農研機構
NARO 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

Soil properties for analyzing cause of high radiocesium concentration in brown rice produced in 2011 in Fukushima prefecture

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2019-12-20 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 神山, 和則, 小原, 洋, 高田, 裕介, 齋藤, 隆, 佐藤, 睦人, 吉岡, 邦雄, 谷山, 一郎 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24514/00003012

[農環研報 34,
63－73（2015）]

2011年高濃度放射性セシウム汚染玄米発生の土壌要因

Soil properties for analyzing cause of high radiocesium concentration in brown rice produced in 2011 in Fukushima prefecture

神山和則*・小原　洋*・高田裕介*・齋藤　隆***
佐藤睦人***・吉岡邦雄***・谷山一郎**

（平成26年12月2日受理）

2011年3月11に発生した東京電力福島第一原子力発電所（福島第一原発）の事故に伴い、放射性物質が大気中に放出された。農地の汚染も広範囲で起こり、水稲栽培に関しては土壌中の放射性セシウム濃度が5,000Bq/kgを超える水田で作付けが制限された。しかしながら2011年産で玄米中の放射性セシウム濃度が暫定規制値（500Bq/kg）を超えるものが一部の水田で生産された。このためこれらの福島県、農水省は水田における要因解析を実施した。本論文ではこれらの要因解析に用いられた土壌特性のデータをとりまとめ、土壌特性からみた要因について考察を行った。

二本松市旧小浜町の5水田と暫定規制値を超過した放射性セシウムの玄米が検出された水田（22カ所）およびその周辺水田（9カ所）の31地点（要因解析調査地点）の合計36地点で作土の土壌試料を採取し分析に供した。作土の放射性セシウム濃度は2,320～11,700Bq/kg、玄米中の放射性セシウム濃度はND～1,240Bq/kgで、移行係数は0.02～0.34の範囲であった。

小浜町の玄米の放射性セシウム濃度と交換性カリ含量はそれぞれ92～453Bq/kg、1.8～10.1mg/100gの範囲であった。また、要因解析調査地点における交換性カリ含量の平均値は9.7mg/100gで2.5～32.3mg/100gの範囲であった。特に規制値を超えた地点においては交換性カリの平均値は6.8mg/100gと低く、10mg/100gを超えた地点は3地点にすぎない。以上のように、土壌の交換性カリ含量が重要な要因の一つであることが明らかになった。一方で、玄米の放射性セシウム濃度と土壌特性との関係性を明確に特徴づけることはできなかった。また、土壌特性以外の要因、栽培管理・用水・周辺環境などの影響もあると思われるため、要因解明には多くの課題が残されている。

* 農業環境インベントリーセンター
** 元研究コーディネータ
*** 福島県農業総合センター

Ⅰ　はじめに

2011年3月11日に発生した東京電力福島第一原子力発電所（福島第一原発）の事故に伴い、放射性物質が大気中に放出された。農地の汚染も広範囲に及んだことから安全な農産物の生産に対する対策が検討された。その経緯は以下のとおりである。

水稲栽培に関しては原子力災害対策本部が2011年4月8日に「稲の作付けに関する考え方」（原子力災害対策本部 2011）を示し、水田の土壌から玄米への移行係数を0.1とし、玄米の放射性セシウム濃度（^{134}Csと^{137}Csの合計値、以後「放射性セシウム」を「放射性Cs」と記す）が暫定規制値（500 Bq/kg）以下となる土壌中の放射性Cs濃度の上限値を5000 Bq/kgとした。2011年3月下旬から4月上旬にかけて行われた土壌中の放射性Cs濃度の調査結果で規制区域（当時の警戒区域、計画的避難区域、緊急時避難準備区域）外は5000 Bq/kg未満であったため、規制区域外では水稲の作付けが認められた（農林水産省, 2011）。

同年8月以降に、安全な米の供給という観点から玄米の放射性Cs濃度の調査が収穫前の予備調査、収穫後の本調査の2段階で実施された。予備調査では二本松市旧小浜町の玄米で500 Bq/kgの放射性Csが検出された。さらに、本調査終了後、福島市旧小国村大波地区で暫定規制値を超える放射性Csが検出された。このため、米の放射性物質緊急調査（緊急調査）が実施され、23,247戸の農家を対象に生産した米の放射性Cs濃度が測定された。

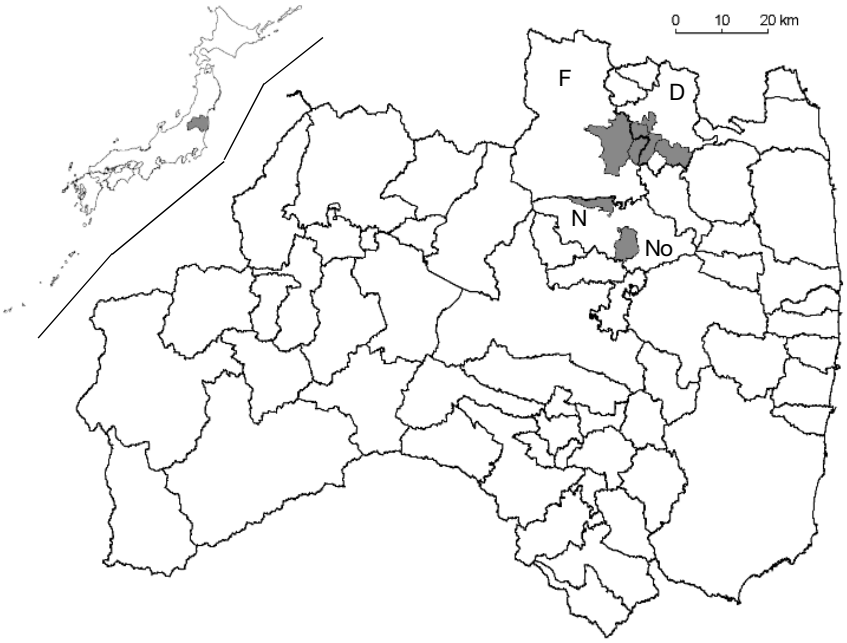
これらの結果を受け、二本松市旧小浜町および緊急調査により暫定規制値を超過した水田圃場についてその要因解析が行われた（福島県 2011, 福島県, 農林水産省 2011）。本報告ではこれらの要因解析に用いられた土壌特性のデータをとりまとめ、土壌特性からみた要因について考察を行った。

Ⅱ　方法

（1）　対象地域

1）　二本松市旧小浜町

調査対象とした水田圃場は二本松市旧小浜町に位置し（図1）、2011年の予備調査において玄米から500 Bq/kgの放射性Csが検出された圃場を含む5圃場である。これらの圃場は周囲を花崗岩質の丘陵に囲まれた狭隘な谷底平野の最上流部で、用水は沢水などの天水を利用している。5圃場（①～⑤）は上流から順に連続し、①から③は同じ沢水を利用しているが、④、⑤は別の沢水も利用している。



F:福島市、 D: 伊達市、N：二本松市、No：二本松市旧小浜町

調査地点がある旧市町村

図1　対象地域

2）要因解析調査地点

緊急調査において38戸の農家で玄米の放射性Cs濃度が暫定規制値を超過していた。これらの農家の水田のうち、暫定規制値を超過した放射性Csの玄米が検出された水田（22カ所）およびその周辺水田（9カ所）の31地点を要因解析のための調査対象とした（以後、要因解析調査地点という）。前者は福島市（旧福島市3地点、旧小国村13地点）、伊達市（旧月舘町1地点、旧小国村2地点、旧桂沢村1地点、旧富成村1地点）、二本松市（旧渋川村1地点）、後者は福島市（旧小国村9地点）に位置する（図1）。

（2）　試料の採取

1）　二本松市旧小浜町

土壌及び稲を2011年10月2日に、隣接する5つの圃場（①～⑤）において水口から水尻にかけてそれぞれ5カ所（②については水口が3カ所あるため6カ所）で採取した。土壌はそれぞれの地点で深さごとに（0-5、5-10、10-15 cm）分けて分析に供した。なお、分析値は各圃場の5または6カ所における平均値で示した。また、稲は玄米、ワラ、籾殻の3つの部位に分けて試料を調製し、分析に供した。

2）要因解析調査地点

要因解析調査地点31圃場においてそれぞれ5カ所で土壌採取器を用いて作土（表層15 cm）の土壌を採取し、これらを混合し試料とした。これとは別に福島市旧小国村の3圃場では作土（0-15 cm）に加えて、深さ別（0-5、5-10、10-15 cm）に試料を採取した。一方、稲については調査時に収穫が終了していたため、圃場における試料採取はできなかった。このため、それぞれの地点における玄米の放射性Cs濃度は相当すると考えられる袋の玄米の放射性Cs濃度とした。

（3）　分析方法

土壌試料については、放射性セシウム濃度、交換性放射性Cs濃度（要因解析調査地点のみ）、一般理化学性、粘土鉱物組成の分析を行った。

1）　放射性Cs濃度（土壌、稲）

土壌中の放射性Cs濃度は「緊急時における食品の放射能測定マニュアル」（厚生労働省, 2002）に従い、ゲルマニウム半導体検出器を用いて測定した。測定時間は1,000～10,000秒とした。土壌の放射性Cs濃度は^{134}Csと^{137}Csの合計値を乾土1 kgあたりのBq（Bq/kg）で示した。

交換性放射性Cs濃度は1M酢酸アンモニウム溶液（pH7.0）を用いて抽出し（固液比1:10で1時間振とう）、測定した。交換性放射性Cs濃度は^{134}Csと^{137}Csの合計値を乾土1 kgあたりのBq（Bq/kg）で示した。

稲は3つの部位別に測定した。各部位の放射性濃度は水分15％換算の濃度（Bq/kg）で示した。

2）　土壌の理化学性

土壌を風乾後2 mmの篩で篩別し、交換性陽イオン（バッチ法）、塩基交換容量（CEC）、全炭素含量（二本松市旧小浜町を除く）、pH、粒径組成を常法（土壌環境分析法編集委員会編, 1997）により測定した。交換性陽イオンは酸化物ベースのmg/100 gで，全炭素含量は腐植含量に換算し重量％で示した。

3）　粘土鉱物

二本松市旧小浜町については5圃場すべてで分析を行った。要因解析調査地点については採取地点や地質等を考慮し福島市旧小国村2地点、福島市旧福島市2地点、伊達市旧月舘町、伊達市旧小国村、伊達市旧桂沢村、伊達市旧富成村それぞれ1地点、二本松市旧渋川村1地点の分析を行った。

有機物分解、DCB脱鉄処理を行った土壌試料から沈降法により粘土画分を採取し、カリウム（K）およびマグネシウム（Mg）飽和処理を行い、X線回折用試料を作成した。粘土鉱物種は、常温のKおよびMg粘土、Mg粘土のグリセロール処理、2段階の加熱処理（約350℃、550℃）後のX線回折ピークのパターンおよび相対的強度に基づいて、－、±、＋、＋＋、＋＋＋の5段階で評価した。

4）　重回帰分析

要因解析調査地点31圃場のデータから玄米の放射性Cs濃度と関係があると考えられる項目を選択し重回帰分析を行った。重回帰分析にはMicrosoft Excelの分析ツールを用いた。

Ⅲ　結　果

（1）　二本松市旧小浜町

1）　土壌、稲の放射性Cs濃度

表1に作土および稲の部位別の放射性Cs濃度と移行係数を示した。作土の放射性Cs濃度は3,030～4,190 Bq/kgで、いずれの圃場も「稲の作付けに関する考え方」（原子力災害対策本部 2011）で示された作付けが制限される値（5,000 Bq/kg）未満であった。圃場別には上流の3圃場（①～③）は下流の2圃場（④、⑤）に比べやや低かった。深さ別には（表2）、最表層（0-5 cm）で濃度は最も高く、圃場②を除き5,000 Bq/kgを超えていた。濃度は

深さとともに減少していたが、10-15 cmにおいても1,350～2,430 Bq/kgあり耕耘等により土壌が混和されていたと考えられる。

一方、稲の部位別濃度は玄米が92～453 Bq/kg、ワラが236～1,260 Bq/kg、籾殻が136～605 Bq/kgの範囲でワラ＞籾殻＞玄米の順であった（表1）。圃場別には土壌とは逆に、上流の3圃場で下流の2圃場より高かった。玄米とワラの濃度比（玄米／ワラ）は0.36～0.42とほぼ同じ値であった。

移行係数は0.02～0.15の範囲で、圃場②において「稲の作付けに関する考え方」で示された0.1を超えた。圃場①、③においても0.09、0.06と高い値を示した。一方、圃場④、⑤は0.02、0.03と低かった。

2）　土壌の一般理化学性

深さ別CEC、交換性カリ含量はそれぞれ9.3～14.7 $cmol_c$/kg、1.8～10.1 mgK_2O/100gと低く、特に交換性カリ含量が低いことが特徴的であった（表2）。最表層（0-5 cm）の土性はSLまたはSCLであった（表3）。圃場別には①、④、⑤は粒径がやや細かく粘土含量が15％を超えていた。これらの圃場は、花崗岩質の丘陵に囲まれた狭隘な谷底平野の最上流部に位置することから、周辺の丘陵から砂質な土壌粒子の供給を受けている可能性がある。

3）　粘土鉱物組成

粘土鉱物組成はほぼ同じであった（表4）。この地区は花崗岩および花崗閃緑岩地帯に位置し、カオリナイトが優勢で雲母鉱物、バーミキュライト－クロライト中間種鉱物がこれに続く。

表1　二本松市旧小浜町における作土（0～15cm）および作物中の放射性Cs濃度

圃場番号	放射性Cs濃度（Bq/kg）				移行係数*
	土壌	作物			
		玄米	ワラ	籾殻	
①	3,580	322	889	491	0.09
②	3,030	453	1,260	605	0.15
③	3,460	208	495	287	0.06
④	4,190	92	236	136	0.02
⑤	3,910	116	325	185	0.03

移行係数*＝玄米の放射性Cs濃度／土壌の放射性Cs濃度

表2　二本松市旧小浜町における土壌の理化学性

圃場番号	深さ cm	pH	CEC $cmol_c$/kg	交換性カリ含量 mgK_2O/100g	放射性Cs濃度 Bq/kg
①	0-5	5.4	12.5	3.3	6,050
	5-10	5.4	11.1	2.1	3,140
	10-15	5.5	11.0	2.1	1,560
②	0-5	5.5	9.4	3.1	4,860
	5-10	5.4	9.4	1.8	2,860
	10-15	5.5	9.3	2.2	1,350
③	0-5	5.4	12.0	3.9	5,450
	5-10	5.4	11.6	2.6	3,100
	10-15	5.3	11.3	2.6	1,850
④	0-5	5.4	13.5	6.4	6,750
	5-10	5.4	13.0	4.6	3,400
	10-15	5.4	12.6	5.4	2,430
⑤	0-5	5.5	14.7	10.1	6,490
	5-10	5.6	13.9	6.6	3,690
	10-15	5.6	13.7	9.0	2,090

数値は採取箇所数（5または6カ所）の平均値

表3　二本松市旧小浜町における粒径組成（0-5 cm）

圃場番号	粗砂（%）	細砂（%）	シルト（%）	粘土（%）	シルト＋粘土（%）	土性
①	43.3	26.5	15.2	15.1	30.3	SCL
②	48.5	26.4	12.3	12.7	25.0	SL
③	44.1	27.0	14.4	14.4	28.8	SL
④	30.5	30.9	19.3	19.3	38.6	SCL
⑤	41.9	23.7	15.8	18.6	34.4	SCL

表4　二本松市旧小浜町における粘土鉱物組成（0-5 cm）

圃場番号	Sm	Vt	Ch	Vt－Ch	It	Kt
①	－	＋＋	＋	＋＋	＋＋＋	＋＋＋
②	－	＋	±	＋＋＋	＋＋＋	＋＋＋
③	－	＋	＋	＋＋＋	＋＋＋	＋＋＋
④	－	＋＋	±	＋＋	＋＋＋	＋＋＋＋
⑤	－	＋	±	＋＋	＋＋	＋＋＋＋

Sm：スメクタイト、Vt：バーミキュライト、Ch：クロライト、
Vt－Ch：バーミキュライトークロライト中間種鉱物、
It：雲母鉱物、Kt：カオリナイト

(2)　要因解析調査地点

1）土壌の放射性Cs濃度

表5に作土の放射性Cs濃度を示した。作土の放射性Cs濃度の平均値は6,090 Bq/kg、範囲は2,320～11,700 Bq/kgであった。作付けが制限される値（5,000 Bq/kg）を超える地点が31地点中23地点あった。ただし、玄米の放射性Cs濃度が規制値を超えなかった調査地点（表5のNo23～31）における作土の放射性Cs濃度の平均値は5,350 Bq/kg、範囲は3,840～7,170 Bq/kgであったので、土壌の高い放射性Cs濃度が玄米の放射性Cs濃度が規制値を超えた主要因とはいえない。

福島市旧小国村で採取した深さ別の放射性Cs濃度はいずれの地点においても最表層（0-5 cm）で濃度は最も高く、2地点（A、B）で10,000 Bq/kgを超えていた（図2）。濃度は深さとともに低下していた。A、B地点では、10-15 cmの濃度が38 Bq/kg、32 Bq/kg（^{134}Csは検出下限値未満）となり、耕耘などによる混和が主に0-10 cmの深さまでであったと思われる。なお、どの地点においても作土（0-15 cm）の濃度と深さ別の濃度の平均値はほぼ一致した。

比較的作物に吸収されやすい形態である交換性放射性濃度の平均値は570 Bq/kg、81～1,900 Bq/kgの範囲であった（表5）。土壌の放射性濃度に対する割合（抽出率）は1.4～19.6%の範囲であった。抽出率は福島市旧小国村で高い傾向にあること以外に、地域的な特徴は判然としない。

2）土壌の一般理化学性

表6に土壌の一般理化学性を示した。腐植含量は伊達市旧月舘町の試料が突出して高く（7.9%）、これを除くと2.4～4.7%であった。CECおよび交換性カリ含量はそ

表5　要因解析調査地点における放射性Cs濃度

No	採取地		玄米*	代表値*	土壌	土壌の交換性	交換性／土壌	移行係数
	市町村	旧市町村	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	%	
1	福島市	旧小国村	970～1,060	1,020	4,100	515	12.5	0.25
2	福島市	旧小国村	1,030～1,270	1,120	5,820	523	9.0	0.19
3	福島市	旧小国村	700～710	705	8,250	1,140	13.8	0.09
4	福島市	旧小国村	550～750	436	5,380	973	18.1	0.08
5	福島市	旧小国村	550～980	765	7,830	1,420	18.1	0.10
6	福島市	旧小国村	710～820	755	9,670	1,900	19.6	0.08
7	福島市	旧小国村	460～1,110	780	6,720	1,130	16.7	0.12
8	福島市	旧小国村	580～1,100	840	3,680	537	14.6	0.23
9	福島市	旧小国村	970～1,270	1,120	5,120	548	10.7	0.22
10	福島市	旧小国村	590～670	630	6,250	–	–	0.10
11	福島市	旧小国村	530	530	4,270	164	3.8	0.12
12	福島市	旧小国村	710～1,170	940	5,090	601	11.8	0.18
13	福島市	旧小国村	760	760	3,850	653	17.0	0.20
14	福島市	旧福島市	590	590	6,930	412	5.9	0.09
15	福島市	旧福島市	550	550	6,890	317	4.6	0.08
16	福島市	旧福島市	510	510	7,130	247	3.5	0.07
17	伊達市	旧月舘町	1,050	1,050	11,700	1,020	8.7	0.09
18	伊達市	旧小国村	580	580	6,460	92	1.4	0.09
19	伊達市	旧小国村	780	780	8,970	123	1.4	0.09
20	伊達市	旧桂沢村	580	580	7,030	220	3.1	0.08
21	伊達市	旧富成村	1,240	1,240	7,310	252	3.5	0.17
22	二本松市	旧渋川村	750～850	800	2,320	81	3.5	0.34
23	福島市	旧小国村	ND～240	130	7,170	1,060	14.8	0.02
24	福島市	旧小国村	143～220	130	3,840	143	3.7	0.03
25	福島市	旧小国村	143～220	130	5,890	–	–	0.02
26	福島市	旧小国村	35～85	62	6,320	916	14.5	0.01
27	福島市	旧小国村	ND～46	33	5,240	290	5.5	0.01
28	福島市	旧小国村	ND～48	34	5,100	841	16.5	0.01
29	福島市	旧小国村	ND～25	23	4,170	425	10.2	0.01
30	福島市	旧小国村	ND	20	4,870	455	9.3	0.00
31	福島市	旧小国村	ND～36	28	5,540	347	6.3	0.01

* 玄米濃度と代表値：要因解析調査の対象圃場は収穫・袋詰めが終了していたため、放射性セシウム濃度の測定には対象圃場で収穫された可能性のある袋（場合により複数）から試料を採取した。このため、玄米の放射性セシウム濃度を範囲で示し、各種解析には代表値（一つの袋の場合は分析した値、複数の袋の場合は平均値）を用いた。

－：分析値なし

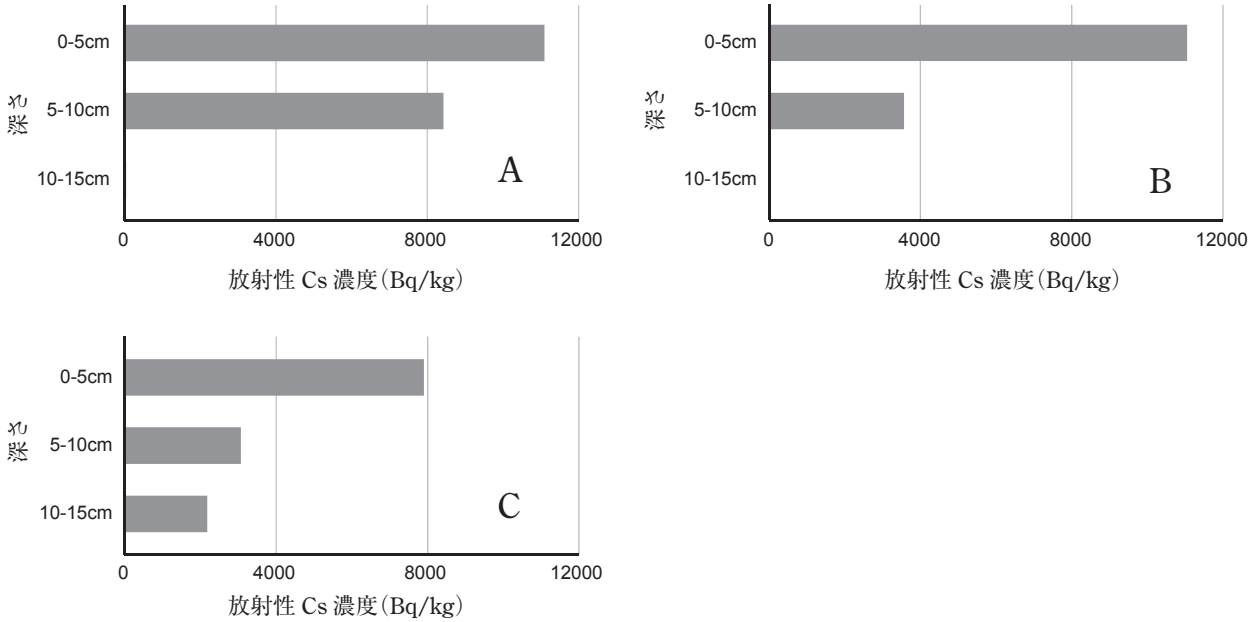


図2　深さ別の放射性Cs濃度（福島市旧小国村）

表6　要因解析調査地点における土壌の理化学性

No	採取地		pH	腐植	CEC	交換性陽イオン含量		
	市町村	旧市町村		%	$cmol_c$/kg	K2O mg/100g	CaO mg/100g	MgO mg/100g
1	福島市	旧小国村	6.3	4.2	43.6	14.7	697	294
2	福島市	旧小国村	6.1	4.5	41.6	11.6	647	276
3	福島市	旧小国村	5.8	4.3	34.7	5.1	618	128
4	福島市	旧小国村	6.1	4.0	40.7	7.6	689	216
5	福島市	旧小国村	5.3	3.4	31.3	5.3	489	86
6	福島市	旧小国村	5.0	3.4	32.3	6.1	443	89
7	福島市	旧小国村	5.6	3.1	37.7	5.7	629	136
8	福島市	旧小国村	6.6	3.8	38.9	5.1	649	273
9	福島市	旧小国村	6.5	3.3	32.1	6.8	573	192
10	福島市	旧小国村	5.8	4.7	32.8	6.0	453	157
11	福島市	旧小国村	6.5	2.5	38.6	8.2	456	311
12	福島市	旧小国村	5.3	3.7	24.3	5.6	163	50
13	福島市	旧小国村	5.1	2.7	20.3	6.4	98	43
14	福島市	旧福島市	5.2	3.0	31.7	6.6	390	86
15	福島市	旧福島市	5.9	2.8	30.1	7.0	422	102
16	福島市	旧福島市	5.4	2.5	32.9	5.6	439	124
17	伊達市	旧月舘町	5.6	7.9	15.2	2.5	122	17
18	伊達市	旧小国村	5.7	4.3	34.2	8.1	546	139
19	伊達市	旧小国村	5.4	2.6	9.3	3.5	101	21
20	伊達市	旧桂沢村	6.2	4.1	55.5	10.1	967	321
21	伊達市	旧富成村	5.4	4.6	34.8	7.6	765	106
22	二本松市	旧渋川村	5.2	2.4	16.3	4.0	133	34
23	福島市	旧小国村	6.4	3.1	36.9	18.5	555	232
24	福島市	旧小国村	6.0	3.8	39.4	10.3	589	236
25	福島市	旧小国村	6.0	4.1	43.6	13.1	676	273
26	福島市	旧小国村	6.3	3.8	42.3	11.7	674	292
27	福島市	旧小国村	6.8	3.5	40.5	17.2	761	247
28	福島市	旧小国村	6.0	3.2	33.0	14.7	551	174
29	福島市	旧小国村	6.4	3.0	37.1	23.0	659	207
30	福島市	旧小国村	6.5	3.0	37.4	32.3	616	229
31	福島市	旧小国村	6.6	2.4	33.0	10.6	560	200

れぞれ平均値が33.8 $cmol_c$/kgと 9.7 mgK_2O/100g、9.3～55.5 $cmol_c$/kgと2.5～32.3 mgK_2O/100gの範囲であった。玄米の放射性Cs濃度が規制値を超えた22地点においては交換性カリの平均値は6.8 mgK_2O/100gと低く、10 mgK_2O/100gを超えた地点は3地点にすぎない。

粒径組成（表7）をみると、粘土含量が高く土性がLiC、SiC、HCといった細粒質の土壌がほとんどであった（分析値のある29地点中26地点）。一方、伊達市旧月舘町の試料は粘土含量が9.0％と低く土性はSLであった。

3） 粘土鉱物組成

表8に粘土鉱物組成を示した。福島市旧小国村、福島市旧福島市2地点、伊達市旧桂沢村、伊達市旧富成村の試料はスメクタイトが優勢な粘土鉱物で、カオリナイトも認められた。イライト（雲母鉱物）は認められなかった。一方、伊達市旧月舘町と伊達市旧小国村の試料はカオリナイトが優勢で、バーミキュライト－クロライト中間種鉱物も認められた。イライト（雲母鉱物）はピークが小さく痕跡程度と考えられた。二本松市旧渋川村の試料はカオリナイトが優勢で、バーミキュライトも認められた。

表層地質との関係を見ると、スメクタイトが優勢な地点は凝灰岩・凝灰角礫岩地域（凝灰岩、凝灰角礫岩、安山岩質岩石（集塊岩）が分布）に位置していた（福島県，1988）。一方、カオリナイトとバーミキュライト－クロライト中間鉱物が優勢な地点は花崗岩及び花崗閃緑岩地帯に位置していた。二本松市旧渋川村は沖積地に位置し、上流地質（花崗岩及び花崗閃緑岩地帯）の影響を受けていると思われる。

表7　要因解析調査地点における土壌の粒径組成

No	採取地		粗砂	細砂	シルト	粘土	シルト＋粘土	土性
	市町村	旧市町村	%	%	%	%	%	
1	福島市	旧小国村	6.1	18.0	34.4	41.6	75.9	LiC
2	福島市	旧小国村	7.8	12.8	32.2	47.2	79.3	HC
3	福島市	旧小国村	10.9	19.5	41.5	28.0	69.5	LiC
4	福島市	旧小国村	9.4	22.3	40.4	27.9	68.2	LiC
5	福島市	旧小国村	16.2	18.3	36.8	28.7	65.5	LiC
6	福島市	旧小国村	13.3	11.2	45.6	29.8	75.5	SiC
7	福島市	旧小国村	10.1	18.4	36.6	34.9	71.5	LiC
8	福島市	旧小国村	8.7	16.7	31.9	42.7	74.6	LiC
9	福島市	旧小国村	21.0	25.8	24.7	28.5	53.2	LiC
10	福島市	旧小国村	－	－	－	－	－	－
11	福島市	旧小国村	22.1	17.4	30.4	30.0	60.5	LiC
12	福島市	旧小国村	32.4	13.2	25.6	28.8	54.5	LiC
13	福島市	旧小国村	34.2	12.2	26.9	26.7	53.6	LiC
14	福島市	旧福島市	15.5	17.9	39.3	27.3	66.6	LiC
15	福島市	旧福島市	16.1	16.5	37.9	29.5	67.4	LiC
16	福島市	旧福島市	13.6	11.5	42.2	32.7	74.9	LiC
17	伊達市	旧月舘町	57.6	22.4	10.9	9.0	19.9	SL
18	伊達市	旧小国村	6.1	18.3	37.7	37.8	75.5	LiC
19	伊達市	旧小国村	45.1	23.6	16.0	15.4	31.4	CL
20	伊達市	旧桂沢村	4.7	13.7	35.6	46.1	81.7	HC
21	伊達市	旧富成村	20.4	14.9	37.5	27.2	64.7	LiC
22	二本松市	旧渋川村	31.0	21.6	23.0	24.4	47.4	CL
23	福島市	旧小国村	6.8	15.1	33.4	44.6	78.1	LiC
24	福島市	旧小国村	7.1	13.5	29.9	49.5	79.4	HC
25	福島市	旧小国村	8.2	15.9	31.6	44.3	75.9	LiC
26	福島市	旧小国村	8.2	14.4	41.0	36.4	77.4	LiC
27	福島市	旧小国村	16.6	15.6	30.3	37.5	67.9	LiC
28	福島市	旧小国村	18.2	28.9	12.8	40.1	52.9	LiC
29	福島市	旧小国村	11.7	23.5	30.0	34.8	64.8	LiC
30	福島市	旧小国村	20.3	20.1	30.5	29.1	59.7	LiC
31	福島市	旧小国村	11.9	18.4	32.7	37.1	69.8	LiC

－：分析値なし

表8　要因解析調査地点における土壌の粘土鉱物組成と地質区分

No	採取地		Sm	Vt	Vt-Ch	It	Kt	地質区分*
	市町村	旧市町村						
1	福島市	旧小国村	×	×	×	×	×	1
2	福島市	旧小国村	×	×	×	×	×	1
3	福島市	旧小国村	×	×	×	×	×	1
4	福島市	旧小国村	×	×	×	×	×	1
5	福島市	旧小国村	×	×	×	×	×	1
6	福島市	旧小国村	×	×	×	×	×	1
7	福島市	旧小国村	×	×	×	×	×	1
8	福島市	旧小国村	×	×	×	×	×	1
9	福島市	旧小国村	×	×	×	×	×	1
10	福島市	旧小国村	×	×	×	×	×	1
11	福島市	旧小国村	×	×	×	×	×	1
12	福島市	旧小国村	×	×	×	×	×	1
13	福島市	旧小国村	×	×	×	×	×	1
14	福島市	旧福島市	＋＋＋	−	−	−	＋＋	1
15	福島市	旧福島市	×	×	×	×	×	1
16	福島市	旧福島市	＋＋＋	−	−	−	＋＋	1
17	伊達市	旧月舘町	−	−	＋＋	+-	＋＋	2
18	伊達市	旧小国村	×	×	×	×	×	2
19	伊達市	旧小国村	−	−	＋＋	+-	＋＋＋	2
20	伊達市	旧桂沢村	＋＋＋	−	−	−	＋	1
21	伊達市	旧富成村	＋＋＋	−	−	−	＋	1
22	二本松市	旧渋川村	−	＋＋	+-	+-	＋＋＋	3
23	福島市	旧小国村	×	×	×	×	×	1
24	福島市	旧小国村	×	×	×	×	×	1
25	福島市	旧小国村	×	×	×	×	×	1
26	福島市	旧小国村	×	×	×	×	×	1
27	福島市	旧小国村	＋＋＋	−	−	−	＋	1
28	福島市	旧小国村	×	×	×	×	×	1
29	福島市	旧小国村	×	×	×	×	×	1
30	福島市	旧小国村	×	×	×	×	×	1
31	福島市	旧小国村	×	×	×	×	×	1

Sm：スメクタイト、Vt：バーミキュライト、Vt－Ch：バーミキュライトークロライト中間種鉱物、It：雲母鉱物、Kt：カオリナイト
* 地質区分：１；凝灰岩・凝灰角礫岩地域、２；花崗岩および花崗閃緑岩地帯、３；沖積地
×：未分析

Ⅳ　考察

（1）　二本松市旧小浜町において玄米の放射性Cs濃度が高かった土壌要因

圃場①～③は圃場④、⑤に比べ土壌の放射性Cs濃度が低い一方、玄米の放射性Cs濃度は高い関係にあった（表1）。一方、シルト＋粘土割合と土壌の放射性Cs濃度あるいは玄米の放射性Cs濃度の関係をみると、シルト＋粘土割合が大きい圃場④、⑤で土壌の放射性Cs濃度が高く、玄米の放射性Cs濃度が低かった（表3）。また、作物へ吸収されやすい形態である交換性放射性Cs濃度は圃場①～③で高かった（表1）。以上のことから、本地区ではより砂質な圃場①～③において放射性Csの固定が少なく稲に吸収されやすい状態にあったと考えられる。

図3に交換性カリ含量と移行係数の関係を示した。交換性カリ含量が高いと移行係数が小さくなることが報告されている（Tsukada et al., 2002）が、本地域においても同様の関係がみられた。このように交換性カリ含量が低いことが玄米の放射性Cs濃度が高くなった原因の一つと考えられる。

既往の研究において交換性カリ濃度が25 mgK_2O/100g程度になると玄米中の放射性Cs濃度の低減に有効とされている（農業・食品産業技術総合研究機構　2012）が、旧小浜町では交換性カリ含量が4 mgK_2O/100g未満で移行係数が急激に増加している。この違いについては、土性などの要因も考えられるが、詳細な検討が必要である。

(2)　要因解析調査地点において玄米の放射性Cs濃度が高かった土壌要因

対象地域は土壌の放射性Cs濃度も高いことから、このことが玄米の放射性Cs濃度が高かった一つの要因と考えられるが、土壌と玄米の放射性Cs濃度との間に明確な関係は認められなかった（r＝0.238）（図4）。同様に交換性放射性Cs濃度と玄米の放射性Cs濃度との間にも明確な関係は認められなかった（r＝0.081）。

玄米の放射性Cs濃度と交換性カリ含量との間にある程度の関係が見られた（$Y=14840x^{-1.79}$；$R^2=0.574$）（図5）。交換性カリ含量10 mgK_2O/100g未満の地点では玄米の放射性Cs濃度は400 Bq/kg以上であり、そのほとんどが暫定規制値を超過していた。3地点（表5のNo. 9、17、21）では玄米の放射性Cs濃度は1,000 Bq/kgを超えており、移行係数も0.09～0.22と高い値を示した。一方、交換性カリ含量10 mg/100g以上の地点では3地点を除き玄米の放射性Cs濃度は130 Bq/kg以下であった。なお、玄米の放射性Cs濃度を測定した試料はその圃場で収穫された玄米ではない可能性がある。交換性カリ含量が高いにもかかわらず玄米の放射性Cs濃度が高い、あるいは移行係数が高い3地点（表5のNo. 1、2、20）については、要因の解析が必要である。

図6に地質区分別にみた交換性カリ含量と移行係数の関係を示した。調査地点の大部分はスメクタイトが優勢な地質区分1であった。バーミキュライト－クロライト中間種鉱物が優勢な地質区分2は3地点のみであるが、

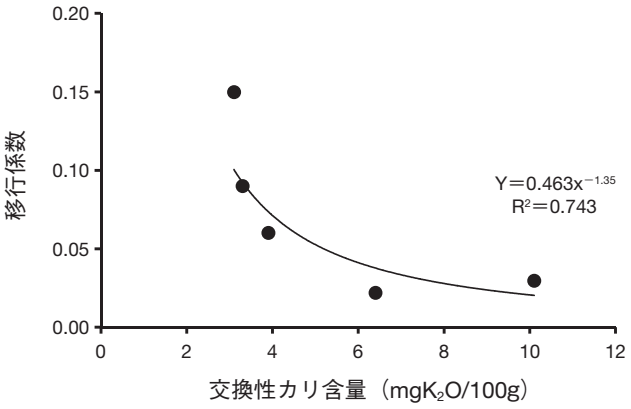


図3　交換性カリ含量と移行係数との関係
（二本松市旧小浜町）

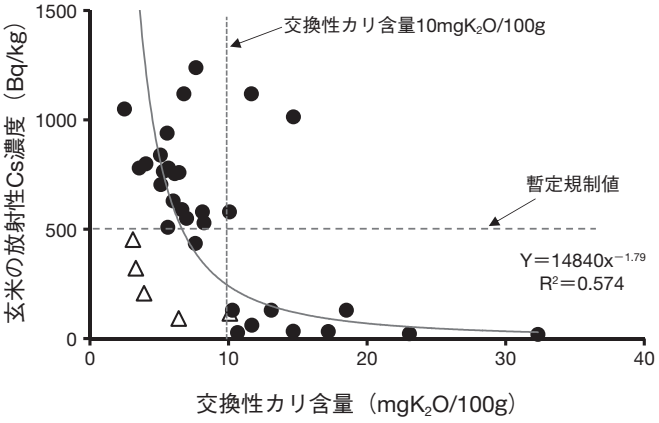


図5　交換性カリ含量と玄米の放射性Cs濃度との関係
（要因解析調査地点）
（二本松市旧小浜町のデータを△で示した。）

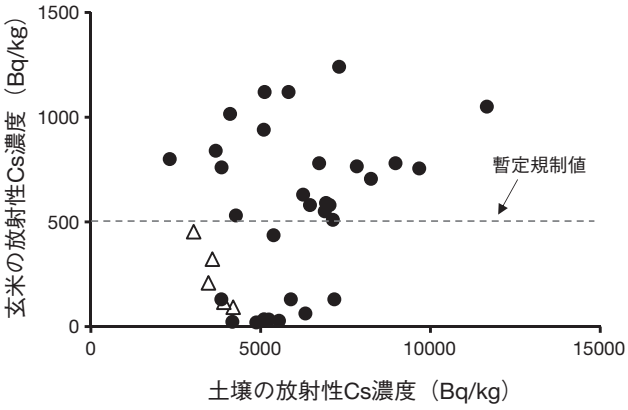
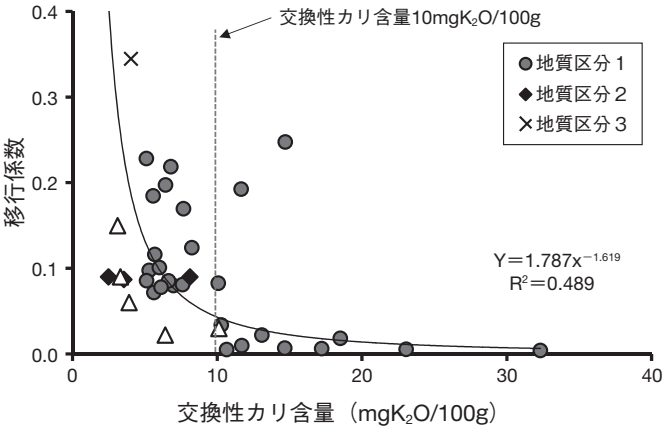


図4　土壌と玄米の放射性Cs濃度との関係
（要因解析調査地点）
（△は二本松市旧小浜町のデータ）



地質区分：１；凝灰岩・凝灰角礫岩地域、
２；花崗岩および花崗閃緑岩地帯、３；沖積地

図6　地質区分別にみた交換性カリ含量と移行係数との関係（要因解析調査地点）
（二本松市旧小浜町のデータを△で示した。旧小浜町は地質区分2に区分される。）

移行係数はいずれも0.1程度であった。一方、二本松市旧渋川村の試料は、カオリナイト、バーミキュライトが優勢な地質区分3であるが、他の地点に比べ移行係数が著しく高い。これら地質区分2および3のグループは試料数が少ないので、試料数を増やすことで関係性がより明確になる可能性がある。

土壌の理化学性から玄米の放射性Cs濃度（RiceCs）を推定するために重回帰分析を実施した。その結果、土壌の放射性Cs濃度は有意な説明変数ではなく、交換性カリ含量（ExK2O）と交換性放射性Cs濃度（ExCs）が説明変数となった。特にこれらの変数の対数値を用いることで高い寄与率（R2＝0.563）を得た（図7）。ただし、標準化偏回帰係数を見るとLog（ExK2O）の係数に比べLog（ExCs）の係数が著しく小さく（表9）、交換性放射性Cs濃度の影響は小さいと考えられた。

Ⅴ　おわりに

2011年産玄米の放射性Cs濃度が暫定規制値を超えた水田における土壌の理化学性を調査した結果、土壌の交換性カリ含量が重要な要因の一つであることが明らかになった。一方で、玄米の放射性Cs濃度と土壌特性との関係性を明確に特徴づけることはできなかった。また、土壌特性以外の要因、栽培管理・用水・周辺環境などの影響もあると思われるため、要因解明には多くの課題が残されている。2012年には玄米を含む一般食品の規制値が100 Bq/kgに設定されたことから、放射性濃度のより低い玄米の生産が求められている。今後も調査を行い、より体系的に要因を検討することが必要である。

Ⅵ　引用文献

1）土壌環境分析法編集委員会編（1997）：土壌環境分析法．日本土壌肥料学会監修．427pp 博友社，東京

2）福島県（1988）：土地分類基本調査　保原，47pp

3）福島県（2011）：二本松市旧小浜町の水田における調査結果（中間報告），http://www.pref.fukushima.jp/keieishien/kenkyuukaihatu/gijyutsufukyuu/05gensiryoku/231017_obama.pdf（accessed 2013-10-21）

4）福島県，農林水産省（2011）：暫定規制値を超過した放射性セシウムを含む米が生産された要因の解析（中間報告），http://www.pref.fukushima.jp/keieishien/kenkyuukaihatu/gijyutsufukyuu/05gensiryoku/240112_tyukan.pdf（accessed 2013-10-21）

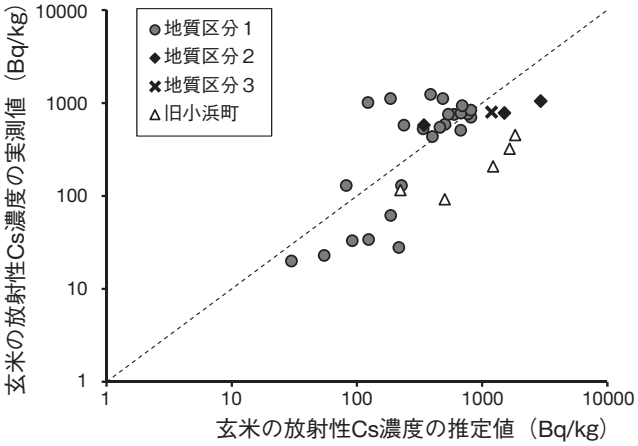
5）原子力災害対策本部（2011）：稲の作付に関する考え方. http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/ine_sakutuke.html（accessed 2013-10-21）

6）厚生労働省（2002）：緊急時における食品の放射能測定マニュアル，1-39

7）農業・食品産業技術総合研究機構（2012）：プレスリリース　玄米の放射性セシウム低減のためのカリ施　用，http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/press/laboratory/narc/027913.html（accessed 2013-10-21）

8）農林水産省（2011）：東日本大震災について～東京電力福島第一原子力発電所の事故に伴う稲の作付制限地域の設定について．http://www.maff.go.jp/j/press/seisan/sien/110422.html（accessed 2013-10-21）

9）Tsukada, H., H. Hasegawa, S. Hisamatsu and S. Yamasaki（2002）：Transfer of 137Cs and stable Cs from paddy soil to polished rice in Aomori, Japan. J. Environ. Radioactiv., 59, 351-363



地質区分：１；凝灰岩・凝灰角礫岩地域、
２；花崗岩および花崗閃緑岩地帯、３；沖積地

図7　重回帰モデルによる玄米の放射性Cs濃度の推定値と実測値の関係（要因解析調査地点）
（二本松市旧小浜町のデータを△で示した。旧小浜町は地質区分2に区分される。）

表9　重回帰分析結果

変数	偏回帰係数		標準化偏回帰係数
（定数）	A1	4.125	
Log（ExK2O）	A2	−1.782	−0.751
Log（ExCs）	A3	0.015	0.009

Log（RiceCs）＝A1＋A2×Log（ExK2O）＋A3×Log（ExCs）
RiceCs：玄米の放射性Cs濃度、ExK2O：交換性カリ含量：ExCs：交換性放射性Cs濃度

Soil properties for analyzing cause of high radiocesium concentration in brown rice produced in 2011 in Fukushima prefecture

Kazunori KOHYAMA, Hiroshi OBARA, Yusuke TAKATA, Takashi SAITO, Mutsuto SATO, Kunio YOSHIOKA and Ichiro TANIYAMA

Summary

The radioactive contamination in farmland occurred by the accident of Tokyo Electric Power Company's Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant in March, 2011. Cultivation of paddy rice was restrained where radiocesium concentration (CsConc) of soil exceeded 5,000 Bq/kg. However, brown rice whose CsConc exceeded provisional regulation value for CsConc in brown rice (500 Bq/kg) was produced in several non-restrained paddy fields. In this paper, we compiled soil properties for analyzing cause of high CsConc in brown rice and deliberated on cause in terms of soil properties.

The 36 topsoil samples were collected from 5 paddy fields in Obama, Nihonmatsu city where CsConc in brown rice exceeded 500 Bq/kg were detected, and from 31 paddy fields in Fukushima, Date and Nihonmatsu city to examine factors for high CsConc in brown rice.

The CsConc of brown rice and ExK2O in topsoil in Obama (5 sites) ranged from 92 to 453 Bq/kg and from 1.8 to 10.1 mg/100g, respectively. The CsConc of topsoil and brown rice in the other sites (31 sites) was 6,090 Bq/kg in average and ranged from 2,320 to 11,700 Bq/kg and 570 Bq/kg in average and ranged from ND to 1,240 Bq/kg, respectively. As the average of CsConc in topsoil ranged from 3,840 to 7,170 in the sites that CsConc in brown rice showed less than provisional regulation value, the high CsConc in topsoil was not necessarily a cause of high CsConc in brown rice. ExK2O in topsoil was 9.7 mg/100g in average and ranged from 2.5 to 32.2 mg/100g. The average ExK2O in the sites that CsConc in brown rice exceeded provisional regulation value was as low as 6.8 mg/100g. In these cases, low ExK2O was one of the main causes of high CsConc in brown rice.