

第2節 有機物連用多湿黒ボク土水田での移行係数の経年変化

宮崎成生・関口(鈴木)未来¹⁾・出口美里²⁾・吉澤比英子³⁾

摘要 : 2011年~2014年に農試場内有機物連用多湿黒ボク土水田ほ場において、有機物の長期連用による土壌中交換性カリ含量と土壌から玄米への放射性セシウム移行との関係およびその経年変化を調査した。2011年は玄米への移行係数が比較的大きく、大気経由による直接汚染の影響が大きいと考えられた。2012年には移行係数が小さくなったが、以降経年による低下は緩やかになった。また、土壌中カリ含量が水稻の生育初期に低下すると、移行係数が大きくなる場合があった。堆肥や稲わらの長期連用により土壌中交換性カリ含量が高く維持され、化学肥料のみを施用している場合や堆肥施用を中止して数年経過した場合に比べ、玄米への移行係数は小さかった。

キーワード : 移行係数, 水稻, 土壌交換性カリウム, 放射性セシウム, 有機物連用

I 緒言

本節では、ほぼ同一の施肥管理を30年程度継続して水稻を栽培している多湿黒ボク土水田において、有機物の長期連用による土壌中交換性カリ含量と玄米中放射性セシウム濃度との関係およびその経年変化を明らかにする。

II 材料および試験方法

1. 試験区の概要

2011~2014年に栃木県農業試験場内有機物連用水田ほ場でおこなった。1984年よりほぼ同一の施肥管理を続けており、2014年は31年目にあたる。供試土壌は多湿黒ボク土であり、試験区は無窒素区、三要素区、堆肥連用区、稲わら連用区、堆肥残効・無肥料区および堆肥残効・三要素区の6区とした。また、試験区外の無肥料を「区外」とした。各試験区の処理内容を第1表に、試験区の土壌理化学性を第2表に、試験区の配置を第1図に、各施用有機物の成分含有率を第3表に示した。堆肥区はもみから牛ふん堆肥を窒素換算で90 kg ha⁻¹相当量(現物で8400 kg ha⁻¹程度)を代かき前に施用した。稲わら区は窒素換算で40 kg ha⁻¹相当量(現物で10000 kg ha⁻¹程度)の稲わらを秋耕時にすき込んだ。稲わら連用区を除き生産された稲わらは全て持ち出した。堆肥残効・無肥料区は2008年まで堆肥連用の後無肥料とした。堆肥残効・三要素区は2006年まで堆肥連用の後三要素のみ施用した。供試土壌は厚層多腐植質多湿黒ボク土、試験規模は1区40 m²(10m×4m)の2反復とした。2011年3月31日採取した試験区外土壌(前年秋に耕起した状態において表層3 cm程度を除いた作土部分)の放射性セシウム濃度は115 Bq kg⁻¹(¹³⁴Csが76 Bq kg⁻¹, ¹³⁷Csが48 Bq

kg⁻¹)であった。かんがい水は地下水で、K濃度は2.0 mg L⁻¹であった。

2. 栽培概要

供試品種はコシヒカリを用いた。は種は4月中旬に、代かきは4月下旬および5月上旬に2回、移植は5月中旬に行った。栽植密度は22.2株 m⁻²(30cm×15cm)で、1株4本植とした。基肥は2回目の代かき時に、また追肥は出穂15日前および穂揃期に第1表のとおり施用した。化学肥料は塩化アンモニウム、熔成リン肥および塩化カリを用いた。

3. 採取および測定方法

土壌の採取および測定は本章1節と同様におこなった。2013年および2014年は、移植時、移植1か月後(6月上旬)、最高分けつ期(6月下旬)、幼穂形成期(7月中旬)および出穂期(8月上旬)に調査株周辺から、収穫時に調査株元から土壌を採取し、交換性カリ含量を測定した。

作物体は、各処理区内から生育が中庸なものを出穂期には5株抜き取り茎葉部を、成熟期には80~120株を地面から7 cm程度の高さで刈り取り、出穂期の稲茎葉、玄米、わらの重量、放射性セシウム濃度およびカリ含量を測定した。玄米は1.8mm以上のものを供試した。

土壌、作物体の化学分析、放射性セシウム濃度の測定および減衰補正は、本章1節と同様におこなった。堆肥の化学分析は、堆肥等有機物分析法(日本土壌協会、2000)により実施した。

III 結果

1. 収穫時の土壌中放射性セシウム濃度について

収穫時の土壌の放射性セシウム濃度を第2図に示した。収穫時の土壌の放射性セシウム濃度は2011年に164 Bq

1) 現栃木県塩谷南那須農業振興事務所, 2) 現栃木県那須農業振興事務所, 3) 現栃木県河内農業振興事務所 (2017.12.25. 受理)

kg⁻¹であったが、2014年には100 Bq kg⁻¹となり4割程度減少した。

2. 土壌中交換性カリ含量について

収穫時の土壌の交換性カリ含量の推移を第4表に示した。収穫時の土壌の交換性カリ含量は、堆肥連用区および稲わら連用区が20 mg 100g⁻¹程度、無窒素区および堆肥残効・三要素区が10 mg 100g⁻¹程度、三要素区、堆肥残効・無肥料区が6~10 mg 100g⁻¹、区外が6 mg 100g⁻¹以下であった。

2013年および2014年の水稲栽培期間中の土壌中交換性カリ含量の推移を第3図に示した。水稲栽培期間中の土壌中の交換性カリ含量は、堆肥連用区および稲わら連用区が2013年は収穫時まで、2014年は最高分げつ期まで20 mg 100g⁻¹程度以上に維持されたが、最高分げつ期から落水時まで10 mg 100g⁻¹程度で推移した。堆肥残効・無肥料区、区外は試験期間を通じて10 mg 100g⁻¹以下であった。他の処理区は施肥直後に少し上昇するものの10 mg 100g⁻¹前後で推移した。2013年と比較して2014年は早い時期に交換性カリ含量が全ての処理区で低下し、その後も低く推移した。

3. 出穂期の水稲茎葉中放射性セシウム濃度について

2013年および2014年の出穂期の水稲茎葉中放射性セシウム濃度を第4図に示した。2013年、2014年ともに出穂期の水稲茎葉中放射性セシウム濃度は、三要素区12 Bq kg⁻¹に比べ、堆肥連用区、稲わら連用区および無窒素区が3~4 Bq kg⁻¹、堆肥残効区・三要素区が8~9 Bq kg⁻¹と低かった。堆肥連用区、稲わら連用区、堆肥残効区・三要素区の乾物重は、三要素区と同程度以上であった。

4. 成熟期の水稲中放射性セシウム濃度について

試験区の配置を第1図に、2011年の玄米およびわらの放射性セシウム濃度等を第5表に示した。2011年の玄米中放射性セシウム濃度は、東の区画が2.1~4.4 Bq kg⁻¹、西の区画が6.0~20.2 Bq kg⁻¹であった。玄米への移行係数は、東の区画が0.009~0.028、西の区画が0.029~0.134で、西側が東側に比べ10%水準で有意に高かった。区画内の比較では、堆肥連用区が他の区より低い傾向であった。わらの放射性セシウム濃度は11~29 Bq kg⁻¹でばらつきが大きく処理および区画の位置による傾向はみられなかった。

2012~2014年の玄米の放射性セシウム濃度を第5図にわらの放射性セシウム濃度を第6図に示した。2012年~2014年の玄米の放射性セシウム濃度は、区外を除き処理区ごとの年次変動は小さかった。稲わら連用区および堆肥連

用区が1.0 Bq kg⁻¹以下、無窒素区が1.0 Bq kg⁻¹程度、堆肥残効・三要素区が2.5 Bq kg⁻¹程度と三要素区3.5 Bq kg⁻¹に比べ低かった。堆肥残効・無肥料区が5.9 Bq kg⁻¹、区外5.7 Bq kg⁻¹であった。わらの放射性セシウム濃度も同様の傾向であり、値は玄米の3~5倍であった。

5. 水稲収量、放射性セシウム吸収量について

水稲収量を第7図に示した。2012~2014年の精玄米重は、三要素区を100とすると、稲わら連用区、堆肥連用区および堆肥残効・三要素区が110程度、無窒素区が80程度、堆肥残効・無施肥区が60程度、区外が50程度であった。ただし、2013年の堆肥連用区は不稔が多く減収した。

2013年および2014年の出穂期および成熟期の水稲の放射性セシウム吸収量を第8図に示す。成熟期の水稲の放射性セシウム吸収量は、年次によらずほぼ同様の傾向を示した。堆肥連用区、稲わら連用区および無窒素区が2~3 Bq m⁻²であり、他区の5~13 Bq m⁻²に比較して少なかった。また、三要素区より堆肥残効・三要素区が低かった。出穂期以降の増加は2013年の区外を除き、なかった。放射性セシウム吸収量の部位別分布割合は、いずれの区とも、わらが70~80%、玄米が15~20%、もみがらが10%程度であった。

6. 放射性セシウム移行係数について

2012年~2014年の収穫時土壌の交換性カリ含量と玄米への移行係数との関係を第9図に示した。収穫時土壌の交換性カリ含量の増加に伴い、放射性セシウムの玄米への移行係数は低下した。土壌の交換性カリが10 mg 100g⁻¹程度するとき、移行係数は0.01であり、10 mg 100g⁻¹までは急激に、それより値が大きくなるほど緩やかに低下した。この傾向に経年変化は見られなかった。

玄米への移行係数の推移を第10図に示した。玄米への移行係数は、2012年から2013年に概ね低下していたが、2013年から2014年ではすべての区で若干の増加傾向であった。

IV 考察

本試験は、福島第一原発の事故に伴い土壌の放射性セシウム濃度が150 Bq kg⁻¹程度の黒ボク土水田において、有機物の連用が水稲の放射性セシウム吸収に与える影響を2011年から4年間調査したものである。

有機物の連用により土壌中交換性カリが高く維持され、玄米およびわらの放射性セシウム濃度が低下した。2013年を例にみると、土壌中交換性カリ含量は、堆肥連用区および稲わら連用区では1年間を通して20 mg 100g⁻¹以上と高く

維持されていた。三要素区では施肥直後に $20 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ 程度まで上昇するもののすぐに低下し、収穫時には作付前と同じ $6 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ になった。試験区内での1年間のカリ収支の試算を第6表に示した。三要素区の水稲によるカリ収奪量は 152 kg ha^{-1} で、カリの施用量とかんがい水からの供給量の試算値の和 140 kg ha^{-1} より多かった。堆肥連用区および稲わら連用区は、それぞれカリ収奪量が 183 kg ha^{-1} , 176 kg ha^{-1} と多くなるが、施用した有機物由来のカリ分が上乘せされるため、供給量が収奪量より 123 kg ha^{-1} および 153 kg ha^{-1} 多くなった。この分がやや緩効的に働くため土壌中交換性カリ含量を1年間維持できると考えられた。堆肥残効・無肥料区の水稲によるカリ収奪量は 102 kg ha^{-1} , かんがい水からの供給量を考慮しても収奪量が上回るものの、収穫時土壌の交換性カリは作付前とほぼ同じ $6 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ であった。

2014年は最高分げつ期以降に土壌の交換性カリ含量が低下した。本章第1節で述べたとおり、原因のひとつとして、田面水がオーバーフローするほどの集中豪雨が、最高分げつ期直前およびその後数回あったことが考えられた。このような集中降雨は2013年にはなかった。第11図に三要素区および堆肥を施用した区の跡地土壌の交換性カリの推移を示した。堆肥残効区はいずれも、堆肥の連用により土壌中交換性カリは $20 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ 程度以上で維持されていたが、施用をやめると1作後または3作以内に低下し、有機物を施用したことがない三要素区と同じ水準 $10 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ 程度になった。これらのことから、玄米への放射性セシウム吸収を効果的に抑制するための適正なカリ水準を維持する手法を開発するうえで、黒ボク土水田土壌でのカリの保持能等を評価することが重要である。

玄米の移行係数は、事故2年目の2012年以降、土壌の交換性カリ含量の影響を大きく受け、同じ施肥管理をした場合でも経年に伴い低下しなかった。また、玄米の移行係数を0.01以下にするためには、2013年および2014年の土壌の交換性カリ含量の推移から、土壌の交換性カリ含量を移植1か月後まで $20 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ 以上に維持する必要があると考える。農作物施肥基準(栃木県, 2006)では、牛ふん堆肥の場合、乾田で $5000 \sim 10000 \text{ kg ha}^{-1}$, 半乾田で 5000 kg ha^{-1} の施用を基準とし、環境負荷を考慮して含有する成分量の減肥を示している。しかし、放射性セシウム対策としてカリ成分については減肥なしが得策と考える。ただし、堆肥については成分組成のばらつきがある(山口, 2004)ことから施用にあたっては成分を考慮する必要がある。また、稲わら還元もカリ供給

の面から有効である。本試験では、窒素量から稲わら施用量を決めているため、生産量の1.5倍量程度投入されたことになる。

2011年のわらの放射性セシウム濃度は、収穫時土壌の交換性カリ含量が多い堆肥連用区(東側)の値が最も大きいなど、玄米にみられた処理の効果は認められなかった。これは、本試験地から東に7km離れた地点において、水稲生育期間中に数百 kBq m^{-2} の放射性セシウム降下が観測されており(栃木県保健環境センター, 2012)、大気からの直接汚染が考えられた。また、玄米の放射性セシウム濃度が西区画で東区画より高かった。第12図に2011年と2012年の収穫時土壌の交換性カリ含量と玄米への移行係数との関係を示したとおり、2012年ほど明瞭ではないものの2011年度においても収穫時土壌の交換性カリ含量が高いと玄米の放射性セシウム濃度が低下する傾向があった。これらのことから、2011年では試験地の西側にある雑木林および道路経由の二次汚染の影響も受けていたと考えられた。

水稲の放射性セシウム含有量は、施肥をしている区では出穂期と成熟期でほぼ同じであることおよび放射性セシウムの部位別割合が玄米15~20%とほぼ一定であることから、出穂期の茎葉の放射性セシウム濃度および乾物重が玄米の放射性セシウム濃度を推測する指標となりえる。

多湿黒ボク土水田において、堆肥または稲わらを連用することは、窒素無機化量、土壌の可給態リン酸含量および交換性カリウムの増加がみられ、収量が増加すること(吉澤ら, 2011)に加え、放射性セシウムの吸収抑制に効果があることが示された。

謝辞

農業環境技術研究所(現農研機構農業環境変動研究センター)の木方展治氏、農研機構東北農業研究センターの松波寿弥氏、高橋義彦氏には、玄米および土壌の放射性セシウムの測定をしていただいた。ここに記して感謝の意を表す。

本研究は平成24~26年度農林水産省委託プロジェクト研究「農地等の放射性物質の除去・低減技術の開発(水稲における放射性セシウム移行要因の解明および移行低減対策技術の開発)」, 平成23年度科学技術戦略推進費「重要政策課題への機動的対応の推進及び総合科学技術会議における政策立案のための調査」で行ったものである。

第1表 試験区の概要

区名	有機物施用量		基肥			穂肥		穂揃肥
	堆肥	稲わら	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	K ₂ O	N
	N kg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹			kg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹
無窒素区	0	0	0	150	100	0	20	0
三要素区	0	0	40	150	100	20	20	20
堆肥連用区	90	0	40	150	100	20	20	20
稲わら連用区	0	40	40	150	100	20	20	20
堆肥残効・無肥料区	0	0	0	0	0	0	0	0
堆肥残効・三要素区	0	0	40	150	100	20	20	20

注1. 窒素は塩安, リン酸はようりん, カリは塩化カリを用いた.
 注2. 稲わらは秋耕起時に, 堆肥は もみがら牛ふん堆肥を代かき時に施用した.
 注3. 堆肥残効・無肥料区は1984~1997年は稲わらと石灰窒素を施用, 1998~2002年は無肥料, 2003~2008年は堆肥を施用, 2009年から無肥料で栽培した.
 注4. 堆肥残効・三要素区は1984~2006年は堆肥を施用し, 2007年はリン酸とカリだけ, 2008年から三要素だけ施用した.

第2表 各試験区の3月中旬採取土壌の理化学性

区名	pH	T-N	T-C	可給態 窒素	Truog -P ₂ O ₅	CEC	交換性塩基		
							CaO	MgO	K ₂ O
	H ₂ O	g 100g ⁻¹		mg 100g ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹	mg 100g ⁻¹			
無窒素区	6.7	0.54	8.1	14.9	7.2	42	900	116	15
三要素区	6.7	0.56	8.3	16.0	7.8	43	933	111	11
堆肥連用区	6.6	0.61	8.8	19.8	9.4	47	952	107	29
稲わら連用区	6.7	0.59	8.7	17.4	6.9	42	890	102	30
堆肥残効・無肥料区	6.7	0.58	8.5	16.5	6.3	45	882	96	11
堆肥残効・三要素区	6.5	0.62	9.1	16.0	8.2	45	972	107	13
区外	6.5	0.57	8.4	15.8	5.9	43	987	117	8

注1. 2012年~2014年の平均値. ただし, 堆肥残効区・無肥料区および区外は2013年と2014年の平均値.
 注2. 区外のリン酸吸収係数は 2350.

粘土	シルト	細砂	粗砂
%			
7.6	49.8	29.5	13.1

第3表 供試有機物の施用量および成分含有率

資材名	施用量 kg ha ⁻¹	水分 g 100g ⁻¹	含有率 g 100g ⁻¹			施用量 kg ha ⁻¹		
			N	C	K	N	C	K ₂ O
牛ふん堆肥	8385	43.9	1.98	34.3	2.56	90	1580	143
稲わら	10100	27.0	0.57	42.0	2.41	40	2990	206

注. 2013年および2014年の平均値. 含有率は乾物あたり, 施用量および水分は現物あたり.

第4表 収穫時土壌の交換性カリ含量の年次変化

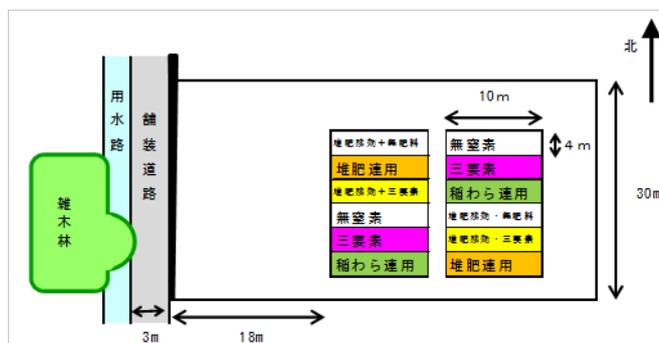
区名	交換性K ₂ O mg 100g ⁻¹			
	2011	2012	2013	2014
無窒素区	11.6	10.9	10.3	10.2
三要素区	9.4	6.9	5.7	6.3
堆肥連用区	27.5	26.2	20.6	18.2
稲わら連用区	16.5	22.2	24.0	22.9
堆肥残効・無肥料区	—	7.4	5.8	6.2
堆肥残効・三要素区	10.6	9.3	6.6	9.3
区外	—	4.1	5.9	3.6

—は未測定

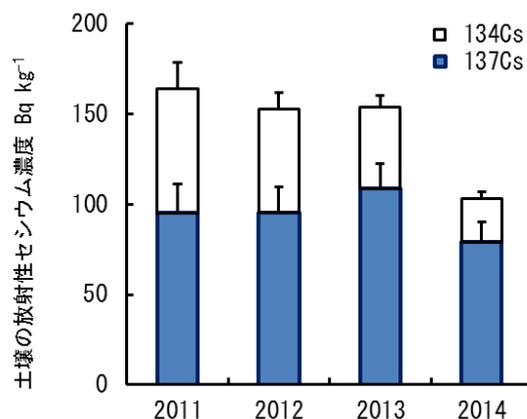
第5表 2011年の放射性セシウム濃度、移行係数、収穫時土壌の交換性カリおよび精玄米重

区名	$^{137}\text{Cs}+^{134}\text{Cs}$ Bq kg^{-1}			移行係数		収穫時土壌の 交換性カリ $\text{mg } 100\text{g}^{-1}$	精玄米重 kg ha^{-1}
	玄米	わら	収穫時土壌	玄米	わら		
無窒素区	4.4	10.5	166	0.026	0.06	12	3070
三要素区	4.0	19.6	164	0.024	0.12	12	4100
東 堆肥連用区	2.1	28.6	228	0.009	0.13	32	5030
稲わら連用区	2.9	11.4	142	0.021	0.08	18	4880
堆肥残効・三要素区	4.1	25.8	149	0.028	0.17	9	5030
無窒素区	8.1	16.2	160	0.051	0.10	11	2160
三要素区	20.2	24.1	150	0.134	0.16	7	4380
西 堆肥連用区	5.8	12.8	203	0.029	0.06	23	—
稲わら連用区	6.1	19.6	129	0.047	0.15	15	4470
堆肥残効・三要素区	6.0	27.5	148	0.041	0.19	12	3520

注. 乾物換算値. ただし, 玄米は水分15%換算値. —は未測定.

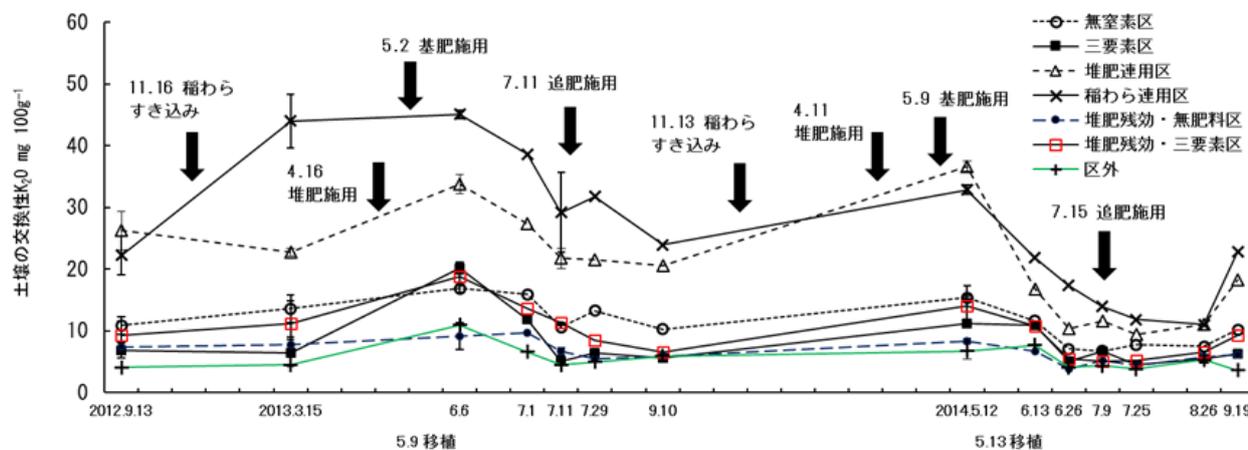


第1図 試験区の配置

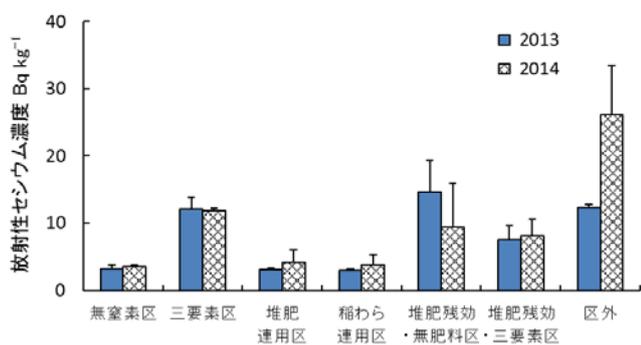


第2図 収穫時土壌の放射性セシウム濃度の推移

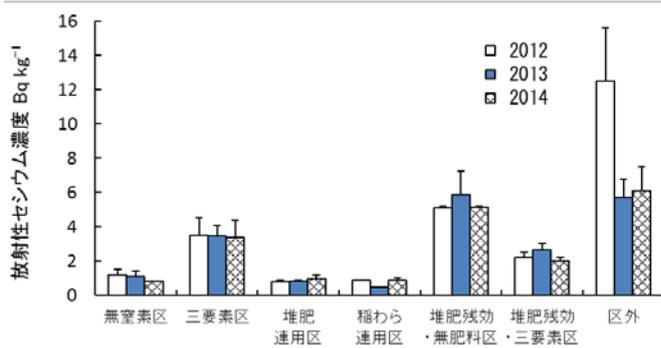
全試験区の平均値. エラーバーは標準偏差



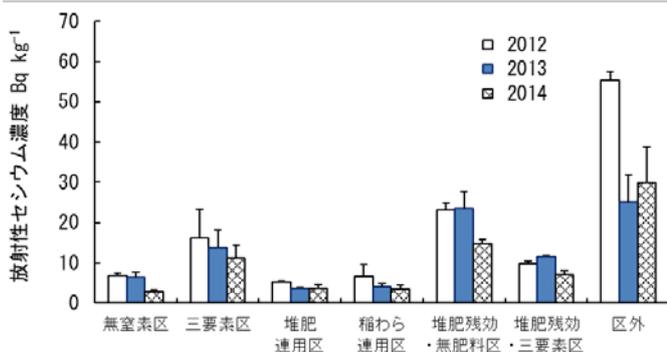
第3図 土壌の交換性カリ含量の推移



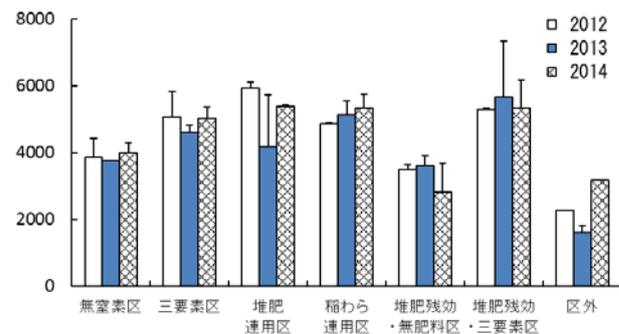
第4図 水稻茎葉(出穂期)の放射性セシウム濃度



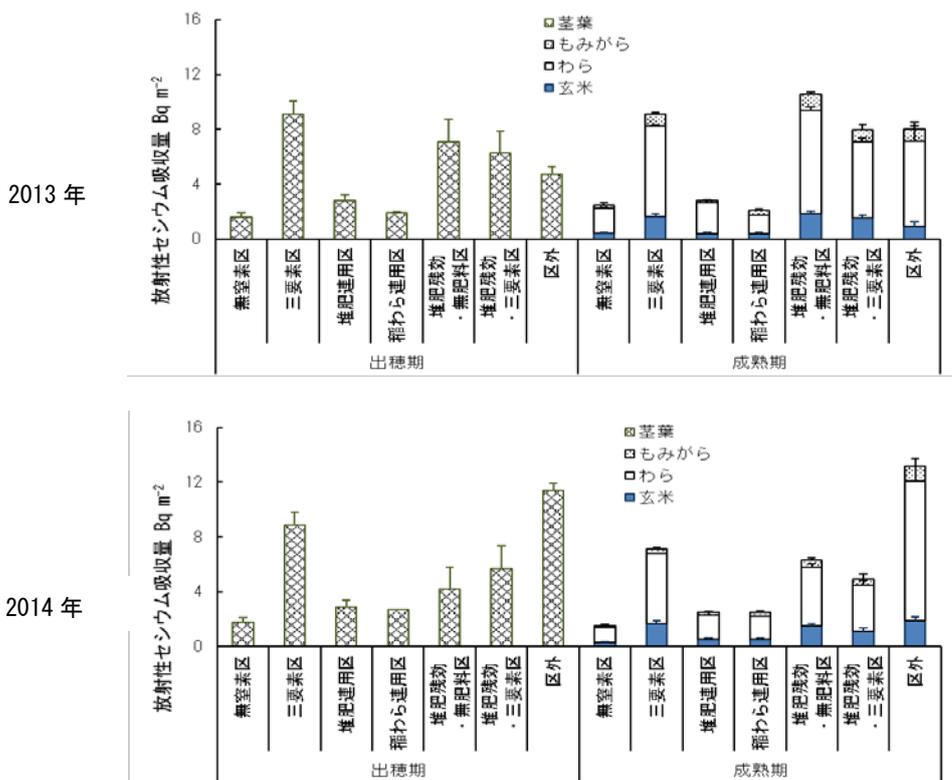
第5図 玄米の放射性セシウム濃度



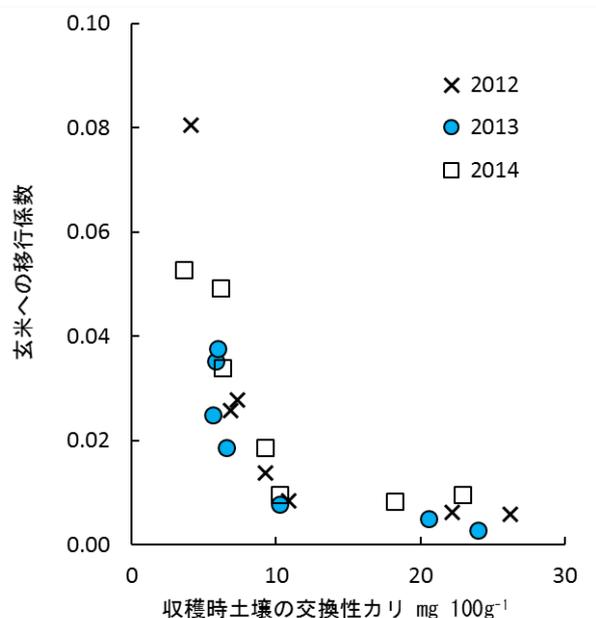
第6図 わらの放射性セシウム濃度



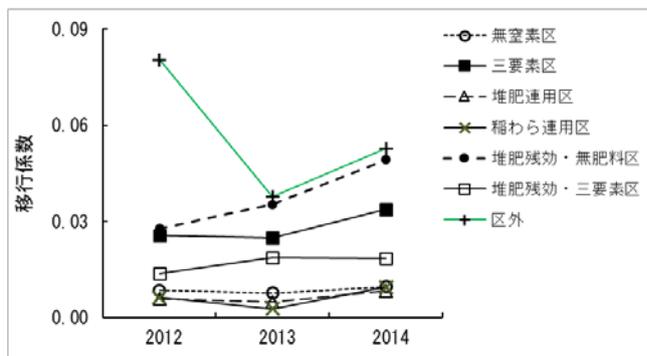
第7図 水稻収量



第8図 出穂期の水稲茎葉および成熟期の水稲部位別放射性セシウム含有量



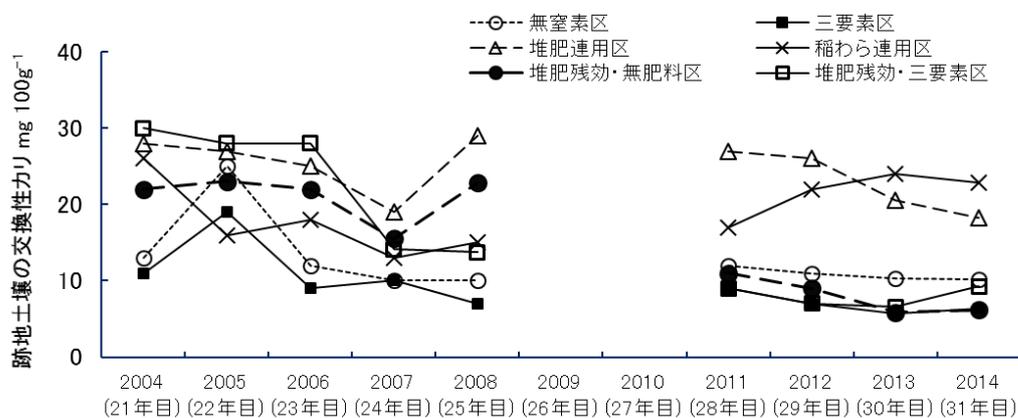
第9図 収穫時土壌の交換性カリと玄米への移行係



第10図 玄米への移行係数の推移

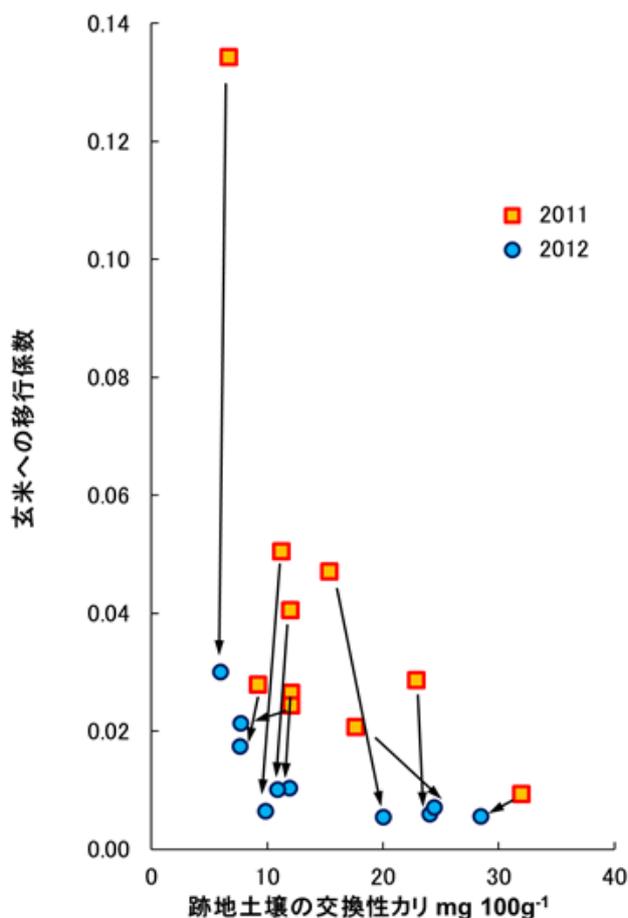
第6表 試験区内での1年間のカリウム収支の試算

区名	水稻へのK ₂ O供給量 kg ha ⁻¹				水稻へのK ₂ O収奪量 kg ha ⁻¹			① - ② kg ha ⁻¹	収穫時土壌中K ₂ O kg ha ⁻¹	
	施肥	有機物	かんがい水	①合計	わら	もみ	②合計		2012年	2013年
(2013年)										
三要素区	120	0	20	140	132	20	152	-12	69	57
堆肥連用区	120	166	20	306	165	18	183	123	262	206
稲わら連用区	120	189	20	329	154	22	176	153	222	240
堆肥残効・無肥料区	0	0	20	20	87	15	102	-82	74	58
(2014年)										
三要素区	120	0	20	140	106	22	128	12	57	63
堆肥連用区	120	120	20	260	128	18	146	114	206	182
稲わら連用区	120	222	20	362	131	19	150	212	240	229
堆肥残効・無肥料区	0	0	20	20	58	11	69	-49	58	62



第11図 三要素区および有機物を施用した区での跡地土壌の交換性カリの推移

2009年および2010年は未測定。堆肥残効・三要素区は2006年まで、堆肥残効・無肥料区は2008年まで堆肥を施用。



第12図 2011年と2012年の跡地土壌の交換性カリと玄米への移行係数との関係

引用文献

文部科学省 (2004) 緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法. pp5-54.

日本土壤協会 (2000) 堆肥等有機物分析法. 日本土壤協会, 東京. pp18-42, 146-153.

日本土壤協会 (2001) 土壤機能モニタリング調査のための土壤, 水質及び作物体分析法. 日本土壤協会, 東京. pp1-81, 24-259.

栃木県 (2006) 施肥基準量, 土づくりと適切な施肥. 農作物施肥基準:pp1-13,87-110.

栃木県保健環境センター (2012) 栃木県における環境放射能測定結果 (平成23年度調査). 栃木県保健環境センター年報 17:pp127-129.

山口武則 (2004) 現在流通している家畜ふん堆肥の品質の実態. 家畜ふん堆肥の品質評価・利用マニュアル. 農林水技術会議事務局. pp17-21.

吉澤比英子・高沢由美・常見譲史・大島正捨 (2011) 黒ボク土水田に連用する有機物の違いが水稻の窒素吸収パターンと収量構成要素に違いをもたらす. 栃木農試研報 66:27-35.