(土壌へのカリウム付加量K:3.5Kg)以外は処理区間で有意な違いがなく、全処理区とも慣行区と同程度の子実中放射性Cs蓄積量を示した。

I-3. 今後の課題

「放射性Cs吸収の低減に貢献する遺伝子の特定(設定した中課題)」に関しては、ほぼ目的が達成され、玄米への放射性Cs吸収抑制系統の「栽培特性と育種マニュアル(案)」がほぼ完成した。ただ、候補遺伝子(HKT2;1、HKT2;4、HMA2)の形質転換体(ノックダウン系統)の作出が遅れ、玄米Cs蓄積量の調査が現在進行中となっている。放射性Cs吸収抑制系統の育種用DNAマーカーの作出では、qCsA3の効果確認に至らなかった。現在、効果を確認できる系統を作出中である。また、異なるカリウム条件で栽培した「ひとめぼれ」の遺伝子発現の比較では、移植後の早い時期(7日後)においては根の遺伝子発現状態が異なることが示唆されたため(昨年度は14日後と28日後に実施し発現変動遺伝子は少ないことを報告)、再現性の確認が必要である。「小課題:イネの放射性Cs吸収の低減に貢献する遺伝子の特性解明」では、HKT1遺伝子の変異株を確立したが、イネの生育は半年の期間を要するため、変異株中の玄米セシウム含量の測定にはあと数か月かかる予定である。「小課題:放射性Csを子実へ蓄積しないダイズ系統の探索と特性解明」では、子実へ放射性Csを高蓄積する系統と低蓄積系統に生理的な違いがあることを見いだしたが、子実への放射性Cs低蓄積系統と高蓄積系統の遺伝因子解析に関して、代表品種を用いた組替え自殖系統を作成中で、遺伝子解析が残された。

「農作物に関する放射性Cs吸収抑制技術の高度化(設定中課題)」では、「小課題:イネに対する生育期ごとの土壌溶液から植物根への放射性Cs吸収モデルの構築」では、H29年度の試験サンプルの測定が完了しておらず、統計的な関係性を評価後、平成30年度には投稿論文としてまとめる。「小課題:除染後水田におけるカリウム供給能評価法の開発」では、除染後水田におけるカリウム供給資材の施用効果の検証でパーミキュライトや金雲母等資材の土壌へのカリウムの供給効果が3年目まで確認できたが、4年目以降いつまで継続するか確認する必要がある。「小課題:稲わら施用による放射性Cs吸収抑制対策の高度化」では、初年目のみカリ上乗せ施用後の稲わら連用3年目収穫時の土壌中交換性カリ含量は15mg/100gであることから、4年目移植時の25mg/100g維持は困難であると想定される。また、わらのカリは溶脱しやすいことから、鋤込み時期が春の場合の土壌中交換性カリ含量や、カリや¹³⁷Cs濃度の異なるわらを用いた場合の土壌中交換性カリ含量の増加程度、玄米中¹³⁷Cs濃度の検討を行い、稲わらの施用時期や稲わらの違いによる吸収抑制効果を明らかにする必要がある。「小課題:放射性Cs吸収抑制が困難な圃場に於ける緩効性カリ肥料の有効性検証」では、2015年度と2017年度の二本松市と西郷村での水稻を対象にした水田への被覆塩化カリの施用試験は、塩化カリウム上乗せに比べ、土壌中へのカリウム添加量を低減できる可能性が示された。被覆塩化カリの場合、低減分は翌年に持ち越すことが可能で、長期的なカリウム施用計画が確立できれば、玄米中の放射性Cs蓄積量を上昇させずに、土壌中のカリウム存在量を効率的に制御できる可能性がある。そのためには、被覆塩化カリの効果がさらに明瞭に出現する農業環境の把握および、そこでの総合的なカリウム施用体系の確立に必要な緩効性カリを有効利用する基盤情報の取得が必要である。

中課題番号(e-Radシステム課題 ID8 桁)	15653590	研究期間	平成27～29年度
小課題番号	100	研究期間	平成27～29年度
中課題名	放射性セシウム吸収抑制メカニズムの解明		
小課題名	イネの放射性Cs吸収に関する、根での吸収遺伝子、茎葉部、籾・玄米への輸送に関する遺伝子等をさらに網羅的に探索		
小課題責任者名・研究機関	横山正、大川泰一郎・東京農工大学		

1) 研究目的

本研究は、放射性Csを吸収、蓄積しにくいイネ品種を効率的に育成するため、放射性Cs吸収、子実蓄積特性の異なるイネ品種の組合せを用いて、SNPマーカーを用いた高精度の量的形質遺伝子座 (QTL) 解析を行い、放射性Cs吸収、子実への蓄積に関わるQTLの特定を行い、低放射性Cs吸収・蓄積抑制に関わる候補遺伝子の探索を行う。

2) 研究成果

日本型のひとめぼれとインド型品種タカナリのRILs 138系統を用いて、放射性Csの吸収および子実への蓄積に関わるQTLの特定のため、玄米の放射性Cs濃度、蓄積量などの表現型の測定を行った。遺伝子型の解析には約1,000のSNPマーカーを用い、R-QTLによるQTL解析を行った。平成27年度は、福島県二本松市針道地区の水田を用いて、以下の手順で栽培し、放射性Csの放射線量を測定比較した。5月7日に育苗用ポットに播種し、6月6日に1本植えた。5系統毎に対照として親品種を植え、圃場における放射性Cs分布の指標とした。葉が黄変し、登熟により穂が垂れてき10月21日に地上部を根元で切断し、根元を水洗して3株ずつネットに入れ、自然乾燥させた。乾燥した植物体を玄米、籾殻、茎葉部に分け、PerkinElmer社のガンマカウンター (WIZARD² 2480) を用いて、放射線量を測定した。平成28年度は、福島県伊達市市月舘地区の多湿水田黒ボク土を用い、現地では採取した土壌を均一化するため、数回切り返して混合した。以下の手順で栽培し、放射性Csの放射線量を測定比較した。5月23日に播種し、株間10cmで大型バットに1本植え、3反復で移植した。収穫期の9月30日に植物体と土壌を採取し、玄米、籾殻、地上部に分け、PerkinElmer社のガンマカウンター (WIZARD² 2480) を用いて、放射線量を測定した。

(1) 土壌の放射性Cs濃度と土壌から玄米への移行係数との関係

測定した土壌の放射性Cs濃度の変動と玄米への影響を検討するため、土壌の全放射性Cs ($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$) 濃度と玄米への移行係数との関係を図1に示した。土壌の全放射性Csはほとんど5100～5700Bq/kgの範囲にあり環境変動が比較的小さかった。玄米への移行係数は0.08～0.35の範囲にあり系統間の変異が大きく、土壌の全放射性Cs濃度との間には関係はみられず、玄米への移行係数の相違は主に系統による遺伝変異により生じることが示唆された。

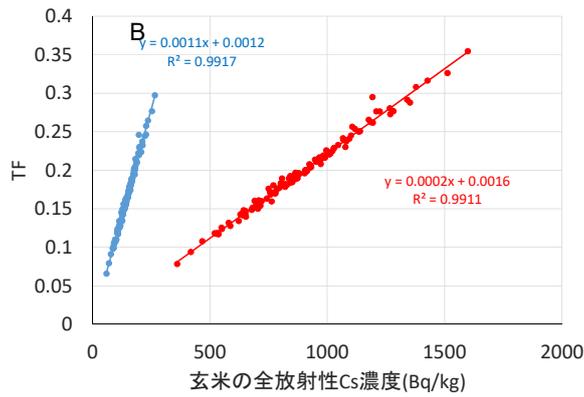
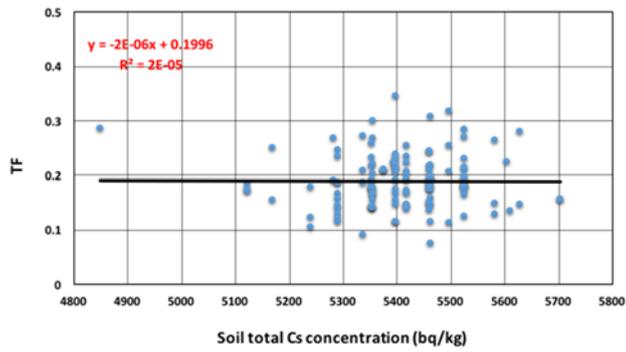


図1 土壌 (A)、玄米 (B) の全放射性Cs濃度と玄米への移行係数との関係。

(2) ひとめぼれとタカナリのRILsにおける玄米の放射性Cs濃度の頻度分布

ひとめぼれとタカナリのRILs138系統における収穫期の玄米の放射性Cs濃度 (^{134}Cs , ^{137}Cs) の頻度分布をそれぞれ図2に示した。玄米の ^{134}Cs は60~280Bq/kgの間、 ^{137}Cs は380~1600Bq/kgの間で連続分布を示し、この形質が量的形質であることを示した。玄米の ^{134}Cs 濃度と ^{137}Cs 濃度との間には、密接な正の相関が認められた (図3)。

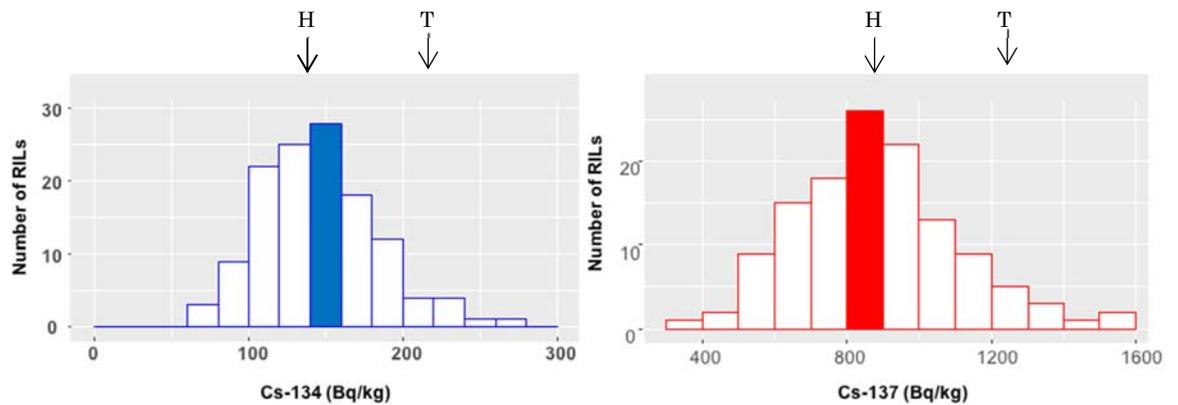


図2 ひとめぼれ/タカナリRILsにおける玄米の放射性Cs濃度 (^{134}Cs , ^{137}Cs) の頻度分布。

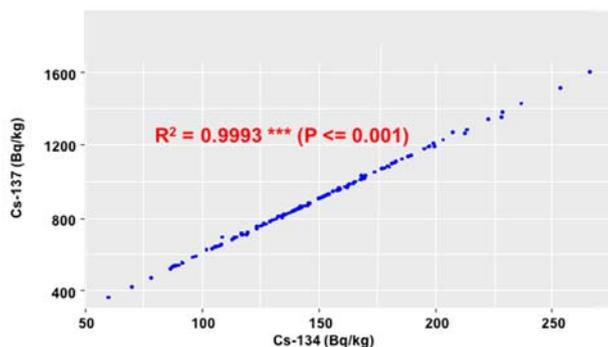


図3 玄米の¹³⁴Cs濃度と¹³⁷Cs濃度との関係.

ひとめぼれとタカナリのRILsを用いたQTL解析の結果、¹³⁴Cs、¹³⁷Csともに、ひとめぼれの対立遺伝子により玄米の放射性Cs濃度を下げる効果のある有意なQTLを第1染色体長腕（寄与率16.7%）と第6染色体長腕（寄与率18.1%）に検出された。とくに、¹³⁷Csの第1、6染色体のLODが有意に高かった（図4）。タカナリの対立遺伝子が玄米の¹³⁷Cs濃度を下げるQTLを第3染色体（寄与率5.6%）に検出し、第6染色体のQTLとの交互作用のあることが認められた（図5）。ゲノムワイドアソシエーション解析（GWAS）においてもQTL解析と同様の領域に有意なピークが検出された。検出された第1、3、6染色体のQTLの領域における候補遺伝子を検索した結果、第6染色体にはカチオントランスポーター*HKT1*、 K^+/Na^+ トランスポーター、重金属トランスポーターが見出された（表1）。第1染色体には*OsGA20ox2* (*sd1*)（表2）、第3染色体にはストリゴラクトンのシグナル伝達におけるTCP転写因子の*OsTBI*、ジベレリンのシグナル伝達における抑制因子DELLAをコードする*OSGAI*（表3）が見出された。

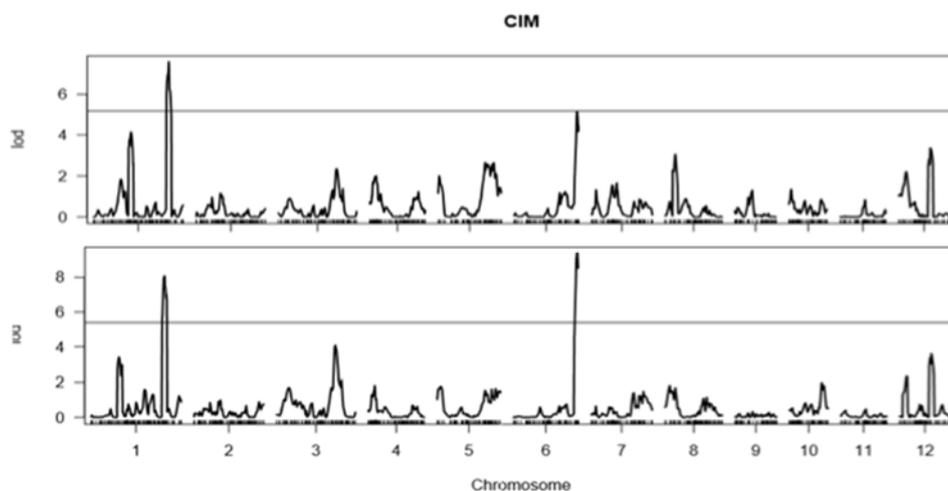


図4 ひとめぼれ/タカナリRILsにおける収穫期の玄米の¹³⁴Cs濃度と¹³⁷Cs濃度のQTLの検出。横線は、5%permutation testによるLODの閾値を示す。

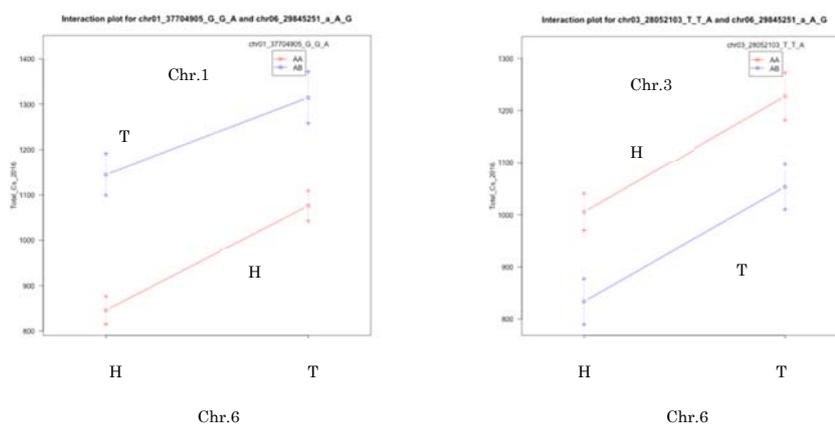


図5 第6染色体で検出されたひとめぼれ型で放射性Cs濃度を下げるQTLと第1,3染色体のQTLとの交互作用。

H: ひとめぼれ型、T: タカナリ型

表1 第1染色体で検出されたひとめぼれ型で放射性Cs濃度を下げるQTLの候補遺伝子の検索。

ID	Description	Accession	Chr	Start	End
Os0110871600-01	Similar to Peptide transporter PTR2-B.	AK103248	chr01	37,795,606	37,797,741
Os0110871700-00	Oligopeptide transporter domain containing protein.		chr01	37,800,956	37,802,110
Os0110872400-01	Similar to POT family protein.	AK243378	chr01	37,830,130	37,832,381
Os0110872450-00	Similar to POT family protein.	EU973246	chr01	37,832,970	37,833,242
Os0110872500-01	Oligopeptide transporter domain containing protein.	AK068086	chr01	37,834,199	37,836,882
Os0110872500-02	Similar to peptide transporter PTR2-B.	AK066692	chr01	37,835,234	37,836,889
Os0110876100-00	Similar to Chloride channel.	AK248202	chr01	38,013,613	38,021,799
Os0110876200-01	Similar to Chloride channel protein CLC-c (AtCLC-c).	AK119459	chr01	38,018,975	38,021,723
Os0110878400-01	Amino acid transporter, transmembrane domain containing protein.	AK073884	chr01	38,118,010	38,120,760
Os0110878700-02	Amino acid transporter, transmembrane domain containing protein.	AK121636	chr01	38,133,475	38,137,770
Os0110878700-03	Amino acid transporter, transmembrane domain containing protein.	AK119529	chr01	38,133,571	38,137,710
Os0110883800-01	Similar to GA C20oxidase2. sd1	CT834906	chr01	38,382,385	38,385,469
Os0110883800-02	GA 20-oxidase2, GA metabolism		chr01	38,382,466	38,385,208
Os0110898900-01	Nucleotide-sugar transporter family protein.	AK120093	chr01	39,085,081	39,091,029
Os0110908600-01	Amino acid transporter, transmembrane domain containing protein.	AK241733	chr01	39,562,727	39,565,686

表2 第6染色体で検出されたひとめぼれ型で放射性Cs濃度を下げるQTLの候補遺伝子の検索。

ID	Description	Accession	Chr.	Start	End
Os06t0700700-02	P-Type heavy metal ATPase, Delivery of Zinc to developing tissues		chr06	29,473,630	29,480,485
Os06t0700700-01	Similar to P1B-type heavy metal transporting ATPase.	AK107235	chr06	29,477,949	29,480,905
Os06t0701600-01	Monovalent cation transporter, Na ⁺ and K ⁺ transport		chr06	29,534,805	29,536,553
Os06t0701700-01	Ion transporter, Na ⁺ /K ⁺ symport		chr06	29,538,938	29,541,203
Os06t0701700-02	Similar to Cation transporter HKT1.	AK105132	chr06	29,538,992	29,540,164
Os06t0706100-00	Similar to Peptide transporter PTR2.	AK334364	chr06	29,828,537	29,831,137
Os06t0706400-01	PTR/NRT1 (peptide transporter/nitrate transporter 1) family protein, Nitrogen utilization efficiency, growth and grain yield		chr06	29,838,314	29,841,264

表3 第3染色体で検出されたタカナリ型で放射性Cs濃度を下げるQTLの候補遺伝子の検索。

ID	Description	Accession	Chr	Start	End
Os03t0695700-01	Similar to Chloride channel protein CLC-d (AtCLC-d).	AK059537	chr03	27861769	27864057
Os03t0703400-01	Similar to MAP3K beta 3 protein kinase (EC 2.7.1.37) (Fragment).	AK100023	chr03	28269607	28275709
Os03t0704400-01	Serine/threonine protein kinase domain containing protein.	AK101297	chr03	28314296	28319907
Os03t0706500-01	TCP family transcription factor, Negative regulator for lateral branching	AK107083	chr03	28428504	28430438
Os03t0707600-01	DELLA repressor protein, Gibberellin signaling		chr03	28512754	28515086
Os03t0708800-02	Similar to GEBP transcription factor (Fragment).	AK063654	chr03	28585243	28586646

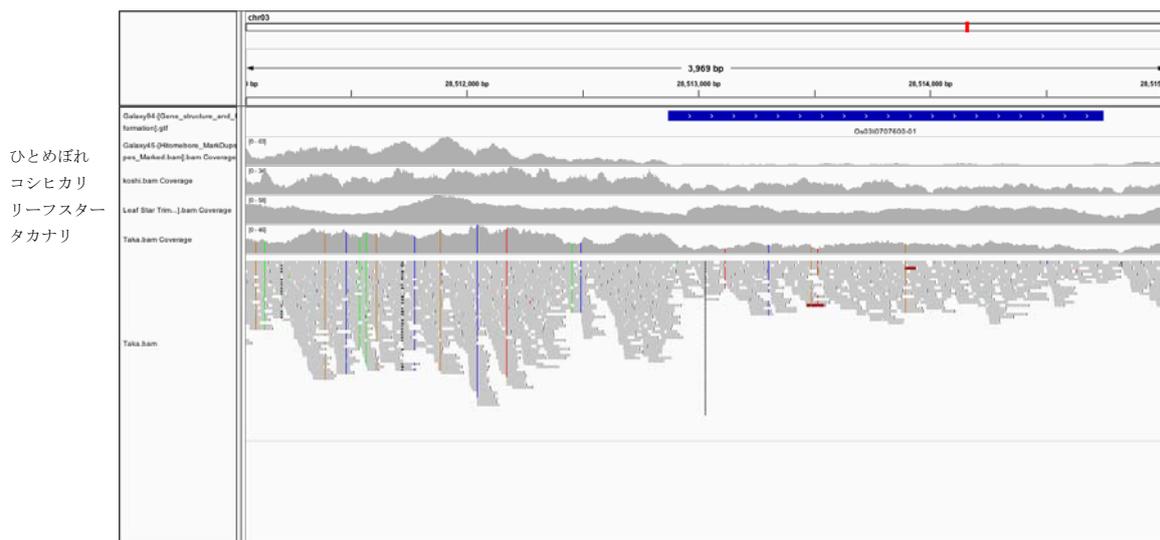


図6 第3染色体の *OsGAI* の塩基配列の品種間比較。

		216
Hitomebore	181 RMRTGGGSTSSSSSSSSSLGGGASRGSVVEAAPPATQGAAAANAPAVPVVVVVDTQEAGIR	
Takanari	181 RMRTGGGSTSSSSSSSSSLGGGASRGSVVEAAPPAMQGAAAANAPAVPVVVVVDTQEAGIR	
		342
Hitomebore	301 STLLDAAFADLLHAHFYESCPLYLKFAHFTANQAILEAFAGCHRVHVVDVFGIKQGMQWPAL	
Takanari	301 STLLDAAFADLLHAHFYESCPLYLKFAHFTANQAILEAFAGCRRVHVVDVFGIKQGMQWPAL	

図7 第3染色体の *OsGAI* のアミノ酸配列の品種間比較。

DELLA ドメイン : 39-111、GRAS ドメイン : 241-621.

OsGAI の塩基配列を品種間で比較した結果、ひとめぼれ、コシヒカリ、リーフスターとの間には相違はなく、ひとめぼれとタカナリとの間には上流の領域に欠損とSNP変異が多数あり、第1エクソンに5か所のSNP変異があった。*indica*で報告されているアミノ酸配列 (NCBI:AAX07462) と同様に、DELLAタンパク質の216番目のアミノ酸がTからM、GRAS領域内の342番目のアミノ酸にHから

Rのアミノ酸変異が見い出された（図7）。

（3）玄米低放射性Cs蓄積系統と玄米高放射性Cs蓄積系統の選抜

QTLの集積効果を正逆で検討するため、ひとめぼれ型の第1,6染色体とタカナリ型の第3染色体の領域をもつ4系統の玄米低放射性Cs蓄積系統、その逆のタカナリ型の第1あるいは第6染色体の領域、ひとめぼれ型の第3染色体の領域をもつ4系統の玄米高放射性Cs蓄積系統を選抜した（図8）。

RIL	玄米 ¹³⁷ Cs(Bq/kg)	TF	H型低Cs	T型低Cs	H型低Cs
			chr1_38204852	chr3_28533159	chr6_29345457
17-34	360.8	0.076	H	T	H
17-88	419.0	0.091	H	T	H
17-90	467.9	0.105	H	T	H
17-89	520.5	0.115	H	T	H

RIL	玄米 ¹³⁷ Cs(Bq/kg)	TF	T型高Cs	H型高Cs	T型高Cs
			chr1_38204852	chr3_28533159	chr6_29345457
17-23	1599.3	0.344	H	H	T
17-138	1512.6	0.317	T	H	H
17-119	1427.5	0.307	T	H	T
17-76	1378.9	0.300	H	H	T

H: ひとめぼれ型、T:タカナリ型

図8 玄米放射性Cs蓄積QTLの正逆集積系統の遺伝子型。

	RIL	玄米 ¹³⁷ Cs(Bq/kg)	玄米TF	H型低Cs	T型低Cs	H型低Cs
				chr1_38204852	chr3_28533159	chr6_29345457
低放射性Cs系統	17-90	142.3±40.2	0.0358±0.0091	H	T	H
低放射性Cs系統	17-89	134.3±42.4	0.0341±0.0118	H	T	H
	ひとめぼれ	194.9±39.6	0.0503±0.0113	H	H	H
高放射性Cs系統	17-23	301.6±83.0	0.0774±0.0241	H	H	T
高放射性Cs系統	17-138	376.7±132.5	0.0941±0.0299	T	H	H
	タカナリ	282.5±118.7	0.0708±0.0334	T	T	T

H: ひとめぼれ型、T:タカナリ型

図9 低放射性Cs系統における玄米¹³⁷Cs濃度。

（4）放射性Cs蓄積に関わるQTLの効果の確認

昨年度検出した放射性Cs蓄積に関わるQTLの効果を確認するため、選抜した低放射性Cs系統と高放射性Cs系統の玄米¹³⁷Cs蓄積濃度と玄米への¹³⁷Csの移行係数TFをひとめぼれ、タカナリと比較した。

その結果、第1染色体と第6染色体がひとめぼれ型、第3染色体がタカナリ型で玄米への放射性Cs蓄積が低かった17-90、17-89は本年度もひとめぼれより玄米の¹³⁷Cs濃度が約30%低く、TFも約30%低くなり、第3染色体がタカナリ型に置換するとひとめぼれよりさらに低くなった（図9）。また、第1,3染色体がひとめぼれ型で第6染色体のみタカナリ型の17-23はひとめぼれより玄米の¹³⁷Cs濃度が55%、TFも55%高く、第6染色体がタカナリ型に置換するだけでもタカナリと同様に高くなった。また第1染色体のみタカナリ型の17-138も玄米の¹³⁷Cs濃度、TFとも約2倍に増加した。これらのことから、昨年度検出された放射性Cs玄米蓄積に関わるQTLの効果が確認された。

3) 成果活用における留意点

育成した低放射性Cs系統、マーカー情報は良食味品種の育種素材、情報として活用することに限定する。

4) 今後の課題

低放射性Cs蓄積QTLの候補遺伝子の特定とともに、NILとその集積系統を育成し、それぞれのQTLのDNAマーカー情報とともにマーカー選抜育種に適用する。

中課題番号(e-Radシステム課題 ID8 桁)	15653590	研究期間	平成27～29年度
小課題番号	101	研究期間	平成27～29年度
中課題名	放射性セシウム吸収抑制メカニズムの解明		
小課題名	放射性Cs吸収の低減に貢献する遺伝子の特定		
小課題責任者名・研究機関	阿部陽・公益財団法人岩手生物工学研究センター		

1) 研究目的

イネの放射性Cs吸収の低減に貢献する遺伝子を特定する。

2) 研究成果

「ひとめぼれ／タカナリ」の組換え自殖系統群 (RILs) を高い放射性Cs濃度土壌で栽培した高精度試験のQTL解析から、第6染色体に玄米の放射性Cs濃度に関するメジャーQTL “*qCsA6*” を検出した (図1)。候補領域内にはHIGH-AFFINITY K⁺ トランスポーター2個、重金属トランスポーター1個が存在し、いずれも「ひとめぼれ」と「タカナリ」間でアミノ酸配列に違いがあった。また、第1染色体にQTL “*qCsA1*” を検出し (図1)、そのQTLは稈長のQTLと同じ箇所であった。いずれのQTLも「ひとめぼれ」型が玄米の放射性Cs濃度を低くするQTLであった。第3染色体には、*qCsA1* と有意な相加効果のある “*qCsA3*” を同定した。*qCsA3* は「タカナリ」型が玄米の放射性Cs濃度を低くするQTLであった。

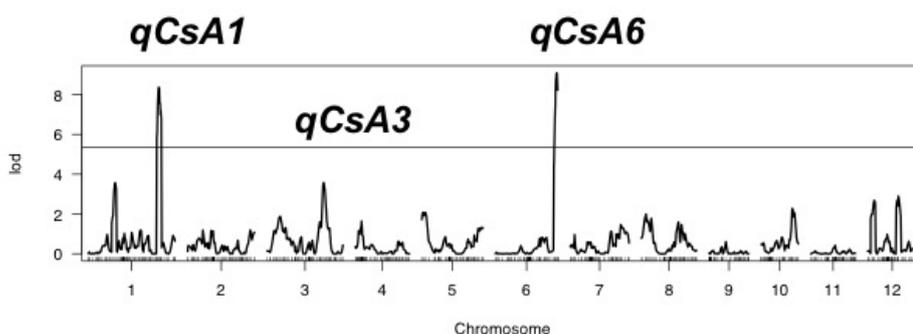


図1 玄米Cs濃度に関するQTL解析結果

qCsA6 に座乗する遺伝子のうち、アノテーション情報からセシウム吸収に関わることが推察された Os06t0701700-1 (HIGH-AFFINITY K⁺ TRANSPORTER 1, HKT1 (OsHKT2;1)), Os06t0701600-2 (HIGH-AFFINITY K⁺ TRANSPORTER 9, HKT9 (OsHKT2;4)), Os06t0700700-2 (heavy metal transporter 2, HMA2) について、「ひとめぼれ」と「タカナリ」のアミノ酸配列を比較した結果、HKT2;1では2カ所のアミノ酸置換、HKT2;4では6カ所のアミノ酸置換、HMA2では17カ所のアミノ酸置換と「タカナ

リ」に2アミノ酸の挿入を確認した。課題103の結果から、ひとめぼれ型HKT2;1に比べて、タカナリ型HKT2;1はCs吸収選択性が高いことが明らかとなった。すなわち、*qCsA6*の原因遺伝子はHKT2;1であり、アミノ酸配列の違いによってタカナリ型でCs吸収選択性が高いことが、タカナリで玄米Cs濃度が高いことが推察された。

約5,000系統の「ひとめぼれ」突然変異系統から、*qCsA6* 候補遺伝子であるHKT2;1のエクソン領域に変異のある系統をTILLING法によって選抜した。HKT2;1に変異のある6系統を高濃度放射性Cs土壌による栽培試験に供試した結果、変異（アミノ酸置換）によって移行係数が小さくなる変異系統（Hit5947、Hit6497）を見出した（図2）。これらは玄米Cs蓄積が「ひとめぼれ」より低い遺伝子資源である可能性が示唆された。

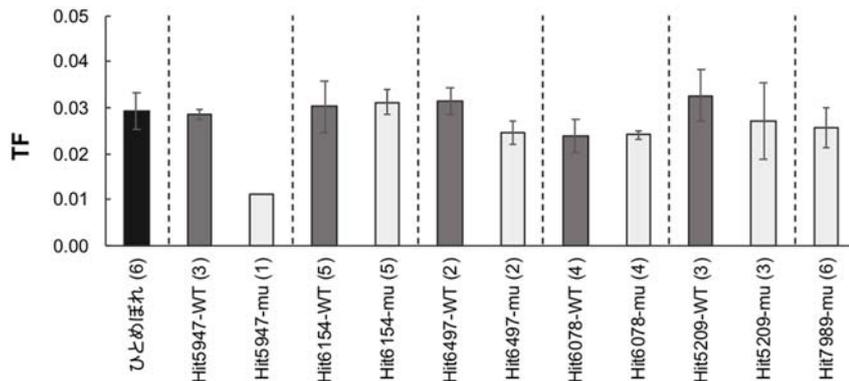


図2 HKT2;1にアミノ酸変異がある「ひとめぼれ」突然変異系統の玄米へのCs移行係数
WT: 野生型、mu: 突然変異型、カッコ内数値は供試個体数

qCsA1 候補遺伝子であるSD1 (GA20ox2) の「ひとめぼれ」準同質遺伝子系統を用いて、稈長が玄米Cs蓄積に与える影響を調べた結果、「ひとめぼれ」に比べて、短稈のNIL25-1-2 (レイメイ型sd1) およびNIL53-4-2 (タカナリ型sd1) は移行係数が高い傾向が認められたことから、*qCsA1* の原因遺伝子はsd1である可能性が示唆された（図3）。さらに、稈長と玄米Cs蓄積量の関係を明らかにする目的で、「ひとめぼれ」と長稈の系統を交配し、その交雑後代から「ひとめぼれ」より長稈で、かつ*qCsA6* が「ひとめぼれ」型の系統を選抜した (HLTAT-001~005)。これら長稈系統の移行係数は「ひとめぼれ」より小さい傾向が認められた（図3）。すなわち、*qCsA1* の原因遺伝子はsd1であり、稈長の違いが玄米Cs濃度に影響を与えることが示唆された。

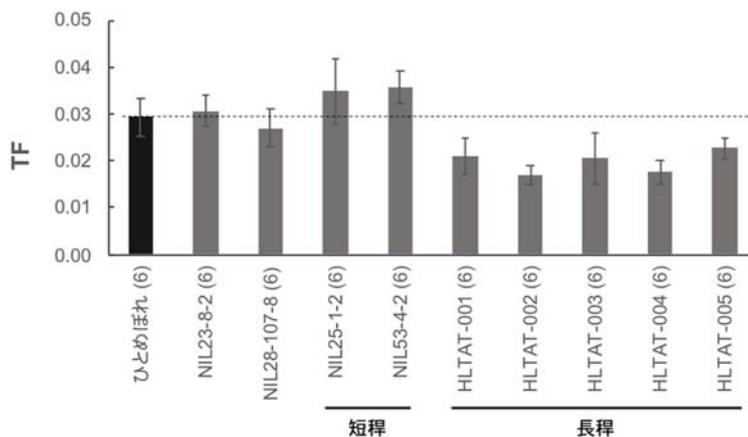


図3 稈長が異なる系統の玄米へのCs移行係数

3) 成果活用における留意点

本研究成果は、「ひとめぼれ／タカナリ」のRILsを用いた試験によって得られた結果である。

4) 今後の課題

玄米Cs濃度低減に寄与する遺伝子の実験的証明とその作用機構の解明。「ひとめぼれ」より玄米Cs濃度を低くする遺伝子資源の確立と育種利用。

中課題番号(e-Radシステム課題 ID8 桁)	15653590	研究期間	平成27～29年度
小課題番号	102	研究期間	平成27～29年度
中課題名	放射性セシウム吸収抑制メカニズムの解明		
小課題名	特定した放射性Cs吸収抑制遺伝子に関わるDNAマーカーの作出とその知的財産権の利用を広く許諾		
小課題責任者名・研究機関	阿部陽・公益財団法人岩手生物工学研究センター		

1) 研究目的

イネの各組織で高発現している放射性Cs吸収抑制型輸送体を見つけDNAマーカーを開発する。

2) 研究成果

小課題101で同定したメジャーQTL *qCsA6* の候補遺伝子 (HKT2;1、HKT2;4、HMA2) の根における遺伝子発現量 (リアルタイムqPCR) を比較した結果、HKT2;1は「ひとめぼれ」において遺伝子発現量が高く、HMA2は「タカナリ」で遺伝子発現量が高いことが明らかとなった。HKT2;4は根で発現していない。また、出穂後の稈におけるHKT2;1の遺伝子発現量 (RNA-seq法) は、「タカナリ」に比べて「ひとめぼれ」で統計的有意に高い傾向が認められた (図1)。

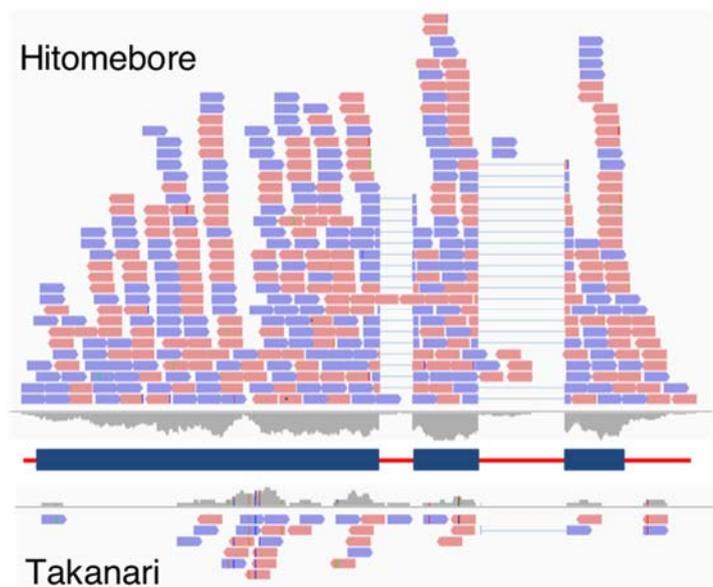


図1 稈から抽出したRNAのRNA-seq解析によるHKT2;1のリードアラインメント状況
「タカナリ」に比べて「ひとめぼれ」のリードが明らかに多い。

3カ所のQTL *qCsA1*、*qCsA3* および *qCsA6* の遺伝子型を識別できるDNAマーカーを開発し（図1）、「米の放射性セシウム蓄積の少ない改良型ひとめぼれの栽培特性、育種マニュアル」として取りまとめた。なお、「ひとめぼれ」と「タカナリ」との解析から当該DNAマーカーを開発したことに留意する必要がある。

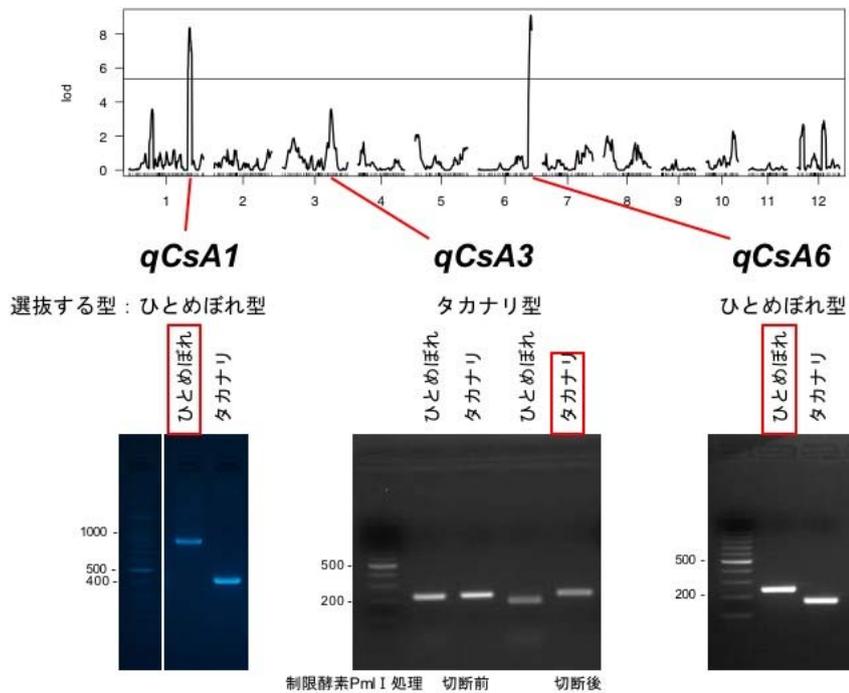


図1 QTL選抜用DNAマーカー

異なるカリウム条件（K 0 kg/10a、16kg/10a）で栽培した「ひとめぼれ」および「タカナリ」の遺伝子発現量を網羅的発現解析BrAD-seq法によって比較すると、品種間の比較では発現量が有意に異なる遺伝子が多いが、カリウム条件間の比較では葉身および根において移植14日後および28日後のいずれにおいても発現量が有意に異なる遺伝子は少なかった（図2、図3）（平成28年度）。

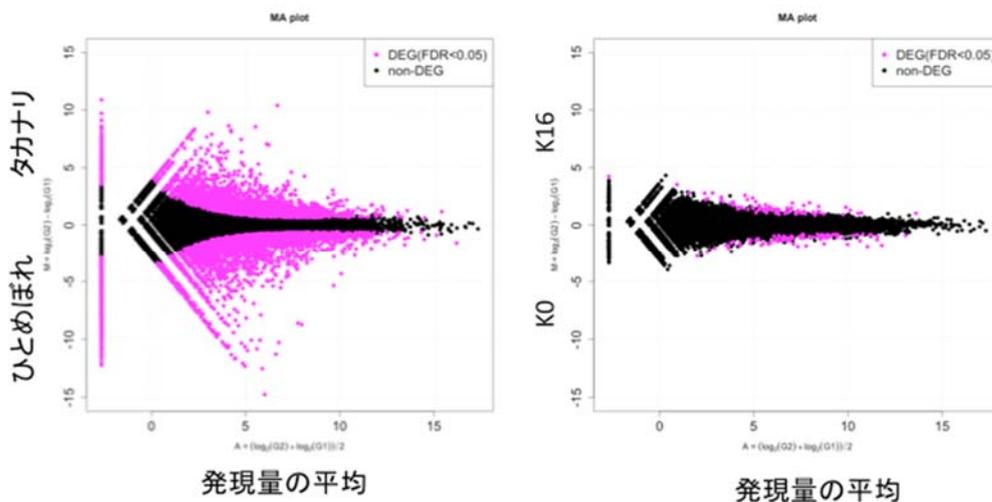


図2 移植14日後の完全展開n葉の葉身における遺伝子発現変動のMA plot
左：品種間の比較（K=0条件）、右：カリウム条件間の比較（ひとめぼれ）

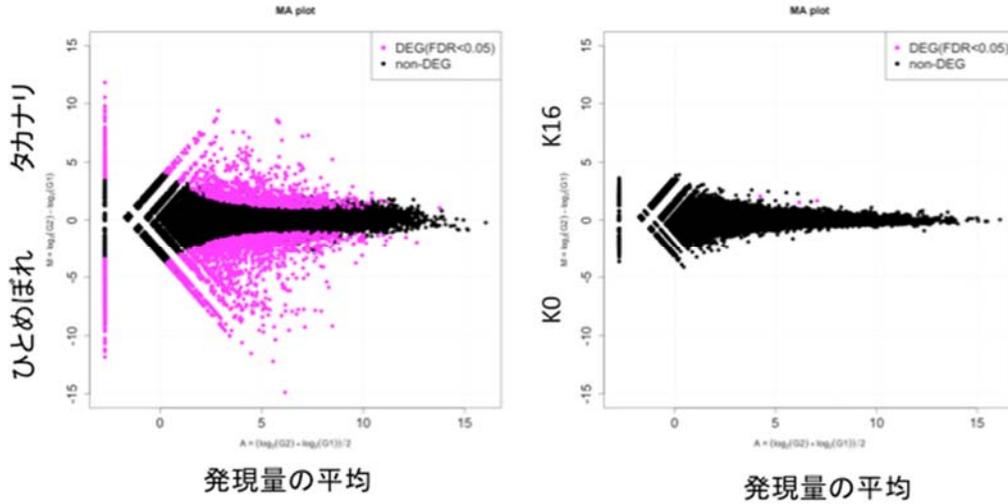


図3 移植28日後の根における遺伝子発現変動のMA plot

左：品種間の比較（K=0条件）、右：カリウム条件間の比較（ひとめぼれ）

「ひとめぼれ」のみを用いて、異なるカリウム条件（K 1 kg/10a、16kg/10a）で栽培した移植7日後および28日後の遺伝子発現変動解析を行った結果、葉身および葉鞘においては発現量が有意に異なる遺伝子はほとんどなかった（図4）。一方、根においては、移植後第7では2,413 遺伝子（transcript）、28日後では783 遺伝子（transcript）が有意に異なっていた。移植7日後では発現量が異なる遺伝子が多いものの、28日後にはその数が少なくなるとともに、発現量の差も小さくなった（図4）すなわち、移植後の早い時期においてはカリウム施肥量の多少によって根の遺伝子発現状態が異なることが示唆された。

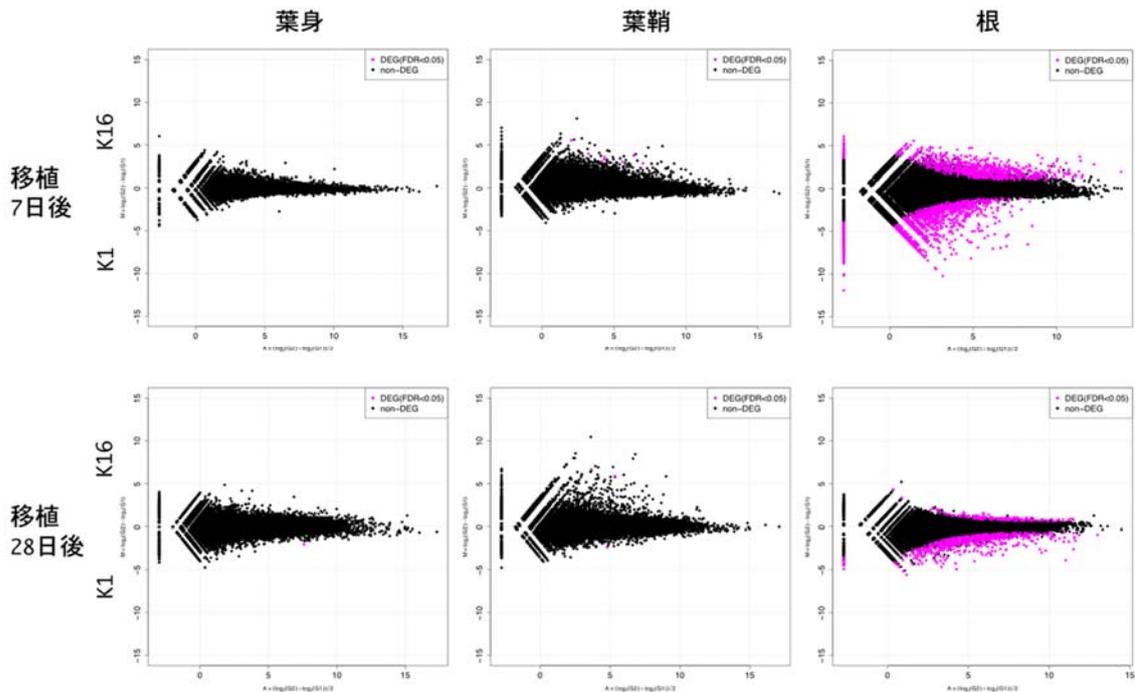


図4 カリウム施肥量の違いが「ひとめぼれ」遺伝子発現量に与える影響

ピンクの点は有意に発現量が異なる遺伝子。

3) 成果活用における留意点

本研究成果は、水稻品種「ひとめぼれ」および「タカナリ」を用いた試験によって得られた結果である。

4) 今後の課題

玄米Cs濃度低減に寄与する遺伝子の実験的証明とその作用機構の解明。カリウム施肥量の多少によって根の遺伝子発現状態が異なることの再現性確認とセシウム吸収に与える影響の解明。

中課題番号(e-Radシステム課題 ID8 桁)	15653590	研究期間	平成27～29年度
小課題番号	103	研究期間	平成27～29年度
中課題名 (契約課題名)	放射性Cs吸収の低減に貢献する遺伝子の特定		
小課題名	放射性 Cs 吸収の低減に貢献する遺伝子の特性解明		
小課題責任者名・研究機関	大津直子・東京農工大学大学院農学研究院		

1) 研究目的

QTL解析で放射性Cs吸収抑制のターゲットと予想される、吸収・輸送タンパク質の放射性Csの取り込み特性の解明を行う。

2) 研究成果

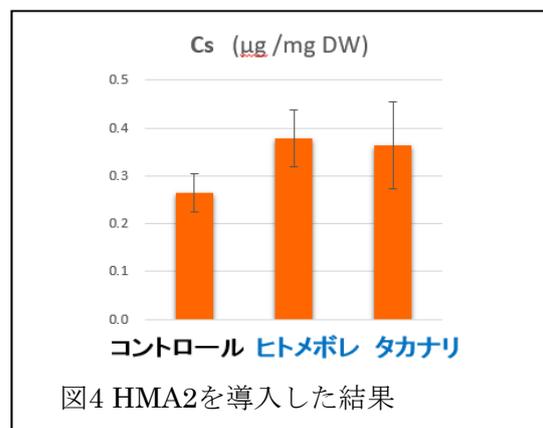
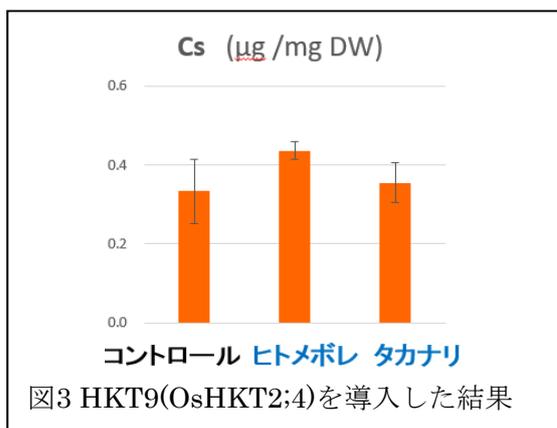
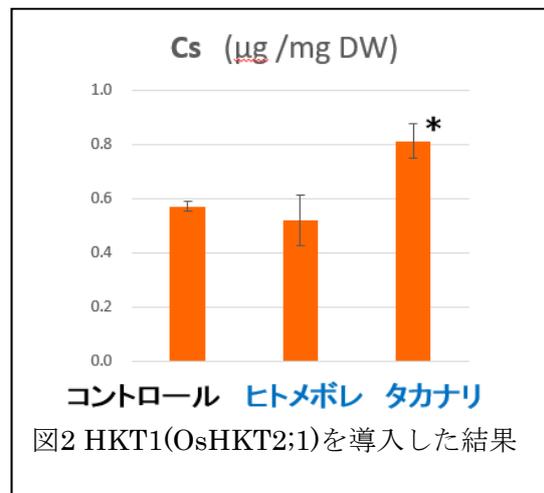
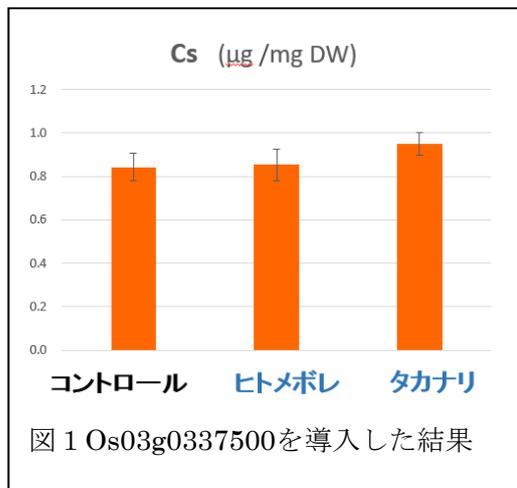
玄米中の放射性セシウム含量が、タカナリよりもひとめぼれにおいて低いことを利用して、「ひとめぼれ-タカナリ」の組換え自殖系統群を用いたQTL解析が行われた。2014年以前の圃場におけるQTL解析ではカリウム輸送体*Os03g0337500*が、2016年のモデル水田におけるQTL解析ではを*Os06t0701700-1* (HIGH-AFFINITY K⁺ TRANSPORTER 1, *HKT1* (*OsHKT2;1*))、*Os06t0701600-2* (HIGH-AFFINITY K⁺ TRANSPORTER 9, *HKT9* (*OsHKT2;4*))、*Os06t0700700-2* (heavy metal transporter 2, *HMA2*) の3遺伝子が候補に挙げられた。

本課題では、酵母においてイネ遺伝子産物のセシウム吸収活性を評価する系を立ち上げた。出芽酵母における主要なCs輸送体遺伝子を欠損した*trk1trk2*二重変異株を作製し、酵母の野生型株あるいは*trk1trk2*二重変異株に、pRSA316ベクターを用いてヒトメボレ型とタカナリ型のセシウム輸送体候補遺伝子を導入するという系である。酵母は増殖期まで培養した後、K非添加培地に換えて6時間培養して細胞中のKを減少させ、Cs輸送実験の妨げとならないようにする。その後K濃度を0 mM, Cs濃度を1 mMにし、20時間培養し、原子吸光光度計で細胞中のCs及びK含量を測定した。

まず酵母野生型株と*trk1trk2*二重変異株について、セシウムの吸収特性を調べたところ、予想に反して二重変異株の方が10倍以上セシウムを多く吸収していた。顕微鏡で観察すると、野生型株の酵母は球形だが変異株は細長く歪であった。このことから変異株は生育が異常で細胞膜が緩んでいることにより、セシウムが浸透した可能性が考えられ、以降の実験では野生型株にイネの遺伝子を導入することとした。

図1～4に、各候補遺伝子を導入した酵母におけるセシウム含量を示した。図2にあるように、*HKT1*(*OsHKT2;1*)を導入した場合のみ、タカナリ型においてベクターコントロールやヒトメボレ型と比べて、酵母細胞内のセシウム含量が高くなった。この結果から、タカナリ型の*HKT1*はヒトメボレ型よりセシウム吸収活性型高く、このことが玄米中の放射性セシウム含量の増加の原因である可能性が考えられた。*HKT1*遺伝子は、一昨年度のRNAseq解析

によると、地上部についてはヒトメボレの幹で発現量が高いが、主に根で発現することが知られている。よってこの遺伝子は、タカナリの根において活性が高く、セシウムを多く吸収していると考えられた。



また、イネTos17遺伝子破壊株を用いた放射性セシウム吸収実験については、*HKT1*, *HKT9*, *HMA2*, *Os03g0337500*遺伝子について、各遺伝子1ライン以上、ホモにT-DNAが挿入された株を確立し、mRNAの低下を確認した。現在、福島県月舘市由来の放射性セシウム含量が多い土壌にて、RNAiラインと共にポット栽培しており、玄米が採取できたらその放射性セシウム含量を測定する予定である。この実験と酵母の結果と合わせて、各遺伝子の玄米への放射性セシウム輸送における役割が明らかになると考えられる。

3) 成果活用における留意点

本課題は、課題100及び101と密接に関連しているため、成果を公表する際は、100や101のデータを合わせて発表することにより、理解が得られやすくなると考える。

4) 今後の課題

酵母を用い、タカナリ型の*HKT1*がヒトメボレ型よりもセシウム吸収活性が高いことを示すことができた。この結果を強化するため、*HKT1*遺伝子の変異株を確立したが、イネの生育は半年の期間を要するため、変異株中の玄米セシウム含量の測定にはあと数か月かかる予

定である。

中課題番号(e-Radシステム課題 ID8 桁)	15653590	研究期間	平成27～29年度
小課題番号	104	研究期間	平成27～29年度
中課題名 (契約課題名)	放射性セシウム吸収抑制メカニズムの解明		
小課題名	放射性Csを子実へ蓄積しないダイズ系統の探索と特性解明		
小課題責任者名・研究機関	横山 正・東京農工大学		

1) 研究目的

福島県によるダイズの放射性Cs検査の結果、平成23年産では211点のうち12点が、平成24年産では847点のうち21点が基準値を超過していた。この数値を玄米のそれと比較すると、ダイズは玄米より基準値超えの出現頻度は1,700倍も高い性質を有していた。現地調査の結果から、土壌の交換性カリ含量が少ないことや土壌酸度がやや低いなどという原因が報告されているが、要因が十分に説明できないものもあるため、ダイズに関してはCsを吸収しにくい品種の育成の可能性も検討する必要がある。そこで、放射性Csを子実へ蓄積しないダイズ系統の探索と特性解明を行う。また、ダイズは根粒菌や菌根菌と共生するが、その共生がダイズ子実や茎葉部の放射性Cs蓄積に与える影響の解明も試みた。

2) 研究成果



2013年5月31日
ダイズとアズキの播種



2013年6月16日
ダイズ苗の育成

写真1

2012年～2013年の
ダイズの圃場試験概要

(福島県二本松市)



2013年6月16日
ダイズの移植



2013年9月26日
ダイズヘタマネギネットを
かけ、収穫開始

放射性Csを子実へ蓄積しないダイズ系統の探索と特性解明に関して2012年から2013年の2年間、二本松市の同一圃場で日本のダイズコアコレクション96品種を栽培し、子実中の放射

性Cs量を測定比較した（写真1）。

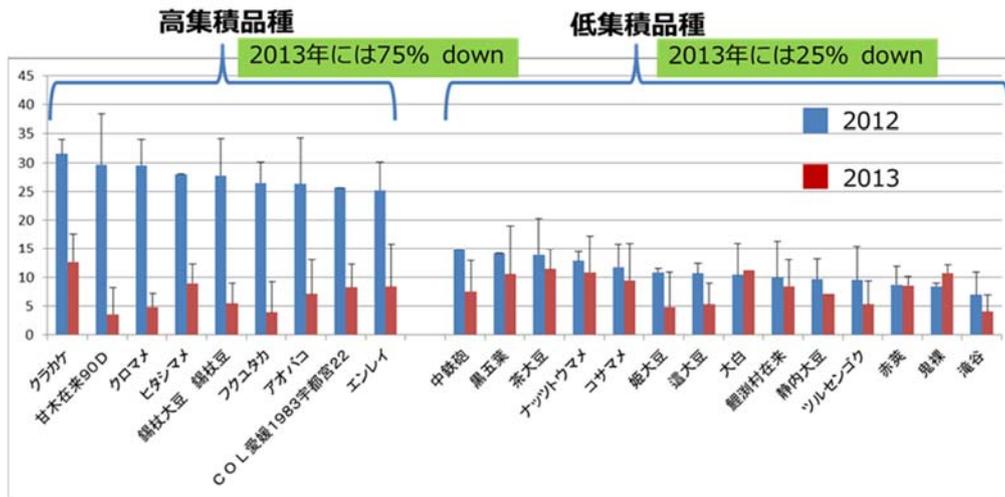


図1 放射性Csが土壤粘土へ固定されるエイジング効果とダイズが子実へ蓄積する放射性Cs量との関係

2年間の試験で、ダイズには、放射性Csの高集積系統と低集積系統が存在し、高集積系統は可給態の放射性Csを良く吸収し、一方、低集積系統は大量に放射性Csは取り込まないが、根からの有機酸等の分泌で粘土鉱物に固定された放射性Csを可動化して吸収することが示唆された（図1）。

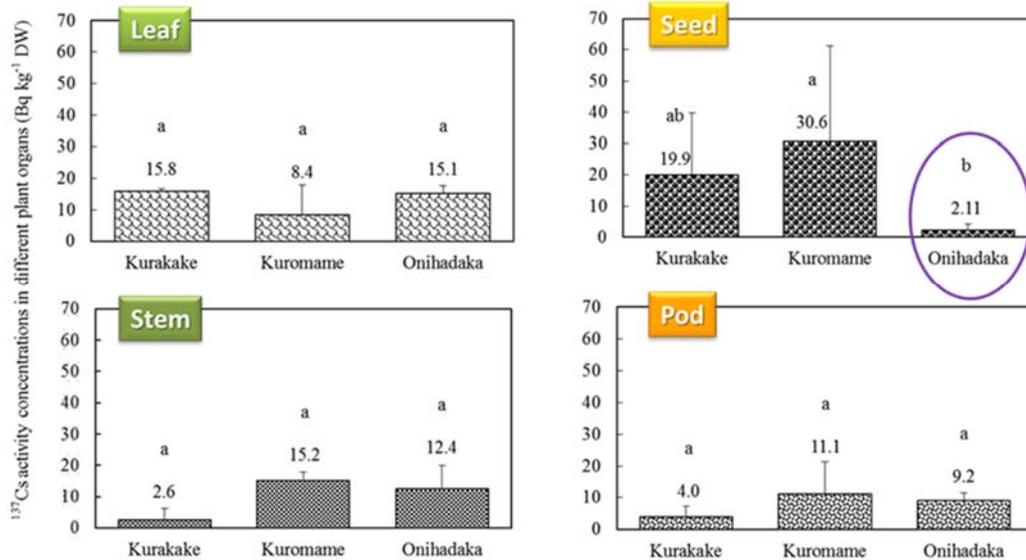


図2 ダイズ子実への放射性Cs高蓄積系統と区分されたクラカケ・クロマメと低蓄積系統に区分された鬼塚間の各器官への放射性Cs蓄積量（二本松市黒ぼく圃場での結果）

そこで、上記の高蓄積と低蓄積系統に分類されたダイズ品種に関して子実への放射性Cs蓄積量に違いが存在するか圃場試験とポット試験で調べ、子実への放射性Cs高蓄積と区分

されたクラカケ・クロマメと低集積と区分された鬼裸間には、子実への放射性Csの集積程度が異なることを見いだした（図2）。

放射性Csの低吸収品種と高吸収品種の特性の把握に関して、粘土鉱物から放射性Csを可動化する有機酸に着目し、ダイズ子実への放射性Cs高吸収と低吸収各系統の根からの有機酸分泌量とその組成の変化について調べた。

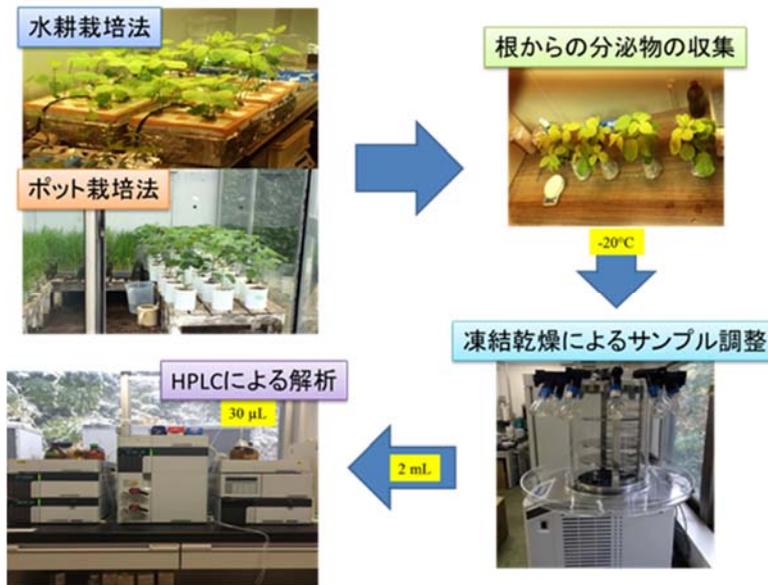


写真2 子実体への放射性Cs低吸収が異なる系統のダイズの根から分泌される有機酸の定量

子実体への放射性Cs低吸収系統である、鬼裸と赤莢、放射性Cs高吸収系統であるクロマメとクラカケに関して、水耕栽培と福島県の黒ぼく土と褐色森林土を用いたポット栽培を行い、根を発達させた。その後、根から分泌物を収集し、HPLCで解析した（写真2）。

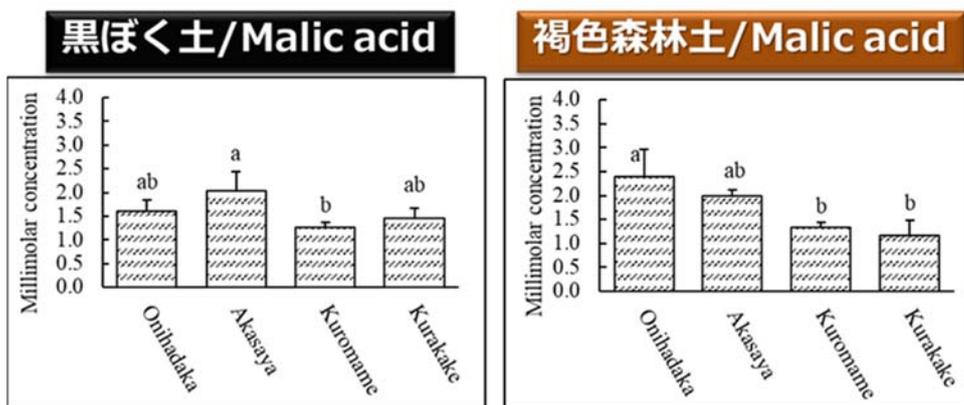


図3 福島県の黒ぼく土と褐色森林土を用いて栽培した各ダイズ品種の根からのリンゴ酸の総分泌量の違い

その結果、鬼裸・赤莢の根からのリンゴ酸の分泌量はクラカケ・クロマメのそれより有意に高い傾向があることを見だし、両系統の根の有機酸分泌特性が異なることを見出し

た。高蓄積系統と低蓄積系統の品種をKagaら（2012）が報告した日本と世界のダイズの系統樹に当てはめると、これらの品種は独立した系統に分布した。そのため、ダイズの子実への放射性Cs集積量には系統間差違が存在する可能性が示唆され、トランスポーター等、形態に表れない遺伝因子がCs吸収に関与している可能性予想された。この解析のために、子実への放射性Cs高蓄積系統のエンレイと低蓄積系統の鬼裸間で、交配を行い、組替え自殖系統を作成し現在F3世代になり、遺伝解析が可能な材料になってきた。

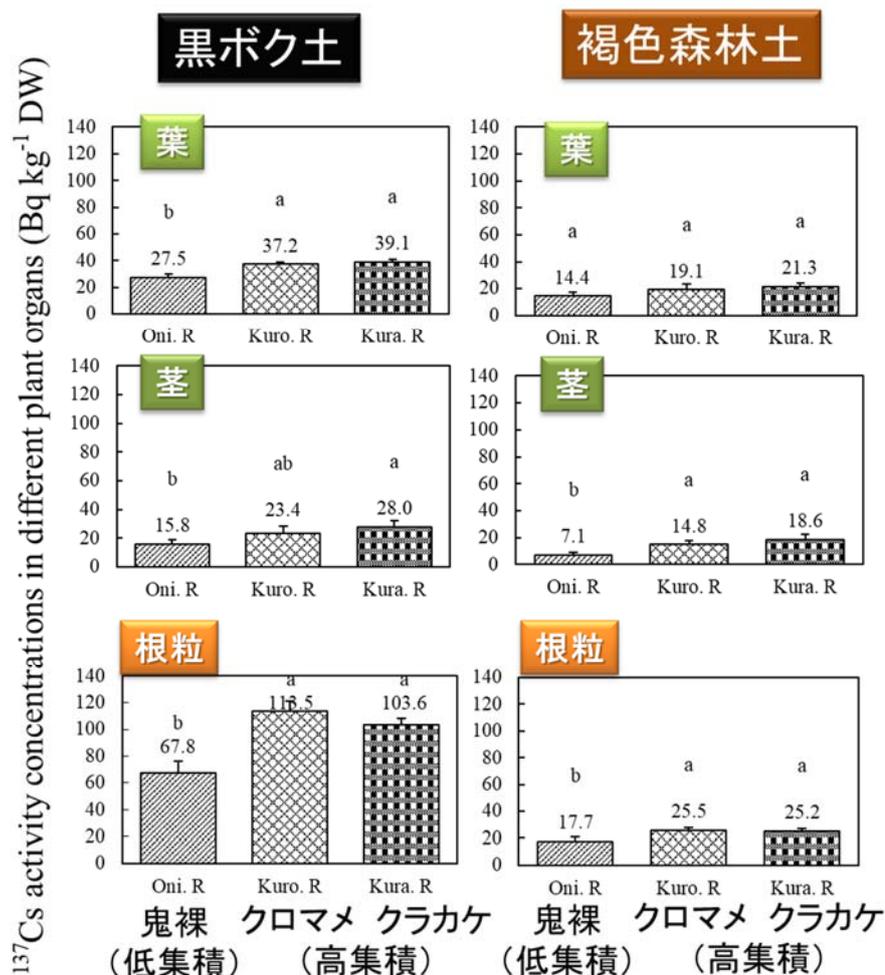


図4 子実への放射性Cs低集積品種「鬼裸」と、高集積系統「クロマメ」「クラカケ」を福島県の黒ボク土と褐色森林土でダイズ根粒菌を接種して栽培した時の葉、茎、根粒の放射性Cs蓄積量の比較

ダイズは根粒菌や菌根菌と共生するが、その共生がダイズ子実や茎葉部の放射性Cs蓄積に与える影響の解明も試みた。子実への放射性Cs低集積品種「鬼裸」と、高集積系統「クロマメ」「クラカケ」を福島県の黒ボク土と褐色森林土でダイズ根粒菌を接種して栽培した時の葉、茎、根粒の放射性Cs蓄積量の比較を図4に示した。土壌の違いで各器官へ集積する放射性Cs量は異なった。黒ボク土で生育したダイズ各器官の放射性Cs蓄積量は、褐色森林土のそれより高かった。黒ボク土では、子実への放射性Cs蓄積量が高い「クロマメ」

「クラカケ」の各器官の放射性Cs量は、有意に鬼裸のそれより高かった。根粒の放射性Csの蓄積量は葉や茎より高かった。また、根に蓄積した放射性Cs量は各系統の品種間で違いはなかった。

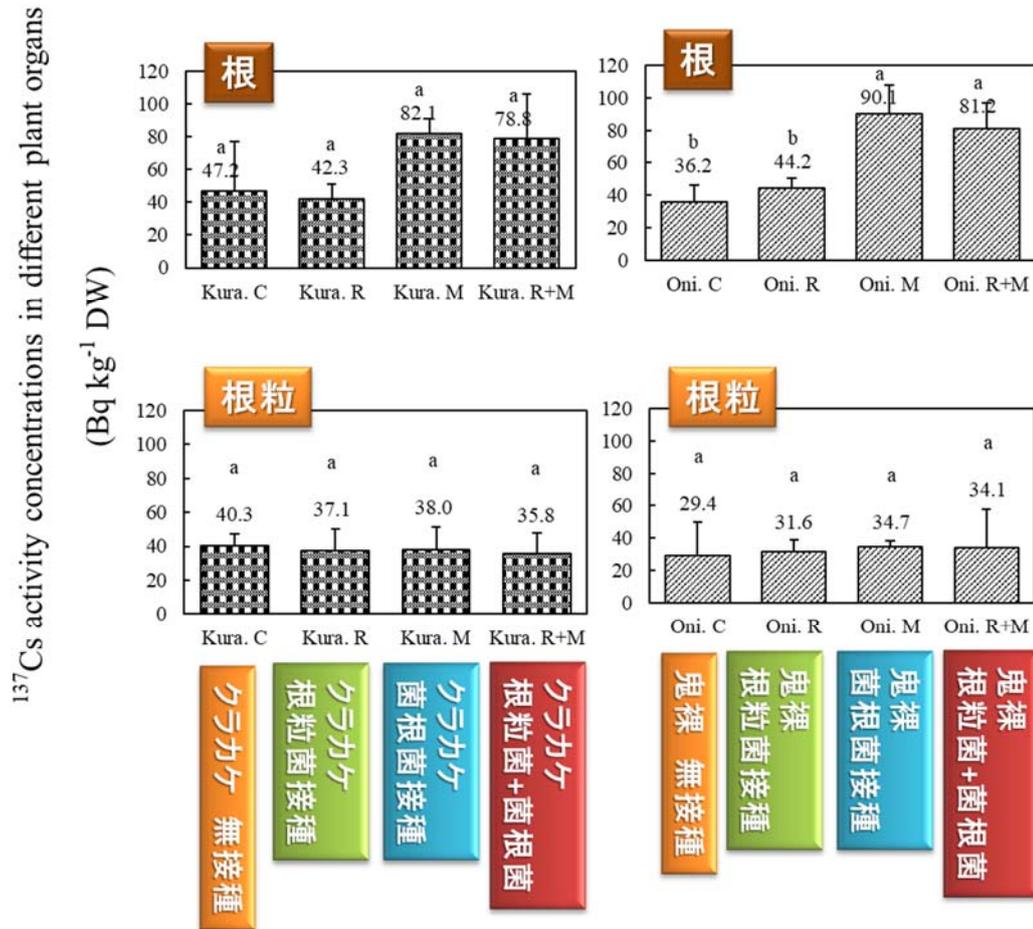


図6 ダイズ品種「鬼裸」（低吸収系統）と「クラカケ」（高吸収系統）を福島県二本松市の黒ボク土の畑土壌でポット栽培し、根粒菌、菌根菌の単一接種と、共接種の3種の処理を行い、根と根粒の放射性Cs蓄積量を比較

図6に、ダイズ品種「鬼裸」と「クラカケ」を黒ボク土で栽培し、根粒菌、菌根菌の単一接種と、共接種を行い、根と根粒の放射性Cs蓄積量を比較した結果を示した。菌根菌の接種は、ダイズの根の放射性Csの蓄積量を明瞭に増加させた。一方、菌根菌接種で根の放射性Cs蓄積量が増加しても、根粒中の放射性Csの蓄積量は増加せず、菌根菌は根の菌根共生器官に蓄積させる傾向が確認された（図7）。

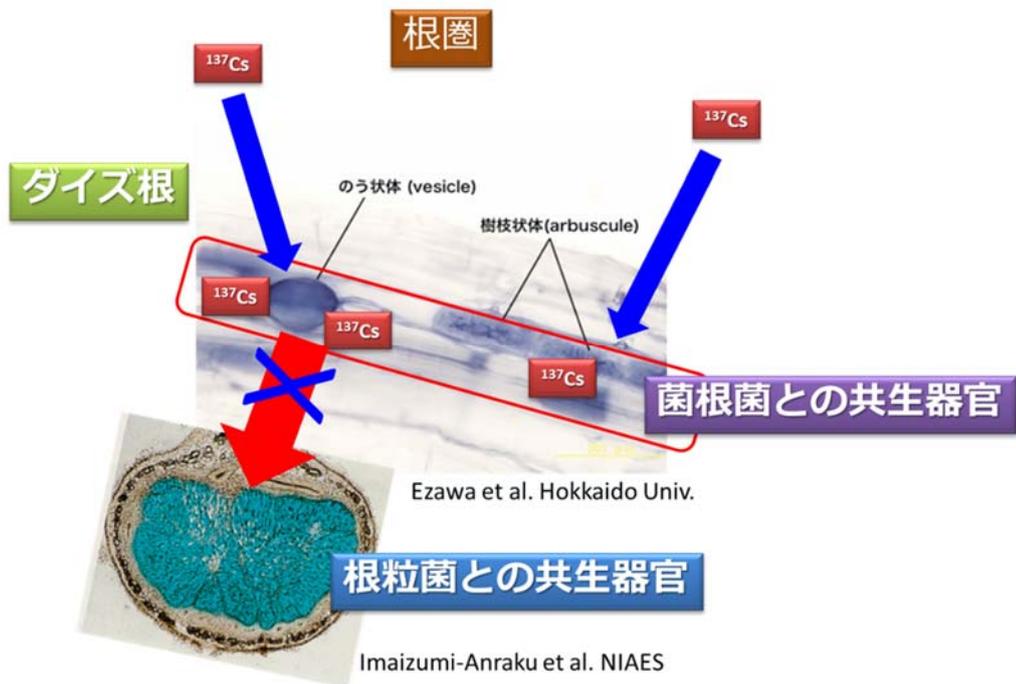


図7 ダイズ根と根粒菌と菌根菌の共生器官での放射性Csの分配の関係

3) 成果活用における留意点

各県で一般に栽培されているエンレイ、フクユタカ、タマホマレ等は子実への放射性Cs高蓄積系統に分類される。黒ボク土等の可給態の放射性Csが多く分布する土壤では、放射性Csを取り込みやすい特性を有する。

4) 今後の課題

ダイズの子実への放射性Cs集積量には系統間差違が存在する可能性が示唆され、トランスポーター等、形態に表れない遺伝因子がCs吸収に関与している可能性予想された。ダイズの放射性Csの吸収抑制機構は不明であり、関連するトランスポーターの単離と機構解明が喫緊の課題と考えられる。

中課題番号(e-Radシステム課題 ID8 桁)	15653590	研究期間	平成27～29年度
小課題番号(桁数は任意)	200	研究期間	平成27～29年度
中課題名(契約課題名)	放射性セシウム吸収抑制メカニズムの解明		
小課題名	放射性Cs吸収抑制型アレルをもつ改良型ひとめぼれ系統の作出とその提供		
小課題責任者名・研究機関	大川泰一郎、横山 正・東京農工大学		

1) 研究目的

玄米の放射性Csを低減するためには、カリウム施肥などの栽培管理技術に加えて、根からの放射性Cs吸収が少なく、玄米への輸送、蓄積の少ないイネ品種に改良する必要がある。本研究では、玄米の放射性Cs蓄積の少ないイネ品種を育成するため、マーカー選抜によって、低放射性Cs吸収、輸送、蓄積に関わる量的形質遺伝子座(QTL)を集積し、放射性Cs吸収抑制型アレルをもつ系統を選抜し、育種母本としての説明マニュアルを作成する。

2) 研究成果

日本型のひとめぼれとインド型在来品種タカナリの組換え自殖系統群RILsから、約1000個のSNPマーカーにより、玄米低放射性Cs濃度に関する第1, 6染色体がひとめぼれ型の領域をもち、第3染色体がタカナリ型の系統と、その逆の遺伝子型の系統を選抜し、玄米の放射性Cs濃度の比較を行った。また、昨年度選抜した17-46について、収量調査と食味評価を行った。炊飯米の理化学試験、食味試験は穀物検定協会に委託し、17-46、ひとめぼれの供試米と協会の基準米(コシヒカリ)のアミロース、タンパク質含有率と、専門パネル20名による5項目(外観、香り、味、粘り、硬さ)と総合評価の相対比較により食味評価を行った。

(1) ひとめぼれとタカナリのRILsにおける玄米の低放射性Cs蓄積抑制、良食味系統のマーカー選抜

ひとめぼれとタカナリのRILsから、玄米低放射性濃度の上位20系統を選抜し、図1のQTL解析によって特定した玄米の低放射性Cs濃度に関する第1, 3, 6染色体のQTL近傍マーカーの遺伝子型と、コシヒカリに由来する良食味に関わる第3, 12染色体の遺伝子型を表1に示した。これらの系統から、良食味QTLを両方、あるいは片方がひとめぼれ型の11系統をマーカー選抜した。また、QTLの集積効果を正逆で検討するため、ひとめぼれ型の第1,6染色体とタカナリ型の第3染色体の領域をもつ4系統の玄米低放射性Cs蓄積系統を選抜した(表2)。選抜した玄米低放射性Cs蓄積系統は玄米の¹³⁷Cs濃度および移行係数TFが著しく低かった。

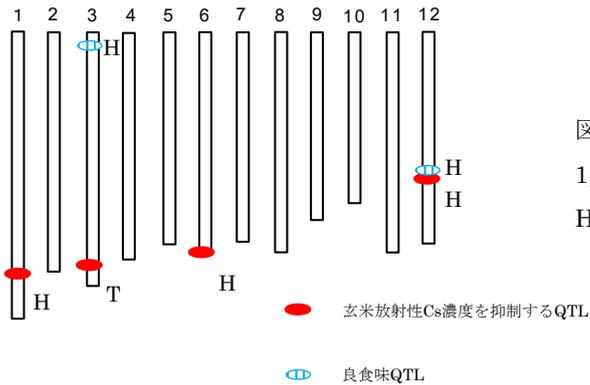


図1 玄米放射性Cs濃度を抑制する第1,3,6,12染色体のQTLと良食味QTL.
H: ひとめぼれ型、T:タカナリ型

表1 玄米放射性Cs濃度の低い系統におけるChr.1, 3, 6の玄米放射性Cs濃度を抑制するQTL近傍マーカーの遺伝子型と、良食味QTL近傍マーカーの遺伝子型.
H: ひとめぼれ型、T:タカナリ型

玄米低放射性Cs系統	玄米 ¹³⁷ Cs(Bq/kg)	TF	H型低Cs			H型良食味	
			chr1_38204852	chr3_28533159	chr6_29345457	chr3_1478610	chr12_17622988
17-34	360.8	0.076	H	T	H	T	H
17-88	419.0	0.091	H	T	H	T	T
17-90	467.9	0.105	H	T	H	H	H
17-89	520.5	0.115	H	T	H	H	H
17-75	527.4	0.114	H	H	H	T	H
17-49	531.9	0.115	H	T	H	T	H
17-16	536.9	0.114	H	T	H	T	T
17-22	549.9	0.122	H	T	H	H	T
17-101	552.1	0.120	H	T	H	T	H
17-50	580.5	0.128	H	T	T	T	T

表2 選抜した低放射性Cs蓄積QTLの集積系統における¹³⁷Cs濃度およびTFの比較.

RIL	玄米 ¹³⁷ Cs(Bq/kg)	TF	H型低Cs		
			chr1_38204852	chr3_28533159	chr6_29345457
17-34	360.8	0.076	H	T	H
17-88	419.0	0.091	H	T	H
17-90	467.9	0.105	H	T	H
17-89	520.5	0.115	H	T	H

(2) 低放射性Cs蓄積、良食味アレルをもつ系統の収量、品質の評価

平成28年度に新たに選抜した低放射性Cs+良食味系統4系統の生育、収量などの農業形質を比較した(図2)。第1染色体のSDIを含むタカナリの染色体断片を含む17-34, 88, 89, 90はひとめぼれと同様に、タカナリより出穂期の草丈が高く、とくに17-34, 89は160cmを超える草丈となった。そのため、登熟期に倒伏が発生した。4系統の出穂期の茎数は、ひとめぼれと同様にタカナリより多かった。

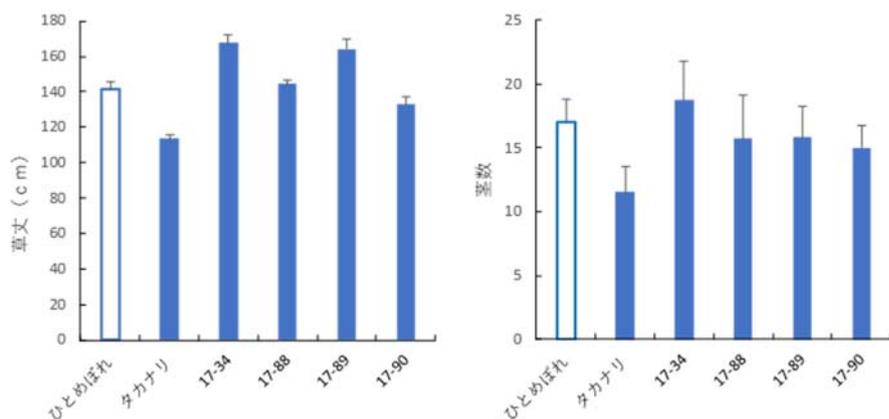


図2 マーカー選抜した玄米低放射性Cs+良食味4系統の出穂期の草丈、茎数の比較.

表3 玄米低放射性Cs+良食味の17-90とひとめぼれの収量構成要素および収量の比較 (農工大、6月15日遅植) .

	1m ² 当り穂数	1穂穎花数	登熟歩合 %	千粒重 g	精玄米収量 kg/10a	粗玄米収量 kg/10a
17-90	340.4±25.6	93.0±4.8	64.0±0.4	19.6±0.5	391.9±11.0	484.4±13.6
ひとめぼれ	414.4±12.8	68.4±5.7	64.1±0.3	19.4±0.1	352.0±36.3	423.0±43.5



図3 収穫期の17-90の草姿.

良食味に関わる第3, 12染色体のQTLが両方ともひとめぼれ型の17-90について、収量および収量構成要素をひとめぼれと比較した(表3)。17-90はひとめぼれより、穂数は少ないが1穂穎花数が多い結果、収量が高くなった。収穫期まで倒伏せず、耐倒伏性は大きかった(図3)。

(3) 低放射性Cs蓄積特性をもつリーフスターとコシヒカリより育成したTULK-143-6の収量および耐倒伏性

ひとめぼれとタカナリのQTL解析と日本と世界のコアコレクション、農工大育成系統の放射性Cs蓄積特性の遺伝変異を解析した結果（小島ら 2017）をもとに、作付面積の多いコシヒカリの改良に適用し、玄米の放射性Cs蓄積をさらに抑制するため、長稈で太稈性を有し、とくに茎葉部の放射性Cs蓄積が少なくキヌヒカリ並みの食味をもつリーフスターとコシヒカリとのRILsの中から、コシヒカリ並みの食味とリーフスター並みの長稈かつ太稈で耐倒伏性の高いTULK-143-6を選抜した（図4）。

TULK-143-6はコシヒカリより、穂数は少ないが1穂穎花数が多い結果、多収となった（表4）。太稈で断面係数が大きいいため挫折時モーメントがコシヒカリの約3倍と大きく、収穫期まで倒伏しなかった（表5、図4）。

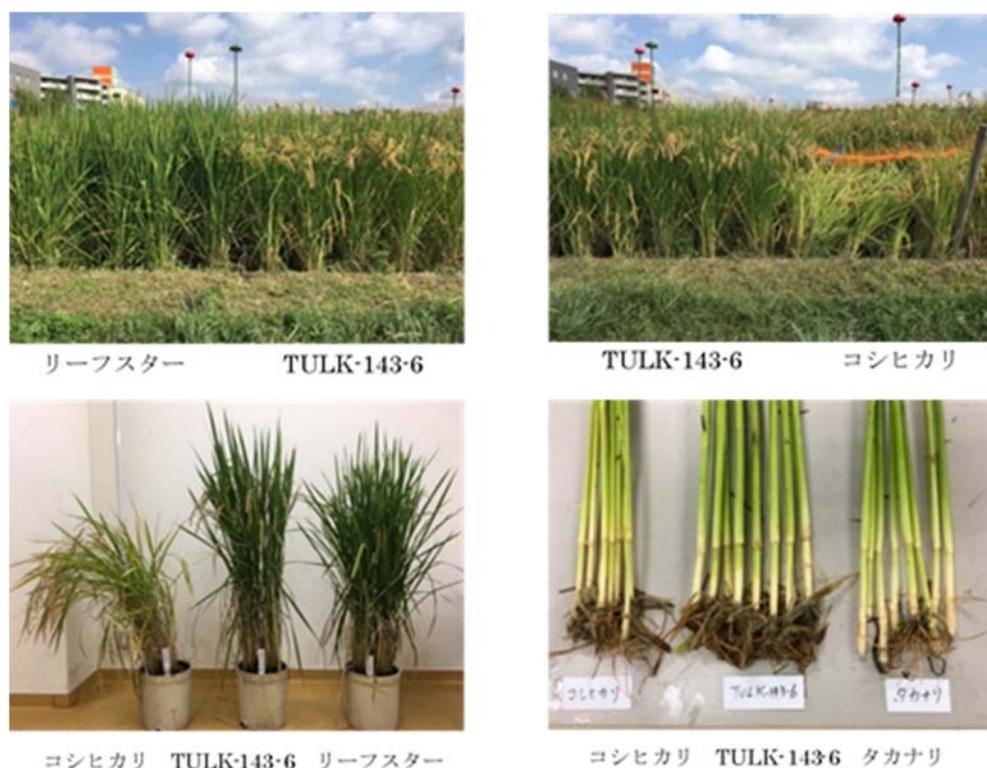


図4 TULK-143-6と両親の草姿、稈の下位節間の太さの比較.

表4 TULK-143-6とコシヒカリの収量構成要素および収量の比較（農工大、5月18日移植）.

	1m ² 当り穂数	1穂穎花数	登熟歩合 %	千粒重 g	精玄米収量 kg/10a	粗玄米収量 kg/10a
TULK143-6	239.3±17.1	179.6±13.3	84.2±2.5	21.4±0.2	773.0±26.8	785.6±26.0
コシヒカリ	360.1±18.6	127.0±25.9	68.4±10.4	19.8±0.2	607.1±33.6	632.7±35.1

表5 TULK-143-6とコシヒカリの挫折型耐倒伏性に関わる強稈形質の比較.

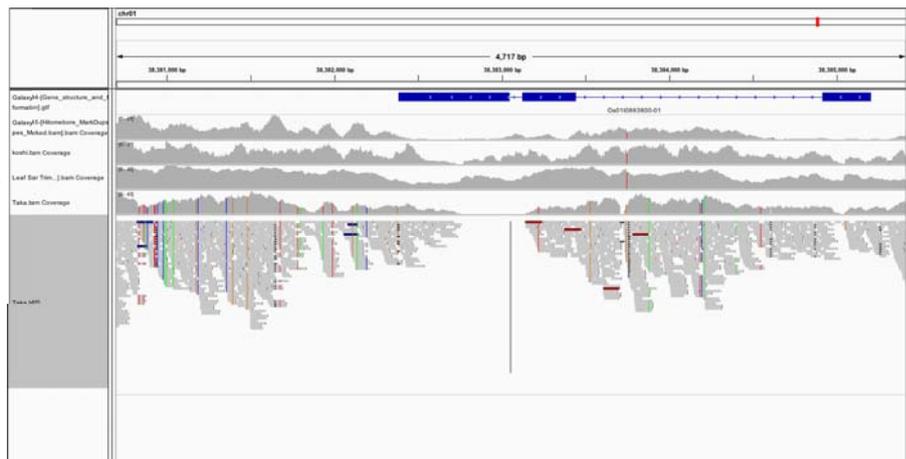
	挫折時モーメント (gf·cm)	断面係数 (mm ³)	曲げ応力 (gf·mm ⁻²)
TULK143-6	2956.1±245.2	22.33±3.63	1348.7±128.5
コシヒカリ	1098.9±61.2	6.34±1.46	1797.7±313.9

(4) 低放射性Csイネ育種素材としてのコシヒカリの太稈NIL「コシヒカリ富農SCM1号」

日本と世界のコアコレクション、農工大育成系統の放射性Cs蓄積特性の遺伝変異を解析した結果 (小島ら 2017)において、農工大のコシヒカリの太稈NILである「コシヒカリ富農SCM1号」(NIL-SCM2、2014年3月に品種登録済、農工大、農研機構、富山県との共同育成)は最も玄米の放射性Cs濃度の低い系統にランクされている。ひとめぼれやコシヒカリの *japonica* 型のアレルで第1染色体のSD1で長稈化した場合、太稈化し耐倒伏性を高め、玄米への放射性Cs蓄積を抑制する効果が期待できる。この系統も玄米の放射性Cs蓄積を抑制するための育種素材として選定した。

第1染色体
OsGA20ox2

ひとめぼれ
コシヒカリ
リーフスター
タカナリ



第6染色体
HKT1

ひとめぼれ
コシヒカリ
リーフスター
タカナリ

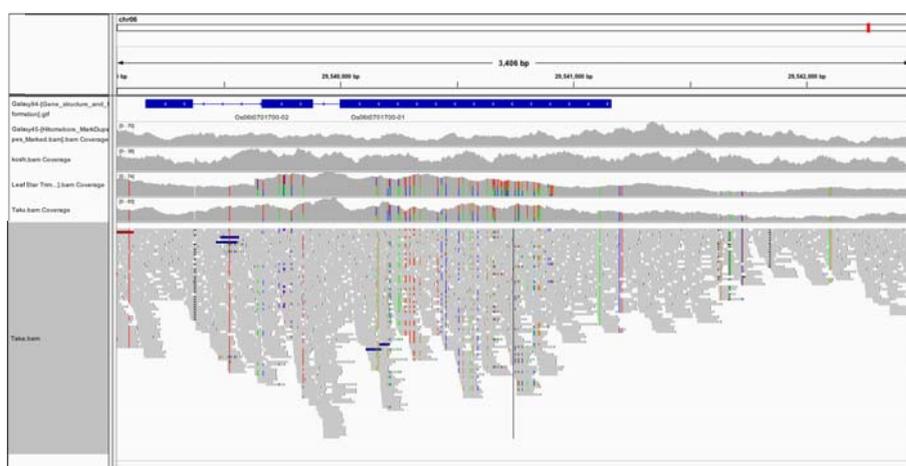


図5 ひとめぼれ、コシヒカリ、リーフスター、タカナリにおける第1染色体の *OsGA20ox2*、第6染色体の *HKT1* の塩基配列の変異.

(5) 育種素材を利用した低放射性Cs蓄積、良食味、耐倒伏性に関わるQTLの集積の検討

本研究から、今後、良食味を有し低Cs蓄積性を改良する育種素材として17-90, TULK-143-6, コシヒカリ富農SCM1号 (NIL-SCM2) を選定した。ひとめぼれ、コシヒカリ、リーフスター由来の第1染色体のSDI (*OsGA20ox2*) を含む領域 (図5) は長稈化をもたらし倒伏のリスクがあるため、タカナリに由来する第6染色体のAPO1, コシヒカリNIL-SCM3のような中国117号に由来するFCIなど強稈性に関わる太稈QTLとの集積 (図6) により、耐倒伏性ととも放射線Csの穂への蓄積能力を高め、玄米への移行を抑制できる可能性がある。すでにこれらの形質のDNAマーカーは作出されており、すぐにマーカー選抜育種に適用できる。第6染色体の候補遺伝子HKT1は、*japonica*の日本晴、コシヒカリ、ひとめぼれで変異がなく、日印交雑品種のタカナリ、リーフスターでは類似した変異がみられた。ひとめぼれやコシヒカリの改良ではこの領域は*japonica*型で残しておく必要があると考えられる (図5)。

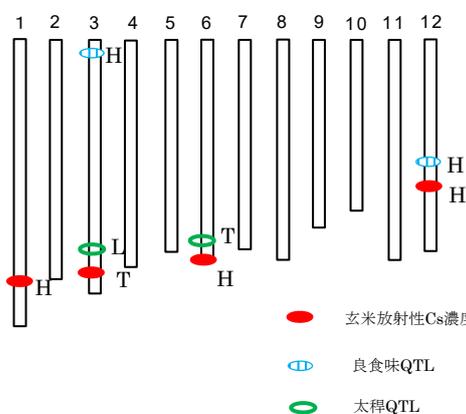


図6 低放射性Cs蓄積、良食味、太稈QTLの集積.

H: ひとめぼれ型、T:タカナリ型
L: リーフスター型

3) 成果活用における留意点

育成した良食味、低放射性Cs系統は良食味品種の育種素材として活用することに限定する。

4) 今後の課題

低放射性Cs蓄積、良食味、強稈QTLのNILとその集積系統を育成し、育種素材としてひとめぼれ、コシヒカリの改良、新しいブランド米の新品種育成に適用する。

中課題番号(e-Radシステム課題 ID8 桁)	15653590	研究期間	平成27～29年度
小課題番号	201	研究期間	平成27～29年度
中課題名 (契約課題名)	放射性セシウム吸収抑制メカニズムの解明		
小課題名	イネに対する生育期ごとの土壌溶液から植物根への放射性Cs吸収モデルの構築		
小課題責任者名・研究機関	小島克洋・横山 正・東京農工大学		

1) 研究目的

本研究では、土壌溶液中のカリウムイオンならびに主要な陽イオンと交換態カリの関係性について、異なる土壌目について調査を実施し、土壌目ごとにこれらの関係性を明らかにする。酢安抽出操作が必要な交換態カリ濃度の代わりに、ハンディーメータ等を用いて比較的簡易に測定できる土壌溶液中のカリ濃度を用いて、Csの吸収抑制に必要な土壌の交換態カリ濃度を推定することを目指す。イネの放射性Cs吸収に関して、交換態カリと土壌溶液のカリ濃度との相関、ならびにイネのカリ吸収に影響を与える競合イオン (Ca, Mg) 濃度との関連の明確化すると共に、放射性Cs吸収を抑制するイネや放射性Cs吸収を促進するイネでは上記の関係はどの様に変化するのか解明する。最終的には、土壌溶液のカリ濃度等からイネへの放射性Cs吸収モデルを構築し、論文化する。また、緩効性カリ肥料を初年度に施用することで、経年的に土壌溶液中のカリ濃度がどのように推移するかを調べ、放射性Cs吸収を持続的に抑制可能か否かを検討し、カリウムの供給様式の異なる資材としてのイネの放射性Cs吸収モデルの再評価を行い、論文として公表する。

2) 研究成果

土壌溶液から植物への放射性Cs吸収モデルに関する研究については、2015年度は福島県二本松市の分類体系の異なる水田土壌を採取し、塩化カリを添加したインキュベーション試験を行った。その後、酢酸アンモニウム抽出法により交換態Kを抽出し、高速遠心分離操作によって土壌溶液を回収して、それらの関係性を統計的に調べた。その結果、土壌溶液のK濃度と交換態Kの関係は土壌によって異なるが、概ね比例関係にあることが示された(図1)。したがって、土壌溶液中のK濃度を測定することにより、土壌ごとに交換態Kの値を推定できることが示唆された。

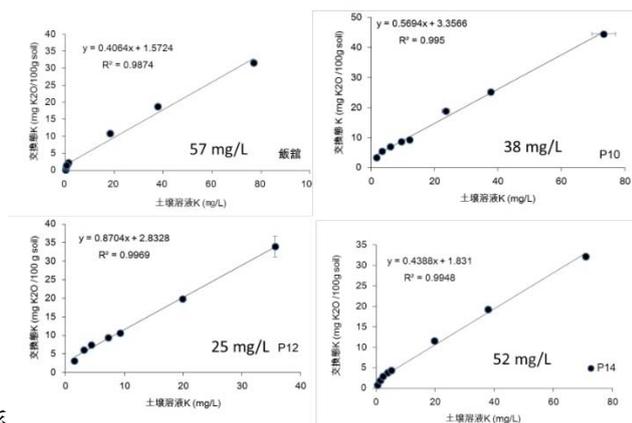


図1 交換態Kと土壤溶液Kの関係

2016年度は、放射性Cs濃度の比較的高い伊達市月館の水田土壌を採取し、0から16kg/10aに相当するKClを添加してコシヒカリをポット栽培し、生育ステージごとの交換態および土壤溶液の陽イオン濃度と植物体地上部の放射性Cs濃度の関係を調べた。7月上旬に移植し、移植後0, 15, 30, 45日後および収穫期の土壤溶液、土壌ならびに植物体試料を採取して、土壤溶液中のKおよび陽イオン濃度ならびに土壌の交換態陽イオンを測定した。植物試料については、茎葉部および玄米の放射性Cs濃度を測定した。交換態および土壤溶液中のK、Ca、Mg濃度を変数に採用し、茎葉部のCs濃度を予測するための重回帰分析を行った結果、土壤溶液のKとCaを用いた回帰式が最も決定係数が高い(各変数: $p < 0.01$)ことが示唆された(表1)。

表1 茎葉部のCs濃度と土壌のイオン濃度の重回帰分析 (2016年度)

採用した変数	回帰式	決定係数
土壤溶液K	$Cs = 456 - 369K$	0.33
土壤溶液K, Ca	$Cs = 824 - 434K - 9.5Ca$	0.73
土壤溶液K, Ca, Mg	$Cs = 842 - 496K - 2.4Ca - 21Mg$	0.74
交換態K	$Cs = 491 - 8.8K$	0.18
交換態K, Ca	$Cs = -54 - 8.9K - 0.85Ca$	0.36
交換態K, Ca, Mg	$Cs = -16 - 10K - 0.6Ca - 1.5Mg$	0.36

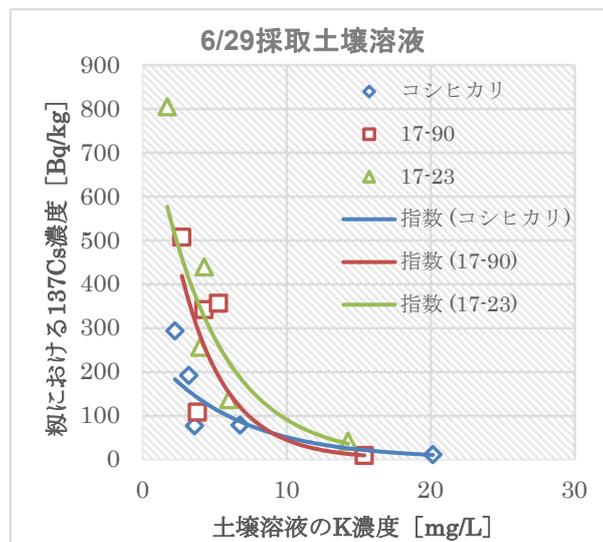
2017年度は、伊達市月舘の現地水田において、他の課題で明らかとなったひとめぼれ/タカナリ組換え自殖系統の放射性Cs高吸収系統（17-34、17-90）と低吸収系統（17-23、17-138）、また2016年度のポット試験で使用したコシヒカリを供試した。カリウム施肥水準の異なる5つの処理区（0、3、9、16、50 kg K20/10 a）を設けて栽培し、生育ステージごとの土壌溶液の陽イオン濃度と植物体地上部の放射性Cs濃度の関係を調べた。その結果、コシヒカリ、17-90、17-23について、6月29日に採取した土壌溶液のK濃度と収穫期の籾における¹³⁷Cs濃度との相関関係を調べてみると、コシヒカリ<17-90<17-23の順に高くなる傾向を示し、高吸収系統と低吸収系統には相応の差が見られた（図2）。

図2 6月29日に採取した土壌溶液のK濃度と収穫期の籾における¹³⁷Cs濃度の関係

2017年度の圃場試験の結果を重回帰分析した結果、出穂前までの値を用いた回帰式が最も決定係数が高く、2016年度のポット試験と同様にKとCaを用いた回帰式が最も決定係数が高かった。しかし、Kの項がプラスであるため、土壌溶液のK濃度が高いほど茎葉部の¹³⁷Cs濃度が高くなるので実際の状況を表していない可能性が考えられる。17-90と17-23については、土壌溶液のK、Ca、Mgを用いた回帰式のほうが決定係数が高い値となった（表2）。まだ測定の終わっていない部分があるので、すべて終わった後で再度検討する。

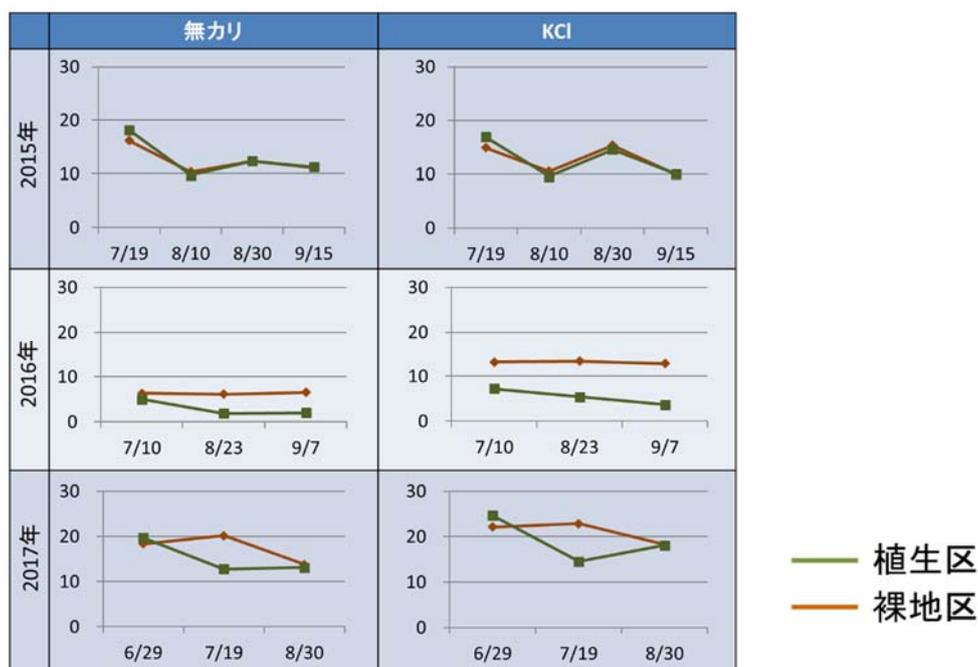
表2 茎葉部のCs濃度と土壌のイオン濃度の重回帰分析（2017年度）

イネ系統	採用した変数	回帰式	決定係数
コシヒカリ	土壌溶液K, Ca	$Cs=1309+63K-30Ca$	0.66
コシヒカリ	土壌溶液K, Ca, Mg	$Cs=975+74K-35Ca+192Mg$	0.61
17-90	土壌溶液K, Ca	$Cs=1266-175K-16Ca$	0.34
17-90	土壌溶液K, Ca, Mg	$Cs=-127-138K-75Ca+1055Mg$	0.74
17-23	土壌溶液K, Ca	$Cs=1326-108K-34Ca$	-0.14
17-23	土壌溶液K, Ca, Mg	$Cs=1379-161K-83Ca+1396Mg$	0.73



二本松市針道の水田における緩効性カリ肥料に関する試験では、緩効性カリ肥料の水準

の異なる3処理区を設けて初年度のみ施用する区（1.4倍、2倍、3倍区）と、毎年KClを施用する区（KCl区）および無カリ区を設け、コシヒカリを3年間栽培した。毎年植生区と裸地区の土壤溶液と収穫期の植物体地上部をサンプリングし、土壤溶液中のK濃度と植物体の放射性Cs濃度を測定し、緩効性カリ肥料の効果を評価した。その結果、土壤溶液のK濃度については、初年度の2015年は明瞭な差が見られなかったが、緩効性カリ肥料2倍、3倍区で高い傾向を示した（図3）。2016年、2017年は年次間の差があるものの、緩効性カリ1.4倍区が無カリ区と同程度であり、緩効性カリ2倍、3倍区がKCl区と同程度であった。植物体の放射性Cs濃度については、2016年度の玄米について、KCl区及び緩効性カリ2、3倍区で無カリ区や緩効性カリ1.4倍区よりも低くなる傾向を示し、土壤溶液中のK濃度が高いと、玄米の放射性セシウム濃度が低くなる関係を示した（図4）。わらについては、2015年度は緩効性カリ2、3倍区で低くなるような傾向が見え、2016年度も無カリ区の放射性セシウム濃度が低い点を無視すれば、2015年度と同様の傾向が見えている。2017年度についてはまだ測定が終わっていないため、植物体の放射性Cs濃度を測定して3年間の最終的な評価を行う。



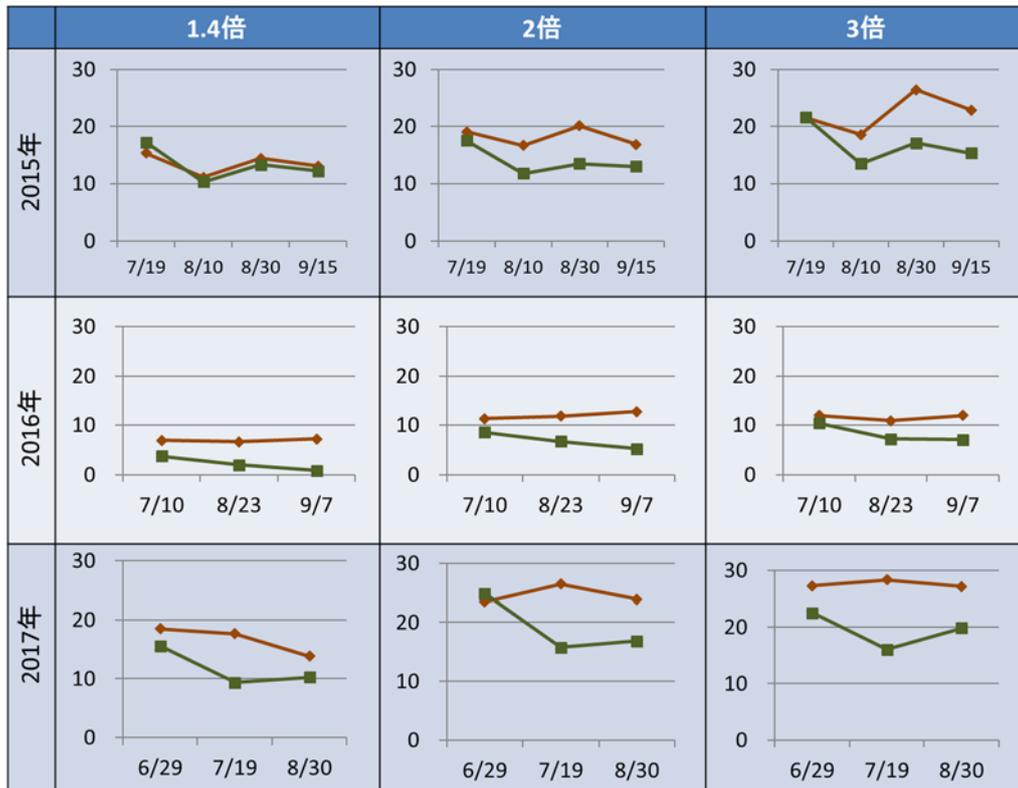


図3 土壤溶液のK濃度 (mg/L)

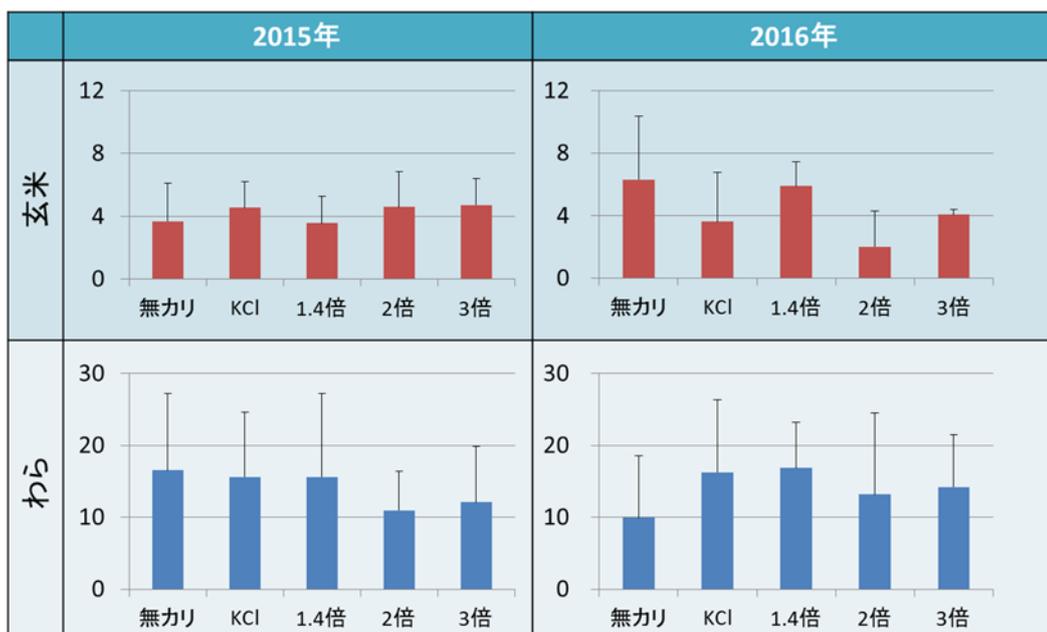


図4 玄米とわらの¹³⁷Cs濃度 (Bq/kg)

3) 成果活用における留意点

土性の違いや土壌の放射性Cs汚染程度の違いにより、重回帰分析による回帰式や変数自体も異なる可能性がある。土壌溶液中の放射性Cs濃度が測定できないため回帰式の説明変数として放射性Cs濃度が含まれていないが、伊達市月舘の試験水田は土壌の汚染程度が比較的高い黒ボク土であるため、土壌溶液中の放射性Cs濃度は高いと推測される。したがって、本研究で示したモデルはイネの放射性Cs濃度が高い値を示すケースでのモデルと考えられるので、土性の異なる水田では、土壌溶液の陽イオン濃度を当てはめて過剰な評価はせず、上限の指標値として捉えるべきである。

4) 今後の課題

土性が異なる複数の水田を対象とした栽培試験を実施し、イネへのCsの吸収に及ぼす因子について土壌溶液のイオン濃度から検証する必要がある。また、緩効性カリ肥料の試験についても、土性が異なる水田や汚染程度が厳しい水田での栽培試験が必要であると考えられる。

中課題番号	15653590	研究期間	平成27～29年度
小課題番号	202	研究期間	平成27～29年度
中課題名（契約課題名）	放射性セシウム吸収抑制メカニズムの解明		
小課題名	除染後水田におけるカリウム供給能評価法の開発		
小課題責任者名・研究機関	鈴木芳成・松岡宏明・福島県農業総合センター環境・作物栄養科		

1) 研究目的

表土剥ぎ取りによる除染後の水田では多種多様な客土材が投入されることから、地力低下や透水性の変化により、土壌中のカリウム流出が懸念される。本研究では作物中放射性セシウム濃度と相関が高いカリウム抽出条件を明らかにすると共に、長期的に土壌へカリウムを供給できる資材・肥料の評価法を開発し、水田における土壌溶液中カリウムイオン (K^+) の保持効果を検証する。

2) 研究成果

(1) 除染後水田におけるカリウム供給能評価法の開発

本評価法は現地ほ場試験の結果と適合した。この評価法により、バーミキュライト、金雲母、およびゼオライトの順にカリを水稻に供給し ^{137}Cs 吸収抑制対策には有用であることが判定できる (図1)。

(2) 除染後水田におけるカリウム供給資材の施用効果の検証

カリ資材として平成27年に金雲母、バーミキュライトを1 t /10 a施用して、3年間水稻を栽培した結果、いずれの処理区とも土壌溶液中の K^+ 濃度を3年目までは高く維持できる (図2)。

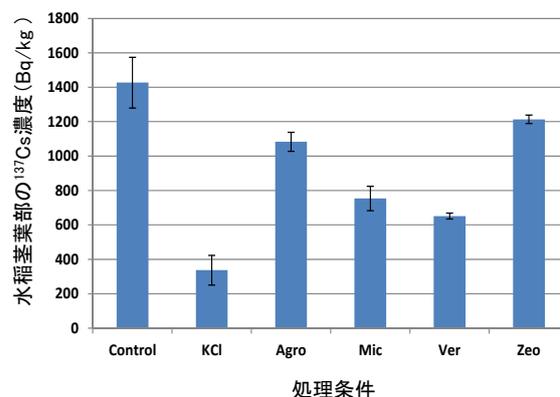


図1 各資材、肥料施用後に栽培した水稻の茎葉部中の ^{137}Cs 濃度
土壌中 ^{137}Cs 濃度は951、KCl:塩化カリ、Agro:アグロコート、Mic:雲母
Ver:バーミキュライト、Zeo:ゼオライト

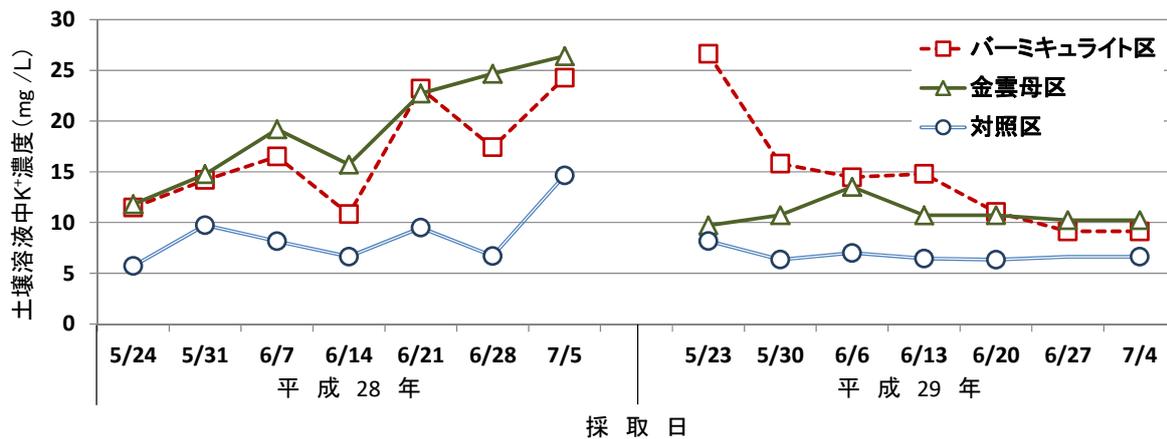


図2 カリ資材施用による土壌溶液中のK⁺濃度の推移
対照区は現地慣行に従っての施肥のみ

3) 成果活用における留意点

- ア) 農地除染は5cmの表土剥ぎ取り後、5cm客土を行っている。
- イ) 平成27年度は試験区内のばらつきが大きく、処理間差は判然としなかった。
- ウ) 使用した資材について、バーミキュライトは南アフリカ産を、金雲母はフィンランド産を購入してそれぞれ施用した。
- エ) 施肥量(kg/10 a)は現地慣行に従い、N: P₂O₅: K₂O=6.5: 8.5: 6.5である。平成29年には同量を側条施肥により行った。また、平成28年の施肥前には堆肥1 tを施用した。

4) 今後の課題

金雲母やバーミキュライトの効果の持続性を山木屋ほ場以外で適用可能か検討する必要がある。また、現地ほ場ではカリ資材を施用して4年目以降の効果の追跡調査が必要である。

中課題番号	15653590	研究期間	平成27～29年度
小課題番号	203	研究期間	平成27～29年度
中課題名（契約課題名）	放射性セシウム吸収抑制メカニズムの解明		
小課題名	203 稲わら施用による放射性Cs吸収抑制対策の高度化		
小課題責任者名・研究機関	新妻和敏、佐久間祐樹、藤澤弥榮、吉田直史・福島県農業総合センター作物園芸部稲作科		

1) 研究目的

稲わらは2%前後のカリを含み重要なカリウム供給源と考えられるが、稲わらをほ場に還元した場合のカリウム供給の評価は十分になされていない。そこで、稲わら施用による放射性セシウム吸収抑制効果や土壌中交換性カリ含量等への影響を調査し、稲わら施用と組み合わせた効率的なカリウム施肥法を開発する。

2) 研究成果

試験は、表1の区を設定し実施した。初年目のみカリ上乗せ施用後、稲わら連用3年目の移植時期まで土壌中交換性カリ含量25mg/100g以上に維持でき(図1)、玄米中¹³⁷Cs濃度は、カリ上乗せ施用による吸収抑制対策と差が無いことが確認できた(図2)。このことから、試験した水田での吸収抑制対策は、カリ上乗せ施用を毎年実施するのではなく、稲わら連用を前提としてカリ上乗せ施用を3年ごとに実施することで可能であることが示された。

表1 区の構成

区名	2015年			2016年年以降		
	わ	カリ		わ	カリ	
	ら	上	標	ら	上	標
	乗	乗	準	乗	乗	準
	準	準		準	準	
初年目のみカリ上乗せ施用+稲わら連用	○	○	○	○	×	○
初年目のみカリ上乗せ施用	×	○	○	×	×	○
カリ上乗せ施用(2016年以降の対照)	×	×	×	×	○	○
無カリ	×	×	×	×	×	×

※カリ上乗せ施用は土壌中交換性カリ含量25mg/100gを目標に塩化カリを施用した。

※カリ標準は基肥にカリ0.8kg/aを塩化カリで施用。

※吸収抑制対策の対照として、カリ上乗せ施用(対照)を設置。

3) 成果活用における留意点

本試験は、福島県北地方の灰色低地土水田で行った結果であり、他の水田では、土壌中交換性カリの維持期間が異なることが考えられる。

稲わら連用で4年目以降については継続調査予定である。

本成果は、カリ卒業水田の管理の参考となる。

4) 今後の課題

4年目以降も同一試験区での試験を行い、稲わら施用で交換性カリ含量が維持できる期間を検証する。また、稲わら中のカリは、溶脱しやすいとされていることから、稲わらの鋤込み時期が春になった場合の土壌中交換性カリ含量、玄米中¹³⁷Cs濃度を検証する。さらに、

カリ濃度の異なるわらでの土壤中交換性カリ含量の増加程度を調査する。

稲わらを園芸や畜産などで利用し、水田に還元できない場合もあるため、各種堆肥やカリ供給資材を用いて検証する必要がある。

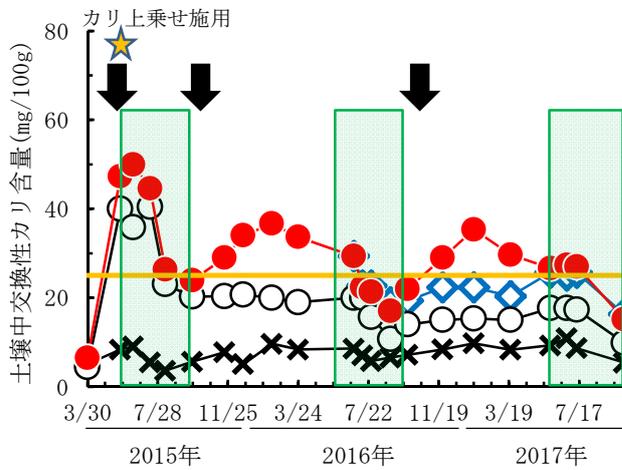


図1 土壤中交換性カリ含量の推移

●：初年目カリ上乗せ+稲わら連用、○：初年目カリ上乗せ、◇：カリ上乗せ(対照)
×：無カリ、↓：わら施用、■：作付期間

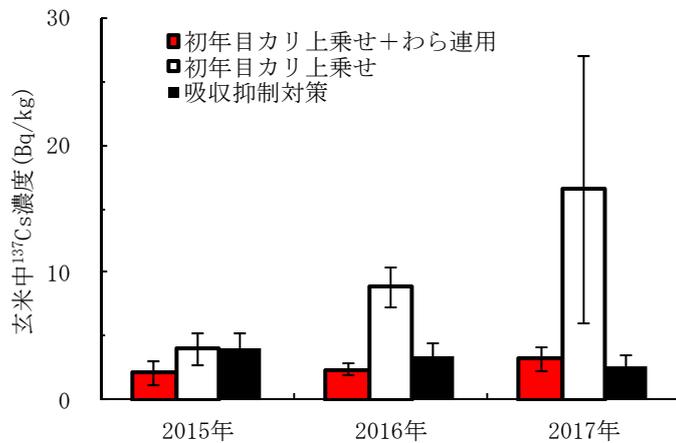


図2 玄米中放射性¹³⁷Cs濃度

無カリ区の¹³⁷Cs濃度(Bq/kg)：2015年：189、2016年：143、2017年：126。
吸収抑制対策は、塩化カリを土壤中交換性カリ含量25mg/100gを目標に施用。
エラーバーは標準偏差。

中課題番号(e-Radシステム課題 ID8 桁)	15653590	研究期間	平成27～29年度
小課題番号(桁数は任意)	204-1	研究期間	平成27～28年度
中課題名(契約課題名)	放射性セシウム吸収抑制メカニズムの解明		
小課題名	イネやダイズの放射性Cs吸収抑制技術の高度化に資する緩効性カリ肥料利用の有効性の検証		
小課題責任者名・研究機関	浅野智孝、石川伸二、飯塚美由紀、松岡英紀、見城貴志・朝日工業株式会社開発部肥料開発課		

1) 研究目的

① イネ・ダイズの放射性Cs吸収抑制技術としてはカリウムの施用が有効であり、土壌診断と合わせて行うことで放射性Cs濃度が低減されている。しかし、過剰なカリウム施用は、土壌塩基バランスの大きな変化を引き起こす可能性がある。一方で、保肥力の弱い圃場では、交換態カリウム含量が低くなると考えられる為、可食部への放射性Cs蓄積を防ぐためには十分な量のカリウム施用が必要である。そこで、福島県内のカリウムの溶脱しやすい圃場を探索し、被覆カリウム肥料(被覆塩化カリウム)を用いて被覆カリウム肥料の有効性とカリウム施用量の低減が可能であるかについて、イネ・ダイズを用いて検証した。

② 被覆カリウム肥料は、塩化カリウムに比べ2倍程度の資材費がかかる。放射性Cs吸収抑制技術として普及させるためには、コスト差を考慮に入れたより減肥、省力的な技術が求められる。そこで、イネ・ダイズ栽培時における、被覆カリウム肥料を用いたカリウムの減肥がどの程度可能であるかを示す為に、福島県内の水田・畑地で圃場試験を行う。

2) 研究成果

(1) 水稻試験

H28年度、福島県内水田圃場(交換態カリウム量: 11.0mg/100g)において、基肥 N:6kg-P:10kgに加え、①基肥K:10kg 追加カリウム無区、②基肥K:10kg +塩化カリウム 38kg/10a (K:23kg) 追加区、③基肥K:0kg+被覆カリウムA 56.3kg/10a (K:34kg) 追加区、④基肥K:0kg +被覆カリウムA 42.2kg/10a (K:25kg) 追加区、⑤基肥K:0kg +被覆カリウムA 28.2kg/10a (K:17kg) 追加区を設定し、水稻(ひとめぼれ)の栽培を行った。収穫後、玄米中Cs濃度の測定を行い、被覆カリウム肥料の減肥効果について検討を行った。

また、H27年度より福島県内水田圃場において肥料埋設試験(現地水田土壌を乾燥した後、4mmの篩で篩がけした土壌50gに、被覆カリウム肥料を混合したサンプルを作成し、不織布につめる。調整したサンプルを水田のカリウム無施用区の10-15cmの土壌深度の部位に1区5連を埋設する。定期的なサンプリングを行い、乾燥後サンプル中に残ったカリウム濃度を測定し、差し引き法により資材のカリウム溶出量・交換態カリ濃度へ与える効果を把握する。)をH27年～28年度に行い、水田中における被覆カリウム肥料の溶出を確認した。

H28年度水稻試験は、6月2日に施肥と苗を移植、10月13日に収穫を行った。施肥前の圃

場カリウム濃度は11.0mg/100gであった。



図1. 6月3日の水田圃場の様子



図2. 8月5日の水田圃場の様子



図3. 10月13日の水田圃場の様子

	水口	水尻	平均	10a収量(kg)
慣行施肥(K:10kg)	0.96	0.82	0.89	534
塩化カリウム(K:33kg)	1.09	0.79	0.94	564
被覆カリウムA(K:34kg)	1.20	0.93	1.07	639
被覆カリウムA(K:25kg)	1.01	1.16	1.09	651
被覆カリウムA(K:17kg)	1.09	1.12	1.11	663
	※27株収量			

表1. H28年度水稻収量調査

・水稻試験では、各区とも慣行施肥以上の玄米収穫量（表1）となり、カリウム施肥量の影響は見られなかった。収穫後の交換態カリウム量：11.6mg/100g乾土となった。

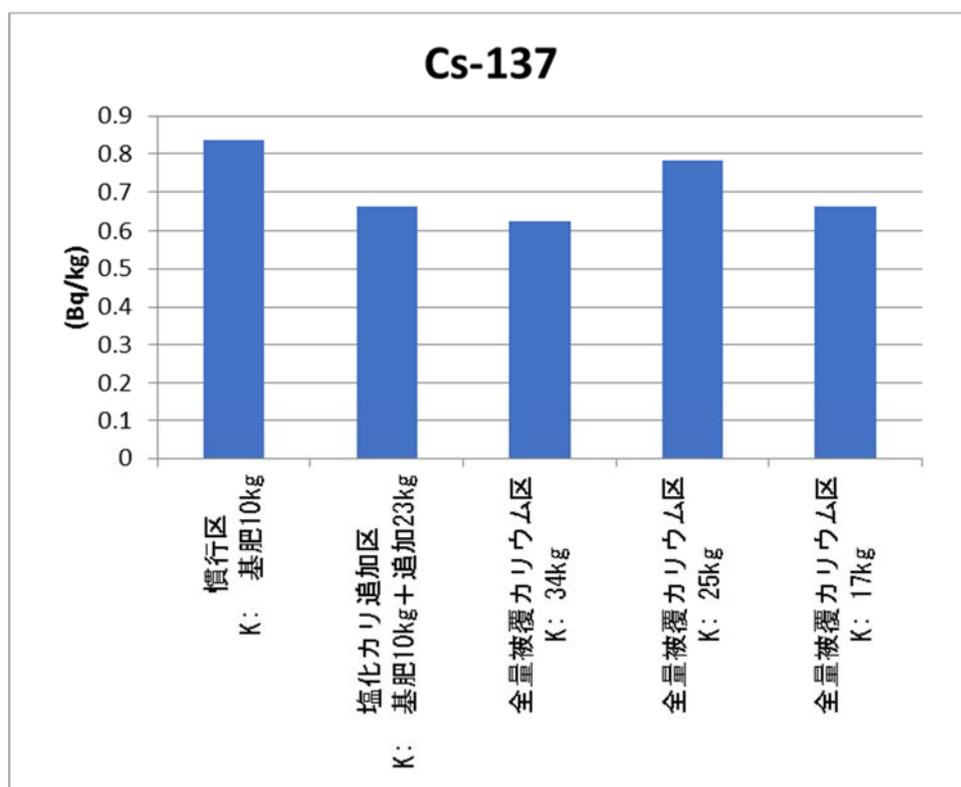


図4 塩化カリウムと被覆塩化カリウムが水稻の玄米中への放射性Cs量に与える効果
(平成28年福島県内水田)

(作付け期間中に塩化カリ追加区は、全てのカリウムが土壌中へ溶出した。全量被覆カリ区のカリウムの溶出割合は、水中溶出の結果から約80%と推定され、それぞれ、図4の左から、27.2Kg、20.0Kg、13.6Kgとなると考えられた。)

平成27年～28年度圃場埋設試験において、埋設中の肥料は、12月～1月中の低温期（埋設170～220日）に溶出量が低下し、気温の上昇とともに溶出量が上昇する傾向が見られた（図5）。圃場の2015年7月から2016年6月までの平均地温は10.7℃であった（図6）ことから、土中での被覆資材の分解がやや進んだ可能性がある。

塩化カリ追加区と、全量被覆カリ34kg区は、カリウムの総施用量がほぼ同等であり、両区の玄米中の放射性Cs抑制程度もほぼ同じと推定された。全量被覆カリ34kg区では、栽培期間中にカリウムが27.2kg程度溶出継続的に溶出し、かつ可食部へのCs吸収を抑制したと推定されることから、土壌への一過的なカリウム供給が低減できたと考えられた。以上のことから、継続的なカリ供給によるCs吸収抑制の可能性が示唆された。今後、溶出日数が長く、かつ初期溶出が抑えられた被覆カリ肥料が調整できれば、長期的なカリウム施用計画により、玄米中の放射性Cs蓄積量を上昇させずに、土壌中のカリウム存在量を効率的に制御できる可能性が示唆された。

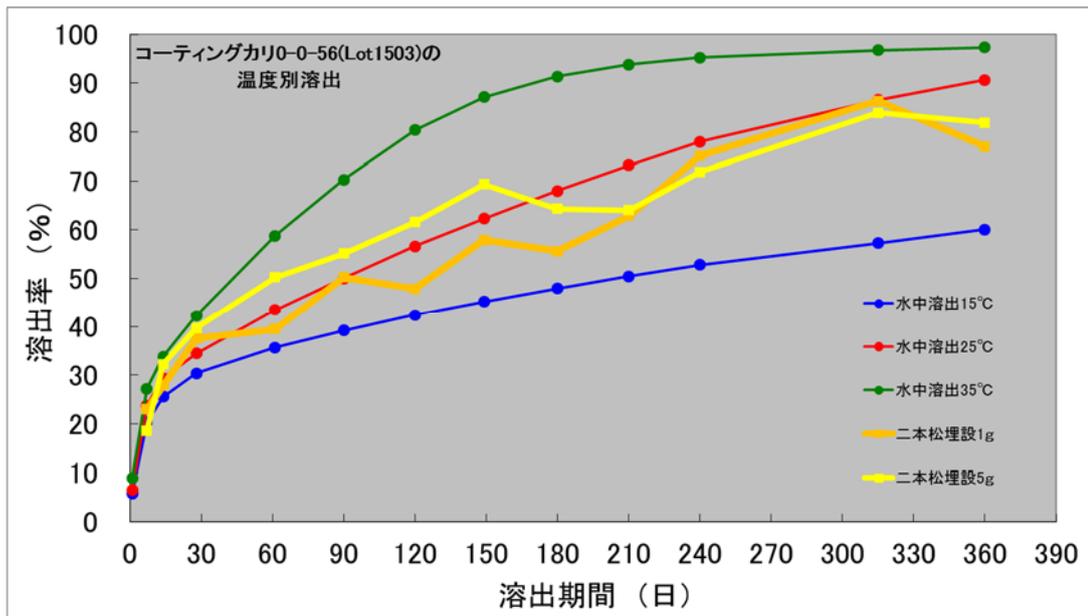


図5. 福島県内水田における圃場埋設肥料の溶出

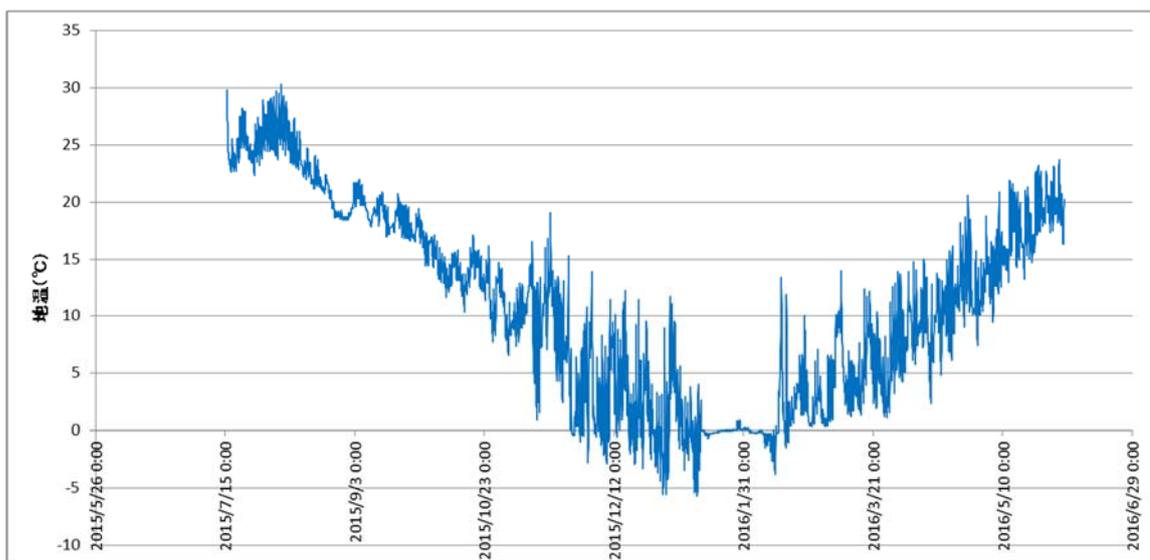


図6. 福島県内水田圃場の地温推移

(2) ダイズ試験

平成28年度、福島県内畑圃場（交換態カリウム量：21.3mg/100g）において、基肥 N:5kg-P:10kgに加え、①基肥K:10kg 追加カリウム無区、②基肥K:10kg+塩化カリウム 14kg/10a (K:8kg)追加区、③基肥K:10kg+被覆カリウムA:15.4kg/10a (K:8kg)追加区、④基肥K:0kg+被覆カリウムA:33.6kg/10a (K:18kg)区、⑤基肥K:0kg+被覆カリウム A:25.5kg/10a (K:14kg)区、⑥基肥K:0kg+被覆カリウムA:18.2kg/10a (K:10kg)区、⑦基肥K:5kg+被覆カリウムA:9.1kg/10a (K:5kg)区、⑧基肥K:10kg+被覆カリウム C:15.4kg/10a (K:8kg)追加区を設定し、ダイズ栽培を行った。ダイズ収穫後、子実のCs-137濃度の測定を行った。また、水田圃場と同様に肥料埋設試験を行い、肥料の溶出パターンの確認を行った。

平成28年6月3日に施肥と播種を行った。7月11日、8月5日、9月8日、11月8日（収穫）にと埋設肥料のサンプリングを行った。施肥前の交換態カリウム量は21.3mg/100gであった。



図7. 6月3日の圃場の様子



図8. 7月11日の圃場の様子

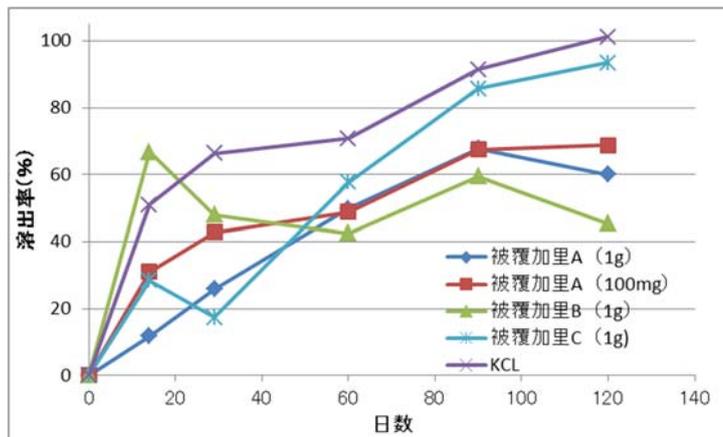


図9. ダイズ圃場における被覆カリウム肥料の溶出率（圃場埋設法）

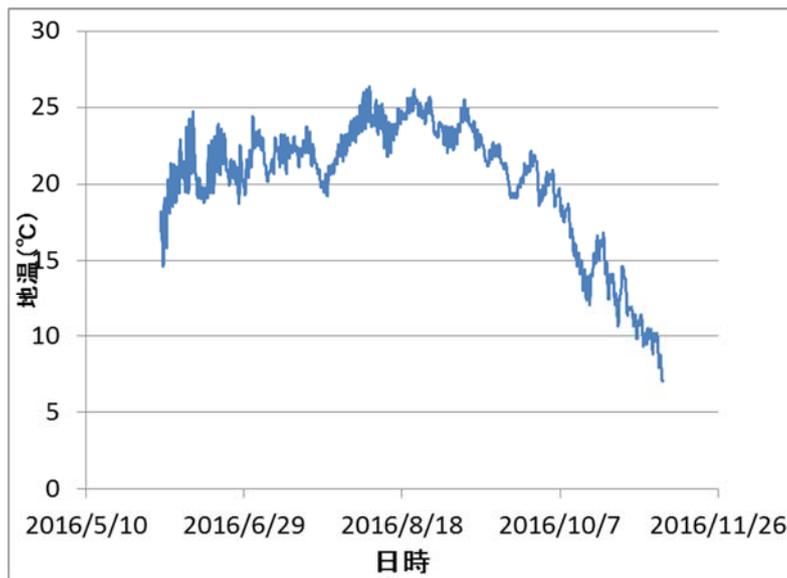


図10. ダイズ圃場の地温推移

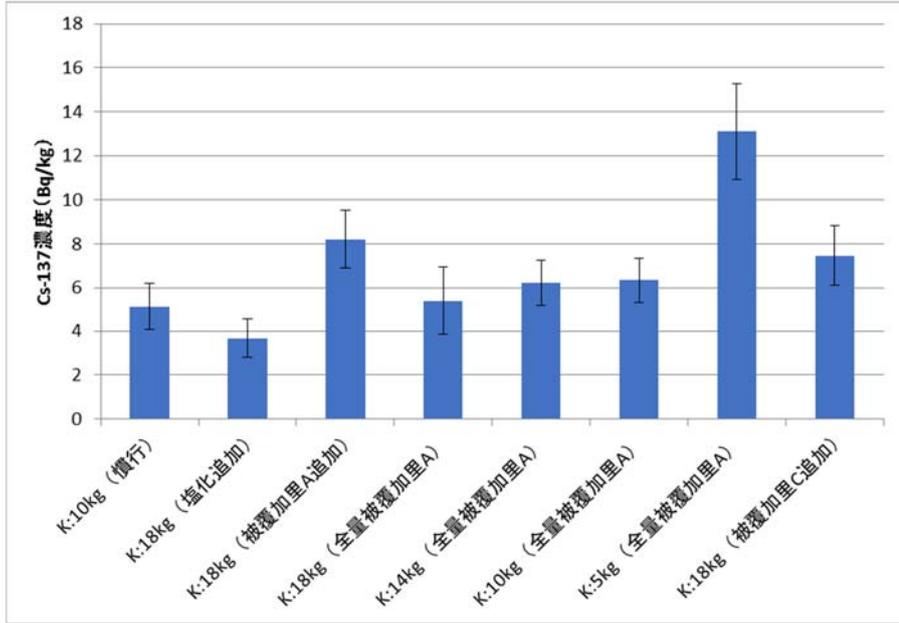


図 1 1. ダイズ子実中の放射性Cs-137濃度 (Ge半導体検出器)

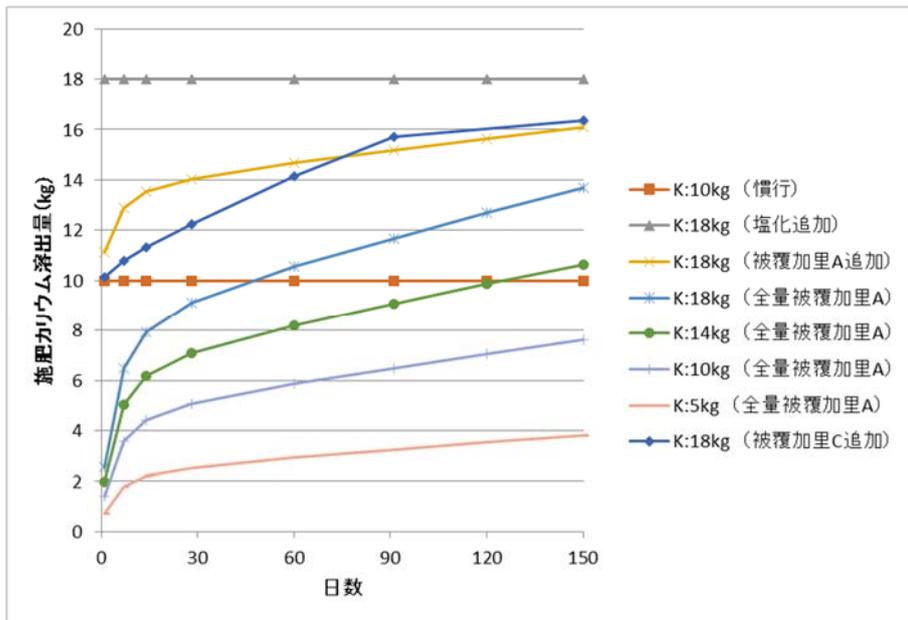


図 1 2. 施肥カリウムの溶出パターン

・ダイズ圃場試験では、慣行施肥K:10kgに比べ、塩加カリウムを追加施肥（基肥K:10kg+追加塩化カリウムK:8kg）した区では、Cs濃度が下がる傾向が見られた。一方で追加施肥を被覆カリウム肥料A、被覆カリウム肥料Cで行った区（基肥K:10kg+被覆カリウム K:8kg）した区では、慣行よりも子実中Cs濃度が高まった。また、基肥分カリウムを被覆カリウム肥料に置き換えた区（全量被覆加里区）ではカリウムの総施用量が減少すると子実中Cs濃度が上昇する傾向が見られた（図 1 1）。全量被覆加里A（K:18kg）区では、慣行施肥と同等の子実Cs濃度となった。施肥カリウムの溶出パターン（図 1 2）から施肥後45日程度までにカリウム溶出量が慣行施肥同等量であれば慣行施肥同等の子実Cs濃度となる可能性があると考えられた。全量被覆加里では、基肥分を含めたカリウム施用設計とすることで

肥料を一つの資材化することができるため施肥労力の軽減が期待できると考えられた。

3) 成果活用における留意点

水稻を対象にした水田への被覆カリの施用試験から、塩化カリ追加区に比べ、土壌への一過的なカリウム供給が低減できたと考えられた。このことから、継続的なカリ供給によるCs吸収抑制の可能性が示唆された。今後、溶出日数が長く、かつ初期溶出が抑えられた被覆カリ肥料が調整できれば、長期的なカリウム施用計画により、玄米中の放射性Cs蓄積量を上昇させずに、土壌中のカリウム存在量を効率的に制御できる可能性が示唆された。一方、ダイズ圃場試験では、被覆カリウム肥料を基肥分を含めたカリウム施用設計とすることで肥料を一つの資材化し、施肥労力の軽減が期待できることが分かった。しかし、一つの資材とした場合、土壌中の交換態カリウム量に応じたカリウム施用が難しくなる。土壌分析が行うことができない場合等、使用する場面を想定して設計する必要がある。

4) 今後の課題

被覆カリウム肥料使用による一過的なカリウム供給が低減できることが示されたが、水稻やダイズの異なる栽培環境で更なる検討が必要である。

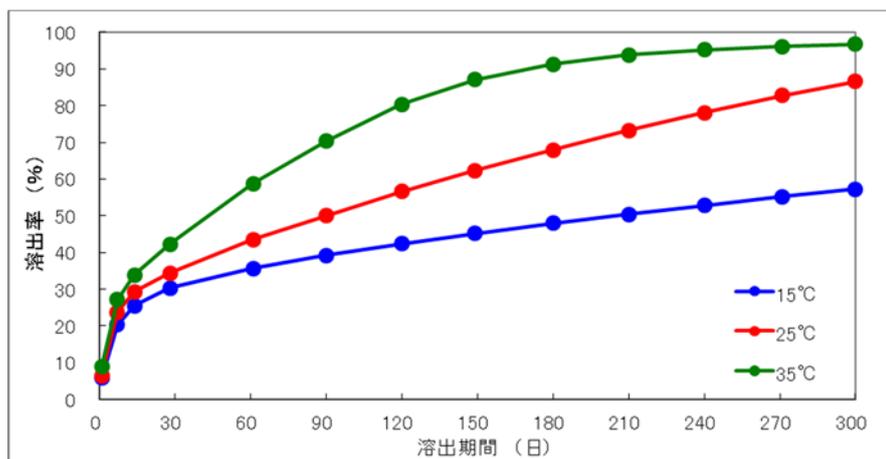
中課題番号(e-Radシステム課題 ID8 桁)	15653590	研究期間	平成27～29年度
小課題番号 (桁数は任意)	204-2	研究期間	平成27～28年度
中課題名 (契約課題名)	放射性セシウム吸収抑制メカニズムの解明		
小課題名	新規の緩効性カリ肥料の探索と開発		
小課題責任者名・研究機関	浅野智孝、石川伸二、飯塚美由紀、松岡英紀、見城貴志・朝日工業株式会社開発部肥料開発課		

1) 研究目的

被覆肥料は、原料の形状・物性や被覆資材の種類、製法により溶出特性が異なる。また、被覆することで製造コストがかかり、原料単独のコストよりも資材費が上昇する。本小課題では、業界のネットワークを利用して、国内外で市販されている緩効性カリウム肥料（被覆カリウム肥料）を収集し、それらの特性を評価する。得られた特性データを利用して、放射性セシウム吸収抑制資材としてより適した緩効性カリウム肥料を検討する。

2) 研究成果

国内外から入手した、被覆カリウム肥料12.5gを250mlの蒸留水に添加し、15℃・25℃・35℃の条件下で保管した。一定期間ごとに、溶出したカリウム量を測定した。



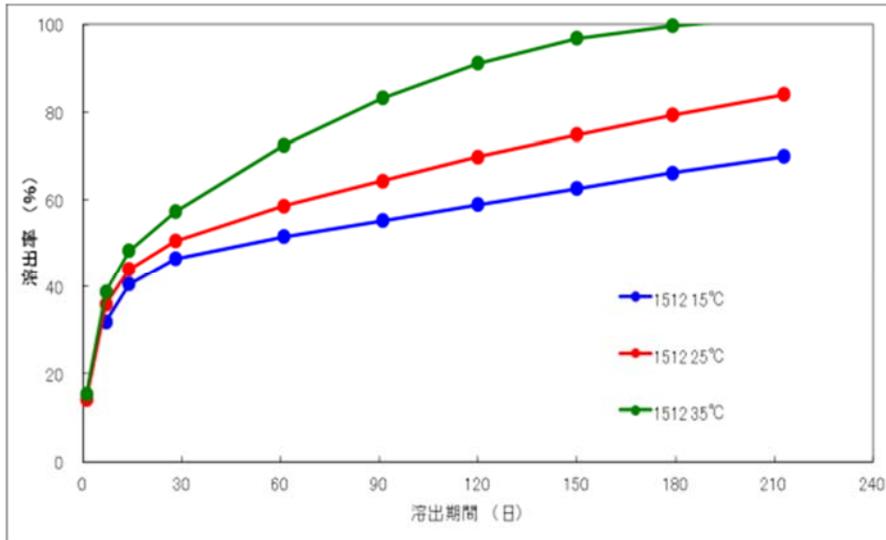


図1. 被覆カリウム肥料A(上: Lot.a、下: Lot.b) の溶出パターン

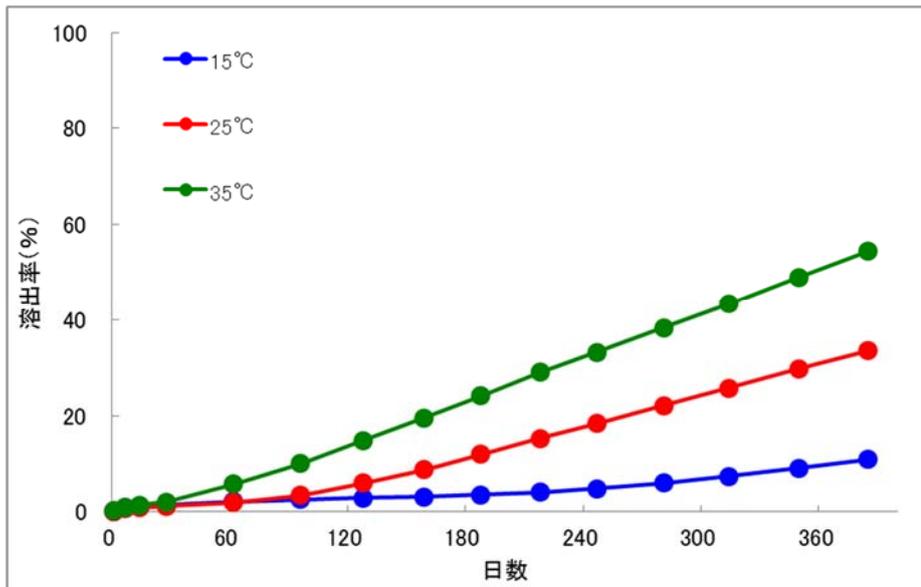


図2. 被覆カリウム肥料Bの溶出パターン

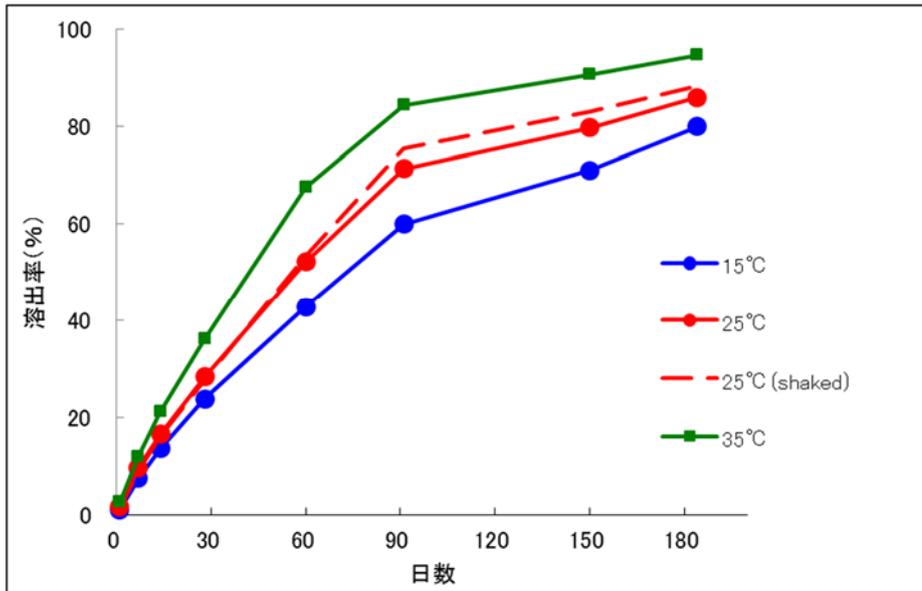


図3. 被覆カリウム肥料Cの溶出パターン

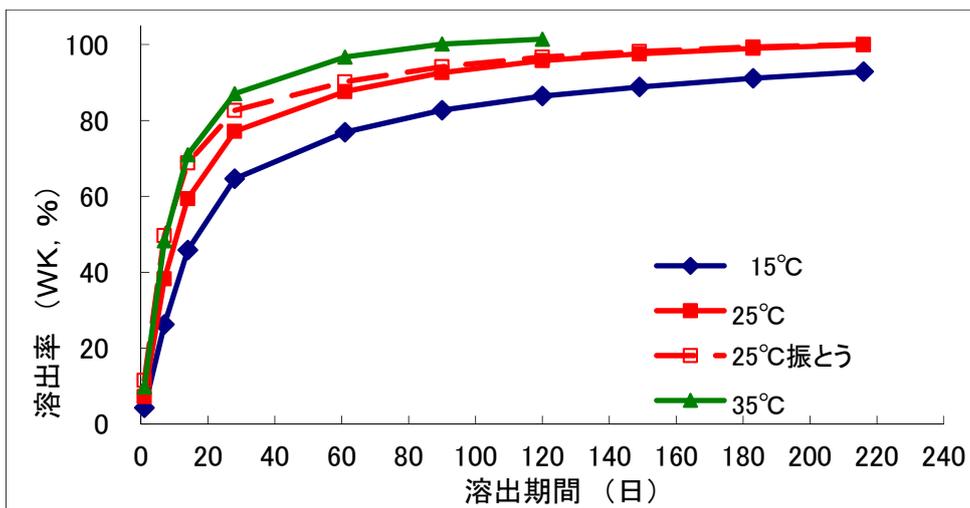


図4. 被覆カリウム肥料Dの溶出パターン

製造メーカーにより、80%溶出までのパターン（特に初期溶出の割合）に差が見られ、設定日数と水中溶出の実測値との差も見られた。また、カリウムを主成分とするが窒素やリン酸を含有している銘柄があり、銘柄による差が見られた。放射性Cs吸収抑制資材としての利用を考えた場合、肥効パターン以外にも、窒素、リン酸成分やカリウム含量、資材コストを含めて総合的に考える必要があると考えられる。

3) 成果活用における留意点

本試験において収集した被覆カリウム肥料は、25°C水中溶出において100日を超える肥料が多くあった。福島県二本松市の年平均地温は10°C弱、6月～10月でも20°C程度であり、被覆肥料は温度依存性があることから、栽培期間よりも短いタイプの被覆カリウム肥料が適していると考えられる。溶出期間と、コストを含めて放射性セシウム吸収抑制資材とし

てより適した緩効性カリウム肥料を検討する必要がある。

4) 今後の課題

被覆カリウム肥料は、溶出日数の種類や成分、形状について発展の可能性があるが、現状、放射性Cs吸収抑制対策資材としては使用が限られる。必要に応じて使用できるよう、情報収集と公開をしていく必要がある。

中課題番号(e-Radシステム課題 ID8 桁)	15653590	研究期間	平成27～29年度
小課題番号 (桁数は任意)	204-3	研究期間	平成27～28年度
中課題名 (契約課題名)	放射性セシウム吸収抑制メカニズムの解明		
小課題名	Cs吸収抑制が困難な圃場に於ける緩効性カリ肥料の有効性検証		
小課題責任者名・研究機関	浅野智孝、石川伸二、飯塚美由紀、松岡英紀、見城貴志・朝日工業株式会社開発部肥料開発課		

1) 研究目的

一般的圃場においては、緩効性カリ肥料の明確な有効性は確認しにくい。しかし、塩化カリ施用においても明確な有効性が確認しづらい圃場が存在することが知られている。この為、水稻において、塩化カリ施用処理にてもCs吸収抑制効果の得難い圃場において、カリの継続的供給可能な緩効性カリ肥料（被覆カリウム肥料）によるCs吸収抑制効果について検証した。

2) 研究成果

Cs抑制効果の得難い圃場（黒ボク土、平成28年収穫後土壌の交換態カリウム量 6～8mg/100g）において、追加カリウム12kg K₂O/10a（配布塩化カリ量 6kg K₂O/10a、農家自主施肥塩化カリ 6kg K₂O/10a）を標準として①基肥+追加カリウム無区、②基肥+塩化カリ追加区、③基肥+塩化カリ倍量区、④基肥+緩効性カリ追加区、⑤基肥+緩効性カリ倍量区を設定（基肥として施肥されるカリウム量 4.2kg K₂O/10a）し、水稻の栽培を行った。

代かき後平成29年5月9日に施肥を行い、5月16日に水稻移植作業を行った。使用品種は現地慣行に合わせ、ひとめぼれとした。また、施肥と同日に圃場埋設試験用のサンプルを圃場内に埋設し、以後1ヵ月ごとにサンプリングを行い、カリウム溶出量の推移を測定した。

圃場埋設試験では、緩効性カリは収穫までに73%が溶出していた（図1）。実験室内での水中溶出法（25℃）よりも低い溶出となったが、現地圃場の地温が平均で20℃（図2）であったことから、ほぼ推定通りの溶出となったと考えられる。一方で、塩化カリは埋設後30日で100%の溶出となった。

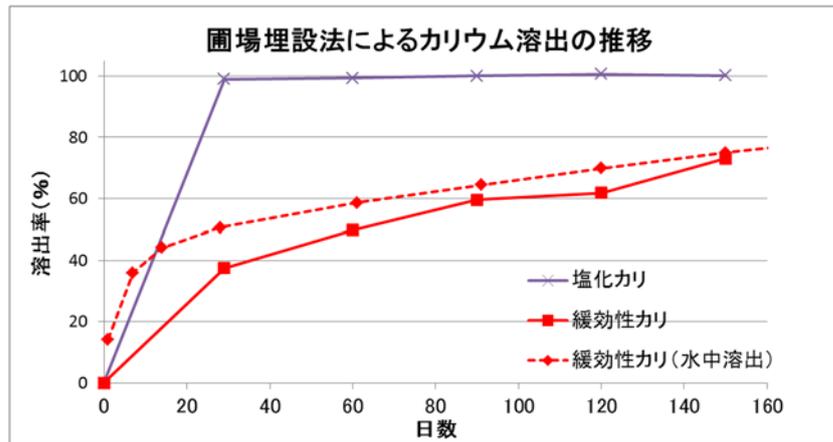


図1. 圃場埋設法によるカリウム溶出の推移

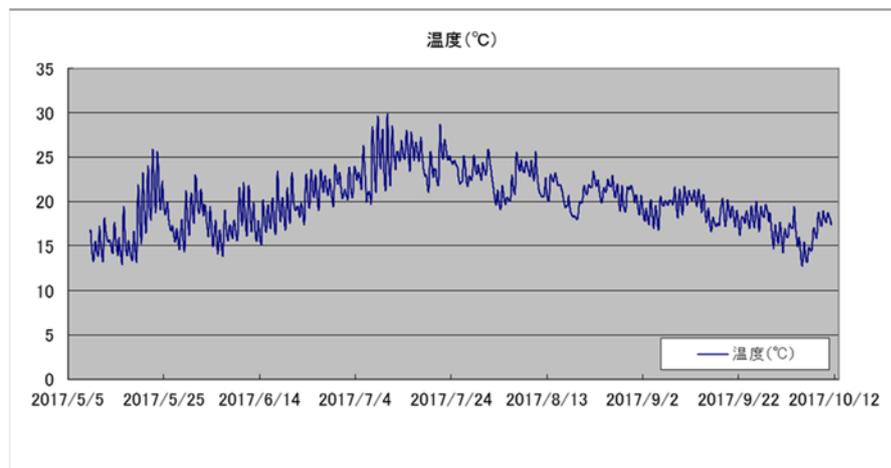


図2. 現地圃場の地温推移

現地圃場の水稲は、病害の発生や倒伏等は無く10月11日に収穫作業（各区100株）を行った。収穫乾燥後、玄米中のCs-137を測定したところ図3のような結果となった。

平成28年度の同圃場の玄米中Cs-137濃度は9Bq/kgであり、平成28年度と同等の施肥量である塩化カリ標準（16.2kg K₂O/10a）が8.2Bq/kgであったことから、カリウム施用によるCs-137吸収抑制効果は同等だったと考えられる。なお、本試験における標準追加量の設定は平成28年度の現地圃場資材施用量の聞き取りを元にした。

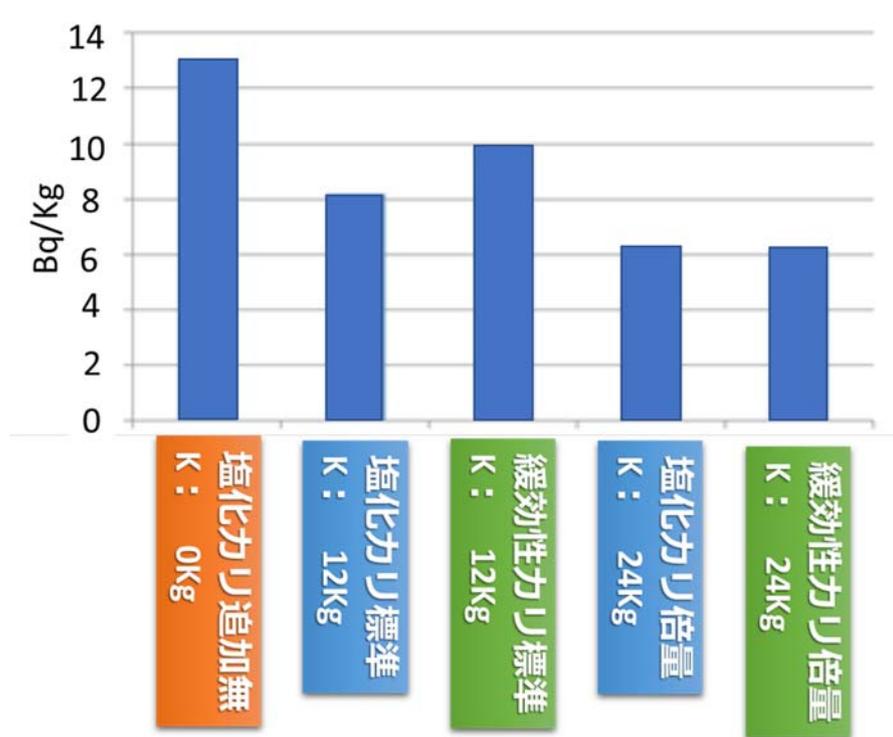


図3 福島県内の黒ボク土水田における塩化カリウムと緩効性カリが水稻の玄米中への放射性Cs量に与える効果（平成29年）

（作付け期間中に塩化カリ標準区は、全てのカリウムが土壌中へ溶出、一方、緩効性カリ区のカリウムの溶出割合は約80%で、それぞれ、図3の左から、9.6Kg、19.2Kgとなる。）

平成29年度の試験では、塩化カリ標準12Kg区と緩効性カリ標準12Kg区を比較した場合、栽培期間中の緩効性カリの溶出程度が約80%と推定される為、緩効性カリは栽培期間中に9.6kgのカリウムが土壌に溶出したことになる。この場合、玄米への放射性Cs蓄積の抑制程度も20%落ちていた。一方、倍量区では、両資材とも、玄米中の放射性Cs蓄積量は12Kg区より約25%抑制した。この場合、緩効性カリ24Kg区では、実質的に19.2Kgのカリウムで塩化カリ上乗せ24Kg区と同等であったことになり、水田土壌への一過的カリウム供給を低減した。

平成29年度の水稻を対象にした水田への緩効性カリの施用試験は、塩化カリウムに比べ、土壌中への一過的なカリウム添加量を低減できる可能性が示された。また、倍量区では塩化カリと緩効性カリで同等の放射性Cs吸収が抑制できたことから、継続的なカリ供給によるCs吸収抑制の可能性が示唆された。今後、溶出日数が長く、かつ初期溶出が抑えられた被覆カリ肥料が調整できれば、長期的なカリウム施用計画により、玄米中の放射性Cs蓄積量を上昇させずに、土壌中のカリウム存在量を効率的に制御できる可能性が示唆された。

3) 成果活用における留意点

平成29年度の福島県内黒ボク土壌水田での緩効性カリの施用試験は、緩効性カリを用いて放射性Cs吸収を抑制しながら、土壌中への一過的なカリウム添加量を低減できる可能性

が示された。玄米中の放射性Cs蓄積量を上昇させずに、土壌中のカリウム存在量を効率的に制御するためには、土壌や気候に合った緩効性カリを使用する必要がある。

4) 今後の課題

緩効性カリの効果が明瞭に出現する農業環境の把握および、そこでの総合的なカリウム施用体系の確立に必要な緩効性カリを有効利用する基盤情報の取得していく必要がある。

成果等の集計数

課題番号	学術論文		学会等発表(口頭またはポスター)		出版図書	国内特許権等		国際特許権等		報道件数	普及しうる成果	発表会の主催(シンポジウム・セミナー等)	アウトリーチ活動
	和文	欧文	国内	国際		出願	取得	出願	取得				
15653590	0	0	14	0	6	0	0	0	0	3(内、予定1件)	2	3	4

(1)学術論文

区分: ①原著論文、②その他論文

整理番号	区分	機関名	タイトル	著者	掲載誌	巻(号)	掲載ページ	発行年	発行月
1			該当なし						

(2)学会等発表(口頭またはポスター)

整理番号	タイトル	発表者名	機関名	学会等名	発行年	発行月
1	ひとめぼれータカナリの組換え自殖系統を用いた放射性Cs吸収抑制遺伝子の探索	國井 みず穂、大川 泰一郎、小島 克洋、高木 宏樹、阿部 陽、中丸 観子、寺内 良平、大津 直子、横山 正	東京農工大学、岩手生物工学研究センター	日本土壤肥料学会	2015	9
2	福島県二本松市の同一圃場で2年間連続栽培したことで分かったダイズ品種群の放射性セシウム吸収特性について	小島 克洋、友岡 憲彦、大津 直子、横山 正.	東京農工大学、農研機構 ジーンバンク	日本土壤肥料学会	2015	9

3	ひとめぼれ-カサラス組換え自殖系統を用いた玄米や茎葉部に放射性セシウム集積を抑制するQTLの探索	中丸 観子, 大川 泰一郎, 小島 克洋, 高木 宏樹, 阿部 陽, 寺内 良平, 大津 直子, 横山 正.	東京農工大学、岩手生物工学研究センター	日本土壤肥料学会	2015	9
4	稲わら施用による水稻の放射性セシウム吸収抑制効果	佐久間祐樹	福島県農業総合センター	日本作物学会	2106	3
5	水稻の放射性セシウム吸収抑制資材としての稲わらの評価	新妻和敏	福島県農業総合センター	東北農業研究	2016	8
6	Evaluation of ¹³⁷ Cs concentration of various organs in two types of soybean cultivars showing different ¹³⁷ Cs uptake property as affected by single / co-inoculation using Bradyrhizobium and. Arbuscular Mycorrhizal fungi and soil types.	Mohammad Daud Haidari, 小島克洋、大津直子、横山 正	東京農工大学	日本土壤肥料学会	2016	9
7	放射性Cs吸収抑制対策で高めた土壌中交換性カリの稲わら施用による維持	新妻和敏	福島県農業総合センター	土壤肥料学会東北支部	2017	7
8	初年度のみ異なる量の緩効性カリ肥料を施用して2年間栽培した水稻各器官における放射性Cs集積の経年推移	小島克洋・石川伸二・浅野智孝・大津直子・横山正	東京農工大学、朝日工業株式会社	日本土壤肥料学会	2017	9
9	カリウム施肥量が異なる水田土壌に生育させ放射性Csの取り込み量が異なったイネで、発現量が変化するカリウム関連トランスポーターのRNA-seq法による解析	市原翼、阿部陽、大津直子、小島克洋、大川泰一郎、横山正	東京農工大学、岩手生物工学研究センター	日本土壤肥料学会	2017	9
10	ひとめぼれ-タカナリの組換え自殖系統を用いたイネの放射性Cs吸収の低減に貢献する遺伝子領域の特定	佐野舜吾、阿部陽、大川泰一郎、大津直子、小島克洋、Jedidi Salem、横山 正	東京農工大学、岩手生物工学研究センター	日本土壤肥料学会	2017	9
11	QTL解析でイネ玄米への放射性Cs吸収抑制に関与が推定されたトランスポーターの放射性Cs取り込み特性の解析	横山 正、福原いずみ、大津直子、小島克洋、森山裕充、阿部 陽、大川泰一郎	東京農工大学、岩手生物工学研究センター	日本土壤肥料学会	2017	9

12	Evaluation of 137Cs concentration of various organs in two types of soybean cultivars showing different 137Cs uptake property as affected by single / co-inoculation using Bradyrhizobium and. Arbuscular Mycorrhizal fungi and soil types.	Mohammad Daud Haidari、小島克洋、大津直子、横山 正	東京農工大学	日本土壤肥料学会	2017	9
13	水稻玄米における放射性セシウム蓄積量に関するQTLの同定	阿部陽	岩手生物工学研究センター、東京農工大学	作物学会	2018	3
14	放射性セシウム吸収抑制対策のためのカリ資材としてパーミキュライト、金雲母の施用効果	松岡宏明	福島県農業総合センター	環境放射能研究会	2018	3

(3) 出版図書

区分：①出版著書、②雑誌(注)(1)学術論文に記載したものを除く、重複記載をしない。)、③年報、④広報誌、⑤その他

整理番号	区分	著書名(タイトル)	著者名	機関名	出版社	発行年	発行月
1	①	土のひみつー食料・環境・生命ー、Cs vs Cs!? セシウムと耕地土壌の闘い	小島克洋、横山 正	東京農工大学、日本土壤肥料学会「土のひみつ」編集グループ (ISBN 978-4-254-40023-6C30)	朝倉書店	2015	9
2	⑤	水稻における稲わら施用の放射性セシウム吸収抑制	佐久間祐樹、新妻和敏	福島県農業総合センター	福島県ホームページ「放射線関連支援技術情報」	2016	4
3	⑤	稲わらのカリは速やかに溶出する	佐久間祐樹、新妻和敏	福島県農業総合センター	福島県ホームページ「放射線関連支援技術情報」	2016	4
4	①	放射性Csを子実に蓄積しない水稻システムの探索とその育種への利用「福島農業復興支援バイオ肥料プロジェクト 最終報告書」	横山 正、大川 泰一郎、大津 直子、小島 克洋、國井みず穂、中丸明子、佐野舜吾、市原翼	東京農工大学 (ISBN 978-4-9906944-3-2-C3045-/00000E)	東京農工大学 農学部 文科省特別経費プロジェクト「バイオ肥料、JY デザイン社」	2017	3
5	①	放射性Csを子実に蓄積しないダイズシステムの探索とその育種への利用「福島農業復興支援バイオ肥料プロジェクト 最終報告書」	横山 正、小島 克洋、加賀 秋人、友岡 憲彦、大津 直子	東京農工大学、農研機構 ジーンバンク (ISBN 978-4-9906944-3-2-C3045-/00000E)	東京農工大学 農学部 文科省特別経費プロジェクト「バイオ肥料、JY デザイン社」	2017	3
6	⑤	カリ上乗せ施用中止後の土壌中交換性カリ含量と玄米中放射性セシウム濃度の推移	新妻和敏、佐久間祐樹、藤澤弥榮、吉田直史	福島県農業総合センター	福島県ホームページ「放射線関連支援技術情報」	2018	

(4) 国内特許権等

整理番号	特許権等の名称	発明者	権利者 (出願人等)	機関名	特許権 等の種 類	番号	出願年月日	取得年 月日
1	該当なし							

(5) 国際特許権等

整理番号	特許権等の名称	発明者	権利者 (出願人等)	機関名	特許権 等の種 類	番号	出願年月日	取得年 月日	出願国
1	該当なし								

(6) 報道等

区分: ①プレスリリース、②新聞記事、③テレビ放映、④その他

区分	記事等の名称	掲載紙・放送社名等	掲載年	掲載月	掲載日	機関名	備考
②	セシウムを吸収しないイネ 農水省開発に着手	日経産業新聞	2015	7	7	農林水産省、東京農工大学	
②	復興の在り方探る 東京農工大とNPOゆうきの里東和合同でシンポ	福島民報	2017	11	30	東京農工大学、NPO法人ゆうきの里東和ふるさとづくり協議会	
①	放射性セシウム吸収抑制対策のためのカリ資材としてバーミキュライト、金雲母を施用することで土壤溶液中のカリウムイオン濃度を高く維持できる	放射線関連支援技術情報	2018	3	1	福島県農業総合センター	予定

(7)普及に移しうる成果

区分:①普及に移されたもの、製品化して普及できるもの、②普及のめどがたったもの、製品化して普及のめどがたったもの、③主要成果として外部評価を受けたもの

区分	成果の名称	機関名	普及(製品化) 年月		主な利用場面	普及状 況
②	玄米への放射性セシウム蓄積の少ない改良型ひとめぼれ(育種母本)の育成	東京農工大学、岩手生物工学研究センター、NPO法人ゆうきの里東和ふるさとづくり協議会	2018	3	玄米への放射性セシウム蓄積が少ない品種の育成時に育種母本として利用し、放射性セシウム抑制遺伝子の導入の有無に関してはDNAマーカーで追跡可能	福島県農業総合センターへ種子を寄託する
②	玄米への放射性セシウム蓄積の少ない改良型ひとめぼれ(育種母本)の栽培特性、育種への利用マニュアル	東京農工大学、岩手生物工学研究センター、NPO法人ゆうきの里東和ふるさとづくり協議会	2018	3	玄米への放射性セシウム蓄積の少ない改良型ひとめぼれ(育種母本)の栽培特性と育種への利用マニュアルを記載しており、特に玄米への放射性セシウム蓄積特性、および玄米への放射性セシウム蓄積を低減させるDNAマーカー情報を利用することで、玄米への放射性セシウム蓄積が少ない品種の育成に使用できる。	福島県農業総合センターへマニュアルを寄託すると共に、インターネット等で広く周知を図る。

(8)発表会の主催の状況

(シンポジウム・セミナー等を記載する。)

整理番号	発表会の名称	年月日			開催場所	参加者数	機関名	備考
1	農学部特別講義III(三菱UFJ環境財団寄附講義)シンポジウム「東京農工大学農学部は東日本大震災の原発事故による放射性物質汚染に対して何がで	2017	8	2	東京農工大学農学部講堂	80名前後	東京農工大学、三菱UFJ環境財団	

2	東京農工大学・NPO法人ゆうきの里東和ふるさとづくり協議会合同シンポジウム (東和地域 災害復興調査報告会) 「現状を知り、確かな裏付けによる、新たな農業の展開をめざして」 ～放射能事故で農業に変化が	2017	11	25	福島県二本松市東和文化センター	70名前後	東京農工大学、NPO法人ゆうきの里東和ふるさとづくり協議会	
3	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	福島県福島市コラッセふくしま多目的ホール	120名前後	農研機構	

(9)アウトリーチ活動の状況

当事業の研究課題におけるアウトリーチ活動の内容は以下のとおり。

区分：①一般市民向けのシンポジウム、講演会及び公開講座、サイエンスカフェ等、②展示会及びフェアへの出展、大学及び研究所等の一般公開への参画、③その他(子供向け出前授業等)

整理番号	区分	アウトリーチ活動	年月日			開催場所	参加者数	主な参加者	機関名	備考
			年	月	日					
1	①	日本大学生物資源学部 講演会：農工大の福島農業復興プロジェクト研究の紹介	2015	7	10	日本大学 生物資源科学部 藤沢キャンパス	70名前後	学生、大学関係者	東京農工大学	
2	①	園芸学会支部会講演会：福島農業復興支援プロジェクト研究の進捗状況の報告	2016	11	26	東京外語大学府中キャンパス	60名前後	園芸学会関係者、大学関係者	東京農工大学	
3	①	サイエンスカフェ「福島の農業復興支援研究の今後を語る～ゆうきの里東和ふるさとづくり協議会と東京農工大学の二人三脚での取り組み～」	2017	3	10	農林水産省消費者の部屋特別展示室	100名前後	会社員、主婦、学生、行政等	東京農工大、NPO法人ゆうきの里東和ふるさとづくり協議会	
4	①	東京外語大学連携講義：農工大の福島農業復興支援プロジェクト研究の紹介	2017	4	18	東京外語大学府中キャンパス	80名前後	学生、大学関係者	東京農工大学	