

福島県における
水田土壌の養分，化学性の実態に関する研究

A study on the present status of nutrients and chemical
properties of paddy soil in Fukushima Prefecture

2019年9月

中山 秀貴
Hidetaka NAKAYAMA

目次

第1章

緒言 1

第2章

福島県水田土壌養分，化学性の実態 8

2-1 はじめに

2-2 材料および方法

2-3 結果

2-4 考察

第3章

放射性セシウム吸収抑制対策を実施した福島県水田土壌の
交換性カリ含量の変動とその土壌要因 . . . 49

3-1 はじめに

3-2 材料および方法

3-3 結果および考察

第4章

小型カリウムイオンメーターによる土壌交換性カリ含量
簡易測定的确度向上のための改良 . . . 71

4-1 はじめに

4-2 材料および方法

4-3 結果および考察

第5章

総合考察 87

摘要 91

引用文献 96

謝辞

第 1 章 緒言

福島県は約 10 万 ha の水田面積を有する。米の生産量 351400t、農業産出額は約 2077 億円（福島県農林水産部 2018）で全国有数の規模をもち、水稲作は福島県農業の基幹農産物となっている。したがって、県農業施策上、水田農業の振興は極めて重要であり、その持続的発展が重要な課題として位置づけられる。今後、特に良食味米生産を目指すためには、地力の維持・向上のための適切な肥培管理が重要な課題となる。そのためには、現在の土壌の養分状態を知ることは重要であり、県農業行政は施策決定、改善対策技術構築等のために、地域ごとの土壌の特性や養分状態、増減のトレンドについて十分把握することが必要となる。

地力を農業生産における基礎と位置づけ、日本の農地土壌の基本的性格、土壌生産力阻害要因等を明らかにするため、1959 年から 1976 年に地力保全基本調査が実施され（福島県農業試験場 1978）、その成果として土壌図（生産力分級図）がとりまとめられた。この土壌図の基盤データは、現在、農業環境変動研究センターで運用する日本土壌インベントリーのデジタル土壌図等として活用されている。地力保全基本調査の福島県のデータは総合成績書にとりまとめられ、当時の土壌の地力の状況、地域性が網羅された貴重な資料となっている。地力保全基本調査後、土壌の時間的経過に伴う変化を総合的に把握するため、1979 年から 1998 年まで、全国約 2 万地点の定点（福島県は約 800 点。内水田 600 点）を設け土壌断面調査、土壌養分分析、土壌管理アンケート調査による土壌環境基礎調査（以下定点調査）が行われた。小原ら（2004）、中井（2003）のように、定点調査により得られたデータを用い全国的な土壌養分変動に関する報告や、堀田ら（2010）、本間ら（2016）のように、各県の土壌実態に関する報告が多数なされている。定点調査終了後の土壌調査

事業の調査地点は，県単位での解析が困難なほど大きく減少し（第1-1表），福島県においては，現状の県内水田土壌の養分等に関する実態が示せるデータがなかった．

第1-1図のように，近年，福島県の水稲反収は微増の傾向にあり，県内で具体的な地力低下に伴う生産性低下に関する報告や議論はなされていない状況であった．しかし，定点調査終了から20年以上が経過し，あわせて水田農業を取り巻く環境は大きく変化している．担い手や企業的経営農家への農地集積や圃場整備の進展，大規模化や農業機械の大型化．肥料高騰や一層の兼業化，高齢化等の社会情勢に加え，堆きゅう肥から稲わらへの施用有機物の変化，食味向上のための施肥窒素量の低減，ケイ酸カルシウム等の土壌改良資材施用量の減少等は直接的に土壌に影響を及ぼすものと考えられる．また，近年，高温登熟により品質を大きく低下させるほどの夏季高温年の頻度が高まっており，今後さらに高温の程度と頻度が高まることが想定されている（気象庁 2013，2017）．窒素やケイ酸は水稲登熟にとって重要であり，土壌の可給態養分の減少は高温化での外観品質に悪影響を及ぼすことが指摘されている（金田 2015）．高温登熟障害の予防的対策として土づくりがあげられ（森田 2013），堆肥やケイ酸資材の投入により地力向上を図る土づくりによる高温障害予防の効果が報告されている（農林水産省 2011）．このように，変動気象下において，土づくりの意義は非常に重要であるが，その実行には費用，労働力のコストが伴うものであり，効果的な実施のためには現状把握が重要であり，圃場単位であれば土壌診断，県としての対応指針策定等のためには可能な限り最近の全県的な土壌養分状態を示す基盤情報が望まれる．

一方で，東京電力福島第一原子力発電所の事故（以下事故）により，放射性物質が東日本の広い地域に飛散し，福島県の農地におい

第1-1表 福島県における土壤環境基礎調査以降の全国土壤調査事業での調査地点数

調査年	地点数(内水田)	土壤調査事業名
1979～1993	832(642)	土壤環境基礎調査(1巡目)
1984～1988	838(641)	土壤環境基礎調査(2巡目)
1989～1993	829(636)	土壤環境基礎調査(3巡目)
1994～1998	769(588)	土壤環境基礎調査(4巡目)
1999～2003	134(102)	土壤機能モニタリング調査(1巡目)
2004～2008	134(102)	土壤機能モニタリング調査(2巡目)
2008～2012	37～47(23～31) ^{注1}	土壤由来温室効果ガス計測・抑制技術実証普及事業
2013～2014	50(36)	農地土壤温室効果ガス排出量算定基礎調査事業
2015～2018	50(36)	農地土壤炭素貯留等基礎調査事業

注1) 毎年調査. 調査地点数は年によって異なる.



第1-1図 福島県の水稲収量の推移

注) 直線は回帰直線。実線は全データによる。破線は1993年データを除く。

ても広範囲で汚染された。2011年産水稲作では、作付け制限等の対策を行ったにも関わらず、当時の一般食品の暫定基準値 500 Bq kg^{-1} を超過する玄米が生産され大きな社会問題になった。水稲への放射性セシウム（以下 RCs）吸収抑制のための研究を2011年から福島県をはじめとした東日本各県と国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構、大学等が協力して実施した（太田 2014）。それらにより、交換性カリ含量が RCs の土壌から玄米への移行に大きく影響することが明らかとなり、交換性カリ $> 250 \text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ を目標とした土壌改良を行うことが提案された（加藤ら 2012）。2012年以降、この成果に基づき、福島県では交換性カリ含量を高めるため、作付け前の交換性カリ $> 250 \text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ を目標としたカリ増施（基肥施用時に基肥としてのカリ肥料成分とは別に実施する塩化カリ等による資材の施用、以下上乗せ施用）が行われてきた。この耕種的対策が功を奏し、福島県が2012年から実施した米の全量全袋検査において、現在の基準値（ 100 Bq kg^{-1} 、2012年施行）を超過した米は2015年以降生産されていない（ふくしまの恵み安全対策協議会 2019）。事故後、水田土壌中の RCs 濃度は除染や物理的減衰が進んだことで低下しており、また、玄米への移行係数も経年的に低下していることが報告されている（Tagami ら 2018, Yamamura ら 2018）。加えて、上乗せ施用は生産者個人の判断ではなく、市町村や地域協議会等の単位で継続して取り組まれており交換性カリの蓄積が地域的に進んでいるものと考えられること等から、今後の上乗せ施用の実施のあり方が議論されている。現時点では、土壌の RCs 濃度から玄米への移行量を正確に把握する手法は確立されていないため、 $> 250 \text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ を目標値とした交換性カリの維持が必要である。今後の県内水田でのカリウム施肥のあり方を議論する上で、交換性カリの地域的な蓄積量に関する情報は不可欠であるが、福島

県では 1998 年に終了した土壌環境基礎調査以後，全県的な農地土壌養分調査は行われておらず，事故後の県内水田土壌の交換性カリ含量の推移や現状を示すデータが求められた．

農林水産省は，農地土壌の汚染状況の把握のため，農地土壌の放射性物質濃度分布図を作成し 2011 年 8 月に公表した（農林水産省 2011）．その後，より精緻な放射性物質濃度分布図を 2012 年 3 月に公表した（農林水産省 2012）．農林水産省は，その作成を独立行政法人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）に委託し，土壌採取調査と RCs 等の放射性物質濃度の測定を行ったが，その分析残土壌試料は福島県農業総合センターの地下室に保管されていた．それらの土壌を用い，2011 年時点の福島県水田の交換性カリを含む土壌養分，化学性の状況が把握可能であると考えられた．

交換性カリ含量の確保による RCs 吸収抑制対策実施にあたって，目標値から大きく過剰，過少であるかの判断を可能にする，より簡易な現場対応型の測定法が求められていた．常法の交換性 K 測定ではその抽出に数時間要するので，しばしばバッチ法により測定される（土壌環境分析法編集委員会 1997）．すなわち， 1.0 molL^{-1} 濃度の酢酸アンモニウム溶液（以下 AAs）で 1 時間振とう抽出した液中のカリウムを原子吸光光度計等の精密分析機器により定量する（以下従来法）．そのため，生産者等が自ら測定を行うことは難しく，分析機関に頼らざるを得ない状況にある．筆者は小型カリウムイオンメーターによる交換性カリの簡易測定法を開発した（中山 2013；中山 2014）．使用したイオンメーターのセンサーに対し， NH_4^+ は妨害イオンであり，本来 K^+ が含まれていない AAs でも測定値が表示される．この方法では，ブランク値を低くするため抽出液にバッチ法での 1.0 molL^{-1} AAs よりも低濃度の 0.1 molL^{-1} AAs を用い，振と

う抽出で得られる上澄み液を測定試料とする。測定には小型カリウムイオンメーターを用い、その測定値からブランク値を差し引いた値と従来法の交換性 K には高い正の相関が見られ、換算係数を乗じることによって交換性 K を求める。福島県では農業普及所等で実際に活用されているが、土壌試料によっては常法値から大きく外れるケースがみられることもあり、その確度（簡易測定法により求めた交換性 K と従来法での交換性 K との統計的な乖離の程度）の向上が望まれていた。

そこで、本研究では福島県水田土壌の土づくりのあり方や方向性を検討する上で必要な土壌養分・化学性の基盤情報の整備を目的に(1)水田土壌養分の養分・化学性の実態、(2)放射能吸収抑制対策として実施されたカリ多施用による土壌交換性カリ含量の実態についてデータを収集し、検討した。また、(3)放射能吸収抑制対策の効果的実施のための交換性カリ簡易測定法の改良、構築について検討した。

本論文は次のような構成とした。

第 2 章では現在の福島県水田土壌の養分・化学性の実態とその特徴について明らかにした。第 3 章では 2011 年以後実施された放射能対策によるカリ肥料の追加施用により増加した土壌交換性カリの実態を明らかにするとともに、カリ保持に係る土壌要因について考察した。第 4 章では放射能吸収抑制対策に必要な土壌交換性カリ含量簡易測定法の構築を行った。最後に第 2 章～第 4 章をまとめて、総合考察を加えた。

第 2 章 福島県水田土壌養分，化学性の実態

2-1 はじめに

近年，環境への配慮や良食味米志向行を背景に，稲作指導の重点が安定多収から品質や食味重視へと移行している．施肥量は減少傾向にあり，一方で，生産コスト低減等の理由で土壌改良資材の使用が減少している．昔から「稲は地力でとる」といわれるように，一定の収量水準を確保しつつ品質の良い米を生産するためには，土づくりによる地力の維持，増強が基本であり，土づくりの果たす役割はこれまで以上に重要である．

現在の土壌の養分状態を知ることは重要であり，県農業行政は施策等の決定，あるいは，改善対策技術構築等のために，県内の地域ごとの土壌状態や特性，変化のトレンドについて十分把握することが必要となる．また，地域的な現状と増減傾向の情報は，生産団体，生産者にとっても土づくりに対する意識の醸成に有用である．

しかし，近年，全国土壌調査事業の県内での調査地点数は減少しており，福島県では 1998 年に終了した土壌環境基礎調査（以下定点調査）以後，水田土壌の実態を示すようなデータの収集，解析は行われていなかった．定点調査後，水田農業を取り巻く環境は大きく変わっており，より近年の県内水田土壌の養分，化学性の実態を示すデータが求められた．

2011 年に発生した東日本大震災に伴う東京電力第一原子力発電所事故後，農林水産省が放射性物質濃度分布図（2012 年 3 月公表）作成のため，2011 年秋冬に県内農地土壌を採取した．放射性物質濃度測定後，分析残土壌試料が福島県農業総合センター地下室に保管された．それらの土壌を用い，2011 年時点の県内水田土壌の養分，化学性の実態が把握可能であると考えられた．

そこで、本研究では現在の県内水田土壌の養分、化学性の状況を明らかにするため、2011年に採取され保管されていた土壌の分析を行った。そのデータを用い、地域性および定点調査等の過去のデータと比較することで増減傾向について検討した。また、稲わらや土壌改良資材等の土づくり資材の施用実態との関連性について考察を行い、今後の福島県での土づくりのあり方について考察した。

2-2 材料および方法

(1) 福島県内水田土壌の養分、化学性の分析および既存データの収集

1) 2011年調査土壌

福島県内水田土壌の養分、化学性の状況を把握するため、放射性物質濃度分布図作成のための調査（以下2011年調査）での土壌試料の分析を2015年に行った。当該土壌は、各調査地点に一つの圃場から5点法により、表面から約0.15 m深までを対象に、2011年の秋冬に採取された。土壌を風乾し2 mm目合いの篩をとおした状態に調整後、分布図作成のための放射性セシウム濃度の分析が行われた（農林水産省2012）。その後、福島県農業総合センターが福島県内農耕地で採取された約2200点の土壌試料の提供を受け、2012年から施設地下室に保管した。保管土壌の内、地点情報等が明らかな水田土壌（以下2011年調査土壌）1047点（第2-1表。調査密度（水稲作付面積／試料点数）は水田約60haに1点に相当する。）を分析対象とし、2015年に保管土壌の一部を取り出し分析を実施した。

可給態窒素は105℃絶乾土を水抽出して得られる濾液を用いた簡易評価法（野原ら2016）で測定（全有機炭素計：島津製作所TOC-VCPH）した。可給態リン酸をトルオーグ法（土壌環境分析法編集委員会1997）、交換性カリをバッチ法（土壌環境分析法編集委員会

第2-1表 2011年調査および定点調査の集計エリア別地点数

地方	2011年調査	定点調査	地域	2011年調査	定点調査	区域	2011年調査	定点調査			
中通り	506	197	県北	177	64	県北	47	25			
						伊達	31	14			
						安達	99	25			
			県中	239	95			県中	94	35	
								田村	35	25	
								須賀川	110	35	
								県南	90	38	
			会津	250	227	会津	228	202	県南	同左	同左
									会津	74	63
									喜多方	72	72
会津坂下	82	67									
南会津	22	25									
浜通り	221	179	相双	169	142	南会津	同左	同左			
						相双	93	97			
						双葉	76	45			
						いわき	52	37			
黒ボク土	70	29				いわき	同左	同左			
						計	1047	632			

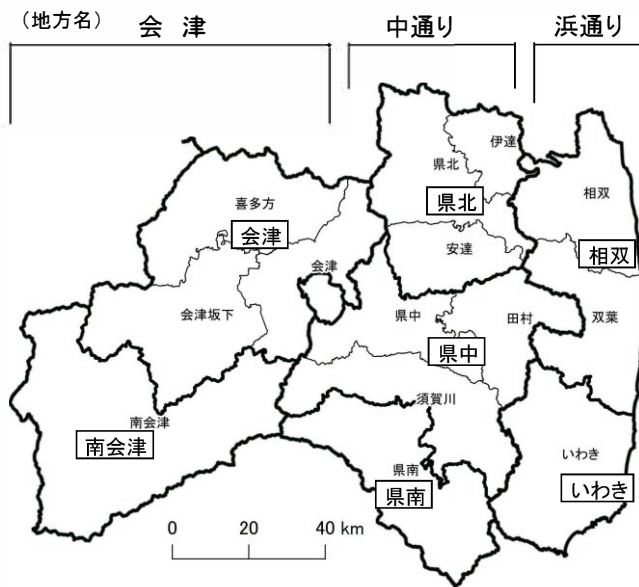
注) 定点調査の調査年、地点数は次のとおり(1993年:南会津地域等42点, 1994年:県北地域, 県中地域等278点, 1995年:会津地域等213点, 1996年:県中地域, 県南地域等256点, 1997年:相双地域, いわき地域等258点。

1997), 可給態ケイ酸を pH6.2 リン酸緩衝液抽出法 (日本土壌協会 2001) で測定した. なお, これらの土壌養分は, 従来, ($\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$) が用いられているが, 本報では SI 単位を用いるため, ($10^{-2} \text{ g kg}^{-1}$) と表記した. CEC をホルモール法 (山田 1984), pH (H_2O) をガラス電極法で測定した. 全炭素, 全窒素を乾式燃焼法で測定 (NC アナライザー:住友化学 SUMIGURAPH NC-220F)した. また, 黒ボク土の判定のためにリン酸吸収係数をリン酸アンモニウム液法 (土壌環境分析法編集委員会 1997) で測定した.

得られた土壌養分, 化学性のデータ (以下 2011 年データ) の集計にあたっては, リン酸吸収係数が $15 \text{ g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ 以上のものを黒ボク土とし, 集計前に各サンプルを非黒ボク土と黒ボク土に分類した. 非黒ボク土は全体の約 93% であり, 第 2-1 図に示す地域区分で地方, 地域, 区域ごとに分析値を集計し, 平均値等をもとめた. 黒ボク土は「黒ボク土」として集計した.

2) 定点調査土壌

2011 年調査土壌の分析値の対照として, 1993 年~1997 年の定点調査で採取した 632 点 (第 2-1 表. 調査密度は水田約 110ha に 1 点に相当する.) の水田土壌第一層 (作土に相当する) の養分, 化学性のデータを収集, 分析を行った. 土壌採取を秋冬の収穫後圃場にて行い, 一つの圃場から 3~5 点採取, 混合したものを土壌試料とした. 採土深は第一層を採取対象としていたため圃場により異なるが概ね 0.15m であった. これらの土壌試料は当時の分析終了後, 風乾細土の状態福島県農業総合センター土壌保管室に保管されていた. 2016 年にその一部を用い, 可給態窒素, 可給態ケイ酸, 全炭素, 全窒素, リン酸吸収係数について, 前述の方法で測定を行った. 可給態リン酸, 交換性カリ, CEC, pH (H_2O) については, 前述の分析方法で調査当時に測定したデータを収集, 整理した.



第2-1図 本報での地域区分

注) 福島県は中通り(県北、県中、県南地域)、会津(会津、南会津地域)、浜通り(相双、いわき地域)の3地方に分けられる。太線が地域境界線、細線が区域境界線。囲み字は地域名、囲みのないものは区域名。各地域は農林事務所管轄、各区域は農業普及指導組織管轄に相当する。

得られた土壌分析値（以下定点調査データ）を，2011年採取土壌と同様に，リン酸吸収係数が $15 \text{ g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ 以上のものを黒ボク土とし，集計前に各サンプルの土壌タイプの分類を行った．非黒ボク土は全体の約 93%であり，2011年データと同様に，地方，地域，区域ごとに分析値を集計し，平均値等をもとめた．黒ボク土は「黒ボク土」として集計した．

3) 地力保全基本調査データ

定点調査以前の土壌養分，化学性の状況を把握するため，地力保全基本調査総合成績書（福島県農業試験場 1978）から可給態窒素，可吸態リン酸，交換性カリ，pH のデータについて，収集，整理した．地力保全基本調査では，各土壌養分，化学性は生産性の視点から 3 段階に分級された（第 2-2 表）．土壌養分の個別の分析データは残っていないが，総合成績書では，市町村単位で各分級の面積が記載されており，それらを集計し地方，地域ごとに面積割合を算出した．

(2) 土壌養分，化学性の適正地点度数分布

2011年データおよび定点調査データを用い，可給態窒素，可給態リン酸，交換性カリ，可給態ケイ酸，pH，CEC について，各地方および地域の適正地点度数分布をもとめた．福島県で定める目標値（福島県 2006）がない項目については，既往の情報や他県での目標値等を元に策定した（第 2-3 表．農林水産省 2008；農研機構 中央農業総合研究センター 2014；富山県農林水産部 2013；岩手県 2000；山形県 2002；2013）．可給態ケイ酸については，分析法である pH6.2 リン酸緩衝液抽出法では非黒ボク土と黒ボク土を統一的に評価することが難しい（東北農業試験場 1999）とされ，富山県農林水産部（2013）を参考に非黒ボク土と黒ボク土の目標値を分けた．

(3) 有機物，土壌改良資材施用データ

第2-2表 地力保全基本調査での土壌養分, 化学性の分級基準

土壌養分, 化学性	分級基準 ^{注)}			分析方法
	1	2	3	
可給態窒素(10^{-2} g N kg^{-1})	<10	10~20	>20	風乾土30℃4週湛水培養法
可給態リン酸(10^{-2} g P_2O_5 kg^{-1})	<2	2~10	>10	トルオーグ法
交換性カリ(10^{-2} g K_2O kg^{-1})	<8	8~15	>15	1M酢酸アンモニウム抽出法
pH(H_2O)	<5.0	5.0~6.0	>6.0	ガラス電極法

注)「2」を適正域とし, 「1」を過少域, 「3」を過剰域として分類している.

第2-3表 本報での水田土壌の各土壌養分、化学性の目標値

土壌養分、化学性	本報での分析法	目標値範囲				参考とした基準値、目標値の出典	
		不足域		適正域			過剰域
		(不足域 I)	(不足域 II)	(適正域 I)	(適正域 II)		
可給態窒素 (10mg N kg ⁻¹)	絶乾土水抽出法	<8		8~<20		20~	農林水産省「地力増進基本指針」
可吸態リン酸 (10mg P ₂ O ₅ kg ⁻¹)	トルオーグ法	<10		10~<15	15~<30	30~	農研機構「土壌診断、施肥法改善、土壌養分利用によるリン酸等の施肥量削減に向けた技術導入の手引き」 山形県「養分蓄積水田におけるコスト低減のためのリン酸、カリ減肥指標」 岩手県「土壌蓄積リン酸に対応した水稲リン酸施肥基準」
交換性カリ (10mg K ₂ O kg ⁻¹)	1M酢酸アンモニウム抽出法	<15		15~<25	25~<40	40~	山形県「養分蓄積水田におけるコスト低減のためのリン酸、カリ減肥指標」
可給態ケイ酸 (10mg SiO ₂ kg ⁻¹)	pH6.2リン酸緩衝液抽出法	<20 (<40)	20~<30 (40~<55)	30~ (55~)		-	山形県「水田での新しいケイ酸施用基準」 富山県「水田土壌のケイ酸栄養診断技術の改訂」
pH(H ₂ O)	ガラス電極法	<5.5		5.5~<6.5		6.5~	福島県「水田土壌改良基準」
CEC (cmol _c kg ⁻¹)	ホルモール法	<6	6~<12	12~<20		20~	農林水産省「地力増進基本指針」 福島県「水田土壌改良基準」

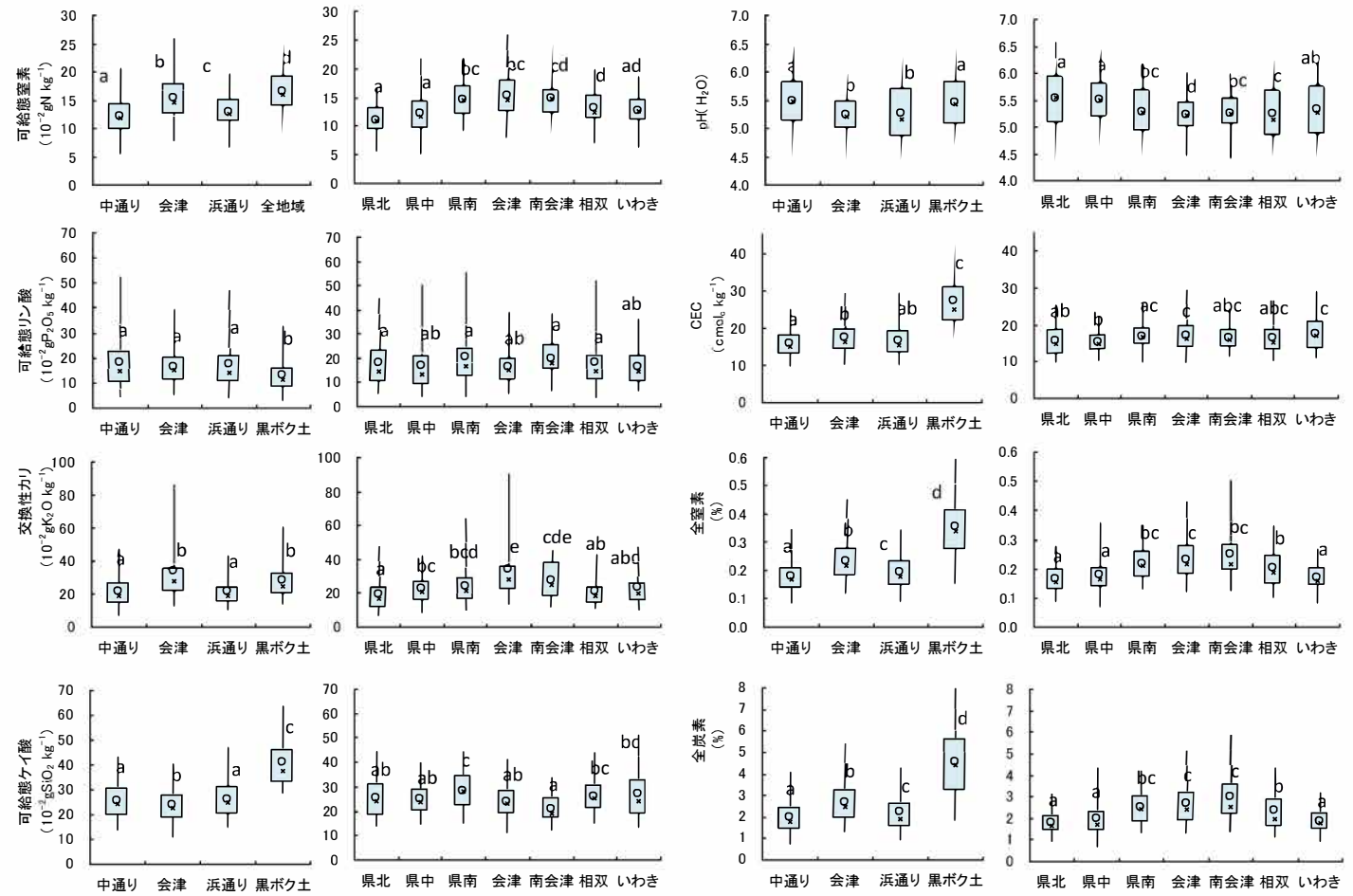
注) 可給態リン酸、交換性カリの「適正域 II」は、今後減肥を検討する水準。ケイ酸、CECの「不足域 I」は早急に何らかの対策を講じる必要がある水準。

福島県農林水産部では、県内各市町村、JAの協力を得て、各年度の市町村単位での稲わら、堆きゅう肥、土壌改良資材（ケイカル、ようりん等）の施用面積、施用量等の数値情報を収集している。それらのデータを用い、地方、地域、区域単位での単位面積当たりの資材施用量を算出、集計した。その後、1989年～2014年までの25年間のデータについて、5年単位（1989年～1993年（Ⅰ）、1994年～1998年（Ⅱ）、1999年～2003年（Ⅲ）、2004年～2008年（Ⅳ）、2009年～2014年（Ⅴ））で各期間の平均値をもとめた。また、そのデータを用い、各地方、地域の土壌改良資材中のリン酸施用量（ $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ ）、ケイ酸施用量（ $\text{kg SiO}_2 \text{ ha}^{-1}$ ）を推定した。リン酸については、県資料の内、「ようりん」、「ケイカリン」（ケイ酸カリにく溶性リン資材を混合したもの）のデータから算出した。ケイ酸については、「ケイカル」、「ようりん」、「ケイカリン」のデータから算出した。

2-3 結果

(1) 地域的特徴

第2-2図の箱ひげ図は2011年調査の分析結果による各養分・化学性の地域性を示す。黒ボク土のCEC、全窒素、全炭素は非黒ボク土のデータに比べ明らかに高かった。一方、3地方間で大きな差のある項目はみられなかった。リン酸固定力の高い黒ボク土であっても、可給態リン酸の平均値は $12.6 \cdot 10^{-2} \text{g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ であった。非黒ボク土の地域的な傾向では、中通りの県北、県中地域はどの項目でも大きな差はなく、他の地域に比べ可給態窒素、全窒素、全炭素が低く、pHが高かった。同じ中通りの県南地域は可給態ケイ酸が他地域に比べ高かった。その可給態窒素、全窒素、全炭素も県北、県中地域よりも高かった。会津の2地域は可給態窒素、交換性カリ、



第2-2図 2011年調査土壌の各土壌養分および化学性の箱ひげ図

- 注1) 箱ひげ図の○は平均値, ×は中央値を示す。また, 箱上端, 下端は75, 25パーセンタイル, ひげ上端, 下端は97.5, 2.5パーセンタイルを示す。
- 注2) データは2011年調査。黒ボク土のデータは県内全域。
- 注3) 異符号間で有意差あり(チューキー法(P<0.05))。

全窒素，全炭素が他地域に比べ高く，可給態ケイ酸，pH が低い傾向であった．浜通りの2地域は全体的に中庸であった．

(2) 定点調査からの増減傾向

定点調査から2011年調査までの各養分，化学性の増減傾向を明らかにするため，第2-4表に各地方，地域での2011年データと定点調査データ間の有意性検定結果を示した．pH，全炭素，全窒素は多くの地域で減少していた．pHの平均値の変動幅は $-0.1 \sim -0.5$ ，全炭素では $-0.01 \sim -0.04\%$ （対定点調査データ比で $-7 \sim -21\%$ ），全窒素では $+0.2 \sim +0.5\%$ （同比 $+7 \sim +22\%$ ）であった．CECは2データ間で有意な差がみられない地域が多かった．7地域でのCEC平均値のデータ間差分（2011年データ－定点調査データ）と全炭素の差分には有意な正の相関（ $r=0.76$ ， $p<0.01$ ．図表省略）がみられた．一方で，可給態窒素では，地方別では，中通りで減少（平均値で $-0.6 \cdot 10^{-2} \text{g N kg}^{-1}$ ），会津，浜通りで増加（それぞれ $+1.1$ ， $+1.7 \cdot 10^{-2} \text{g N kg}^{-1}$ ）し，最も減少した県北地域で $-0.7 \cdot 10^{-2} \text{g N kg}^{-1}$ （対定点調査データ比 -10% ），最も増加した県南地域で $+0.9 \cdot 10^{-2} \text{g N kg}^{-1}$ （同比 $+9\%$ ）であった．

可吸態リン酸は中通りで増加，会津で減少傾向にあり，最も減少した南会津地域で $-13.4 \cdot 10^{-2} \text{g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ （対定点調査データ比 -40% ），最も増加した県南地域で $+6.0 \cdot 10^{-2} \text{g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ （同比 $+46\%$ ）とその増減の幅が大きかった．可給態リン酸とは逆に，交換性カリは中通りで減少，会津，浜通りで増加した．最も減少した県南地域で $-8.5 \cdot 10^{-2} \text{g K}_2\text{O kg}^{-1}$ （対定点調査データ比 -27% ），最も増加した会津地域で $+12.7 \cdot 10^{-2} \text{g K}_2\text{O kg}^{-1}$ （同比 $+72\%$ ）であった．可給態ケイ酸は黒ボク土を含め全地方で増加し，最も増加した南会津地域で $+5.6 \cdot 10^{-2} \text{g SiO}_2 \text{ kg}^{-1}$ （対定点調査データ比 $+36\%$ ），全地域の平均値で $+3.2 \cdot 10^{-2} \text{g SiO}_2 \text{ kg}^{-1}$ （同比 $+16\%$ ）であった．

第2-4表 定点調査に対する2011年調査での各土壌養分、化学性分析値(平均値)の増減傾向

可給態窒素($10^{-2} \text{g N kg}^{-1}$)

地方	近年調査	過去調査	有意差	傾向	地域	近年調査	過去調査	有意差	傾向
中通り	12.2	12.8	*	▼	県北	11.1	12.4	**	▼
					県中	12.1	12.2	ns	
					県南	14.7	15.3	ns	
会津	15.2	14.1	**	△	会津	15.2	13.9	**	△
					南会津	14.4	15.1	ns	
					相双	13.1	12.2	**	△
浜通り	13.0	12.3	*	△	相双	13.1	12.2	**	△
					いわき	12.6	12.5	ns	
					黒ボク土	16.6	15.8	ns	△

可給態リン酸($10^{-2} \text{g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$)

地方	近年調査	過去調査	有意差	傾向	地域	近年調査	過去調査	有意差	傾向
中通り	17.2	13.9	***	△	県北	17.6	12.9	***	△
					県中	16.1	14.8	ns	
					県南	19.3	13.3	**	△
会津	16.5	20.8	***	▼	会津	16.2	19.3	***	▼
					南会津	19.8	33.2	**	▼
					相双	16.6	16.0	ns	
浜通り	16.7	15.6	ns		相双	16.6	16.0	ns	
					いわき	16.6	14.3	ns	
					黒ボク土	12.6	10.3	ns	

交換性カリ($10^{-2} \text{g K}_2\text{O kg}^{-1}$)

地方	近年調査	過去調査	有意差	傾向	地域	近年調査	過去調査	有意差	傾向
中通り	20.9	25.8	***	▼	県北	18.6	16.7	ns	
					県中	21.7	29.2	***	▼
					県南	23.1	31.6	***	▼
会津	29.8	18.3	***	△	会津	30.2	17.6	***	△
					南会津	27.8	23.1	ns	
					相双	20.3	14.7	***	△
浜通り	20.8	16.5	***	△	相双	20.3	14.7	***	△
					いわき	21.9	23.0	ns	
					黒ボク土	27.6	31.0	ns	

可給態ケイ酸($10^{-2} \text{g SiO}_2 \text{ kg}^{-1}$)

地方	近年調査	過去調査	有意差	傾向	地域	近年調査	過去調査	有意差	傾向
中通り	25.5	22.8	***	△	県北	25.1	24.1	ns	
					県中	24.7	21.7	***	△
					県南	28.2	23.8	**	△
会津	23.6	21.7	**	△	会津	23.9	22.4	*	△
					南会津	20.9	15.3	***	△
					相双	26.0	21.3	***	△
浜通り	26.1	21.8	***	△	相双	26.0	21.3	***	△
					いわき	26.3	23.8	ns	
					黒ボク土	40.6	31.9	***	△

CEC($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)

地方	近年調査	過去調査	有意差	傾向	地域	近年調査	過去調査	有意差	傾向
中通り	15.7	15.6	ns		県北	15.6	16.3	ns	
					県中	15.3	14.9	ns	
					県南	16.9	16.4	ns	
会津	16.9	15.7	***	△	会津	17.0	15.3	***	△
					南会津	16.4	18.5	†	▼
					相双	16.0	16.8	†	▼
浜通り	16.4	17.5	*	▼	相双	16.0	16.8	†	▼
					いわき	17.7	20.0	*	▼
					黒ボク土	26.8	26.0	ns	

pH(H_2O)

地方	近年調査	過去調査	有意差	傾向	地域	近年調査	過去調査	有意差	傾向
中通り	5.5	5.4	†	△	県北	5.5	5.2	***	△
					県中	5.5	5.5	ns	
					県南	5.3	5.5	**	▼
会津	5.2	5.3	***	▼	会津	5.2	5.3	***	▼
					南会津	5.3	5.4	†	▼
					相双	5.3	5.8	***	▼
浜通り	5.3	5.7	***	▼	相双	5.3	5.8	***	▼
					いわき	5.3	5.6	**	▼
					黒ボク土	5.5	5.9	***	▼

全窒素(%)

地方	近年調査	過去調査	有意差	傾向	地域	近年調査	過去調査	有意差	傾向
中通り	0.18	0.21	***	▼	県北	0.16	0.20	***	▼
					県中	0.17	0.20	**	▼
					県南	0.22	0.24	**	▼
会津	0.23	0.24	†	▼	会津	0.23	0.24	ns	
					南会津	0.24	0.28	ns	
					相双	0.20	0.22	†	▼
浜通り	0.19	0.21	**	▼	相双	0.20	0.22	†	▼
					いわき	0.17	0.21	***	▼
					黒ボク土	0.35	0.44	***	▼

全炭素(%)

地方	近年調査	過去調査	有意差	傾向	地域	近年調査	過去調査	有意差	傾向
中通り	2.0	2.4	***	▼	県北	1.8	2.3	***	▼
					県中	1.9	2.4	***	▼
					県南	2.5	2.8	†	▼
会津	2.6	2.9	**	▼	会津	2.6	2.8	*	▼
					南会津	2.9	3.4	ns	
					相双	2.3	2.6	**	▼
浜通り	2.2	2.5	***	▼	相双	2.3	2.6	**	▼
					いわき	1.8	2.3	***	▼
					黒ボク土	4.5	6.0	***	▼

注1)2011年調査:2011年秋冬採取, 定点調査:1993年~1997年秋冬採取,

注2)黒ボク土のデータは県内全域,

注3)有意性検定はt-検定による.*:p<5.0,**p<1.0,***:P<0.1.

注4)傾向:△:増加傾向,▼:減少傾向.

(3) 適正地点数度数分布の変化

2011年データ及び定点調査データを用い、各養分・化学性について各地方、地域の適正地点数度数分布を第2-3図に示した。

1) 可給態窒素

2011年調査では地域、土壤に関わらず適正域 ($6 \sim 20 \text{ } 10^{-2} \text{ g N kg}^{-1}$) となる地点数が76～95%と多数を占めた。県北、県中地域での不足域 ($< 6 \text{ } 10^{-2} \text{ g N kg}^{-1}$) が他地域に比べ多く (それぞれ14%, 15%), 会津地域、黒ボク土で過剰域 ($> 20 \text{ } 10^{-2} \text{ g N kg}^{-1}$) がそれぞれ15%, 23%と多かった。定点調査と比較すると、概して、不足域、過剰域となる割合はともに減少し、適正域が増加していた。

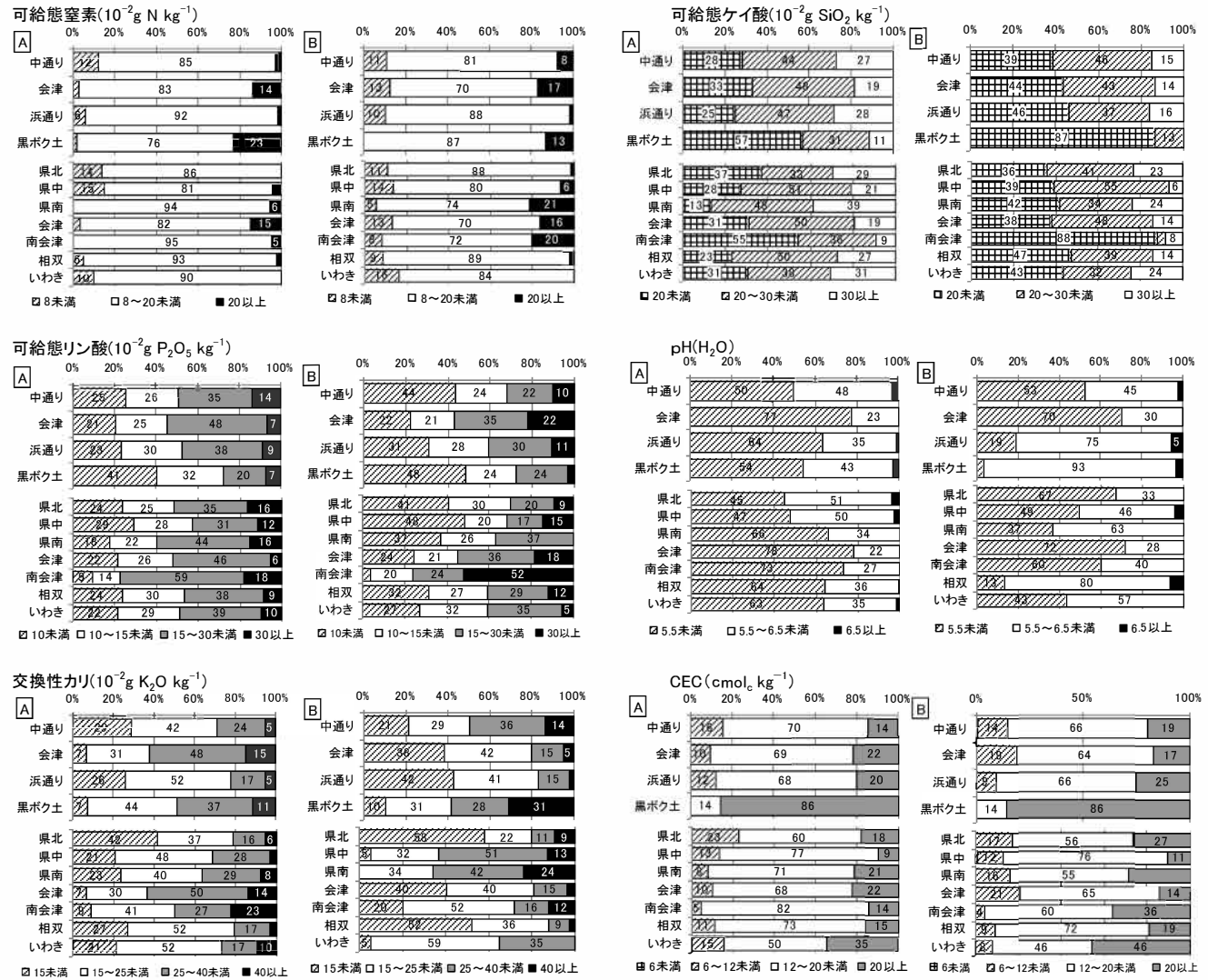
2) 可給態リン酸

不足域 ($< 10 \text{ } 10^{-2} \text{ g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$) はリン酸固定力の強い黒ボク土で41%と多く、地域別でみると9～28%であった。過剰域 ($> 30 \text{ } 10^{-2} \text{ g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$) は中通りの3地域、南会津地域で12～18%であり他地域に比べ多かった。各地域とも適正域 (適正域 I + II, $10 \sim 30 \text{ } 10^{-2} \text{ g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$) の割合が6～7割程度を占めた。定点調査と比較すると中通りで不足域となる割合が減少した。過剰域となる割合は全ての地域で減少しており、会津、特に南会津地域で過剰域となる割合が大きく減少した。

3) 交換性カリ

2011年調査では、過剰域の地点数割合はいずれの地域も少ない。会津は他地方よりも不足域となる割合が少なく、中通りの県北地域での不足域が42%と多かった。定点調査と比較すると、県中、県南地域で不足域の割合が増加 (それぞれ5%から21%へ, 0%から25%へ) しているが、他の地域では減少していた。特に会津地域での不足域の割合は40%から7%まで大きく減少した。

4) 可給態ケイ酸



第2-3図 各地方、地域の土壌養分、化学性適正地点数数分布

注) 各項目の左(A)の図は2011年データ、右(B)の図は定点調査データによるもの。

不足域Ⅰ ($<20 \text{ } 10^{-2} \text{ g SiO}_2 \text{ kg}^{-1}$, 非黒ボク土 ; <40 , 黒ボク土) の地点数割合には地域差があり, 県南地域では少なく(13%), 県北, 南会津地域で高かった(それぞれ 37%, 55%). 黒ボク土では 57%と大きかった. 不足域Ⅱ ($20 \sim 30 \text{ } 10^{-2} \text{ g SiO}_2 \text{ kg}^{-1}$, 非黒ボク土 ; $40 \sim 55$, 黒ボク土) となる割合は 3 地方とも 4~5 割程度で, 黒ボク土では 31%であった. 定点調査と比較すると, いずれの地域も不足域となる割合が減少しており, 適正域 ($>30 \text{ } 10^{-2} \text{ g SiO}_2 \text{ kg}^{-1}$, 非黒ボク土 ; >55 , 黒ボク土) となる割合は定点調査では 15%程度であったが, 2011 年調査では 19~28%に増加した. また, 2011 年調査で不足域Ⅰの割合が高かった南会津地域は, 88%から 55%までに大きく減少していた.

5) pH

いずれの地域でも適正 pH (5.5~6.5) 未満の割合は 45~78%と高かった. 特に会津でその割合が高く, 中通り, 黒ボク土で比較的低い. 定点調査と比較すると, 県北地域では適正 pH 未満の地点割合が減少したが, 県南, 相双, いわき地域では増加しており, 会津, 南会津地域では定点調査でそれぞれ 72%, 60%であったものが 78%, 73%とその割合が高まった.

6) CEC

いずれの地域でも CEC が $<6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ の地点はみられなかった. CEC $6 \sim 12 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ の地点数の割合が比較的高いのは県北地域(22%)であり, 南会津地域は低かった(5%). いずれの地域も CEC $12 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 以上の割合が大半(77~95%)を占めていた. 定点調査と比較すると, 概して CEC が $>20 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, $<12 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ の地点数割合が減少し, CEC $12 \sim 20 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ の地点の割合が増加していた.

(4) 地力保全基本調査データと定点調査, 2011 年調査データと

の比較

可給態窒素，可給態リン酸，交換性カリ，および pH について，地力保全基本調査データと 2011 年調査および定点調査（以下近年調査）のデータを比較した．第 2-4～2-7 図に各養分及び pH の地方，地域別の各データの階級別ヒストグラム，第 2-5 表に地力保全基本調査データの概要と近年調査データとの比較の概要を整理した．

1) 中通り

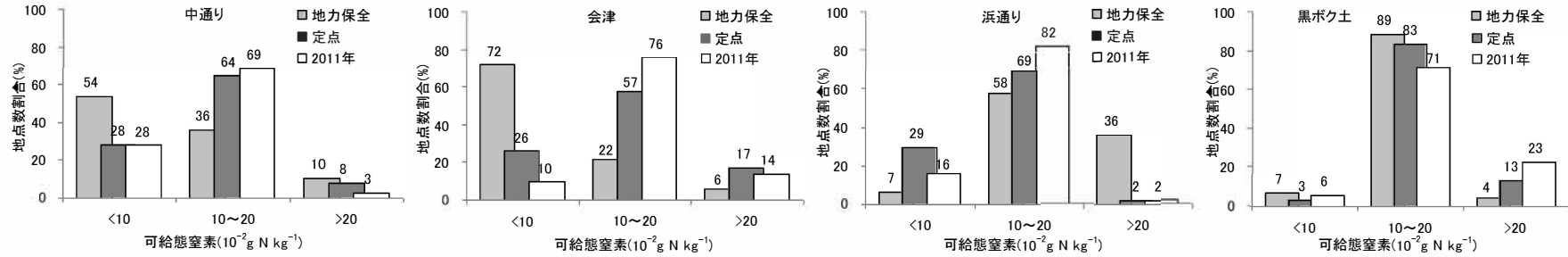
可給態窒素は $<10 \text{ } 10^{-2} \text{ g N kg}^{-1}$ の割合が 54% と高かったが，近年調査では減少し， $10 \sim 20 \text{ } 10^{-2} \text{ g N kg}^{-1}$ の割合が全体の約 2/3 を占めている．可給態リン酸は $2 \sim 10 \text{ } 10^{-2} \text{ g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ の割合が漸減し， $>10 \text{ } 10^{-2} \text{ g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ の割合が増加していた．交換性カリは $8 \sim 15 \text{ } 10^{-2} \text{ g K}_2\text{O kg}^{-1}$ の割合が減少し， $>15 \text{ } 10^{-2} \text{ g K}_2\text{O kg}^{-1}$ の割合が増加していた．pH は >6.0 の割合が 47% であったが，近年調査では減少し， <5.0 ， $5.0 \sim 6.0$ の割合が増加していた．以上のように，中通りにおいては，可給態窒素，可給態リン酸，交換性カリ含量は地力保全基本調査から増加傾向にあり，pH は酸性化の傾向にあった．

2) 会津

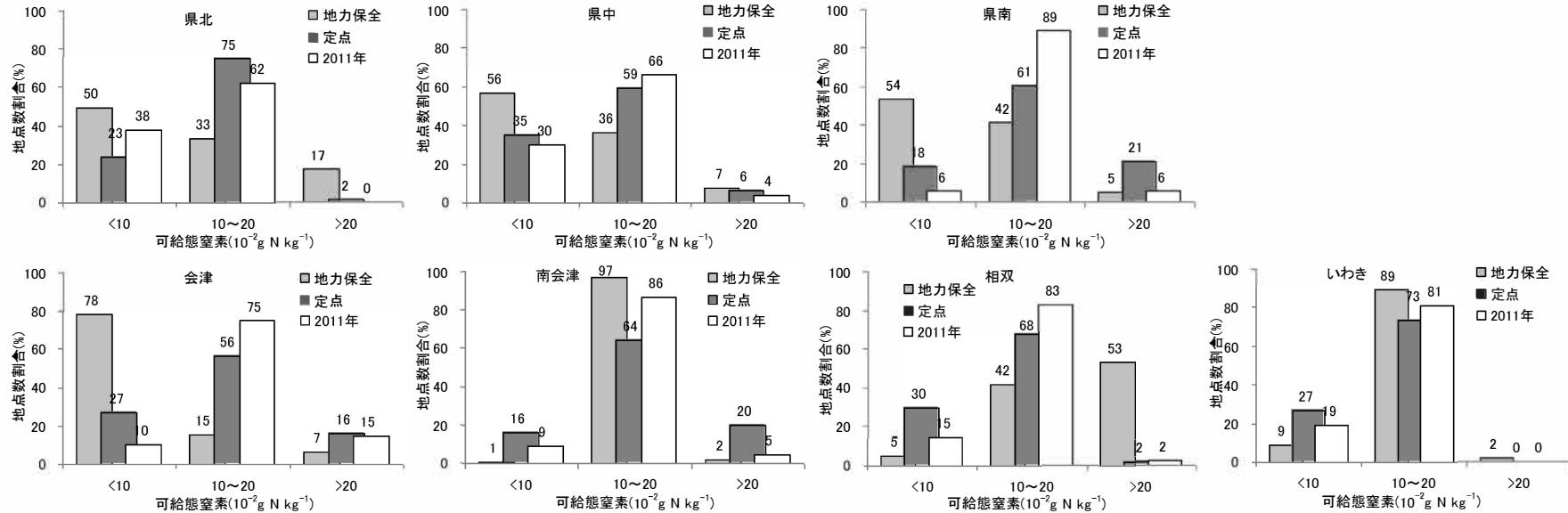
可給態窒素は $<10 \text{ } 10^{-2} \text{ g N kg}^{-1}$ の割合 72% と高かったが，近年調査では減少し， $10 \sim 20 \text{ } 10^{-2} \text{ g N kg}^{-1}$ の割合が全体の約 6～7 割を占めている．可給態リン酸は $>10 \text{ } 10^{-2} \text{ g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ の割合が優占し変化は少なかった．交換性カリは地力保全基本調査データと定点調査データで大きな違いはなかったが，2011 年データでは $>15 \text{ } 10^{-2} \text{ g K}_2\text{O kg}^{-1}$ の地点割合が増加し 93% と優占した．pH は $5.0 \sim 6.0$ の割合が 99% と優占していたが，近年調査では <5.0 の割合が増加していた．以上のように，会津においては，可給態窒素，交換性カリ含量が増加傾向にあり，pH は酸性化の傾向にあった．

3) 浜通り

【地方、土壌種別】



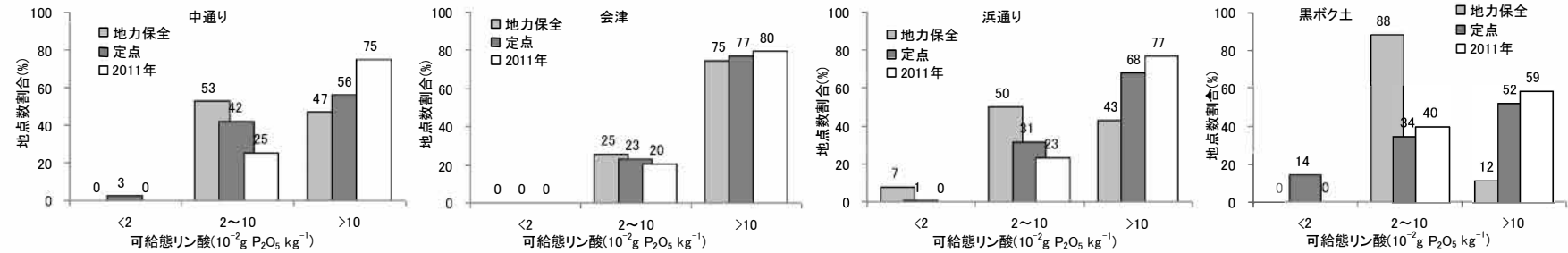
【地域別】



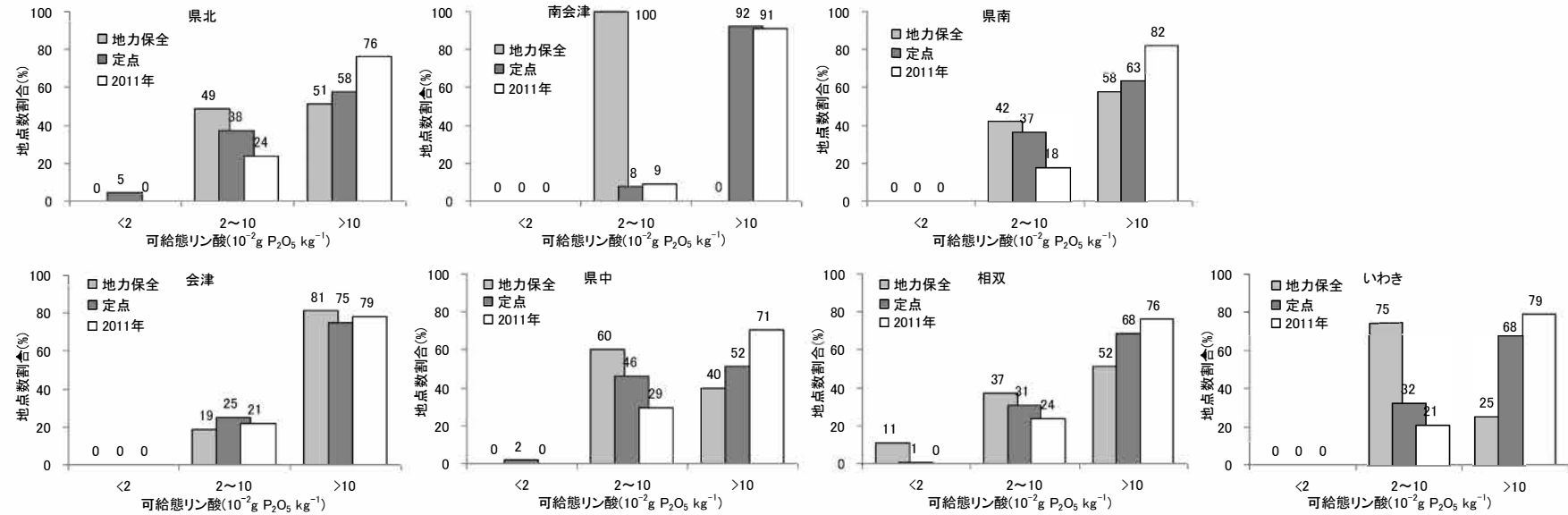
第2-4図 地力保全基本調査から2011年調査までの可給態窒素度数分布の推移

注) 地力保全: 地力保全基本調査(調査年: 1959年~1976年), 定点: 土壤環境基礎調査(データ対象調査年: 1993年~1997年), 2011: 農林水産省2012年3月公表放射性物質濃度分布図作成のための調査(調査年: 2011年)。

【地方, 土壌種別】



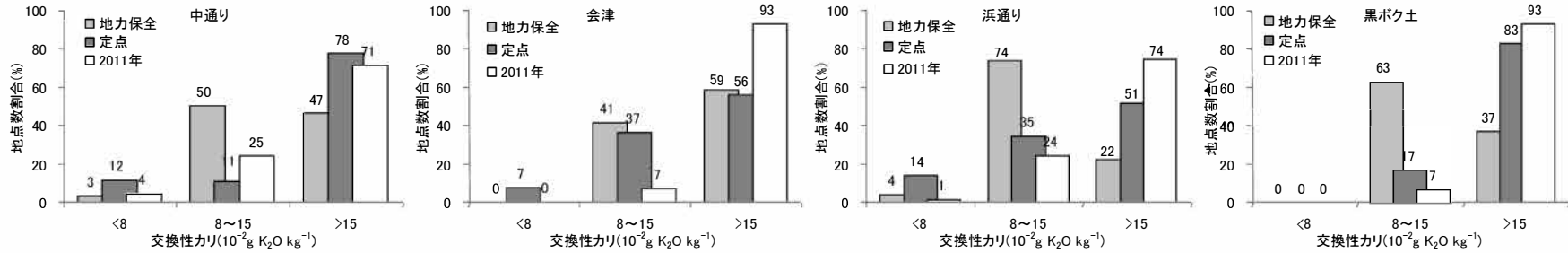
【地域別】



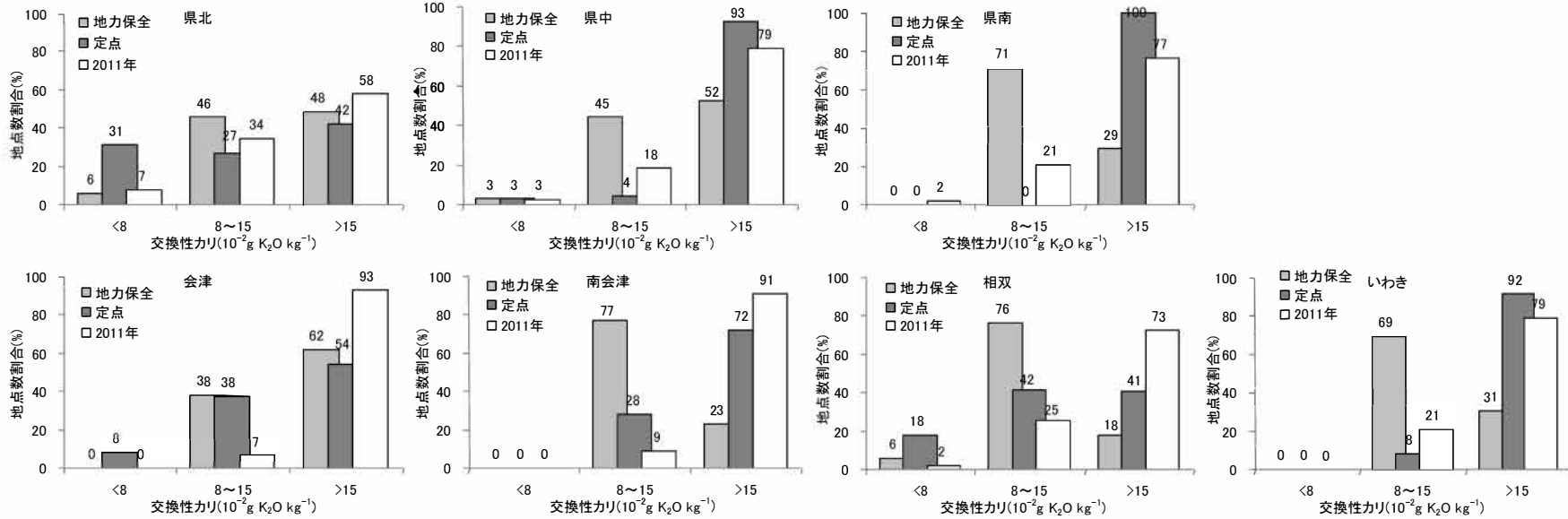
第2-5図 地力保全基本調査から2011年調査までの可給態リン酸度数分布の推移

注) 地力保全: 地力保全基本調査(調査年: 1959年~1976年), 定点: 土壤環境基礎調査(データ対象調査年: 1993年~1997年), 2011: 農林水産省2012年3月公表放射性物質濃度分布図作成のための調査(調査年: 2011年)。

【地方, 土壌種別】



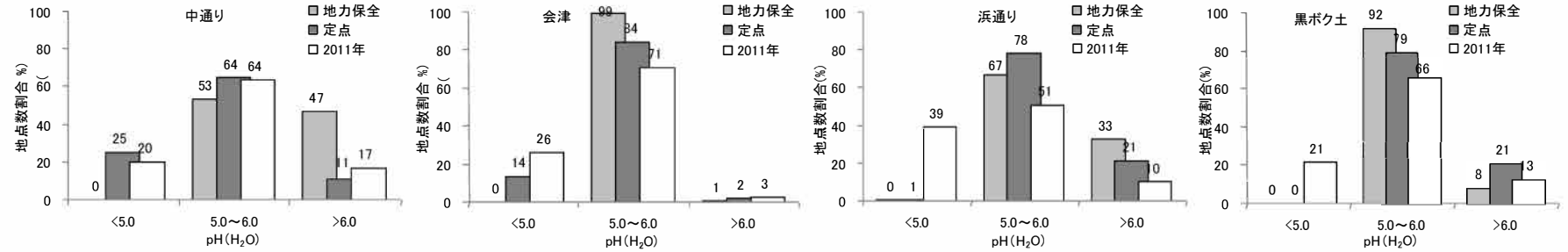
【地域別】



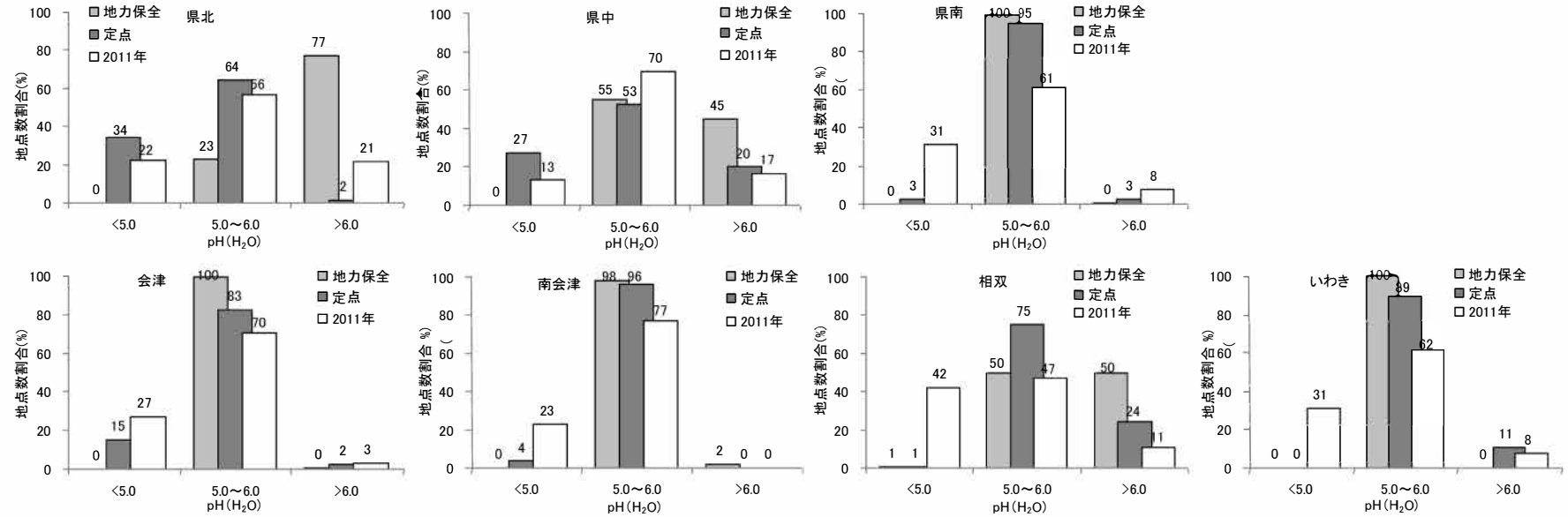
第2-6図 地力保全基本調査から2011年調査までの交換性カリ度数分布の推移

注) 地力保全: 地力保全基本調査(調査年: 1959年~1976年), 定点: 土壌環境基礎調査(データ対象調査年: 1993年~1997年), 2011: 農林水産省2012年3月公表放射性物質濃度分布図作成のための調査(調査年: 2011年).

【地方，土壤種別】



【地域別】



第2-7図 地力保全基本調査から2011年調査までのpH度数分布の推移

注) 地力保全: 地力保全基本調査(調査年: 1959年~1976年), 定点: 土壤環境基礎調査(データ対象調査年: 1993年~1997年), 2011: 農林水産省2012年3月公表放射性物質濃度分布図作成のための調査(調査年: 2011年)。

第2-5表 地力保全基本調査での地方別特徴と定点調査, 2011年調査データとの比較

項目, 基準	概要	地力保全基本調査での各地方の特徴		定点調査, 2011年調査データとの比較	
		地方(土壤)	各クラスの割合(上段: 地力保全基本調査, 下段: 2011年調査)	地域	地力保全基本調査からの増減傾向
可給態窒素 (10^{-2} g N kg^{-1}) ①<10 ②10~20 ③>20	<ul style="list-style-type: none"> ①(46%), ②(38%)の割合が高い。 ・他地方に比べ会津は①の割合が高く、浜通りは②、③の割合が高い。 ・黒ボク土は②が88%を占める。 	中通り	①54%, ②36%, ③10% ②69%, ①28%, ③3%	全般	①の割合が減少し、②の割合が約7割に増加
		会津	①72%, ②22%, ③6% ②76%, ③14%, ①10%	県北	①の割合が減少し、②の割合が約6割に増加
		浜通り	②58%, ③36%, ①7% ②82%, ①16%, ③2%	県中	同上
		黒ボク土	②88%, ①6%, ③6% ②71%, ③23%, ①6%	県南	①の割合が減少し、②の割合が約9割に増加
				全般	①の割合が減少し、②の割合が約8割に増加
可給態リン酸 (10^{-2} g P_2O_5 kg^{-1}) ①<2 ②2~10 ③>10	<ul style="list-style-type: none"> ③(53%), ②(46%)の割合が高い。 ・会津は他地方に比べ③の割合が高い。 ・黒ボク土は②が97%を占める。 	中通り	②53%, ③47% ③75%, ②25%	全般	②の漸減に伴い、③が約7割まで増増
		会津	③75%, ②25% ③80%, ②20%	県北	同上
		浜通り	②50%, ③43%, ①7% ③77%, ②23%	県中	同上
		黒ボク土	②97%, ③3% ③59%, ②40%	県南	②の漸減に伴い、③が約8割まで増増
				全般	変化なく、③が優占する
交換性カリ (10^{-2} g K_2O kg^{-1}) ①<8 ②8~15 ③>15	<ul style="list-style-type: none"> ②(54%), ③(44%)の割合が高い。 ・他地方に比べ会津は③の割合が高く、浜通りは②の割合が高い。 	中通り	②50%, ③47%, ①3% ③71%, ②25%, ①4%	全般	②の割合が減少し、③の割合が7割程度に増加
		会津	③59%, ②41% ③93%, ②7%	県北	②の割合が減少し、③の割合が5割程度に増加
		浜通り	②74%, ③22%, ①4% ③74%, ②24%, ①1%	県中	②の割合が減少し、③の割合が8割程度に増加
		黒ボク土	②59%, ③41% ③93%, ②7%	県南	②の割合が減少し、③の割合が7割程度に増加
				全般	2011年調査で、③の占める割合が増加
pH(H ₂ O) ①<5.0 ②5.0~6.0 ③>6.0	<ul style="list-style-type: none"> ②(68%), ③(32%)の割合が高い。 ・他地方に比べ会津は②の割合が高く、中通りは③の割合が高い。 ・黒ボク土は②が86%を占める。 	中通り	②53%, ③47% ②64%, ①20%, ③17%	全般	近年、③の割合が減少し、①の割合が増加した
		会津	②99%, ③1% ②71%, ①26%, ③3%	県北	③が約8割と優占していたが、近年、②、①の割合が増加
		浜通り	②67%, ③33% ②51%, ①39%, ③10%	県中	近年、③の割合が減少し、①の割合が増加した
		黒ボク土	②86%, ③14% ③66%, ①21%, ③13%	県南	②が優占していた。近年、①の割合が増加
				全般	②が大きく優占していた。近年、①の割合が増加

注) 各項目の基準は第2-3表と異なり、地力保全基本調査での生産性分級基準(第2-2表)による。

可給態窒素は $>20 \text{ } 10^{-2} \text{ g N kg}^{-1}$ の地点が36%みられていたが、近年調査では減少し、 <10 、 $10 \sim 20 \text{ } 10^{-2} \text{ g N kg}^{-1}$ の割合が増加した。可給態リン酸は $2 \sim 10 \text{ } 10^{-2} \text{ g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ の割合が漸減し、 $>10 \text{ } 10^{-2} \text{ g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ の割合が近年調査データでは約7割まで増加した。交換性カリは $8 \sim 15 \text{ } 10^{-2} \text{ g K}_2\text{O kg}^{-1}$ の割合が漸減し、 $>15 \text{ } 10^{-2} \text{ g K}_2\text{O kg}^{-1}$ の割合が地力保全基本調査データで22%、定点調査データでは51%、2011年データでは74%と増加した。pHは5.0～6.0の割合が63%、 >6.0 の割合が33%であったが、 <5.0 の割合が増加した。以上のように、浜通りにおいては、可給態窒素は低下傾向にあり、可給態リン酸、交換性カリ含量が増加傾向にあった。pHは他の地方と同様に酸性化の傾向にあった。

4) 黒ボク土

可給態窒素は $10 \sim 20 \text{ } 10^{-2} \text{ g N kg}^{-1}$ の地点数割合が地力保全基本調査データでは89%であったが漸減し、 $>20 \text{ } 10^{-2} \text{ g N kg}^{-1}$ の割合が定点調査データでは13%、2011年データでは23%と増加した。可給態リン酸は $2 \sim 10 \text{ } 10^{-2} \text{ g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ の割合が88%であったが、 $>10 \text{ } 10^{-2} \text{ g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ の割合が近年調査データでは約6割まで増加した。交換性カリは、 $8 \sim 15 \text{ } 10^{-2} \text{ g K}_2\text{O kg}^{-1}$ の割合が63%であったが、 $>15 \text{ } 10^{-2} \text{ g K}_2\text{O kg}^{-1}$ の割合が定点調査データで83%、2011年調査では93%と増加した。pHは5.0～6.0の割合が92%と大きく優占していたが、2011年調査では <5.0 の割合が増加した。以上のように、黒ボク土においては、可給態窒素、可給態リン酸、交換性カリ含量は増加傾向にあり、pHは酸性化の傾向にあった。

(5) 稲わら、土壌改良資材施用の実態

第2-6表に県農林水産部資料から集計した稲わら、堆きゅう肥、土壌改良資材の地方、地域ごとの施用面積割合の推移を示した。稲わらの施用面積割合は急激に増加しており、V（2009年～2014年）

第2-6表 各集計エリアの稲わら、堆きゆう肥、土壌改良資材の施用面積割合の推移

		施用面積割合(%)																								
		稲わら(圃場還元)					堆きゆう肥					ケイ酸カルシウム					熔成リン肥					ケイ酸カリ				
		I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
地方別	中通り	22	39	54	55	62	31	23	16	14	12	19	16	9	7	4	41	22	14	10	7	2	8	9	9	
	会津	69	78	84	87	87	15	10	8	8	7	18	11	4	1	2	40	30	11	3	3	4	17	34	29	
	浜通り	46	51	60	73	75	26	25	21	15	15	17	11	9	8	8	32	30	22	12	12	5	8	17	10	
	(全体)	40	52	63	68	72	26	20	15	13	10	18	13	8	5	4	39	26	15	9	7	3	10	17	15	
地域別	中通り	13	17	28	39	50	33	29	25	19	12	19	16	5	4	2	43	19	7	8	7	2	17	16	17	
	県北	19	35	61	58	65	34	23	14	14	12	20	14	13	10	7	41	26	20	14	9	2	5	6	6	
	県中	36	74	64	65	68	24	19	11	10	14	19	20	7	3	2	40	19	10	4	3	2	6	6	5	
	県南	70	79	85	86	86	16	10	8	8	7	17	10	3	1	2	39	28	9	3	3	4	18	35	29	
	会津	65	67	68	93	94	12	15	16	4	5	28	22	14	5	4	46	43	24	7	9	4	8	23	33	
	南会津	51	55	58	67	67	28	26	24	20	21	17	10	7	6	6	31	29	21	8	10	5	7	19	11	
	浜通り	30	40	63	88	90	22	21	13	2	5	16	14	13	13	14	35	32	26	21	17	3	11	10	7	
	相双																									
	いわき																									

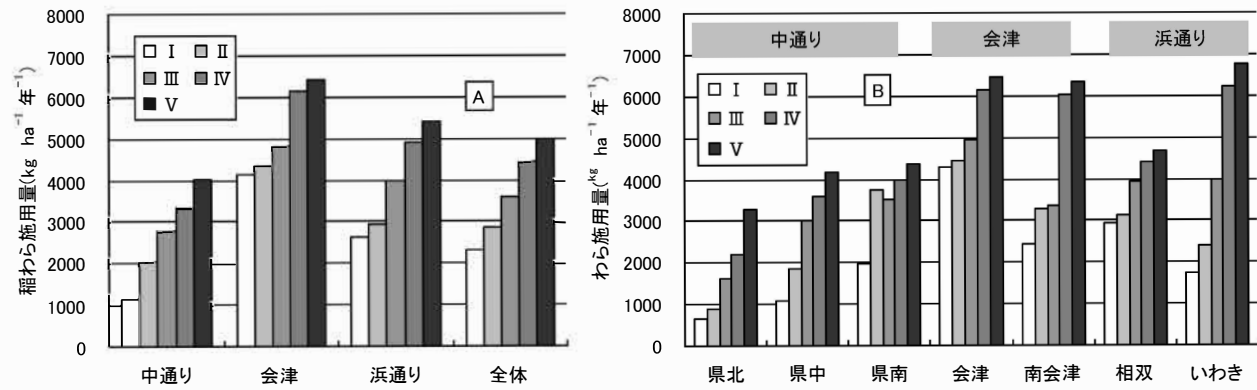
注1) I : 1989年~1993年, II : 1994年~1998年, III : 1999年~2003年, IV : 2004年~2008年, V : 2009年~2014年.

注2)「ケイ酸カリ」のデータはII以降のみ.

の時点で県全体では 72%，特に会津では 87%と高かった．一方，堆きゅう肥の施用面積割合は減少しており，県全体で 10%，最も高いいわき地域においても 21%であった．ケイ酸カルシウム，熔成リン肥の施用面積割合はいずれも急激に減少しており，県全体でそれぞれ 4%，7%であり，比較的浜通りで高かった．Ⅱ（1994年～1998年）以降に登場したケイ酸カリはケイ酸カルシウム，熔成リン肥に比べ施用面積割合が高く，県全体で 15%，特に会津で 29%と高かった．

稲わらは乾物で炭素約 40%，窒素約 1%，リン酸約 0.3%，カリ約 2%，ケイ酸約 10%を含み（農林水産バイオリサイクル研究システム化サブチーム 2006），その圃場還元は土壌養分の増強につながると考えられる．県農林水産部資料から算出した各地方，地域の単位面積当たりの稲わら施用量の推移を第 2-8 図に示した．いずれの地域，区域も稲わら施用量は増加しており，Ⅴ（2009年～2014年）の時点での施用量は会津＞浜通り＞中通りの順で多い．区域によっては 10 倍以上の増加がみられた（県北地域の県北，伊達区域，図表省略）．中通りはⅠ（1989年～1993年）では約 $1200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ 年}^{-1}$ であったものがⅤ（2009年～2014年）では約 $4000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ 年}^{-1}$ （3.5 倍）に増加した．同様に，浜通りは約 $2600 \text{ kg ha}^{-1} \text{ 年}^{-1}$ から約 $5400 \text{ kg ha}^{-1} \text{ 年}^{-1}$ （2.1 倍），会津は $4100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ 年}^{-1}$ から約 $6400 \text{ kg ha}^{-1} \text{ 年}^{-1}$ （1.6 倍）に増加した．

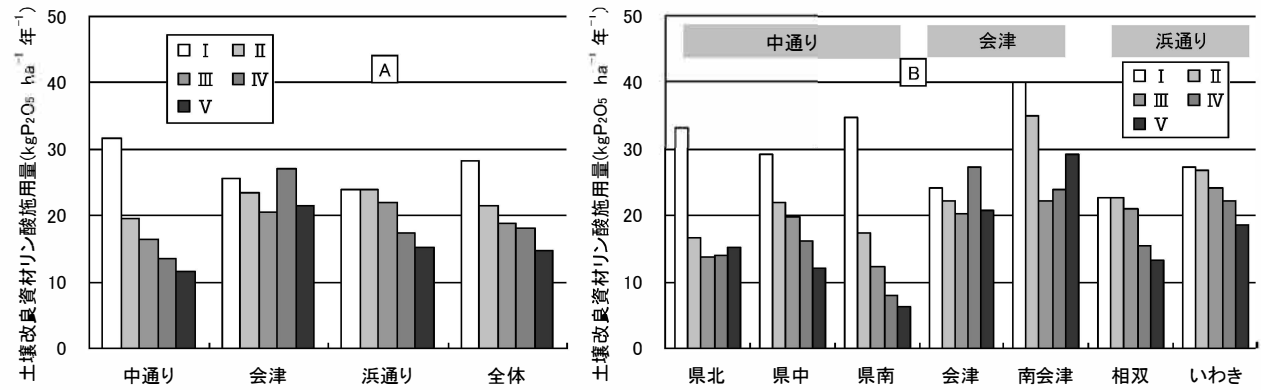
土壌改良資材の単位面積当たりの施用量と各資材のリン酸成分量からもとめた土壌改良資材リン酸施用量の推移を第 2-9 図に，同様にケイ酸施用量の推移を第 2-10 図に示した．いずれも地方，地域に関わらず減少傾向にあり，ケイ酸はリン酸に比べその傾向が強かった．Ⅴ（2009年～2014年）の時点でのリン酸施用量は，稲わら施用量と同様に，会津＞浜通り＞中通りの順で多かった．地域別で見ると，南会津地域で多く，県南地域で少ない．中通りでのリン酸



第2-8図 各地方、地域の稲わら施用量の推移

注1) A: 地方別, B: 地域別,

注2) I: 1989年~1993年, II: 1994年~1998年, III: 1999年~2003年, IV: 2004年~2008年, V: 2009年~2014年。

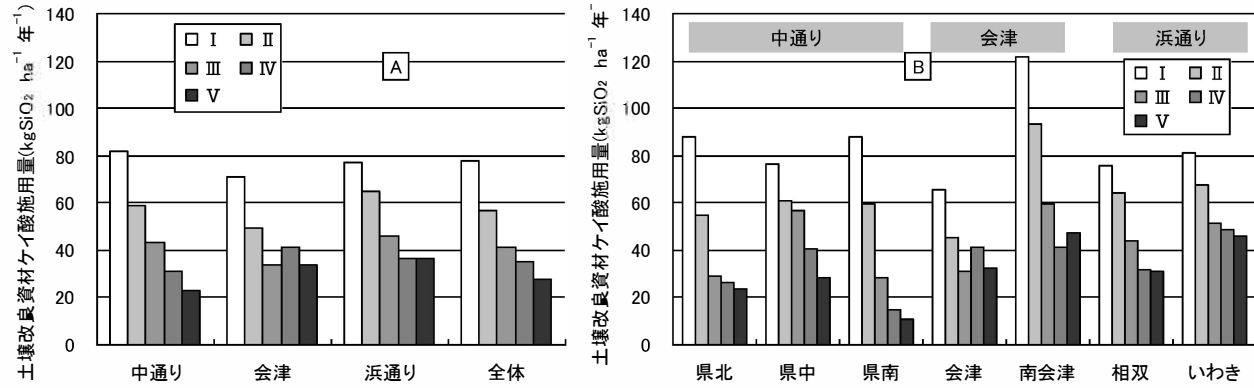


第2-9図 各地方、地域の土壤改良資材リン酸施用量の推移

注1) 福島県農林水産部資料の内、「ようりん」、「ケイカリン」(ケイ酸カリにく溶性リン資材を混合)のデータから算出した。

注2) A: 地方別. B: 地域別.

注3) I: 1989年～1993年, II: 1994年～1998年, III: 1999年～2003年, IV: 2004年～2008年, V: 2009年～2014年.



第2-10図 各地方、地域の土壤改良資材ケイ酸施用量の推移

福島県農林水産部資料の内「ケイカル」、「ようりん」、「ケイカリン」(ケイ酸カリにく溶性リン資材を混合)のデータから算出した。

注1) I : 1989年～1993年, II : 1994年～1998年, III : 1999年～2003年, IV : 2004年～2008年, V : 2009年～2014年。

注2) A : 地方別, B : 地域別。

注3) I : 1989年～1993年, II : 1994年～1998年, III : 1999年～2003年, IV : 2004年～2008年, V : 2009年～2014年。

施用量は，I（1989年～1993年）では約 $32 \text{ kg ha}^{-1} \text{ 年}^{-1}$ であったものがV（2009年～2014年）では約 $11 \text{ kg ha}^{-1} \text{ 年}^{-1}$ （0.36倍），浜通りは約 $24 \text{ kg ha}^{-1} \text{ 年}^{-1}$ から約 $16 \text{ kg ha}^{-1} \text{ 年}^{-1}$ （0.63倍）に減少した．会津は減少割合が比較的小さく，約 $26 \text{ kg ha}^{-1} \text{ 年}^{-1}$ から約 $22 \text{ kg ha}^{-1} \text{ 年}^{-1}$ （0.84倍）に減少した．ケイ酸施用量は会津，浜通り > 中通りの順で多い．中通りのケイ酸施用量の減少割合は他の地方より大きく，約 $82 \text{ kg ha}^{-1} \text{ 年}^{-1}$ から約 $23 \text{ kg ha}^{-1} \text{ 年}^{-1}$ （0.28倍）に減少した．会津は約 $71 \text{ kg ha}^{-1} \text{ 年}^{-1}$ から約 $34 \text{ kg ha}^{-1} \text{ 年}^{-1}$ （0.48倍）に，浜通りは約 $77 \text{ kg ha}^{-1} \text{ 年}^{-1}$ から約 $36 \text{ kg ha}^{-1} \text{ 年}^{-1}$ （0.47倍）に減少した．

2-4 考察

(1) 各土壌養分，化学性の実態に対する考察

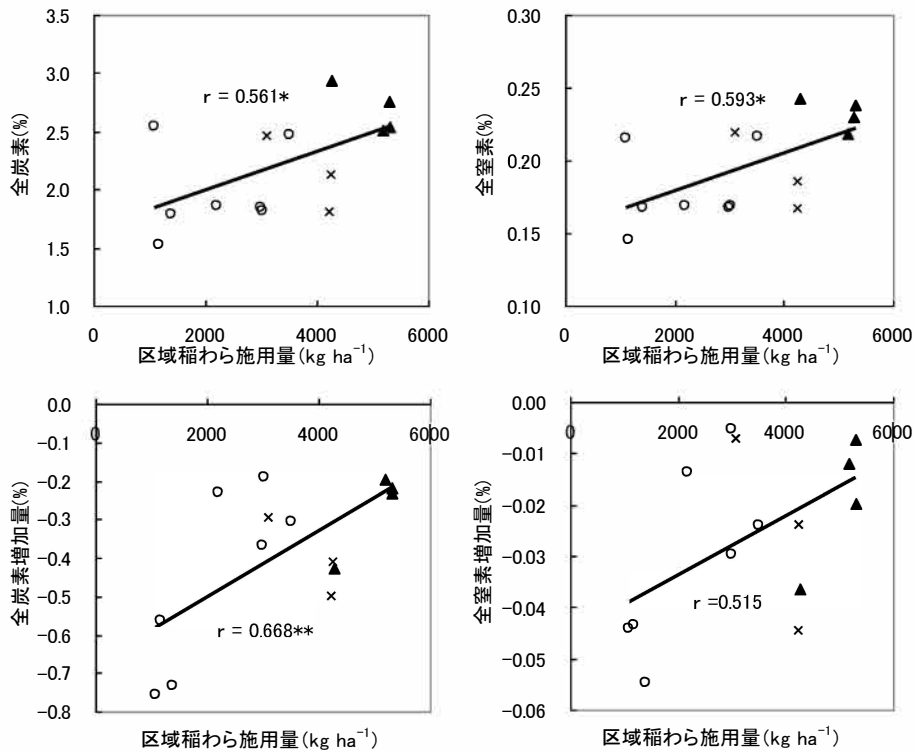
1) 全炭素，全窒素，可給態窒素，CEC

現在，福島県では堆きゅう肥の施用は少なく，稲わら施用が全域で慣行的に実施されている状況にあった．他県での定点調査結果を用いた水田土壌の全炭素や腐植の変動に関する報告をみると，変動が少ない場合が多い（新潟県（本間ら 2016），岩手県（岩手県 2014；2019），滋賀県（堀田ら 2010），秋田県（中川ら 2013），兵庫県（青山ら 2003））．一方，今回，福島県では全炭素および全窒素の減少傾向がみられた．滋賀県，兵庫県の報告では稲わら施用が水田土壌の全炭素の維持に貢献していると推察しており，福島県においても有機物のより積極的な利用が望まれる．CECの大小には粘土鉱物と土壌有機物の負荷電の量が大きく影響する．通常，粘土鉱物は短期間で変質するものではないため，CECの変動は有機物含量，即ち全炭素量の変化に起因すると考えられる．今回，CECの減少が確認されなかった地方，地域においても，全炭素減少に伴うCECの低下が

今後表面化する懸念がある。CEC同様、全炭素、全窒素との関連性が強いと考えられる可給態窒素については、増加した地方、地域が散見され、このことは、稲わら施用においては、全炭素の維持・増加効果に比べ、可給態窒素の維持・増加効果は現れやすいと考えられた。第2-11図に14区域での稲わら施用量と全炭素、全窒素およびそれらの増加量（定点調査データと2011年データとの差）との関係を示した。いずれも正の相関が見られ、稲わら施用が全炭素、全窒素の増加に影響していることが示された。同様の相関図をCEC、可給態窒素で作図し第2-12図に示した。CECでは相関の程度は小さいが同様の傾向が見られた。可給態窒素についてはより高い相関が見られ、稲わら施用の影響が強くと考えられた。現在、可給態窒素については適正地点数の割合は高く、他県で報告されているような低下傾向は見られていないが、このことは、福島県では田畑輪換の実施圃場は少なく水田単作が多いこと、あわせて基盤整備（2017年時点で耕地整備率73.2%、福島県調べ）による乾田化の進行も影響していると考えられる。他県での水田土壌の実態として、転作、畑地化による可給態窒素の減少が報告されており（千葉県（千葉県2015）、長崎県（井上ら2014））、今後福島県においても田畑輪換を実施する圃場が増加すれば可給態窒素の不足地点数割合の増加が予想され、注視する必要がある。

2) 可給態リン酸

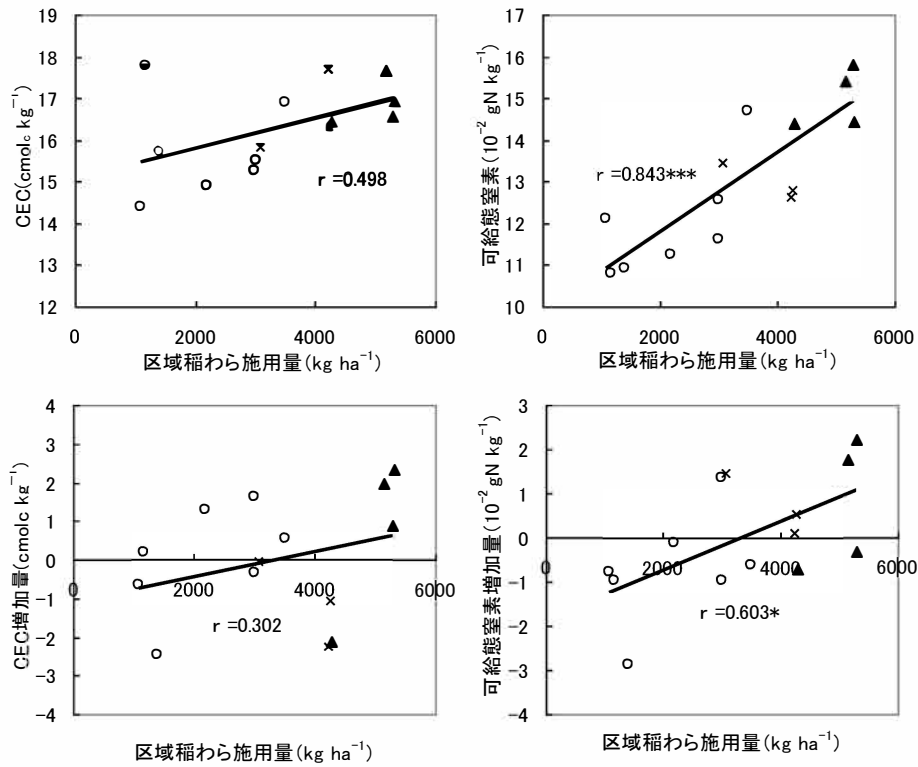
可給態リン酸について、普通畑や樹園地ほどではないが、水田土壌での含量が増加傾向にあるとする報告が多い（農研機構（小原ら2004）、新潟県（本間ら2016）、長崎県（井上ら2014）、兵庫県（青山ら2003）、福井（伊藤ら2002））。一方で、近年、減少傾向にある報告もある（岩手県2019；園田ら2014）。リン酸の増加については、特に田畑輪換により畑作物や野菜を栽培することでリン酸残



第2-11図 区域稲わら施用量と全炭素との関係

注1) 普及管轄単位の14区域のデータをもとに作図。土壌分析値は2011年調査での分析データ。増加量は2011年調査分析データから定点調査分析データを減じたもの。稲わら施用量は1989年以降の25年間の平均値。県内14区域(普及書管轄)単位で集計した。

注2) 凡例は次のとおり。○: 中通り, ▲: 会津, ×: 浜通り。直線は全データによる回帰直線。

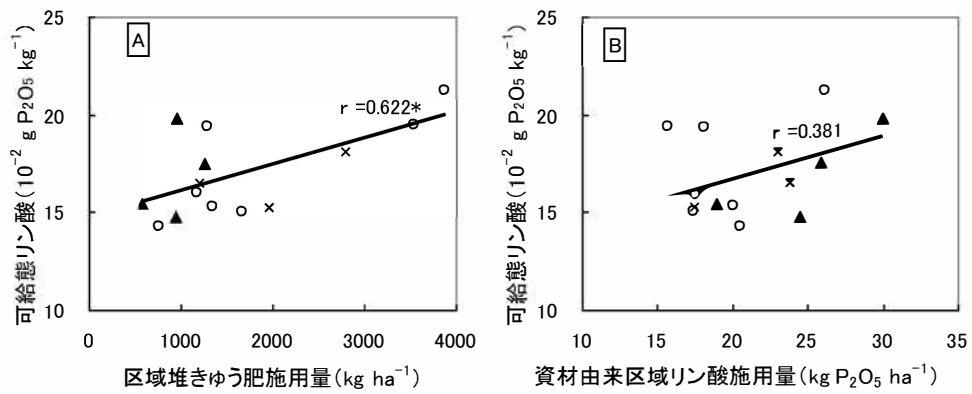


第2-12図 区域稲わら施用とCECおよび可給態窒素との関係

注1) 普及管轄単位の14区域のデータをもとに作図。土壌分析値は2011年調査での分析データ。増加量は2011年調査分析データから定点調査分析データを減じたもの。稲わら施用量は1989年以降の25年間の平均値。県内14区域(普及書管轄)単位で集計した。

注2) 凡例は次のとおり。○: 中通り, ▲: 会津, ×: 浜通り。直線は全データによる回帰直線。

肥が増加する状況がうかがえる。長崎県では30年間で約3倍に増加（井上ら 2014）し、岩手県では約3割の水田が岩手県でのリン酸無施肥可能水準（可給態リン酸 $>30 \text{ } 10^{-2} \text{ g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ ）にあるとしている（岩手県 2019）。第2-13図Aに14区域での堆きゅう肥施用量と可給態リン酸との関係を示した。正の相関が見られ、リン酸の蓄積に堆きゅう肥施用の影響があるものと考えられた。同様の相関図を資材由来リン酸施用量で作図し同図Bに示した。正の相関は見られるものの堆きゅう肥に比べ相関係数は低く、土壌改良資材よりも堆きゅう肥の施用状況が可給態リン酸に影響を与えるものと考えられた。リン酸は土壌に吸着、固定されやすく、作物吸収や浸食以外は系外に移動は少なく土壌中に蓄積しやすいと考えられる。しかし、土壌流亡による湖沼などの富栄養化も問題とされており、経済性の面からも適切な管理が求められる。その含量は中通りで増加傾向、会津で減少傾向、浜通りで横ばいと地域差がみられている（第2-4表）が、適正地点の割合に大きな地域差はなく、各地域とも適正域（ $10 \sim 30 \text{ } 10^{-2} \text{ g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ ）となる地点数の割合が6～7割程度を占め、不足と評価される地点数が2割、過剰される地点数が1割程度を占める（第2-3図）。リン酸等の施肥量削減を目的とした農林水産省委託プロジェクト研究（中核機関：農研機構中央農業研究センター。研究期間：2009年～2013年。）の成果（農研機構中央農業研究センター 2014）によると、水稻作においては、第2-3表で適正域とした $15 \sim 30 \text{ } 10^{-2} \text{ g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ ではリン酸施肥の半減が可能としている。また、安西（2013）は、各府県のリン酸減肥基準値の情報を集め、水田での100%リン酸減肥の基準値は $30 \text{ } 10^{-2} \text{ g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ が適当としている。減肥の視点から、福島県で対象となる水田面積を試算（対象地点数の割合に各地方の水田面積（2010年値）を乗じて算出）すると、基肥リン酸半量減肥可能（可給態リン酸20



第2-13図 区域堆きゅう肥施用量および資材由来リン酸施用量と可給態リン酸との関係

注1) 土壌分析値は2011年調査での分析データ。増加量は2011年調査分析データから定点調査分析データを減じたもの。堆きゅう肥施用量、資材由来リン酸施用量は1989年以降の25年間の平均値。各データは県内14区域(普及書管轄)単位で集計した。

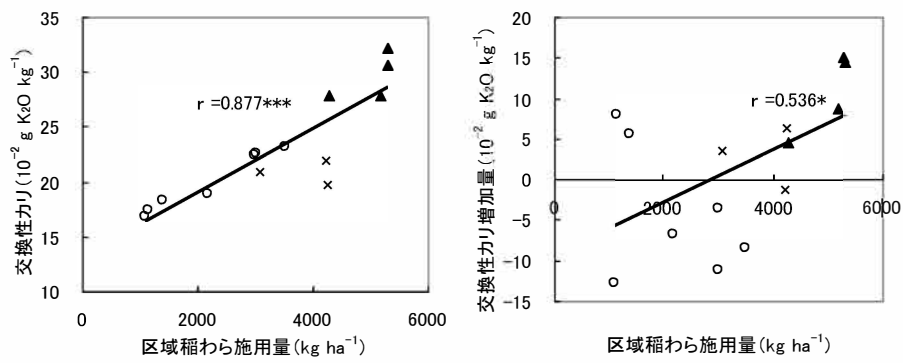
注2) 資材由来リン酸施用量は県資料での「ようりん」、「ケイカリン」(ケイ酸カリにく溶性リン資材を混合した資材)のデータから算出した。

注3) 凡例は次のとおり。○: 中通り, ▲: 会津, ×: 浜通り。直線は全データによる回帰直線。

～ $30 \text{ } 10^{-2} \text{ g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$) な水田面積は中通りで 13237 ha ，会津で 10375 ha ，浜通りで 4567 ha ，黒ボク土で 1039 ha ，合計 29219 ha であり，加えて，全量減肥可能 ($>30 \text{ } 10^{-2} \text{ g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$) な水田面積は中通りで 5310 ha ，会津で 1495 ha ，浜通りで 1087 ha ，黒ボク土で 371 ha ，合計 8263 ha にのぼると推定される．

3) 交換性カリ

交換性カリについて，2011年調査において，定点調査時に比べ中通りは増加傾向，会津，浜通りでは減少傾向にあった．特に会津地方では $18 \text{ } 10^{-2} \text{ g K}_2\text{O} \text{ kg}^{-1}$ から $30 \text{ } 10^{-2} \text{ g K}_2\text{O} \text{ kg}^{-1}$ へと 1.6 倍に増加している．本間ら (2016) は，新潟県では 25 年間で水田の交換性カリがおよそ 1.7 倍に増加しており，その増加は稲わら施用率の変化と対応していると報告している．第 2-14 図に 14 区域での稲わら施用量と交換性カリおよびその増加量との関係を示した．いずれも正の相関が見られ，稲わら施用がカリの蓄積に影響していることを示す．特に交換性カリ含量との相関係数が高く ($r=0.877$)，継続的な施用により，2011年調査の時点では交換性カリの地域差が明確に現れている状態にあることを示すものと考えられた．福沢ら (2014) は交換性カリ含量が高くない ($8 \sim 15 \text{ } 10^{-2} \text{ g K}_2\text{O} \text{ kg}^{-1}$) 青森県内低地土水田で稲わら施用によるカリ減肥試験を行ったところ，稲わら 6000 kg ha^{-1} (K_2O 成分量で 119 kg ha^{-1} に相当) 施用したとき， $25 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ の基肥カリを削減できることを報告している．この報告からすると，施用した稲わらから水稻へのカリ利用率は 20% 程度あるものと見積もられる．また，阿部ら (2014) は稲わらを圃場還元する交換性カリ $20 \text{ } 10^{-2} \text{ g K}_2\text{O} \text{ kg}^{-1}$ 以上の灰色低地土，黒ボク土等で基肥カリ $40 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ を削減しても稲の生育，交換性カリ含量に影響がなかったとしている．稲わら還元量を $5000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ 年}^{-1}$ ，稲わら中のカリ含有率を 2%，稲わらのカリ利用率を 20% としたと



第2-14図 区域稲わら施用量と交換性カリとの関係

注1)普及管轄単位の14区域のデータをもとに作図。

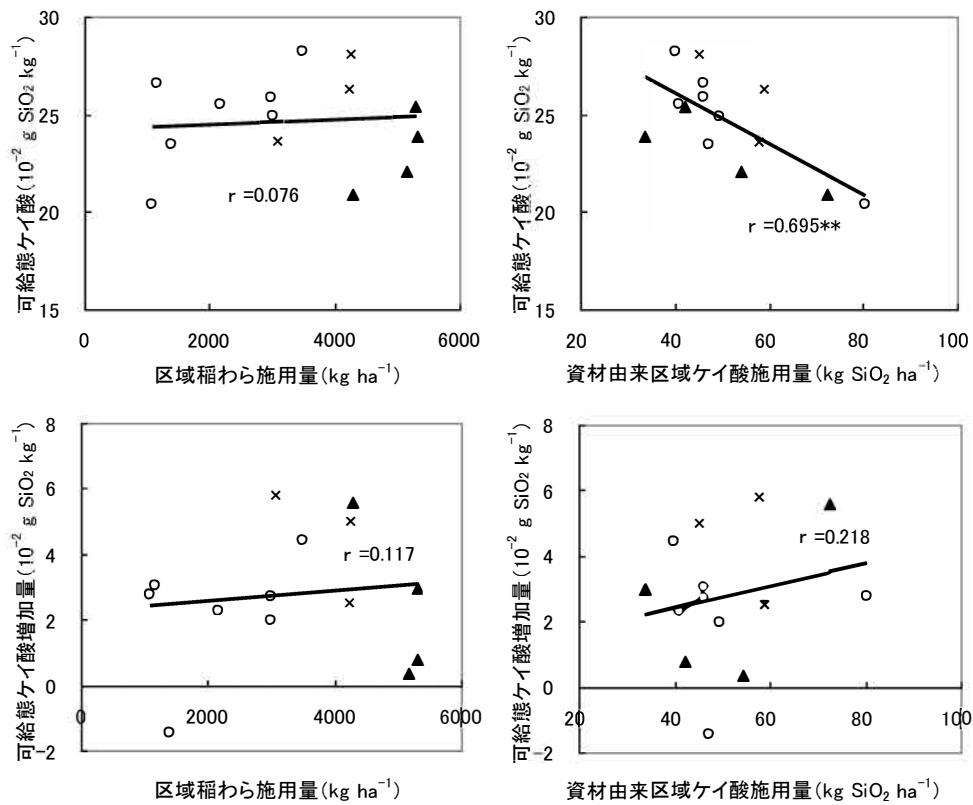
注2)土壌分析値は2011年調査での分析データ。増加量は2011年調査分析データから定点調査分析データを減じたもの。稲わら施用量は1989年以降の25年間の平均値。県内14区域(普及書管轄)単位で集計した。

注3)凡例は次のとおり。○:中通り, ▲:会津, ×:浜通り。直線は全データによる回帰直線。

きのカリ利用量は $20 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ となり，福島県での水稲のカリ肥料施肥基準 $80\sim 100 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ の $20\%\sim 25\%$ を占め，重要なカリ供給源であるとともに交換性カリの維持に大きく関わっているものと考えられる。

4) 可給態ケイ酸

水稲はケイ酸を一作で 1Mg ha^{-1} 程度と多量に吸収する。ケイ酸の水稲生育に対する施用効果として，受光体勢改善を含めた光合成能力向上による生育収量の増進，根の酸化力の活性化，寒冷地水稲におけるいもち病耐性発現などが確認されている（高橋 1987）。また，光合成能力の向上により，収量向上とあわせ玄米中のタンパク質含有率の低下も報告されている（宮森 1996；藤井ら 1999；2002）。さらに，地球温暖化に伴う高温による乳白米等コメの品質低下防止に貢献する（金田ら 2010）とされ，石川県では可給態ケイ酸が目標値以上の水田では賓日照・低温年（2003年）での減収率が低かった（梅本 2015）としている。可給態ケイ酸について，他県の報告では減少傾向にあるとする報告（青森県（青森県 2000），石川県（赤桐ら 2019），兵庫県（青山ら 2003））や可給態ケイ酸不足の圃場が多いとする報告（新潟県（本間ら 2016），富山県（東 2017），福井県（伊藤ら 2002））がみられる。2011年データと定点調査データとの比較により，福島県では可給態ケイ酸は概して増加傾向にあり，不足域と評価される地点数割合も減少していると考えられた。地域差もあるが，およそ3割の水田でケイ酸不足と評価されるため，今後も継続してケイ酸含有の土壌改良資材の施用が求められるが第2-6表や第2-10図に示したようにその施用量は減少傾向にある。第2-15図に14区域での区域稲わら施用量および資材由来区域ケイ酸施用量と可給態ケイ酸およびその増加量との相関図を示した。稲わら施用量と可給態ケイ酸には相関は見られず，稲わら施用が可給態



第2-15図 区域稲わら施用量および資材由来ケイ酸施用量と可給態ケイ酸との関係

注1) 土壌分析値は2011年調査での分析データ。増加量は2011年調査分析データから定点調査分析データを減じたもの。わら施用量、資材由来ケイ酸施用量は1989年以降の25年間の平均値。各データは県内14区域(普及書管轄)単位で集計した。

資材由来ケイ酸施用量は県資料での「ケイカル」、「ようりん」、「ケイカリン」(ケイ酸カリにく溶性リン資材を混合した資材)のデータから算出した。

注2) 凡例は次のとおり。○: 中通り, ▲: 会津, ×: 浜通り。直線は全データによる回帰直線。

ケイ酸の維持，増加の主要因ではないと考えられた．一方で，資材由来ケイ酸施用量と可給態ケイ酸増加量にも明確な相関は認められなかった．可給態ケイ酸と資材由来区域ケイ酸施用量には負の相関が認められ，実態として，可給態ケイ酸が少ない区域ほどケイ酸含有資材を施用している状況がうかがえた．また，東（2017）によると，富山県においては可給態ケイ酸が高い土壌ほど pH は高い傾向があり，ケイ酸カルシウム等の資材の施用との関係が示唆されるとしているが，本報でのデータを用い相関図を作成したがそのような傾向は見られなかった（図表省略）．一方で，茨城県（2016）は，15年以上，9割以上の圃場で稲わら還元が行われている県内水田において，可給態ケイ酸含量が維持されており，稲わら施用が大きく影響していることを報告している．稲わら中のケイ酸はプラントオパールの状態となり，これは風化に対する抵抗力が強く，稲わら施用水田での稲わらから水稲へのケイ酸利用率は6%程度であるとされる（住田 1991）．県全体の稲わら還元量を $5000 \text{ kg ha}^{-1} \text{年}^{-1}$ ，稲わら中のケイ酸含有率を10%，ケイ酸利用率を6%としたときのケイ酸利用量は $30 \text{ kg SiO}_2 \text{ ha}^{-1}$ となり，第2-10図の資材由来計算量とほぼ同等の量となる．稲わら施用量が可給態ケイ酸増加の主たる要因とは認められなかったものの，還元稲わらが重要なケイ酸供給源であり，土壌可給態ケイ酸の維持に大きく関わっているものと考えられる．熊谷ら（1998）が指摘しているように，近年河川上流にダムが造成されたり，水路がコンクリート化されることで灌漑水のケイ酸濃度は急激に低下していると考えられる．土壌の可給態ケイ酸の維持，資材の施用は高品質，多収栽培において重要な役割を果たすと考えられる．

5) pH

土壌の pH は根の伸張など直接植物へ影響を与えるほか，土壌養

分の可溶性に影響し欠乏症あるいは過剰症の要因となる。圃場還元された稲わらの分解の点でも酸性化は腐熟速度の遅延の原因となり、特に水稻生育初期の土壌の強還元に伴う根の機能低下、根量減少を招く恐れを高める。pH について、今回、目標値以下の割合がいずれの地域でも多く、会津、浜通りでは酸性化が進んでいる結果であった。他県でも水田土壌の酸性化が報告されている（青森県（青森県 2000）、新潟県（本間ら 2016）、滋賀県（堀田ら 2010））。滋賀県ではアルカリ分を含む土壌改良資材の施用率の低下と pH 低下の関連性がみられるとしているが、本報のデータを用い、区域ごとのアルカリ分含む土壌改良資材施用率や施用量と pH のデータに相関は見られなかった（図表省略）。しかし、圃場単位での肥培管理の上で、酸性土壌の pH 矯正にはアルカリ分を含む資材の利用が不可欠であり、土壌診断をもとに土づくりを行い、適正化を図る必要がある。

（2）まとめおよび今後の土づくり指針作成に向けた提案

以上のように、2011年に採取した県内水田土壌を用い、養分含量、化学性の現状を明らかにした。また、1990年台の土壌のデータと比較し、増減変動はあるものの、研究開始時に懸念された緊急的に対応が必要なほど悪化している状況にないことが確認できた。一方で、今後の福島県米の食味および水稻生産性の向上を考えた場合、pH の改善やケイ酸肥沃度の向上が重要であると考えられた。また、可給態リン酸については極端に低い圃場はないものの、減肥が可能と考えられる圃場も多いと考えられ、土壌改良資材やリン酸施肥の改善の余地は大きく、蓄積養分の有効利用による施肥コスト削減の点からもリン酸施肥については再考の必要があると考えられた。

他方、福島県での具体的データを示せないが、作土の浅層化が他県で指摘されている（福井県（伊藤 2002）；秋田県（中川 2013））。

浅層化は作業労力重視，大型機械導入による作土下層の圧密化がその原因と考えられ，また，乾田化も土壌の緻密度を高め助長しうる（伊藤 2002）．そのため，他県と同様に，福島県においても作土の浅層化が進行していると考えられる．作土は水稻根の大部分が分布している．作土深が浅いと土壌からの養水分の供給量が少なくなり，その結果，登熟不良による収量，品質低下を招くと考えられる．また，施肥養分の利用率の点からも，耕耘により混合される土壌量が多い方が土壌に吸着され損失も少なくなるものと考えられる．土壌養分のみならず，十分な作土深の確保も肥培管理技術の一つとして留意する必要がある．

福島県での水田土壌での土づくりの現状としては，土壌改良資材の施用は大きく減少し，稲わら施用が慣行的に実施され，それらの施用の有無が土壌養分に影響している状況がうかがえた．特に，稲わらについては，今後の福島県での土づくりを考えるに当たってはその施用の有無を考慮した肥培管理を行っていくことが重要と考えられた．稲わら施用は全炭素や CEC，可給態窒素，交換性カリ，可給態ケイ酸の維持，増強に貢献していると考えられるが，十分量ではなく，補給的に土壌改良資材施用の施用も必要である．福島県でも稲の WCS は拡大傾向にあり，地域的に稲わら還元が大勢を占めるにしても，圃場単位で見れば稲わらが連年持ち出されている圃場も少なくない．稲わら施用を実施しない圃場においては，特に，それらの土壌養分の低下が明確に現れやすいと考えられるため，より積極的な土壌改良資材の使用や施肥量の検討が必要である．現在，福島県においては，水田への土壌改良資材や基肥について，その基準的な施用量は品種や地域で一律となっているが，稲わらの圃場還元の有無を基に別個に設定することが効果的な土づくりを行う上で重要と考えられる．

さらに，土づくりのための土壌改良資材や有機物の施用にあたっては，資材費，散布作業等のコストもかかることから，効率的，効果的に行うためには個別圃場の土壌診断が重要な手立てである．土づくりの啓蒙とあわせ，より積極的な土壌診断の推進が必要である．近年，普及組織あるいは生産者が実施可能な簡易測定法の開発も進んでおり，それらの技術の活用，普及に向けた取組も重要と考える．

第3章 放射性セシウム吸収抑制対策を実施した福島県水田土壤の交換性カリ含量の変動とその土壤要因

3-1 はじめに

東京電力福島第一原子力発電所の事故（以下事故）により，放射性物質が東日本の広い地域に飛散し，福島県の農地においても広範囲で汚染された．2011年産水稻作では，作付け制限等の対策を行ったにも関わらず，当時の一般食品の暫定基準値 500 Bq kg^{-1} を超過する玄米が生産され大きな社会問題になった．水稻への放射性セシウム（以下 RCs）吸収抑制のための研究を2011年から福島県をはじめとした東日本各県と国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構，大学等が協力して実施した（太田 2014）．それらにより，土壤中の交換態としてのカリウム（以下 ExK）含量が RCs の土壤から玄米への移行に大きく影響することが明らかとなり， $\text{ExK} > 250 \text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ を目標とした土壤改良を行うことが提案された（加藤ら 2012）．2012年以降，この成果に基づき，福島県では ExK 含量を高めるため，作付け前の $\text{ExK} > 250 \text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ を目標としたカリ増施（基肥施用時に基肥としてのカリ肥料成分とは別に実施する塩化カリ等による資材の施用，以下上乘せ施用）が行われてきた．施用作業は主に生産者が行い大きな負担となったが，この耕種的対策が功を奏し，福島県が2012年から実施した米の全量全袋検査において，現在の基準値（ 100 Bq kg^{-1} ，2012年施行）を超過した米は2015年以降生産されていない（ふくしまの恵み安全対策協議会 2019）．

事故後，水田土壤中の RCs 濃度は除染や物理的減衰が進んだことで低下しており，また，玄米への移行係数も経年的に低下していることが報告されている（Tagamiら 2018，Yamamuraら 2018）．加えて，上乘せ施用は生産者個人の判断ではなく，市町村や地域協議

会等の単位で継続して取り組まれており ExK の蓄積が地域的に進んでいるものと考えられること等から、今後の上乗せ施用の実施のあり方が議論されている。現時点では、土壤の RCs 濃度から玄米への移行量を正確に把握する手法は確立されていないため、 $\text{ExK} > 250 \text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ を目標値とした ExK 含量の維持が必要である。今後の県内水田でのカリウム施肥のあり方を議論する上で、 ExK の地域的な蓄積量に関する情報は不可欠であるが、福島県では 1998 年に終了した土壤環境基礎調査以後、全県的な農地土壤養分調査は行われておらず、事故後の県内水田土壤の ExK 含量の推移や現状を示すデータが求められた。

農林水産省は、農地土壤の汚染状況の把握のため、農地土壤の放射性物質濃度分布図を作成し 2011 年 8 月に公表した（農林水産省 2011）。その後、より精緻な放射性物質濃度分布図（以下 2011 濃度分布図）を 2012 年 3 月に公表した（農林水産省 2012）。農林水産省は、その作成を独立行政法人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）に委託し、土壤採取調査と RCs 等の放射性物質濃度の測定を行ったが、その分析残土壤試料は福島県農業総合センターの地下室に保管されていた。それらの土壤を用い、2011 年時点の ExK 含量の状況が把握可能であると考えられた。一方で、データは一般公開されていないが、福島県農業協同組合中央会（以下 JA 福島中央会）が農産物の安全・安心確保対策の一環として 2014 年、2017 年に土壤中の RCs 濃度と ExK 含量の測定調査を行った。今回、著者らは、JA 福島中央会からそのデータの提供を受け、2011 年採取土壤のデータと比較し、事故後の ExK 含量の変遷を追跡した。今回のような、広域的に特定の資材が複数年に渡り多量に農地に施用される事例はかつてなく、その効果の実態を明らかにすることの意義は大きい。

福島県ではほぼ全域が放射性物質汚染の影響を受け、深刻な打撃を受けた福島県の水田農業の復興が火急の課題となっている。本研究では、事故後に実施されてきた上乘せ施用の効果を明らかにするとともに、現在の福島県水田土壌 ExK 含量の実態を把握し、効果的な RCs 吸収抑制対策の実現に向けた ExK の増加、保持に関わる土壌要因を明らかにすることを目的に、得られたデータを用い考察した。

3-2 材料および方法

(1) 福島県内水田土壌の交換性カリ含量の状況

1) 2011 年採取土壌

著者らは、2011 年当時の福島県の水田土壌の ExK 含量の状況を把握するため、2011 濃度分布図での土壌試料の分析を行った。当該土壌は、各調査地点に一つの圃場から 5 点法により、表面から約 0.15 m 深までを対象に、2011 年の秋冬に採取され、風乾し 2 mm 目合いの篩をとおした状態に調整後、分布図作成のための RCs 濃度の分析が行われた（農林水産省 2012）。その後、福島県農業総合センターが福島県内で採取された約 2200 点の土壌試料の提供を受け、2012 年から施設地下室に 500 mL または 1000 mL 容の硬質 PVC ねじ蓋付きボトルに充填し保管した。保管土壌の内、地点情報等が明らかな水田土壌（以下 2011 年採取土壌）を分析対象とした。2015 年に保管土壌の一部を取り出し分析を実施した。理化学性として、ExK 以外に、交換性カルシウム（以下 ExCa）、交換性マグネシウム（以下 ExMg）、リン酸吸収係数、CEC、pH の測定を行った。交換性塩基をバッチ法（土壌環境分析法編集委員会 1997）、CEC をホルモー法（山田 1984）、リン酸吸収係数をリン酸アンモニウム液法（土壌環境分析法編集委員会、1997）、pH（H₂O）をガラス電極法で測

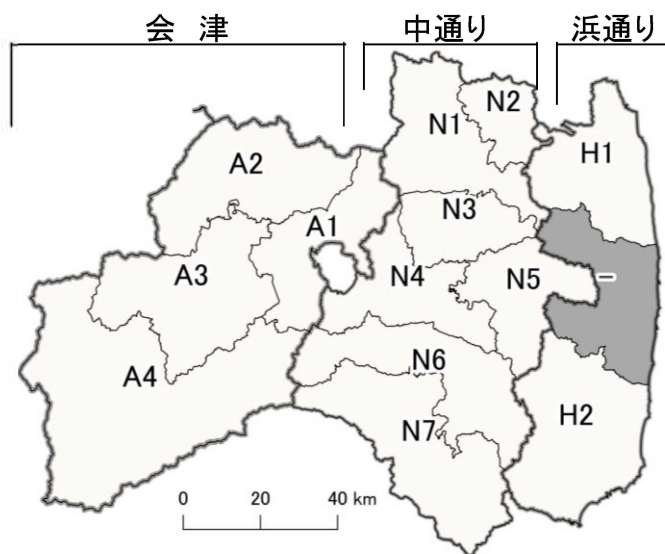
定した。

2) 2014年および2017年採取土壌

JA福島中央会が2014年と2017年に実施した土壌調査での水田土壌（以下，それぞれ，2014年採取土壌，2017年採取土壌）のExK含量データの提供を受けた。それらの土壌採取地点は2011濃度分布図での調査地点を基に設定され，同一圃場で土壌採取が行われた。2011濃度分布図での調査地点863地点に対し，2014年の調査では730地点，2017年の調査では577地点であった。2014年の土壌採取は2014年の秋冬，2017年の土壌採取は2017年の秋冬に行われた。土壌採取方法および分析前の調整方法は，2011年採取土壌と同様であった。ExKはバッチ法（土壌環境分析法編集委員会1997）により民間の分析委託業者により行われた。

3) 交換性カリ含量実態の解析

解析にあたり，第3-1図に示す13の調査区域区分でExK等の分析データや後述する上乗せ施用の施用量を集計した。この区域区分は福島県での農業普及指導組織管轄に対応する。福島県は「中通り」，「会津」，「浜通り」の3地方に区分され，中通りはN1からN7，会津はA1からA4，浜通りはH1およびH2を含む。図中浜通りの「ー」の区域は，事故以降，その大部分が避難指示区域に指定され，営農が断念された地域であり，今回の調査研究の対象としなかった。また，H1内の避難指示区域となった市町村のデータについても集計から除いた。黒ボク土は塩基保持の点で他の土壌と異なる傾向を持つ（和田1997）ことから，リン酸吸収係数が $15 \text{ g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ 以上のものを黒ボク土とし，集計前に各サンプルの土壌タイプの分類を行った。多くの区域では殆どのサンプルが非黒ボク土（5%以内）であった。そこで各区域のデータの集計から黒ボク土のデータは除外した。ただし，N7内に黒ボク土が多く見られる地域があったた



第3-1図 調査区域区分

注) 細線が区域境界線. 太線は地方 (中通り, 会津, 浜通り) 境界線. 各区域は福島県での農業普及指導組織管轄に相当する. 図中灰色部分の「ー」の地域は, 2011年東京電力第一原子力発電所事故以降, その大部分が避難指示区域に指定され, 営農が断念された区域であり, 今回の調査研究の対象としなかった.

め、それらのデータを N7 (An) として別に集計した。それら 14 区域ごとの分析値の平均値を算出した。次に、2011 年～2014 年を期間 I、2014 年～2017 年を期間 II とし、同一地点の ExK 含量の増加量（期末値-期初値）と増加比（期末値/期初値）の平均値を区域ごとに算出した。その算出の際、期初のデータはあるが期末のデータがない場合、それらのデータは除外した。第 3-1 表に各調査での区域ごとのサンプル数と期間 I、期間 II でのサンプル数を示す。

(2) 交換性カリ含量増加に関わる要因解析

上乗せ施用により投入されるカリ肥料の K 成分量（以下カリ施用量）は、ExK 含量増加の最も大きな要因であると考えられる。事故後の各区域の上乗せ施用によるカリ施用量を把握するため、データ収集を行った。また、上乗せ施用による ExK 含量の増加、保持に影響を与える土壌要因について検討した。

1) 上乗せ施用でのカリ施用量の把握

福島県水稲栽培での RCs 吸収抑制対策のための本格的な上乗せ施用は、2012 年作から開始された。資材費用は生産者負担、または市町村独自の補助事業等が活用された場合もあるが、多くは農林水産省の放射性物質吸収抑制のための支援事業（福島県営農再開支援事業、2012 年～）が活用された。その事業活用実績をホームページ等で閲覧でき（東北農政局）、使用資材や施用量について、今回の調査区分での集計が可能であった。各区域の資材施用量を K 成分量ベースで集計し、県統計情報での水稲作付面積で除し、各区域のカリ施用量（ $\text{kg K}_2\text{O ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ）を求めた。さらに、ExK 含量の増加変動との関係性解析のため、期間 I および期間 II の平均施用量を求めた。資材施用は春に行われるため、期間 I は 2012 年～2014 年、期間 II は 2015 年～2017 年のデータを用いた。福島県営農再開支援事業の本格的な活用は 2013 年からであり、2012 年は他の支援事業

第3-1表 各調査のサンプル数および期間 I, II でのサンプル数

土壌 タイプ	地方名	区域名	各調査 ¹⁾ でのサンプル数			各期間の同一調査 地点サンプル数 ²⁾	
			2011年 調査	2014年 調査	2017年 調査	期間 I	期間 II
非黒ボク土	中通り	N1	47	34	14	34	14
		N2	31	29	22	29	22
		N3	99	82	78	82	73
		N4	94	87	84	87	78
		N5	35	29	11	29	10
		N6	110	87	78	87	74
		N7	90	82	70	82	68
	会津	A1	74	67	55	67	52
		A2	72	64	61	64	57
		A3	82	63	23	63	22
		A4	22	12	0	11	0
	浜通り	H1	29	29	25	28	24
		H2	52	40	39	40	36
	黒ボク土	中通り	N7(A _n)	26	25	17	25

1)2011年調査:農林水産省が2011年秋冬に実施した農地土壌放射性物質濃度分布図作成のための土壌調査.2014年調査,2017年調査:JA福島中央会が2014年,2017年に実施した土壌調査.

2)期間 I および期間 II の期初,期末に同一調査地点で採取されたサンプルの数. 期間 I の期初,期末はそれぞれ2011年,2014年,同じく期間 II は2014年,2017年.

(農林水産省東日本大震災農業生産対策交付金)により行われたが、区域ごとの資材施用量に関するデータを収集することができなかった。2012年水稻作では、1) N1, N2, N3に見られた全量生産出荷管理区域においては、RCs吸収抑制対策として上乗せ施用が実施された上で栽培され、施用量が確認できた圃場の多くは60~180 kg K₂O ha⁻¹であった、2) その他の地域ではカリ増施による吸収抑制対策は周知されていたが実施圃場は限定的と考えられる、という状況から、2012年のカリ施用量は2013年施用量の半量程度と考え、2013年施用量の半量を2012年カリ施用量の推定値とし、期間Ⅰの平均施用量の算出に用いた。

2) 上乗せ施用による ExK 増加効果

上乗せ施用の ExK 増加効果の程度と地域性を確認するため、期間Ⅰおよび期間Ⅱの各区域の単位面積当たりの ExK 増加量 (kg K₂O ha⁻¹) を上乗せ施用でのカリ施用量 (kg K₂O ha⁻¹) で除し、増加効率を求めた。単位面積当たりの ExK 増加量は、ExK 増加量 (期末 ExK と期初 ExK の差, mg K₂O kg⁻¹) を用い、土壌仮比重を 1.0 (N7 (An) のみ 0.8)、土壌深度を 0.15 m として算出した。

3) 交換性カリ含量増加に関わる土壌要因

上乗せ施用による ExK 増加効果に影響する土壌要因を明らかにするため、CEC、有効 CEC (交換性塩基当量の総計)、塩基飽和度および K の溶脱の指標となる E_K (交換性塩基中に占める K の当量割合(久保寺ら 2011))と ExK 増加量との関係性について検討した。各区域のそれらの 2011年、2014年時点の平均値を求め、それぞれを期間Ⅰ、期間Ⅱの期間期初値とした。それらを説明変数とし、ExK 増加量 (期末 ExK と期初 ExK の差, mg K₂O kg⁻¹) を目的変数としたときの単回帰分析を行った。CEC のデータは 2014年採取土壌のものはない。農地土壌環境基礎調査結果 (農林水産省生産局

2008)によると, 1994年~1998年調査時の福島県の水田 ($n=588$) での CEC ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) 平均値, 中央値, 標準偏差はそれぞれ 16.3, 15.6, 4.4 であり, 一方, 2011年採取土壌では, それぞれ 16.7, 15.7, 5.2 であった. また, いずれの区域でも, 事故後に, CEC に影響を与える有機物や土壌改良資材の多量施用, 客土等の広域的な実施はなく, CEC の経年変動は少ないと考えられることから, 期間 II での解析においても 2011年採取土壌のデータを用いた. 有効 CEC, 塩基飽和度, E_K 算出での交換性塩基当量の総計の算出には Ca, Mg, K のみのデータを用いた. CEC と同様に, $ExCa$, $ExMg$ のデータも 2014年採取土壌のものはなかった. 対象土壌が水田であり, 石灰, 苦土資材の施用は限定的と考えられるため, 期間 II での塩基飽和度, 有効 CEC, E_K の算出に 2011年採取土壌のデータを用いた.

上乘せ施用による ExK 増加量は, カリ施用量と交換態としての K の保持に関わる土壌要因の関数と考えられる. 2011年から 2017年までの ExK 増加を説明するモデルとして, 期間 I, II での各区域の ExK 増加量を目的変数とし, 説明変数をカリ施用量, 並びに交換態としての K の保持に影響すると考えられた有効 CEC および E_K にカリ施用量を乗じた値としたときの相関図を作成し, 決定係数, RMSE を算出した.

なお, 本研究における統計解析には, エクセル統計 2015 (SSRI) を使用した.

3-3 結果および考察

(1) 福島県水田土壌の ExK 含量の状況

第 3-2 表に 2011年採取土壌の理化学性を示す. 各区域の ExK は $172 \sim 383 \text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ であり, 会津地方の区域で高い傾向が見られた. 当該区域が属する会津地方での稲わら圃場還元を実施する割合

第3-2表 2011年採取土壌の理化学性

土壌 タイプ	地方名	区域名	リン酸吸収係数		pH		CEC		ExK		ExK当量		ExCa当量		ExMg当量	
			g P ₂ O ₅ kg ⁻¹		H ₂ O		cmol _c kg ⁻¹		mg K ₂ O kg ⁻¹		cmol _c kg ⁻¹		cmol _c kg ⁻¹		cmol _c kg ⁻¹	
非黒ボク土	中通り	N1	0.85 ± 0.26	5.46 ± 0.52	15.9 ± 5.1	198 ± 127	0.42 ± 0.3	8.7 ± 3.5	2.5 ± 1.2							
		N2	0.91 ± 0.27	5.52 ± 0.62	17.8 ± 5.4	183 ± 129	0.39 ± 0.3	10.4 ± 3.9	3.4 ± 1.7							
		N3	0.89 ± 0.22	5.57 ± 0.62	15.0 ± 3.6	194 ± 98	0.41 ± 0.2	8.4 ± 2.3	2.4 ± 0.9							
		N4	0.88 ± 0.21	5.51 ± 0.48	15.7 ± 3.9	241 ± 161	0.51 ± 0.3	7.8 ± 2.9	2.2 ± 0.8							
		N5	0.88 ± 0.24	5.60 ± 0.56	14.6 ± 4.4	172 ± 83	0.37 ± 0.2	7.3 ± 2.5	1.5 ± 0.7							
		N6	0.92 ± 0.18	5.51 ± 0.45	15.3 ± 2.8	226 ± 79	0.48 ± 0.2	7.5 ± 2.5	2.1 ± 1.1							
		N7	1.03 ± 0.25	5.29 ± 0.49	17.0 ± 3.8	248 ± 158	0.53 ± 0.3	7.3 ± 2.9	1.7 ± 0.8							
	会津	A1	0.92 ± 0.24	5.15 ± 0.39	17.2 ± 5.2	383 ± 564	0.81 ± 1.2	6.3 ± 2.8	1.5 ± 1.0							
		A2	0.88 ± 0.24	5.30 ± 0.36	17.9 ± 5.4	314 ± 307	0.67 ± 0.7	7.3 ± 3.1	2.2 ± 1.2							
		A3	0.88 ± 0.21	5.25 ± 0.37	16.6 ± 3.5	335 ± 155	0.71 ± 0.3	7.0 ± 2.2	1.7 ± 0.8							
		A4	0.96 ± 0.27	5.25 ± 0.40	16.5 ± 3.9	278 ± 114	0.59 ± 0.2	6.1 ± 2.7	1.2 ± 0.7							
	浜通り	H1	0.98 ± 0.23	5.65 ± 0.47	18.0 ± 5.8	187 ± 85	0.40 ± 0.2	9.1 ± 3.2	3.3 ± 2.0							
		H2	0.91 ± 0.25	5.33 ± 0.54	17.8 ± 5.4	232 ± 125	0.49 ± 0.3	9.2 ± 4.4	3.1 ± 2.0							
	黒ボク土	中通り	N7(An)	1.79 ± 0.22	5.45 ± 0.46	23.3 ± 4.1	302 ± 121	0.64 ± 0.3	8.6 ± 2.8	1.8 ± 0.6						

注) 数値は平均値±標準偏差を示す。

は 8 割程度であり，他区域の中通り，浜通り約 6 割に比べ高く，その影響が大きいものと考えられた．ExCa 当量，ExMg 当量は N1，N2，H1，H2 で他区域に比べ高い傾向にあった．CEC は中通りの区域で低い傾向にあった．第 3-3 表に 2014 年，2017 年採取土壌の ExK 含量と期間 I および期間 II での増加量，増加比を示した．2014 年の ExK 含量は A4 を除き大幅に増加していた．A4 を除いた期間 I の各区域の増加量は，20～313 mg K₂O kg⁻¹，増加比は 1.16～3.31 であった．2017 年の ExK 含量はさらに高まっており，249～527 mg K₂O kg⁻¹ であった．期間 II での各区域の増加量は -33～132 mg K₂O kg⁻¹，増加比は 0.93～1.48 であり，ExK の増加は期間 I に比べ緩慢であった．第 3-2 図に各区域の ExK > 250 mg K₂O kg⁻¹ の地点数の割合の推移を示した．2011 年は中通り，浜通りの各区域での地点数割合は 20～40 % 程度であった．会津の各地域は 50～60 % と高く，対象データ全体の地点数割合は 37 % であった．2014 年は大きく増加し，対象データ全体で 71 % であり，N1，N2，N3 で顕著に増加していた．2017 年は，2014 年から微増または微減の区域が多かった．対象データ全体の地点数割合は 81% で全体的には増加していた．

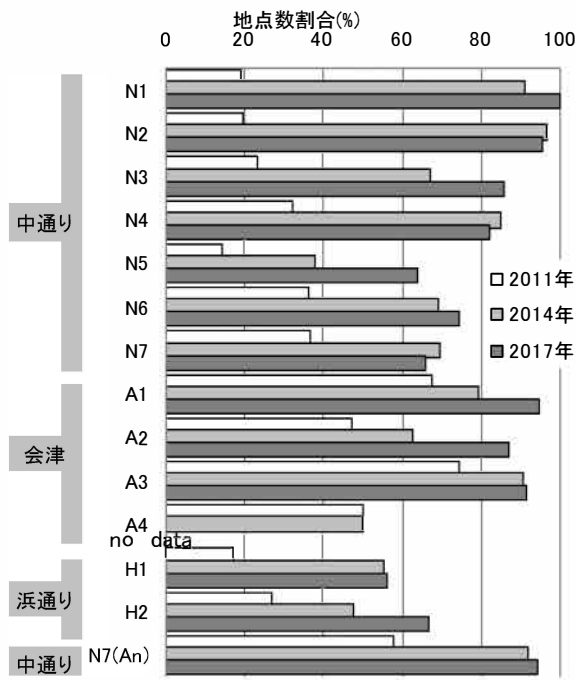
以上のように，事故後の上乗せ施用により，福島県の水田土壌の ExK 含量は 6 年間という短期間で大幅に増加していた．これらのことから，RCs 吸収抑制対策のための ExK 増加という目標は全県的に達成されていると評価できる．事故前に作成された福島県の施肥基準（福島県 2006）では，水田土壌の改良基準の ExK 飽和度は 2～10 % としている．2017 年時点での ExK 飽和度を 2011 年採取土壌の同地点の CEC 値を用い算出したところ，95 % 以上のサンプルはこの改良基準内に収まっていた（図表省略）．なお，福島県内において，ExK 増加による水稻生育や収量，食味値に対する負の影響について報告はなされていない（福島県農林水産部 2014）．

第3-3表 2014年,2017年採取土壤の交換性カリ含量と増加比,増加量

土壤 タイプ	地方名	区域名	ExK (mg K ₂ O kg ⁻¹)		ExK増加量 (mg K ₂ O kg ⁻¹)		ExK増加比	
			2014年調査	2017年調査	期間 I	期間 II	期間 I	期間 II
非黒ボク土	中通り	N1	363 ± 106	495 ± 150	186 ± 95	101 ± 118	2.30 ± 1.0	1.28 ± 0.4
		N2	493 ± 192	455 ± 172	313 ± 92	12 ± 107	3.31 ± 1.2	1.02 ± 0.2
		N3	307 ± 116	456 ± 191	107 ± 68	132 ± 130	1.65 ± 0.5	1.48 ± 0.5
		N4	370 ± 171	395 ± 187	125 ± 82	18 ± 104	1.64 ± 0.5	1.09 ± 0.4
		N5	253 ± 135	249 ± 102	84 ± 117	-33 ± 80	1.61 ± 0.8	0.93 ± 0.2
		N6	321 ± 118	343 ± 131	87 ± 89	16 ± 82	1.44 ± 0.7	1.07 ± 0.3
		N7	337 ± 184	342 ± 158	81 ± 143	5 ± 118	1.38 ± 0.4	1.08 ± 0.3
	会津	A1	421 ± 653	527 ± 722	28 ± 216	85 ± 90	1.16 ± 0.3	1.28 ± 0.3
		A2	369 ± 371	453 ± 392	59 ± 109	79 ± 125	1.23 ± 0.4	1.37 ± 0.5
		A3	435 ± 220	517 ± 190	96 ± 91	132 ± 166	1.30 ± 0.2	1.36 ± 0.5
		A4	248 ± 96	-	-18 ± 63	-	0.98 ± 0.2	-
	浜通り	H1	279 ± 114	314 ± 121	88 ± 74	20 ± 78	1.55 ± 0.5	1.13 ± 0.4
		H2	249 ± 97	303 ± 123	20 ± 148	61 ± 148	1.22 ± 0.6	1.39 ± 0.9
	黒ボク土	中通り	N7 (An)	408 ± 152	457 ± 121	112 ± 111	37 ± 118	1.48 ± 0.6

注1) 数値は平均値±標準偏差を示す。

注2) ExK増加量は、期末のExK含量から期初のデータを差し引いたもの。ExK増加比は期末の値を期初の値で除したもの。期初,期末で同一地点のデータを対象に算出した。



第3-2図 ExK > 250mg K₂O kg⁻¹地点数割合の推移

今回、事故後の福島県内水田土壌の各区域の ExK 含量の変遷と 2017 年時点での ExK の状況が明らかとなった。事故直後及び現時点での ExK 含量の状況を示すデータは、今後の RCs 吸収抑制対策のためのカリ肥料施用方針を策定する上で重要な基盤データとなる。新妻（2018）は ExK が約 $100 \text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ の灰色低地土圃場において、上乗せ施用により約 $400 \text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ まで増加させ水稻を 2 作栽培すると、その後 ExK が約 $150 \text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ まで低下したことを報告している。この報告により ExK 含量の急激な減少を見せる圃場が存在する可能性も否定することはできず、今後、特に上乗せ施用を中止した圃場を中心に引き続きデータの収集を行い、県内水田の ExK 含量の経年変化を把握する必要がある。

（2）上乗せ施用でのカリ施用量の推移と施用効果

第 3-4 表に各区域の上乗せ施用でのカリ施用量（ $\text{kg K}_2\text{O ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ）の推移と期間 I および II の平均施用量を示した。2011 年に高い RCs 濃度の玄米が多く生産された中通り北部の N1, N2 では $250 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ 以上のカリ肥料が施用されていた。中通り中南部の N4~N7 ではその 3 割程度、N3 と浜通りの H1, H2 ではその 5 割程度であった。会津地方の区域は $51 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ 以下と全般に少なく、ExK の増加がみられなかった A4 での上乗せ施用でのカリ施用量は 0 だった。施用資材の多くは塩化カリで、上乗せ施用開始当初はケイ酸カリやゼオライトが用いられることもあったが、その後、塩化カリによる吸収抑制効果が高いことが示され（農林水産省ほか 2014）、期間 II においての使用資材の殆どは塩化カリであった。多量のカリ肥料が施用されていた N1, N2 においても、N1 では 2015 年以降、N2 では 2016 年以降、単位面積当たりの施用量が減少し、およそ半減した。N1, N2 を除き、他の区域の 2017 年時点の施用量は 2013 年時点とほぼ同じであった。

第3-4表 上乗せ施用でのカリ肥料施用量の推移

土壌 タイプ	地方名	区域名	カリ施用量(kg K ₂ O ha ⁻¹ year ⁻¹)								塩化カリの割合 ³⁾	
			2012年 ¹⁾	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	期間平均 ²⁾		(%)	
									期間 I	期間 II	期間 I	期間 II
非黒ボク土	中通り	N1	161	323	286	133	127	118	257	126	86	100
		N2	137	274	330	266	113	108	247	162	99	100
		N3	71	142	139	131	132	128	118	130	99	100
		N4	50	101	124	125	124	125	92	125	100	100
		N5	42	84	84	87	83	84	70	85	100	100
		N6	38	76	78	86	86	86	64	86	100	100
		N7	46	92	69	58	63	54	69	58	98	100
	会津	A1	26	51	50	50	49	59	42	53	77	100
		A2	21	41	41	42	41	39	35	41	97	97
		A3	18	35	117	116	110	60	57	95	79	100
		A4	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
	浜通り	H1	77	155	152	175	75	71	128	107	99	100
		H2	63	126	125	130	132	143	104	135	100	100
	黒ボク土	中通り	N7(An)	52	104	74	57	65	58	76	60	97

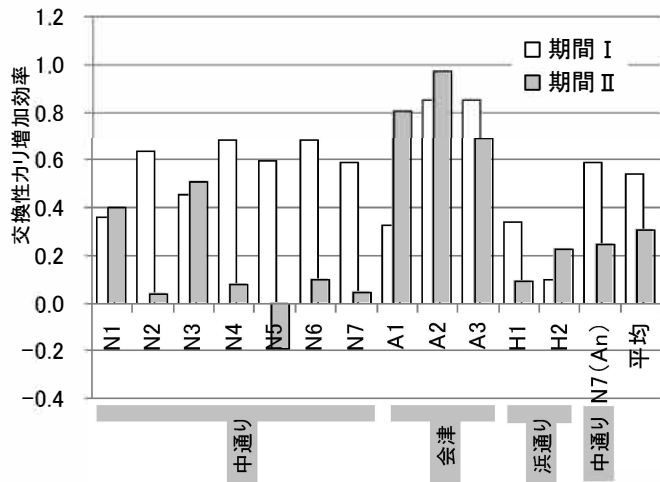
1)2012年は推定値。 2)期間 I を2012年～2014年,期間 II を2015年～2017年とし算出した。

3)塩化カリの割合:カリ成分量ベースで算出した。

第 3-3 図に， E_xK 増加量（第 3-3 表）と上乗せ施用でのカリ施用量（第 3-4 表）を基に算出した E_xK 増加効率を示した．全般に期間 I に比べ期間 II で低下する傾向にあり，平均では 0.54 から 0.31 に減少した．特に中通りで大きく減少する区域が散見された．そのような区域では，期間 II においては期間 I に比べ上乗せ施用による E_xK 増加の効果が少なかったことを示す．期間 II での E_xK 増加効率の低下は，上乗せ施用による土壌中の K の蓄積に伴い， E_xK 保持に関わる土壌要因（以下保持要因）が変動し，その能力が低下したためと推察された．会津地方の区域は他区域よりも高い傾向にあり，これは当該区域が他区域に比べ稲わらの圃場還元が多く，一方で上乗せ施用のカリ施用量が比較的少ないためと考えられた．

（3） E_xK 含量増加に関わる土壌要因

第 3-5 表に期間 I，II の E_xK 増加量に対する各説明変数（上乗せ施用でのカリ施用量，CEC，有効 CEC，塩基飽和度， E_K ）の単回帰分析結果を示した．上乗せ施用開始直後の期間 I において，その施用量は E_xK 増加量と強い有意な正相関が見られた（ $R^2 = 0.71$ ， $p < 0.001$ ）．また，有効 CEC，塩基飽和度については有意な正相関（それぞれ $R^2 = 0.54$ ， $p < 0.01$ ， $R^2 = 0.37$ ， $p < 0.05$ ）が， E_K については有意な負相関（ $R^2 = 0.35$ ， $p < 0.05$ ）が見られた．一方で CEC とは無相関であった．和田・大谷（1997）は，高 pH，高濃度酢酸アンモニウム溶液で測定される CEC 値は必ずしも圃場条件下における陽イオン保持力の良い尺度にはならないと指摘した上で，むしろ有効 CEC を陽イオン吸着容量の尺度とした方が合理的であるとしている．塩基飽和度は，CEC で交換性塩基当量総計，つまり有効 CEC を除いたものであり，今回，各区域の CEC に大きな地域差はなく（第 3-2 表），その結果，有効 CEC と同様の正相関がみられたと考えられた．一方， E_K の算出式にも有効 CEC が含まれる．久保



第3-3図 各区域での交換性カリ含量増加効率¹⁾

1) 単位面積のExK増加量(kg K₂O ha⁻¹)を上乗せ施用でのカリ施用量(kg K₂O ha⁻¹)で除して求めた。

第3-5表 ExK増加量に対する各説明変数の単回帰分析結果

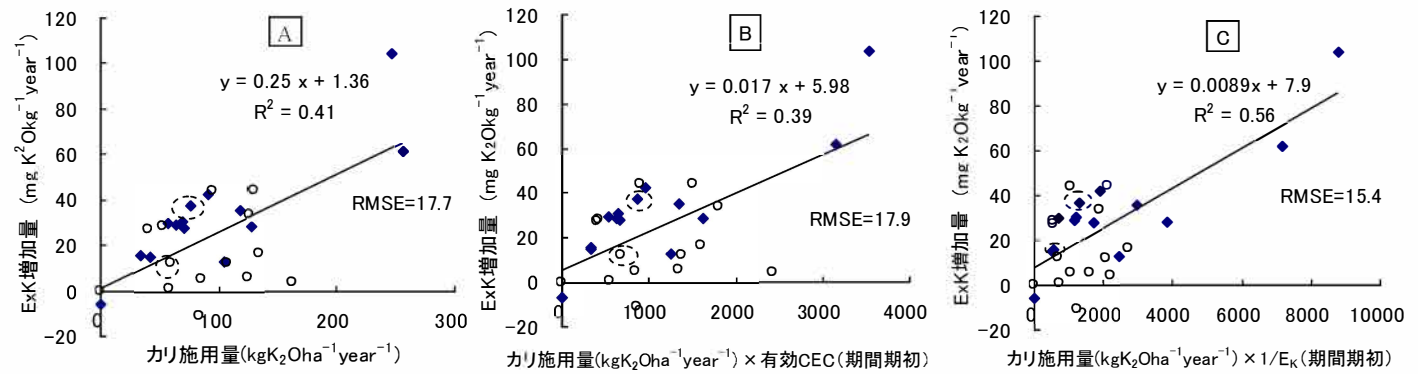
目的変数	説明変数	n	決定係数	切片	傾き	P-値
期間 I ExK増加量 ¹⁾ (mg K ₂ O kg ⁻¹ year ⁻¹) (2011年~2014年)	カリ施用量 ²⁾ (kg K ₂ O ha ⁻¹ year ⁻¹)	14	0.71	3.1	0.3	0.000 ***
	CEC(2011年, cmol _c kg ⁻¹)	14	0.01	17.1	0.9	0.806 ns
	有効CEC(2011年, cmol _c kg ⁻¹)	14	0.54	-259.4	33.3	0.003 **
	塩基飽和度(2011年, %)	14	0.37	-63.3	1.5	0.021 *
	E _k (2011年)	14	0.35	73.0	-780.3	0.026 *
期間 II ExK増加量 ¹⁾ (mg K ₂ O kg ⁻¹ year ⁻¹) (2014年~2017年)	カリ施用量 ²⁾ (kg K ₂ O ha ⁻¹ year ⁻¹)	13	0.04	8.9	0.1	0.492 ns
	CEC(2011年, cmol _c kg ⁻¹)	13	0.01	3.4	0.8	0.728 ns
	有効CEC(2014年, cmol _c kg ⁻¹)	13	0.00	61.0	-0.9	0.919 ns
	塩基飽和度(2014年, %)	13	0.00	20.7	-0.1	0.910 ns
	E _k (2014年)	13	0.05	2.1	217.4	0.478 ns

1) 期末のExK含量から期初のデータを差し引いた値を期間年数(3年)で除して求めた。期間 I の期初,期末はそれぞれ2011年,2014年,同じく期間 II は2014年,2017年。

2) 上乗せ施用でのカリ肥料施用量。

寺ら（2011）は，K 溶脱に関する土壌カラム試験の結果から，溶脱は CEC よりも E_K と関連性が見られ，イオン交換における選択性の影響を強く受けると考えられるとしている．今回の結果は，その報告と矛盾しない．一方で，期間 II ではいずれの説明変数とも有意な相関はみられなかった．先述の増加効率と同様に，期間 II は上乗せ施用開始から 4 年以降の期間であり，塩基が飽和状態に近づき，上乗せ施用による E_xK 増加効果が低くなっていることが推察される．

各区域の上乗せ施用でのカリ施用量と各期間の E_xK 増加量との相関図を第 3-4 図 A に，そのカリ施用量に有効 CEC 並びに E_K の逆数を乗じた値との相関図をそれぞれ同図 B，同図 C に示した． E_K を逆数としたのは先述の期間 I でのカリ増加量との関係が負相関であったためである．カリ施用量のみでの相関モデルの決定係数は 0.41，RMSE は 17.7 であり，これに対し，同図 B での決定係数，RMSE は大きく違わなかった．一方，同図 C では決定係数の向上（0.56），RMSE の低下（15.4）がはかれた．有効 CEC を実圃場条件での塩基保持容量を示すものとした場合， E_K はその中での E_xK の飽和程度を示すと考えられる． E_K の逆数は有効 CEC を E_xK 当量で除した値であり，同図 C の説明変数の値は同図 B での値に E_xK 当量の逆数を乗じたものと等しく， E_xK の飽和程度が含まれていると考えられる．そのため，カリ施用量に E_K の逆数を乗じることで増加量モデルの精度の向上が図られたと考えられた．これらの結果は，施用した K の E_xK としての保持の程度に E_K や有効 CEC が影響することを示し，それらが資材施用時の保持の強弱，保持のしやすさを示す指標となり得ることを示唆する．また，黒ボク土である N7 (An) のデータも他データと乖離していなかった（同図 A～C）．このことは，今回の事故後の上乗せ施用によるカリ増加の効果は黒ボク土と非黒ボク土で大きく異ならず，また， E_xK としての保持の指標とし



第3-4図 上乗せ施用でのカリ施用量と各土壌要因との乗算値とExK増加量との関係

注) 直線は両期間のデータによる回帰直線。図中破線円のデータはN7 (An)のもの。凡例は次のとおり。◆: 期間 I (ExK増加量の期初は2011年, 期末は2014年, カリ施用量は2012年~2014年のデータ), ○: 期間 II (ExK増加量の期初は2014年, 期末は2017年, カリ施用量は2015年~2017年のデータ)。

て E_K ，有効 CEC が土壌種に関わらず有効であることを示唆する。

第 3-6 表に各地方の有効 CEC と E_K の平均値の推移を示した。有効 CEC の地方間差は少なく，一方， E_K については，2011 年時点の会津，浜通りの値は中通りに比べ 1.4～1.5 倍ほど高く，カリ蓄積の効果は 4 割～5 割程度高かったと考えられた。また， E_K はカリの蓄積が進んでいくことで経年的に高まり，2017 年時点での地方間差は縮小していると考えられた。

今回の研究結果から， E_xK 増加の程度に上乗せ施用でのカリ施用量が大きく影響し，保持要因として E_K や有効 CEC との関係性が示された。このことは，その施用量が減少した時の E_xK の維持にそれらが影響する可能性があることを示し，増加した E_xK が急激な減少を見せる圃場の探索やリスク評価への活用が期待される。有効 CEC が小さい土壌は E_K が大きくなりやすいため，そのような圃場でのカリ施用による E_xK 増加の効果は相対的に低くなると考えられ，また，カリ施用量が減少したときの E_xK 含量の減少の程度も大きくなる可能性が高いと考えられる。

一方で，塩基の吸着性や固定は粘土鉱物組成や含量が大きく影響する。RCs を固定する能力は非雲母由来の粘土鉱物よりも雲母由来のバーミキュライトなどで高い（農林水産省ほか 2014）とされ，Hamamoto ら（2018）や久保ら（2016）はバーミキュライトを多く含む土壌は K の固定サイトが多いため固定化されやすく，交換態としての K 量が少なることを報告している。また，福島県内の水田土壌の粘土鉱物組成について，バーミキュライト質土壌の分布は限定的でスメクタイト質土壌が多い（佐野ら 2011）とされ，江口ら（2018）はスメクタイト質土壌でカリ増施による E_xK 増加効果が高いことを報告している。今後は E_xK の保持に関わる土壌要因の検討のために，粘土鉱物組成も含めた解析が必要であると考えられる。

第3-6表 各地方ごとの有効CEC、 E_K の推移

地方名	有効CEC (cmol _e kg ⁻¹)			E_K		
	2011年	2014年	2017年	2011年	2014年	2017年
中通り	10.7 a	10.9 a	11.0 a	0.035 a	0.056 a	0.063 a
会津	10.0 a	10.1 a	10.8 ab	0.050 b	0.058 a	0.068 a
浜通り	9.5 a	9.6 a	9.7 b	0.053 b	0.061 a	0.070 a

注1) 中通りはN1～N7, 会津はA1～A4, 浜通りはH1, H2のデータを用い, 平均値を算出した.

注2) 異なるアルファベット間には5%水準で有意差あり(Tukey法).

第4章 小型カリウムイオンメーターによる土壌交換性カリ含量簡易測定の確度向上のための改良

4-1 はじめに

2011年3月の東京電力福島第一原子力発電所の事故にともない、福島県を中心とした広範囲の農地土壌に放射性セシウムが飛散し、農作物への吸収移行が大きな問題となっている。セシウムはカリウムと化学的性質が似ており、福島県では、農作物の放射性セシウム吸収抑制のため、農地へのカリ肥料の増施および適正施用の指導を徹底している。カリ肥料の施用量を決定するためには土壌分析による土壌交換性カリ含量（以下交換性K）の測定が必要となる。常法の交換性K測定ではその抽出に数時間要するので、しばしばバッチ法により測定される（土壌環境分析法編集委員会，1997）。すなわち、 1.0 mol L^{-1} 濃度の酢酸アンモニウム溶液（以下AAs）で1時間振とう抽出した液中のカリウムを原子吸光光度計等の精密分析機器により定量する（以下従来法）。そのため、生産者等が自ら測定を行うことは難しく、分析機関に頼らざるを得ない状況にある。そのような中、目標値あるいは基準値から大きく過剰、過少であるかの判断を可能にする、より簡易な現場対応型の測定法が求められていた。

他方、農耕地土壌の実態と推移の把握を目的として実施された土壌環境基礎調査（定点調査）の結果、農地における交換性Kは全国的には蓄積傾向にあり（小原・中井，2003）、水田においてカリウム過剰とされる割合は29%、その他の農地においても同様の傾向がみられる（農林水産省，2009）。簡易測定法の開発は、土壌分析の実施頻度の向上につながり、蓄積養分の有効利用、施肥費用縮減の一助となる。また、鳥山（2001）、森塚（2009）が示したように、一筆圃場内での土壌肥沃度の不均一性が存在するため、実際の生産現場では圃場スケールでの土壌養分の評価と対応が必要である。そ

のためにも，土壤養分の簡易分析手法は有効な生産者支援技術となる．

筆者は小型カリウムイオンメーターによる交換性 K の簡易測定法を開発した（中山，2013；中山，2014）．使用したイオンメーターのセンサーに対し， NH_4^+ は妨害イオンであり，本来 K^+ が含まれていない AAs でも測定値が表示される．この方法では，ブランク値を低くするため抽出液にバッチ法での 1.0 molL^{-1} AAs よりも低濃度の 0.1 molL^{-1} AAs を用い，土液比 1:2 の振とう抽出で得られる上澄み液を測定試料とする．測定には小型カリウムイオンメーターを用い，その測定値からブランク値を差し引いた値と従来法の交換性 K には高い正の相関が見られ，換算係数を乗じることで交換性 K を求める．福島県では農業普及所等で実際に活用されているが，土壤試料によっては従来法値から大きく外れるケースがみられることもあり，その確度（簡易測定法により求めた交換性 K と従来法での交換性 K との統計的な乖離の程度）の向上が望まれている．さらに，イオンメーターの特性により，AAs による土壤試料抽出液を連続測定した時に，機器の測定ベースライン（以下 BL）が徐々に低下する，すなわち，供試液測定値およびブランク値の測定結果が低濃度側にゆっくりとシフトし続ける現象が認められ，簡易測定法の確度への影響が懸念された．小型カリウムイオンメーターを用いた交換性 K の測定については，他に村主ら（2013）が報告しており，ブランク値を抑えることを目的に，土壤試料抽出液に 0.003 molL^{-1} 濃度の硫酸アンモニウム溶液を用いている．この方法と中山（2013）の 0.1 molL^{-1} AAs での方法で複数の同一土壤試料を測定したところ，明らかに前者で乖離の程度は大きく，あわせて，BL 変動も認められた．

そこで，本研究では，確度を高めるための測定法の改良と測定機

器の BL 変動に対応するための換算式の検討を行った。検討にあたり、広範囲の交換性 K のサンプルを測定対象にできることに加え、福島県では農地面積の約 6 割が水田でありその 9 割以上のほ場の交換性 K は $40 \text{ } 10^{-2} \text{ gK}_2\text{O kg}^{-1}$ 未満である（中山，未発表）こと、併せて前述の放射性セシウム吸収抑制対策の交換性 K 目標値が 25～40 $10^{-2} \text{ gK}_2\text{O kg}^{-1}$ （福島県農林水産部，2017；福島県農林水産部，2018a，2018b）であることを鑑み、 $40 \text{ } 10^{-2} \text{ gK}_2\text{O kg}^{-1}$ 未満のサンプルでの確度が高いことを目標に行った。また、従来法測定値との乖離の要因について考察した。

なお、交換性 K の単位は、従来、 $(\text{mgK}_2\text{O } 100 \text{ g}^{-1})$ が用いられているが、本報では SI 単位を用いるため、 $(10^{-2} \text{ gK}_2\text{O kg}^{-1})$ と表記した。

4-2 材料および方法

（試験 1）改良した簡易測定法の試行と既報測定法との比較

同一土壌試料を用い、既報および改良した簡易測定法での測定を行い、それらの測定結果と従来法交換性 K との相関図を作成し、回帰式および決定係数を求め比較した。併せて、回帰モデルで誤差を評価する指標として、二乗平均平方根誤差（以下 RMSE）を求めた。データの解析にあたっては、全供試土壌によるもの（以下全供試データ）と交換性 K が $40 \text{ } 10^{-2} \text{ gK}_2\text{O kg}^{-1}$ 未満の供試土壌によるもの（以下低交換性 K データ）の 2 つに分けて行った。

（1）供試土壌

福島県内の農家ほ場から採取した合計 86 点の作土（約 15cm 深まで）土壌を試験に供した（第 4-1 表）。地目別では水田 19 点（うち黒ボク土 2 点）、普通畑 22 点（同 3 点）、施設畑 5 点（同 1 点）、樹園地 10 点（同 0 点）、草地 30 点（同 6 点）であった。試料を風乾

第4-1表 供試土壌

地目	試料数	うち従来法での 交換性K ($10^{-2}\text{gK}_2\text{O kg}^{-1}$) が<40の試料数	土壌種 ¹⁾ 別の 試料数		従来法での 交換性K ($10^{-2}\text{gK}_2\text{O kg}^{-1}$)		CEC (陽イオン交換容量) ($\text{c mol}_\text{c}\text{kg}^{-1}$)	
			非黒ボク土	黒ボク土	範囲	平均値	範囲	平均値
水田	19	17	17	2	10.6 - 39.3	27.7	8.4 - 35.1	19.3
普通畑	22	11	19	3	8.5 - 167.6	47.1	7.9 - 25.0	15.9
施設畑	5	1	4	1	18.6 - 208.9	81.6	11.5 - 25.8	17.2
樹園地	10	4	10	0	5.6 - 176.5	72.6	9.6 - 38.2	20.0
草地	30	13	24	6	10.0 - 122.5	47.1	7.9 - 23.4	15.2
(全体)	86	46	74	12	5.6 - 208.9	48.2	7.9 - 38.2	17.0

1) リン酸吸収係数($\text{gP}_2\text{O}_5 \text{kg}^{-1}$)が15.0未満のものを非黒ボク土とした。

後、軽く砕いて礫を除き、2mm以下の画分のみを供試した。従来法を用いた供試土壌の交換性Kの範囲は $5.6 \sim 208.9 \text{ } 10^{-2} \text{ gK}_2\text{O kg}^{-1}$ であり、そのうち46点は40未満であった。

(2) 分析方法

1)従来法での交換性Kの定量

バッチ法を基に、2gの土壌に 1.0 molL^{-1} AAs25mlを加え、1時間振とう後、アドバンテック東洋社製のNo.5Bのろ紙でろ液を採取した。竹内(1991)を参考にセシウムを干渉抑制剤とし、適宜ろ液を希釈後フレイム式原子吸光光度計(VARIAN AA280FS)により交換性Kを定量した。

2)簡易測定法での測定計器および抽出、測定方法

簡易測定法でのカリウムの測定には、既報と同じく小型カリウムイオンメーター(HORIBA LaquaTwin B-731、測定原理：イオン選択性電極法)を用いた。本計器はサンプル液中の K^+ 濃度(mgL^{-1})を測定する。その分解能は、液中の K^+ 濃度が 100 mgL^{-1} 以下の場合 1 mgL^{-1} 単位であり、 100 mgL^{-1} を超えると 10 mgL^{-1} 単位となる。

抽出、測定法は、既報の測定方法(0.1 molL^{-1} AAsによる土液比1:2で10分間振とうし抽出した上澄み液(以下供試液)を原液のままイオンメーターで測定。以下低AAs抽出測定)とあわせ、改良法として、抽出液に従来法と同じ 1.0 molL^{-1} AAsを用いた次の方法も試行した。10gの土壌に 1.0 molL^{-1} 濃度のAAsを20ml加え、10分間振とう後、静置して得られる上澄み液を供試液とした。供試液測定時に、同量の脱塩水をセンサー部にピペットにより滴下し、十分混合した状態で測定した(以下高AAs抽出測定)。2倍に希釈するのは、ブランク測定時に、 1.0 molL^{-1} AAsでは計器測定値が 100 mgL^{-1} を超え、読み値の分解能が低下することに対応するためである。 0.1 molL^{-1} AAsおよび 1.0 molL^{-1} AAsのpHは7.0に調整した。

測定は反復なしで行った。どちらの簡易測定法においても、供試液の測定毎に、その測定直前のブランク値を測定した。計器の校正は計器に付属する $K+150 \text{ mgL}^{-1}$ 液を用いた 1 点校正により行った。ブランクおよび供試液の測定のタイミングはイオンメーターの測定値安定マークが表示された時点（通常、試料添加から 5 秒程度で表示された）とした。

（試験 2）簡易測定法の交換性 K への換算式の決定と確度の評価

カリウムイオンメーターを連続測定した場合にみられる BL の変動が高 AAs 抽出測定の測定値と従来法交換性 K との相関関係に与える影響を明らかにするため、BL の水準を一定範囲に数段階設定し、同一サンプルの測定を行った。BL の水準の調整は、センサー部に AAs を滴下し、30 分～2 時間程度静置することで行った。また、その水準をブランク値により判断した。試験は BL 水準 I～III の 3 水準（ブランク値 (mgL^{-1}) の範囲は I : 58～62, II : 42～48, III 36～40) で行った。なお、いずれの測定においても計器本体およびセンサー部は同一のものを使用した。供試土壌、および簡易測定の測定方法は試験 1 と同様である。

測定したデータから、既報と同様に、供試液測定値と各供試液測定直前のブランク値の差（供試液測定値 - ブランク値、以下減法値）を算出した。事前に実施した予備試験において、同一の供試液による BL 変動前後の測定値とそれぞれの BL 水準でのブランク値との比は同程度であることが観察された。このことから、減法値と併せて、今回新たに両者の比（供試液測定値 / ブランク値、以下除法値）を算出した。それらの値と従来法測定値との関係を BL 水準ごとに比較した。その後、全供試データおよび低交換性 K データのそれぞれで得られた測定結果を用い、簡易測定法での測定値から交換性 K への換算式を決定した。また、その確度の評価のため、各換算式に

ついて、独立変数（簡易測定法での測定値）に対する従属変数（従来法交換性 K）の予測値の 95%信頼区間（以下 95%予測区間）を求めた。

（試験 3）簡易測定法交換性 K の乖離の要因

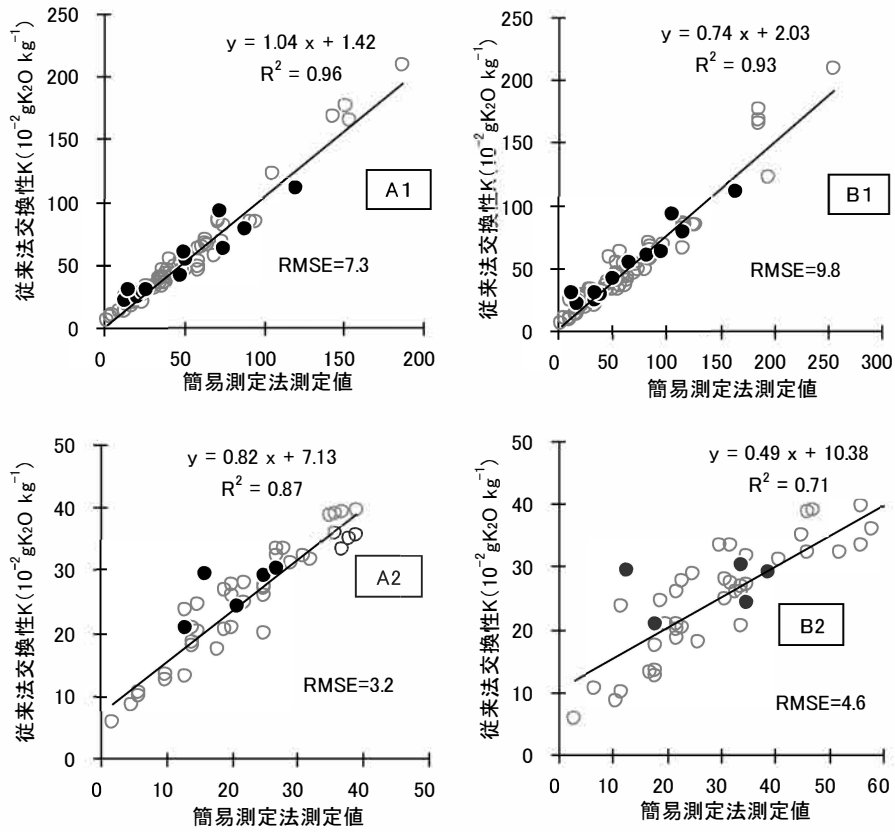
簡易測定法交換性 K の従来法測定値からの乖離の要因を明らかにするため、供試土壌の陽イオン交換容量（以下 CEC）、および簡易測定で抽出した際の供試液の pH が従来法交換性 K と簡易測定法交換性 K との比（簡易測定法交換性 K / 従来法交換性 K、以下乖離比）に与える影響を調査した。供試土壌の CEC をホルモール法（山田,1984）により測定した。試験 1 での簡易測定法の供試液の pH を HORIBA LaquaTwin B-712（測定原理：ガラス電極法）により測定した。

4-3 結果および考察

（1）簡易測定法の測定値と従来法交換性 K の関係

試験 1 で行った高 AAs 抽出測定での供試液測定直前のブランク値（ mgL^{-1} ）は 58~62、低 AAs 抽出測定では 13~14 であった。測定結果から求めた減法値と従来法での交換性 K には高い正相関が見られ、黒ボク土も他の土壌と同様の傾向であった（第 4-1 図）。低 AAs 抽出測定での結果（同図 B1, B2）に比べ、高 AAs 抽出測定での決定係数は高く、かつ、RMSE は小さく（同図 B1, B2）、改良法である高 AAs 抽出測定でより高い相関と適合性が認められた。また、全供試データでの結果（同図 A1）に比べ低交換性 K データ（同図 A2）での RMSE は小さいことから、交換性 K を算出する換算式の決定に際しては、交換性 K の濃度ごとに換算式を別に設定することで、精度の向上が図られると考えられた。

高 AAs 抽出測定と低 AAs 抽出測定の 2 つの簡易測定法での抽出



第4-1図 簡易測定法での測定値(減法値)と従来法での交換性Kとの関係

A1: 高AAs抽出測定における全供試データでの結果, A2: 同測定法における低交換性Kデータでの結果, B1: 低AAs抽出測定における全供試データでの結果, B2: 同測定法における低交換性Kデータでの結果.
凡例は次のとおり. ○: 非黒ボク土, ●: 黒ボク土

注1) 簡易測定法測定値: サンプル測定値(mgL^{-1}) - 直前のブランク値(mgL^{-1})

注2) 全供試データ($n=86$)の従来法での交換性K($10^{-2}\text{gK}_2\text{O kg}^{-1}$)は5.6~208.9, 低交換性Kデータ($n=46$)は5.6~39.6.

率(減法値から求めたカリ含量に対する従来法での交換性 K の割合)は、前者で高く、抽出率の向上が見られた(第 4-2 表)。一方、両簡易測定において、抽出率について土壌種による有意差はなかった。同様に、非黒ボク土の中で各地目間での結果にも有意差はなかった。また、両簡易測定法でのカリ含量測定値の比も同様の結果であった。これらのことから、両簡易測定法において、土壌種、地目の違いがカリウムの抽出に与える影響は小さいと考えられた。

(2) 測定ベースライン水準の変動が供試液測定値に与える影響

試験 2 で行った高 AAs 抽出測定での測定結果から算出した除法値および減法値と従来法交換性 K との関係を示した。除法値、減法値ともに従来法交換性 K と正相関が見られたが、除法値での回帰直線の傾きは、BL 水準に関わらずほぼ同じであった(同図 A)のに対し、減法値では、BL の水準が異なる場合その回帰直線の傾きは大きく異なった(同図 B)。このことから、除法値を簡易測定法での測定値(以下簡易測定法測定値)として採用することとした。

連続測定時の BL の低下の原因は不明であるが、この現象は、測定する溶液に NH_4^+ が含まれる場合に見られる。本計器のセンサーは、単に AAs 中の NH_4^+ を K^+ として誤感知しているだけでなく、AAs 中の電解物質により、センサー部のイオン応答膜が、一時的に電氣的な障害を受けた状態となっている可能性が考えられた。

(3) 簡易測定法測定値の換算式の決定と確度の評価

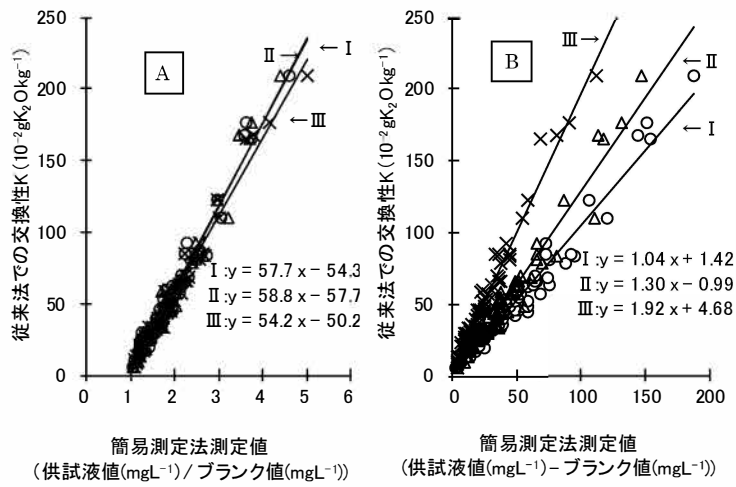
試験 2 の測定データを用い、一方は、全供試データ、もう一方は、低交換性 K データのみでの簡易測定法測定値と従来法交換性 K との相関係数、回帰式を求め第 4-3 表に示した。低交換性 K データにおいても、第 4-2 図での結果と同様に、BL の水準が異なる場合でもそれらは大きく違わなかった。次に、各回帰式を換算式としたとき、簡易測定法測定値から求められる交換性 K の 95% 予測区間を同表に

第4-2表 2つの簡易測定法での交換性カリ抽出率とカリ含量測定値比

土壌種/地目	試料数	交換性カリ抽出率 (%) ¹⁾				カリ含量測定値比 ²⁾	
		高AAs抽出測定		低AAs抽出測定		平均	標準偏差
		平均	標準偏差	平均	標準偏差		
黒ボク土	12	44	10	30	8	1.54	0.34
非黒ボク土	74	44	8	30	7	1.48	0.30
(水田)	17	42	9	28	9	1.59	0.34
(普通畑)	19	43	5	32	5	1.38	0.27
(施設畑)	4	41	4	30	3	1.36	0.08
(樹園地)	10	41	9	32	9	1.32	0.19
(草地)	24	46	9	30	5	1.55	0.33

- 1) 各簡易測定法測定値(サンプル測定値(mgL⁻¹)-直前のブランク値(mgL⁻¹))から求めたカリ含量(10⁻²gK₂O kg⁻¹)に対する従来法での交換性カリ含量(10⁻²gK₂O kg⁻¹)の割合.
- 2) 高AAs抽出測定でのカリ含量(10⁻²gK₂O kg⁻¹)/低AAs抽出測定でのカリ含量(10⁻²gK₂O kg⁻¹).

注1) 土壌種間および地目間の有意性検定はいずれの項目でも有意差なしであった(それぞれ、Studentのt-検定、Tukeyの多重検定).



第4-2図 測定ベースラインの水準が異なる条件における高
AAs 抽出測定での測定値計算法が従来法交換性K
との関係に及ぼす影響

A: 簡易測定法測定値を除算値としたとき, B: 減算値としたときの結果.
凡例は次のとおり. BL水準 I : O, 同 II : Δ, 同 III : ×.
注1) 測定ベースライン(BL)水準 I, II, IIIのブランク
値(mgL⁻¹)の範囲はそれぞれ58~62, 42~48, 26
~29.

第4-3表 測定ベースライン水準変動試験での除法による簡易法測定値と従来法交換性Kとの関係および95%予測区間

対象 データ ¹⁾	n	簡易測定法 測定時の 測定ベースライン の水準 ²⁾	簡易測定法値と交換性Kとの関係			95%予測区間 ⁵⁾		
			相関係数 ³⁾ (r)	回帰式 ⁴⁾ ($Y = (X_1/X_2) \times a + b$)		(10 ⁻² gK ₂ O kg ⁻¹)		
				a	b	最大幅	最小幅	平均
全供試 データ	86	I	0.985 ^{***}	57.7	-54.3	±14.4	±12.9	±13.4
		II	0.987 ^{***}	58.8	-57.7	±13.1	±12.0	±12.3
		III	0.990 ^{***}	54.2	-50.2	±12.1	±10.8	±11.2
		(平均) ⁶⁾	0.990 ^{***}	57.1	-54.5	±11.6	±10.5	±10.8
低交換性K データ	46	I	0.934 ^{***}	50.1	-43.3	±6.7	±6.4	±6.5
		II	0.932 ^{***}	44.7	-37.6	±6.8	±6.5	±6.6
		III	0.925 ^{***}	48.9	-42.6	±7.1	±6.8	±6.9
		(平均) ⁶⁾	0.944 ^{***}	49.2	-43.0	±6.1	±5.9	±6.0

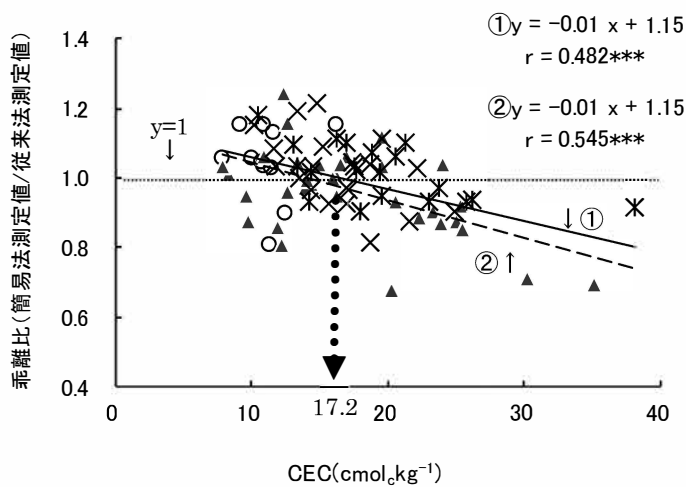
- 1) 全供試データの従来法での交換性K(10⁻²gK₂O kg⁻¹)は5.6~208.9, 低交換性Kデータは5.6~39.6.
- 2) 測定ベースラインの水準 I, II, IIIのブランク値(mgL⁻¹)の範囲は, それぞれ58~62, 42~48, 26~29.
- 3) ***は0.1%水準で有意であることを示す.
- 4) Y: 従来法での交換性K, X₁: 供試液測定値, X₂: ブランク値, a: 傾き, b: 切片
- 5) 表中回帰式を用い簡易測定法測定値(X₁/X₂)から算出される交換性K(Y)の95%予測区間の予測曲線の上
限と下限との幅.
- 6) 試料ごとに各測定ベースラインの水準で得られた簡易測定法値の平均値を算出し, その値をもとに回帰式,
95%予測区間を求めた.

示した。相関係数，回帰式と同様に，BLの水準で大きな差はなく，全供試データでは $11.2 \sim 13.4 \text{ } 10^{-2} \text{ gK}_2\text{O kg}^{-1}$ の範囲であった。

さらに，試験2の測定データから，試料ごとに各BL水準で得られた簡易測定法測定値の平均値を算出した。それらを横軸とし，縦軸に供試土壌の従来法での交換性Kをプロットして回帰式，95%予測区間を算出し，この回帰式を簡易測定法での換算式として決定した（第4-3表）。低交換性Kデータの95%予測区間（平均値）は，全供試データの約半分程度であり，供試土壌の交換性Kが低い場合（ $40 \text{ } 10^{-2} \text{ gK}_2\text{O kg}^{-1}$ 未満），こちらの換算式を使うことが適すると考えられた。

（4）簡易測定法交換性Kの乖離の要因

試験3において，各供試土壌のCECと乖離比には有意な負の相関が見られた（第4-3図）。簡易測定法は，従来法に比べ，振とう時間が短く土液比が低いため，相対的に，抽出力は弱いと考えられる。CECが高い，すなわち，塩基の保持力が大きい土壌では，簡易測定法での抽出では従来法に比べ値が低くなりやすく，保持力の小さい土壌では，塩基を離しやすいため値が高くなりやすいと想定され，この結果は，矛盾がない。今回の測定データでは，全供試データによる回帰直線（第4-3図の①）と「簡易測定法交換性K＝従来法交換性K」を意味する乖離比=1を示す直線（ $y=1$ ）との交点となるCECは $17.2 \text{ c mol c kg}^{-1}$ であり，CECがこの近傍となる土壌試料では，比較的乖離が小さくなることを示す。定点調査の福島県における各地目のCEC平均値は水田 16.7，普通畑 15.7，樹園地 16.4，草地 19.4 であり（農林水産省生産局，2008），今回の換算式の適合性は高いと推察される。一方で，今回供試した土壌とは異なる高CEC，あるいは低CECの土壌を用い，本報と同様の手法で換算式を作成することで，供試土壌のCECに適合した確度の高い測定が可能になると考



第4-3図 供試土壤のCECと乖離比の関係

凡例は次のとおり。○：供試土壤の従来法での交換性K ($10^{-2}\text{gK}_2\text{O kg}^{-1}$)が20未満，▲：同20～40，×：同40～60，*：60以上。実線直線(①)は全供試データ(n=86)，破線直線(②)は低交換性K土壤($40 \cdot 10^{-2}\text{gK}_2\text{O kg}^{-1}$ 未満)のデータ(n=46)による回帰直線。点線直線はy=1を示す。
注1) ***は0.1%水準で有意であることを示す。

えられた。

低交換性 K データの回帰直線（第 4-3 図の②）の傾きは，全データによるものよりも大きく，比較的，乖離しやすい傾向にあった。このことは，供試土壌の交換性 K が低い場合では，土壌の保持力の大小が簡易測定法でのカリウム抽出量決定に影響し，乖離が大きくなるケースが増加することを示すと考えられた。

簡易測定法における抽出液の pH は 7.0 であったが，抽出時の土液比が従来法に比べ低いため，土壌による抽出液の pH 変動（主に低下）がカリウムの抽出効率に影響を与える可能性が考えられた。しかし，供試液 pH と乖離比に相関は見られず（図表省略），抽出時の pH 低下は乖離に影響しないと判断した。

（5） 操作手順と換算式

今回改良法として試行した高 AAs 抽出測定の操作手順と交換性 K を算出するための換算式を第 4-4 図に示す。換算式には除法値を用い，イオンメーターの BL 変動に対応している。

抽出

風乾土10gを遠沈管に秤取
抽出液¹⁾ 20ml添加
10分間振とう
静置(15分程度)

測定

イオンメーターの校正(K^+ 150mgL⁻¹液による1点校正)
ブランク値測定²⁾
供試液測定³⁾

簡易測定法交換性Kの算出

$$Y(\text{簡易測定法交換性K}(10^{-2}\text{gK}_2\text{O kg}^{-1})) \\ = (X_1/X_2) \times a + b$$

X_1 =供試液測定値、 X_2 =ブランク値

$$a=57.1, b=-54.5$$

(Y が40未満であれば、 $a=49.2$, $b=-43.0$ で再計算.)

第4-4図 改良した簡易測定法の操作手順と換算式

- 1) 1.0 molL⁻¹酢酸アンモニウム液.
- 2) 1.0 molL⁻¹酢酸アンモニウム液+等量の脱塩水.
- 3) 抽出液+等量の脱塩水.

第 5 章 総合考察

本研究は、福島県での水田農業振興の観点から、今後の水田土壌の土づくりのあり方や方向性の議論、検討に資するため、その現状、および問題点を明らかにすることを目的に行った。第 2 章において、2011 年 3 月に発生した放射能災害後に農地土壌の汚染状況を明らかにするために 2011 年秋冬に採取した土壌試料を用い、県内水田土壌養分の養分、化学性の実態、増減傾向を明らかにした。第 3 章において、2012 年以降、放射能吸収抑制対策として実施されたカリ多施用による水田での土壌交換性カリ含量の増加の実態について明らかにした。さらに、第 4 章において、土壌交換性カリ含量の維持のために必要な現場対応型の交換性カリ含量簡易測定法の構築を行った。総合考察として、あらためて、県内の土壌養分、化学性の実態を整理するとともに、今後の土づくり、肥培管理のあり方について考察する。交換性カリ含量については、放射性セシウム吸収抑制対策と関連させたうえで今後のカリ肥沃度管理のあり方として考察する。

(1) 福島県水田土壌の養分、化学性の問題点

第 2-4 表、第 2-3 図で示したように、2011 年に採取された土壌試料のデータと 1990 年代に採取された定点調査のデータを比較すると、可給態窒素、可給態リン酸、CEC については大きく増減する地域、地方は少なく、適正域の地点数割合も比較的高い。その中で、可給態ケイ酸については、適正域 ($30 < 10 \cdot 2 \text{mg SiO}_2 \text{ kg}^{-1}$) となる地点数割合は増加しているが、適正域未満の割合はいずれの地方も 8 割以上（黒ボク土は約 9 割）であり、ケイ酸肥沃度の向上の必要性が認められた。pH についても、適正域が増加する地域もあるが、概して 1990 年代より酸性化が進んでおり、適正域 ($5.5 \sim < 6.0$) 未満の割合が 6 割前後という状況にある。このように、福島県の土壌

養分，化学性の実態からは，特にケイ酸肥沃度向上と酸性化対策が課題としてあげられる．土づくり資材施用の実態として，稲わら施用面積割合が県全体で72%と高く，一方で，ケイ酸カルシウム，熔性リン肥の施用面積割合はそれぞれ4%，7%と低い（第2-6表）．ケイ酸肥沃度の向上という目的に対し，稲わら施用は有効であるが，可給態ケイ酸含量の少ない圃場においてはケイ酸分を含む土壌改良資材のより積極的な活用が必要である．土壌改良資材施用の実態として，近年，ケイ酸カルシウム，熔性リン肥と比較して，ケイ酸カリの施用が増加しており，県全体で15%，特に会津においては29%となっている．酸性化対策の観点から，ケイ酸カリよりも，アルカリ分を含むケイ酸カルシウム，熔性リン肥等の施用に切り替えることが有効と考えられる．また，安西（2013）の可給態リン酸含量による基肥リン酸減肥量に関する報告に基づき，福島県での減肥可能水田面積を試算した．可給態リン酸については，適正域（ $10 \sim < 30 \text{ } 10^{-2} \text{ g P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ ）の地点数割合がいずれの地方も7割前後（黒ボク土は約5割）であるが，半量減肥可能な水田面積は29219ha（中通りで13237ha，会津で10375ha，浜通りで4567ha，黒ボク土で1039ha），全量減肥可能な水田面積は8263ha（中通りで5310ha，会津で1495ha，浜通りで1087ha，黒ボク土で371ha）にのぼると推定された．リン酸施肥低減による低コスト，環境負荷低減型農業推進の一助となる情報を得た．

（2）放射性セシウム吸収抑制対策のための交換性カリの増強，維持

第3-2図，第3-3表で示したように，放射性セシウム吸収抑制対策のため実施したカリ多施用により，県内水田土壌の交換性カリ含量は，2011年から2017年までに1.5倍～3.4倍に急激に増加している実態が明らかとなった．その増加の程度は地域により大きく

異なり，カリ肥料の上乗せ施用量が大きく影響していた．また，土壌の有効 CEC や E_K が交換性カリの蓄積，保持の指標となる可能性が示された．現在，玄米中放射性セシウムが検出されない状況（ふくしまの恵み安全対策協議，2019）もあり，県が目標値として掲げる交換性カリ含量 $250 \text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ の維持を前提とした上で，市町村単位でカリ肥料の上乗せ施用が終了，あるいはその検討がなされている状況にある．土壌に蓄積したカリは，新妻（2018）が示したように溶脱や水稻の収奪により徐々に低下していくものと考えられる．その速度は土壌条件や圃場管理等の影響をうけ，圃場によって異なるものと予想される．そのため，作毎に各圃場の交換性カリ含量の把握を土壌分析によって行うことは放射性セシウム吸収抑制のために必要である．通常，交換性カリ含量の測定には，高額な分析機器を要し，生産者は分析業務委託を行っているが，第4章で構築した小型カリウムイオンメーターを用いた交換性カリ簡易測定技術は，測定操作が簡便で，生産者等も実施可能であるため，交換性カリ含量把握の一助となる．中山（2013）の成果を受け，福島県の農業普及所では，カリウムイオンメーターを配備し，普及活動に活用している．現在，全県的に稲わらの施用が増えている状況は，土壌中のカリの増強，維持につながり，放射生成セシウム吸収抑制の面からも望ましいものである．しかし，カリ資材の上乗せ施用も含め，稲わらの施用は圃場単位で行われるものであるため，特に，それらの施用が実施されない圃場においては，交換性カリ含量の把握のための土壌分析は必ず実施するような指導が継続して必要である．

（3）今後の福島県水田土壌での土づくり，肥培管理および研究の発展方向

福島県の水田農業の持続的な発展において，その生産基盤である土壌の地力の維持・向上，並びに放射性セシウムの吸収抑制に考慮

した土づくり，肥培管理が重要な課題である．その実現に向け，県農業行政として，現在の状況を示した上で，普及組織，生産団体と連携し，得られた情報を活用した土づくり，肥培管理指針策定に取り組んでいくことが望まれる．現在の福島県の水稲栽培での施肥基準（福島県，2006）では，稲わら施用の有無を考慮していないが，稲わらの $5000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ 年}^{-1}$ 施用により，水稲に利用される形態でのカリは $20 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ ，ケイ酸は $30 \text{ kg SiO}_2 \text{ ha}^{-1}$ 程度の施用効果が期待でき，稲わら施用の有無は施肥設計に考慮されるべきと考えられる．また，有機物が補給されることでの可給態窒素，CECの維持，向上につながる全炭素，全窒素含量の増強も期待できる．放射性セシウム吸収抑制対策の視点からも，稲わら施用はカリ肥沃度の維持に大きな役割を果たすため，県として，稲わらの施用状況に応じた土づくり，肥培管理の指針作成，施肥基準の整備を行っていくべきと考えられる．

本研究は2011年採取土壌を対象に実施したが，県として，今後県内土壌養分，化学性に関するデータの収集を継続的に実施し，データの更新に努める必要があると強く考える．特に，交換性カリ含量については，玄米への放射性セシウムの移行抑制を担保するためにも，特に，上乗せカリ施用終了圃場において，交換性カリ含量の推移のモニタリング調査や低下速度を律する要因の解析に関する研究を実施する必要があると考えられる．各市町村で設置する上乗せカリ肥料終了を検討するための試験圃場があり，研究実施に向けて，連携・協力体制を整えているところである．一方で，効率的かつ効果的な土づくり，肥培管理のために，土壌分析は必須であるため，県として土壌分析実施の励行，普及組織での実施支援等を引き続き行うとともに，簡易測定等の技術開発を実施することは重要と考える．

摘要

福島県の農業振興において、生産基盤である土壌の地力の維持・向上のための適切な肥培管理は重要な課題である。1990年代以降、全県的な土壌調査が行われておらず、現在の土壌養分、化学性の実態が不明であった。あわせて、2011年3月に発生した放射能災害後に、玄米の放射性セシウム吸収抑制のため、福島県では多量のカリ肥料の上乗せ施用が実施され、カリの蓄積が進んでいると考えられるが、地域的な増加の程度に関する情報はなく、今後の放射性セシウム吸収抑制対策のあり方を議論する上でも関連情報の収集、解析が望まれた。

本研究では、福島県内水田土壌の養分、化学性の実態と交換性カリ含量増加の実態を明らかにするために行った。また、放射性セシウム吸収抑制対策を効果的に実施する上で必要となる、交換性カリ含量の簡易測定法について、既往の測定法の改良を行った。

(1) 福島県水田土壌養分、化学性の実態

県内の地域ごとの土壌養分、化学性の状態や特徴、変化のトレンドに関する情報は、県農業行政における施策等の決定、あるいは、改善対策技術構築等のために必要である。農林水産省が放射性物質濃度分布図（2012年3月公表）作成のため2011年秋冬に県内農地土壌を採取し、その後保管されていた水田土壌試料（ $n=1047$ ）を用い、2011年時点の県内水田土壌の養分、化学性の実態、定点調査以後の増減傾向を明らかにした。また、稲わら、土壌改良資材等の土づくり資材の施用実態との関連性を明らかにした。

1) 地域的特徴

他地域に比べ、中通りの県北、県中地域の可給態窒素、全窒素、全炭素は低く、県南地域では可給態ケイ酸が高かった。会津地方 2

地域（会津，南会津）は可給態窒素，交換性カリが高い傾向にあった．浜通りの2地域（相双，いわき）は全体的に中庸であった．

2) 近年の各養分，化学性の増減傾向

可給態窒素は中通りで減少，会津，浜通りで増加した．可給態リン酸は中通りで増加，会津で減少傾向にあった．交換性カリは中通りで減少し，会津，浜通りで増加した．可給態ケイ酸は増加（対定
点調査データ比で+16%）していた．また，多くの地域で pH の低下（変動幅 -0.1～-0.5）が見られた．

3) 適正地点数度数分布

可給態窒素は，不足域，過剰域となる割合が減少し，適正域の割合が高まった．可給態リン酸は，過剰域となる割合が減少し，各地域で適正域の割合が6～7割を占めた．可給態ケイ酸は，不足域の割合が減少し適正域の割合が19%～28%に増加した．pH はいずれの地域でも適正 pH 未満の割合が45～78%と高く，特に会津地方で増加した．

4) 土づくり資材施用の実態

近年，県内水田での稲わらの施用面積割合は増加しており，2009年～2014年時点での県平均値は72%であり，特に会津地方では87%と高い．ケイ酸カルシウム，溶性リン肥の施用は減少傾向にあり県平均でそれぞれ4%，7%であった．ケイ酸カリは15%と比較的高かった．
土壌改良資材からのリン酸施用量，ケイ酸施用量は，20年間でそれぞれ0.52倍，0.35倍に減少したと考えられた．

5) 今後の福島県水田土壌の土づくりにあたって

2011年時点での県内水田土壌の養分・化学性の現状として，1990年代と比較し，緊急的な対応が必要なほどに悪化している状況にならないことが確認できた．一方で，pHの改善やケイ酸肥沃度の向上が課題としてあげられた．土壌改良資材の施用は大きく減少し，稲わら

施用が慣行的に実施され、それらの施用の有無が土壌養分に影響している状況がうかがえた。特に、稲わらについては、今後の福島県での土づくり、肥培管理を行っていく上で、その施用の有無を考慮した基準、指針づくりが必要と考えられた。

（２）放射性セシウム吸収抑制対策を実施した福島県水田土壌の交換性カリ含量の変動とその土壌要因

2011年の原子力発電所事故後、玄米の放射性セシウム吸収抑制のため、福島県は水稲作付け前の土壌交換性カリ含量 $> 250 \text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ を目標値としたカリ肥料の増施（上乘せ施用）を推奨し、多量のカリ肥料が施用された。蓄積した土壌交換性カリの実態を明らかにするため、県内水田の交換性カリ含量データ（2011年：n=863，2014年：n=730，2017年：n=577）を測定、収集し、県内13地域の地域的な変動を明らかにした。また、交換性カリ含量増加に関わる土壌要因について考察した。

1）県内水田土壌交換性カリ含量増加の実態

2011年に高い放射性セシウム濃度の玄米が多く生産された地域では、2011年～2014年に $313 \text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ の交換性カリ含量の増加がみられ、交換性カリ含量が $> 250 \text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ の地点数の割合は、2017年時点で81%であった。

2）カリ肥料の上乗せ施用量の実態

カリ肥料の上乗せ施用量には地域差があり、2011年に高い放射性セシウム濃度の玄米が多く生産された地域では $250 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ 以上のカリ肥料が施用されていた。2011年～2014年までの期間に比べ、2014年～2017年までの期間の交換性カリの増加効率（各地域の増加量と施用量の比）は低下しており、これは、上乘せ施用による土壌中のカリの蓄積に伴い交換性カリ保持に関わる土壌要因が変動したためと考えられた。

3) 交換性カリ含量の保持に関わる土壌要因の検討

2011年～2014年の各区域の交換性カリ増加量と有意な相関がある土壌要因は、有効CEC（塩基当量の総計）、 E_K （交換性カリ当量/有効CEC）であり、CECとの相関は認められなかった。2011年～2017年の交換性カリ増加量と上乗せ施用でのカリ施用量との線形モデルの決定係数（ R^2 ）は0.41であったが、施用量に E_K の逆数を乗じた場合は0.56となりモデルの向上が図られた。このことから E_K 、もしくは E_K を算出する際に用いる有効CECが交換性カリの保持の指標になり得ると考えられた。

(3) 小型カリウムイオンメーターによる土壌交換性カリ含量簡易測定 of 確度向上のための改良

福島県では、農作物の放射性セシウム吸収抑制のため、農地へのカリ肥料の増施および適正施用の指導を徹底している。カリ肥料の施用量を決定するためには土壌分析による土壌交換性カリ含量の測定が必要となるため、小型カリウムイオンメーターを用いた簡易測定法が開発された（中山 2013）。しかし、この測定法では、土壌試料によっては従来の分析法での測定値から乖離するケースが見られ、また、イオンメーターの特性により計器のベースラインが低下する現象がみられ、測定値の確度の低下が懸念された。そこで、既報の簡易測定法を基に、測定法の改良と構築を行った。

1) 新たな測定法の試行

簡易測定法の測定値（供試液測定値-ブランク値）と従来の測定方法での測定値（1M酢酸アンモニウム液を用い、土液比1:12.5で1時間振とう抽出し、原子吸光光度計により定量。）には高い相関関係がみられた。その回帰直線の決定係数、二乗平均平方根誤差は、既報の0.1M酢酸アンモニウム液抽出測定での結果に比べ、1.0M酢酸アンモニウム液抽出-2倍希釈測定でより良好な結果が得られた。

2) ベースライン変動に対応した計算法の検証

減法での簡易測定法での測定値（供試液測定値 - ブランク値）と従来法での交換性カリ含量との回帰直線の傾きは，ベースラインの水準により異なった．一方，除法での測定値（供試液測定値 / ブランク値）の場合，ベースラインの水準にかかわらず，回帰直線の傾きはほぼ同じであり，除法による計算が適していることが明らかとなった．

3) 測定法の構築と確度の検証

交換性カリ含量を算出する換算式を決定し，測定法の構築を行った．土壌交換性カリ含量が $40 \text{ } 10^{-2} \text{ gK}_2\text{O kg}^{-1}$ 未満の土壌試料を対象とした0.1M抽出測定での95%予測区間の範囲は， $\pm 9.5 \text{ } 10^{-2} \text{ gK}_2\text{O kg}^{-1}$ であったのに対し，1.0M抽出-2倍希釈測定では $\pm 6.0 \text{ } 10^{-2} \text{ gK}_2\text{O kg}^{-1}$ であり，確度の向上が認められた．

引用文献

- 阿部倫則・本田修三 2014：宮城県の水稲作における5年間のカリ50%減肥が土壌交換性カリに及ぼす影響．<http://www.naro.affrc.go.jp/org/tarc/seika/jyouhou/H25/kankyoushou/H25kankyou009.html> (2019年6月5日確認)．
- 東英男 2017：県下水田土壌の変化と実態～35年間の継続調査によって見えてきた水田土壌の変化～．http://taffrc.pref.toyama.jp/nsgc/center/webfile/t1_d65f93193f0c5d25f2aff050ff87b690.pdf (2019年6月5日確認)．
- 赤桐さやか・向井吉崇・高原知佳子・梅本英之 2019：石川県内の水田土壌の変化とその課題．石川県農林水産研究成果集報，21号．
- 安西徹郎 2013：全国減肥基準からみた土壌リン酸およびカリウムにおける減肥の指標値と100%減肥とする基準値(案)，農業および園芸，88，984-997．
- 青森県 2000：青森県における農耕地土壌の実態と改良対策．<https://www.pref.aomori.lg.jp/soshiki/nourin/nosui/files/H11-156-1.pdf> (2019年6月5日確認)．
- 青山喜典・津高寿和 2003：兵庫県下水田土壌の養分特性の経年変化と土壌改良対策．兵庫焦立農林水産技術総合センター研究報告(農業編)，51，13-18．
- 千葉県 2015：千葉県農耕地土壌の現状と変化 土壌実態調査7巡目(2009～2012)の結果より．https://www.pref.chiba.lg.jp/ninaite/seikafukyu/documents/h26-5_noukoutidojyou.pdf (2019年6月5日確認)．
- 土壌環境分析法編集委員会編 1997：土壌環境分析法，p215-222．

博友社，東京．

江口哲也・若林正吉・山田大吾・平山孝・濱本昌一郎・二瓶直登・久保堅司・太田健・信濃卓郎 2017：粘土鉱物組成が放射性セシウム汚染土壌へのカリ施用の有効性におよぼす影響，H29 農業農村工学会要旨集；4-5.

藤井弘志・安藤豊・渡部幸一郎 1999：水田土壌における土づくりの必要性．農業技術，54，462-467.

藤井弘志 2002：水稻の生育・収量・食味に及ぼすケイ酸の効果．日本土壌肥料学会編ケイ酸と作物生産，40-77，東京，博友社．

福島県 2006：福島県施肥基準，http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyohozen_type/h_sehi_kizyun/fuk1.html（2019年6月5日確認）．

福島県農業試験場 1978：地力保全基本調査総合成績書（福島県），1-608.

福島県農林水産部 2014：農作物の放射性セシウム対策に係る除染及び技術対策指針 第3版，<https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/61508.pdf>（2019年6月5日確認）．

福島県農林水産部 2017：「ふくしまからはじめよう．」農業技術情報（第55号）30年産米の放射性セシウム吸収抑制対策．<http://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/247416.pdf>.（2019年6月5日確認）．

福島県農林水産部 2018a：「ふくしまからはじめよう．」農業技術情報（第56号）大豆とそばの放射性セシウム吸収抑制対策．<http://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/256930.pdf>.（2019年6月5日確認）．

福島県農林水産部 2018b : 「ふくしまからはじめよう。」農業技術情報(第57号)30年産牧草の放射性セシウム吸収抑制対策。
<http://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/260019.pdf>. (2019年6月5日確認).

福島県農林水産部 2018c : 福島県農林水産業の現状。
<http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/36005b/norinkikaku2.html> (2019年6月5日確認).

ふくしまの恵み安全対策協議会 2019 : 放射性物質検査情報(玄米),
<https://fukumegu.org/ok/kome/> (2019年6月5日確認).

福沢琢磨・米村由美子・藤澤春樹 2014 : 水稻栽培の稲わら施用によるカリ減肥. 東北農業研究, 67, 17-18.

Hamamoto S, Eguchi T, Kubo K, Nihei N, Hirayama T, Nishimura T 2018 : Adsorption and Transport Behaviors of Potassium in Vermiculitic Soils, RADIOISOTOPES, 67 ; 93-100.

本間利光・白鳥豊・金子(門倉)綾子・大峽広智・南雲芳文・土田徹 2016 : 新潟県農耕地土壌の理化学性及び土壌管理の実態と変化. 新潟県農業総合研究所研究報告, 14, 1-32.

堀田悟・園田敬太郎・武久邦彦・西堀康士・山田善彦 2010 : 滋賀県における農耕地土壌の実態と変化(第2報)土壌理化学性の変化と施肥の実態. 滋賀県農業技術振興センター研究報告, 49, 33-43.

茨城県 2016 : 水田土壌の可給態ケイ酸含量の持続性に対する肥培管理の影響. <https://www.pref.ibaraki.jp/nourinsuisan/noken/seika/h27pdf/documents/g13.pdf>(2019年6月5日確認).

井上勝広・藤山正史・大津善雄・里中利正・清水マスヨ・大井義弘 2014 : 長崎県における農耕地土壌の理化学性の実態と経年変

- 化(第3報)水田,普通畑,樹園地の30年間の変化. 長崎県農林技術開発センター研究報告, 5, 85-92.
- 伊藤博志・牧田康宏・西端善丸・坂東義仁・栗波哲・森永一・長谷光展 2002: 福井県の水田土壌の変化と土壌施肥管理の方向. 福井県農業試験場研究報告, 39, 17-28.
- 岩手県 2000: 研究レポート No.108 土壌蓄積リン酸に対応した水稲リン酸施肥基準. http://www2.pref.iwate.jp/~hp2088/repo/pdf/repo_108.pdf (2019年6月5日確認).
- 岩手県 2014: 県内水田土壌の30年間の施肥管理と化学性の変化. http://www2.pref.iwate.jp/~hp2088/seika/h25/h25shidou_19.pdf (2019年6月5日確認).
- 岩手県 2019: 県内水田土壌の35年間の施肥管理と化学性の変化. http://www2.pref.iwate.jp/~hp2088/seika/h30/h30shidou_12.pdf (2019年6月5日確認).
- 金田吉弘・高橋大悟・坂口春菜・金和裕・高階史章・佐藤孝 2010: ケイ酸質肥料が登熟期の高温処理水稲の葉温・気孔コンダクタンスおよびケイ酸吸収に及ぼす影響. 土肥誌, 81, 504-507.
- 金田吉弘 2015: 水田土壌の地力低下の実態とその対策. 7. 水田土壌の地力低下の実態とその対策. 土肥誌, 86, 336-337.
- 加藤直人・伊藤純雄・木方展治・藤村恵人・池羽正晴・宮崎成生・斎藤幸雄・廣岡政義 2012: 水田土壌のカリウム供給力の向上による玄米の放射性セシウム濃度の低減. 研究成果情報(農研機構・放射能対策技術), http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/narc/2011/a00a0_01_67.html (2019年6月5日確認).
- 珪酸石灰肥料協会 2014: ケイカル Q&A. 1-64.
- 気象庁 2013: 地球温暖化予測情報, 8. 1-88.

気象庁 2017：地球温暖化予測情報，9，1-88.

久保堅司・平山孝・竹内恵・藤村恵人・江口哲也・二瓶直登・濱本昌一郎・齋藤隆・太田健・信濃卓郎 2016：交換性カリ含量が高まらない土壌の特性とカリの動態，日本土壌肥料学会要旨集，62；148.

久保寺秀夫・新美洋・和田信一郎 2011：土壌カラムに投入した硝酸およびカリウムイオンの保持と溶脱に関する因子，第74回九州沖縄農研研究発表会要旨；42.

熊谷勝巳・今野陽一・黒田潤・上野正夫 1998. 山形県における農業用水のケイ酸濃度．土肥誌，69，636-637

宮森康雄 1996：低タンパク米生産におけるケイ酸の役割とその診断指標．土肥誌，67，696-700.

森田敏 2013：持続可能な農業生産及び地球環境対策支援 B16「水稲の高温登熟障害対策技術」.水稲高温登熟障害の克服に向けた対策技術．九州沖縄農業研究センター．https://www.naro.affrc.go.jp/training/files/reformation_txt2013_b16.pdf f (2019年6月5日確認).

森塚直樹 2009：日本の農耕地土壌のカリウムの形態－地域・圃場・根域スケールでの評価－．土肥誌，74，80-88.

村主栄一・上山啓一・河村花愛 2013：コンパクトイオンメーターを使った交換性カリとナトリウムの簡易分析法．平成25年度東北農業研究成果情報．<http://www.naro.affrc.go.jp/org/tarc/seika/jyouhou/H25/kankyuu/H25kankyuu008.html> (2019年6月5日確認).

中川進平・伊藤千春・伊藤正志・石田頼子・渋谷允・武田悟 2013：県内水田土壌の土壌炭素・窒素蓄積量の変遷．秋田県農業試験場研究時報，53，11-12.

- 中井信 2006：農耕地土壌の特性変動，農業と科学，574，1-8.
- 中山秀貴 2013：小型カリウムイオンメーターによる土壌交換性カリ含量簡易測定法．平成25年度東北農業研究成果情報．
<http://www.naro.affrc.go.jp/org/tarc/seika/jyouhou/H25/kankyou/H25kankyou013.html>（2019年6月5日確認）.
- 中山秀貴 2014：小型イオンメーターを用いた土壌交換性カリ含量の簡易測定法．農耕と園芸，70，1，57-61.
- 日本土壌協会 2001：24可給態ケイ酸 B リン酸緩衝液抽出法．土壌，水質及び植物体分析法，日本土壌協会，84-85.
- 新妻和敏・佐久間祐樹・藤澤弥榮・吉田直史 2018：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．福島県農業総合センター放射線関連支援技術情報，
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/285011.pdf>（2019年6月5日確認）.
- 野原茂樹・東英男・上菌一郎・高橋茂・加藤直人 2016：水田土壌可給態窒素の簡易・迅速評価マニュアル．http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/narc_available_N_paddy_man.pdf（2019年6月5日確認）.
- 農研機構 中央農業総合研究センター 2014：土壌診断、施肥法改善、土壌養分利用によるリン酸等の施肥量削減にむけた技術導入の手引き．http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/narc_sehisakugen_man_all.pdf（2019年6月5日確認）.
- 農林水産バイオリサイクル研究 システム化サブチーム 編著 2006：バイオマス利活用システムの設計と評価，1-267，茨城県つくば市，農林水産バイオリサイクル研究「システム化サブチーム」.

- 農林水産省 2008：地力増進基本指針．http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_dozyo/pdf/chi4.pdf (2019年6月5日確認)．
- 農林水産省 2009：肥料高騰に対応した施肥改善等に関する検討会中間とりまとめ報告書関係資料．http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/nenryu_koutou/n_kento/pdf/siryoo.pdf ．
(2019年6月5日確認)．
- 農林水産省 2011：「農地土壌の放射性物質濃度分布図」の作成について，<http://www.affrc.maff.go.jp/docs/map/h23/110830.htm> (2019年6月5日確認)．
- 農林水産省 2012：「農地土壌の放射性物質濃度分布図」の作成について，<http://www.affrc.maff.go.jp/docs/map/h24/120323.htm> (2019年6月5日確認)．
- 農林水産省・福島県・(独)農業・食品産業技術総合研究機構・(独)農業環境技術研究所 2014：放射性セシウム濃度の高い米が発生する要因とその対策について～要因解析調査と試験栽培等の結果の取りまとめ～(概要第2版)，http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/pdf/youin_kome2.pdf (2019年6月5日確認)．
- 農林水産省生産局 2008：土壌環境基礎調査編，土壌保全調査事業成績書．p1～400．
- 小原洋・中井信 2003：農耕地土壌の交換性塩基類の全国的変動農耕地土壌の特性変動(I)．土肥誌，74，615-622．
- 小原洋・中井信 2004：農耕地土壌の可給態リン酸の全国的変動，土肥誌，75，59-67．
- 太田健 2014：水稻の放射性セシウム吸収抑制対策，日本土壌肥料学会誌，85(2)；90-93．

- 佐野大樹・伊藤豊彰・安藤正・南條正巳・斎藤元也・三枝正彦
2010：南東北地方の代表的な水田土壌の粘土鉱物組成，ペ
ドロジスト，54（2）；83-92.
- 園田敬太郎・猪田有美・北川照美・武久邦彦 2014：滋賀県におけ
る農耕地土壌の実態と変化（第3報）土壌モニタリング調査
35年間のまとめと解析．滋賀県農業技術振興センター研究
報告，52，29-39.
- 住田弘一・大山信雄 1991：水稻のケイ酸吸収促進に及ぼす有機物
およびケイ酸石灰の施用効果，土肥誌，62，386-392.
- Tagami K, Tsukada H, Uchida S, Brenda J. Howard 2018：
Changes in the Soil to Brown Rice Concentration Ratio of
Radiocaesium before and after the Fukushima Daiichi
Nuclear Power Plant Accident in 2011, Environmental
Science & Technology, 52（15）；8339-8345.
- 高橋英一 1987：ケイ酸植物と石灰植物．110-118，農文協，東京．
- 竹内誠 1991：原子吸光光度法による水中ナトリウム・カリウムの
高精度分析法．土肥誌，62，545-548.
- 鳥山和伸 2001：フィールドから展開される土壌肥料学－新たな視
点でデータを採る・見る－1．大区画水田における地力窒素
ムラと水稻生育．土肥誌，72，453-458.
- 東北農業試験場 1999：pH6.2のリン酸緩衝液抽出による水田土壌
の可給態ケイ酸の簡易評価法．総合農業の新技术13，146-150.
- 東北農政局：福島県営農再開支援事業，[http://www.maff.go.jp/
tohoku/seisan/sinsai/index.html](http://www.maff.go.jp/tohoku/seisan/sinsai/index.html)（2019年6月5日確認）.
- 富山県農林水産部 八木麻子 山田宗孝 2013：水田土壌のケイ酸
栄養診断技術の改定．平成24年度農業分野試験研究の成果
と普及，7-8.

- 梅本英之 2015 : 水田土壌の地力低下の実態とその対策 4. 石川県における水田土壌の実態と最近の知見. 土肥誌, 86, 334-335.
- 和田信一郎・大谷崇 1997 : pH5 の酢酸アンモニウムを用いた土壌の塩基分析法の検討, 農業および園芸, 72 ; 34-36.
- 和田信一郎 1997 : 第 6 章土壌の化学性, 6. 2 陽イオンの交換・吸着, 最新土壌学, 久馬一剛編, 朝倉書店, 東京, pp. 75-82.
- 山田裕 1984 : 精密分析, 農業技術体系土壌施肥編法, 4. 250-258. 農山漁村文化協会, 東京.
- 山形県 2002 : 水田での新しいケイ酸施用基準. <http://www.naro.affrc.go.jp/org/tarc/seika/jyouhou/H13/seisan/H13seisan021.html> (2019年6月5日確認).
- 山形県 2013 : 養分蓄積水田におけるコスト低減のためのリン酸、カリ減肥指標. http://agrin.jp/ufile/7/38/22224/image1_file0114091414105422969.pdf (2019年6月5日確認).
- Yamamura K, Fujimura S, Ota T, Ishikawa T, Saito T, Arai Y, Shinano T 2018 : A statistical model for estimating the radiocesium transfer factor from soil to brown rice using the soil exchangeable potassium content. Journal of Environmental Radioactivity, 195 ; 114-125.

謝 辞

本論文をまとめるにあたり，国立大学法人山形大学農学部教授藤井弘志博士から，ご指導とご校閲を賜った．また，国立大学法人山形大学農学部准教授 森静香博士，国立大学法人弘前大学農学部准教授 松山信彦博士，国立大学法人岩手大学准教授 鈴木雄二博士には，本論文をご校閲していただき，ご意見とご指導を賜りました．衷心より感謝の意を表します．

さらに，本研究の実施と論文の作成にあたり，福島県農林水産部根本文宏氏，同佐藤睦人氏，同荒井義光氏，同鈴木良成氏，同佐藤翔平氏には適切な御指導と御校閲，数々の便宜および御助言をいただいた．とりまとめにあたりご助言いただいた国立大学法人茨城大学農学部教授 佐藤達夫博士，国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構中央農業研究センター金澤健博士に深く感謝いたします．

また，本研究を実施するにあたり，土壌試料を提供いただいた福島県農林水産部各普及機関の担当者の皆様，交換性カリ含量のデータ提供いただいた福島県農業協同組合中央会に深く感謝いたします．

本研究は福島県農業総合センターの職員の御協力を得て行われた．特に，生産環境部環境・作物栄養科職員の皆様には研究遂行にあたり多大なる御指導とご支援をいただいた．

以上の方々に心から感謝申し上げます．