

国内産農業資源を活用した農作物への
放射性セシウム吸収抑制対策技術の開発

2015 年

蛭木 朋子

目次

1.緒言.....	1-7
2.水稲の放射性セシウム吸収抑制対策試験	
2-1.南相馬市における水稲作付け試験 (カリ、ゼオライトの効果について)	8-18
2-2.伊達市における水稲作付け試験 (カリ、ゼオライト、酸性改良の効果について)	19-27
2-3.ゼオライトの水稲への放射性セシウム吸収抑制 メカニズム検証のためのポット栽培試験	
2-3-(1).ゼオライトの施用が水稲の放射性セシウム吸収 および窒素・カリ溶脱に及ぼす影響.....	28-37
2-3-(2).酸性改良、窒素施肥およびゼオライト施肥が 水稲の放射性セシウム吸収に及ぼす影響	38-46
3.畑作物の放射性セシウム吸収抑制対策試験	
3-1.伊達市における大豆の作付け試験.....	47-52
3-2.堆肥施用が野菜のセシウム吸収に及ぼす影響	
3-2-(1).伊達市におけるグリーンピース作付け試験.....	53-57
3-2-(2). 放射能汚染堆肥の施用が野菜のセシウム吸収に 及ぼす影響について群馬県の調査事例	58-61
3-3-(3). 有機物施用が土壌溶液および野菜の ¹³³ Cs 移行に及ぼす影響.....	62-68
4.堆肥施用がもたらす環境リスクについて	
4-1.西日本地域における有機農業実践農地の土壌調査事例	69-81
4-2.長期有機栽培実践畑の調査事例	
4-2-(1).農地土壌、井戸水の環境実態調査および	

栽培野菜の栄養評価	82-108
4-2-(2).長期有機栽培畑における窒素の流出を抑制した コマツナの栽培試験	109-122
5.堆肥を肥料資源として活用するための迅速分析法の開発	
5-1.ディスクリット型自動化学分析装置による 堆肥中の速効性肥料成分量の迅速分析.....	123-139
5-2.試験紙による堆肥の速効性肥料成分量の簡易分析	140-155
6.総合考察	156-159
巻末データ	160-163
参考文献	164-170
摘要	171-180
Summary	181-192
謝辞	193

1, 緒言

1, 背景

2011年3月11日に起こった東北地方太平洋三陸沖を震源地とする東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故により放射性物質が放出され、これにより福島の森林や土壌が広範囲にわたり汚染された。飛散した主な放射性核種は ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs で、半減期が30年におよぶ ^{137}Cs が農地汚染核種の主体であった。図1に示したのは放射性セシウム拡散を示した土壌マップであるが、福島第一原発から半径30km圏内で高い数値が計測された。その分布は同一円上に一様でなく、北西－西方の地点に高レベルの放射能が局在した。また、同一地域でも局地的に、あるいは遠隔地において高レベルの放射線が観測され、風向きなどの気象条件により放射性物質の降下が集中するホットスポットといわれる高放射能地点が発見された。

農水省は原発から半径20km県内にある警戒区域、計画的避難準備区域、緊急時避難準備区域において水稻の作付け制限を指示し、暫定基準値である500Bq/kgを超過する米が産出される可能性の高い地域での作付け制限を決定した。また、2012年には新基準値として100Bg/kgが設定された。緊急時避難準備区域の作付け制限は解除されたが、米の検査で100～500Bq/kg検出された一部区域と併せて、前出荷制限下で管理計画に基づく米の全量管理と全袋検査を行う方針となった。

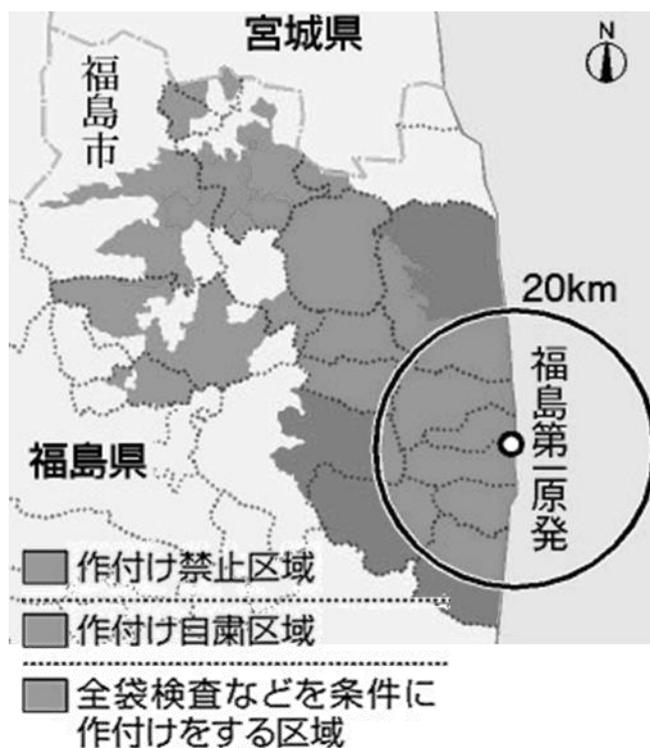


図 1, 放射能の汚染マップ (農水省)

福島の農耕地面積は 144,500ha でありその 7 割 (100,500ha) を水田が占め、全国第 4 位の米生産県であった。原発事故後の 2012 年産水田の作付け面積は 64,200ha となり 20%まで減少した (統計からみた福島の農業 2013)。田は稲作を行わないと土地が荒れ、元に戻るのに数年が必要となると言われているが、福島県では営農再開できない理由は原発事故の影響との回答が圧倒的に多かった (農林金融 2014)。

セシウムは土壤中で Cs^+ として挙動し、バーミキュライトやイライトなどの粘土鉱物に吸着され土壌表層に長く留まるため農地では長期的対策が必要となる。著者らは、2011 年 4 月に立ち上げられた東京農大東日本支援プロジェクトの一環として、福島県南相

馬市と伊達市の水稲作付け制限区域において、水稲を中心に農産物への放射性セシウム吸収抑制対策を確立するための研究を開始した。

表1に示した2012年に発表された農水省の除染マニュアルによると、5,000Bq/kg以上の放射性セシウムで汚染された農地では表土を除去する。一方、5,000Bq/kg以下の農地では、表土を除去せず、耕耘・反転により放射能レベルを下げた上で、作物への放射性セシウム吸収抑制対策を講じることとした。著者らはその対策の一環としてゼオライトに注目した。

表1、農地土壌の放射性物質除去技術（除染技術,H23,農水省）

土壌の放射性セシウム濃度	畑		水田	
～5,000Bq/kg	農作物への移行を可能な限り低減する観点、また、空間線量率を下げる観点から、必要に応じて○反転耕、○移行低減栽培技術を適用。			
5,000 ～ 10,000 Bq/kg	地下水位		土壌診断・地下水位	
	低い場合※	高い場合※	低地土	低地土以外
10,000 ～ 25,000 Bq/kg	●表土削り取り ○反転耕		●表土削り取り ●水による土壌攪拌・除去 ○反転耕 (耕盤が壊れる)	●表土削り取り ●水による土壌攪拌・除去 (低地土より効果低) ○反転耕 (耕盤が壊れる) (地下水位が低い場合のみ適用)
25,000Bq/kg～	●表土削り取り 5cm以上の厚さで削り取り。ただし、高線量下での作業技術の検討が必要。(土ぼこりの飛散防止のために固化剤を使用)		●表土削り取り 5cm以上の厚さで削り取り。ただし、高線量下での作業技術の検討が必要。(土ぼこりの飛散防止のために固化剤を使用)	

天然ゼオライト(沸石化した白色凝灰岩粉砕物、以下ゼオライト)とは、カリウムやアンモニウムイオンに対して選択的な交換吸着

性を持つこと(後藤ら 1980)、さらにセシウムはカリウムと同じアルカリ金属に属する元素で、その水和イオン径がカリウムより小さいため、ゼオライトはカリウム以上に交換吸着されやすい(西村 1973)ことが知られている。福島第一原発内では、その性質を利用して事故発生初期から放射性セシウムなどで汚染された水の処理にゼオライトが使われてきた。また、チェルノブイリ原発事故では、放射性セシウムで汚染された農地の修復にも利用された(KONOPLEV ら 1993、ROSEN ら 2006)。

そのような背景で、福島周辺での汚染農地ではゼオライトをセシウム吸着材として施用し、作物への放射性セシウム吸収抑制を図ろうとする機運が高まった。著者らと同時期から農林水産省と福島県でも水稻作付け制限区域内約 400 ヶ所の水田で試験作付けを実施した。そして 2012 年春からそのメカニズムが明らかにされない状態で福島県内の水田に低減対策資材としてゼオライトが施用された。その後、2013 年 1 月に農水省と福島県から発表され「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」では、ゼオライトの吸収抑制効果は、ゼオライトに含まれるカリウムによる効果であり、今後の吸収抑制対策はカリ肥料による土壌中のカリ含量の確保を基本にする(福島県・農水省、2013)とした。そのため、2013 年度以降はゼオライト施用を強く要望した一部の地域を除いて復興予算として計上されなかった。

一方で著者らはゼオライトの放射能吸収抑制効果については、その特性に起因すると考え、水稻や大豆などへの放射性セシウム吸収抑制対策としてゼオライトとカリウムの施用試験を継続して

実施した。また、ゼオライトの施用が作物への放射性セシウム吸収に及ぼす影響を検討するための室内実験やポット栽培試験を行った。

そして、堆肥については原発周辺県で収集された動植物性堆肥原料（家畜排せつ物、魚粉、わら、もみがら、樹皮、落ち葉、雑草、残さ等）が放射性セシウムに汚染されていた場合、これらを原料として生産された堆肥は高濃度の放射性セシウムを含有する可能性があり、汚染拡大防止措置として暫定基準値 400Bq/kg を超過するものに関する流通・販売が規制された。しかし、利用ができなくなった堆肥は製造場所に滞留し、新たな堆肥の保管場所が不足した。また堆肥の一時的な移動をするために多額の補助金が投じられた。堆肥の処分に関しても放射性物質の飛散や焼却灰をめぐる不安が残るため、放射能汚染堆肥の処分に窮しているのが現状であり、この堆肥の処遇に関しては急務となる。そこで、カリの代替資材として堆肥の活用が有効であるか確認し、暫定基準値を超過した放射能汚染堆肥を使用して栽培された野菜の調査を実施した。なお、有機質土壌ではセシウムの移動性が高く、植物に吸収されやすくなることが SANCHEZ A L1999、STAUNTION S ら 2002 によって実証されているので、安定同位体である ^{133}Cs を使用した試験を行い、総合的に堆肥の有効活用の可能性について検討をおこなった。

放射能吸収抑制に最も有効である塩化カリについては 100%海外からの輸入に依存しているため、安定供給をはかるために代替資源として国内の堆肥を活用することは非常に重要となるが、堆

肥施用には資材の有効利用という反面で、環境負荷などのリスクが存在する。これまで堆肥は主に土づくり資材(土壌改良資材)として、農地に施されてきた。その結果、土壌中の可給態リン酸や交換性カリの蓄積に伴う土壌養分バランスの悪化や硝酸態窒素の溶脱による地下水汚染などが懸念されている。そこで、有機栽培実践畑を対象に土壌、環境調査を実施した。そして堆肥のみを活用している畑の現状について、栽培される野菜の品質の調査もおこない、土壌からの地力窒素溶出が多い畑において、窒素の流亡を抑制した作付け試験の検討を加えた。

わが国では、肥料資源の多くを海外からの輸入に頼っている。その一方、国内で約 8,300 万トン発生する家畜排せつ物などの有機性廃棄物中に含まれる肥料成分量は輸入量を大きく上回る。よって、それら有機性廃棄物を原料とする堆肥を肥料資源として有効活用することは非常に合理的である。堆肥の有効活用並びに過剰施肥を防止するためには堆肥の適正施用が望まれるが、そのためには堆肥中の肥料成分含有量を迅速に測定する必要がある。そこで、堆肥の速効性肥料成分として抽出されるアンモニア態窒素・硝酸態窒素・リン酸・カリ・石灰・苦土をディスクリート方式による自動化学分析装置により定量するための検討を行った。さらに個人でも簡単に堆肥分析できる、より生産現場向きの試験紙によるリアルタイム簡易測定法について検討もおこなった。

2,放射能吸収抑制対策で用いた主要な資材

A,カリ資材

カリウムはアルカリ金属元素に属しセシウムと同族元素であるため、作物では拮抗的にセシウム吸収を抑制する。塩化カリは100%海外からの輸入に頼っており、主な取引先はカナダ、ロシア、ヨルダンである。よって、カリ肥料の価格は海外の動向に左右されやすい。

B,ゼオライト

ゼオライトとは火山ガラスが変質して形成された白色凝灰岩粉砕物であり、結晶性アルミノケイ酸塩である。立体網目構造を持ち、風化抵抗性が高く、構造の細孔に陽イオンを特異的に捕捉する性質がある。また、均一な細孔を有することによりイオンの大きさによる形状選択性があり、その陽イオンの選択性は $Cs^+ > Rb^+, NH_4^+ >> K^+ > Na^+, Li^+$ の序列となる（1973 西村、2012 武島ら）。今回は還元条件下土壌におけるゼオライトの働きについて注目した。

C,転炉スラグ

転炉スラグとは鉄の製鋼過程で産出される副産物であり、ケイ酸カルシウムを主成分とし土壌の酸性改良資材として使用される。酸性矯正力は苦土石灰よりも弱い、マグネシウム、リン酸、鉄、マンガン、ホウ素などの微量元素を含有するため、酸性改良しても微量元素欠乏が起こりづらい。水田ではケイ酸の補給資材としても使用される。（村上ら 1999）

2.水稲の放射性セシウム吸収抑制対策試験

2-1.南相馬市における水稲作付け試験

(カリ、ゼオライトの効果について)

1,はじめに

福島第一原発から半径 20.8km に位置し、避難準備区域として作付け制限区域に指定されている福島県南相馬市の水田において試験作付けを行った。本圃場は南相馬市に許可申請し圃場番号 126 とされ、2011 年 4 月から調査および試験を開始し、2014 年まで継続して試験をおこなった。

耕地面積は 3000m² で本圃場は雑草対策として原発事故後にロータリー耕により作土混層が行われており、2011 年 10 月時点で放射性 Cs 強度は 2,565Bq/kg であった。その後も施肥や混層を行ったため、作付け開始前の土壌放射性 Cs 強度は 1,475Bq/kg (2012 年 5 月) まで低減していた。この圃場に放射能吸収抑制対策資材としてカリ、ゼオライトを施用して作付け試験をおこない、また、初年度以降は水田におけるゼオライトの持続効果について検証をおこなった。また、対策資材と併せて稲わら鋤き込みによる影響について検討を行った。当時、放射能で汚染された稲わらは圃場から持ち出して焼却処分することとしていた。しかし、この方法は手間やコストがかかり、また放射性廃棄物を増大させる。そこで、稲わらの有効利用の可能性について、土壌肥沃度の観点から検証した。

2,試験および方法

試験区についてカリウムは南相馬市慣行施用量である 5kg/10a (標準区) と、対策区として 30kg/10a (多量区) を設定し、さらにゼオライトはカリ標準区、多量区にそれぞれ、施用なし、1t/10a、2t/10a 施用区を設け、合計 6 試験区とした。カリ 30kg/10a については農研機構の土壌の交換性カリ含量と放射性セシウムの玄米への移行係数の関係 (2012 加藤ら) を参考に玄米への移行係数が 0.005 以下となる土壌交換性カリ含量 25mg/100g となるように施肥量を決定した。

供試したゼオライトは福島産の日東粉化工業株式会社製であり、2011 年 12 月 10,11 日にゼオライトの施用と混層作業をおこなった。フレコンに入ったゼオライトをライムサワーに移し所定量散布し、ロータリーにより作土を混層した。

2012 年 5 月 20 日に基肥として 10a 当たり N 5kg, P₂O₅ 4kg, K₂O 4kg, MgO 1kg (ニューセーフティ一発 50kg/10a) を全面に施肥した。尚、カリ多量区については 2012 年 5 月 12 日にあらかじめ基肥を考慮して K₂O で合計 25kg/10a となるよう KCl で施肥した。水稻の品種はヒトメボレで施肥後、植え付けを行った。収穫は 2012 年 9 月 27 日におこない、また参考値として茎葉の放射能強度が最も高くなる幼穂形成期 (2011 年 8 月 10 日) に青刈りをおこなった。

2012 年度水稻作の稲わらは持ち出さずに全て圃場にすき込んだ。2013 年度産作付けに関しては継続効果を確認するためゼオライトの追加施用はせず、全面に K₂O 5kg/10a となるよう塩化カリで施

用した。作付けした水稻の品種はテンノツブで 2012 年 5 月上旬に定植し、9 月 24 日に収穫し、稲わらも全て水田に鋤き込んだ。また、茎葉について幼穂形成期（7 月 26 日）の調査も行った。

2014 年度産作付けでは、基肥として圃場全面に鶏ふんペレット 100kg/10a（4.0-4.3-3.8kg/10a）と、高度化成を 1.1-1.1-1.1kg/10a 施用した。K₂O 施用量は併せて約 5kg/10a になる。水稻の品種はテンノツブで、2014 年 5 月 15 日に定植し、9 月 24 日に収穫した。こちらにも幼穂形成期（7 月 23 日）の調査を行った。

水稻の刈り取り調査は各区 3 か所からで、茎葉に土壌が付着しないように地表から 5cm 程度の部分を切り取り、坪刈り（50cm×50cm 四方）を行った。その後自然乾燥させ、脱穀及び籾摺りをおこなった後、キャンベラ社製のゲルマニウム半導体検出器にて玄米の放射能強度を測定した。幼穂形成期茎葉については収穫期と同様な方法で採取し、その後自然乾燥させ 2cm 程度に裁断して容器に充填し放射能強度を測定した。なお、幼穂形成期茎葉については参考値であるため 2013 年度、2014 年度は各区 3 連であったが、2012 年は各区 1 連で作業をおこなった。玄米は放射能強度測定後、タンパク質含量（PS-500 静岡精機）の測定を行った。土壌は坪刈りを行った場所の作土を土壌スcoopで採取し、分析に供した。土壌分析は採取した土壌を風乾後 2mm の篩を全通させ、以下の分析に供した。基本分析として、pH(H₂O)、電気伝導率は 1 : 5 水浸出法により電気伝導率測定後、ガラス電極により pH(H₂O)を測定した。硝酸態窒素、アンモニア態窒素は 1M 塩化カリウム溶液で抽出後 FIA にて分析した。陽イオン交換容量および交換性

塩基は酢安振とう抽出 - ICP 発光分析法とした。調査開始時の土壌化学性は表 1 に示した。

次章以降の放射能分析、土壌分析に関しても特に記載のない場合は同様の手法とする。

表 1, 南相馬市作付け水田の土壌化学性 (2011 年 10 月)

pH (H ₂ O)	EC dS/m	交換性塩基(mg/100g)				CEC meq/100g	塩基飽和度 %
		CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O		
6.2	0.04	246	36.4	17.0	1.77	14.1	78.1

3,結果および考察

(1)ゼオライトとカリ施用による水稲の放射性セシウム吸収抑制効果

2012 年度産水稲作付け試験の結果は表 2 に示したとおりである。幼穂形成期の茎葉については、カリ 5kg/10a、ゼオライトなし区で 62.0Bq/kg と最も高く、ゼオライト施用により放射性 Cs 強度は低減しカリ 5kg/10a・ゼオライト 2t/10a 区とカリ 30kg/10a 区では 20Bq/kg 程度まで低減された。カリとゼオライト施用量の間には 5%水準で交互作用が認められる結果となった。玄米の放射能強度についても茎葉と同様な傾向であり、カリ 5kg/10a、ゼオライトなし区で 16.6Bq/kg と最も高く、ゼオライト施用により 1t/10a 区で 11.8Bq/kg、2t/10a 区で 6.2Bq/kg と低減した。カリ 30kg/10a 区ではいずれも 5~6Bq/kg 程度まで放射能強度は低減しており、ゼオライトの効果は認めらなかった。カリとゼオライト施用量の間には 10%水準で交互作用が確認され、カリ 5kg 区でゼオライト

の効果が強いことが示された。また、玄米の収量についてはゼオライト施用により増収が確認され、窒素の吸収性が向上したことが示唆された。そこで、玄米のタンパク質含量を計測した結果、有意差は認められなかったものの、ゼオライト施用によりタンパク質含量が増加する傾向にあり、水稻の窒素吸収性が増加したことが窺える。よって、ゼオライト施用により水稻の放射性 Cs が低減することと、玄米における窒素吸収性の向上が示された。

天正ら（1961）によれば、窒素肥料を施肥することで、水稻の放射性 Cs の吸収性は増大することが分かっている。本試験は窒素吸収性が向上したにも関わらず、放射性 Cs 吸収は抑制されたことから、過去の知見と矛盾する結果となった。

2013年度産水稻はゼオライトの継続効果に注目して試験を行った。結果は表 3 に示すとおりである。2012年度産水稻では Cs 吸収量が最も高くなる幼穂形成期における茎葉（8月採取）と比べ玄米（9月収穫）で放射性 Cs 含量は 1/3 程度まで低減していた。2013年度産水稻では幼穂形成期茎葉の放射性 Cs は 15～7Bq/kg と 2012年度より低減しており、玄米では幼穂形成期茎葉の 1/3 となる 3～4Bq/kg 程度になることが予測された。しかし、玄米の放射性 Cs は 30～47Bq/kg と 2012年度産を超過する値であり、その傾向も統一性がなかった。一方で玄米の収量はカリ 5,30kg/10a 区共にゼオライトの施用により増収しており、ゼオライトの効果が持続していることが確認された。

2013年度産水稻に関して考察すると、玄米の放射性 Cs は、幼穂形成期茎葉の 2.7～4.9 倍にも及んだ。2012年水稻では玄米の放

放射性 Cs は茎葉の 0.27～0.34 倍と低減していることから、2013 年玄米の放射能強度は明らかな異常値であり、青刈りを行った 7 月下旬～収穫期の 9 月下旬までの間に土壌吸収以外の経路で放射性物質を吸収したことが考えられ、灌漑水からの流入による径根吸収や空からの降下物飛散による葉面からの直接吸収が疑われた。2014 年 7 月の朝日新聞では 2013 年 8 月に福島第一原発でのガレキ撤去作業が行われ、それに伴う放射性物質飛散の可能性が報道された。

本試験を実施した地域では、本試験と同様な異常現象が複数報告されており、行政では 2014 年 7 月から予定されていたガレキ撤去作業を、この地域での収穫が終る 10 月まで延期することとなった。

2014 年度産水稻の結果は表 4 に示したとおりで、幼穂形成期茎葉の放射能強度は 15Bq/kg 以下であり、玄米については 5Bq/kg を下回る値となり予測したような結果となった。玄米の放射性 Cs 強度はゼオライト施用区で低減しており、3 年目においてもゼオライトの継続効果を確認することができた。

表 2, 2012 年産水稻の茎葉と玄米放射性 Cs と玄米収量

試験区		放射性Cs(Bq/kg)		収量	食味計測値(%)*	
K ₂ O	ゼオライト	茎葉**	玄米	kg/10a	タンパク質	スコア
5kg/10a	なし	62.0 c	16.6 c	449 a	6.0	79
	1t/10a	34.5 b	11.8 b	530 ab	6.4	74
	2t/10a	20.3 ab	6.2 a	553 b	6.2	77
30kg/10a	なし	20.1 ab	6.3 a	493 a	6.1	77
	1t/10a	20.0 ab	5.9 a	609 bc	6.4	73
	2t/10a	15.8 a	5.3 a	676 c	6.5	72

表 3, 2013 年産水稻の茎葉と玄米放射性 Cs と玄米収量

試験区		放射性Cs(Bq/kg)		収量	食味計測値(%)*	
K ₂ O	ゼオライト	茎葉**	玄米	kg/10a	タンパク質	スコア
5kg/10a	なし	10.3	31.4 a	625 a	5.6	82
	1t/10a	12.3	33.2 a	896 c	6.1	75
	2t/10a	8.2	37.3 a	744 b	5.8	79
30kg/10a	なし	7.6	37.0 a	595 a	6.4	74
	1t/10a	15.2	47.1 a	776 b	6.7	70
	2t/10a	8.3	38.5 a	777 b	6.5	72

表 4, 2014 年産水稻の茎葉と玄米放射性 Cs と玄米収量

試験区		放射性Cs(Bq/kg)		収量	食味計測値(%)*	
K ₂ O	ゼオライト	茎葉**	玄米	kg/10a	タンパク質	スコア
5kg/10a	なし	15	4.1 c	611 a	5.1	84
	1t/10a	12	3.1 cb	686 b	4.9	85
	2t/10a	ND	1.9 ab	693 b	5.3	82
30kg/10a	なし	11	2.1 ab	605 a	5.0	85
	1t/10a	ND	2.4 ab	648 ab	5.1	84
	2t/10a	ND	1.5 a	707 b	5.4	81
(検出限界)		(<10)	(<1.5)			

Tukey 法 同一アルファベット間に有意差なし $\alpha=0.25, n=3$

*PS500 **幼穂形成期茎葉

(2)ゼオライト施用と稲わら鋤き込みによる土壌中カリ含量の変化

図 1 に施肥後と収穫後の土壌交換性カリ含量を示した。2012 年度水稲作の収穫後土壌についてカリ 5kg/10a のゼオライトなしで最も低い 9.9mg/100g であり、ゼオライト 1t、2t/10a 施用で 15.0、17.4mg/100g と増加した。カリ 30kg/10a ではゼオライト無施用区で 17.1mg/100g とカリ 5kg/10a のゼオライト無施用区と同等の値となり、ゼオライト 1t、2t/10a 施用により 19.9、27.6mg/100g と有意に増加し、ゼオライトによるカリ保持効果を確認した。2013 年度水稲作の収穫後土壌についてもカリ 5kg/10a 区でゼオライトなしで 17.3mg/100g、ゼオライト 1t、2t/10a 施用で 21.7、27.0mg/100g となり、カリ 30kg/10a 区においてゼオライトなしで 24.1mg/100g、ゼオライト 1t、2t/10a 施用で 27.6、33.3mg/100g まで増加し、ゼオライトによる有意なカリ保持効果を確認した。また、2013 年産水稲作ではカリ施用は全面に 5kg/10a しか行っていないが、2012 年より交換性カリは全区で 5.7～9.6mg/100g 高くなり、稲わらの鋤き込み効果であったと考えられる。2012 年産水稲の稲わら中のカリ含量について表 5 に示したが、稲わらには 3% 程度のカリが含有されており、茎葉を全て鋤き込むことで K_2O として 15～22kg/10a が土壌に還元されることが分かる。また、稲わらの茎葉重はゼオライト施用区で増加する傾向にあるため、カリ還元量もゼオライト施用区で増加した。2012 年度の収穫後カリ飽和度は最も低い区で 1.6% であり、ゼオライト施用とカリ 30kg/10a 区で 2.1～3.9% となった。2013 年では最も低い区でも 3.3% でゼオ

ライト施用とカリ 30kg/10a 区で 3.8～5.5%と高い値を保持していた。よって、稲わら鋤き込みによるカリ還元を行えば、毎年カリを多量施用する必要がないことが分かった。またゼオライトを 1t/10a 施用すれば土壌のカリ保持効果が持続するため、稲わらの鋤き込みとゼオライト施用を併用することで初年度以降は慣行施用量で放射能吸収抑制対策となる。

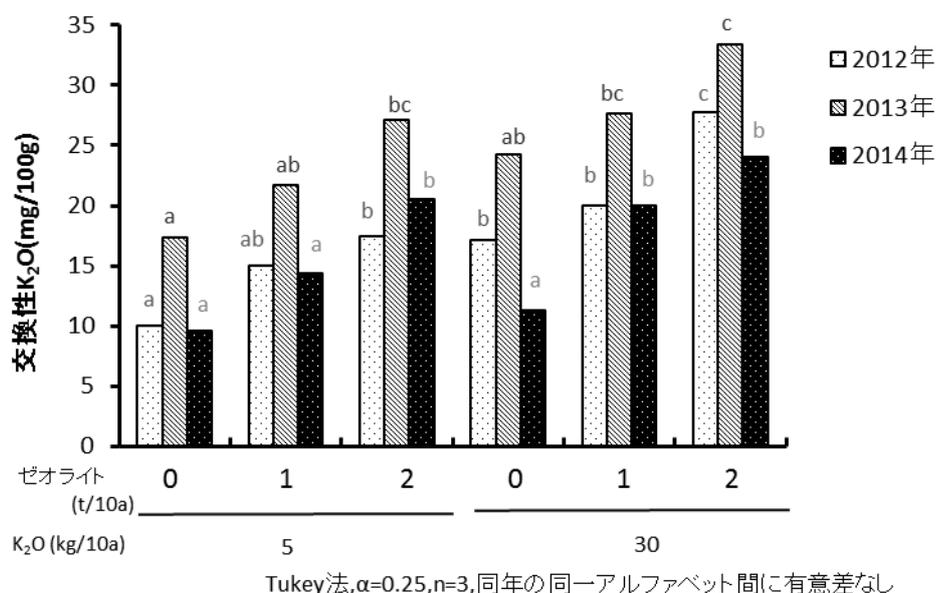


図 1, 南相馬市水田の水稻収穫後の土壌交換性カリ (2012～2014)

表 5, 2012 年産稲わらのカリ含有量

試験区		茎葉 kg/10a	K ₂ O	
カリウム	ゼオライト		%	kg/10a
5kg/10a	なし	488	3.0	14.8
	1t/10a	767	2.8	21.7
	2t/10a	780	2.6	20.7
30kg/10a	なし	623	2.9	18.0
	1t/10a	651	2.9	18.7
	2t/10a	708	2.9	20.3

3,南相馬市水田まとめ

2013 年の土壤交換性カリは高く保持されていたことから、2013年玄米の放射能異常値については土壤吸収以外の要因が強く示唆された。よって、2013 年度産玄米の放射性 Cs 異常吸収については2013年8月の福島第一原発ガレキ撤去作業に伴う放射性物質飛散が原因であると考えられた。また2014年産水稻作で放射能値は正常であったことから、この異常値について放射性物質飛散が原因であることを裏づけることとなり、本試験の考察から除外することとした。

水稻の放射性セシウム吸収抑制対策資材として、カリとゼオライトの施用が有効であることが分かった。特にゼオライトは低カリ条件下で Cs 吸収抑制効果を発揮した。ゼオライトには土壤交換性カリを高く保持する効果があり、施用 2、3 年目の持続効果についても確認した。

K^+ は Cs^+ と拮抗して作物の Cs 吸収を抑制することは知られており（1961 天正）、ゼオライトのカリ保持効果により、 K^+ と拮抗して Cs^+ の吸収が抑制されたと考えられた。しかし一方で、ゼオライト施用による玄米の増収から窒素の吸収性の向上が示唆された。塚田ら(2011)らによれば水稻栽培において NH_4^+ の施肥は、粘土鉱物に吸着されている交換性 Cs と交換反応により、土壤溶液中に Cs^+ を放出し、水溶性 Cs が増大することで水稻の Cs 吸収が促進されることが報告されている。しかし、本試験ではゼオライト施用により玄米が増収したことから水稻の窒素吸収性が向上したことが示唆されにも関わらず、Cs 吸収抑制効果を発揮するという結

果となった。この課題については 2-3 章で検証することとする。

また、稲ワラ鋤き込みはカリ還元効果が高く、土壌交換性カリは 2012 年収穫後よりも 2013 年収穫後土壌で高く保持された。

以上から本試験によれば、ゼオライト 1t/10a 施用し、稲わらの鋤き込みを行えば、初年度以降は基肥のみで放射能吸収抑制対策が可能であった。

2.水稲の放射性セシウム吸収抑制対策試験

2-2,伊達市における水稲作付け試験（カリ、ゼオライト、酸性改良の効果について）

1,はじめに

伊達市水田は暫定基準値である 500Bq/kg を超過する玄米が産出され、作付け自粛区域に指定されている。伊達地区の 3 か所の圃場において放射能吸収抑制対策のための各試験を実施した。

A 圃場では 2012 年にゼオライトを施用し 2012 年、2013 年の継続効果を検証した。また、2013 年ではさらカリ標準施用と多量施用区を設け、カリの多量施用が毎年必要か検討した。B 圃場ではケイ酸カリと塩化カリの施用効果について、C 圃場では転炉スラグによる酸性改良の効果について 2012 年、2013 年での効果を検証した。

2,試験および方法

A 圃場の試験作付け（ゼオライトの施用効果）

2012 年水稲作では対策資材として、連続する 2 枚の水田にゼオライト 1t/10a 施用区と対照として無施用区を設定した。水田土壌の放射性 Cs 強度は各 4,814Bq/kg、4,561Bq/kg であった。その他の対策資材として全面に転炉スラグ 200kg/10a とケイ酸カリ 200kg/10a (K₂O 40kg/10a) を施用した。作付け品種はコシヒカリで 5 月上旬に定植し、9 月 27 日に収穫した。この圃場で産出された 2012 年度産水稲の茎葉は全て持ち

出し、2013年作付けでは基肥として 2.6-5.9-5.3 kg/10a (N-P₂O₅-K₂O) コシヒカリ専用肥料で施用し、さらに各区を2つに分け、基肥のみである標準区 (K₂O 5kg/10a) と多量施用区として基肥と合計で K₂O30kg/10a となるように塩化カリで追加施用した区を設定し、5月上旬にコシヒカリを定植し10月1日に収穫した。この圃場ではゼオライトの継続効果についてと、カリの多量施用が毎年必要か検証を行った。

B 圃場の試験作付け（塩化カリとケイ酸カリの施用効果）

2012年度に連続する3枚の圃場に対策資材としてゼオライト 1t/10a・ケイ酸カリ 200kg/10 (K₂O40kg/10a) 施用区、ゼオライト 200kg/10a・塩化カリ 67kg/10a (K₂O 40kg/10a) 施用区、ゼオライト 200kg/10a・ケイ酸カリ 200kg/10a 施用区の3試験区を設けた。各圃場の土壤放射性 Cs 強度は 8,836Bq/kg、7,705Bq/kg、5,350Bq/kg であった。作付け品種はコシヒカリで5月上旬に定植して9月27日に収穫した。この試験では特にカリ肥料の施用法に注目し、塩化カリとケイ酸カリどちらが効果的であるか検証した。

C 圃場の試験作付け（転炉スラグ施用による酸性改良効果）

2012年産作付けで連続する2枚の水田に転炉スラグ 1t/10a 施用区と対照として転炉スラグ無施用区を設定した。各圃場の土壤放射性 Cs 強度は 4,363Bq/kg、4,186Bq/kg であった。また、対策資材として両試験区にケイ酸カリ 200kg/10a (K₂O 40kg/10a) を施用した。作付け品種はコシヒカリで、5月上旬

に定植し、9月27日に収穫した。2012年度産水稻茎葉は全て持ち出し、2013年度産水稻作付けでは基肥としてコシヒカリ専用肥料で施用を3.7-5.4-5.0kg/10a(N-P₂O₅-K₂O)施用した。5月上旬にコシヒカリを定植し10月1日に収穫し、2年目の転炉スラグの効果を検証した。こちらでもA圃場と同様に各区を2つに分け、基肥のみである標準区(K₂O 5kg/10a)と多量施用区として基肥と合計でK₂O30kg/10aとなるように塩化カリで追加施用した区を設定した。また、酸性改良による窒素発現量の増加が考えられたため、2012年施肥後土壌を用いた湛水条件下での可給態窒素量を測定するための室内培養試験をおこなった。可給態窒素分析は定法によった(温度30℃で4週間保温静置)。

各試験圃場では水稻の刈り取り調査は各区3か所で坪刈り(50cm×50cm四方)を行った。その後自然乾燥させ、脱穀及び籾摺りをおこなった後、キャンベラ社製のゲルマニウム半導体検出器にて玄米の放射能強度を測定した。玄米は放射能強度測定後、タンパク質含量(PS-500 静岡精機)の測定を行った。また土壌スコップで作土を採取し分析に供した。

3,結果および考察

1)A 圃場 (ゼオライトの施用効果)

2012年作付け前の土壌放射能強度と土壌化学性については表1,2に示した。

表 1, 土壌放射能強度

ゼオライト t/10a	Cs-134	Cs-137	合計Cs
	Bq/kg		
0	1646	2915	4561
1	1802	3012	4814

表 2, 試験区の施肥後土壌化学性

ゼオライト t/10a	pH (H ₂ O)	EC (mS/cm)	交換性塩基 (mg/100g)				CEC meq/100g	塩基飽和度 %
			CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O		
0	6.2	0.07	330	53.9	15.5	7.54	14.1	107
1	6.4	0.08	331	50.6	31.4	16.0	14.4	108

(2012/6/13-15福島調査)

2012 年度玄米の結果は表 3 に示したとおりである。放射性セシウム強度に関してはゼオライト 0、1t/10a 施用区共に 4～5Bq/kg であり有意差はなかった。2013 年度を表 4 に示したが、ゼオライト 0、1t/10a 施用区及びカリ 5、30kg/10a 区の全区で放射性セシウムはほとんど検出されなかった。2012 年から 2013 年の土壌交換性カリの変化を図 1 に示したが、2012 年において施肥後の交換性カリはゼオライト 0、1t/10a 施用区でそれぞれ 15.5、31.4mg/100g でありカリ飽和度に換算すると各 2.3%、4.6%であった。土壌から玄米への放射能吸収を最大限抑制するとされる土壌交換性カリ含量はカリ飽和度で 2%とされている。今回は両区ともにカリ飽和度 2%を上回る値であったため、放射性セシウムの吸収は抑制されたと考えられた。一方、収量はゼオライト 0、1t/10a 施用区で各 344、459kg/10a とゼオライト施用区で増収した。また、タンパク質含量についてゼオライト施用区で 0.2%高く、ゼオライト施用により窒素

吸収性が向上したことが示唆された。

2013年施肥後土壌交換性カリは22～38mg/100gでありカリ飽和度で3.4～5.7%と高かったことにより、2013年玄米で放射性セシウム強度は検出限界程度以下になったと考えられた。また、収量とタンパク質において有意差は見られなかったが、収量はゼオライト施用区で増加傾向にあった。

各区による土壌交換性カリの変化について図1を見ると、全期間を通じゼオライト施用区で交換性カリが高く保持されていることが分かる。また、2013年10月の収穫時土壌では各カリ5、30kg/10a区においてゼオライト施用により5～8mg/100g高く、カリ30kg区とカリ5kg/10a・ゼオライト施用区では後者の方が交換性カリは高く保持されていた。よって、カリ多量施用よりもゼオライト施用により土壌交換性カリは高く保持されることが分かった。

表 3,A 水田 2012 年産玄米の収量および放射性セシウム強度

ゼオライト t/10a	Cs-134	Cs-137 Bq/kg	合計Cs	収量 kg/10a	タンパク質 %
0	2.1	3.3	5.4a	344a	5.4a
1	1.6	2.5	4.0a	459b	5.6b

n=3,α =0.25 同一アルファベット間に有意差なし

表 4,A 水田 2013 年産玄米の収量および放射性セシウム強度

ゼオライト t/10a	K ₂ O kg/10a	Cs-134	Cs-137 Bq/kg	合計Cs	収量 kg/10a	タンパク質 %
0	5	ND	ND	ND	339a	5.0ab
0	30	ND	0.91	0.91	333a	4.7 a
1	5	ND	ND	ND	371a	5.0ab
1	30	ND	0.51	0.51	377a	5.2 b

n=3,α =0.25 同一アルファベット間に有意差なし

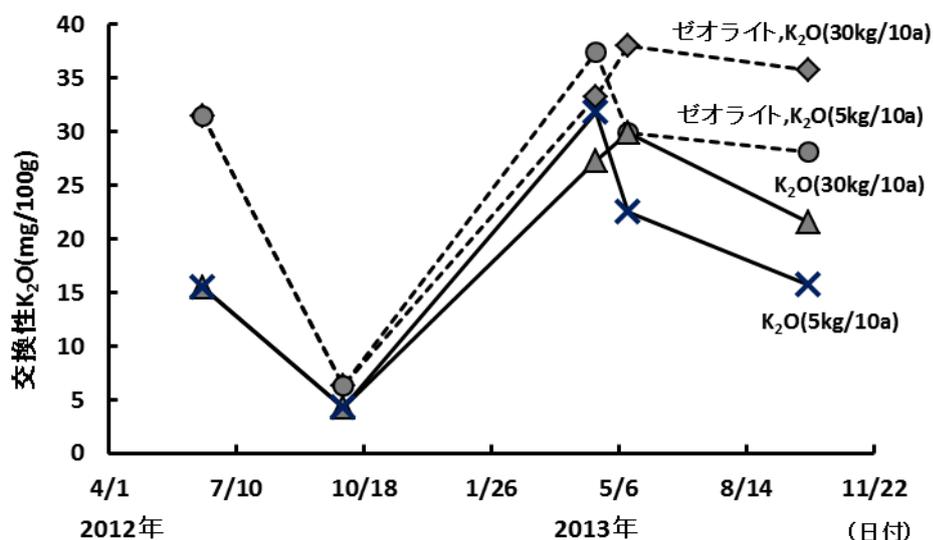


図 1, 試験水田 A における土壤交換性カリの推移

2)B 圃場の試験作付け（塩化カリとケイ酸カリの施用効果）

連続する 3 枚の水田の土壤放射能強度、施肥後土壤化学性は表 5,6 に示したとおりである。

玄米の放射性セシウムは表 7 に示した通りで、ゼオライト 1t/10a・ケイ酸カリ区とゼオライト 200kg/10a・塩化カリ区は 2.4、3.8Bq/kg と有意差はなかったが、ゼオライト 200kg/10a・ケイ酸カリ区では 11.2Bq/kg と有意に高い値を示した。ここでは、収量やタンパク質に差はなくカリウムの肥効の差によるものと考えられる。すなわち、水稻は生育後期に効いてくるようなケイ酸カリのような緩効性肥料よりも、生育初期に肥効を示す塩化カリのような速効性肥料の方が放射性セシウム吸収を抑制する効果が高いことが示された。

表 5, B 水田土壤放射能強度

ゼオライト kg/10a	カリの種類	Cs-134	Cs-137	合計Cs
		Bq/kg		
200	塩化カリ	2767	4939	7705
200	ケイ酸カリ	2704	4796	5350
1000	ケイ酸カリ	3286	5550	8836

表 6, B 水田施肥後土壤化学性

ゼオライト kg/10a	カリの種類 (K ₂ O 40)	pH (H ₂ O)	EC (mS/cm)	交換性塩基 (mg/100g)				CEC meq/100g
				CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	
200	塩化カリ	6.1	0.06	682	177	21.9	17.8	34.8
200	ケイ酸カリ	5.9	0.08	617	176	18.4	12.8	33.8
1000	ケイ酸カリ	5.9	0.07	729	199	28.6	9.97	38.5

(2012/6/13-15福島調査)

表 7, B 水田玄米の収量および放射性セシウム強度

ゼオライト kg/10a	カリの種類	Cs-134	Cs-137	合計Cs	収量 kg/10a	タンパク質 %
		Bq/kg				
200	塩化カリ	1.5	2.3	3.8a	457a	5.3a
200	ケイ酸カリ	4.3	6.9	11.2b	415a	5.3a
1000	ケイ酸カリ	1.1	1.7	2.4a	448a	5.4a

n=3, α =0.25 同一アルファベット間に有意差なし

3)C 圃場の試験作付け (転炉スラグ施用による酸性改良効果)

土壤放射能強度と施肥後の土壤化学性は表 8,9 に示したとおりで、転炉スラグ施用による酸性改良効果で土壤 pH は 6.0 から 7.3 まで上昇した。2012 年の収穫した玄米の結果は表 10 に示したが、放射性セシウムは転炉スラグ施用により 58Bq/kg から 29Bq/kg まで低減していた。また、収量において 414kg/10a から 482kg/10a に増収し、タンパク質も増加していたことから水稲において窒素の吸収性が向上したことが考えられた。そこで、土壤の可給態窒素量を調べたところ、転炉

スラグ施用区で有意に窒素無機化量が多いことが分かった。すなわち、転炉スラグ施用による酸性改良効果によって窒素無機化が促進され、水稻の窒素吸収性が向上したと考えられる。また、2013年においては表11に示したように、放射性セシウムは全区で5Bq/kg程度以下となり、転炉スラグ施用の有無による放射能強度の相違は認められなかった。

表 8, C 水田土壤放射能強度

転炉スラグ t/10a	Cs-134 Bq/kg	Cs-137 Bq/kg	合計Cs Bq/kg
0	1507	2679	4186
1	1571	2792	4363

表 9, C 水田施肥後土壤化学性

転炉スラグ t/10a	pH (H ₂ O)	EC (mS/cm)	交換性塩基 (mg/100g)				CEC meq/100g	塩基飽和度 %
			CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O		
0	6.0	0.05	262	51.3	11.0	6.75	13.9	89.1
1	7.3	0.12	484	77.6	10.2	7.62	17.6	123

(2012/6/13-15福島調査)

水稻栽培においてアンモニウムイオンの存在は土壤に吸着されているセシウムイオンとの交換反応により、セシウムを土壤コロイドから解離させ水稻へのセシウム吸収を助長することが知られているが(1961 天正)、今回の試験栽培では酸性改良効果によって土壤中の窒素無機化が促進され、水稻の窒素吸収性も向上したにも関わらず放射性セシウムの吸収は抑制される結果となった。これは水稻栽培におけるゼオライト施用効果と類似した結果となった。

この酸性改良およびゼオライトの効果についてメカニズムの検証は 2-3 章で行うこととする。

表 10, C 水田 2012 産水稻の収量および放射性セシウムと

窒素無機化量

転炉スラグ t/10a	Cs-134 Bq/kg	Cs-137 Bq/kg	合計Cs	収量 kg/10a	タンパク質 %	無機化窒素 mg/100g
0	22	36	58b	414a	5.7a	3.2a
1	11	19	29a	482b	6.2b	4.9b

α =0.05 α =0.30 α =0.25 α =0.10
n=3,同一アルファベット間に有意差なし

表 11, C 水田 2013 産水稻の収量および放射性セシウム

転炉スラグ t/10a	カリ施用 kg/10a	Cs-134 Bq/kg	Cs-137	合計Cs	収量 kg/10a	タンパク質 %
0	5	2.7	5.6	7.4b	432a	5.4a
0	30	N.D.	N.D.	N.D.	561b	5.5a
1	5	3.4(2.4>)	6.3	8.5b	569b	5.6a
1	30	N.D.	1.3	1.3a	517b	5.6a

n=3,α =0.25,同一アルファベット間に有意差なし

2-3.ゼオライトの水稲への放射性セシウム吸収抑制メカニズム検証のためのポット栽培試験

2-3-(1).ゼオライトの施用が水稲の放射性セシウム吸収および窒素・カリ溶脱に及ぼす影響

1,はじめに

現地栽培試験では水田においてゼオライト施用によるセシウム吸収抑制効果と、カリの保持効果が確認された。また、ゼオライト施用による玄米の増収が確認されたことから、水稲における窒素吸収性の向上が示唆された。ゼオライトは畑地において土壌保肥力を改善する土壌改良資材として使用されてきた。一方で、水田におけるゼオライトの効果についてその知見は少ない。水田土壌は還元条件下であり、また水の流出入があるため畑地とはイオンの挙動が異なることが考えられる。そこで実際に水稲を栽培した場合のゼオライトの施用効果について、ポットから溶脱水を抜き取り水田における水の流出入を再現した水稲栽培試験を行った。また溶脱するイオンを調べ、特にカリウムイオン・アンモニウムイオンの挙動に注目し、ゼオライトによるセシウム吸収抑制効果との因果関係について検証した。

2,材料および方法

1)供試土壌

土壌は福島県二本松市内圃場の灰色低地土を採取し、5mmの篩いにかけて均一化したものを供試した。土壌化学性は表1に示

した。土壌放射能強度は 2552Bq/kg であった。

2) 供試材料

共試したゼオライトは福島県飯坂鉱山より産出されたモルデナイト結晶型で、日東粉化株式会社のケイゼオン（粒系 3.3mm 以下 6 メッシュ）を使用した。

Ca 置換ゼオライト作成法

ゼオライト中のカリウムイオンとアンモニウムイオンを交換するため、1mol/L 塩化アンモニウム溶液（抽出比率 1:20）で 3 回振とうをおこなった。イオン交換水で洗浄後、ゼオライトに吸着されたアンモニウムイオンとカルシウムイオンを交換するために、1mol/L 塩化カルシウム溶液を加え、さらに反応を促進させるために消石灰で pH を上昇させ溶液を加熱し、アンモニア特有の刺激臭がなくなるまで十分反応させた。その後イオン交換水で洗浄し、乾燥させたゼオライトを Ca 置換ゼオライトとした。ゼオライト、Ca 置換ゼオライトの化学性は表 2 に示したとおりである。ゼオライトには交換性カリが 1031mg/100g 含有されており、Ca 置換ゼオライトは 132mg/100g とカリ除去率は 87%であった。また、陽イオン交換容量（CEC）はカルシウム置換操作により 141.5meq/100g から 130.5meq/100g まで低減した。CEC の抽出操作は、酢酸アンモニウム溶液により陽イオンを全てアンモニウムイオンで置換したあと、塩化カリ溶液で抽出されたアンモニウムイオン量から陽イオン交換容量を計算するものである。Ca 置換ゼオライトの場合、アンモニウムイオンがゼオライトに吸着された後、一部が 10%塩化カリ溶液では抽出されない不交換態とな

ったため、CEC が低減したと考えられる。また 10%塩化カリによって抽出された交換態アンモニウムはゼオライト 0.5mg/100g、Ca 置換ゼオライト 41.7mg/100g であった。Ca 置換ゼオライトの詳細な実験データは巻末に示した。

表 1, 供試土壌化学性

交換性塩基 (mg/100g)				CEC	塩基飽和度
CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	meq/100g	%
94.5	14.7	4.7	5.4	8.6	57.4

表 2, ゼオライトの化学性

ゼオライト 種類	ex-base(mg/100gDW)				NH ₄ -N
	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	mg/100g
普通	2264	78.4	1255	1295	0.46
Ca型	2325	22.8	108	109	41.7

3)試験区

試験区は表 3 に示した。ゼオライト施用なしの対照区と通常のゼオライトと Ca 置換ゼオライト施用区を設定した。ゼオライト施用量は 0.5t/10a(10g/pot)、1.0t/10a(20g/pot)とし、ゼオライト 10g に含有される交換性カリは 103mg、Ca 置換ゼオライトで 13mg となる。土壌中に含有される交換性カリは全区一律で 95mg であり、土壌中+ゼオライト中+施肥（塩化カリ）の合計カリ量が 121、198、301、500、600mg となるよう 5 段階に設定した。総カリ量 121mg においては対照区と Ca 置換ゼオライト 0.5、1t/10a 施用区とし、総カリ量 198mg では対照

区、ゼオライト 0.5t/10a、Ca 置換ゼオライト 0.5、1t/10a 施用区、総カリ量 301mg 以上では対照区、ゼオライト 0.5、1t/10a、Ca 置換ゼオライト 0.5、1t/10a 施用区を設けた。そして、基肥として $P_2O_5-N=0.5-0.5$ となるように過リン酸石灰と塩化アンモニウムで施肥を行った。

表 3, 栽培試験設計

試験区 カリ総量	K ₂ O施用量(mg/pot)				
	ゼオ無施肥	ゼオ0.5t/10a	ゼオ1/10a	Caゼオ0.5t/10a	Caゼオ1t/10a
121	95+0+26			95+13+13	95+26+0
198	95+0+103	95+103+0		95+13+90	95+26+77
301	95+0+206	95+103+103	95+206+0	95+13+193	95+26+180
500	95+0+405	95+103+302	95+206+199	95+13+392	95+26+379
600	95+0+505	95+103+402	95+206+299	95+13+492	95+26+479
*(土壌中+ゼオライト中+施肥)			各3連	22区	66pot

3)栽培方法

栽培期間中にポットの浸透水を採取できるような装置を作成した(図1)。1/5000a ワグネルポットの基底部に、観賞魚のエアレーションに使用されるロングストーン 10cm (貝沼産業製) を目が詰まらないよう、ガラス繊維濾紙(203×254mm GF/A ワットマン) でくるみ、その上を遮根シートで覆った。ガラス管を通したゴム栓(9号)の一方をロングストーンと接合し、一方は底部の穴から突き出るようにした。外部に露出したガラス管にゴム管を接続して、ピンチコックで先端を塞げるようにした。そして、ロングストーンが隠れる程度の川砂をポット内部に引き詰め(5cm程度)、土壌と混ざらないよう遮根シートで川砂を包み、その上に肥料および各資材をあらかじめ混和した土壌入れた。なお、土壌は全ポット同量となるように

した。そして、土壌が冠水するまで水道水を入れ代掻きを行い、数日後にひとめぼれを定植した。定植してから水稻の根が活着した2週間後に下部のピンチコックを開き、溶脱水の採取を開始した。灌水は毎朝水道水で行い、ポットからの溶脱水採取については現地水田の水の流出入をできるだけ再現するようにした。水田の平均的な減水深 2cm (400mL/ポット) から、半分を蒸散量としポット当たり 200mL を1日6時間(0.5ml/min)かけて採取し、栽培期間中の溶脱水中の無機成分について分析をおこなった。栽培期間は 6/9 から 8/4 で、幼穂形成期前に水稻茎葉を刈り取り、乾燥させ分析に供した。

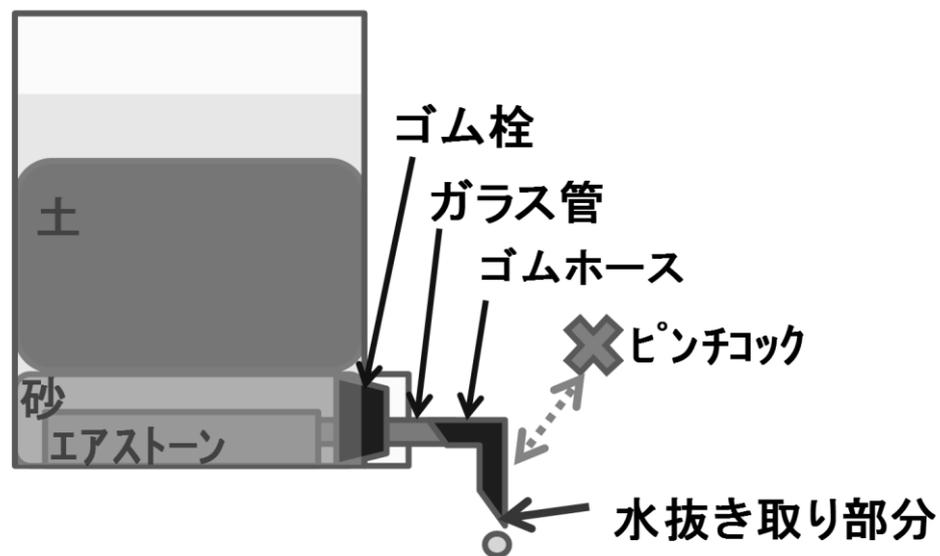


図 1, ポットに浸透した溶脱水を抜き取るための

栽培試験装置模式図

4)測定・分析方法

茎葉は自然乾燥後 2cm 程度に裁断して U8 容器に充填し、キャンベラ社製のゲルマニウム半導体検出器にて放射能強度を測定した。また、溶脱水は No.131 ろ紙でろ過後、自動化学分析装置（日立 7020）にてアンモニア態窒素、硝酸態窒素、ICP-AES（島津製作所 ICPS-8100）にてカリウムの測定をおこなった。また、アンモニア態窒素と硝酸態窒素の合計量を窒素溶脱量と示したが還元条件下であるためほとんどがアンモニア態窒素である。

3,結果および考察

水稻の放射性セシウム強度の結果は図 2、3 に示した。対照区については、ポット中のカリ量が多くなるほど放射性セシウムは低減した。また、カリ 120～500mg/pot の試験区においてゼオライト施用により水稻の放射性セシウムは有意に低減されたが、カリ 600mg/pot の試験区では有意差は確認できなかった。ゼオライト施用量とカリ量の間には 25%水準で交互作用が確認され、カリ量が少ないほどゼオライト施用による放射性セシウム低減効果が高いことが示された。また、放射性セシウム吸収についてはゼオライトと Ca 置換ゼオライト間の差は認められなかった。

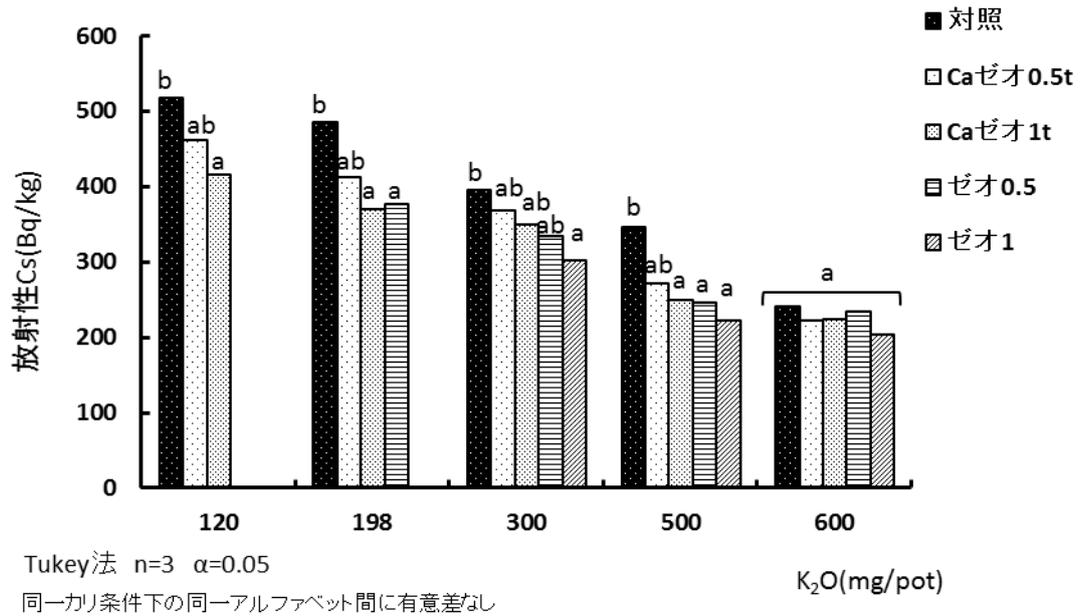


図 2, 異なるカリ条件下でのゼオライト施用が
放射性セシウム吸収に及ぼす影響

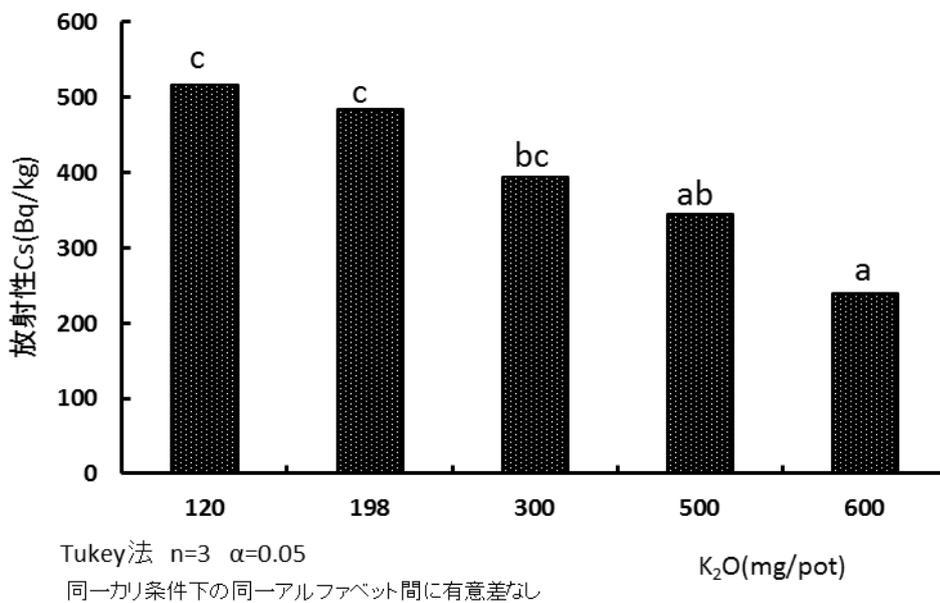


図 3, カリ量と水稻茎葉の放射性セシウム強度の関係

栽培期間中に溶脱した窒素、カリについて図 4、5 に示した。カリ溶脱量についてゼオライト施用によって有意に抑制されており、ゼオライトと Ca 置換ゼオライト間での有意差はなかった。カリ量とゼオライト施用量の間にはゼオライトで 25% 水準、Ca 置換ゼオライトで 5%水準の交互作用が確認され、すなわちカリ量が多くなるほどゼオライト施用によってカリ溶脱が抑制されることが分かった。

一方、窒素についてもゼオライト施用によって溶脱が抑制されていることが分かる。また、カリ 300mg/pot で Ca 置換ゼオライト 1t/10a 施用が最も窒素溶脱抑制しており、カリ 600mg/pot で Ca 置換ゼオライトよりもゼオライトで窒素溶脱抑制効果が高いことが示された。これは Ca 置換ゼオライトの作成過程で一部の不交換態となった NH_4^+ が K^+ 増加により溶出されたことが考えられる。

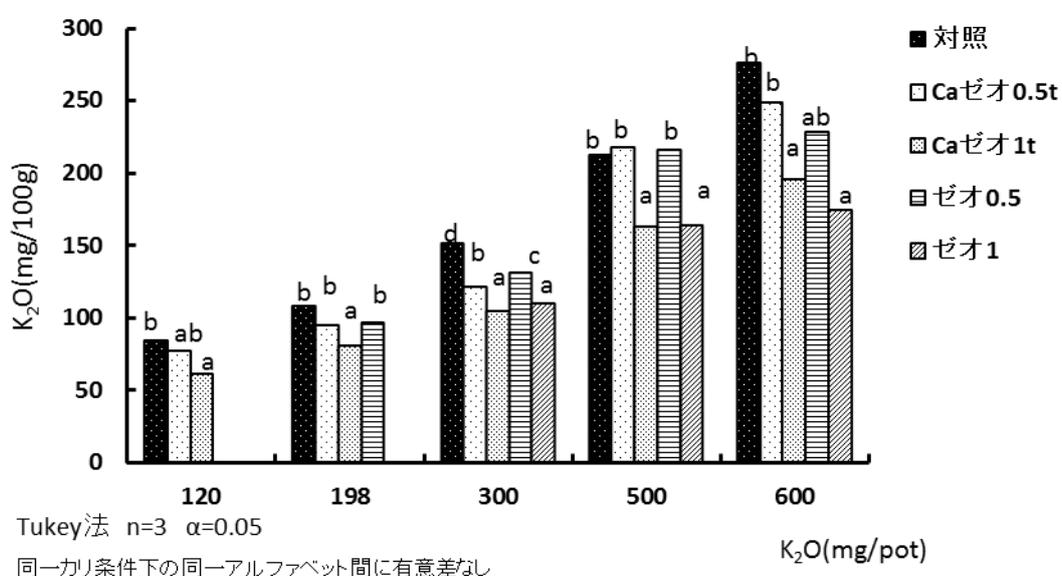


図 4, 異なるカリ条件下でゼオライト施用が

カリ溶脱量に及ぼす影響

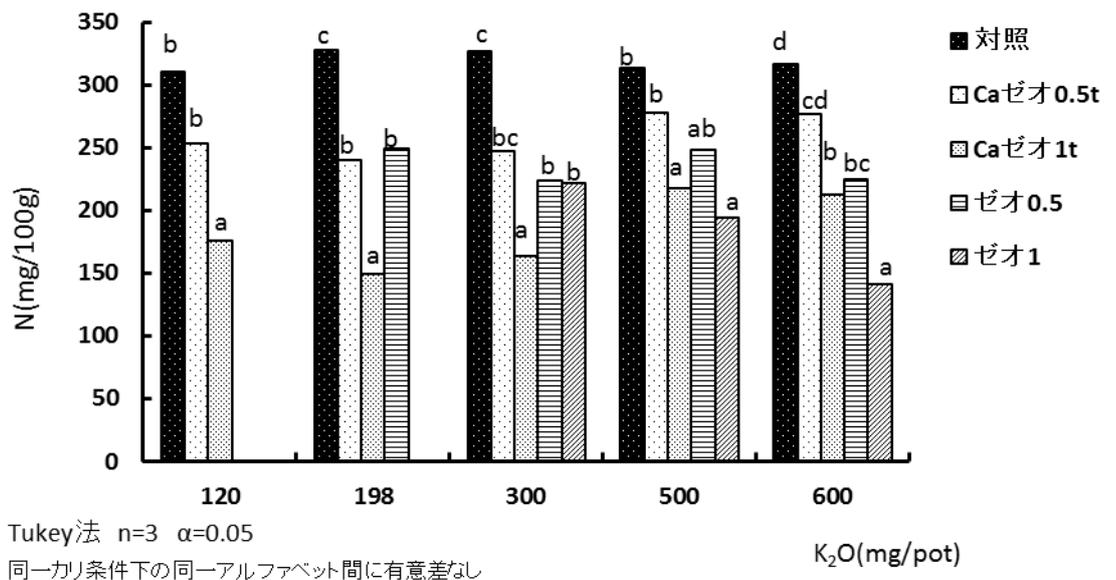


図 5, 異なるカリ条件下でゼオライト施用が

窒素溶脱量に及ぼす影響

あるいは、ゼオライトはイオン交換レベルによってゼオライトの各種分子の吸着量が変わるため、 K^+ と Ca^{2+} のイオン交換反応により有効細孔径が変化したことにより（1991 富永ら）、Ca 置換ゼオライトでは NH_4^+ と K^+ 吸着性に微妙な変化を生じたと推察される。

ゼオライトの陽イオンの選択性は $NH_4^+ \gg K^+ > Na^+ > Ca^{2+}$ の序列となるが、カリ 300mg/pot までにおいてはゼオライトによる選択性について Ca^{2+} は K^+ に劣るためゼオライトよりもCa 置換ゼオライトにおいて NH_4^+ との交換性が高かったと考えられる。一方でカリ 500mg/pot ではゼオライトの種類による NH_4^+ 吸着性の違いはなくなり、600mg/pot において逆転し

た。これは K^+ が濃度の増加によって優勢イオンになることで、Ca 置換ゼオライトの有効細孔径に生じた変化により NH_4^+ の吸着性が若干低減したものと考えられた。また、ポット中のカリ量とゼオライト、Ca 置換ゼオライト施用量の間にはそれぞれ 10%水準の交互作用が確認され、低カリ条件下で窒素捕捉効果が高いことが分かった。

以上から、ゼオライト施用によって放射性セシウム吸収抑制効果が確認された。その要因はゼオライトによる陽イオンの特異吸着性によるものと判断できる。ゼオライトは Cs^+ 、 K^+ 、 NH_4^+ など陽イオンを吸着するが、 Cs^+ はより強固に捕捉されるため、水稻は優先的また拮抗的に K^+ 、 NH_4^+ を吸収し、その結果、放射性セシウム低減効果を発揮したと推察できる。またゼオライトは低カリ条件下で NH_4^+ の捕捉効果が高いことが分かったため、放射性セシウム吸収が高い土壌においてゼオライト施用効果は高いと考えられる。

2-3.ゼオライトの水稲への放射性セシウム吸収抑制メカニズム検証のためのポット栽培試験

2-3-(2).酸性改良、窒素施肥およびゼオライト施肥が水稲の放射性セシウム吸収に及ぼす影響

1.はじめに

現地圃場における水稲栽培試験で、酸性改良やゼオライト施用による放射性セシウム吸収抑制効果が確認された。また、これらの試験では玄米が増収したことから窒素吸収性の向上したことが示されている。現地栽培土壌を用いた培養試験から、酸性改良によるアルカリ効果によって土壌から窒素無機化の促進が確認されている。牧草や畑作物において酸性改良によって放射性セシウム吸収抑制効果が報告されているが（Nisbetら 1993）、水田土壌についてその効果は明確にされていない。

天正ら（1961）は水稲栽培においてアンモニウムイオンの共存は、放射性セシウム吸収を促進すると報告しており、水稲の特異的に高い Cs 吸収能は、水田特有の土壌条件に起因する現象であり、窒素源がアンモニア態窒素であることにもとづくものであるとしている。

そこで、水稲栽培におけるゼオライト施用と酸性改良では両者において還元条件下土壌における窒素の挙動について共通点があることが考えられ、その放射性セシウム吸収抑制効果についてメカニズムを解明するために、アンモニウムイオンの挙動について着目したポット栽培試験を実施した。

2,材料および方法

1)供試土壌

福島県伊達市にある 2 ヶ所の灰色低地土圃場において土壌を採取し、5mm の篩いにかけて均一化したものを供試した。土壌化学性は表 1 に示したが、陽イオン交換容量が CEC9、CEC30 と異なる。各土壌の放射能強度は 2552Bq/kg、8240Bq/kg であった。

表 1, 供試土壌の化学性および放射能強度

	pH	EC (mS/cm)	交換性塩基 (mg/100g)				CEC meq/100g	塩基飽和度 %	放射性Cs Bq/kg
	(H ₂ O)		CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O			
CEC9	5.40	0.03	94.55	14.66	4.67	5.43	8.58	57.40	2553
CEC30	5.50	0.06	517.22	134.94	10.31	11.07	32.47	83.31	8240

2)供試材料

ゼオライトは福島県飯坂鉦山より産出されたモルデナイト結晶型で、日東粉化株式会社のケイゼオン（粒系 3.3mm 以下 6メッシュ）を使用した。

酸性改良資材として転炉スラグ（ミネックス株式会社てんろ石灰）を用いた。

3)試験区

試験区は対照区として酸性改良無しの無改良区と、転炉スラグによって pH6.5、pH7.5 に酸性改良した区および窒素多肥区を設定し、各区にゼオライト 0.5t/10a(10g/pot)施用区を設けた。なお、酸性改良区では各土壌について公定法である pH 緩衝曲線法を用い、目標 pH となるように転炉スラグを施用した。カリの施用量はゼオライトに含有される K₂O 1%を加味して、土

壤交換性カリを含め、合計でポットあたり 0.33g となるよう塩化カリで調整し施用した。また、窒素肥料は窒素多肥区で N 0.50g/pot、それ以外では N 0.25g となるように塩化アンモニウムで施用し、リン酸は全区において P₂O₅ 0.50g/pot となるよう過リン酸石灰で施用した。

4)栽培方法

栽培は 1/5000a ワグネルポットで行い、品種ひとめぼれを 6/9 定植し 8/4 の幼穂形成期前に茎葉を刈り取り、乾燥させ分析に供した。栽培期間中（56 日間）は水道水で灌水をおこなった。

5)窒素無機化試験

酸性改良による土壌からの窒素無機化量について室内試験を行った。試験区は無改良と、転炉スラグによって pH6.5、pH7.5 に酸性改良した区で、公定法である水田土壌の保温静置法による培養試験を実施した。培養温度は 30℃で、2 週間ごとに 8 週間（56 日間）までの窒素無機化量について測定を行った。

6)測定・分析方法

茎葉は自然乾燥後 2cm 程度に裁断して U8 容器に充填し、キャンベラ社製のゲルマニウム半導体検出器にて放射能強度を測定した。

3,結果および考察

栽培試験の結果

茎葉の放射性セシウムの結果は図 1 のようになった。CEC9

の土壌では無改良区で 441Bq/kg であったが、pH6.5 で 222Bq/kg、pH7.5 で 217Bq/kg と酸性改良により放射性セシウム低減効果が確認され、pH6.5 と pH7.5 間での有意差は認められなかった。一方で窒素多肥区では 797Bq/kg と有意に放射性セシウム吸収が増加していたが、ゼオライト施用により 470Bq/kg まで低減した。また、無改良、pH6.5、pH7.5 の各ゼオライト施用区は 352、184、152Bq/kg となり、有意差は認められなかったが各 pH 条件下においてゼオライト施用により放射性セシウムは低減する傾向にあった。

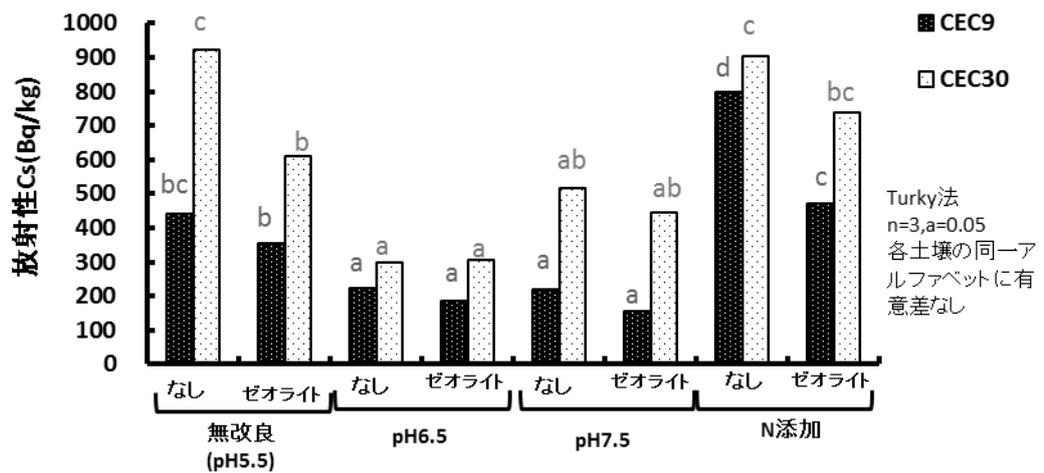


図 1, 窒素、酸性改良、ゼオライト施用が水稻茎葉の放射性セシウム強度に及ぼす影響

CEC30の土壌において無改良区で912Bq/kgとなり、pH6.5で296Bq/kg、pH7.5で515Bq/kgと酸性改良によって有意に放射性セシウムは低減したが、pHの上昇に伴い放射性セシウムは増加する傾向がみられた。また酸性改良区においてゼオライト施用効果は確認されなかった。窒素多肥区は903Bq/kgと無改良と同程度の値となり、無改良区と窒素多肥区においてゼオライト施用により608、736Bq/kgと放射性セシウム低減効果が認められた。ゼオライト施用の効果はpH6.5ではみとめられなかったが、pH7.5では442 Bq/kgと低減する傾向にあった。

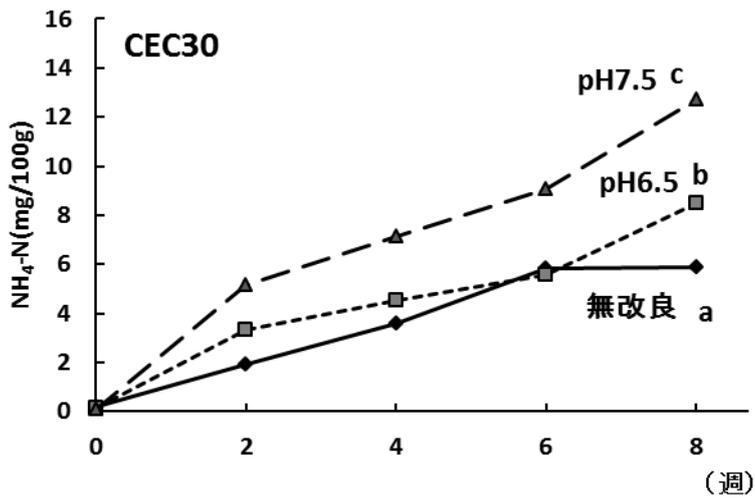
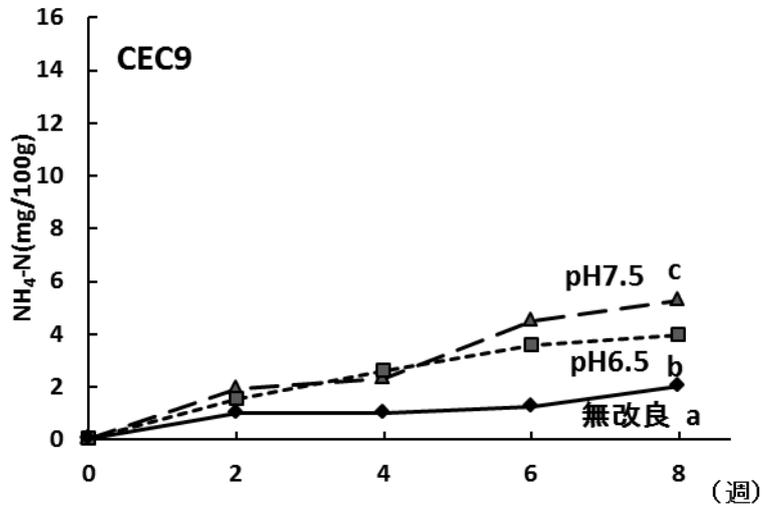
CEC9、30の両土壌において酸性改良による放射性セシウム低減効果が確認された。しかし、CEC30ではpH6.5よりもpH7.5で放射性セシウム吸収は増加する傾向にあった。また窒素多肥区はCEC9で有意に放射性セシウム増加が確認されたが、CEC30では無改良区と同程度であった。

窒素無機化試験の結果

土壌から無機化するアンモニウムイオンについて培養試験をおこなった結果を図2に示した。

CEC9、30の両土壌共に、無改良区と比較しpH6.5、pH7.5とpHが高くなるほどアンモニウムイオンが増加していくことが分かる。土壌pHを上げると有機物の一部が溶出して微生物の分解作用を受けやすくなり、土壌中のタンパク質など難分解性有機態窒素がアミノ酸を経てアンモニア態窒素まで分解される。生物的作用によるものであるから、アンモニア態窒素の

溶出は緩効的であることが分かる。



*培養 8 週目の窒素無機化量について Tukey 法, $n=3$, $\alpha = 0.05$
同一アルファベット間に有意差なし。

図 2, 酸性改良による還元条件下土壤の
アンモニア態窒素の無機化量

培養 8 週目のアンモニウムイオンの増加量について、CEC9 では無改良区 2.0mg/100g、pH6.5 で 4.0mg/100g、pH7.5 で 5.3mg/100g となった。一方 CEC30 では無改良で 5.9mg/100g、pH6.5 で 8.5mg/100g、pH7.5 で 12.7mg/100g と、各 pH 条件下の CEC9 土壌と比較し倍以上となるアンモニウムイオンが土壌より無機化していることがわかった。これは、CEC30 の土壌に多くの有機物が含有されていたため、窒素の無機化量が多かったと考えられた。

4,総合考察

水田土壌において NH_4^+ の共存は水稲への放射性 Cs 吸収を増加させることが報告されている。 K^+ 、 NH_4^+ 、 Cs^+ はいずれも同族のアルカリ金属元素であり、土壌コロイドに対する吸着力は、 $\text{Cs}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+$ であることが知られている。そのため、土壌コロイド表面に吸着されている交換性セシウムはカリウムイオンを施用してもセシウムイオンと交換放出されにくい。しかし多量のアンモニウムイオンを一度に施用すると交換性セシウムは土壌溶液中に放出され水稲に吸収される。その理由として土壌コロイドに吸着された交換態 Cs が NH_4^+ と交換置換され、遊離された Cs^+ が水稲に吸収されることが考えられる（天正ら 1961、津村ら 1984）。今回の試験栽培においてもアンモニア施肥によって水稲の放射性 Cs 吸収量は増加し過去の知見と一致する。一方で、ゼオライト施用によって Cs 吸収は抑制された。これはゼオライトが NH_4^+ を特異吸着したことにより、土壌溶液中の NH_4^+ 増大を抑制したことで、土壌コロイドに吸

着された Cs⁺との交換置換による遊離が抑制されたためと考えられる。また水稲はゼオライトに吸着された NH₄⁺を効率的に吸収したため、玄米増収効果を発揮したと推察できる。

酸性改良による放射性 Cs 吸収については、CEC9 では pH 上昇に伴い低下しており、また土壌からの窒素無機化については NH₄⁺が緩効的に溶出していることが分かる。一方で CEC30 は酸性改良により Cs 吸収は抑制していたが pH6.5 より 7.5 でその吸収は増加しており、その土壌からの NH₄⁺の溶出は多く、pH7.5 では無改良の倍量ともなる窒素無機化が確認された。

これらのことから NH₄⁺の挙動については、次のように考察した。pH が高まると結晶粘土鉱物のケイ酸四面大層の末端基から陰電荷が発生するため、陽イオンの固定能が増加し NH₄⁺固定能が高くなる。また、一部は水稲に効率よく吸収されることで、土壌溶液中の NH₄⁺は増加せず、土壌コロイドに吸着されている Cs⁺の遊離を抑制したと考えられる。また一方で、CEC30 の結果から分かるように、土壌陰電荷による NH₄⁺固定能と水稲による吸収量を超過する NH₄⁺溶出量があった場合は、土壌に固定された Cs⁺との置換反応が起こり、作物に Cs が吸収されたと考えられる。よって、酸性改良による Cs 吸収抑制は土壌の窒素無機化量や pH 依存性陰電荷などに依存すると考えられるため、土壌の種類によってその効果は異なると推察される。

今回の試験結果と同様に土耕実験の場合、NH₄⁺の添加は Cs の吸収量を増加させることはすでに報告されている通りであるが、水耕実験では Cs の吸収に対し K⁺、NH₄⁺が拮抗的に働く

ことが確かめられている。作物による Cs 吸収量は培地に添加した NH_4^+ と Cs^+ との置換作用と吸収抑制作用の強さに著しく影響されるものと判断される（津村ら 1984）。よって、緩効的 NH_4^+ 溶出による土壤溶液中の絶妙な濃度バランスにより Cs 吸収抑制効果を発揮したとも考えられた。また、土壤による Cs^+ 吸着能は土壤の pH に影響されることが知られており、アルカリ土壤では Cs の固定力が強くなることが報告されている（津村ら 1984）が、今回の試験結果について考察すると酸性改良による Cs^+ 固定能増加よりも NH_4^+ の挙動が水稻の Cs 吸収と強く関係していると考えられた。

ゼオライトと酸性改良による Cs 吸収抑制効果について、両者とも NH_4^+ が関係していると考えられたが、その NH_4^+ の挙動、メカニズムについて異なる見解を得た。酸性改良では緩効的な NH_4^+ の溶出が Cs 吸収抑制能を発揮したと考えられ、土壤の種類によって効果が異なると予測される。よって、Cs 吸収抑制対策としてはゼオライト施用を推奨する。特に 2-3-(1) よりゼオライトは低カリ条件下における窒素捕捉効果が高いという結果を得ており、水稻栽培において強い効果を発揮すると考えられる。

3.畑作物の放射性セシウム吸収抑制対策試験

3-1.伊達市における大豆の作付け試験

1,はじめに

福島県では水稲と大豆の輪作体系が推進されており、2008年産における水田の本地面積に対する大豆作付け面積は1.9%であった。

大豆は水稲と比較しカリ要求量が高いため、セシウムの吸収性が高いことが予測される。また、栽培土壌条件が異なるため、水稲で有効であった放射性セシウム吸収抑制対策をそのまま大豆栽培で適用できるとは限らない。そこで、水稲栽培で有効であった放射性セシウム吸収抑制対策資材として塩化カリとゼオライトを用い、大豆の作付け試験を実施した。

対象地は福島県伊達市梁川町にある2圃場であり、堰本、山舟生にある圃場はそれぞれ水稲から転作して8、10年目であった。2012年産大豆から堰本350、山舟生69Bq/kgの放射性セシウムが検出された。この2圃場において、畑地土壌におけるセシウム吸収抑制策について検討をおこなった。

2,試験および方法

1)供試資材

セシウム対策抑制対策資材として、塩化カリと福島県飯坂鉦山産モルデナイト系の日東粉化工業株式会社製ゼオライトを使用した。

2)試験区

福島県伊達市梁川町にある山舟生、堰本地区における2圃場で試験作付けを実施した。試験区は表1のとおりである。

堰本は対照区と対策資材として塩化カリ、ゼオライト1、2t/10a、

転炉スラグ 1t/10a を施用した区を設定した。対照区と転炉スラグ区は K_2O 30kg/10a、塩化カリ区は K_2O 50kg/10a、ゼオライト施用区ではゼオライトには K_2O が 1%含有されるため、ゼオライト 1 t/10a 区は K_2O 40kg/10a、ゼオライト 2t/10a 区は K_2O 30kg/10a と合計で K_2O 50kg/10a となるように塩化カリで施肥した。

山舟生は対照区と塩化カリ、ゼオライト 1、2t/10a、転炉スラグ 2t/10a を施用した区を設定した。対照区と転炉スラグ区ではカリ無施用とし、塩化カリ、ゼオライト施用区ではではカリ合計施肥量が 50kg/10a となるように施肥した。すなわち、ゼオライト 1t/10a 区は K_2O 40kg/10a、ゼオライト 2t/10a 区は K_2O 30kg/10a となるように塩化カリで施肥した。

堰本、山舟生における試験は各区 2 反復で行い、大豆と土壌について分析をした。栽培した大豆は福島県の慣行品種であるタチナガハで、6月中旬に播種し 11月6日に大豆子実の収穫を行い、キャンベラ社製のゲルマニウム半導体検出器にて放射能強度を測定した。

表 1, 試験区設計

堰本(CEC25)			山舟生(CEC15)		
処理区	ゼオライト kg/10a	K_2O	処理区	ゼオライト kg/10a	K_2O
対照	—	30	対照	—	—
塩化カリ	—	50	塩化カリ	—	50
ゼオライト1t	1000	40+10	ゼオライト1	1000	40+10
ゼオライト2t	2000	30+20	ゼオライト2	2000	30+20
転炉スラグ	—	30	転炉スラグ	—	—

3) 土壌化学性

採取した土壌を風乾後 2mm の篩を全通させ、以下の分析に供し

た。pH(H₂O)、電気伝導率および可給態リン酸（トルオーグ法）は定法によった。陽イオン交換容量および交換性塩基は振とう抽出ICP発光分析法（1996 村本ら）によった。

3,結果および考察

各圃場の土壤放射能強度と施肥後土壤化学性は表○に示したが、交換性塩基のバラツキが大きかったため土壤化学性は2反復両方の値を示した。特に堰本圃場では交換性カリについて2反復間最大で80mg/100gもの差を生じていた。陽イオン交換容量は堰本で25meq/100g、山舟生で15meq/100gと2圃場間で異なっていた。また酸性改良資材として転炉スラグを施用した区について堰本で对照区のpH6.0からpH6.5、山舟生では对照区のpH5.6からpH6.1まで上昇していた。また土壤交換性カリの変化を図1に示した。ゼオライト施用区と塩化カリ区はカリ施肥量が同じであったが、ゼオライト施用区で交換性カリが高く保持されていることが分かる。

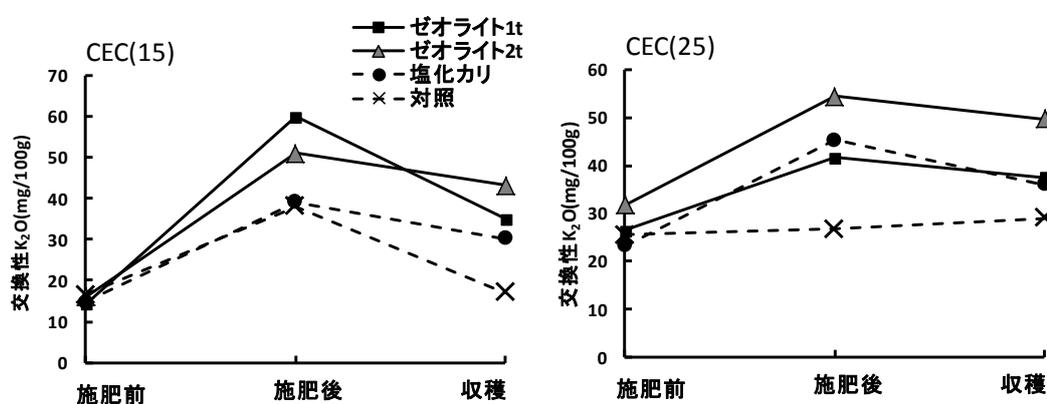


図 1, 各圃場における土壤交換性カリの変化

大豆子実体の放射性セシウム強度の結果は表 2 に示した。堰本において 2 反復のバラツキが大きかったため 25%水準においても有意差は確認できなかったが、平均値は対照区が 46Bq/kg と高く、塩化カリ、ゼオライト、転炉スラグ施用区では 20～23Bq/kg と大豆子実体の放射性セシウムは低減傾向にあった。山舟生では 25%水準において有意差が認められ、対照区、転炉スラグで放射性セシウム強度が高く、対照区と有意差はなかったが、塩化カリ、ゼオライト施用により放射性セシウム強度は低減された。転炉スラグについて堰本では対照区と比較し放射性セシウム低減傾向がみられたが、山舟生では相違なかった。また、堰本で大豆子実体に有意差が生じなかった。これらの原因として土壌交換性カリが 2 反復間で異なることが上げられるため、大豆子実体放射性セシウムと土壌交換性カリの関係性について相関（図 2）を調べた結果、両圃場においてそれぞれ土壌交換性カリが高いほど大豆子実体放射性セシウム強度は低減する傾向が示されたが、一方で 2 圃場全体としてはその傾向性は認められなかった。

表 2, 大豆子実の放射性セシウム強度

堰本(CEC25)	Cs			a		山舟生(CEC15)	Cs			ab	
	Cs ¹³⁴	Cs ¹³⁷	Cs合計				Cs ¹³⁴	Cs ¹³⁷	Cs合計		
	Bq/kg					Bq/kg					
対照	13.5	32.6	46.1	a		対照	2.3	6.6	8.9	ab	
塩化カリ	6.2	14.1	20.4	a		塩化カリ	1.3	2.4	3.7	a	
ゼオライト1t	7.2	16.0	23.2	a		ゼオライト1t	1.8	2.8	4.6	a	
ゼオライト2t	6.9	14.5	21.4	a		ゼオライト2t	1.5	3.5	5.0	a	
転炉スラグ	6.7	14.1	19.8	a		転炉スラグ	3.3	8.1	11.4	b	

Tukey法 $\alpha = 0.25$

2 圃場については陽イオン交換容量が異なるため、陽イオン交換容量を加味した指針となるカリ飽和度に直して、同一データの相関性を調べた（図 3）、その結果大豆子実体放射性セシウム強度とカリ飽和度について累乗近似曲線で $R^2=0.674$ の強い関係性が認められた。また、グラフからカリ飽和度 5%以上では大豆の放射性セシウムは 5Bq/kg 程度以下になることが分かった。

以上から、大豆栽培において放射性セシウム吸収を抑制する最も大きな要因として土壌交換性カリが挙げられる。ゼオライトは土壌の交換性カリを保持する資材として有効であることが確認された。転炉スラグについては、堰本でみられた放射性セシウム低減傾向は土壌交換性カリ含量で説明できるため、大豆圃場において転炉スラグの施用効果は認められなかった。

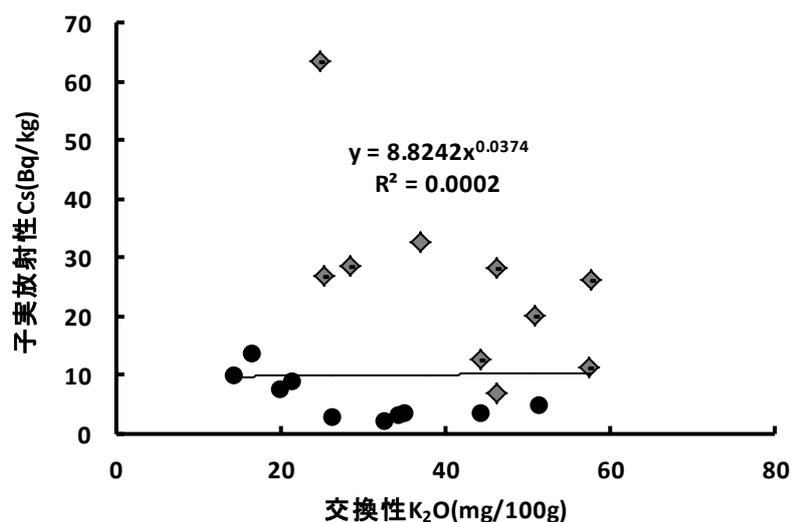


図 2、大豆の放射能強度と土壌交換性カリの関係

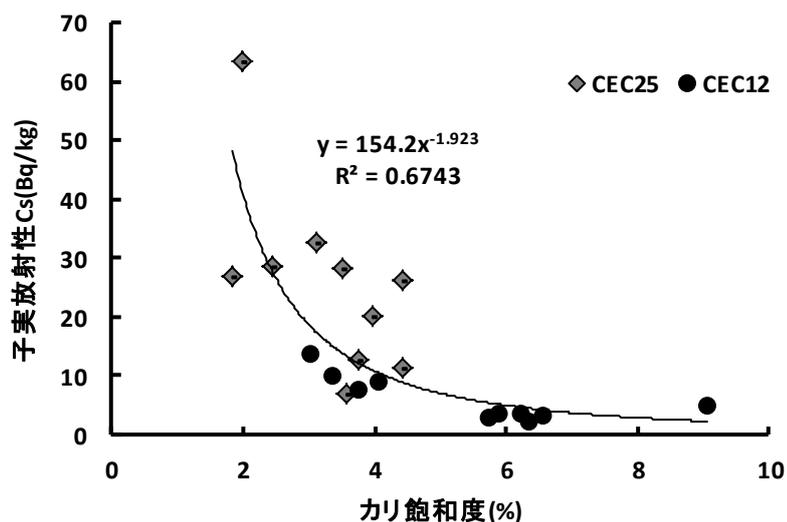


図 3, 大豆の放射能強度とカリ飽和度の関係

4, 総括

水稲の転作を行った圃場について大豆の放射能抑制対策試験をおこなった結果、塩化カリ、ゼオライト施用によって大豆子実の放射性セシウム低減効果が確認されたが、転炉スラグ施用による酸性改良ではその効果は確認できなかった。大豆子実の放射性セシウム強度と土壤交換性カリには高い関係性が認められたが、陽イオン交換容量の異なる圃場において一定の傾向性を示さなかった。そこで、交換性カリから陽イオン交換容量を加味したカリ飽和度にして相関性を調べると、強い関係性が確認された。この結果から、カリ飽和度を用いることで、異なる土壌においても放射能吸収抑制対策について統一の指標を示すことができた。

よって、大豆栽培における放射性セシウム吸収抑制対策として、カリ飽和度 5%以上を基準として施肥をおこない、土壤交換性カリを保持するためにゼオライト施用を行うこととする。

3.畑作物の放射性セシウム吸収抑制対策試験

3-2.堆肥施用が野菜のセシウム吸収に及ぼす影響

3-2-(1).伊達市におけるグリーンピース作付け試験

1,はじめに

福島県の2010年度グリーンピース生産量は全国6位であり、主要な農産物の一つであった。福島県伊達市の畑で、2012年産グリーンピースから133Bq/kgと食品新基準値を超過する放射性セシウムが検出された。この畑において放射能吸収抑制対策のための作付け試験を実施した。また、ここでは塩化カリの代替資材として堆肥が有効であるかの検討も行った。

2,試験および方法

施肥前土壌化学性は表1に示した。混層前と混層後の作土放射性セシウム強度は5869 Bq/kgから3888Bq/kgまで低減していた。耕地面積は500m²で、対策資材として塩化カリ、ゼオライト、堆肥、転炉スラグを用いた作付け試験を実施した。試験区とカリ施用量は表2にしめしたとおりで、カリ慣行施用量の対照区と、塩化カリ施用、堆肥施用、転炉スラグ施用にそれぞれゼオライト併用区を2反復で設定した。全区に基肥としてえんどう類専用肥料N(10)、P(14)、K(10)kg/10aを施用した。従って、K₂Oの施用量は対照区で10kg/10a、ゼオライト単独施用区では基肥に加えゼオライト1t/10aにK₂O 18kg/10a含有されるため合計で28kg/10a、塩化カリ区と堆肥区(3t/10a)、転炉スラグ(3t/10a)と塩化カリ併用区で48~49kg/10a、塩化カリとゼオライトの併用区および塩

化カリ、ゼオライト、転炉スラグを全て併用した混合区で 66kg/10a となる。グリーンピース栽培品種は実えんどうで、2012年10月20日に播種し、2013年4月に尿素 4kg/10a 追肥して6月12日に収穫した。収穫したグリーンピースの葉と子実はヤンベラ社製のゲルマニウム半導体検出器にて放射能強度を分析した。

表 1, 作付け試験土壌化学性

深さ cm	pH	EC mS/cm	NH ₄ -N	NO ₃ -N	可給態	水溶性
	(H ₂ O)		無機態窒素 (mg/100g)		P ₂ O ₅ (mg/100g)	
0-15	6.1	0.07	1.13	0.66	33.0	6.40
交換性塩基 (mg/100g)					CEC meq/100g	塩基飽和度 %
CaO		MgO	K ₂ O	Na ₂ O		
755		142	20.9	6.26	40.2	86.2

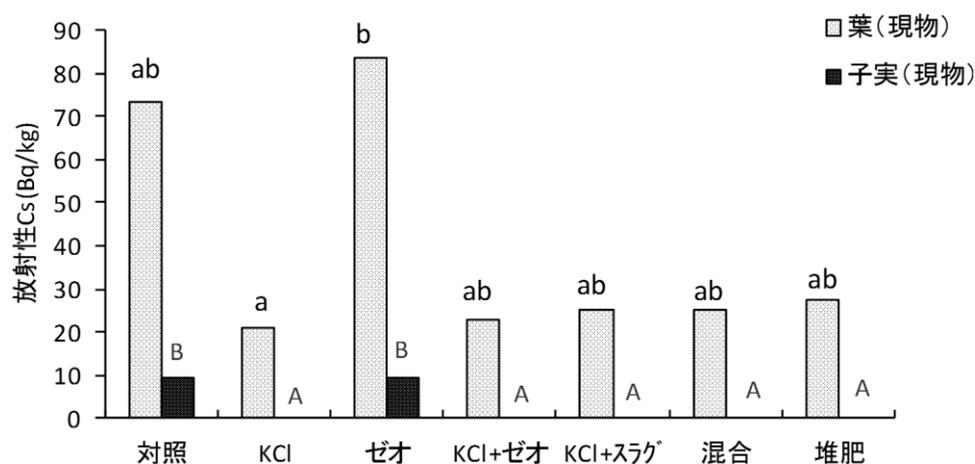
表 2, 試験区及び資材により施肥されたカリ量

	基肥	塩化カリ	ゼオライト	牛ふん堆肥	合計
資材施肥(kg/10a)		60	1000	3000	K ₂ O
(K ₂ O kg/10a)	(10)	(38)	(18)	(39)	kg
対照(慣行施肥)	10	-	-	-	10
ゼオライト	10	-	18	-	28
塩化カリ	10	38	-	-	48
塩化カリ+ゼオライト	10	38	18	-	66
堆肥	10	-	-	39	49
塩化カリ+スラグ	10	38	-	-	48
混合	10	38	18	-	66

3, 結果および考察

グリーンピース葉と子実体における放射性セシウム強度の結果は図 1 のとおりとなった。対照区とゼオライト単独施用区では葉か

ら 73、83Bq/kg、子実体から 9.8、9.5Bq/kg の放射性セシウムが検出された。一方でその他の対策区では葉部 21~27Bq/kg、子実体については検出限界以下となった。以上から、ゼオライトについては単独施用で放射性セシウム吸収抑制効果は示さず、カリ資材との併用により効果を発揮することが考えられた。一方で、塩化カリ区と堆肥区について同等の放射性セシウム抑制効果が確認された。両区では K_2O 施肥量は同量であり、堆肥中のカリにおいても放射性セシウム吸収抑制資材として有効であることが示された。よって、カリ代替資材として堆肥の活用が期待される。



*Turkey法 a=0.05 n=2 葉、子実体の同一アルファベット間に有意差なし。

図 1, 各資材がグリーンピースの放射性セシウム吸収に

及ぼす影響

グリーンピースの栽培試験について、カリ施肥量が異なっていたため、施肥後土壌の交換性カリとグリーンピース葉部の相関性について調べたところ、図 2 のように交換性カリが高くなるほど、放射性セシウムが低減されることが確認された。また、カリ飽和度で相関性を調べたところ、図 3 のようにカリ飽和度 5%以上から放射性セシウム強度は横ばいとなった。すなわち、グリーンピースにおいてカリ飽和度 5%以上で放射性セシウムの吸収は抑制され、これは同じ豆科である大豆と同様の結果となる。

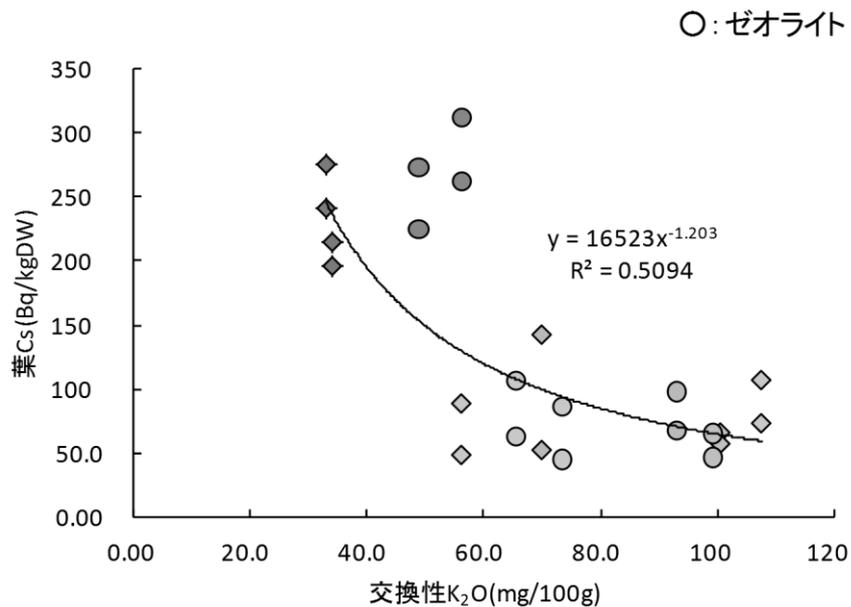


図 2, グリーンピース葉部の放射性セシウムと

施肥後土壌交換性カリ含量

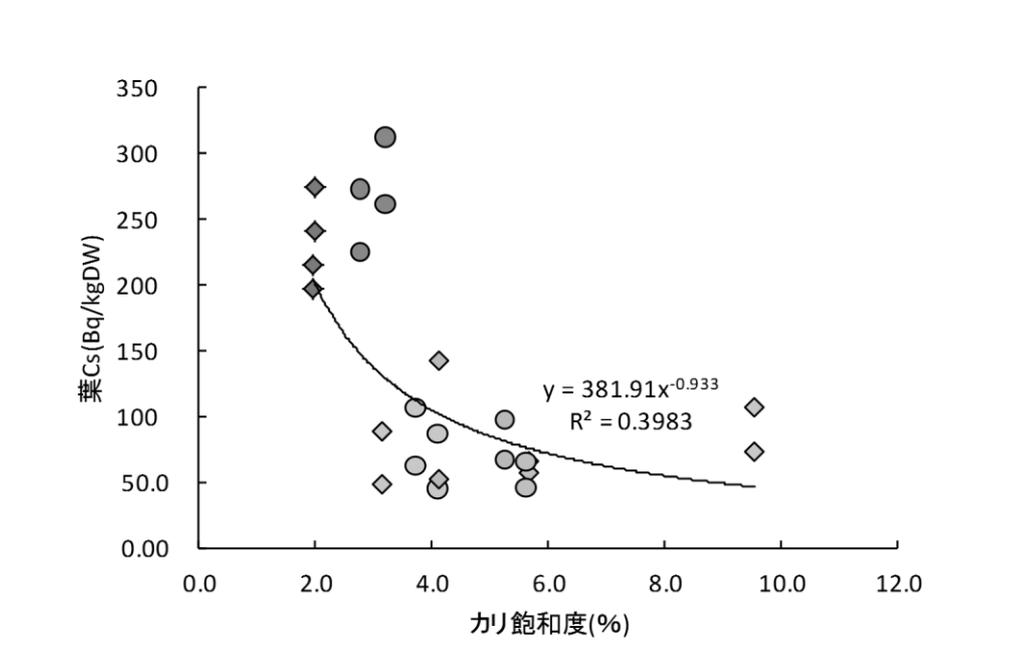


図 3, グリンピース葉部の放射性セシウムと

施肥後土壌カリ飽和度

3.畑作物の放射性セシウム吸収抑制対策試験

3-2.堆肥施用が野菜のセシウム吸収に及ぼす影響

3-2-(2).放射能汚染堆肥の施用が

野菜のセシウム吸収に及ぼす影響について群馬県の調査事例

1, はじめに

堆肥の放射性セシウムが暫定基準値である 400Bq/kg を超過したものは出荷・利用の制限がかかった。暫定許容値を超過した堆肥は、利用ができなくなったため堆肥の製造場所に滞留し、新たな堆肥の保管場所が不足した。また堆肥の一時的な移動には多額の補助金が投じられた。8000Bq/kg 以下の堆肥については一般廃棄物として処分可能であるが、処分に関しても放射性物質の飛散や焼却灰をめぐる不安が残るため、放射能汚染堆肥に関してはその処分に窮しているのが現状である。

汚染堆肥を施用した場合、その土壌も汚染され、農作物へ吸収される放射性セシウムが増大することへの疑念が、汚染有機物施用について消極的である最大の理由であろう。しかしながら、現在における堆肥の暫定基準値は長期間施用しても原発事故前の土壌の水準に収まる範囲となる（農水省 2012）ように設定された非常に低いレベルとなっている。

群馬県渋川市のある有機農家では、近隣の山野から落ち葉や枝を拾い木質主体の自家製堆肥を施用して露地で多品目野菜を栽培していた。2011年9月11日に農家の依頼により調査に入った。堆肥について放射能を測定したところ暫定基準値を超過する放射性セシウムが検出された。原発から離れていたが、ホットスポットであることが考えられる。しかし、化学肥料を用いることができないため、その堆肥を施用して野菜を栽培するしかないが、野菜への移行が懸念されるため、野菜について随

時、放射性セシウム強度を調べることにした。その調査結果について報告する。

2, 方法

農家には通常のように栽培してもらい、収穫した野菜の放射能強度を測定した。畑では常に多品目の野菜が栽培され、収穫期についても異なる。また、収穫を終えた畑では随時作付けをしていくような輪作体系であった。畑の隅に堆積した堆肥の山を切り崩して、毎作 3~4t/10a 程度を畑に施用し混層後作付けを行っていた。土壌、野菜の放射能強度は NaI (シンチレーションカウンター) で測定した。

3, 結果および考察

堆肥および作土の放射性 ^{137}Cs 強度は表 1 に示した。作土からは 320Bq/kg 程度検出され、堆肥から暫定基準値 400Bq/kg を超過する放射能が検出された。採取時期によって放射能強度は異なり、原発事故から 2 か月後の 5 月では 500Bq/kg であったが、9 月には 2200Bq/kg、翌 3 月には 5000Bq/kg であった。5 月では堆積された山の表面に降下した放射能が検出され、9 月、3 月については森林の落ち葉などに付着した放射能が堆肥化により濃縮されたと考えられる。今回栽培に使用した堆肥は 500~2200Bq/kg であった。栽培された野菜について表 2 に示したが、コマツナ、ホウレンソウ、ニンジン、ネギについて測定したところいずれも 10Bq/kg 以下と検出限界であった。

表 1, 堆肥と作土の放射性セシウム強度

	採取日	¹³⁷ Cs Bq/kg
堆肥	2011/5/19	557
	2011/9/8	2257
	2011/3/7	5082
作土	2011/9/8	321

*堆肥は現物、作土は風乾物。

表 2, 野菜の放射性セシウム強度

	¹³⁷ Cs Bq/kg
2011/10/7 コマツナ	ND
2011/11/7 ホウレンソウ	ND
2012/3/7 ニンジン	ND
2012/3/7 ネギ	ND

*野菜は現物の値

表 3 に土壌化学性を示したが、作土で交換性 K_2O が 80mg/100g もあり、高濃度放射能汚染堆肥を使用しても土壌にカリが十分量あれば、野菜に放射性セシウムは吸収されないことが実証された。また堆肥化学性を表 4 に示すが、堆肥には K_2O 1%含有されているため、堆肥 3t/10a では K_2O 30kg/10a に相当する。当該畑ではむしろ養分過剰気味であり堆肥施用量を抑えた方が良いと思うが、堆肥から供給される K_2O は放射能吸収抑制に有効であると考えられた。

表 3, 栽培土壌の化学性

深さ cm	pH	EC mS/cm	交換性塩基 (mg/100g)		
	H ₂ O		CaO	MgO	K ₂ O
15	6.9	0.12	673	65.4	84.3
30	6.9	0.12	568	55.6	73.0
45	7.0	0.10	445	47.5	68.6

CEC	塩基飽和度	可給態P ₂ O ₅
meq/100g	%	mg/100g
25.0	117	298
20.9	118	287
17.6	112	164

表 4, 堆肥の全分解成分による化学性

N	C	C/N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O
(%)			(%)				
0.93	21.3	22.8	0.35	1.00	1.47	0.24	0.04

(現物あたり)

3.畑作物の放射性セシウム吸収抑制対策試験

3-2.堆肥施用が野菜のセシウム吸収に及ぼす影響

3-2-(3).有機物施用が土壤溶液および野菜の

^{133}Cs 移行に及ぼす影響

1,はじめに

農地への有機物施用と作物への放射能吸収移行の関係については過去にいくつか挙げられており、有機質土壌では Cs の移動性が高く、植物体への高い移行が引き起こされることが報告されている。これは有機物の添加により土壌粘土鉱物の Cs 吸着が低下するためである。(SANCHEZ AL1999,STAUNTION S ら 2002)。また一方で有機物施用によって Cs の植物への移行が低減することを LEMBRECHTS J(1993)は報告している。今回は有機物施用による効果について、移動性や施用条件などを踏まえ考察することとした。

2,材料および方法

1)堆肥施用による土壤溶液への ^{133}Cs の移動性

黒ボク土:堆肥=2:1(V/V)となるように混合し、水分を最大容水量の 60%となるようにし、50 日間 30°C で保温静置後、pF4.2 となるように遠心法にて土壤溶液を採取し、土壤溶液に移行した ^{133}Cs を調べた。試験区は表 1 に示した通りで、堆肥無施用区、施用区を設定し、ゼオライト 0,1,10%施用区を混合した。また、 ^{133}Cs を 0.6mg/kg となるように塩化セシウムを添加した区も設定した。黒ボク土の ^{133}Cs は 3200 $\mu\text{g}/\text{kg}$ であった。

表 1, 土壌溶水への ^{133}Cs 移行試験区

	堆肥施用	^{133}Cs 添加*	ゼオライト 添加
1	×	×	0%
2	○	×	0%
3	×	○	0%
4	×	○	1%
5	×	○	10%
6	○	○	0%
7	○	○	1%
8	○	○	10%

2) 堆肥施用して栽培したラデッシュにおける ^{133}Cs の移行率

試験区は表 2 に示したとおりである。栽培土壌は黒ボク土（農大用賀圃場）と、単純な有機物の効果を確認するためにピートモス（カナダ産）を供試した。堆肥は剪定枝主体の木質堆肥を用い容積比で 1/3 となるように 50g/pot 添加混合した。またゼオライト（日東粉化製）を各区に 0、1、10% となるように添加した。また対照として各土壌（培地）に堆肥無施用区、ゼオライト 100% 区を設定した。対照区施肥は $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=0.2:0.2:0.2(\text{g})$ となるようにそれぞれ硝酸カルシウム、熔リン、塩化カリで施用し、FTE 0.4g を加えた。ピートモスは $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})4$ であったので $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})6$ となるように苦土石灰で調整した。堆肥施用区については N 0.2g のみ硝酸カルシウムで施肥した。堆肥のポットあたりの成分添加量は $\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=0.34:0.34(\text{g})$ であった。

栽培規模は 1/10000a ノイバウエルポットで、ラデッシュをガラス温室で 10/22~12/7 の 46 日間栽培し、地上部と根部の

^{133}Cs を測定した。各材料及び試験区の硝酸加圧分解による全抽出成分と ^{133}Cs 含量は表 3 に示した。

表 2, ラデッシ栽培試験設計

要因	水準
培地	黒ボク土, ピートモス
ゼオライト	0%, 1%, 10%, (100%)
(10区 × 3連 = 30pot)	各3連

表 3, 各試験区・資材における全成分抽出量及び ^{133}Cs 含量

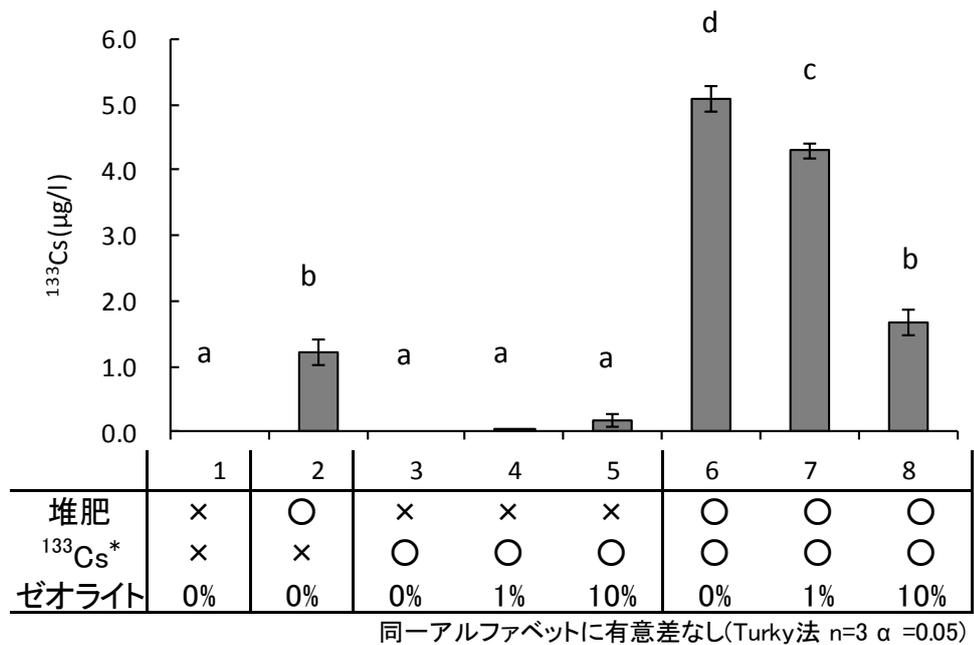
	堆肥施用	ゼオライト %	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	Na_2O	^{133}Cs $\mu\text{g/kg}$
黒ボク	○	0	1.11	0.26	1.32	1.82	0.06	2351
	○	1	1.11	0.26	1.32	1.82	0.06	2347
	○	10	1.12	0.27	1.37	1.79	0.06	2310
ピートモス	○	0	1.58	0.49	2.54	1.21	0.10	232
	○	1	1.58	0.49	2.55	1.21	0.10	232
	○	10	1.61	0.50	2.62	1.17	0.10	240
黒ボク	×	0	0.89	0.15	0.76	2.09	0.04	2808
ピートモス	×	0	0.06	0.03	0.11	0.21	0.02	46.9
堆肥	—	—	0.68	0.69	2.62	0.46	0.09	185

(ゼオライト ^{133}Cs 5995 $\mu\text{g/kg}$)

3, 結果および考察

1) 堆肥施用による土壤溶液への ^{133}Cs の移動性

結果は図 1 に示したとおりで、堆肥施用によって土壤溶液中の ^{133}Cs 濃度が増加した。これは ^{133}Cs 添加区において土壤溶液中の ^{133}Cs 濃度増加は顕著であった。つまり堆肥によって ^{133}Cs の移動性が高まったと考えられる。そして、ゼオライト施用によって土壤溶液中の ^{133}Cs は低減していることが分かるが、これはゼオライトが ^{133}Cs を特異的に捕捉したことによるものと判断される。



黒ボク土 ¹³³Cs 3200(μg/kg)

*¹³³Cs 添加 0.6mg/kg

図 1, 堆肥、ゼオライト添加が土壤溶液の

¹³³Cs 濃度におよぼす影響

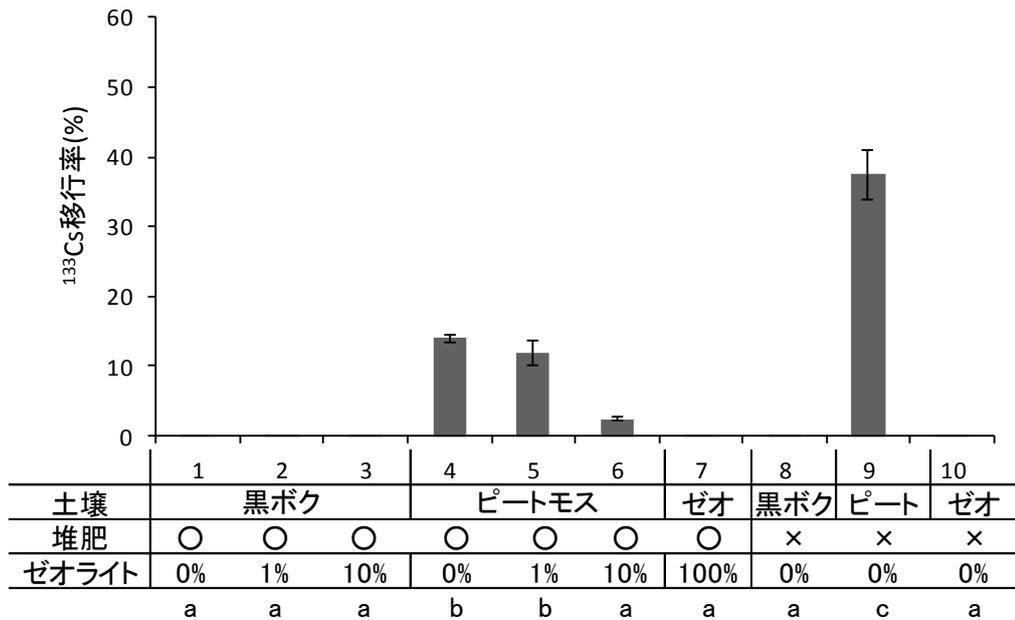
2)堆肥施用して栽培したラデッシュにおける ¹³³Cs の移行

ラデッシュの ¹³³Cs 含量の結果は表 4 に示したが、各栽培地の ¹³³Cs 含量が異なるため、図 2,3 において移行率でも示した。結果をみると黒ボク土では地上部、根部ともに堆肥施用、無施用に関わらず ¹³³Cs はほとんど吸収されていないことが分かる。これは粘土鉱物に吸着されているため、植物にはほとんど吸収されなかったと考えられる。またゼオライトにおいても ¹³³Cs 吸収はほとんど見られず、ゼオライトに保持される ¹³³Cs は強く

表 4, ラデッシュの ^{133}Cs 含有量

栽培土壌	堆肥	ゼオライト 施用量	^{133}Cs ($\mu\text{g}/\text{DWkg}$)	
			地上部	根部
黒ボク土	○	0%	2.1 a	3.1 a
	○	1%	5.3 a	3.3 a
	○	10%	4.9 a	2.2 a
ピートモス	○	0%	32.6 d	3.3 a
	○	1%	26.3 cd	8.2 ab
	○	10%	5.4 a	14.5 bc
ゼオライト	○	100%	11.5 ab	4.6 a
黒ボク土	×	0%	6.8 a	4.3 a
ピートモス	×	0%	18.4 bc	23.1 c
ゼオライト	×	0%	7.2 a	46.4 d

同一アルファベットに有意差なし(Turky法 $n=3, \alpha=0.05$)



同一アルファベットに有意差なし(Turky法 $n=3, \alpha=0.05$)

図 2, ラデッシュ地上部の ^{133}Cs 移行率

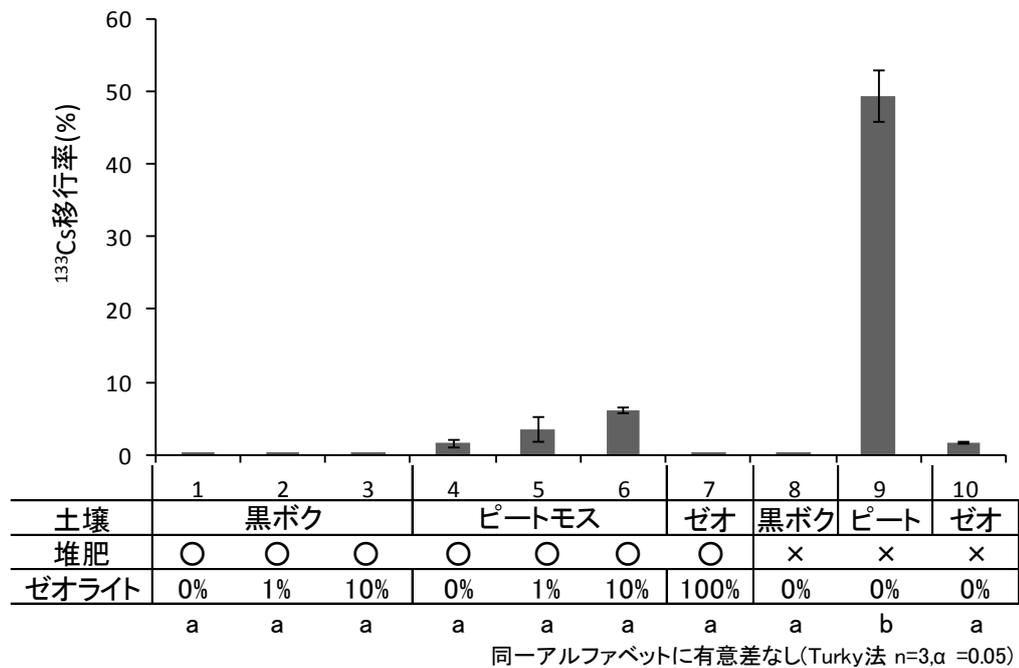


図 3, ラデッシュ根部の ^{133}Cs 移行率

保持され植物にはほとんど利用されないことが分かった。よって、 ^{133}Cs の吸着力は黒ボク土より高いと考えられた。堆肥無施用区に比べ堆肥施用区で ^{133}Cs 吸収が抑制されていた。これはカリ添加量が堆肥施用区が多かったためと考えられる。そして地上部においてゼオライト施用で ^{133}Cs 吸収は低減されたが根部では地上部ではやや吸収促進される傾向がみられたものの、移行率について有意差は確認されなかった。

4, 総合考察

堆肥施用によって ^{133}Cs の土壤溶液への移動性が高まることが確認された。これまでに SANCHEZ A L1999, STAUNTION

Sら（2002年）が報告しているとおり有機物施用が土壤粘土鉱物のCs吸着を低下させている裏づけとなる。また、栽培試験では堆肥施用による野菜の ^{133}Cs 吸収抑制効果を確認した。これは堆肥中のカリが吸収抑制効果を発揮したと考えられた。またピートモスのように有機質主体の培地では ^{133}Cs の吸収は増加したが、ゼオライト施用が吸収抑制に効果を発揮した。津村ら(1984)によると稲わらやリグニンなどは水溶性セシウムが多く、それに比べると麦完熟堆肥や腐植酸などでは置換態、固定態セシウムが多いことが報告されている。よって、未熟な有機物施用については ^{133}Cs 移動性を高めることが考えられた。以上から、堆肥施用はセシウムの移動性を高めるが、カリによる吸収抑制作用が強く現れるため、堆肥施用によってセシウムは吸収阻害されると判断できる。

4.堆肥施用がもたらす環境リスクについて

4-1.西日本地域における有機農業実践農地の土壌調査事例

1,はじめに

農水省が2007年4月に公表した「有機農業の推進に関する基本的な方針の公表について」の第2-2-(4)「都道府県における推進計画の策定と有機農業の推進体制の強化」では、現状では未だ取り組みの少ない有機農業を推進するためには、全国各地において、それぞれ農業者その他の関係者及び消費者の理解と協力を得ながら基本方針に基づく取り組みを進める必要がある。また、推進計画を策定・実施している都道府県の割合をおおむね平成23年度までに100%にすることを旨とする。とされており、明確な土壌管理基準の提示などはないが、各都道府県においても有機農業の推進はもはや必須となっている。

成分の明確な化学肥料を用いる慣行栽培と違い、有機栽培は成分が明確ではない堆肥などの有機質資材を用いることが多いため土壌管理が難しく、よって、土壌養分状態が良好ではない農地も少なくないと思われる。しかしながら、有機農業者は慣行農業者に比べ、土壌診断を受ける機会に恵まれないことが多いため、土壌養分状態については把握されていないところが多い。現在の有機農業の現状を把握するためには多様な有機農家の有機栽培実践農地の土壌養分の実態を調査し、その傾向を掴むことが重要である。そこで、有機農業者に各方面から土壌の提供をよびかけ、それによって集まった土壌について分析し、土壌養分状態把握とその傾向を探った。

2,方法及び手法

全国の有機栽培実践土壌を把握する目的で第10回日本有機農業学会鹿児島大会にて有機農業者に土壌の提供協力を呼びかけた。それに応じたのは山口県の1グループのみであった。その他、兵庫県と高知県の試料については研究室で繋がりのある協力者に提供してもらった。表1に土壌試料についての詳細を記載した。

試料は西日本地域における農地の土壌であり、分布する土壌の種類は褐色森林土・赤黄色土・灰色低地土である。特徴として、黒ボク土に比べ陽イオン交換容量(CEC)が低く、腐植が少ない。また、リン酸吸収係数は1000mg/100g以下を示す。

これらの土壌試料について、基本分析、全量分析、可給態窒素、容積重の測定を行った。

表1, 分析調査をおこなった土壌試料

県	露地	ハウス	水田	合計	農家	有機栽培歴(年)
山口	13	6	0	19	7	4~33
兵庫	5	2	0	7	2	20
高知	6	1	1	8	2	3~10
合計	24	9	1	34	11	3~33

3,各県の土壌化学性

土壌化学性について地目別に表2に示した。また、土壌成分において地力増進法の普通畑土壌の改善目標値を基準とし、それより少ない土壌は不足、多い土壌は過剰、基準値内の土壌は適正值内とし、その各県ごとの農地件数を表3に示した。

(1)山口県

pH(H₂O)は平均で7.0と高めであり、塩基飽和度が平均で露地140%、ハウス194%と高く、特に交換性カルシウムがすべての農地において過剰状態であった。CECが12meq/100gを下回る農地が9件あり、陽イオン吸着能が低い傾向にあった。また、可給態リン酸において露地280mg/kg、ハウス290mg/kgと非常に高い値であり、水溶性リン酸も44mg/100gと高く、可給態リン酸の約20%を占めていた。

図4-1より可給態リン酸と有機栽培年数には有意水準15%の正の相関があり、関係性は弱い。有機栽培年数が長くなるほど可給態リン酸が増加する傾向にあるということがいえる。

表2、各県における地目別土壌化学性

山口県		pH H ₂ O	pH KCl	電気伝導率			無機態窒素				交換性塩基				CEC meq/100g	塩基飽和度 %	リン酸		
				EC dS/m	NH ₄ -N mg/100g		NO ₃ -N mg/100g	CaO mg/100g	MgO mg/100g	K ₂ O mg/100g	Na ₂ O mg/100g	水溶性 mg/100g	可給態 mg/100g	吸収係数					
					EC	NH ₄ -N											NO ₃ -N		
露地 n=13	最小	6.2	5.6	0.06	0.56	0.35	148	16	25	1.2	6.6	100	15	40	0.0				
	最大	7.3	6.7	0.28	1.15	9.01	655	93	101	14	20	187	72	560	194				
	平均	6.9	6.3	0.15	0.82	3.27	430	51	56	4.8	13	140	42	279	63				
	中央値	6.9	6.3	0.15	0.76	2.88	516	50	54	3.8	13	139	42	236	0.0				
	標準偏差	0.3	0.3	0.07	0.18	2.67	174	20	24	3.2	3.9	27	18	176	81				
ハウス n=6	最小	6.5	6.3	0.16	0.68	2.19	341	65	11	5.2	10	153	27	179	0.0				
	最大	7.4	6.8	2.08	1.10	60.20	845	216	171	45	17	273	79	453	99				
	平均	7.0	6.6	0.84	0.81	28.42	506	115	75	17	13	194	49	288	17				
	中央値	7.0	6.6	0.53	0.77	22.75	403	75	74	9.0	11	178	44	267	0.0				
	標準偏差	0.3	0.2	0.78	0.15	25.86	213	70	53	16	3.0	46	19	101	41				

兵庫県		pH H ₂ O	pH KCl	電気伝導率			無機態窒素				交換性塩基				CEC meq/100g	塩基飽和度 %	リン酸		
				EC dS/m	NH ₄ -N mg/100g		NO ₃ -N mg/100g	CaO mg/100g	MgO mg/100g	K ₂ O mg/100g	Na ₂ O mg/100g	水溶性 mg/100g	可給態 mg/100g	吸収係数					
					EC	NH ₄ -N											NO ₃ -N		
露地 n=5	最小	6.5	6.0	0.08	0.13	0.21	344	45	34	1.9	14	101	42	235	0.0				
	最大	7.1	6.6	0.24	0.39	1.78	546	100	80	3.2	18	142	72	479	121				
	平均	6.8	6.3	0.14	0.29	0.61	426	76	55	2.5	16	123	58	350	26				
	中央値	6.8	6.2	0.12	0.35	0.32	362	73	57	2.4	15	118	60	363	0.0				
	標準偏差	0.3	0.3	0.06	0.11	0.66	104	23	18	0.6	2.0	16	13	96	53				
ハウス n=2	最小	4.9	4.8	0.13	0.13	1.06	335	46	35	6.2	14	112	41	185	0.0				
	最大	6.8	6.2	1.15	0.82	62.01	353	64	36	17	14	115	43	192	82				
	平均	5.8	5.5	0.64	0.48	31.54	344	55	36	12	14	114	42	189	41				
	中央値	5.8	5.5	0.64	0.48	31.54	344	55	36	12	14	114	42	189	41				
	標準偏差	1.3	1.0	0.72	0.49	43.09	13	12	0.6	7.9	0.3	1.9	1.9	4.9	58				

高知県		pH H ₂ O	pH KCl	電気伝導率			無機態窒素				交換性塩基				CEC meq/100g	塩基飽和度 %	リン酸		
				EC dS/m	NH ₄ -N mg/100g		NO ₃ -N mg/100g	CaO mg/100g	MgO mg/100g	K ₂ O mg/100g	Na ₂ O mg/100g	水溶性 mg/100g	可給態 mg/100g	吸収係数					
					EC	NH ₄ -N											NO ₃ -N		
露地 n=6	最小	6.0	5.1	0.04	0.29	0.44	210	37	12	1.1	13	66	8.5	26	212				
	最大	6.5	5.7	0.14	0.75	3.49	382	83	46	2.2	25	89	23	101	944				
	平均	6.1	5.3	0.07	0.51	1.29	286	55	24	1.7	18	77	17	82	553				
	中央値	6.1	5.3	0.07	0.45	0.63	284	54	22	1.6	17	79	17	62	553				
	標準偏差	0.2	0.2	0.04	0.18	1.24	56	17	12	0.4	4.3	8.7	5.9	26	241				
ハウス	6.6	6.1	0.46	0.23	14.28	683	221	36	20	32	113	13	54	701					
水田	5.7	4.8	0.04	0.52	0.05	109	15	9.5	1.1	8.5	58	5.7	21	218					

地力増進法による普通畑土壌の改善目標

pH H ₂ O	pH KCl	電気伝導率 EC dS/m	CEC meq/100g	塩基飽和度 %	交換性塩基		
					CaO	MgO	K ₂ O
					%		
6.0~6.5	5.5~6.0	0.3	12.0	60~100	65~75	20~25	2~10

表3 土壌中の各要素における適正值内を示す農地数(件)

山口県 n=19	pH H ₂ O	pH KCl	CEC	塩基飽和度	交換性塩基		
					CaO	MgO	K ₂ O
不足	0	0	9	0	0	1	0
過剰	18	16	0	19	19	8	10
適正值内	1	3	10	0	0	10	9

兵庫県 n=7	pH H ₂ O	pH KCl	CEC	塩基飽和度	交換性塩基		
					CaO	MgO	K ₂ O
不足	1	1	0	0	0	0	0
過剰	5	5	0	7	7	5	1
適正值内	1	1	7	0	0	2	6

高知県 n=8	pH H ₂ O	pH KCl	CEC	塩基飽和度	交換性塩基		
					CaO	MgO	K ₂ O
不足	1	6	1	1	0	3	0
過剰	1	1	0	1	1	1	0
適正值内	6	1	7	6	7	4	8

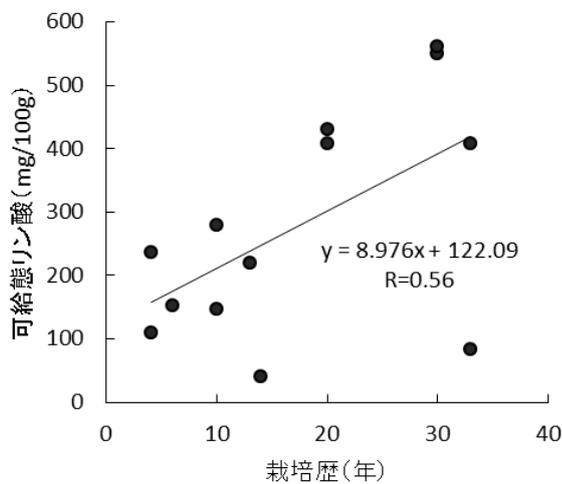


図1, 山口県の露地野菜畑における可給態リン酸と栽培歴の関係

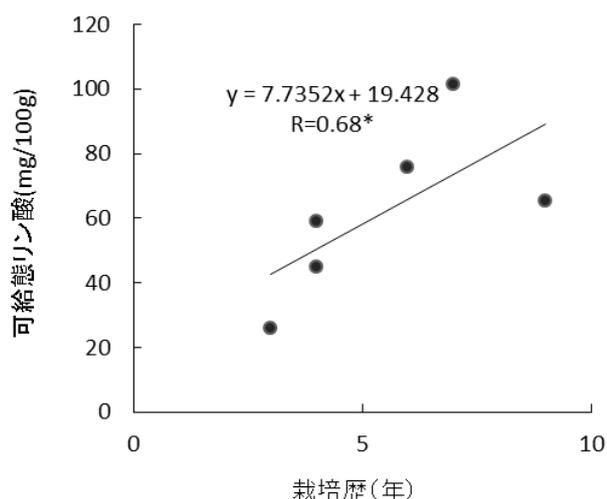


図 2, 高知県の露地野菜畑における可給態リン酸と栽培歴の関係

リン酸吸収係数は 0~194mg/100g と全体的に低く、特にリン酸吸収係数が 0mg/100g のリン酸固定能が消失した土壌が 12 件の農地で確認された。さらにハウスでは露地と比べ電気伝導率が平均 0.84dS/m と高く、硝酸が平均 28mg/100g と蓄積していた。また、交換性塩基もハウスのほうが多く、雨水などで流亡しないため、露地よりもハウスで養分過剰が顕著であったと考えられる。

(2)兵庫県

有機栽培歴はいずれの農地も 20 年であった。露地では pH(H₂O)6.8 と高く、塩基飽和度 123%であり、全ての露地全 5 件で過剰であった。交換性塩基も高い傾向にあり、交換性カルシウムは全 5 件で過剰であり、交換性マグネシウムは 3 件・交換性カリウムは 1 件で過剰状態であった。電気伝導率は適正内であり、硝酸の蓄積もなかった。一方ハウス 2 件では pH(H₂O)が 6.8 と 4.9 であり、片方が著しく低 pH(H₂O)であった。塩基飽和度は平均で 114%と 2 件とも過剰であり、交換性カルシウム・マグネシウムにおいても過剰であった。ただし、低 pH(H₂O)の農地において

硝酸が 62mg/100g を示し、硝酸の蓄積が土壌の低 pH(H₂O)の原因と考えられた。可給態リン酸においては平均で露地 350mg/100g、ハウス 190mg/100g と高かった。リン酸吸収係数は 0~121mg/100g と低く、リン酸吸収係数 0mg/100g の農地は 4 件であった。

(3)高知県

pH(H₂O)は平均で露地 6.1、ハウス 6.6 とほぼ適正であった。塩基飽和度は露地 77%でハウスは 113%と過剰であり、交換性カルシウム・マグネシウム・カリウムは露地では適正值内であったが、ハウスでは過剰であった。また、ハウスでは電気伝導率が 0.46dS/m で硝酸が 14mg/100g であった。水田においては普通畑の基準でみると不足気味だが、水田としては適正である。可給態リン酸に関しては 26~101mg/100g で平均 62mg/100g と基準値内ではあるが、図 4-2 で示した通り、有機栽培年数と可給態リン酸には 5%水準で有意な正の相関があり、有機栽培年数が長くなるにつれ可給態リン酸が増加する傾向にあった。本農地は土壌診断をする機会があるらしく、土壌養分状態も比較的良好であったが、可給態リン酸の蓄積が懸念された。

4,34 農地における西日本地域有機栽培土壌の傾向

西日本地域における有機栽培土壌 34 件の土壌化学成分を中心とした傾向を探った。各要因の組み合わせとその相関係数について表 4 に示した。

表 4, 34 農地における土壤化学性を中心とした各要因の相関関係

要因の組み合わせ	相関係数	要因の組み合わせ	相関係数	要因の組み合わせ	相関係数	要因の組み合わせ	相関係数		
栽培歴	可給態P	0.55***	水溶性P ₂ O ₅	0.92***	Al	Fe	0.50***		
pH(H ₂ O)	交換性CaO	0.52**	T-P ₂ O ₅	0.75***	Mn	Fe	0.66***		
	塩基飽和度	0.65***	T-CaO	0.75***		Cu	0.61***		
	可給態P ₂ O ₅	0.56***	Zn	0.70***		Cr	0.47**		
pH(KCl)	交換性CaO	0.64***	Mo	0.49**	Ni	0.52**	リン酸吸収係数	水溶性P ₂ O ₅	-0.71***
	交換性K ₂ O	0.58***	Cd	0.54**	Cu	0.94***		可給態P ₂ O ₅	-0.67***
	塩基飽和度	0.81***	T-CaO	0.65***	Cr	0.89***		塩基飽和度	-0.62***
EC	硝酸	0.95***	Zn	0.79***	Ni	0.94***	栽培歴	リン酸吸収係数	-0.52**
	交換性CaO	0.75***	As	0.50***	Cu	0.90***			
	交換性MgO	0.57***	Cd	0.69***	Ni	0.91***			
塩基飽和度	交換性K ₂ O	0.77***	T-K ₂ O	0.60***	Cd	0.82***			
	交換性Na ₂ O	0.69***	T-CaO	0.61***	Pb	0.53**			
			T-Na ₂ O	0.83***	Cr	0.98***			
CEC	T-N	0.82***	Fe	0.91***	As	0.51**			
	T-C	0.88***	Cu	0.94***	Cd	0.42*			
T-C	T-N	0.93***	Cr	0.97***					
	Mn	0.52**	Ni	0.95***					
	Cu	0.62***							

n=34
*5%水準で有意
**1%水準で有意
***0.1%水準で有意

(1) リン酸

34 農地の可給態リン酸量の度数分布 (図 4-3) を示した。一般的に可給態リン酸 10mg/100g 以下では野菜の生育が悪く、10~20mg/100g 前後を超えると急激に収量が上がり 100mg/100g まで緩やかに上昇し、100mg/100g 以上で収量は緩やかに低下することが多い。本調査結果から基準値である 100mg/100g を上回る農地が 74%のものぼり、ほとんどの農地でリン酸過剰状態であった。

リン酸吸収係数の度数分布をみると (図 4-4)、全体の 47%の農地で 0mg/100g を示し、他の農地でもリン酸吸収係数は低い傾向にあった。表 4-4 より、リン酸吸収係数と可給態リン酸には高い負の相関があり、可給態リン酸の多量蓄積がリン酸固定能の低下及び消失の原因と考えられた。また、有機栽培歴と可給態リン酸には正の相関があり、有機栽培年数が長いと可給態リン酸の蓄積量が多くなる傾向にあることが分かった。

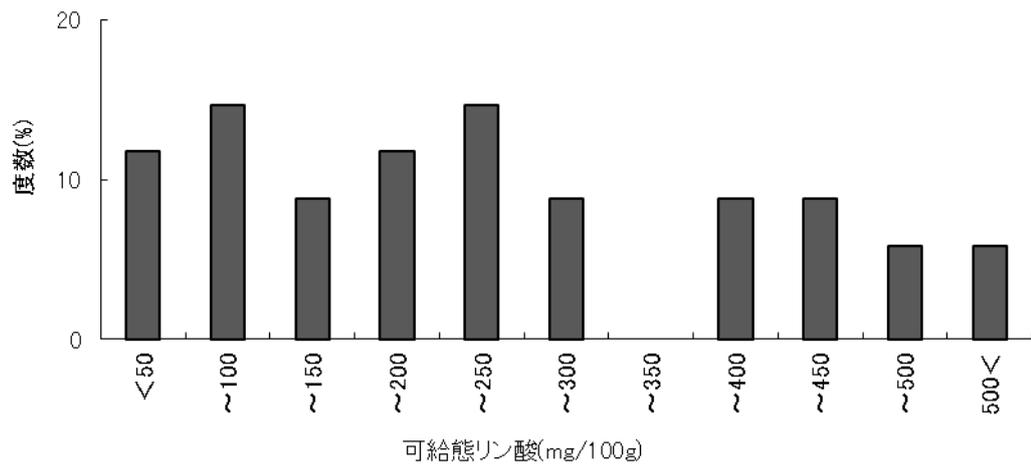


図 3, 34 農地における可給態リン酸の度数分布

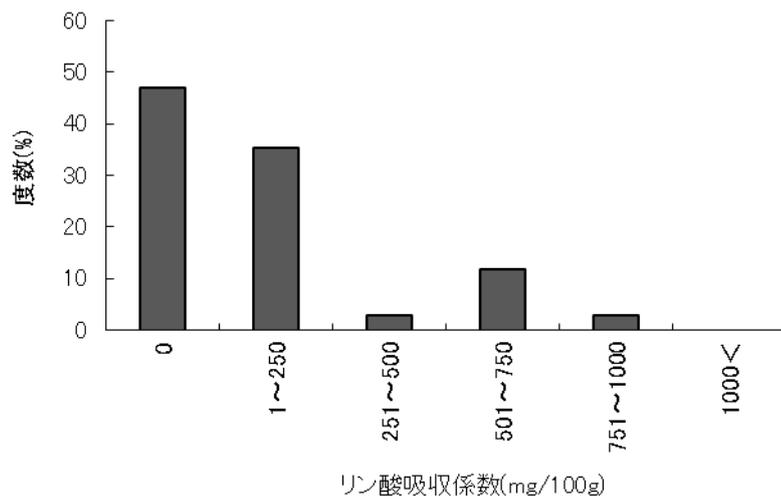


図 4, 34 農地におけるリン酸吸収係数の度数分布

(2)全炭素と全窒素、CEC、容積重、可給態窒素

有機物は炭素骨格を有することから、有機物量の指標として全炭素(T-C)を用い、各要因との関係性を調べた(図5)。

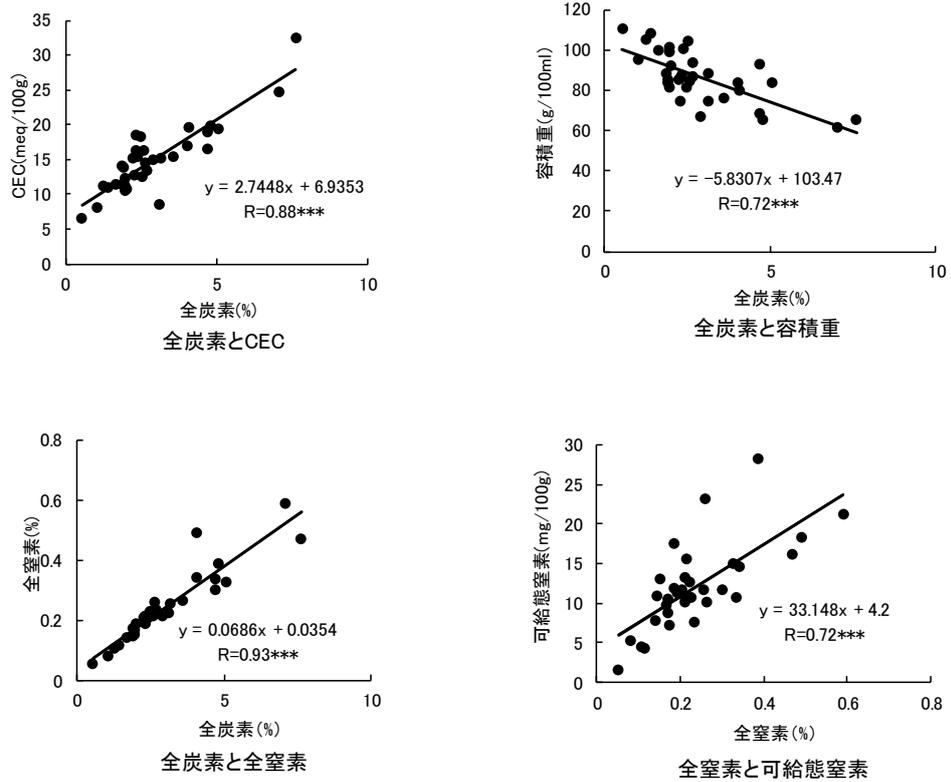


図5, 全炭素と全窒素、CEC、容積重、可給態窒素の関係

***0.1%水準で有意

全窒素とは高い正の相関関係にあり、炭素骨格に窒素が結合してタンパク質やアミノ酸として有機物を形成していると考えられた。

CEC と高い正の相関があり、有機物施用により陽イオン吸着能が増加することが示唆された。

容積重（仮比重）とは負の相関関係であり、有機物施用により土壤の団粒構造が形成され、空気を多く含むことで、比重が軽くなったと考えられた。

全窒素と可給態窒素は正の相関関係にあり、蓄積する全窒素量が多いほど生成する無機態窒素量は多くなると考えられる。全窒素は 0.1～0.6% で平均 0.2% であり、可給態窒素は 1.6～28mg/100g で平均 12mg/100g、全窒素にしめる可給態窒素の割合は 3.1～9.3% で平均 5.3% であった。第 3 章の有機栽培土壌では全窒素 0.9%、可給態窒素 30mg/100g、全窒素にしめる可給態窒素の割合は 3.5% であった。西日本地域土壌は第 3 章の全窒素より低い、全窒素に占める可給態窒素の割合は高く、可給態窒素の生成量が多いと考えられる。

(3)微量元素と重金属

可給態微量元素について表 5 の通りで、欠乏症・過剰症の範囲以外を健全値として、その農地数も示した。過剰についてはマンガン 21 件、銅 2 件であった。不足はホウ素 6 件、亜鉛 7 件であった。微量元素、重金属の全量分析値を表 6 に示した。環境管理基準である亜鉛 120mg/kg を超える農地は 10 件あった。亜鉛の過剰害は自然状態であまり見られず、人為的な汚染によって起こる場合が多い。表 4 から、全リン酸と亜鉛（図 5）、ヒ素、カドミウム（図 6）の相関が高かったことから、肥料成分とともに重金属が農地に持ち込まれることが示唆された。

表 5, 土壤の可給態微量元素と適正值内にある農地数

n=34	可給態微量元素				
	B	Fe	Mn	Zn	Cu
	mg/kg				
最小	0.18	25.3	3.64	1.05	0.94
最大	2.98	276	31.8	27.0	14.2
平均	0.85	103	12.7	9.56	3.66
中央値	0.83	91.8	11.2	7.02	2.99
標準偏差	0.58	52.4	7.70	7.07	3.03
欠乏値農地数	6	0	0	7	0
健全値農地数	28	34	13	27	29
過剰値農地数	0	-	21	0	5

作物に欠乏症または過剰症のする土壤中含有量(1980年高橋ら)

	可給態微量元素				
	B	Fe	Mn	Zn	Cu
	mg/kg				
欠乏	0.4以下	4~8以下	2~3以下	4以下	0.5以下
健全	0.8~2.0	8~10	4~8	8~40	0.8~1.5
過剰	7.0以上	-	10以上	100以上	5以上

表 6, 34 農地の土壤に含有する酸分解性微量元素および重金属

	pH(H ₂ O)	Mn	Cu	Zn	Cr	Ni	As	Mo	Cd	Pb	Hg
		mg/kg									
最小	4.9	242	2.75	26.0	12.1	75.3	1.47	0.05	0.11	7.50	0.00
最大	7.4	1726	143	206	1629	1716	16.3	1.13	0.60	50.1	0.49
平均	6.7	785	34.3	106	183	257	6.77	0.45	0.34	22.8	0.15
中央値	6.8	630	26.7	95.2	67.6	164	5.51	0.46	0.32	21.4	0.11
標準偏差	0.5	398	32.8	43.5	365	334	4.22	0.26	0.12	8.56	0.12
変動率(%)	8	51	96	41	200	130	62	57	36	38	78
環境基準			125	120*			15				

*環境管理基準

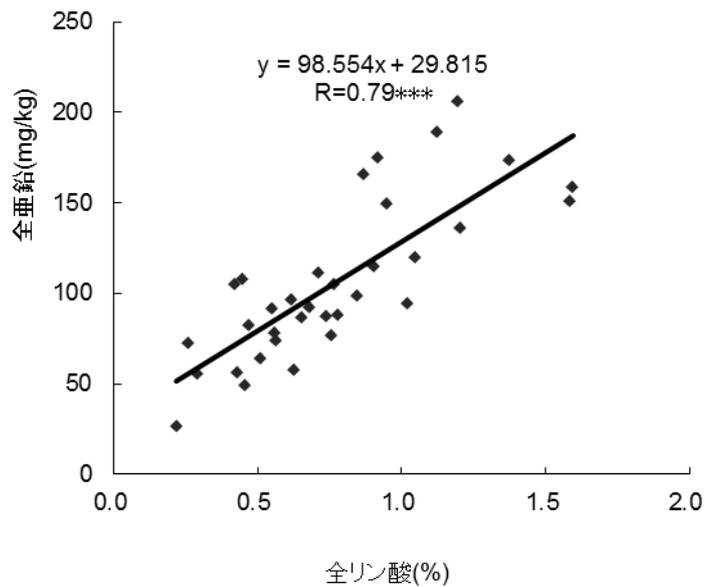


図 5, 土壤に含有される酸分解性リン酸と亜鉛の関係

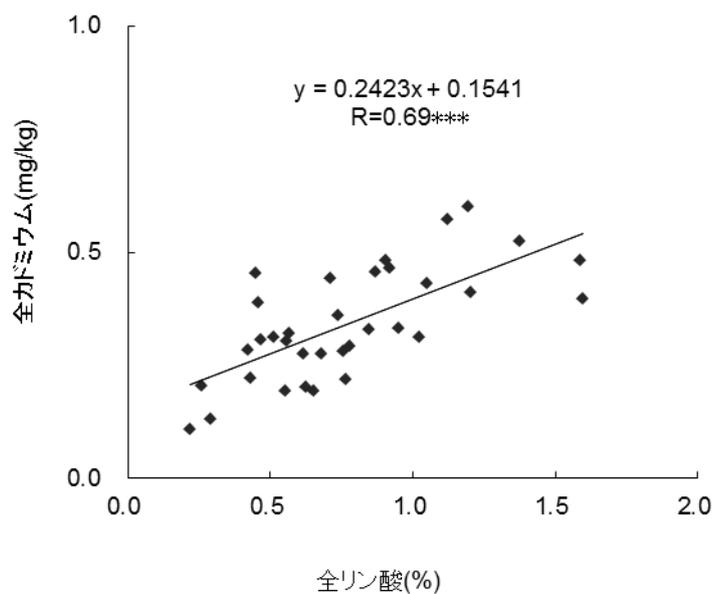


図 6, 土壤に含有される酸分解性リン酸と亜鉛の関係

5,まとめ

本調査対象となった西日本地域の 34 農地はリン酸過剰傾向にあり、半数の農地で異常な可給態リン酸の過剰による土壌のリン酸固定能消失が確認された。また、交換性塩基過剰や塩基バランスの崩れ、またハウスでは硝酸蓄積も確認され、全体的に養分過剰状態であった。山口県、兵庫県、高知県はいずれも養鶏がさかんであり、鶏糞が安価に手に入る。鶏糞はリン酸含有量が高く、一部アンケート調査では鶏糞が多量に施用されていることが確認されており、リン酸過剰の原因と考えられる。西日本地域の土壌は黒ボク土に比べ、リン酸固定能が 1000mg/kg 以下と低く、可給態リン酸が過剰になりやすいため、リン酸の施肥量はきちんとした管理が必要である。

土壌への有機物の施用により、陽イオン交換能の向上及び物理性の向上が示唆された。また、可給態窒素の増加も示された。しかし、有機物の施用とともに、重金属の蓄積が示唆されたため、適正施肥をすることが重要であるとえる。

4.堆肥施用をもたらす環境リスクについて

4-2.長期有機栽培実践畑の調査事例

4-2-(1).農地土壌、井戸水の環境実態調査および

栽培野菜の栄養評価

1, 緒言

本調査地は東京都世田谷区にあり、40年以上有機栽培を実践している露地野菜畑である。同農地が有機農業に転換したのは1968年であり、ちょうど高品質高生産を目指した近代農業による様々な問題が顕在化しはじめた頃だった。同農場が有機農業に転換する以前は農産物のより迅速・高品質・高生産での供給を目指すべく率先して近代農業を取り入れていた。また、ビニールハウスの第一人者でもあり、まさに近代化の先駆けであった。しかし、土壌生産力の低下や農薬による健康被害をきっかけに、堆肥作りを基盤とした土づくりを中心に、完全無農薬・無化学肥料での野菜栽培および、害虫と天敵となる昆虫や野鳥の生態的バランスのとれた総合的害虫防除を取り入れた。当時はまだ「有機農法」という言葉はなかったため、自然と調和した「夢の農法」を開始した。

このような日本の有機農業にとって象徴的な1件の農地について、その土壌化学性、作物成分、養分収支、窒素の挙動について調査を実施し、長期的に有機栽培を実践した露地野菜畑の生産環境域を明らかにすることで、利点・問題点の抽出を行い現状における評価を行った。

2, 分析方法

土壌の種類は黒ボク土であり、過去に 1m ほどの客土をしている。作土壌はセンチウスコップにて下層 15cm までを採取し、また下層 100cm までの土壌はソイルオーガーを用いて採取し、風乾させ土壌分析に供した。植物体は採取後、栄養分析をしたのち、乾燥・粉砕したものを植物体分析に供した。作物の収量調査は一定面積中での重量、個数を計測し 10a あたりに換算した。また、果菜類は果実収穫後の茎や葉などの残渣も含めて吸収量とした。堆肥については施肥後すぐに一定面積中内に施用された堆肥の量を計測し、一部は堆肥分析に供した。

3, 農地の概要

本調査地は 2006 年から本研究室で継続して調査をおこなってきた。販売形態は直売で、会員制の契約栽培を行っている。農地の模式図は図 3-1 に示した。面積は 3000 m²ほどで便宜上 A~G の 7 区画に分けて調査を実施してきた。C 区と道路を挟んで野外に堆肥置き場が設置してある。農園内には合計 2 つの井戸が、A 区と C 区の間及び堆肥置き場の近くにあり、定期的に水質の調査を実施した。2009 年の作付け調査では葉菜、果菜を中心に 26 品目の栽培がされ、年間の畑の利用率は平均 200%の輪作体系をとっていた。コマツナ・ナス・トマトなど約半分の品種で種子の自家採取をおこなっていた。

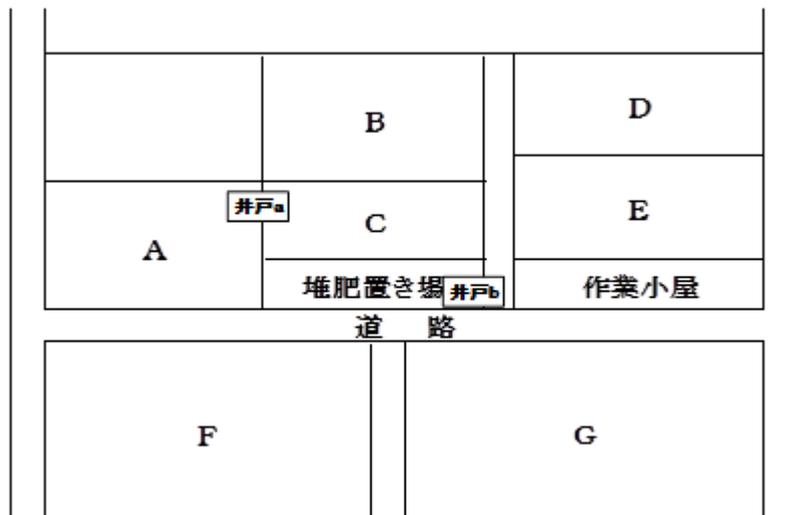


図 1, 農地模式図(3000m²)

畑に施用している資材は堆肥のほか、果菜類などを栽培するとき
にボカシ肥を使用しており、全て自家製であった。堆肥の主原料で
ある剪定枝は造園業者などによって持ち込まれ、他に、ボカシ肥の
材料としても用いられる米ぬかやおからは近所の米屋や豆腐屋から
低額で買い取るか、譲り受けていた。また、消費者の生ごみの持ち
込みや、畑ででた野菜くずや雑草なども堆肥の原料とし回収してい
た。このように都会で入手可能な未利用資材を用い、地域循環型農
業を実践していた。

調査開始当時の 2006 年聞き取り調査では堆肥の施用量は年間
20t/10a であったが、次第に堆肥の削減に成功し、2009 年には 5t/10a
まで減少していた。しかし、堆肥は過去に多量に施用され続けられ
ており、かなりの養分蓄積が予想される。

4, 調査結果および考察

(1) 土壌化学性

土壌の水溶性並びに可給態成分の分析値を表 3-3 に示した。土壌の pH(H₂O)は 6.5~7.0 と高く、電気伝導率は 0.1~0.2ds/m と適正值内であり、硝酸態窒素・アンモニア態窒素の蓄積はなかった。可給態リン酸は 20~65mg/100g と区画による差かみられたが、水溶性リン酸の可給態リン酸に対する割合は 40%以上にもなった。交換性塩基については各区画の平均でカルシウム 1200mg/100g・マグネシウム 170mg/100g・カリウム 200mg/100g と高い値を示した。土壌の CEC (陽イオン交換容量) は約 60meq/100g と高かった。交換性塩基の基準値は CEC を用いて普通畑土壌の改善目標値に準拠して計算しているため、値は高かったが基準値の上限値前後で収まっており、塩基バランスはほぼ良好であった。

土壌が多腐植質黒ボク土の場合、CEC の代表値の目安は 30~40meq/100g で、CEC が 30meq/100g 以上の場合、交換性カルシウム 350~550mg/100g、交換性マグネシウム 35~60mg/100g、交換性カリウム 20~40mg/100g である。それと比較すると本農地は全てにおいて 2 倍近くの高い値が検出されていることが分かる。

陽イオン交換能の起源となる土壌コロイドの陰電荷は、粘土鉱物の特性で決まる永久陰電荷と、粘土鉱物の結晶構造の末端に生じる末端基と腐植の構造中に含まれる官能基に由来し pH の変化に応じて電荷量が変わる pH 依存性陰電荷がある。本農地の土壌中から全炭素が約 10%検出されたことから腐植が多量に蓄積していると考えられる。また、土壌はアロフェン鉱物である黒ボク土であり、陰電荷の大半は pH 依存型である。よって、土壌の pH(H₂O)は平均 6.8

と高いため、pH 依存型陰電荷である土壌中のアロフェンと蓄積された腐植の陰電荷の増加も加わり、世界で最も肥沃な土壌といわれているチェルノーゼムの CEC 30~50meq/100g 以上になったと考えられる。

以下に土壌酸分解性成分の結果を示すが、土壌中の蓄積が確認されたにも関わらず、無機態窒素・可給態リン酸・交換性塩基などの過剰な蓄積は認められなかった。よって、有機態など難分解性成分としての養分蓄積が示唆された。特に無機態窒素の土層中の蓄積も見られなかったことから、雨水などで溶脱したと考えられた。

表 1, 各区画における作土の化学性

区画	pH		電気伝導率 EC dS/m	無機態窒素		リン酸		リン酸 吸収係数 mg/100g
	H ₂ O	KCl		NH ₄ -N	NO ₃ -N	水溶性	可給態	
			mg/100g		mg/100g			
A	6.8	5.8	0.10	0.99	2.24	11.6	23.3	1610
B	6.8	5.8	0.12	1.10	3.07	26.5	65.8	1560
C	6.8	5.9	0.15	1.34	3.85	23.0	60.8	1600
D	6.9	6.0	0.14	1.21	3.28	12.3	24.7	1950
E	6.9	6.0	0.17	1.40	3.35	11.8	25.7	1890
F	6.9	5.9	0.17	1.24	4.01	26.9	51.0	1590
G	6.6	5.7	0.18	1.36	4.04	17.1	41.9	1610
平均	6.8	5.9	0.15	1.23	3.41	18.5	41.9	1687
中央値	6.8	5.9	0.15	1.24	3.35	17.1	41.9	1610
標準偏差	0.12	0.12	0.03	0.15	0.64	6.94	17.9	161
変動率(%)	2	2	20	12	19	38	43	10
診断基準値	6.0~6.5		0.2					

区画	交換性塩基				CEC	塩基飽和度
	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O		
	mg/100g				meq/100g	%
A	1034	151	245	3.79	52.6	94.4
B	1246	165	169	3.29	59.0	95.6
C	1276	171	190	3.23	62.2	93.4
D	1240	174	165	3.20	61.9	91.3
E	1288	200	218	6.18	62.4	97.2
F	1251	170	296	3.99	63.2	94.2
G	1132	153	130	3.48	59.4	85.6
平均	1210	169	202	3.88	60.1	93.1
中央値	1246	170	190	3.48	61.9	94.2
標準偏差	92.7	16.5	56.0	1.06	3.66	3.78
変動率(%)	8	10	28	27	6	4
診断基準値	650~1120	140~270	30~250		15	80~100

表 2, F 区画における土層 100cm までの土壌化学性

深さ cm	pH		電気伝導率 (EC) dS/m	無機態窒素		P ₂ O ₅	
	H ₂ O	KCl		NH ₄ -N	NO ₃ -N	水溶性	トルオグ法
			mg/100g		mg/100g		
10	6.89	5.90	0.17	1.24	4.01	26.9	51.0
20	6.83	5.91	0.18	1.64	4.13	22.8	46.5
30	6.65	5.75	0.16	1.19	4.37	14.1	35.1
40	6.71	5.77	0.14	1.35	3.45	1.95	10.4
50	6.78	5.95	0.17	1.34	4.77	0.31	3.37
60	6.83	6.09	0.21	1.38	7.84	0.36	1.74
70	6.93	6.07	0.15	0.85	5.42	0.36	2.01
80	6.97	5.96	0.12	1.94	3.10	0.56	3.58
90	6.91	5.95	0.14	2.11	3.52	0.51	2.35
100	6.80	5.89	0.14	1.07	3.25	0.51	5.23

深さ cm	交換性塩基				CEC	塩基飽和度
	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O		
	mg/100g				meq/100g	%
10	1251	170	296	3.99	63.2	94.2
20	1268	180	229	3.54	61.2	96.6
30	1071	155	143	2.65	56.2	87.2
40	753	117	108	1.91	43.4	80.7
50	575	87.8	71.8	2.12	36.8	71.9
60	568	78.2	71.1	2.20	36.0	71.5
70	521	70.7	79.6	2.01	33.6	70.9
80	731	110	216	2.94	43.3	83.5
90	539	71.1	205	1.76	37.8	71.9
100	554	69.2	149	1.95	37.8	69.9

土層 100cm までの土壌化学性については表 2 に示した。CEC、交換性カルシウム、塩基飽和度は 30,40cm 付近まで高い値であり、有機物施用の影響が及んでいると考えられる。下層 80cm から 100cm で交換性カリが高かったが、これは客土の影響によるものと考えられた。なお、この調査地は 1980 年に後藤らが土壌分析をおこなっていたので、その当時の土壌化学性を表 3 に示すが、交換性カルシウム、可給態リン酸、CEC が増加していた。特に交換性カルシウム、CEC が高くなっているのは木質堆肥を連用し続けたためと考えられた。

表 3, 1980 年の土壌化学性（後藤ら 1982）

深さ cm	pH		無機態窒素		リン酸
	H ₂ O	KCl	NH ₄ -N mg/100g	NO ₃ -N mg/100g	可給態 mg/100g
0-20cm	7.6	6.3		2.31	10.7
20-40cm	6.9	5.5	0.57	1.14	7.32
0-15cm	7.6	6.2	0.52	1.92	24.4

深さ cm	交換性塩基				CEC	塩基飽和度
	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	meq/100g	%
0-20cm	620	128	169	17.4	32.6	93.6
20-40cm	379	52.2	55.6	33.5	29.1	59.2
0-15cm	668	123	215	29.8	34.5	94.6

深さ cm	窒素	炭素	炭素率	腐植
	N %	C %	C/N	%
0-20cm	0.36	3.61	10.0	6.21
20-40cm	0.50	2.82	5.63	4.85
0-15cm	0.27	4.44	16.4	7.63

(2) 土壌の酸分解性成分

作土に含有する各養分について、その全量分析での分析値を表 4,5 に示した。全窒素は各区画作土の平均で約 0.9%あり、その他、全リン酸 1.3%・全カルシウム 2.0%・全マグネシウム 1.9%も蓄積していた。全カリウムは 0.24%と他の成分と比べて低かった。土層中の養分量を分析した結果を表 3-2 に示した。土層 30cm 以上で全窒素 0.5%以上示し、全炭素は 10%を示した。東京都内にある黒ボク土の農耕地で堆肥施用を行っていた土壌では作土付近で全窒素約 0.5~0.6%・全炭素 7.5~8.5%であり（1999 年竹迫ら）、本調査対象農地のほうが高い値が検出されたことが分かる。全リン酸は土層 40cm 以上で 1%以上であり、全カルシウム・全マグネシウムにおいても土層 100cm まで 1~2%の蓄積があり、下層まで土壌養分が蓄積し

ていることが分かった。

表 4, 各区画における土壌の酸分解性成分

区画	N	C	C/N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O
	%					%		
A	0.58	7.05	12.1	0.81	0.29	1.45	1.15	0.04
B	0.84	9.46	11.2	1.43	0.19	2.12	2.02	0.05
C	0.92	10.5	11.5	1.45	0.23	2.25	1.79	0.05
D	0.98	11.1	11.3	1.21	0.22	2.03	1.97	0.05
E	0.88	9.97	11.3	1.17	0.25	2.05	2.00	0.05
F	0.93	10.7	11.5	1.39	0.32	2.20	1.96	0.06
G	0.91	10.7	11.7	1.37	0.18	1.99	2.25	0.06
平均	0.86	9.91	11.5	1.26	0.24	2.02	1.88	0.05
標準偏差	0.13	1.37	0.30	0.23	0.05	0.27	0.35	0.01
変動率(%)	15	14	3	18	20	13	19	13

表 5, 土層 100cm までの土壌酸分解性成分

深さ cm	N	C	C/N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O
	%					%		
10	0.88	9.97	11.3	1.17	0.25	2.05	2.00	0.05
20	0.94	11.1	11.8	1.14	0.25	2.01	1.77	0.04
30	0.46	5.82	12.7	0.68	0.22	1.29	2.35	0.03
40	0.37	5.09	13.8	0.76	0.20	1.21	2.14	0.05
50	0.36	4.79	13.2	0.97	0.20	1.37	1.96	0.05
60	0.26	4.00	15.5	0.62	0.18	1.22	1.82	0.05
70	0.26	4.14	15.7	0.49	0.21	1.08	1.57	0.05
80	0.34	4.83	14.2	1.16	0.17	1.21	1.78	0.05
90	0.33	4.30	13.1	1.17	0.15	1.05	2.18	0.04
100	0.28	3.83	13.6	0.62	0.15	0.78	2.20	0.03

(3)井戸水の水質調査

(3)-1.井戸水のイオン含有量

農園内には深さ 3m 程度の手掘り井戸が 2 つある。2009 年 4 月～2010 年 4 月まで定期的に水質の調査を行った。採取した水は、イオンクロマトグラフィーにて陰イオン (NO₃⁻-N、SO₄²⁻-S、Cl⁻-Cl、PO₄³⁻-P) を、ICP-AES にて陽イオン (Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺、Na⁺) を測定した。硝酸性窒素の濃度の変化については図 2 に示した。

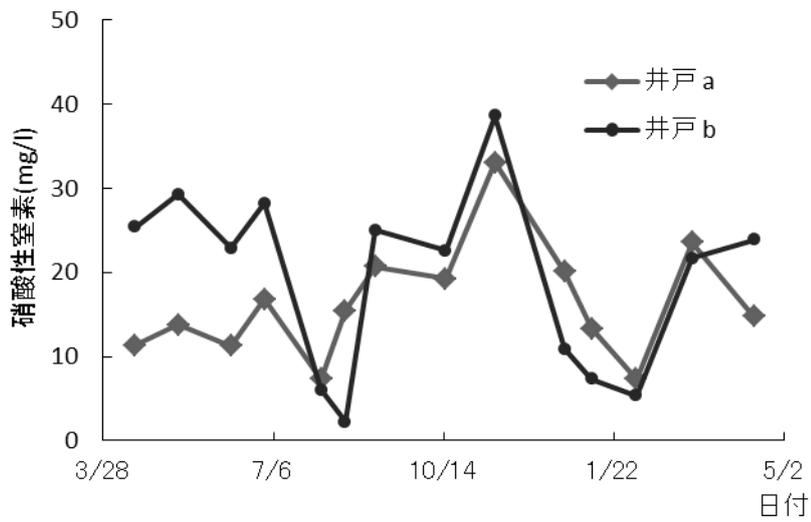


図 2, 井戸水の硝酸性窒素濃度の推移 (2009/4~2010/4)

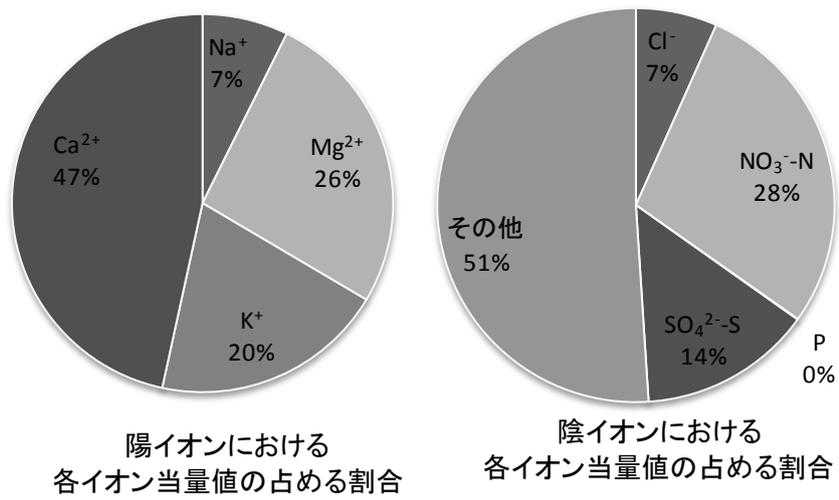


図 3, 井戸水における各イオン当量値の割合

濃度は年平均で井戸 a 16mg/l、井戸 b 19mg/l と水質汚濁に係る環境基準値の 10mg/l を大きく上回っていた。また、井戸 a、b についてイオン存在比は同程度であったので、2 つ井戸における 1 年間の平均として、陽イオン・陰イオンそれぞれの当量値におけるイオン存在比について図 3 に示した。陽イオンに比べ陰イオンの当量値の合計は約半分にしかならなかった。陽イオンと陰イオンは対で存在するが、陰イオンは測定項目以外の炭酸イオンなどの陽イオンと多く結合していると考えられるが、その他と表記した。それを除くと陰イオンでは硝酸イオンが 28% と多く、次いで硫酸イオン 14%、塩素イオン 7% 存在していた。陽イオンではカルシウムイオンが 47% と最も多く、次いでマグネシウムイオン 26%、カリウムイオン 20%、ナトリウムイオン 7% であった。その他の陰イオンとしては炭酸イオンが考えられ、多くの陽イオンと対をなしていると考えられる。また、存在比の多いカルシウムイオンと硝酸イオンは多くが対をなしていると考えられる。

硝酸イオンにおいては環境基準値以上の値が検出され、地下水の硝酸汚染が確認された。他のイオン類に関しては特に基準値が設けられていないが、硝酸と同様に高い値が検出された。特にカルシウムの検出量は顕著に高く、農地土壌においてカルシウムが多く蓄積されていることが影響していると思われる。これら井戸水中に含有されるイオンは農地の土壌中から溶出したものと考えられた。

(3)-2.窒素安定同位体比法による井戸水の窒素源特定

窒素には原子量 14 と 15 の 2 つの安定同位体が存在し、その大気中の存在比は 99.635% と 0.365% とほぼ一定であるが、物質により

変化する。その変化は重い窒素で構成されている化合物と軽い窒素で構成されている化合物とではその性質はほぼ類似しているが、移動速度、平行定数、反応速度にわずかな違いが出る。食物連鎖の上位にいくほど同位体濃縮がおこり重い窒素の存在比が増加するといわれている。自然あるいは人為的に合成された窒素化合物の同位体組成は、その生成過程により大きく異なり、それぞれの窒素供給源に対しほぼ一定の値を示す。降水で-8～2‰、化学肥料で-7.4～6.8‰、家畜糞尿で 10～22‰、下水処理水で 8～15‰等の値が報告されている。（公害研究対策センター）

本農園で井戸水の硝酸汚染が確認されたため、硝酸イオンの窒素供給源を特定する目的で井戸水及び、窒素供給源と考えられる堆肥、ボカシ肥、作土について窒素安定同位体比の測定を行った。試料は SI サイエンス株式会社に委託分析し、その結果を表 6 に示した。結果、井戸水の硝酸汚染の原因と考えられる資材については、堆肥 4.5‰、ボカシ肥 4.9‰であった。また、それらの資材を施用されている作土は 5.1‰と資材と同程度の数値を示した。一方、井戸水の安定同位体比は約 16‰であり、井戸水の窒素供給源と考えられた資材や土壌は 5‰前後であったため、井戸水の窒素安定同位体比も 5‰前後になると予測されたが、資材に比べて 3 倍近く高い数値であった。井戸水の $\delta^{15}\text{N}$ が窒素供給源と考えられる資材よりも高くなった原因については、本農地の土壌の特性とも考えられるため、今後検討していきたい。

表 6, 井戸水・堆肥などの窒素安定同位体

試料	$\delta^{15}\text{N-Air}(\text{‰})$
井戸水 a	15.8
井戸水 b	15.9
堆肥	4.5
ぼかし肥	4.9
作土	5.5

(4)窒素無機化試験

(4)-1.土壌及び堆肥における窒素無機化量

作土付近には 1%近くの全窒素が蓄積しているが、無機態窒素としての存在量は全窒素の 0.5~2.0%程度と少なく、窒素成分のほとんどは有機態で存在していると考えられた。また、農園内の地下水では農地から流入したと考えられる硝酸による汚染が確認されたため、農地土壌についてその窒素の挙動を探るべく、窒素無機化試験を実施した。

土壌は本農地の作土を有機区とし、対照区として東京農大用賀圃場の既耕地黒ボク土を慣行区として用いた。また各区において本農地で使用している剪定枝堆肥を基肥 5t/10a となるように添加した堆肥施用区を設けた。それら試験区の風乾土壌を最大容水量の 50% に水分を調整して 30℃で保温静置し、12 か月間に及ぶ窒素無機化試験を実施した (図 4)。

土壌の全窒素は有機区 0.9%、慣行区 0.3%であり、窒素の無機化量は有機堆肥無施用区で1 か月 16kg/10a、12 か月 43kg/10a であり、有機堆肥施用区との差から堆肥の無機化率は1 か月ではほぼ 0%で、12 か月で 10%であった。慣行区堆肥施用区と堆肥無施用区ではほと

んど差はなく、1 か月で 2kg/10a、12 か月で 9kg/10a の窒素が無機化した。堆肥から無機態窒素の供給はほとんどないことから、本農園の剪定枝主体の木質堆肥は分解されにくく、有機区で多量に供給される無機態窒素は土壌由来であることが分かった。

要因	水準	
土壌 堆肥(5t/10a)	有機 無施用	慣行 施用

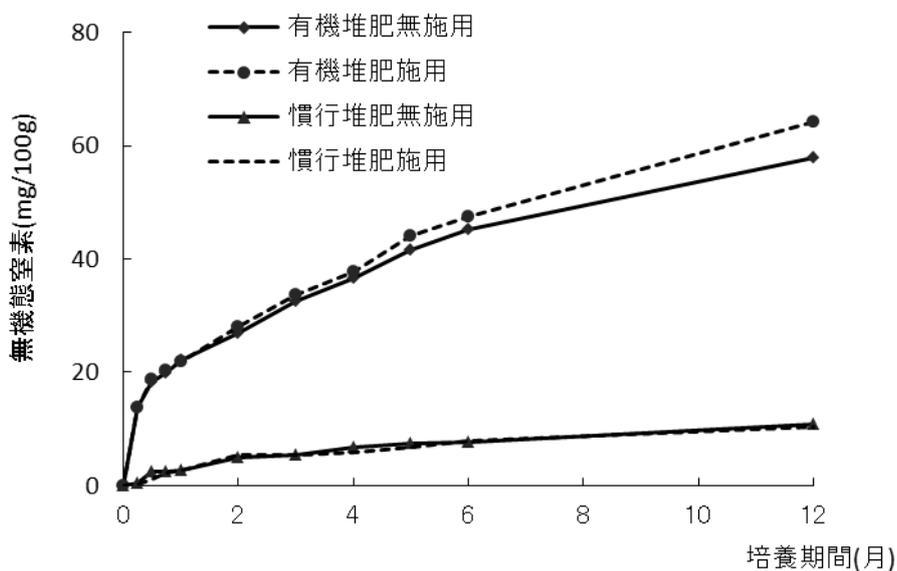


図 4, 慣行栽培と有機栽培における土壌からの窒素無機化量

一般土壌に全窒素は 0.2～0.3%含まれており、そのうち無機態窒素で存在するものは 1%程度(2.3kg/10a)で、他は有機態で存在している。そのうち 1 年間で無機化される窒素は全窒素の 1～5% (7～15kg/10a) であるといわれている。本試験では各土壌の全窒素に対する窒素無機化量は有機区で 6%、慣行区で 3%であった。全窒素に対して 1 年間に無機化する比率は一般的傾向とほぼ変わらないものの、本農園の土壌は全窒素含有量が多いため、一般的農地土壌の約 3 倍もの窒素が無機化していた。

(4)-2.土層 1m内における窒素無機化量

土壌中の全窒素は作土 20cm までに約 1%蓄積しており、土層 50cm でも 0.35%であることがすでに分かっている。よって生成される無機態窒素量全体として、作土以外の窒素無機化量も無視できないと考えられた。そこで、農地で生成される窒素無機化量により正確に再現するために、土層 100cm 内の E、F 区画の土壌についてソイルオーガーを用い 10cm 毎採取し、生土の状態のまま 30℃恒温器にて培養後、無機態窒素を測定した。

結果、図 5 のように E、F 区において同様な傾向であり、時間の経過とともに窒素の無機化量は増大した。土層 50cm までに窒素の無機化がみられ、土層 30cm までで窒素無機化量の 80%以上を占める。土層 100cm 内の窒素無機化量合計は 2 区平均 1 か月で 12kg/10a であり、12 か月で 134kg/10a に及んだ。

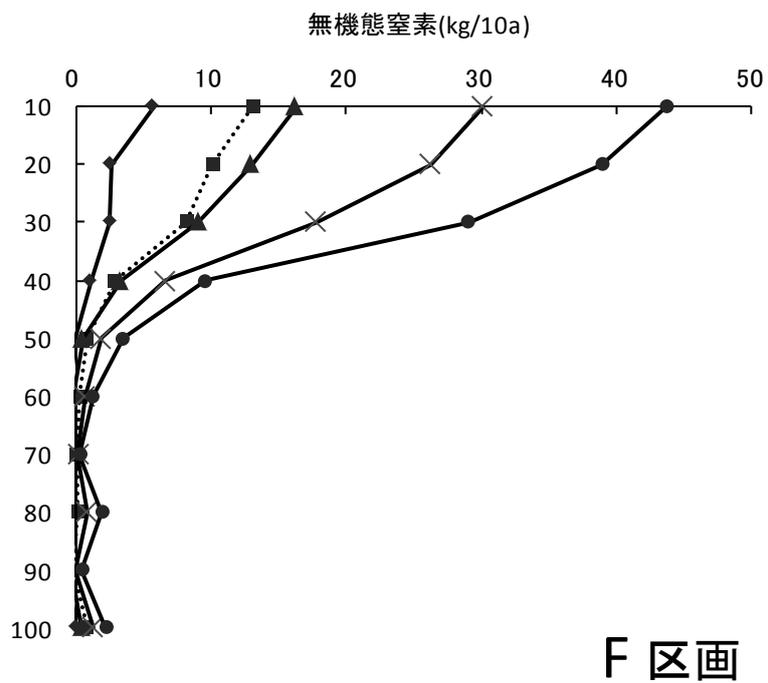
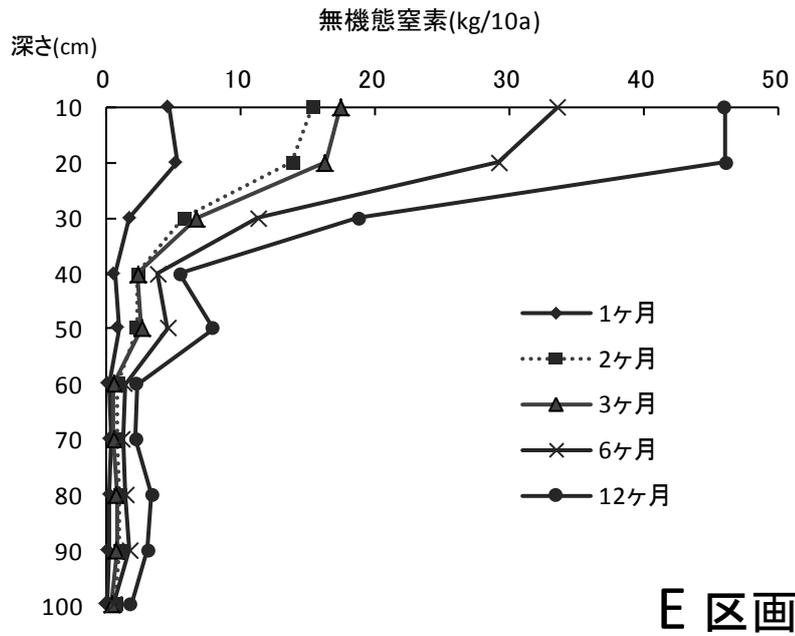


図 5, 土層 100cm までの土壌における窒素無機化量

コマツナなどの葉菜類の根が届くと思われる土層 30cm までは 11kg/10a であり、本農園におけるコマツナ 1 作の吸収量は 8～15kg/10a なので、夏季にコマツナを 1 か月栽培するのに必要量以上の窒素が無機化されていると考えられた。農地での作付けは平均年 2 回行われているため、12 か月の窒素無機化量を考慮すると、かなりの無機態窒素が栽培野菜に吸収されずに土壤中に残留することが予想され、それらは雨水により流亡すると考えられる。

(4)-3. 土壤中からの窒素無機化量と窒素収支

窒素成分における年間の施肥量と野菜の吸収量を調査した結果（表 7）、施肥量は 65kg/10a でそれに対して野菜の吸収量は 28kg/10a であり、38kg/10a は余剰であった。堆肥と作土壌における窒素無機化量を調べた結果で堆肥の無機化率は 12 か月でわずか 10%程度であり、無機化するほとんどが土壌由来の地力窒素であった。また、土層 50cm 以上で多量の窒素の無機化が確認されている。そこで、土壤中に生成する無機態窒素と野菜の吸収する窒素量から余剰量を算出した。また、現地では土壤中での無機態窒素の挙動を調査した。

表 7, F 区画における窒素成分の年間収支

		現物重	N	
		kg/10a		
F区画	施用量	基肥堆肥	5250	45
		堆肥マルチ	2463	17
		ボカシ肥	120	3
		合計		65
	吸収量	シュンギク	5454	12
		ネギ	10647	22
		合計		28
	成分余剰量			38

F 区画において各作付け前に各層 10cm 毎にソイルオーガーにて 70cm まで土壌を採取し、栽培期間中各層毎に生土の状態で 30℃保温静置し、作付け期間中の窒素無機化量を調べた。その結果(図 6)、1 作目では栽培期間 47 日の溶出量は 30kg/10a で、もともと土壌中に残存していた 10kg/10a を加味すると 28kg/10a 余剰であり、2 作目では栽培期間 173 日の溶出量は 125kg/10a で、残存量 38kg/10a を加味すると 余剰量は 141kg/10a に及ぶと予想された。しかし、気温の設定が 30℃であるので、実測値は実験値よりも少なくなると予想される。

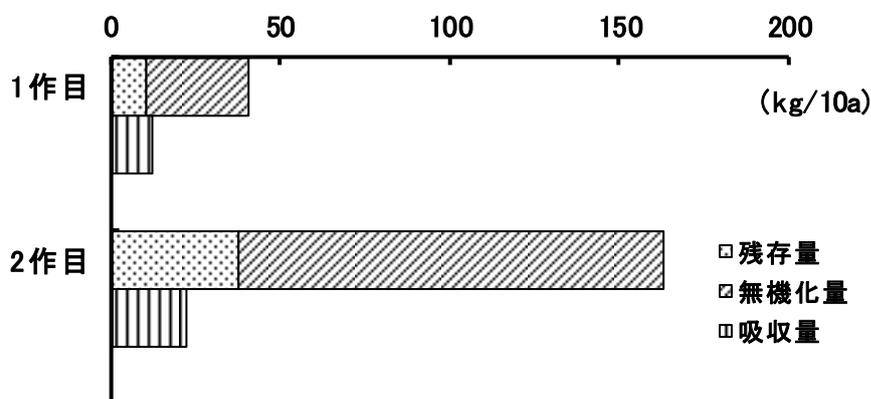


図 6, 土壌から無機化する窒素量と野菜の吸収量

現地における無機態窒素の挙動について図 7 に示した。経時的に表層の無機態窒素が下層へ移行していることが分かった。つまり、余剰に生成された無機態窒素は雨水などによって下層へ流亡していることが分かった。

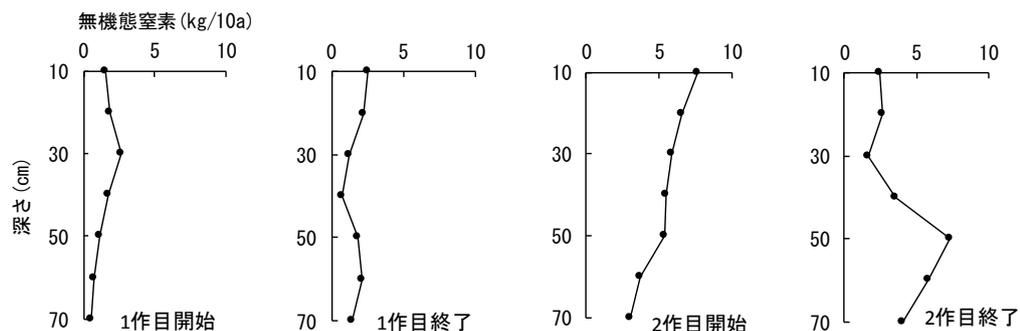


図 7, 現地における土層 70cm 内無機態窒素の挙動

(5)コマツナの品質

(5)-1.コマツナの硝酸及びビタミンC含有量

本農地では供給される無機態窒素のほとんどが土壌由来であるという特徴がある。このような土壌で栽培される野菜の品質について、本農園で作付け回数の多いコマツナを対象に硝酸及びビタミンC含有量を 2006～2010 年にかけて調査した。その結果が表 8 であり、平均気温が 10～12℃で 4 月収穫の冬季栽培では硝酸 400～600mg/kg でビタミンC 52～58mg/100g と食品成分表に比べ著しく低硝酸、高ビタミンCであった。平均気温が 18～21℃で 5.6 月収穫の春季栽培では硝酸が 3950～4300mg/kg、ビタミンC 40～44mg/100g と冬季栽培に比べて硝酸含有量が増大し、ビタミンC含有量が低下した。平均気温が 24～27℃で 7 月収穫の夏季栽培では硝酸 5600～7700mg/kg、ビタミンC 36～40mg/100 で食品成分表と比較しても高硝酸、低ビタミンCとなった。平均気温 9～16℃で 11 月以降収穫の秋季栽培では硝酸 2100～2700mg/kg、ビタミンC 51～58mg/100g であり、夏季栽培に比べ硝酸含有量が低下し、ビタミ

ンC含有量が増加した。

表 8, 栽培されたコマツナの栄養分析結果

栽培年度	播種日-収穫日	栽培日数	ビタミンC mg/100g	硝酸 mg/kg	平均気温 °C
2006	3/9-4/28	50	52	576	12
2009	2/25-4/16	50	57	398	11
2010	3/2-4/19	48	58	654	10
2006	5/14-6/13	30	41	4134	20
2007	4/17-5/22	35	44	4142	18
2008	5/7-6/6	30	41	4322	18
2009	5/16-6/11	26	40	4287	21
2010	4/19-5/27	31	43	3935	18
2007	6/12-7/3	30	36	5631	24
2007	6/14-7/11	27	36	6018	24
2010	6/23-7/21	28	40	7736	27
2006	10/13-11/27	45	58	2557	16
2009	10/16-11/30	45	54	2090	15
2010	11/7-2/4	90	51	2686	9
平均		42	46	3577	18
標準偏差		20	8	2351	6
変動率(%)		47	18	66	34
食品成分表 五訂			39	5000	

(現物あたり)

表 9 慣行栽培における葉菜類の栄養分析値

作物	播種日-収穫日	栽培日数	総ビタミンC ^{※3} (mg/100g)	還元型ビタミンC ^{※3} 率(%)	乾物 ^{※3} 硝酸濃 ^{※3} 度(ppm)
ホレンソウ ^{※1}	6/23- 8/ 3	30	54.7	35.8	8.3 7800
ホレンソウ	10/11-11/22	42	72.2	68.6	9.2 8630
ホレンソウ	12/14- 2/20	68	84.1	79.2	9.9 8100
ホレンソウ ^{※2}	11/28- 3/14	106	-	116.0	15.3 2600
コマツナ ^{※1}	4/28- 5/25	27	75.1	61.0	8.5 6740
コマツナ	9/22-10/23	31	103.6	86.2	9.5 6700
チンゲンサイ ^{※1}	2/23- 4/19	55	61.9	44.0	6.3 4580
チンゲンサイ	5/10- 6/21	42	57.2	39.9	6.0 4480

※1 ホレンソウ、チンゲンサイは雨よけ、コマツナは露地栽培 ※2 ホレンソウはトンネル栽培
 ※3 ビタミンC、乾物率は葉身、硝酸は葉柄汁液で、作物の収量が最も多い条件での数値を示した。

(埼玉県園芸試験場成果報告)

図 8 から、硝酸とビタミン C の含有量には有意水準 0.1% の高い負の相関があり、硝酸含量が低下するとビタミン C 含有量が増加していることが分かる。また、図 9 ではビタミン C と Brix 糖度計での屈折糖度の関係を示し、有意水準 1% で正の相関関係にあることが分かった。植物は根から硝酸を吸収して、クエン酸回路でアミノ酸やタンパク質を生成する。その際糖が消費されるため、植物中の硝酸含量が多いと糖度が下がり、糖を前駆体とするビタミン C 量も低下する。本農園のコマツナでも既存の報告と同様の傾向が確認された。

比較として、表 9 に慣行栽培の葉菜類における栄養分析値の季節変化（1995 埼玉県園芸試験場の成果報告）を示した。分析値について硝酸は葉柄、ビタミン C は葉身を用いていることから、それぞれ野菜可食部全体の数値よりも高い値を示している。コマツナにおいては 5 月・10 月収穫で硝酸、ビタミン C 含有量に差はみられなかった。ハウレンソウでは同栽培条件の*1 において 8 月・11 月・2 月収穫のものを比較すると、コマツナ同様にあまり含有量に変化はなかった。

野菜中の硝酸含有量は窒素施用量が多くなると増加することが多く報告されており、土壌中と野菜中の硝酸含有量は密接な関係があるということが分かっている。対象とした慣行栽培の葉菜は施肥量が一定であったため、硝酸・ビタミン C 含有量に変化がなかったと考えられた。一方、本農地に存在する無機態窒素はほとんど土壌由来であることが分かっている。土壌中の無機態窒素は土壌微生物の働きによって供給され、温度が上昇すると微生物の活動が活発となり、有機態窒素の無機化が促進される。

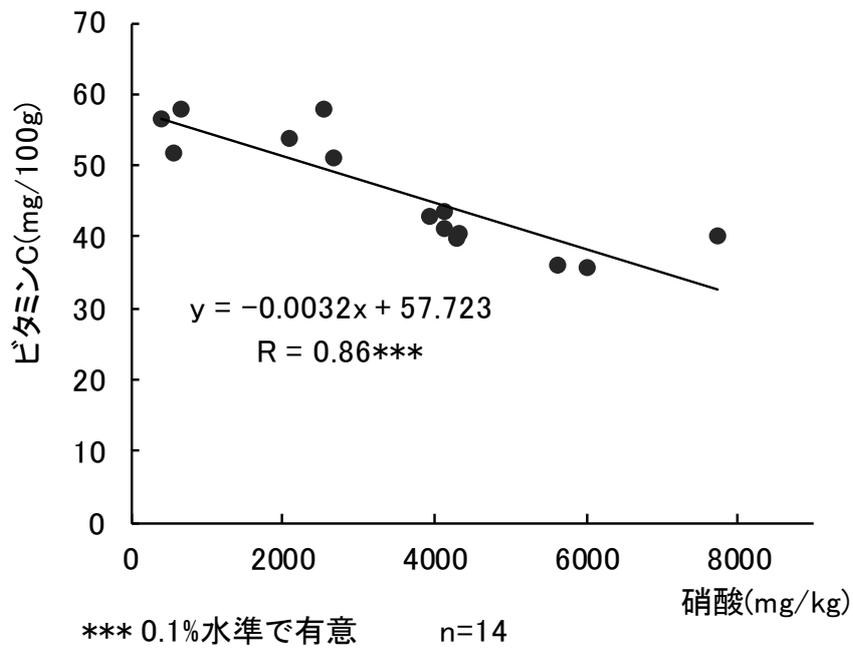


図 8, コマツナにおける硝酸とビタミンCの関係

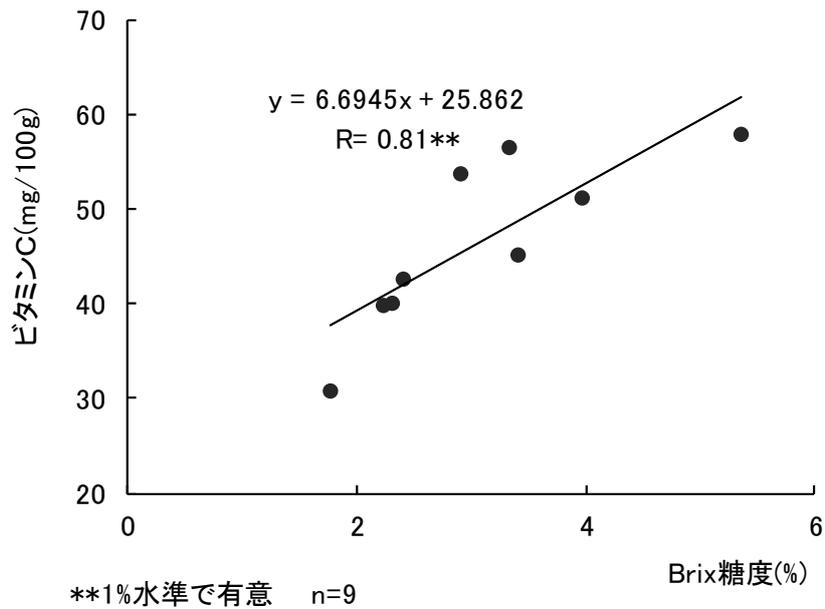


図 9, コマツナにおける Brix 糖度とビタミン C の関係

よって、夏季では気温が高いため窒素の無機化が促進され、土壌中の無機態窒素含有量が増加し高硝酸・低ビタミンCになり、反対に冬季栽培では気温が低いため窒素の無機化が抑制され低硝酸・高ビタミンCになったと考えられた。秋季栽培と冬季栽培では平均気温はほとんど変わらないが、秋季栽培の方が多く硝酸を含有しており、原因として夏季に無機化した窒素が残留していたためと考えられる。

(5)-2. コマツナのミネラル及び重金属含有量

コマツナのミネラル含有量について表 10 に示した。季節による変化はほとんどなく、食品成分表と比較してその平均値は同程度であり、一般的コマツナのミネラル含有量と同等であった。

重金属の含有量を表 11 に示した。カドミウム含有量は 0.01mg/kg とコーデックスにおける葉菜類のカドミウム基準値である 0.2mg/kg を下回る値であり、問題はなかった。

表 10, コマツナのミネラル含有量

栽培年度	播種日-収穫日	Na	K	Ca	Mg	P	Fe	Zn	Cu	Mn
mg/100g										
2006	3/9-4/28	1.80	340	104	14.4	42.7	0.85	0.22	0.03	0.15
2009	2/25-4/16	1.77	467	109	20.0	57.7	1.69	0.25	0.03	0.17
2010	3/2-4/19	2.72	537	172	28.2	56.7	2.45	0.37	0.04	0.25
2006	5/14-6/13	1.84	375	105	17.7	52.3	0.90	0.28	0.03	0.17
2007	4/17-5/22	1.17	505	123	20.9	48.1	0.81	0.22	0.03	0.16
2008	5/7-6/6	2.08	417	88.4	13.6	35.6	0.61	0.21	0.02	0.14
2009	5/16-6/11	1.57	345	94.3	16.2	34.7	2.33	0.22	0.03	0.15
2007	6/12-7/3	1.29	497	143	22.4	43.7	1.28	0.27	0.04	0.17
2007	6/14-7/11	1.61	412	119	20.1	32.6	0.76	0.20	0.03	0.12
2006	10/13-11/27	1.67	314	101	17.4	47.9	0.80	0.25	0.03	0.22
2009	10/16-11/30	4.28	383	125	17.9	36.6	1.23	0.24	0.04	0.14
2010	11/7-2/4	3.53	444	181	28.9	59.1	1.08	0.41	0.04	0.22
	平均	2.11	420	122	19.8	45.6	1.23	0.26	0.03	0.17
	標準偏差	0.94	71.5	29.4	4.82	9.47	0.61	0.07	0.01	0.04
	変動率(%)	44.4	17.0	24.1	24.3	20.7	49.8	25.0	17.2	22.9
	食品成分表 五訂	15	500	170	12	45	2.8	0.2	0.06	0.13

(現物あたり)

表 11, コマツナに含有される重金属

栽培 年度	播種日-収穫日	Ni	As	Cd	Pb
		mg/kg			
2006	3/9-4/28	0.07	0.02	0.01	0.01
2009	2/25-4/16	0.10	0.03	0.01	0.01
2010	3/2-4/19	0.07	0.00	0.01	0.02
2006	5/14-6/13	0.18	0.06	0.02	0.02
2007	4/17-5/22	0.04	0.01	0.01	0.02
2008	5/7-6/6	0.07	0.00	0.01	0.02
2009	5/16-6/11	0.17	0.01	0.01	0.01
2007	6/12-7/3	0.05	0.01	0.01	0.02
2007	6/14-7/11	0.04	0.00	0.01	0.01
2006	10/13-11/27	0.07	0.03	0.01	0.01
2009	10/16-11/30	0.15	0.00	0.01	0.01
2010	11/7-2/4	0.06	0.01	0.03	0.01
	平均	0.09	0.02	0.01	0.01
	標準偏差	0.05	0.02	0.01	0.01
	変動率(%)	54.2	108	49.4	36.3
	基準値*	-	-	0.20	-

*コーデックス委員会 (現物当たり)

(6)微量元素及び重金属

(6)-1.土壌中含有量

可給態微量元素について 7 区画における平均値を表 12 に示した。銅・マンガンにおいて作物の過剰症のする土壌中含有量であったが、他は適正域内であった。

一方、全量分析における土壌中の重金属含有量（表 13）では、銅は環境基準値の 125mg/kg を超える 177mg/kg であり、ヒ素は基準値内であった。農用地における土壌中の重金属等の蓄積防止に係る管理指標は、亜鉛の含有量で 120mg/kg とされており、本農地では平均 268mg/kg と 2 倍以上の値であることから、土壌の重金属汚染が確認された。また、亜鉛と相関の高いカドミウムでは平均 1.18mg/kg 蓄積していた。しかし、コマツナに含有されるカドミウ

ムは 0.01mg/kg と低かった。カドミウムは高 pH(H₂O)で難溶化し植物に吸収されない形態になる。よって、本農地土壌の平均 pH(H₂O)6.8 と高かったため、カドミウムが不溶化し土壌から野菜に移行しなかったと考えられた。本農地では重金属の蓄積が確認されたので、野菜へのカドミウムの移行を防ぐためには、pH の管理も重要と考えられる。

表 12, 土壌中の可給態微量元素含有量

n=7	可給態微量元素				
	B	Fe	Mn	Zn	Cu
	mg/kg				
最小	0.95	96.2	10.4	13.9	5.38
最大	1.94	137	23.3	35.6	9.42
平均	1.37	116	14.3	24.7	6.82
中央値	1.21	113	13.0	22.2	7.04
標準偏差	0.34	14.4	4.36	8.17	1.45

作物に欠乏症または過剰症のする土壌中含有量(1980年高橋ら)

	可給態微量元素				
	B	Fe	Mn	Zn	Cu
	mg/kg				
欠乏	0.4以下	4~8以下	2~3以下	4以下	0.5以下
健全	0.8~2.0	8~10	4~8	8~40	0.8~1.5
過剰	7.0以上	-	10以上	100以上	5以上

表 13, 酸分解性微量要素と重金属含量

区画	Mn	Cu	Zn	Cr	Ni
	mg/kg				
A	1565	169	199	78.2	576
B	1453	165	284	72.9	521
C	1420	207	296	77.8	495
D	1497	173	259	82.9	563
E	1485	181	254	78.9	539
F	1451	169	293	77.7	512
G	1460	174	290	83.0	552
平均	1476	177	268	78.8	537
標準偏差	46.3	14.3	34.5	3.48	29.1
変動率(%)	3	8	13	4	5
環境基準	-	125	120*	-	-

区画	As	Mo	Cd	Pb	Hg
	mg/kg				
A	8.06	0.94	0.59	26.0	0.13
B	19.2	0.91	1.41	51.2	0.16
C	2.75	0.76	1.59	86.9	0.00
D	11.5	0.97	1.01	40.1	0.25
E	10.9	1.07	1.05	73.0	0.16
F	11.1	1.04	1.36	50.7	0.28
G	13.5	1.06	1.23	52.2	0.07
平均	11.0	0.96	1.18	54.3	0.15
標準偏差	5.00	0.11	0.33	20.2	0.10
変動率(%)	45	11	28	37	64
環境基準	15	-	-	-	-

(6)-2.資材中含有量

表 14 の堆肥中の全量分析による各成分をみると重金属が含まれていることが分かる。また、表 15 の窒素と各成分の相関関係ではリン酸・銅・亜鉛・鉛について相関係数 0.5 前後であり、各肥料成分と共に重金属が含有されていることが分かった。堆肥の主成分である剪定枝について含有成分を調べた結果、(表 16)変動率は高く、含有量にばらつきがあるが、重金属が含まれていることが分かった。

よって、本農地では資材などの施用で肥料成分と共に重金属が持ち

込まれていることが確認された。

表 14, 堆肥に含有される全量成分

堆肥 _{n=8}	N	C	C/N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
	%				%		
最小	0.57	8.37	12.2	0.15	0.28	1.08	0.22
最大	0.86	20.5	29.6	0.65	0.40	1.49	0.50
平均	0.73	12.9	17.9	0.38	0.33	1.27	0.34
中央値	0.71	12.9	17.0	0.39	0.31	1.29	0.33
標準偏差	0.10	3.85	5.46	0.16	0.05	0.17	0.09
変動率(%)	13.3	29.7	30.4	41.7	14.2	13.3	25.0

(現物あたり)

堆肥 _{n=8}	Cu	Zn	Cd	Pb
	mg/kg			
最小	14.9	48.3	0.15	5.33
最大	37.7	86.9	1.02	15.2
平均	24.7	70.5	0.32	8.65
中央値	24.0	75.5	0.19	8.15
標準偏差	7.46	14.2	0.30	3.07
変動率(%)	30	20	95	36

表 15, 堆肥に含有される窒素と各成分の関係

要因の組み合わせ		相関係数
N	P ₂ O ₅	0.51
	Cu	0.41
	Zn	0.53
	Cd	0.51
	Pb	0.55

剪定枝の種類	
モッコク	サワラ
ハイチゴササ	カイツカイブキ
ヤブガラシ	スダジイ
ドウダンツツジ	モチノキ
オオムラサキ	サクラ
シラカシ	サクラ

表 16, 剪定枝に含有される各成分および重金属量

剪定枝 n=12	N	C	C/N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
	%			%			
最小	0.07	1.77	10.2	0.04	0.22	0.14	0.02
最大	2.00	27.7	54.4	0.31	0.96	1.35	0.31
平均	0.63	17.7	33.0	0.14	0.43	0.82	0.16
中央値	0.53	19.9	34.5	0.14	0.43	0.84	0.16
標準偏差	0.50	8.34	13.8	0.08	0.20	0.39	0.08
変動率(%)	79.6	47.2	41.7	59.5	46.5	47.5	48.4

(現物あたり)

剪定枝 n=12	Cu	Zn	Cd	Pb
	mg/kg			
最小	0.91	2.95	0.00	0.00
最大	54.9	236	0.56	1.51
平均	12.0	62.2	0.07	0.31
中央値	3.06	14.9	0.02	0.23
標準偏差	18.2	84.8	0.16	0.40
変動率(%)	151	136	233	132

4.堆肥施用がもたらす環境リスクについて

4-2.長期有機栽培実践畑の調査事例

4-2-(2).長期有機栽培畑における

窒素の流出を抑制したコマツナの栽培試験

1,はじめに

長期有機栽培実践畑の調査では、土壌から多量の無機化が行われていることが分かった。また、その伴い窒素成分が表層から溶脱して地下水汚染の原因になっていることが示唆された。そして栽培される野菜の品質に関しては季節間で大きく異なっており、これは窒素無機化量と関連性があると考えられる。そこで、多量に無機化する窒素について流出を抑制するのに有効な対策と、野菜の品質に関わる主要因を検証するために、該当農地の一角において窒素の流出を抑えた、コマツナの連続栽培試験を行うこととした。

2,材料および方法

1)現地栽培試験区概要

試験区は 30m² の区画を 2 つに分け、慣行区と改善区とし、2010 年 5 月から 2011 年 4 月までの期間に 5 作のコマツナ作付け試験を行った。栽培期間および気温については表 1 のとおりである。コマツナの品種は城南で本農園において自家採種をおこなっているものを使用した。慣行区では堆肥を慣行量である 5t/10a (75kg/15m²) 施肥し作土を混層した 1 週間後に 1 作目のコマツナを播種した。資材の化学性は表 2 に示したとお

り、施用分量は 10a あたり N:36kg、P₂O₅:25kg、K₂O:15kg となる。その後、堆肥の追加施用はせずコマツナを栽培した。

表 1, 栽培期間および平均温度

	1作目	2作目	休耕	3作目	4作目	5作目
播種日	10,4/19	10,6/24	10,7/22	10,9/29	10,11/15	11,3/12
収穫日	10,5/27	10,7/20	10,9/14	10,11/9	11,3/10	11,4/28
栽培日数	38	26	54	41	115	47
平均気温(°C)*	17.6	26.6	29.4	18.2	7.9	12.0

*気象庁のデータより

表 2, 資材化学性

	N	C	C/N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O
	%					%		
堆肥	0.72	13.8	19.3	0.49	0.30	1.11	0.33	0.01
米ぬか	2.58	44.6	17.3	2.49	1.10	0.04	0.69	0.01

現物あたり

本農地では最も気温が高くなる約 1 か月間はほとんどの区画で作付けは行わず休耕しているため、慣行区では 7 月 22 日～9 月 14 日までを休耕期間とし植え付けを行わなかった。改善区では堆肥施用はせずにコマツナ栽培をした。また、2 作目播種 10 日前にコメヌカを 500kg/10a(7.5kg/15m²)施用した。このとき施用分量は 10a あたり N:13kg、P₂O₅:12kg、K₂O:5.5kg に相当するが、コメヌカは炭素含量が多いため土壤中で窒素の有機化を促進する効果が期待された。また、休耕期間中に改善区ではソルゴーを栽培し窒素流出抑制効果について検証した。

2)調査と分析

(1)土壌調査

土壌中の無機態窒素の挙動を調査する目的で、定期的に各区の土壌をソイルオーガーにて深さ 80~100cm まで 10cm 毎に採取し分析に供した。土壌は通風乾燥後、2mm の篩にかけ、1MKCl 溶液で抽出後、FIA にて硝酸態窒素、アンモニア態窒素を分析した。また、その他の成分に関しては土壌試料を選別し、振とう抽出-ICP 発光分析法で交換性塩基を分析した。pH(H₂O)、電気伝導率および可給態リン酸（トルオーグ法）は定法によった。

(2)コマツナの収量および品質

コマツナは各区 3 か所で 50cm² 内のコマツナを全て収穫し収量調査を行った。その後、下記の栄養分析に供した。ビタミンCは5%メタリン酸で抽出し、メルク社試験紙のアスコルビン酸テストで、硝酸はイオン交換水で抽出し、硝酸イオンテスト試験紙を用い RQflex plus10（メルク社）にて測定した。糖度はコマツナをニンニク絞り機で搾汁し、Brix 糖度計（PR-100 株式会社アタゴ）で測定した。また、一部は 65℃で通風乾燥後、微粉碎し硝酸-ICP 発光分析法により無機成分を分析した。

(3)資材の分析

堆肥、コメヌカは 35℃で乾燥粉碎し、全炭素と全窒素は窒素・炭素自動分析装置（住友 NC120 AUTO）により分析した。その他の無機成分については、テフロン加圧分解容器・硝酸-ICP 発光分析法によって分析した。

(4)窒素無機化試験

(4)-1,インキュベーターでの窒素無機化試験

本農地土壌における各資材施用による窒素無機化パターンについて検証する目的で、室内培養試験を実施した。試験区は資材添加なしの対照区と、堆肥 5t/10a 施用区に加え、コメヌカ 0.5%、1.0%施用区に、純粋な炭素資材としてグルコースをコメヌカ 0.5%に相当する炭素量となるよう添加した区を設定した。

各資材の添加量及び添加量あたりの炭素含量は表 2 のとおりである。土壌は本農園現地土壌を風乾し、各資材を添加し混和後、土壌水分が最大容水量の 50%になるようにイオン交換水を加え、30℃で 4 か月間保温静置して定期的に無機態窒素を測定した。硝酸態窒素、アンモニア態窒素は 1M 塩化カリウム溶液で抽出後、FIA で分析した。

(4)-2,現地畑での埋没窒素無機化試験

窒素無機化量は温度によって溶出量が変化する。そこで栽培期間中に現地土壌から無機化する窒素量を測定するために、現地畑で窒素無機化試験を実施した。慣行区、改善区の各作栽培前の作土を採取し 100ml のプラスチック容器に土壌を 2/3 程度になるよう充填し、ポリエチレン製のラップで瓶口を塞ぎ、その上からストッキングで補強し瓶口の回りを結束バンドで固定した。そして、畑の端に深さ 10cm 程度の穴を掘り、土壌を充填したビンを栽培開始から埋没させ、栽培終了と同時に回収した。なお、栽培終了時から栽培開始時の無機態窒素を引いた値を窒素無機化量とした。

3, 結果および考察

1) 各資材による窒素無機化量

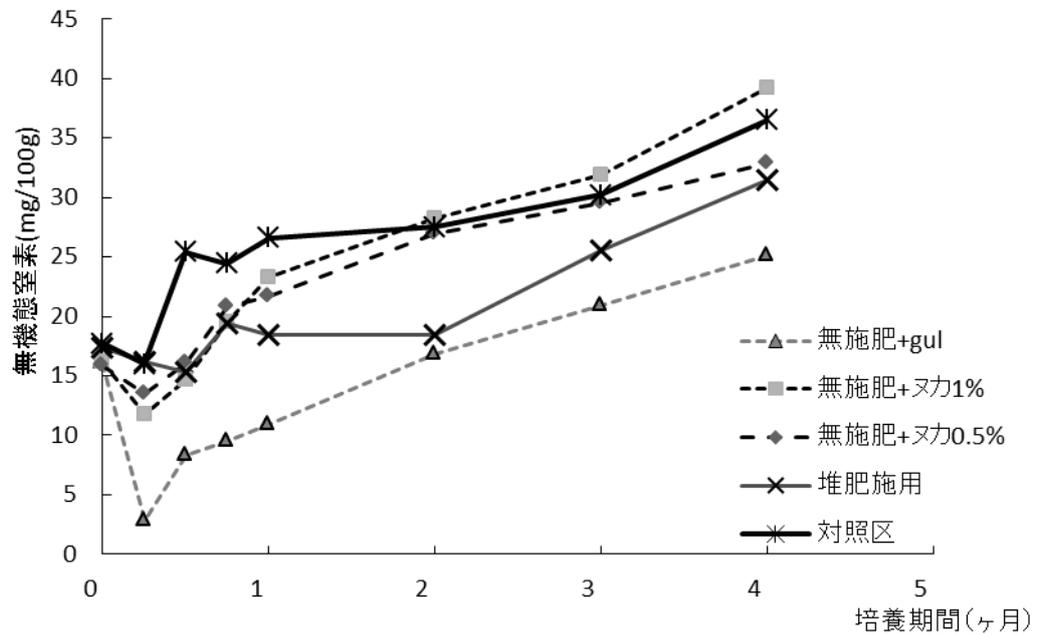


図 1, 各資材による窒素無機化のパターン

各資材による窒素無機化パターンについては図 1 に示したとおりである。対照区では培養 2 週間目から窒素無機化が確認され、培養 1 ヶ月で窒素無機化量は $8.9\text{mg}/100\text{g}$ となった。それから 2 ヶ月目、3 ヶ月目と窒素無機化量は増加し培養 4 ヶ月目で $19\text{mg}/100\text{g}$ となった。

グルコース区では 1 週間で $-13.3\text{mg}/100\text{g}$ となり、そこから徐々に増加していき、培養 2 ヶ月から正の数値となり、4 ヶ月目で $9\text{mg}/100\text{g}$ となった。グルコースは炭素と水素で構成されるため、土壌に添加された場合、微生物がグルコースの炭素を取り込むために周辺の窒素を利用することで土壌中の無機態

窒素が消費される。このような窒素の有機化現象が培養 1 週間で著しかったが、2 週目からは窒素無機化量が有機化量を上回ったため見かけ上、土壌中の無機態窒素が増加し、培養 2 ヶ月で正の数値となった。また窒素無機化量は 4 ヶ月で対照区より 11.4mg/100g 低かった。

堆肥施用区については培養 2 週間目までマイナスの数値を示し、窒素の有機化が行われていることが示唆された。その後 2 ヶ月目までグラフでは横ばいとなり見かけ上の窒素無機化はみられなかったが、それ以降は増加を示し、培養 4 ヶ月で窒素無機化量は 14mg/100g となったが対照区より 5mg/100g 低い値であった。

米ぬかは炭素率が堆肥と同程度であり、土壌に施用することで窒素無機化の抑制効果が期待された。対照区と比較すると 1 ヶ月まで窒素無機化は抑制されたが、2 ヶ月以降は対照区と同様な窒素無機化傾向を示した。4 ヶ月で対照区とコメヌカ 0.5% 区の窒素無機化量の差は 2mg/100g 未満となった。また、コメヌカ 0.5% と 1.0% では同様な傾向を示したが、培養 4 ヶ月でコメヌカ 0.5% よりコメヌカ 1.0% は 6mg/100g 高かった。

今回使用した堆肥は炭素率 19.3 と高かったため、土壌からの窒素無機化を抑制したと考えられる。また、コメヌカの炭素率は 17 であり堆肥よりも低く、期待する窒素無機化抑制効果はほとんどなかった。

2)野菜の品質と土壌中窒素量の関係

栽培した 5 作のコマツナの硝酸、ビタミン C、収量などについて表 3 に示した。

表 3, 慣行区および改善区における

コマツナの収量と栄養分析値

	試験区	葉色	硝酸	ビタミンC		糖度		収量		
		スパッド	mg/kg	mg/100	Brix%/	kg/10a				
1作目	改善区	41	4547	b	46	a	2.5	a	3073	c
	慣行区	32	4566	b	43	a	2.4	a	2973	bc
2作目	改善区	28	8713	c	48	ab	3.1	a	1980	a
	慣行区	27	8694	c	52	ab	2.3	a	1800	a
3作目	改善区	26	4265	b	43	a	2.7	a	1903	a
	慣行区	25	3938	b	43	a	2.4	a	2096	ab
4作目	改善区	39	4173	b	61	b				
	慣行区	36	4185	b	52	ab				
5作目	改善区	30	606	a	78	c	4.3	b	2140	abc
	慣行区	32	573	a	75	c	4.3	b	1767	b
食品成分表			5000		39					

*4作目は虫害などのため不作であり収量調査と糖度の分析は行っていない。

Tukey法 $\alpha = 0.25, n=3$ 硝酸、ビタミンC、収量、糖度について

同一アルファベット間に有意差なし。

硝酸含量については平均気温 25℃と最も高くなる 2 作目が 8700mg/kg となり、1 作目と 3 作目は平均気温 17℃、栽培日数は 40 日前後と同様な条件であり硝酸含量は 4000～4500mg/kg となった。また、4 作目は平均気温 5.8℃と低温条件下であったが、栽培日数が 115 日と長期間あり 4200mg/kg 程度となった。また 5 作目は平均気温 11.8℃で栽培日数が 47 日であり、硝酸量は 570～600mg/kg と著しく低い値を示した。

一方で野菜は利用する窒素が多いほど糖が消費されるため、糖を前駆体とするビタミン C 合成量が減少する。硝酸とビタミン C については負の相関があることが報告されている(1995 建部ら, 2005 池羽ら)。

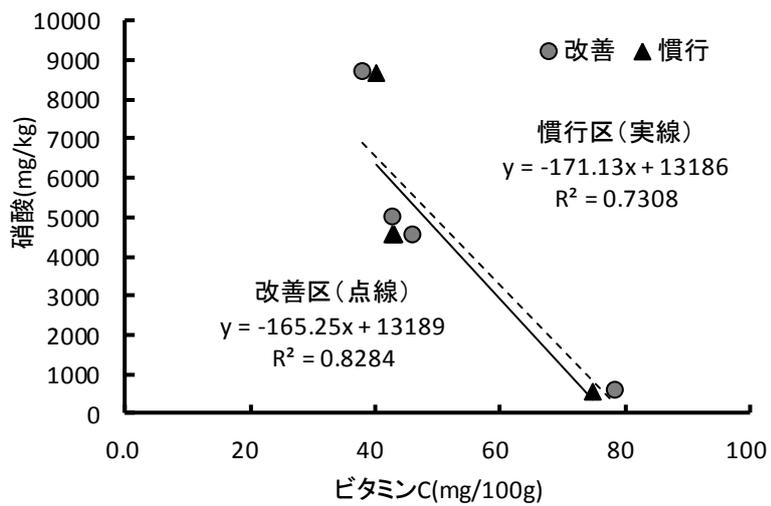


図 2, コマツナの硝酸とビタミン C の関係

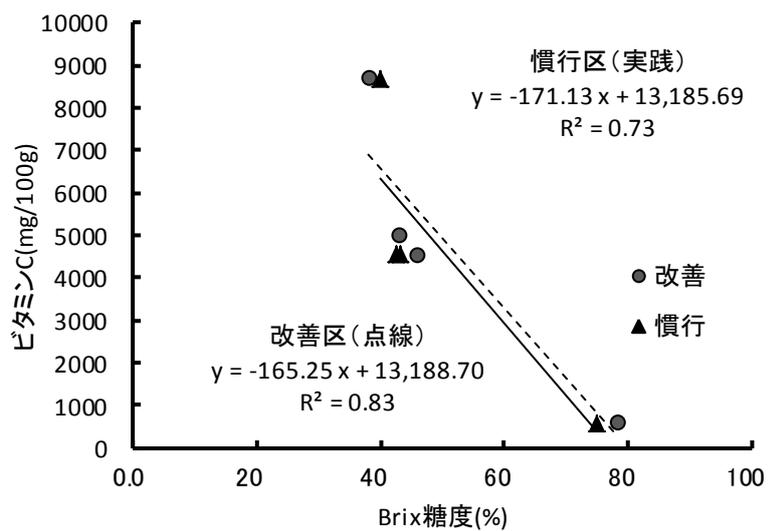


図 3, コマツナのビタミン C と Brix 糖度の関係

本試験においても、ビタミン C は硝酸が最も高い 5 作目で 75~78mg/100g となり、1 作目から 4 作目は 43~61mg/100g と有意差は確認されなかったが、硝酸とビタミン C については寄与率 0.7~0.8 程度の負の相関が認められた(図 2)。また、ブリックス糖度についてもビタミン C と同様に 5 作目で 4.3% と有意に高く(図 3)、1 作目から 4 作目は 2.4~3.1% と有意差はなかった。また、各作において慣行区、改善区間の品質、収量の有意差は認められず、同等の品質のコマツナが生産されたことが分かった。

野菜の硝酸含量については栽培開始時の窒素と高い相関あることが報告されている(1995 建部ら,2005 池羽ら)。本試験における栽培開始時土壌とコマツナ硝酸の関係性について図 4 に示したが、寄与率について慣行区 0.5、改善区 0.7 と相関性は低かった。本試験の農地土壌からは多量の窒素が無機化されることが分かっており、栽培期間中の土壌窒素無機化がコマツナの硝酸含量に影響を及ぼしたと考えられる。そこで埋没窒素無機化試験の結果から栽培期間中に現地土壌から無機化する窒素及び栽培開始時無機態窒素の含量とコマツナの硝酸含量の関係性について調べた結果、図 5 のように慣行区、改善区で寄与率 0.93、0.90 の高い相関性が認められた。

よって、コマツナの硝酸含量について土壌から無機化する窒素と深い関係があることが分かり、低温条件下であっても栽培期間が長期間に及び、その間土壌から窒素無機化量が多くなれば硝酸含量が高くなることが分かった。

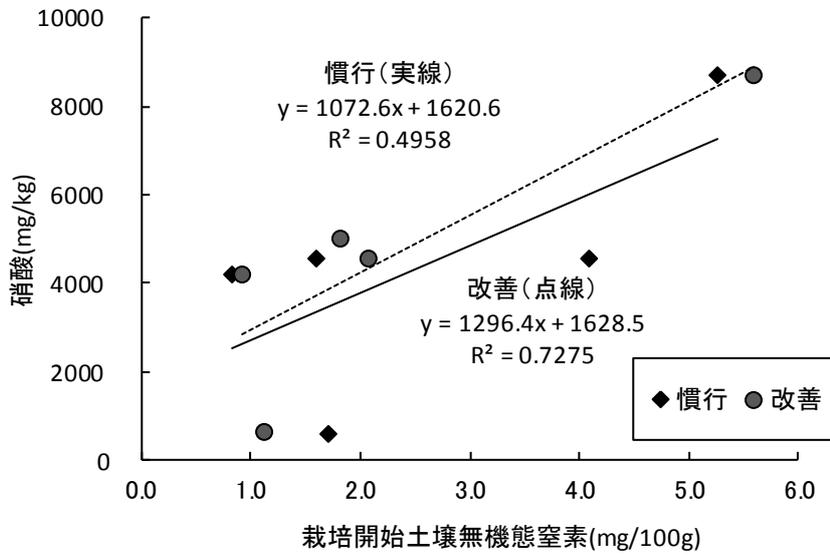


図 4, 栽培開始時土壌無機態窒素とコマツナ硝酸含量の関係

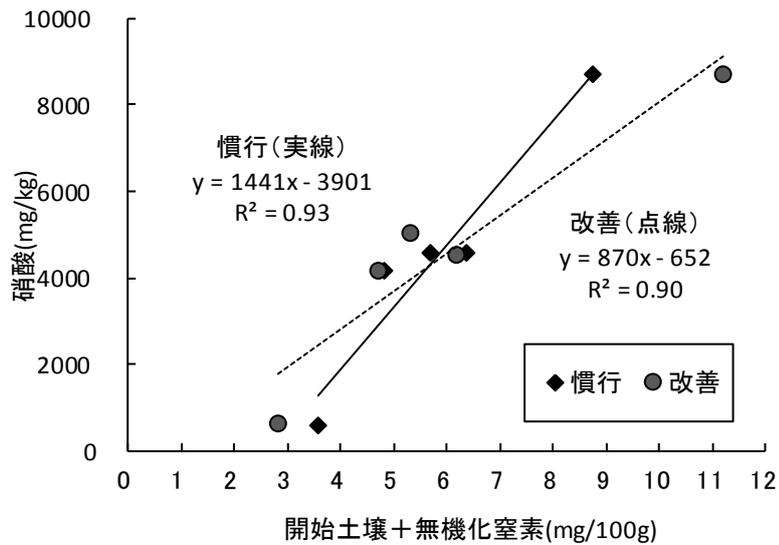


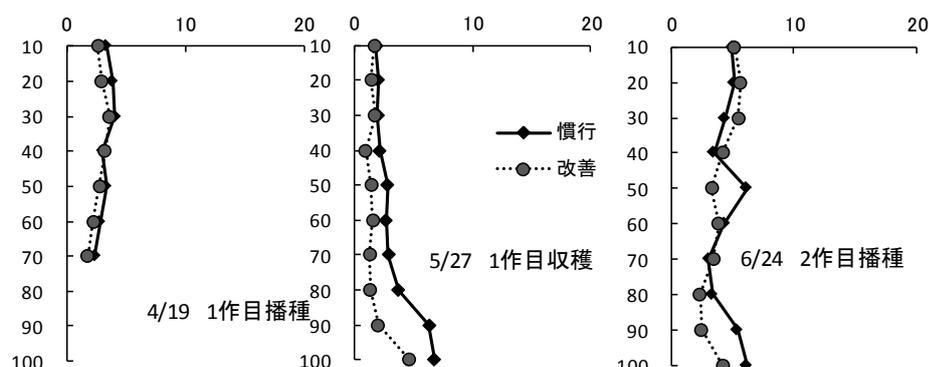
図 5, 栽培開始時無機態窒素および栽培期間中に無機化する窒素含量値とコマツナ硝酸含量の関係

以上から、特に有機物を多く含む土壌では、窒素無機化量は野菜の品質に大きく影響する。土壌の窒素無機化を考慮した栽培管理を行うことで、高品質野菜栽培の可能性が示唆された。

3) 現地畑における無機態窒素の挙動

土壌の無機態窒素の挙動について図 6 に示した。7 月から 9 月にかけて表層の無機態窒素が増加しており、時間経過に伴い下層の無機態窒素も増加していた。これは夏季の高温条件下で微生物が活発化され、土壌からの窒素無機化量が増大し、雨水などにより下層に浸透していったためと考えられる。特に 9 月以降は気温が低下し表層での窒素無機化が抑制されているため、ピークが時間の経過と共に下層に移行していることが明確に分かる。そして、約 3 か月後の 12 月には表層の無機態窒素ピークは下層 100cm まで到達していた。

また慣行区と比べ改善区において 7 月から 9 月の表層における無機態窒素量は抑えられており、以後の無機態窒素溶脱量は改善区で抑制されていた。



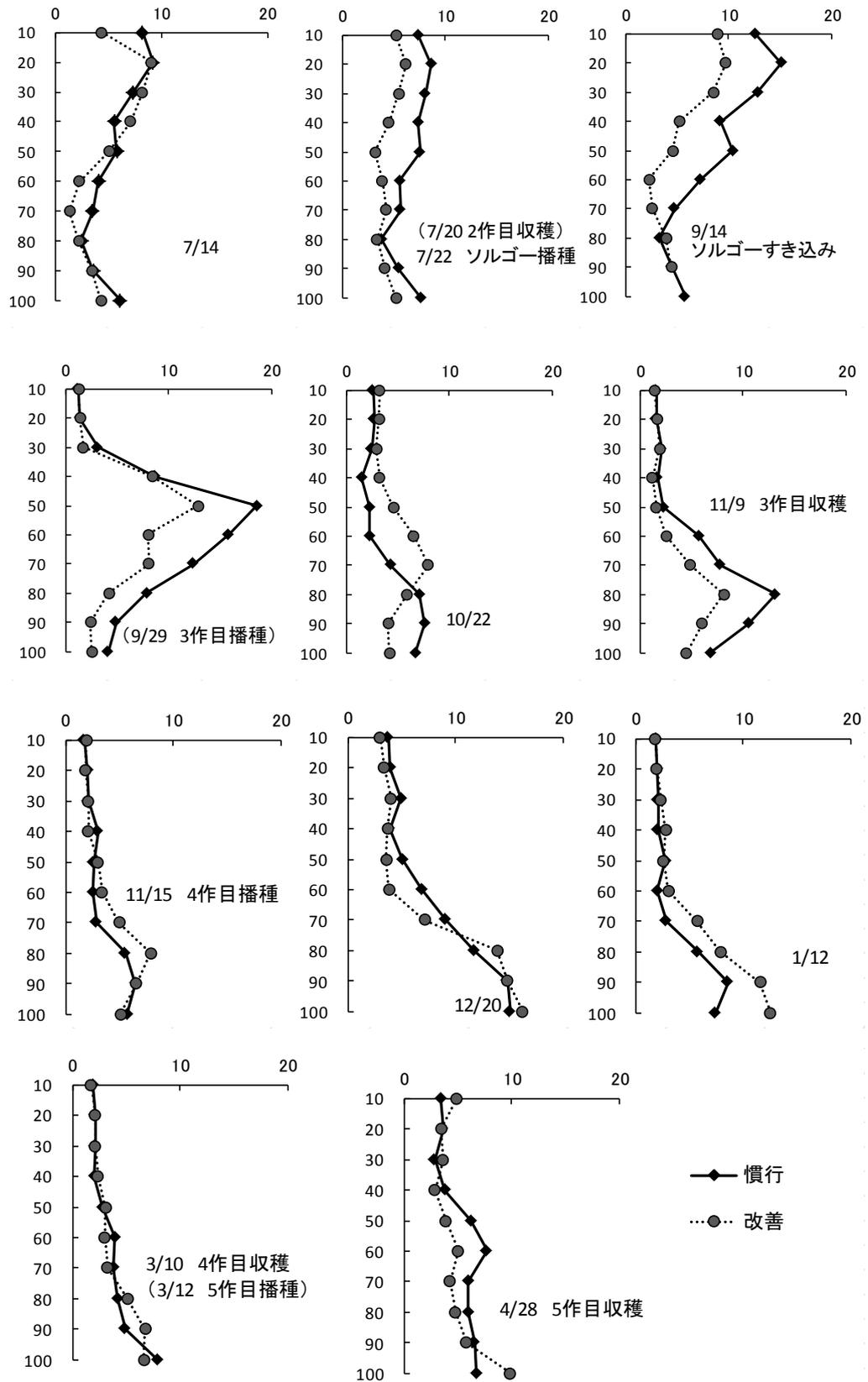


図 6, 慣行区、改善区における土層 100cm 内無機態窒の素挙動

表層 30cm までの無機態窒素の挙動について図 7 に示したが、改善区において休耕期間中のソルゴー栽培により減少していることが分かる。この間の慣行区と改善区の無機態窒素の差は 13.5kg/10a であった。ソルゴーの成分吸収量は表 4 の通りで、窒素で 8.7kg/10a であり無機態窒素減少量よりもやや少なかった。よって、改善区における無機態窒素減少効果は、ソルゴーによる吸収及び、ソルゴー栽培により土壌の日陰が増えたため窒素無機化が抑制された 2 重の効果によるものと推察する。

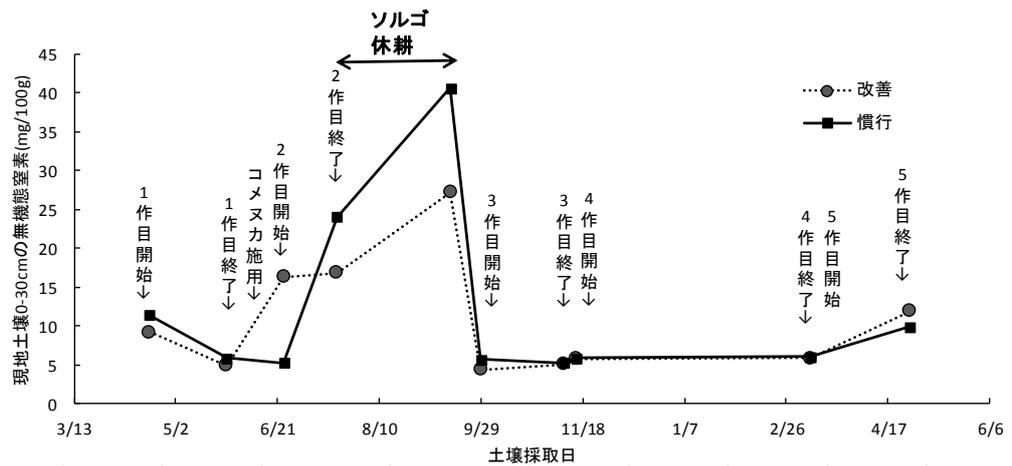


図 7, 表層 30cm 内の無機態窒素の挙動

表 4, 各区における成分吸収量

慣行区						
	収量	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO
	kg/10a	吸収量(kg/10a)				
1作目	2973	8.8	1.0	13.5	0.5	3.0
2作目	1800	5.9	0.5	8.2	0.3	2.3
3作目	2096	6.3	0.7	9.0	0.4	2.5
4作目	2790	9.5	1.1	11.6	0.9	4.9
5作目	1767	5.1	0.8	8.3	0.4	2.6
合計量		35.7	4.1	50.6	2.5	15.3

改善区						
	収量	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO
	kg/10a	吸収量(kg/10a)				
1作目	3073	8.8	1.2	13.7	0.5	3.0
2作目	1980	3.4	0.6	9.5	0.4	2.7
緑肥	2673	8.7	0.8	15.9	1.2	1.8
3作目	1903	4.8	0.5	7.3	0.3	1.9
4作目	1884	7.5	0.9	9.0	0.6	3.7
5作目	2140	6.1	1.1	11.6	0.6	3.2
合計量		39.2	5.1	66.9	3.4	16.3

5.堆肥を肥料資源として活用するための迅速分析法の開発

5-1.ディスクリート型自動化学分析装置による

堆肥中の速効性肥料成分量の迅速分析

1. はじめに

本来、堆肥は稲わらや麦わらあるいは野草などを原料として野外で堆積していたため、窒素・リン酸・カリなどの肥料成分に乏しく、主に土壌改良資材として施用されていた。しかし、近年では堆肥といえば家畜ふん堆肥が主流で、しかも屋根のある堆肥舎で製造するため肥料成分を多く含むと共に、畜種や副原料あるいは製造方法などにより成分含有量が大きく異なることが知られている(山口ら 2000)。しかし、農家の堆肥に対する意識は従来通りであることが多く、そのような堆肥施用が主に園芸土壌の可給態リン酸や交換性カリの過剰蓄積をもたらしてきた。

そこで、堆肥中の肥料成分を肥料として活用する機運が高まり、従来の堆肥分析法を簡易化するための前処理や分析法に関する検討がなされてきた。前処理法に関して、棚橋ら(2005)、柳井ら(2005)は 0.5 mol L^{-1} 塩酸、新妻ら(2010)は、 1 mol L^{-1} 塩酸、藤田ら(2011)は 20 g L^{-1} クエン酸抽出により家畜ふん堆肥中の速効性肥料成分を抽出できることを報告している。また、分析法に関しては、安藤ら(2004)、棚橋ら(2005)の小型反射式光度計(RQ フレックス)、磯部ら(1999)、JA 全農(2002)、村上ら(2006)の全農型土壌分析器(ZA-II)を用いた簡易定量法などがある。これらは何れも農業生産現場や小規模な土壌診断室など試料点数が比較的少数の場合には最適であるが、大規模土壌診断室では不向きである。小

宮山ら(2009)は非破壊迅速定量法として蛍光 X 線分析法の有効性を報告しているが、重要な分析対象である窒素の分析ができない。また、現状の大規模土壌診断室では、土壌診断分析に用いる原子吸光分析、炎光分析、ICP-AES などによる分析が行われているが、多項目をひとつの分析装置でカバーすることができない。その点、炎光分析と比色分析を組み合わせた土壌・作物体総合分析装置(SPAD)では、多項目の分析が可能であるが、分析項目を変える毎に人手を必要とする。一部の土壌診断室では、フロー方式による自動化学分析装置(FIA, オートアナライザー)が用いられている。この装置であれば多項目の自動分析が可能であるが、分析項目毎に検出部を用意しなければならず、設置に高額な経費を必要とする。一方、最近土壌診断分析にディスクリット方式による自動化学分析装置が利用される(馬場ら 2009)ようになった。ディスクリット方式による自動化学分析装置(以下、自動化学分析装置)とは数 \sim 30 μ L の試料溶液と反応試薬を自動ピペッターにより順次添加混合して、一定時間反応後、吸光度を測定する分析装置で、一液中の多成分を迅速に定量することができる。本装置は多項目分析が可能でフロー方式に比べて安価な予算で導入が可能である。そこで、本報では棚橋ら(2005)の 0.5mol L⁻¹ 塩酸抽出液中のアンモニア態窒素・硝酸態窒素・リン酸(P₂O₅)・カリ(K₂O)・石灰(CaO)・苦土(MgO)をディスクリット型自動化学分析装置により迅速に定量するための検討を行った。なお、棚橋ら(2005,2010)は堆肥 5 \sim 10 g に 0.5mol L⁻¹ 塩酸 100mL を添加して 60 分振とう抽出すれば、湿式灰化法と比較しほぼ同量のリン酸、カリ、石灰、苦土を抽出でき、2mol L⁻¹ 塩化カリウム溶液では抽出できない MAP 態窒素を抽

出することができることから速効性窒素の評価として優れていることを述べている。本報告では、これらの抽出法と夾雑物の回避技術もあわせて検討した。

2.材料および方法

1) 供試試料

堆肥試料には、家畜ふん堆肥 11 種類(牛ふん 3 種類, 豚ふん 5 種類, 鶏ふん 3 種類)の他に、木質堆肥 4 種類, もみ殻堆肥 2 種類, 生ごみ堆肥 3 種類の合計 20 点を供試した。通常, 堆肥の分析には現物を供試するが, 本報告の目的が堆肥分析法の検討であるため, いずれも, 風乾後に粉碎して, 2mm の篩を通過させた均一試料とした。これら 20 点の堆肥の pH, 電気伝導率, 全炭素, 全窒素および無機成分含有量を表 1 に示す。なお, pH と電気伝導率は試料 5g に純水 50mL を加え, 1 時間振とう後の懸濁液について測定した。全窒素・炭素は全窒素・炭素自動分析装置(住化 NC-220F)を用い, 無機成分含有量の測定は硝酸分解後, ICP-AES で測定した(後藤ら 1992)。

2) 分析装置

堆肥から 0.5 mol L^{-1} 塩酸で抽出したアンモニア態窒素・硝酸態窒素・リン酸・カリ・石灰・苦土をディスクリート式自動化学分析装置(富士平工業(株)高速土壌養分自動分析装置 SNA-24i)で測定した。各成分の測定原理と測定条件, 検量線の濃度範囲などは表 2 のとおりである。また, それらの測定値と比較する従来分析法として, アンモニア態窒素・硝酸態窒素については FIA(サヌキ工業 SNK FI-5000V), その他の無機成分については ICP-AES(島

津製作所 ICPS-8100)を採用した. FIA による比色分析原理は自動化学分析装置と同様とした.

表 1, 供試堆肥の種類と肥料成分含有量

堆肥の種類	No.	乾物当たり						
		N	C	C/N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
		g kg ⁻¹			g kg ⁻¹			
牛ふん堆肥	1	33.3	313	9.39	55.3	68.8	55.4	23.6
	2	21.7	425	19.6	46.6	20.6	19.1	18.8
	3	27.5	391	14.2	31.8	30.3	46.7	15.2
豚ふん堆肥	1	43.6	341	7.82	87.6	27.2	68.3	23.9
	2	37.0	250	6.76	107	42.1	137	31.7
	3	34.0	281	8.26	131	37.6	152	28.5
	4	37.5	396	10.6	72.2	20.7	49.4	17.5
	5	29.3	370	12.6	21.4	23.2	28.7	13.5
鶏ふん堆肥	1	60.3	311	5.15	63.2	44.3	185	15.7
	2	31.4	289	9.20	51.0	39.2	155	13.1
	3	52.5	380	7.25	28.5	20.7	56.5	11.9
生ごみ堆肥	1	32.1	467	14.6	10.1	18.4	51.5	2.65
	2	28.3	309	10.9	33.1	41.3	108	17.5
	3	22.6	507	22.5	28.3	16.2	3.15	9.01
木質堆肥	1	19.9	403	20.2	12.2	3.52	49.2	10.1
	2	22.5	241	10.7	14.7	8.06	23.7	17.5
	3	22.7	419	18.5	7.87	19.7	34.8	5.05
	4	21.4	318	14.8	9.90	8.69	34.1	9.84
モミ殻堆肥	1	11.5	212	18.4	3.85	8.19	15.3	8.94
	2	13.4	221	16.5	16.3	6.56	32.2	5.99

表 2, 自動化学分析装置の測定条件

項目	検量線濃度 mg L ⁻¹	主波長	副波長	検体量	R1量*	R2量**	反応液量	測定法
		(nm)		(μL)				
NO ₃ -N	0-10	546	700	20	200	160	380	チタン還元・ナフチルエチレンジアミン法
NH ₄ -N	0-10	600	546	10	140	140	290	インドフェノール青法
K	0-50	405		20	150	210	380	テトラフェニルホスホニウム吸光度法
P	0-50	405	(700)	30	100	40	170	バニリンモリブデン酸法
Ca	0-200	570		5	300		305	オーカルゾールフタルインコンフレーション法
Mg	0-50	505		3	300		303	キシリトール-I 吸光度法

*, ** 発色液1, 2

3)堆肥抽出液の前処理法の検討

棚橋ら(2005)の方法に従い、鶏ふん堆肥 3 点については 1g, その他の堆肥については 2g を 80cc のナルゲン遠沈管に採取し、0.5 mol L⁻¹ 塩酸 20mL を加え、室温で 60 分間振とう抽出した。この抽出液を No.5C のろ紙でろ過し、水で 100 倍に希釈した。

これらの希釈溶液の一部で褐色ないし黒褐色の着色が認められ、堆肥中から塩酸で抽出された有機物に起因するものと思われた。自動化学分析装置では比色あるいは比濁法により各成分の定量を行うため、測定液中の着色が定量値に影響する可能性がある。また、測定液中に有機物が存在すると、硝酸イオンを亜硝酸イオンに還元する還元剤として添加された塩化チタン(Ⅲ)が有機物により酸化されて負の干渉を及ぼすとされている。しかし、加熱・酸化活性炭(加藤ら 1992)を用いることで、着色が除去され、自動化学分析装置による硝酸測定値の向上が馬場ら(2009)によって報告されている。そこで堆肥の塩酸抽出液について着色が分析に与える影響及び、活性炭の有効性とその処理法について検討を行った。

(1)活性炭の有効性

上記の抽出液の中で、最も着色が認められた豚ふん堆肥 No.1 の試料抽出液を水で 100 倍に希釈した溶液の紫外部および可視部(190~500nm)の吸収スペクトルを測定した。また、堆肥抽出希釈液 10mL に市販の活性炭(和光純薬工業製特級活性炭素,粉末 Lot PDH0694)0.1g を添加し、よく攪拌後にろ過をしたろ液および、NO₃-N 5mgL⁻¹ 硝酸イオン標準溶液と堆肥抽出希釈液と同様に活性炭処理した溶液についても吸収スペクトルを測定した。

(2)活性炭の処理方法

加藤ら(1992)の方法に従い,和光純薬工業製の活性炭を 600°Cで 4 時間加熱処理した.豚ふん堆肥 No.1 の抽出液をろ過する際,ろ紙内に加熱処理活性炭 0.1g を採り,そこに堆肥抽出液を注いで約 10mL のろ液を得た.ろ液を水で 100 倍に希釈し,自動化学分析装置と比較のために FIA により硝酸イオンを定量した.なお,活性炭処理を施さない無処理区も設けた.

(3)加熱活性炭に関する酸洗浄処理

加藤ら(1992)は土壌中の硝酸態窒素定量の前処理として加熱活性炭を用いたが,本分析では堆肥中の硝酸態窒素の他にリン酸,カリ,石灰,苦土を対象とするため,加熱処理活性炭中に含まれる灰分の影響が懸念される.そこで,600°Cで 4 時間加熱処理した活性炭 5g を 80mL 容ナルゲン遠沈管に採り 6molL⁻¹塩酸 50mL を加えふたをして手で 1 分間激しく振とうした.遠心分離後,上澄を廃棄し同様の操作を計 3 回繰り返した.その後同操作により純水で 5 回洗浄し,乾燥して次の実験に供試した.すなわち,ろ紙内に酸処理あるいは無酸処理活性炭をそれぞれ 0.1g 採り, 0.5mol L⁻¹塩酸抽出液 10mL を注いでろ過した.そのろ液中のリン,カリ,石灰,苦土を ICP-AES(島津製作所 ICPS-8100)により定量した.

(4)活性炭量の検討

活性炭の適正使用量を検討する目的で,豚ふん堆肥 No.1 抽出希釈液中の硝酸イオンを自動化学分析装置法で定量した.その際の活性炭使用量を 0, 0.05, 0.10, 0.20g とした.なお,本実験では上記検討項目(2)および(3)の結果に基づいて加熱処理後に酸処理を施した活性炭を供試した.

4) 従来法との比較

棚橋ら(2005)の方法で供試堆肥 20 点を 0.5 mol L^{-1} 塩酸で抽出した。直径 11cm のろ紙(No.5C)を円錐形に折り，直径 6 cm のプラスチック製ロートにセットした。ろ紙の中に加熱，酸洗浄した活性炭 0.1g を入れ，そこに約 10mL の堆肥抽出液を注ぎろ過した。そのろ液 0.5mL をマイクロピペットで採取し，水で 100 倍に希釈した。この溶液と活性炭処理を施さない活性炭無処理希釈液を従来法と自動化学分析装置に供し，6 成分を定量した。なお，これらの分析は全て 3 連で行った。

3.結果および考察

1)堆肥抽出液の前処理法の検討

(1)活性炭の有効性

堆肥抽出液の中で，最も着色が認められた豚ふん堆肥 No.1 の希釈溶液の紫外部および可視部の吸収スペクトルを測定した結果、図 1 のように堆肥抽出希釈液では 210nm 付近にシャープなピークと 280nm 付近にショルダー状のピークが認められた。210nm のピークは硝酸標準溶液と一致したため硝酸イオンに起因するピークと判断された。なお，この 210nm を利用した紫外部吸収光度法による土壌や水耕液中の硝酸イオンの定量が従来から行われている(斉藤 1988，加藤ら 1992，八槇 2003，安藤ら 1985)。また，斉藤は 280nm のピークが土壌中の水溶性タンパク質に起因し，その吸光度を測定することで可給態窒素量を評価できるとしている。一方，佐藤(1985)はおがくずの熱水抽出液の紫外部吸収スペクトルに認められる 285nm 付近のブロードなピークをタンニンなどのポリフェノール類に起因するとしている。これらのピークに該当すると思われる 280nm 付近のピークは活性炭処理により消失

したため、堆肥から抽出された有機物に起因すると判断された。

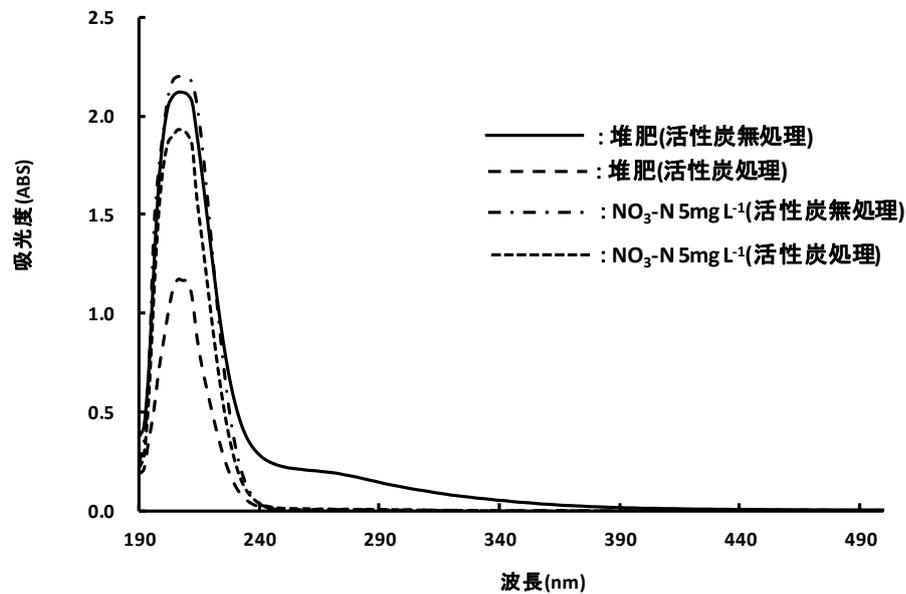


図 1, 堆肥抽出液の紫外外部吸収スペクトルと

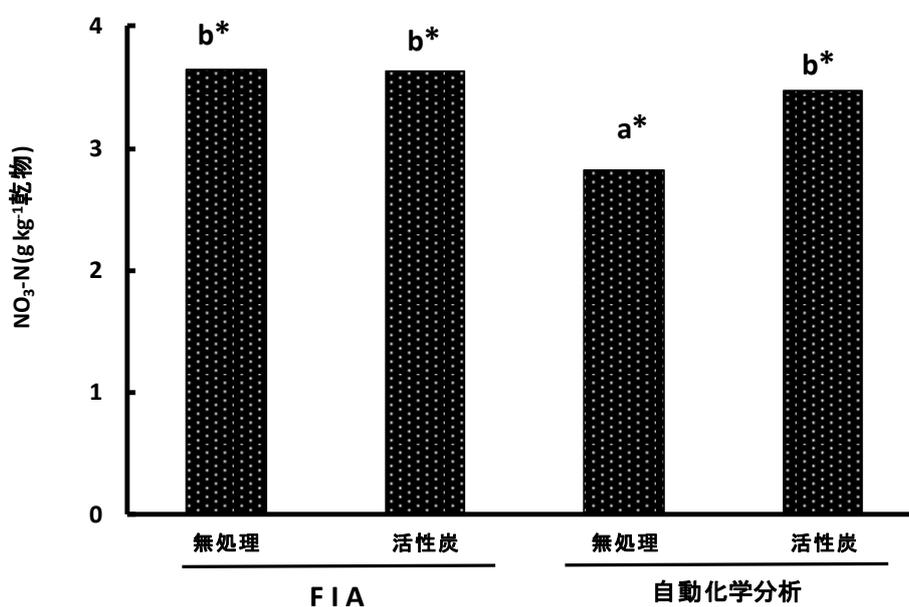
活性炭処理による変化 (試料: 豚ふん堆肥 No,1)

なお、硝酸イオンによる 210nm のピークは堆肥抽出液と硝酸標準溶液共に活性炭処理によりピーク高が低下した。加藤ら(1992)は、紫外外部吸光光度法による土壌中の硝酸態窒素の定量において、土壌抽出液中の硝酸イオンの 17~50%が活性炭処理により活性炭に吸着されるが、活性炭を 600℃で 4 時間加熱処理すれば、吸着を回避できることを報告している。

以上の結果より、本分析法では堆肥抽出希釈液の有機物を除去するために加熱処理を施した活性炭による前処理を要することが示唆された。

(2)活性炭の処理方法

加熱活性炭処理の有無が豚ふん堆肥 No.1 の抽出希釈液中の硝酸態窒素定量値に及ぼす影響を自動化学分析装置と FIA で比較した。



*: 同一アルファベット間に有意差なし(Tukey法、 $\alpha = 0.01$ 、 $n=3$)

図 2, 堆肥抽出液の活性炭処理が豚ふん堆肥中の硝酸態窒素量に及ぼす影響

その結果, 図 2 のように FIA では活性炭処理の有無間で有意差が認められなかったが, 自動化学分析装置では活性炭無処理区で低い値となった。試料溶液中の硝酸イオンを金属カドミウム充填カラムに通して亜硝酸イオンに還元する FIA では, 少量の有機物が溶存していてもカラム通過後には完全に還元されるため負の干渉を与えないが, 20 μ L の試料液中に 0.4 μ L の塩化チタン溶液を

添加する自動化学分析装置では、 Ti^{3+} の一部が試料液中の有機物により酸化されて硝酸イオンの還元力が低下するため、活性炭無処理区では有意な負の干渉を与えたと考えられる。すなわち、自動化学分析装置による堆肥抽出液中の硝酸イオンの定量には活性炭処理を要することが明らかになった。

(3)加熱活性炭に関する酸洗浄処理

0.5mol L⁻¹塩酸による加熱活性炭からの養分溶出量を測定した結果、表3のように酸無処理の活性炭ではリン酸とカリの溶出は認められなかったが、堆肥の乾物換算量で 29.1g kg⁻¹の石灰と 19.7 g kg⁻¹の苦土が溶出した。一方で、酸処理を施した活性炭では石灰、苦土の溶出は認められなくなった。

すなわち、本分析法に用いる活性炭の前処理として、加熱処理とその後の酸洗浄処理を要することが明らかになった。

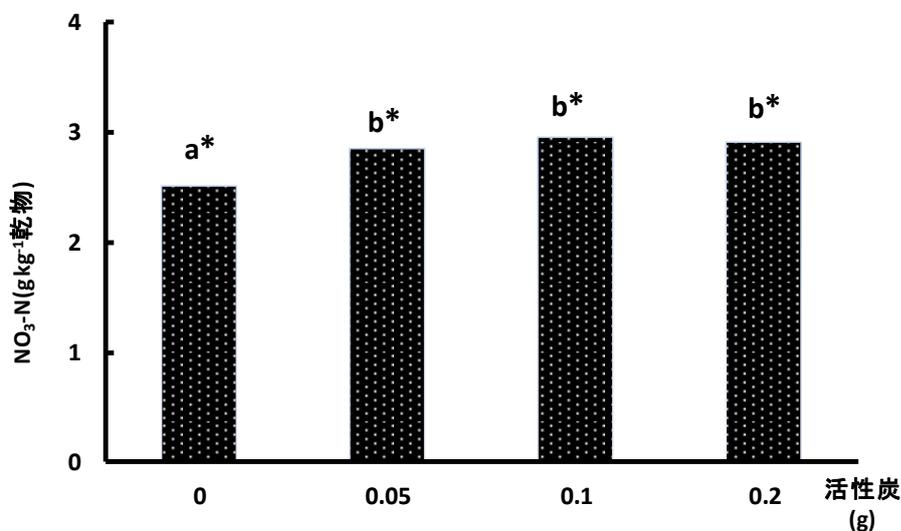
表 3, 酸処理の有無が活性炭からの分析成分抽出量に及ぼす影響

酸洗浄	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
無	0.0	0.0	29.1	19.7
有	0.0	0.0	0.0	0.0

堆肥乾物当たり(g kg⁻¹)

(4) 活性炭量の検討

活性炭の適正使用量について検討した結果、図3のように活性炭 0.05g 以上で有意差は認められなかった。そこで、活性炭使用量を 0.1g 以上とし、実用分析の際にはすり切り 0.1g 程度のプラスチックスプーンを用いることとした。



*: 同一アルファベット間に有意差なし(Tukey法、 $\alpha = 0.05$ 、 $n=3$)

図 3, 活性炭量が豚ふん堆肥中の硝酸態窒素量に及ぼす影響

2)従来法との比較

堆肥中の 6 成分ごとの従来法と自動化学分析装置による測定値の相関図を図 4 に示す. なお, 各図中には活性炭処理の有無による回帰線を図示した. 硝酸態窒素に関しては, 活性炭処理の有無により回帰式に相違が認められた. すなわち, 活性炭処理区では両法による回帰係数が 1.08 であったのに対して, 活性炭無処理区では 1.19 と自動化学分析装置による測定値が従来法より低かった. また, 寄与率も活性炭処理区の 0.971 に対して活性炭無処理区では 0.896 であった.

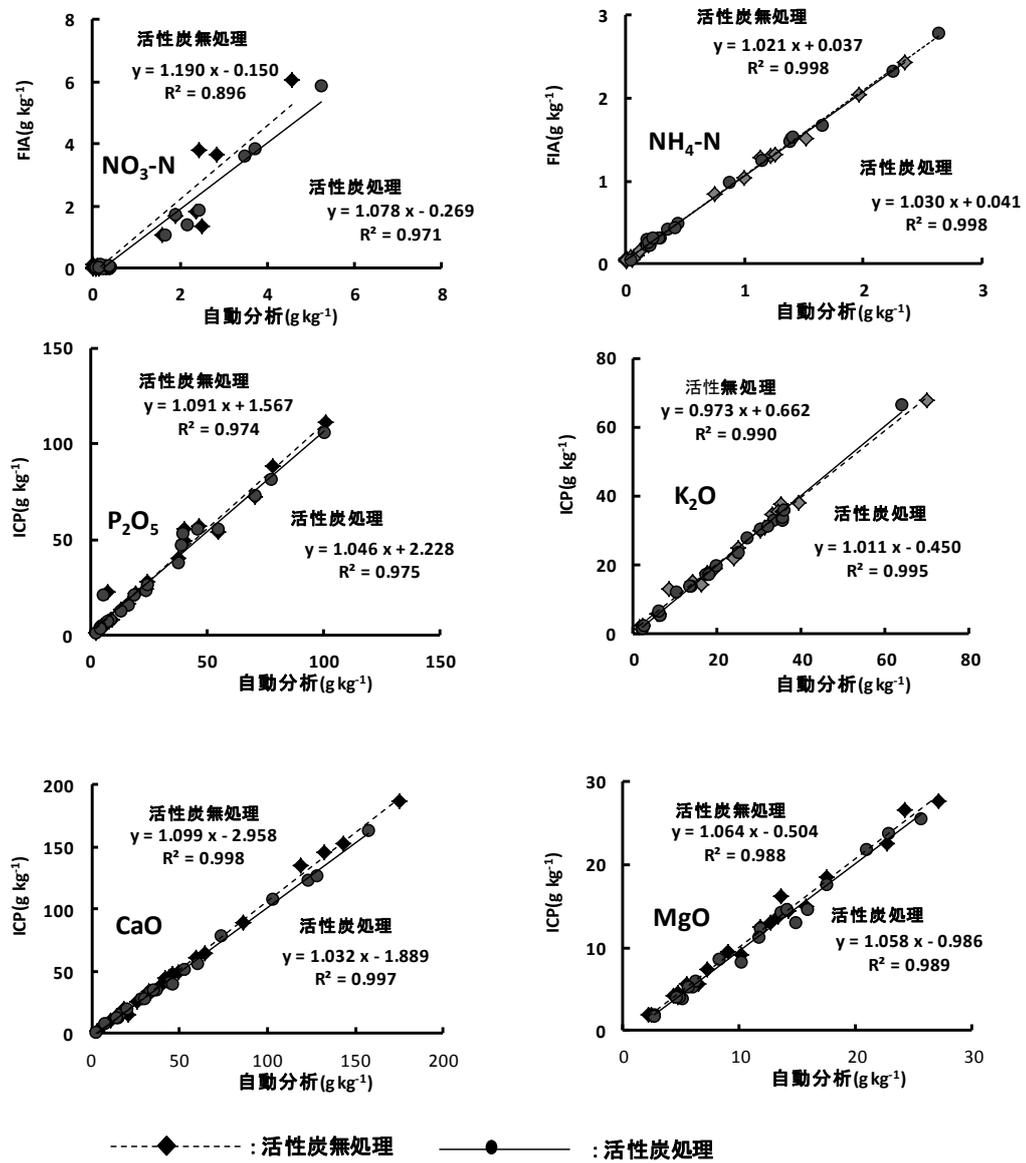


図 4, 自動化学分析装置による分析値と従来法 (FIA, ICP-AES) との比較

自動化学分析装置による硝酸イオンの定量において、活性炭無処理区ではセル中に採取した試料液中の有機物と塩化チタン(Ⅲ)との反応により Ti^{3+} の還元力が低下して負の干渉を受けた。また、試料液中に溶存する有機物量は試料間で異なるため、活性炭処理区に比べて寄与率が低下したと考えられる。従って、硝酸態窒素の定量には活性炭処理が不可欠である。次に、アンモニア態窒素とカリでは活性炭処理の有無にかかわらず寄与率 0.99 以上の高い相関性が認められ、回帰係数も 0.97~1.03 とよく一致した。リン酸、石灰および苦土では寄与率は 0.98 程度以上であったが、回帰係数は活性炭処理区で 1.03~1.06、活性炭無処理区では 1.06~1.10 と活性炭処理の有無にかかわらず、ICP-AES より自動化学分析装置による測定値がやや低く、その傾向は活性炭無処理区ほど大きかった。自動化学分析装置によるリン酸の定量では、リン酸イオンをモリブデン酸塩およびメタバナジン酸塩と反応させて生成する錯塩による呈色、石灰と苦土の定量では両イオンとキレート反応による呈色を比色するのに対して、従来法である ICP-AES では高温プラズマ中で試料溶液中のイオン体だけでなく有機態あるいはコロイド様成分などを含めた全リン、カルシウム、マグネシウムが励起され、そのスペクトル強度を測定する分析法であるため、ICP-AES による分析値が上回り、回帰係数が 1 を若干上回った。また、活性炭処理区では有機態成分が取り除かれるため、活性炭処理の有無により回帰係数にわずかな相違を生じたものと考えられる。

5. 総合考察

棚橋ら(2005)の 0.5mol L^{-1} 塩酸抽出液中の速効性肥料成分量測

定に自動化学分析装置を利用すると、きわめて迅速な堆肥分析が可能となる。ただし、各成分の定量法が比色あるいは比濁法であり、また小型反射式光度計などの簡易分析装置に比べて分析感度が著しく高いので、抽出液の前処理法に検討を加えた結果、塩酸で抽出された有機物により、硝酸態窒素の測定値に影響を及ぼすことが明らかになった。そこで、堆肥と塩酸の懸濁液をろ過する際に加熱と酸洗浄処理を施した活性炭約 0.1g を予めろ紙にセットし、そこに約 10mL の懸濁液を注いでろ液を採取する。そのろ液の一定量をマイクロピペットで採取して純水で 100 倍に希釈し、自動化学分析装置で、硝酸態窒素・アンモニア態窒素・リン酸・カリ・石灰・苦土を定量する方法が最適であった。

なお、本法によるアンモニア態窒素と硝酸態窒素抽出量と 2mol L⁻¹ 塩化カリウムによる抽出量との間には寄与率 0.9 内外の相関性が認められ、本法による抽出の方が平均 12% 増加した。また、リン酸とカリについては本法による抽出量と硝酸分解による値の間には寄与率 0.95 以上の高い相関性が認められ、本法によりリン酸では平均 64%、カリでは平均 87% 抽出された。石灰では、寄与率 0.94 で抽出率は平均 75%、苦土では、寄与率 0.78、抽出率は平均 75% であった(データは表 4)。これらの値を家畜ふん堆肥を主体とする新妻ら(2010)、藤田ら(2011)、林(2014)など既存の結果と比べると相関性と抽出率がやや劣った。その原因は対象試料 20 点中家畜ふん堆肥が 11 点であったことによる堆肥原料の違いと考えられる。

表 2 の測定条件で各成分を連続 3 回ずつ測定する場合の堆肥試料 1 点あたりに要する時間は約 5 分である。したがって、標準溶液

による検量線作成と分析途中で 1 時間毎に標準溶液による感度確認(馬場ら 2009)を行えば, 半日で約 40 点の測定が可能となる. 例えば, 午前中に 40 点の前処理を行い, 午後自動化学分析装置にセットすれば効率よく堆肥の大量迅速分析が可能となる. 測定開始から終了後までには人手を要しないので, その間に他の作業に携わることができる.

表 4, 硝酸分解抽出量に対する本法による抽出量の比率

P ₂ O ₅	抽出比率(%)		抽出比率(%)
1 牛ふん-1	98	8 木質-1	40
19 牛ふん-2	81	9 木質-2	55
20 牛ふん-3	81	16 木質-3	58
平均	87	17 木質-4	38
		平均	48
2 豚ふん-1	81		
3 豚ふん-2	72	10 生ごみ-1	77
4 豚ふん-3	76	11 生ごみ-2	71
7 豚ふん-4	63	12 生ごみ-3	75
13 豚ふん-5	73	平均	74
平均	73		
		15 モミ殻-1	36
5 鶏ふん-1	61	18 モミ殻-2	80
6 鶏ふん-2	77	平均	58
14 鶏ふん-3	64		
平均	67		
平均 家畜ふん	75	平均 全体	64

K ₂ O	抽出比率(%)
1 牛ふん-1	93
19 牛ふん-2	96
20 牛ふん-3	89
平均	93

2 豚ふん-1	110
3 豚ふん-2	79
4 豚ふん-3	86
7 豚ふん-4	120
13 豚ふん-5	77
平均	94

5 鶏ふん-1	80
6 鶏ふん-2	91
14 鶏ふん-3	83
平均	84

平均 家畜ふん	91
---------	----

CaO	抽出比率(%)
1 牛ふん-1	95
19 牛ふん-2	73
20 牛ふん-3	76
平均	81

2 豚ふん-1	87
3 豚ふん-2	75
4 豚ふん-3	81
7 豚ふん-4	90
13 豚ふん-5	54
平均	77

5 鶏ふん-1	69
6 鶏ふん-2	102
14 鶏ふん-3	65
平均	79

平均 家畜ふん	79
---------	----

	抽出比率(%)
8 木質-1	59
9 木質-2	80
16 木質-3	92
17 木質-4	152
平均	96

10 生ごみ-1	74
11 生ごみ-2	87
12 生ごみ-3	64
平均	75

15 モミ殻-1	31
18 モミ殻-2	93
平均	62

平均 全体	87
-------	----

	抽出比率(%)
8 木質-1	67
9 木質-2	62
16 木質-3	56
17 木質-4	82
平均	67

10 生ごみ-1	89
11 生ごみ-2	68
12 生ごみ-3	65
平均	74

15 モミ殻-1	48
18 モミ殻-2	92
平均	70

平均 全体	75
-------	----

MgO	抽出比率(%)
1 牛ふん-1	58
19 牛ふん-2	75
20 牛ふん-3	77
平均	70
2 豚ふん-1	87
3 豚ふん-2	72
4 豚ふん-3	90
7 豚ふん-4	100
13 豚ふん-5	62
平均	82
5 鶏ふん-1	94
6 鶏ふん-2	121
14 鶏ふん-3	85
平均	100
平均 家畜ふん	84

	抽出比率(%)
8 木質-1	51
9 木質-2	34
16 木質-3	95
17 木質-4	57
平均	59
10 生ごみ-1	103
11 生ごみ-2	68
12 生ごみ-3	68
平均	80
15 モミ殻-1	30
18 モミ殻-2	76
平均	53
平均 全体	75

5.堆肥を肥料資源として活用するための迅速分析法の開発

5-2.試験紙による堆肥の速効性肥料成分量の簡易分析

1,はじめに

塩酸抽出法は速効性肥料成分の評価として優れている。今回はさらに個人でも扱い易いクエン酸を用いた抽出法について検討した。クエン酸は水溶性成分の抽出にも使われ、藤田ら(2011)は 2g kg^{-1} クエン酸抽出により家畜ふん堆肥中の速効性肥料成分を抽出できることを報告しており、堆肥の肥料成分を示す有効な溶媒であるうえ、扱いが比較的容易である。そこで、本研究では 20g kg^{-1} クエン酸溶液による可給態成分抽出のための検討をおこなった。

2,材料と方法

1) 20g kg^{-1} クエン酸による簡易抽出法の検討(検討 1)

pH と電気伝導率は試料 5g に純水 50mL を加え、1 時間振とう後の懸濁液について測定した。全窒素・炭素は全窒素・炭素自動分析装置(住化 NC-220F)を用い、無機成分含有量の測定は硝酸分解後、ICP-AES で測定した(後藤ら 1992)。供試堆肥 20 点の堆肥の pH、電気伝導率、全炭素、全窒素および無機成分含有量を表 1 に示す。色付きの試料が抽出法の検討に用いたものである。

(1) 0.5mol L^{-1} 塩酸と 20g kg^{-1} クエン酸溶液における抽出量の比較

供試堆肥は牛ふん堆肥 1,豚ふん堆肥 4,鶏ふん堆肥 2 の合計 7 種類の家畜ふんを用いた。ただし、本報告は堆肥抽出法、分析法の検討が目的であるため、試料については風乾粉碎物を用い、測定

値については乾物表記とした。抽出は供試堆肥 2g（鶏ふんは 1g）に対し、0.5mol L⁻¹ 塩酸及び 20g kg⁻¹ クエン酸溶液 20ml を加え 60 分間振とうした。その後、3000rpm で 5 分間遠心分離後、上澄み液ろ過し、抽出液を 100 倍希釈後、リン酸、カリは ICP-AES で、アンモニア態窒素、硝酸態窒素は FIA で測定した。

表 1, 供試堆肥の種類と肥料成分含有量

試料	試料No	pH(H ₂ O)	EC	T-N		T-C	C/N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O
				(g kg ⁻¹)								
牛ふん堆肥	牛ふん-1	7.8	13.5	33.3	313	9.39	55.3	68.8	55.4	23.6	15.8	
	牛ふん-2	7.3	4.14	21.7	425	19.6	46.6	20.6	19.1	18.8	4.33	
	牛ふん-3	7.5	5.36	27.5	391	14.2	31.8	30.3	46.7	15.2	3.58	
豚ふん堆肥	豚ふん-1	7.3	7.40	43.6	341	7.82	87.6	27.2	68.3	23.9	7.75	
	豚ふん-2	9.0	5.77	37.0	250	6.76	107	42.1	137	31.7	9.80	
	豚ふん-3	7.9	9.89	34.0	281	8.26	131	37.6	152	28.5	11.4	
	豚ふん-4	7.9	4.82	37.5	396	10.6	72.2	20.7	49.4	17.5	5.24	
	豚ふん-5	5.2	11.3	29.3	370	12.6	21.4	23.2	28.7	13.5	21.5	
鶏ふん堆肥	鶏ふん-1	8.1	5.49	60.3	311	5.15	63.2	44.3	185	15.7	6.86	
	鶏ふん-2	8.7	5.63	31.4	289	9.20	51.0	39.2	155	13.1	5.03	
	鶏ふん-3	7.4	11.0	52.5	380	7.25	28.5	20.7	56.5	11.9	27.9	
生ごみ堆肥	生ごみ-1	5.5	5.29	32.1	467	14.6	10.1	18.4	51.5	2.65	7.44	
	生ごみ-2	7.3	6.08	28.3	309	10.9	33.1	41.3	108	17.5	4.00	
	生ごみ-3	5.5	4.14	22.6	507	22.5	28.3	16.2	3.15	9.01	6.66	
木質堆肥 (剪定枝 落ち葉)	木質-1	6.9	0.45	19.9	403	20.2	12.2	3.52	49.2	10.1	0.89	
	木質-2	6.0	1.51	22.5	241	10.7	14.7	8.06	23.7	17.5	1.39	
	木質-3	8.1	1.98	22.7	419	18.5	7.87	19.7	34.8	5.05	0.94	
	木質-4	7.5	1.29	21.4	318	14.8	9.90	8.69	34.1	9.84	0.54	
モミ殻堆肥	モミ殻-1	7.1	0.39	11.5	212	18.4	3.85	8.19	15.3	8.94	0.36	
	モミ殻-2	7.3	0.51	13.4	221	16.5	16.3	6.56	32.2	5.99	1.45	

*乾物あたりで表示

(2)20g kg⁻¹ クエン酸溶液における抽出比率による成分抽出量の相違

上記供試堆肥とクエン酸溶液の抽出比率を 1:10,1:20,1:50,1:100 とし、60 分の室温振とうした。抽出液は適宜希釈を行い、抽出比率以外の条件は(1)と同様で、塩酸抽出量との比較を行った。尚、硝酸態窒素については抽出液の検討で塩酸抽出と同等の結果を得たため抽出比率の検討は省略した。

(2) 20g kg⁻¹ クエン酸溶液での振とう時間の検討

クエン酸溶液について上記で決定した抽出比率(1:50)を用い、1,15,30,60 分間の振とうを行った。ろ過後 20 倍希釈し、その他条件は(1)と同様とし、リン酸、カリ、アンモニア態窒素、硝酸態窒素の分析をおこなった。

(3) 20g kg⁻¹ クエン酸溶液での抽出温度の検討

(2),(3)で決定した抽出条件（抽出比率 1:50, 振とう時間 1 分）を用いて、抽出温度の影響について検討した。20g kg⁻¹ クエン酸溶液をそれぞれ 10°C、20°C、30°Cの液温に設定し、堆肥試料 0.4g を量り込んだナルゲン遠沈管に溶液 20ml を加え、各温度に設定したインキュベーター内で 1 分間振とうした。抽出液はろ過後、20 倍希釈し、その他条件は(1)と同様としリン酸、カリ、アンモニア態窒素、硝酸態窒素の分析をおこなった。

2) 20g kg⁻¹ クエン酸簡易抽出法における試験紙測定の検討

試験紙は既存のものを用いた。リン酸,カリは「みどりくん PK」を溶液に 10 秒間浸し,60 秒間静置させ比色により濃度を判定した。硝酸態窒素は「みどりくん N」を溶液に 3 秒間浸し,60 秒間静置させ比色により濃度を判定した。アンモニア態窒素は溶液 3ml 小瓶に移し,「アクアチェック A」試験紙を溶液中で 30 秒間強く上下させ,30 秒間静置後に比色表で濃度を判定した。アンモニア試験紙においては本抽出法で呈色が阻害されたため pH について検討を加えた。pH 測定には試料液 3ml 程度でも測定できる携帯 pH メーター (AS ONE AS-211 twin pH) を使用した。

(1)試験紙による各濃度の測定範囲

試験紙の測定範囲について標準液を作成し検討した。標準溶液はリン酸、カリにおいては 0.02g kg^{-1} クエン酸溶液にリン酸は $0\text{-}33\text{mg L}^{-1}$ の範囲で $1\text{-}2\text{mg L}^{-1}$ 毎、カリは $0\text{-}50\text{g kg}^{-1}$ の範囲で $1\text{-}5\text{g kg}^{-1}$ 毎に、硝酸態窒素、アンモニア態窒素は 0.2g kg^{-1} クエン酸溶液に硝酸態窒素は $0\text{-}30\text{mg L}^{-1}$ 範囲で $1\text{-}2\text{mg L}^{-1}$ 毎、アンモニア態窒素は $0\text{-}10\text{mg L}^{-1}$ 範囲で $0.1\text{-}1\text{mg L}^{-1}$ 毎に濃度を設定し、試験紙測定をおこなった。

(2) 20g kg^{-1} クエン酸簡易抽出法による堆肥の試験紙測定

供試堆肥を 1g に対し 20g kg^{-1} クエン酸溶液を 50ml 加え、1 分間の室温 (20°C 前後) 振とう抽出をおこなった。その後抽出液の上清を希釈し、試験紙測定に供した。供試堆肥は抽出法の検討で用いた堆肥 7 点に加え、牛ふん 1, 豚ふん 1, 鶏ふん 1, 生ごみ 3, 木質 4, モミガラ 2 を加え合計 20 点の風乾粉碎物を用いた。リン酸, カリは抽出液を 100 倍希釈後「みどりくん PK」で、硝酸態窒素は 10 倍希釈液に「みどりくん N」、アンモニア態窒素は 10 倍希釈液を「アクアチェック A」試験紙で測定した。また、比較のため希釈液をろ過し、リン酸とカリは ICP、アンモニア態窒素と硝酸態窒素は 100 倍希釈液に調整後 F I A で測定した。なお、測定値は試験紙測定に合わせ風乾物堆肥として表記した。

3, 結果および考察

1) 20g kg^{-1} クエン酸による簡易抽出法の検討

(1) 0.5mol L^{-1} 塩酸と 20g kg^{-1} クエン酸溶液における抽出量の比較

クエン酸抽出によるリン酸、カリ、アンモニア態窒素、硝酸態窒素の抽出量について塩酸抽出の値と比較した結果、**図 1**のように硝酸態窒素以外で有意差が認められた。塩酸抽出との差はリン酸において $5.2 \sim 42 \text{ g kg}^{-1}$ (9~43%) 高い値となった。カリは 5 試料で $1.5 \sim 5.9 \text{ g kg}^{-1}$ (6~10%) 程度高かった。アンモニア態窒素は牛ふん-1 との鶏ふん-1,2 が $0.07 \sim 0.36 \text{ g kg}^{-1}$ (14~19%) 高かった。クエン酸抽出では塩酸抽出よりもリン酸、カリ、アンモニア態窒素で抽出量が低下する結果となった。よって、硝酸態窒素以外の成分について抽出量が塩酸抽出と同程度になる条件について検討をおこなった。

(2) 20 g kg^{-1} クエン酸溶液における抽出比率による成分抽出量の相違

図 2 に抽出比率の相違によるリン酸、カリ、アンモニア態窒素について測定した結果を示した。塩酸抽出と比較するとリン酸では 6 試料で抽出比率 1:50 以上において差はなくなった。有意差のあった鶏ふん-2 においてその差は 5 g kg^{-1} (11%) 程度であった。カリは 1:20 以上においてその差は最大で 2.1 g kg^{-1} (2.5%) であり、全ての試料で塩酸抽出と同等の値となった。アンモニア態窒素は 6 試料において 1:50 以上で有意差はみられなかが、有意差のあらわれた牛ふん-1 で塩酸抽出との差は 0.07 g kg^{-1} (15%) と数値としては小さいため、試験紙測定には影響しないと判断した。以上から、クエン酸溶液ではリン酸、アンモニア態窒素では 1:50 以上、カリでは 1:20 以上で塩酸抽出と同等の抽出量を得ることができる。よって、クエン酸における抽出比率は 1:50 とした。

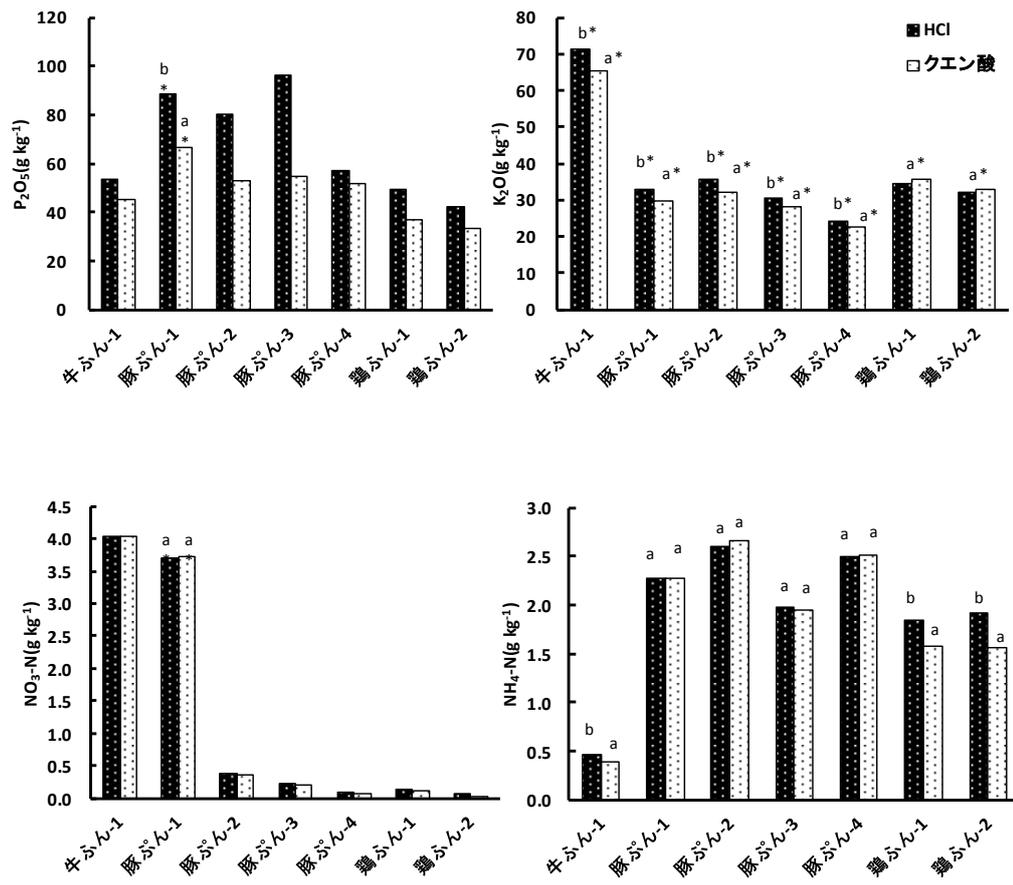
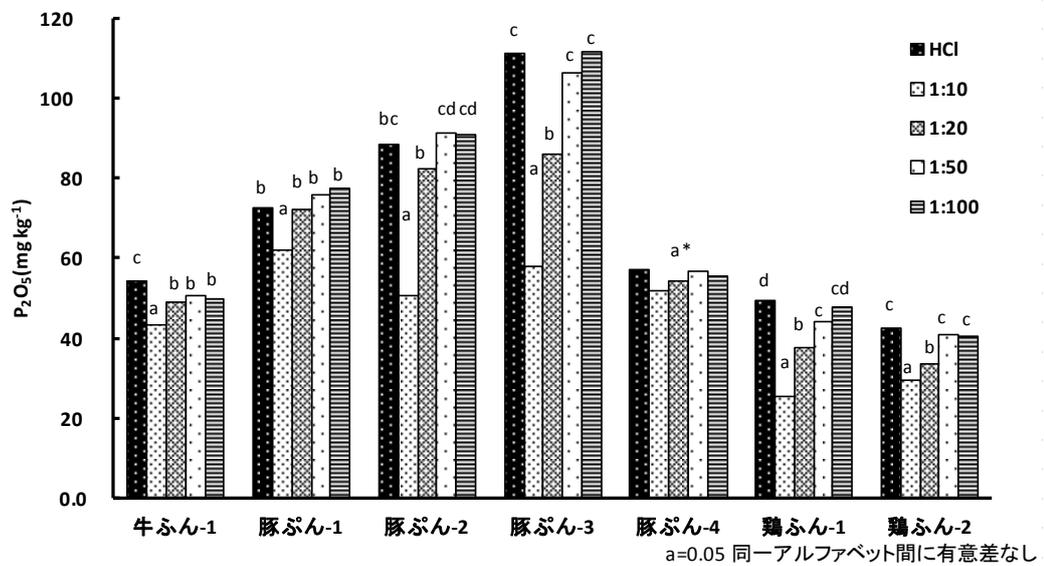


図 1, 塩酸とクエン酸溶液による成分抽出量の比較



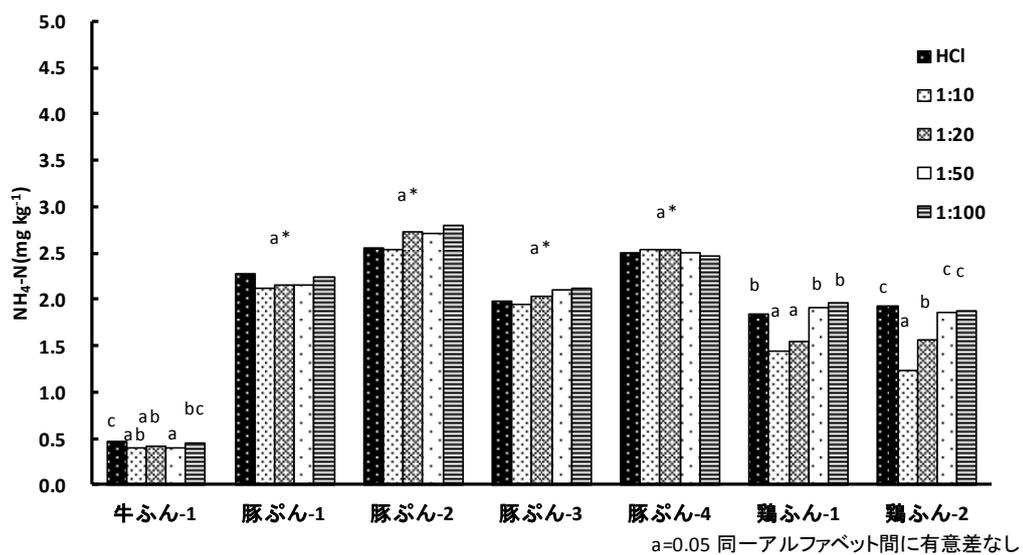
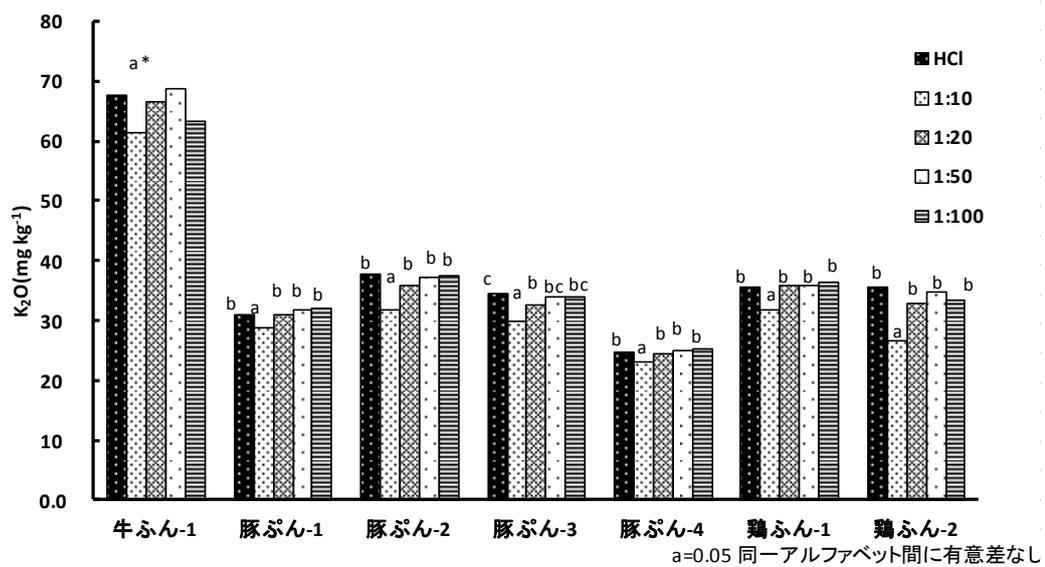


図 2, 抽出比率の違いによるクエン酸溶液からの成分抽出量

(3) 20g kg⁻¹ クエン酸溶液での振とう時間の検討

振とう時間による抽出量の違いを図 3 に示した。リン酸は全ての試料で振とう時間短縮による抽出量の減少がみられたが、6 試料においては振とう 60 分から 1 分における抽出量の減少は 4.7g kg⁻¹(10%)以下であった。しかし、豚ふん-3 においては 60 分で 108g kg⁻¹、30 分は 106 g kg⁻¹、15 分、1 分では 97 g kg⁻¹、82 g kg⁻¹ と抽出量は低下していき、最大で 25.5g kg⁻¹(24%)減少した。豚ふん-3 の塩酸抽出によるリン酸含量は 111g kg⁻¹ と 7 試料中で最も高く、リン酸が高濃度の試料において、振とう時間短縮による影響があるものと考えられた。

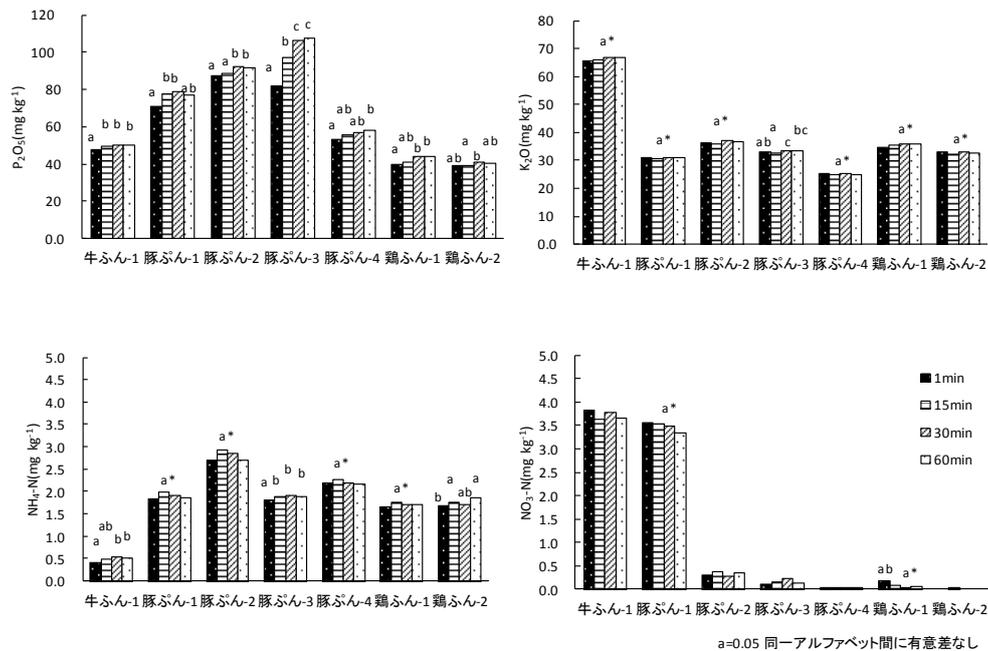


図 3, 振とう時間による成分抽出量の比較

カリでは 60 分と 1 分振とうにおける抽出量の差の最大値は 1.1g kg^{-1} (3%)であり、全ての試料で振とう時間による影響はみられなかった。アンモニア態窒素は牛ふん-1、豚ふん-3、鶏ふん-2 の試料で有意差がみられたが、60 分から 1 分の測定値の差は $0.08\sim 0.18\text{g kg}^{-1}$ (4.3~17.7%) と微量の差であった。硝酸態窒素では振とう時間による抽出量の有意差はなかった。

(4) 20g kg^{-1} クエン酸溶液での抽出温度の検討

温度による抽出効率の差を検討した結果は図 4 に示す通りである。硝酸態窒素では温度による差はみられなかった。カリにおいて豚ふん-1、豚ふん-2、豚ふん-3 で温度低下による減少がみられたが、その差は $2.5\sim 3.6\text{g kg}^{-1}$ と 10%内外であった。一方でリン酸では豚ふん-1、豚ふん-2、豚ふん-3、鶏ふん-2 で、アンモニア態窒素は牛ふん-1、豚ふん-1、豚ふん-2、豚ふん-3 でそれぞれ温度低下による抽出量の減少が確認された。30°Cと比較した温度低下による減少量について、リン酸は 10°Cで $4\sim 14\text{g kg}^{-1}$ 、20°Cで $0\sim 11\text{g kg}^{-1}$ であり、アンモニア態窒素は 10°Cで $0.3\sim 1.1\text{g kg}^{-1}$ 、20°Cで $0.2\sim 0.6\text{g kg}^{-1}$ 減少していった。リン酸、アンモニア態窒素について 30°Cから 10°Cにおける減少量を mol 数で示すと、リン酸は $1.5\sim 5.2\text{mol kg}^{-1}$ 、アンモニアは $0.02\sim 0.04\text{mol kg}^{-1}$ であった。また、詳細なデータは省略するが、アンモニアの抽出量低減に伴いマグネシウムは $0.7\sim 2.0\text{mol kg}^{-1}$ 、カルシウムは $5.6\sim 10.6\text{mol kg}^{-1}$ 低減した。このことから、MAP 態 ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、HAP 態 ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)(\text{OH})_2$) 由来のリン酸、アンモニア態窒素が温度の低下にともないクエン酸溶液への溶出量が低下したことが考

えられた。

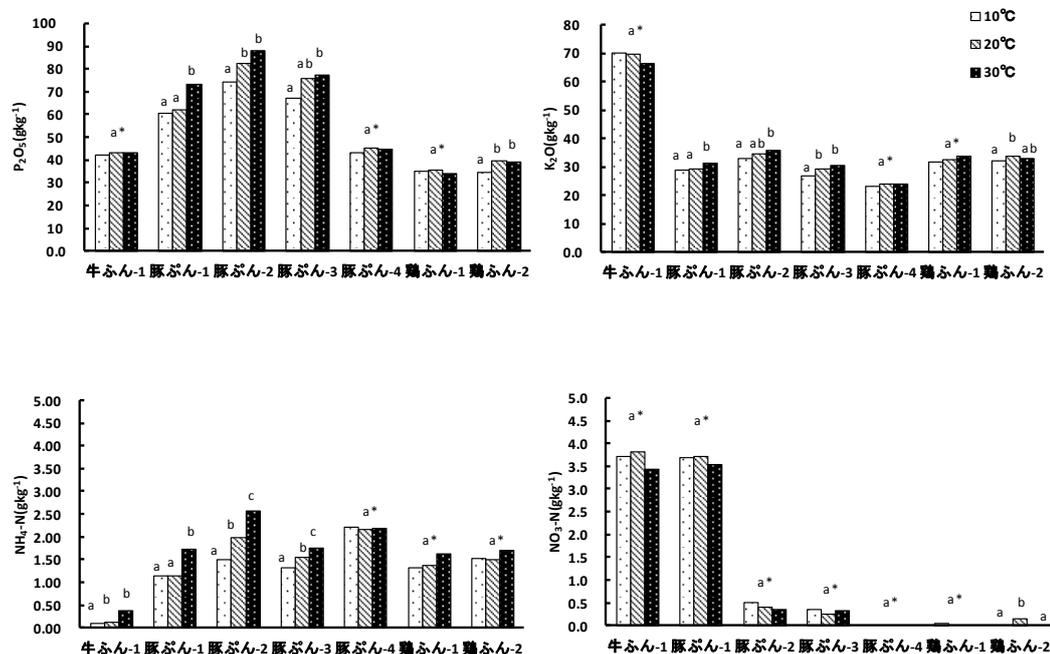


図 4, 異なる温度条件かにおける成分抽出量

2) 20g kg⁻¹クエン酸簡易抽出法における試験紙測定の検討

(1)アンモニア試験紙

クエン酸抽出による堆肥成分含有量から、各成分が試験紙の測定域内になるよう、リン酸、カリは 100 倍し、硝酸態窒素、アンモニア態窒素は 10 倍に希釈して試験紙測定に供することとした。試験紙測定における測定原理は表 2 に示すとおりである。堆肥試料を実際に分析したところリン酸、カリ、硝酸態窒素においては試験紙による呈色反応が確認された。

表 2, 試験紙の測定原理

検定項目	測定原理	
P ₂ O ₅	リン酸イオン	モリブデン青法
K ₂ O	カリウムイオン	クラウンエーテル法
NH ₄ -N	アンモニアイオン	アンモニア選択透過膜を用いた呈色反応
NO ₃ -N	硝酸イオン	還元剤+Griess-Romizine反応

しかし、アンモニア試験紙については呈色がみられず、濃度を判定することができなかった。アンモニア試験紙はアンモニア測定部とアルカリ緩衝剤部から成り、試料溶液中で攪拌すると pH10 以上になる。このとき試料中のアンモニウムイオンはアンモニアに変化し、測定部のアンモニア選択透過膜を通過し、内部の BTB 主成分の指示薬と反応して呈色する (1999 仁木ら)。本抽出法によるアンモニア測定では 2g kg⁻¹クエン酸溶液を試験紙にて測定するが 2g kg⁻¹クエン酸溶液は pH2.4 であり、試料溶液中(3ml)で試験紙を攪拌したところ pH4.3 程度までしか上昇しなかった。よって、溶液中のアンモニウムイオンのガス化が阻害させたため、呈色しなかったと考えられる。そこで試験紙測定時に溶液を中和することを検討した。中和剤としては取扱いやすく簡単に入手できる炭酸水素ナトリウムと炭酸ナトリウムが考えられたが、よりアルカリ度の強い炭酸ナトリウムを用いることとした。クエン酸と炭酸ナトリウムの中和反応は $C_3H_2(COOH)_3 + 3/2Na_2CO_3 \rightarrow Na_3(C_3H_5O(COO)) + 3/2CO_3^{2-} + 3H^+$ となり、2g kg⁻¹クエン酸 3ml を中和するのに必要な炭酸ナトリウムは 5mg である。しかし、緩衝作用が考えられたため pH 曲線を作成したところ、pH7 程度に

するには炭酸ナトリウムが 8.5mg 必要であった。そこで、2g kg⁻¹ クエン酸 3ml に炭酸ナトリウムを 10mg 程度添加後、アンモニア試験紙で攪拌し、溶液の pH を測定したところ pH10 程度まで上昇した。よって、アンモニア態窒素測定ではコーヒースプーンなどで炭酸ナトリウムを 10mg 程度添加後、アンモニア試験紙で攪拌させ、測定に供することとした。実際の堆肥試料を用いて測定したところ、測定部が呈色反応を示し測定が可能となった。

(2)試験紙による測定濃度域

試験紙で示される各濃度について、作成した標準液から各濃度における範囲を測定した。試験紙に表記された濃度と、堆肥含有成分への換算値、各濃度における測定範囲について最大値と最小値で示したのが表 3 である。

表 3, 試験紙の濃度と測定範囲

P ₂ O ₅		K ₂ O		NH ₄ -N		NO ₃ -N	
mg L ⁻¹	g kg ⁻¹ (範囲)	mg L ⁻¹	g kg ⁻¹ (範囲)	mg L ⁻¹	g kg ⁻¹ (範囲)	mg L ⁻¹	g kg ⁻¹ (範囲)
3	15 (0-25)	0	0 -	0.5	0.3 (0.0-0.3)	0	0.0 (0-0.5)
7	35 (30-60)	3	15 (0-25)	1	0.5 (0.4-0.8)	3	1.5 (1.0-2.5)
17	85 (65-110)	7	35 (30-50)	3	1.5 (0.9-2.0)	7	3.5 (3.0-4.0)
33	165 (115-165)	17	85 (55-175)	6	3.0 (2.3-3.8)	10	5.0 (4.5-8.5)
-	-	50	250 (190-250)	10	5.0 (4.0-5.0)	20	10.0 (8.5-12.5)
-	-	-	-	-	-	30	15.0 (12.5-15)

試験紙の濃度範囲の結果から、抽出量に差を生じた振とう時間と温度の影響について、試験紙測定で影響のする範囲であるか検討した。

振とう時間短縮による抽出量の影響は、リン酸において最大で 60 分(108g kg⁻¹)から 1 分(85g kg⁻¹)には 25g kg⁻¹ 程度の差が生じた。しかし、試験紙濃度範囲内 (65~110) に収まっておりいずれも 85g kg⁻¹ と判断される。また、アンモニア態窒素で有意差のあった試料について試験紙濃度範囲に当てはめると、いずれの温度においても牛ふん-1 は 0.5g kg⁻¹、豚ふん-3 は 1.5g kg⁻¹、鶏ふん-2 は 1.5g kg⁻¹ と判断される。よって、試験紙測定において時間短縮による影響は少ないと判断できる。

温度変化により有意差のみられた試料について、リン酸は 10℃ -20℃ -30℃において豚ふん-1,61-62-73、豚ふん-2,74-83-88、豚ふん-3,67-76-77、鶏ふん-2,35-39-39(g kg⁻¹)であった。これを試験紙濃度範囲に当てはめると、豚ふん-1 では 10℃,20℃で 35、85g kg⁻¹ の中間となり、30℃で 85g kg⁻¹ となる。豚ふん-2、豚ふん-3 はいずれの温度でも 85g kg⁻¹ となり、鶏ふん-2 では 35g kg⁻¹ と判断される。アンモニア態窒素も同様に有意差のみられた試料について 10℃ -20℃ -30℃において牛ふん-1,0.09-0.12-0.38、豚ふん-1,1.13-1.14-1.73、豚ふん-2,1.50-1.99-2.56、豚ふん-3,1.31-1.54-1.74 (g kg⁻¹) であった。試験紙濃度範囲から、牛ふん-1 は 10℃,20℃で 0.3g kg⁻¹、30℃で 0.3、0.5g kg⁻¹ の中間となる。豚ふん-1 はいずれの温度でも 1.5g kg⁻¹、豚ふん-2 は 10℃,20℃で 1.5g kg⁻¹、30℃で 3.0g kg⁻¹ となり、豚ふん-3 では全ての温度で 1.5g kg⁻¹ と判断される。よって、リン酸については豚ふん-1 で温度低下により濃度が低く判定される可能性があるが、その他の試料でその影響はないと考えられた。また、アンモニア試験紙では温度低下により牛ふん-1、豚ふん-2 で 0.2、1.5g kg⁻¹ 程度の差

を生じるが、もともと測定濃度が細かく設定されているため、施肥量に反映する場合その影響は少ないと考えられる。以上から、より厳密に測定する場合は液温 30℃での抽出が推奨されるが、例外を除いたほとんどの試料で試験紙測定の際、温度(10℃~30℃)の影響なく測定できると考えられた。

(3)20g kg⁻¹クエン酸簡易抽出法による堆肥の試験紙測定

実際の堆肥を本法による抽出操作のあと、機器測定と試験紙測定をおこない、堆肥含有成分あたりに換算した結果を図 5 に示した。図中には各濃度の範囲について表 3 を参考にした線を示してある。

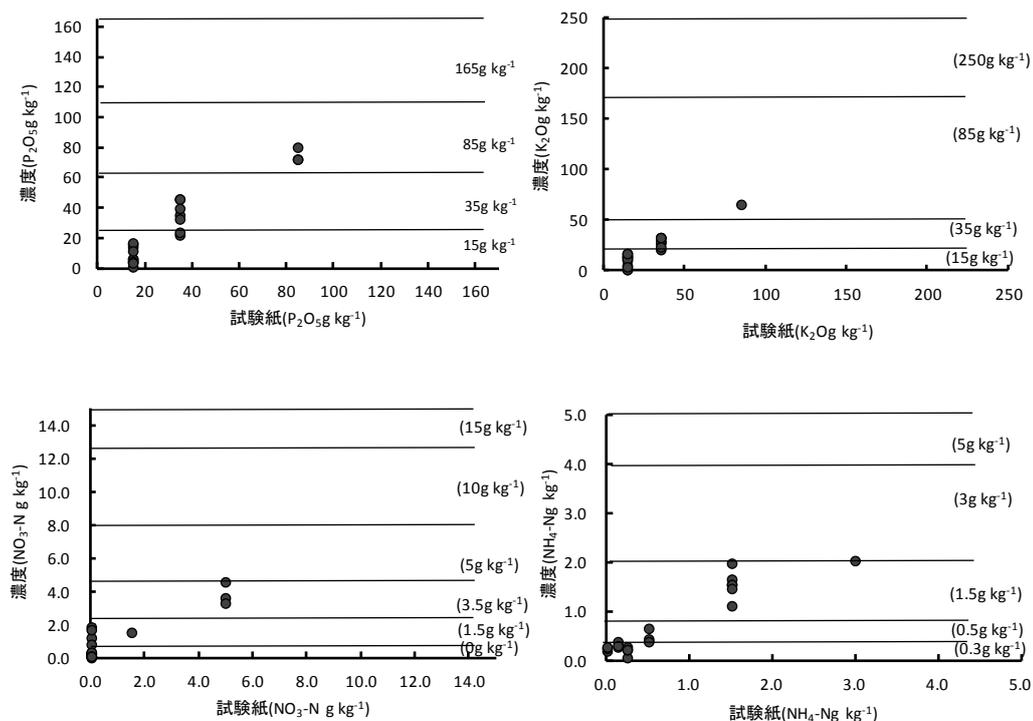


図 5, 機器分析と試験紙による堆肥測定値

リン酸、カリの機器測定値は、試験紙における測定濃度範囲内に概ね収まっていた。アンモニア態窒素は 0.3g kg^{-1} 以下の値においてバラツキがみられたが、 0.5g kg^{-1} 以上は各濃度範囲内にあった。硝酸態窒素は 2.0g kg^{-1} の試料においてほとんど呈色がみられなかったが、 3g kg^{-1} の以上では測定することができた。以上から、既存の試験紙を用いて堆肥分析を行うことが可能であった。ただし、アンモニア態窒素、硝酸態窒素においては $0.5\sim 3.0\text{g kg}^{-1}$ の低濃度域において試験紙で判別ができない場合があるが、施肥への影響は小さいものと考えられる。

3)クエン酸抽出による堆肥のリアルタイム簡易分析法の手順

- ・堆肥 1g に 2%クエン酸溶液 50ml (室温) を加え、1 分間手振とうする。(生堆肥の場合はスケールを大きくしてサンプリング誤差を小さくするなどの対策をとる。)
- ・上清をシリンジ等で採取し、イオン交換水にて 10,100 倍希釈液を作成する。
- ・リン酸,カリは 100 倍希釈液を「みどりくん PK」で濃度を判定する。
- ・硝酸態窒素は 10 倍希釈液を「みどりくん N」で濃度を判定する。
- ・アンモニア態窒素は 10 倍希釈液を 3ml 小瓶に移し、コーヒースプーン等で約 10mg の炭酸ナトリウムを添加し、「アクアチェック A」試験紙を溶液中で 30 秒間強く上下させ、30 秒間静置後に比色表で濃度を判定する。

以上より、堆肥のリアルタイム簡易分析が可能となる。キットさ

えあれば特別な機材や技術を必要しないため、誰でも手軽に分析
でき、施肥設計に活かすことができる。

6. 総合考察

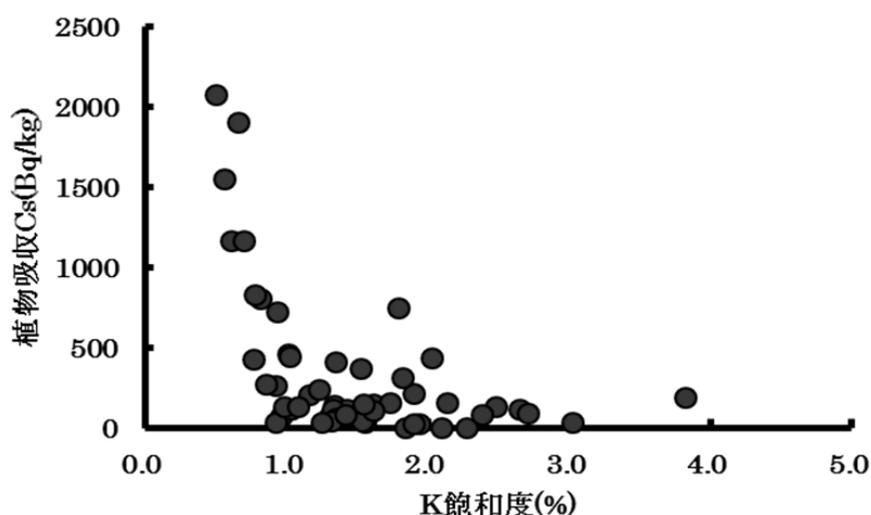
本研究によりゼオライトとカリの併用が有効であることが明らかになった。ゼオライトの放射性セシウム吸収抑制メカニズムはセシウムイオンの吸着材としてより、土壤中で肥料として施されたカリウムイオンとアンモニウムイオンを特異的に吸着して、それらの溶脱を抑制することに起因した。ゼオライトはアンモニウムイオンとセシウムイオンの吸着に伴い土壤溶液中の両イオン濃度が低下させ、土壤コロイド表面に交換吸着されているセシウムイオンの解離を抑制する。さらにはゼオライト構造内に吸着されたカリウムイオンとアンモニウムイオンが効率よく作物に吸収されるため拮抗的にセシウムイオンの吸収が抑制されたと考えられた。また、ゼオライトは低カリ条件下でのアンモニウムイオン捕捉効果が高いため、放射性セシウム吸収が起りやすい条件下において高い放射能吸収抑制効果を発揮すると考えられた。

対策資材としてカリの施用が有効であることは既知であるが、堆肥中に含有されるカリにおいても塩化カリと同等の放射性セシウム吸収抑制効果を発揮した。また、暫定基を超過する放射能が検出された堆肥を使用して栽培された野菜についていづれも検出限界以下であったことから、高濃度放射能汚染堆肥を使用しても土壤にカリが十分量あれば、野菜に放射性 Cs は吸収されないことが実証された。放射性セシウムは時間の経過とともに低減していくため、放射能が検出された堆肥を放射性廃棄物として処理するよりは、様子をみながらカリ資源として

使用していくのが合理的であると考え。よって、堆肥の暫定基準値を緩和して、積極的に有効活用していくことを推奨する。一方で堆肥は成分含量が不明確であるため、一般的に過剰施用する傾向される傾向にある。そこで、長期的に有機栽培を継続している畑で調査を実施したところ、堆肥の多量施用が土壤養分の過剰蓄積や地下水の硝酸汚染などの環境リスクを伴うことがわかった。よって、堆肥の適正施用が望まれる。そこで、堆肥の可給態成分について迅速に分析できる技術の開発をおこなった。この技術が広く普及すれば、堆肥中のカリを放射能対策資材として取り扱うことも容易になる。

今回のような非常時においても、土壤診断に基づいた土作りが基本であることが分かった。福島第一原発から 20km 圏内やその周辺には、未だ手つかずの農地が放置されている。田は稲作を行わないと土地が荒れるため、1日も早い復興が望まれる。今後原発事故の影響が残る地域での営農再開のための対策としては、土壤中のカリ保持を基本とするが、ゼオライトを 1t/10a 程度施用した上でカリを施用するのが効果的である。また、カリ肥料源としては家畜ふん堆肥の活用が有効であった。ただし、堆肥の過剰施用は地下水の硝酸性窒素汚染などの環境負荷をもたらす恐れもあるので、肥料分量の分析を行った上で施用量を決定する。土壤中の放射性セシウム吸収を抑制するために必要なカリ施用量は、水稻では施肥後におけるカリ飽和度を 2% 程度以上（参照 1）、大豆では 5% 程度以上とする。なお水田では、収穫後の稲わらを鋤き込むことで、土壤交換性カリの保持に大きく貢献する。

わが国は肥料資源に乏しく、そのほとんど輸入に頼っている現状にある。東北地方を中心に無尽蔵ともいわれるほど大量の天然ゼオライトが埋蔵されており、その中には 1~2%のカリが含有されており、このカリについても有効活用が期待できる。



参照 1, 伊達市小国地区の水田における土壌中のカリ量と水稲中の放射能強度との関係 (出典:小国地区試験栽培支援グループ,2012)

このように、天然ゼオライト、稲わら、堆肥など国内産農業資源を活用し作物の放射性セシウム吸収抑制対策を行う意義は大きい。

尚、福島県では生産された米についてはベルトコンベア式放射性セシウム濃度検査器を用いて放射性物質の全量全袋検査を、出荷する米以外にも実施され、結果はラベルに書かれた識別番号でデータ管理されている。このように安心安全な米であることを証明し消費者の信頼回復を図っているが、しかし、い

まだに風評被害の影響をうけて店舗販売数が著しく減少した現状にある。これは、消費者の不安がいまだ払拭されていないことが浮き彫りになっている。放射能抑制技術は日々研究され、安全な農産物の生産技術が講じられており、かつ厳格な検査態勢のもと福島の農産物は出荷されている。このような事実が広く公開され、消費者らの不安の払拭に繋がることを期待する。

今回の対策技術が福島の復興に貢献することを深く願う。

巻末データ

Ca 置換ゼオライト作成の検討

① ゼオライトからのカリ除去

方法:ナルゲンにゼオライト0.5gづつ量り取り、各洗浄液(30ml)により処理後、従来の酢安抽出操作をおこなう。

洗浄液	濃度	振とう時間 min	洗う回数	ex-base(mg/100gDW)				K ₂ O除去 %
				Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO	
酢安	1M	15	1	29.9	2.99	167	187	86.6
HCl	1N	15	1	285	12.6	661	1048	46.9
NaCl	1N	15	1	3292	7.91	421	530	66.1
CaCl ₂	1N	15	1	1097	18.9	1180	2544	5.09
酢安(2)	1M	15	2	14.8	2.18	54.0	141	95.7
HCl(2)	1N	15	2	153	11.8	464	1002	62.7
NaCl(2)	1N	15	2	3604	6.01	205	390	83.5
CaCl ₂ (2)	1N	15	2	1065	19.8	1210	2755	2.69
HCl+CaCl ₂		15	1	266	11.7	611	1766	50.9
HCl(60min)		60	1	226	11.9	599	987	51.8
CaCl ₂ (60min)		60	1	1097	18.6	1219	2667	2.00
無処理				1276	74.7	1244	1982	0.00

洗浄液	比率	振とう時間 min	洗う回数	ex-base(mg/100gDW)				K ₂ O奪取 %
				Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO	
1N NaCl	1:60	15	2	3592	1.91	857	375	73.4
	1:30	15	2	7781	4.11	2505	707	22.2
	1:20	15	2	7862	4.40	2968	736	7.80
	1:10	15	2	7337	4.68	3589	764	-
1N NH ₄ Cl	1:60	15	2	59.6	1.35	93.5	190	97.1
	1:30	15	2	17.8	3.07	283	350	91.2
	1:20	15	2	28.0	2.76	440	353	86.3
	1:10	15	2	73.0	3.05	941	373	70.7
無処理	1:60			2717	13.2	3219	1049	0.00

② NH₄ 置換ゼオライトからの NH₄ 除去

抽出液	方法	CEC meq/100g	NH ₄ -N mg/100g
無処理		151	2751
300°C	焼成	155	2397
651°C	焼成	84.9	3.78
①	1N HCl 振とう		1072
②	1N CaCl ₂ 130°C煮沸		871
③	DW+Ca(OH)130°C煮沸		194
④	①→③		189
	Ca(OH) ₂ × 2		1798
	Ca(OH) ₂ × 2 → HCl		903
	Ca(OH) ₂ × 2		1756
	Ca(OH) ₂ × 2 → HCl		922
	・HCl × 2 *0.5N HCl		772
	・HCl → a溶液		888
	・a溶液 × 2		814
	・HCl × 2		793
	・HCl → a溶液		914
	・a溶液 × 2		807
	0.5N HCl ×		842
	0.5N HCl × 1:60		459
	3N HCl		220
	3N HCl		454
	1N HCl 1:20		929

ゼオライト種類 方法	消石灰	NH ₄ -N mg/100g
NH ₄ 型(z130511)	①0.17(g/100cm ³)	1103
1:30	②0.34(g/100cm ³)	467
90°C90min	③0.51(g/100cm ³)	315
	④0.085(g/100cm ³)	1824
	①+HCl	729
	無処理	2817
90°C90min→15min	③+HCl*1	248
	③+HCl*2	204
NH ₄ 型 60min	①0.17(g/100cm ³)	245
1:30	②0.34(g/100cm ³)	221
100°C	③0.51(g/100cm ³)	193
60→30min	③→③	134
	Z05無処理	0.00
	Z05無処理	0.00

a溶液: 0.4N CaCl₂+Ca(OH)₂飽和溶液 pH 11.6
 1N CaCl₂ pH 5.4
 10% KCl pH 5.4

0.17g/100cm³(消石灰溶解度MAX)

ゼオライト	抽出液	方法	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO	NH ₄ -N mg/100g	KCl pH
NH ₄ 型	a溶液	振とう	6.46	15.6	90.8	2508	1411	7.05
	a溶液+HCl		3.10	2.12	67.5	1142	677	2.53
Z-05	a溶液		1028	25.2	2424	2683	9.56	8.68
NH ₄ 型	a溶液	130°C煮沸	10.2	4.94	61.6	2916	739	6.42
	a溶液+HCl		3.85	1.66	45.8	1718	326	2.71
Z-05	a溶液		470	21.3	1498	4646	9.56	9.14
Z-05	無処理						9.56	5.51

a溶液(60min煮沸)→0.5N塩酸(30s)→a溶液(30min煮沸)→1N CaCl₂(15min振とう)

抽出比率	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO
	mg/100g			
1:60	16.3	1.56	51.7	3011
1:30	7.62	1.48	50.6	2628
1:20	5.05	1.27	56.4	2308

	pH	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO	NH ₄ -N mg/100g
		mg/100g				
K(CaCl ₂ 1)	2.05	12.4	1.79	13.4	348	104
Z(CaCl ₂ 1)	1.98	8.18	1.76	23.5	356	48.7
K(CaCl ₂ 2)	2.07	23.1	1.57	24.2	456	91.5
Z(CaCl ₂ 2)	2.01	12.7	1.64	20.7	442	48.8
無処理K		4.94				0.00
無処理Z		5.38				4.81

H型

③ Ca への置換

ゼオライト	抽出液	方法	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO	NH ₄ -N	KCl
			mg/100g				mg/100g	pH
NH4型	a溶液	振とう	6.46	15.6	90.8	2508	1411	7.05
	a溶液+HCl		3.10	2.12	67.5	1142	677	2.53
Z-05	a溶液		1028	25.2	2424	2683	9.56	8.68
NH4型	a溶液	130°C煮沸	10.2	4.94	61.6	2916	739	6.42
	a溶液+HCl		3.85	1.66	45.8	1718	326	2.71
Z-05	a溶液		470	21.3	1498	4646	9.56	9.14
Z-05	無処理						9.56	5.51

NH4型ゼオライト

a溶液(60min煮沸)→0.5N塩酸(30s)→a溶液(30min煮沸)→1N CaCl₂(15min振とう)

抽出比率	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO
	mg/100g			
1:60	16.3	1.56	51.7	3011
1:30	7.62	1.48	50.6	2628
1:20	5.05	1.27	56.4	2308

NH4型ゼオライト(1:60)→塩酸15min振とう→Caで煮沸(130°C)→DWで洗浄×2

ゼオライト	振とう15min	煮沸 60min	匂い消失 min	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO
				mg/100g			
NH4型	0.5N HCl	a溶液	30	5.88	6.53	116	2452
		Ca(OH) ₂ 溶沈	30	9.14	12.4	149	1820
		1N CaCl ₂ 遅い		9.37	6.79	99.0	2525
NH4型	3N HCl	a溶液		5.90	6.43	82.5	1835
		Ca(OH) ₂ 溶液		7.28	9.77	95.7	869
		1N CaCl ₂ 遅い		12.2	5.62	69.9	1934

	pH	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO	NH ₄ -N
		mg/100g				mg/100g
K(CaCl ₂ 1)	2.05	12.4	1.79	13.4	348	104
Z(CaCl ₂ 1)	1.98	8.18	1.76	23.5	356	48.7
K(CaCl ₂ 2)	2.07	23.1	1.57	24.2	456	91.5
Z(CaCl ₂ 2)	2.01	12.7	1.64	20.7	442	48.8
無処理K	4.94					0.00
無処理Z	5.38					4.81
Z(a溶液30ml)		3.63	1.10	37.0	406	
Z(a溶液15ml)		2.31	0.92	30.5	352	

④ 各種ゼオライト組成

	ex-base(mg/100gDW)				NH ₄ -N	CEC
	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO	mg/100g	meq/100g
Z-05	2178	10.6	2580	841	7.12	152
NH ₄ 型	4.53	6.16	75.8	173	2751	151
Ca型(仮)	16.3	1.56	51.7	3011	317	151

ゼオライト成分(0.2g)

ゼオライト 種類	ex-base(mg/100gDW)				CEC	NH ₄
	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO	meq/100g	mg/100g
ケイゼオン	1224	64.6	1129	1887	137	711
Z-05	2395	9.74	2689	764	161	708

Ca型ゼオライト

	ex-base(mg/100gDW)				カリ除去率	NH ₄
	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO	%	mg/100g
ケイゼオン	38.8	1.26	85.4	2181	92	323
Z-05	9.22	0.57	81.4	2242	97	335

⑤ Ca 置換ゼオライト作成のプロトコール

抽出比率(1:30)

ゼオライト(Z-05)



1N NH₄Cl (3回洗浄)

←NH₄型ゼオライト



1N HCl(3回洗浄)

←H型ゼオライト



DW洗浄(1回)



CaCl₂+Ca(OH)₂ 混合溶液 (煮沸2回)

←Ca型ゼオライト

参考文献

1, 放射能吸収抑制対策の関連文献

1-(1), 放射能関連

- 1) ABSALOM J P ら(2001). Predicting the transfer of radiocaesium from organic soils to plants using soil characteristics. *J Environ Radioact*,52(1),31-43.
- 2) A.F. NISBET et.al(1993). Application of fertilisers and ameliorants to reduce soil to plant transfer of radiocaesium and radiostrontium in the medium to long term-a summary. *Sci Total Environ*,137(1/3),173-182.
- 3) 荒木市郎(2013).家畜ふん堆肥に含まれる放射性セシウムについて. *日本東北支部報*,56,33-34.
- 4) 大震災から3年を経た農業復旧・復興施策の動向と農協の取組み 2014. *農林金融* 2014・3. 15-25.
- 5) J.LEMBRECHTS(1993). A review of literature on the effectiveness of chemical amendments in reducing the soil-to-plant transfer of radiostrontium and radiocaesium. *Sci Total Environ*.137(1/3),81-98.
- 6) 小島懋・藤本弘・虎谷博一・太田襄二 1980. 2:1型粘土鉱物に固定されたセシウムの植物による吸収. *土肥誌*, 51(1), 1-7.
- 7) Kruse-Irmer and Giani (2003), Distribution and bioavailability of ¹³⁷Cs in organic and mineral soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2003, 166, 635-641.
- 8) 三井進午・天正清 1958. 核爆発に伴う作物の放射能汚染に関する研究(第3報) 作物による核分裂生成物質の径根的吸収. *土肥誌*,29(2),25-30.
- 9) 三井進午・天正清・葉可霖・小野勝巳 1958. 核爆発に伴う農作物の放射能汚染に関する研究(第4報) 1956-7年における土壌及び農作物の放射能汚染,特にSrの汚染度について. *土肥誌*,29(3),109-116.
- 10) 中尾淳 2012. セシウムの土壌吸着と固定. 学術の動向, 特集1 放射能除染の土壌科学, 2-7.
- 11) RIGOL A, VIDAL M, RAURET G(2002). An overview of the effect of organic matter on soil-radiocaesium interaction: Implications in root uptake. *J Environ Radioact*, 58(2/3),191-216.
- 12) SANCHEZ A L ら(1999). High plant uptake of radiocaesium from organic soils due to Cs mobility and low soil K content. *Environ.Sci.Technol*,33(16),2752-2757.
- 13) STAUNTON S ら(2002). Possible role of organic matter in radiocaesium adsorption in soils. *J Environ Radioact*.58(2/3),163-173.
- 14) 統計からみた福島県の米作の現状について. *福島の進路* 2013,12-23.
- 15) 塚田祥文・鳥山和信・山口紀子・武田晃・中尾淳・原田久富美・高橋知之・山下

- 睦・小林大輔・吉田聡・杉山秀男・柴田尚 2011. 土壌-作物系における放射性核種の挙動. 土肥誌, 82, 408-418.
- 16)塚田祥文 2013. 農作物への放射性核種の移行と分布に関する研究. 土肥誌,84(5),337-340.
- 17)津村昭人・駒村美佐子・小林宏信 1983. 土壌及び土壌-植物系における放射性ストロンチウムとセシウムの挙動に関する研究. 農技研報 B, 36, 57-111.
- 18)天正清・葉可霖・三井進午 1959. 水稲及び陸稲による土壌よりの ^{90}Sr 及び Ca の吸収と作物対の分布. 土肥誌, 30(2), 83-89.
- 19)天正清・葉可霖・三井進午 1959. 水稲及び陸稲による土壌よりの ^{134}Cs 及び K の吸収と作物体内の分布. 土肥誌, 30(6), 253-258.
- 20)天正清 1959. 土壌植物系における核分裂生成物の行動-特に Sr と Cs について. 土肥誌 29(11), 515-520. 総説
- 21)天正清・葉可霖・三井進午 1961. 小麦およびソラ豆による土壌よりの ^{90}Sr , ^{134}Cs の吸収と作物体内の分布. 土肥誌, 32(3), 111-114.
- 22)天正清・葉可霖・三井進午 1961. 水稲による特異的セシウム吸収の機構. 土肥誌, 32(4), 139-144.

1-(2), ゼオライト関連

- 23)後藤逸男・蜷木翠 1979. 天然ゼオライトの農業利用に関する基礎的研究(第1報) 畑土壌における硝酸化成抑制と塩基流亡防止効果について. 農学集報, 24(2), 164-183.
- 24)M.C.BARRETO・P.CIAMBELLI・G.DEL RE 1987. A Theoretical Study Of Ion Selectivity Of Zeolites-Application To Chabazite 1987. J.phys.Chem.Solids.Vol 48(1), 1-12.
- 25)西村陽一 1973. 天然ゼオライトの特性と利用. 粘土科学, 13(1), 23-34.
奥村雅彦・中村博樹・町田昌彦 2013. 粘土鉱物とゼオライトにおけるセシウムの吸着挙動. 表面科学, 34(3), 135-142.
- 26)SUWARDI・Itsuo GOTO・Midori NINAKI 1994. The Quality of Natural Zeolites from Japan and Indonesia and Their Application Effect for Soil Amendment. Jour.Agri.Sci.,Tokyo Nogyo Daigaku,39(3),133-148.
- 27)武島俊達・森本辰雄・川村真由子・武田都・村井貞人 2012. 天然ゼオライトのセシウム吸着現象に関する考察と利用方法についての提言. Proc Symp Geo-Environ Geo-Tech, 21, 27-32.

1-(3), 放射能対策の政策関連

- 28)福島水田農業産地づくり対策等推進会議水田等有効活用促進事業都道府県作付拡

- 大推進方針 H21.
- 29)福島県内の災害廃棄物の当面の取扱い H23. 環境省.
- 30)福島県内の災害廃棄物の処理の方針 H23. 環境省.
- 31)平成 24 年産稲の作付制限区域等の設定について H24. 農林水産省.
- 32)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) - H25. 福島県,農林水産省.
- 33)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) - H26. 福島県,農林水産省, (独) 農業技術総合研究機構,(独)農環技術研究所.
- 34)放射性物質に対応した生産指導のための参考資料 H24. 生産局農産部技術普及課.
- 35)平成 23 年度産稲わらから生じるもみがら及び稲わらの取扱いについて H23. 農水省.
- 36)一般廃棄物処理施設における放射性物質に汚染されたおそれのある廃棄物処理について H23. 環境省.
- 37)除染関係ガイドライン第 2 版 H25. 環境省.
- 38)農水省の除染マニュアルとその考え方 2012 年. 農環研. 日本学術会議.
- 39)農地除染対策の技術書概要 H24. 農水省.
- 40)放射性セシウムを含む肥料・土壌改良資材・倍土及び資料の暫定許容値の設定について H23. 農水省.
- 41)飼料中の放射性セシウムの暫定許容値の見直しについて H24. 農水省.

2, 堆肥施用がもたらす環境リスクの関連文献

2-(1), 野菜の品質関連

- 42)有田俊幸・伊達昇・米山徳造 1983. 葉菜類の硝酸塩含量に関する試験. 東京都農業試験場研究報告, 16, 161-174.
- 43)有田俊幸・宮尾茂雄 2004. 有機認証野菜のビタミン C 及び硝酸含有量. 東京都立食品技術センター研究報告, 13, 16-21.
- 44)浅野次郎・速水昭彦・小浜節雄 1981. 野菜の品質に及ぼす油かす・パークたい肥の影響. 9, 97-113.
- 45)藤原孝之 2006. 有機野菜の品質評価研究の課題と展望. 園芸学研究, 5(1), 1-5.
- 46)廣田智子・永井耕介・福嶋昭・井上喜正 2002. 土壌と肥料の違いがハウレンソウの生育および品質に及ぼす影響. 兵庫農技研報, 50, 41-46.
- 47)池羽智子, 貝塚隆史, 石井貴, 鹿島恭子 2005. チンゲンサイのビタミン C,糖,硝酸含量に及ぼす品種,栽培条件の影響. 茨城県農業総合センター園芸研報告, 13, 17-23.
- 48)亀野貞・木下隆雄・楠原操・野口正樹 1990. ホウレンソウの栽培条件及び品種

- と品質関連成分の変動. 中国農研報, 6, 157-178.
- 49)鯨幸夫・中山真希 1997. 有機栽培が野菜の品質に及ぼす影響. 北陸作物学会報, 32, 91-94.
- 50)目黒孝司 1998. 有機野菜の品質と評価. 研究ジャーナル 21(7), 30-34.
- 51)建部雅子 1999. 窒素栄養の制御による作物品質成分の改善に関する研究. 農業研究センター研究報告, 31, 19-83.
- 52)建部雅子, 米山忠克・石原俊幸・石井かおる 1995. 窒素等栄養条件による葉菜類の品質成分の変動 2 培地の窒素形態および Ca:K 比がハウレンソウとコマツナの硝酸,アスコルビン酸,シュウ酸含有率に与える影響. 土肥誌, 66(5),535-543.
- 53)吉田敦, 原田和夫・菅原彰敏・但野利秋 1998. 水耕ハウレンソウの糖,アスコルビン酸,硝酸,シュウ酸含有率に及ぼす養分中断処理の効果と問題点. 土肥誌, 69(2), 178-184.
- 54)葎田隆治 1990. 有機農産物と窒素化合物. 北陸作物学会会報, 25, 100-104.
- 55)山崎晴民・六本木和夫 1998. 有機物施用が葉菜類の収量及び品質に及ぼす影響. 埼玉園試研報, 21, 7-20.

2-(2), 有機栽培土壌関連

- 56)伊東祐次郎・塩崎尚郎・橋元秀教 1982. 多腐植黒ボク土の畑地における牛ふん尿厩肥の大量連用と土壌の肥沃性. 九州農業試験場報告, 22(2), 259-320.
- 57)加藤哲郎 2003. 都内黒ボク土畑における長期間にわたる営農活動が土壌の理化学性および作物生産に及ぼす影響. 東京農試研報, 31, 1-66.
- 58)亀和田國彦・広沢美幸 2003. 各種有機物を 20 年間連用した黒ボク土畑圃場の各種養分の垂直分布. 栃木農試研報, 52, 63-74.
- 59)河合徹・若澤秀幸・堀田柏・神谷怪明 1994. 堆きゅう肥の連用が黄色土及び黒ボク土畑土壌に及ぼす影響 (第 2 報) 土壌緩衝能と重金属含量に及ぼす影響. 静岡農試研報, 38, 99-106.
- 60)片野豊・木下忠孝・武井昭夫 1988. 有機物の連用が施設土壌の化学性に及ぼす影響. 愛知農総試研報, 20, 324-328.
- 61)後藤逸男・加藤仁之・蜷木翠 1982. 東京都世田谷区内における専業農家の土壌. 農学集報, 27(1), 71-83.
- 62)長坂克彦・中村保一・松野篤 1999. 有機物の長期連用が淡色黒ボク土の理化学性及び物理性に及ぼす影響. 山梨農試研報, 9, 1-10.
- 63)折原健太郎・上山紀代美・藤原俊六郎 2002. 家畜ふん堆肥の重金属含有量の特徴. 土肥誌, 73(4), 403-409.
- 64)六本木和夫・石上忠・武田正人 1992. 稲わら堆肥の連用が沖積畑土壌の養分供給力にあたる影響. 土肥誌, 63(6), 696-702.

- 65)瀧勝俊・加藤保 1998. 有機農業実践ほ場における土壌の特徴. 愛知農総試研報, 30, 79-87.
- 66)上沢正志 1991. 化学肥料・有機物の連用が土壌・作物収量に与える影響の全国的解析. 農業技術, 46(9), 393-397.
- 67)若澤秀幸ら 1994. 堆きゅう肥の連用が黄色土及び黒ボク土畑土壌に及ぼす影響(第1報)土壌の理化学性の変化とキャベツ、カンショの収量. 静岡農試研報, 38, 85-98.
- 68)安田傑 1990. 火山灰畑土壌における有機物連用の影響. 愛媛県農業試験場研究報告, 30, 59-63.
- 69)家壽多正樹・八楨敦・戸辺学・安西徹郎 2001. 黒ボク土畑における有機物および改良資材の連用が作物収量および土壌に及ぼす影響. 千葉農試研報, 42, 43-53.
- 70)山田祐・鎌田春海 1989. 有機農業の技術的評価(第1報)有機栽培が野菜の収量および土壌に及ぼす影響. 神奈川県農業総合研究所研究報告, 131,1-13.
- 71)山田祐 1991. 有機農業の技術的評価に関する研究(第2報)無機肥料及び有機肥料連用圃場における地力窒素の評価. 神奈川県農業総合研究所研究報告, 133, 67-74.

3, 堆肥を肥料資源として活用するための迅速分析法の開発の関連文献

3-(1), 簡易分析法

- 73)浅井信一 1998. 小型反射式光度計による土壌の硝酸態窒素・可給態窒素・可給態リン酸・交換性カリウムの簡易測定. 土肥誌, 69(1), 85-87.
- 74)安藤義昭・小柳渉・森山則男 2004. 小型反射式光度計(RQフレックス)による有機質資材中のカリウム,リン,窒素の簡易測定法. 土肥誌, 75(5), 605-608.
- 75)藤田裕・植田稔宏・小田部裕・折本善介 2011. 家畜ふん堆肥中のリン酸・カリウムの簡易分析法の実用性. 茨城県農業総合センター園芸研究報告, 第18号, 45-50.
- 76)林薫月・斉藤正志 2004. 近赤外分析法による堆肥の成分分析. 福井県畜産試験場研究報告,第18号, 21-29.
- 77)磯部武志・山口武則・山本直之・生雲晴久 1999. 比色計システムによる豚ふん堆肥中の肥料成分の簡易分析. 土肥誌, 70(6), 808-810.
- 78)JA全農 2002. グリーンレポート No.379. 4.15号
- 79)小宮山鉄兵・藤澤英司・加藤雅彦・森國博全 2009. 波長分散型蛍光 X線分析による家畜ふん堆肥成分の迅速分析法. 土肥誌, 80(3), 275-279.
- 80)小宮山鉄兵・新妻成一・日高秀俊・森國博全 2010. 塩酸抽出ー吸光光度法による家畜ふん堆肥可給態窒素の迅速推定法. 土肥誌, 81(1), 48-52.
- 81)小柳渉 2009. 家畜ふん堆肥の特性の実用的評価方法の開発とその活用. 土肥誌,

- 80(5), 454-457.
- 82)間瀨公子・関哲夫・野町太郎 2000. 近赤外分析法を用いた堆肥の簡易分析・評価方法の検討. 静岡県中小家畜試験場報告, 第 11 号, 29-33.
- 83)村上章・石田頼子・佐藤寛子 2006. 土壌分析器を用いた堆肥の簡易分析法. 東北農業研究 59 号,111-112.
- 84)中谷誠・原田靖生 1995. 堆肥化過程における家畜ふんの近赤外拡散反射スペクトルの主成分分析. 土肥誌, 66(4), 422-424.
- 85)新妻成一・日高秀俊・小宮山鉄兵・森國博全 2010. 家畜ふん堆肥の肥料成分迅速分析法における塩酸抽出条件の検討. 土肥誌 ,81(2),135-139.
- 86)鈴木究・柳井政史・渡辺高秀 2004. 紫外線照射還元-フローインジェクション分析法による土壌抽出液中の硝酸態窒素の定量. 土肥誌, 75(5), 613-616.
- 87)棚橋寿彦 2005. 家畜ふん堆肥からの塩酸抽出の意義と肥料成分の簡易分析法. 農業技術,60(7),308-312.
- 88)棚橋寿彦・矢野秀治・伊藤元・小柳渉 2010. 牛ふん堆肥・豚ふん堆肥中のリン酸マグネシウムアンモニウム存在とその評価のための抽出法. 土肥誌, 81(4), 329-335.
- 89)棚橋寿彦 2011. 家畜ふん堆肥の窒素の形態解析に基づく実用的肥効評価の開発. 82(5), 357-359.
- 90)千葉佳朗・上山啓一・武田良和・安井孝臣 2000. 小型反射式光度計の測定値に及ぼす養分測定時の液温の影響. 土肥誌, 71(5), 706-709.
- 91)柳井政史・鈴木究・山口武則・古畑哲 2005. 簡易前処理による各種有機物資材中の成分分析. 土肥誌, 76(2),183-186.
- 92)山口武則・原田靖生・築城幹典 2000. 家畜ふん堆肥の製造・利用の現状とその成分的特徴. 農業研究センター研究資料, 第 41 号, 1-178.

3-(2), 自動分析関連

- 93)馬場康尋・後藤逸男 2009. ディスクリット方式による自動化学分析装置の土壌診断分析への応用. 土肥誌, 80(6), 611-615.
- 94)土壌環境分析法編集委員会編 1997. 土壌環境分析法, 博友社, 東京.
- 95)後藤逸男・山本穰司・蜷木翠 1992.テフロン加圧分解容器-ICP 発光分光分析法による植物の無機成分分析. .土肥誌,63,345-348.
- 96)林敦敏・坂本一憲・吉田富男 1997. ヒドラジン還元法を用いた土壌中の硝酸態窒素の迅速分析. 土肥誌, 68(3), 322-326.
- 97)日本分析化学会北海道支部編 2005. 水の分析(第 5 版), 化学同人, 京都.
- 98)西口靖彦・大阪隆志・安藤貞・早坂貴代史・池田順一・堀兼明・須賀有子・福永
- 99)垂矢子 2007. 飼料中マグネシウム,カリウム,カルシウム含量の迅速測定法

2. 比色・比濁法による定量法. 近中四農研報 6, 141-151.
- 100) 清水義昭・竹田政史・北村耕作・深川正己・石井奈緒子・麻生英夫 1984. OCPC 吸光光度法による土壌の交換性 CaO の迅速分析. 土肥誌, 55(5), 477-480.
- 101) 清水義昭・竹田政史・平方泰範・石井奈緒子・麻生英夫 1984. XB-I 吸光光度法による土壌の置換性 MgO の迅速定量法. 土肥誌, 55(3), 269-272.
- 102) 竹迫紘 1991. フローインジェクション分析法による土壌抽出液の硝酸態窒素の定量法. 土肥誌, 62(2), 135-140.
- 103) 竹迫紘 1991. フローインジェクション分析法による土壌抽出液のアンモニア態窒素の定量. 土肥誌, 62(2), 128-134.
- 104) 山添文雄・越野正義・藤井国博・三輪倫太郎 1973. 詳細肥料分析法, 養賢堂, 東京.

3-(3), 活性炭関連

- 105) 安藤忠男・尾形昭和逸 1985. 紫外吸光度法による水耕培養液硝酸イオン濃度の測定. 土肥誌, 56(1), 56-58.
- 106) 加藤忠司・中島秀治・斎藤雅典 1992. 加熱・酸化活性炭を使用した紫外吸光度法による土壌中硝酸態窒素の定量. 土肥誌, 63(6), 715-718.
- 107) 斎藤雅典 1988. 土壌可給態窒素量の紫外外部吸光度法による評価. 土肥誌, 59, 493-459.
- 108) 佐藤俊 1995. 木質物の堆肥化過程の解析と木質系堆肥の熟度の基準値策定に関する研究. 林試研報, 第 334 号, 53-146.
- 109) 八槇敦 2003. 紫外吸光度法を利用した土壌中硝酸態窒素の迅速測定法. 土肥誌 74(2), 195-197.

3-(4), 試験紙関連

- 110) 長谷川雄蔵・Ken Blake・太田宜秀 1997. 多項目簡易水質検査試験紙. 工業用水, 第 469 号, 51-56.
- 111) 永瀬久光・小川宗子・Ken Blake・太田宜秀 1998. 多項目簡易水質検査試験紙の基礎的検討. 工業用水, 第 481 号, 45-49.
- 112) 仁木圭三・大森英昭・長谷川雄蔵・鈴木晴光 1999. 浄化槽の維持管理におけるアンモニア性窒素用簡易試験紙の検討. 日本水環境学会年会講演集, vol33, 380.
- 113) 太田宜秀 2001. 簡易水質検査試験紙の現状と将来展望. ぶんせき, No12, 661-667, 日本分析化学会.
- 114) 竹田良子 2003. 食品製造現場における簡易水質検査試験紙「アクアチェックシリーズ」の利用, ジャパンフードサイエンス, vol.42(6), 52-55.

国内産農業資源を活用した農作物への

放射性セシウム吸収抑制対策技術の開発

摘要

1. 水稻の放射性セシウム吸収抑制対策

(1) 南相馬市における水稻作付け試験

南相馬市の試験において、カリ・ゼオライトの施用効果について3年間の連用試験をおこなった。放射性セシウムはゼオライト無施用・カリ標準施用区で最も高く、カリ肥料およびゼオライトの施用により低減された。その低減要因を解析した結果、カリ多量施用区ではゼオライトの効果は認められなかったが、カリ標準施用区ではゼオライトの施用により放射性セシウム強度が低下する傾向にあった。玄米収量については、カリ肥料とゼオライトの施用により増収した。その後水田で産出した稲わらは全て鋤き込み、ゼオライトの追加施用はせずにカリ慣行施用量で水稻を栽培したところ、ゼオライト施用区で玄米の増収などの持続効果を確認した。土壌交換性カリはゼオライト施用区で高く保持されており、その効果は3年目まで継続していた。また、土壌交換性カリについて2012年収穫後よりも2013年収穫後土壌で高く保持されたのは稲わらの鋤き込み効果があったと考えられた。稲わらすき込みによるカリ還元量は14～20kg/10aと多く、土壌交換性カリを高く保持するのに有効であることが確認された。よって、ゼオライト1t/10a施用し、稲わらすき込みによる土壌へのカリ還元を行えば、初年度以降

は基肥のみで放射能吸収抑制対策が可能であった。

(2)伊達市における水稲作付け試験

福島県伊達市では、2011年に暫定基準値 500Bq/kg を超える玄米が産出したため、作付け自粛区域に指定された。そこで、3か所の試験水田で各対策資材の有効性について作付け試験を実施した。

A圃場では2012年にゼオライトを施用し2012年、2013年の継続効果を検証した。また、2013年にはさらかり標準施用と多量施用区を設け、カリの多量施用が毎年必要か検討した。その結果、玄米の放射性セシウムは2012、2013年ともに全区において5Bq/kg程度以下であった。また、玄米収量は2年目ともにゼオライト施用区で高かった。さらに、2013年作収穫後の土壌中の交換性カリ量はゼオライト無施用・カリ多量区よりゼオライト施用・カリ慣行区で高く保持されていた。B圃場ではケイ酸カリと塩化カリの施用効果について試験したが、水稲は生育後期に効いてくるようなケイ酸カリのような緩効性肥料よりも、生育初期に肥効を示す塩化カリのような速効性肥料の方が放射性セシウム吸収を抑制する効果が高いことが分かった。C圃場では転炉スラグによる酸性改良の効果について検証した。チェルノブイリ原発事故による放射能汚染地において行われた畑作物の栽培試験で、石灰資材の施用による作物への放射能吸収低減効果が報告されている(Nisbetら 1993)。そこで、2012年に隣り合う水田に転炉スラグ 1t/10a 施用、無施用区を設け、定植前の土壌 pH(H₂O)は転炉スラグ施用区で7.5、無施用区で6.0とした。2013年には各区にそれぞれにカリ慣

行区とカリ多量区を設けた。その結果、2012年産玄米の放射性セシウム強度は、転炉スラグ無施用区に対して、転炉スラグ施用区で低減され、玄米収量の増加も認められた。また土壌の窒素無機化量を測定したところ、転炉スラグの施用による土壌のアルカリ効果により有機態窒素の無機化促進が確認された。2013年産玄米では、転炉スラグ施用の有無による放射能強度の相違は認められず、いずれも検出限界付近であり、これは土壌交換性カリ含量が高かったためと考えられた。

水稻栽培においてカリの施用によりセシウムの吸収は拮抗的に抑制されることが明らかになっている。一方、天正ら(1961)はアンモニアの施用により放射性セシウム吸収が促進されたとしている。また、塚田ら(2012)や中尾ら(2012)はカリウムイオンより交換浸入力強いアンモニウムイオンが土壌中に施用されると土壌に交換吸着されているセシウムイオンが追い出されるため、植物に吸収されやすくなるとしている。

しかし、本試験では水稻においてゼオライトの施用により窒素の吸収性が向上したが、稲体への放射性セシウム吸収促進は認められず、むしろ軽減される傾向にあった。また酸性改良により土壌からの窒素無機化量増大が確認され、水稻の窒素吸収性が向上したが、ゼオライト同様に水稻の放射性セシウムは低減していた。

(3)ゼオライトの水稻への放射性セシウム吸収抑制メカニズム 検証のためのポット栽培試験

現地試験の結果をふまえ、ゼオライトの放射能吸収抑制メカニズムについて解明するための水稻ポット栽培試験をおこな

った。水田の減水深を考慮し水を溶脱させた試験では、ゼオライトによるカリウムイオン、アンモニウムイオンの特異吸着性を確認し、特に低カリ条件下でのアンモニウムイオン捕捉効果が高いことが分かった。また水稲栽培におけるゼオライト施用と酸性改良では両者において還元条件下土壌における窒素の挙動について共通点があることが考えられ、その放射性セシウム吸収抑制効果についてアンモニウムイオンの挙動について着目したポット栽培試験を実施した。その結果、窒素多量施用区では放射性セシウムが増大したが、ゼオライト施用区によって低減した。酸性改良による放射性セシウム低減を確認したが、その効果は土壌の種類によって異なり、原因として土壌から無機化する窒素量の違いが考えられた。土壌コロイドに対する吸着力は、 $Cs^+ > NH_4^+ > K^+$ であることが知られているが、多量のアンモニウムイオンを一度に施用すると交換性セシウムは土壌溶液中に放出され水稲に吸収される。しかし、ゼオライトが存在するとアンモニウムイオンを吸着するため、土壌溶液中のアンモニウムイオンの過剰な増加を防ぎ、土壌コロイドからの交換性セシウム解離を抑制することで水稲への放射性セシウム吸収を低減させたと考えられた。一方酸性改良は土壌中で緩効的な窒素の無機化を生じ、アンモニウムイオンが効率的に水稲に吸収されることにより土壌溶液中で増大せず、土壌コロイドからの交換性セシウム解離が抑制されたと考えられる。さらに土壌溶液中ではアンモニウムイオンとセシウムイオン間で水稲根への吸収拮抗を生じるため、置換作用と吸収抑制作用の関係から放射性セシウムの吸収効果を発揮したと考えられた。

(4)水稲の放射性セシウム吸収抑制対策まとめ

以上より、水田土壌における、ゼオライトの放射性セシウム吸収抑制メカニズムはセシウムイオンの吸着材としてより、土壌中で肥料として施されたカリウムイオンとアンモニウムイオンを特異的に吸着し、それらの溶脱を抑制することが主要因であった。ゼオライトはアンモニウムイオンとセシウムイオンの吸着に伴い土壌溶液中の両イオン濃度が低下させ、土壌コロイド表面に交換吸着されているセシウムイオンの解離を抑制する。さらにはゼオライト構造内に吸着されたカリウムイオンとアンモニウムイオンが効率よく作物に吸収されるため拮抗的にセシウムイオンの吸収が抑制されたと考えられた。

2.畑作物の放射性セシウム吸収抑制対策試験

(1)伊達市における大豆の作付け試験

福島県伊達地域では、従来から水稲と大豆の輪作が行われてきた。大豆は水稲と比較しカリ要求量が高いため、セシウムの吸収性が高いことが予測される。そこで、放射性セシウムが大豆から 350Bq/kg、69Bq/kg 検出された伊達市における 2ヶ所の圃場で放射性セシウム吸収抑制対策試験を実施した。

大豆圃場 A と大豆圃場 B において、ゼオライトとカリ施用効果について検証した。なお、カリ施用量は 50kg/10a とし、ゼオライト施用区ではゼオライト中に含まれるカリ量分を削減した。その結果、両圃場共にゼオライト、カリ施用による放射性セシウム低減効果を確認した。また、ダイズ収穫後の土壌中の交換性カリ量はゼオライト施用区で多く残存していた。子

実中の放射性セシウム強度と収穫跡地の交換性カリ量との関係は圃場 A,B 間で著しく相違したが、カリ飽和度とは良好な相関性が認められ、子実中の放射能を 10Bq/kg 程度以下とするにはカリ飽和度を 5%程度以上とすればよいと判断できる。

(2)堆肥施用が野菜のセシウム吸収に及ぼす影響

(2)-1,伊達市におけるグリーンピース作付け試験

ゼオライト(1t/10a)のみの対策では放射性セシウムの低減効果は確認されず、施肥後にカリ飽和度 5%程度以上の交換性カリ量が確保できれば、子実中の放射能を 10Bq/kg 以下となることが分かった。塩化カリ区と堆肥区について同等の放射性セシウム吸収抑制効果が確認され、堆肥中のカリにおいても放射性セシウム吸収抑制資材として有効であることが示された。

(2)-2,放射能汚染堆肥の施用が野菜のセシウム吸収に及ぼす影響について群馬県の調査事例

暫定基準値 400Bq/kg を超過する放射能が検出された堆肥(500~2200Bq/kg)で栽培された野菜についていずれも検出限界(10Bq/kg 以下)であった。高濃度放射能汚染堆肥を使用しても土壌にカリが十分量あれば、野菜に放射性 Cs は吸収されないことが実証された。

放射性セシウムは時間の経過とともに低減していくため、放射能が検出された堆肥を放射性廃棄物として処理するよりは、様子を見ながらカリ資源として使用していくのが合理的であると考えられる。よって、堆肥の暫定基準値を緩和して、積極的に有効活用していくことを推奨する。

(2)-3,有機物施用が土壌溶液および野菜の ^{133}Cs 移行に及ぼす

影響

堆肥施用によって¹³³Csの土壌溶液への移動性が高まることが確認された。これまでにSANCHEZ A L1999,STAUNTION Sら 2002が報告しているとおりに有機物施用が土壌粘土鉱物のセシウム吸着を低下させている裏づけとなる。また、栽培試験では堆肥施用による野菜の¹³³Cs吸収抑制効果を確認した。これは堆肥中のカリが吸収抑制効果を発揮したといえる。よって、堆肥施用はセシウムの移動性を高めるが、カリによる吸収抑制作用が強く、セシウム吸収抑制資材としての活用が期待できる。

3.堆肥施用がもたらす環境リスクについて

西日本地域の有機栽培実践農地の土壌診断分析では、養分の過剰蓄積やアンバランス化が多数確認された。特に可給態リン酸においては約半数の農地でリン酸固定能が消失するほどの過剰状態であることが判明した。可給態リン酸は栽培年数の長い農地ほど増加する傾向にあった。

東京都内の長期有機栽培農地を対象に実態調査をした結果、土壌養分バランスについて地力増進法による改善目標値のある項目においては良好であったが、全量分析結果から各養分が有機態として多量に蓄積していることが示唆された。長期的な堆肥の多量施用により、養分及び重金属が蓄積され、多量に蓄積された窒素は夏季に多量に無機化し地下水汚染をもたらしたとことがわかった。野菜の品質については季節により著しく異なり、地力窒素との関連性が示唆された。そこでコマツナ連続栽培試験を実施したところ、栽培開始時の無機態窒素と無機

化窒素の合計量についてコマツナの硝酸含量と高い正の相関性が確認された。また、夏季のソルゴー作付けは地表からの窒素流亡抑制に有効であることが確認された。以上から、過剰な有機物施用は土壤養分の過剰蓄積や養分のアンバランス化、地下水の硝酸汚染などを引き起こすことが確認された。

4.堆肥を肥料資源として活用するための迅速分析法の開発

堆肥の有効活用並びに過剰施肥を防止するためには堆肥の適正施用が望まれるが、そのためには堆肥中の肥料成分含有量を迅速に測定する必要がある。そこで、堆肥の速効性肥料成分迅速分析法を開発した。

堆肥中の速効性肥料成分抽出法として、棚橋ら(2005)の0.5M/L 塩酸抽出法を用い、ディスクリート方式による自動化学分析装置により定量するための検討を行い、装置1台でアンモニア態窒素・硝酸態窒素・リン酸・カリ・石灰・苦土の6成分について、迅速多量分析をすることが可能となった。

さらに生産現場で簡便に測定できる方法として、試験紙による分析方法を検討した。抽出液は肥料分析にも用いられる2%クエン酸とし、抽出比率、振とう時間などを検討し、既存の試験紙であるアクアチェック A、みどりくん N、みどりくん PK を用いて、堆肥中の速効性肥料成分としてのアンモニア態窒素・硝酸態窒素・リン酸・カリの4成分について簡易測定が可能となった。

5.まとめ

本研究によりゼオライトとカリの併用が有効であることが明らかになった。ゼオライトの放射性セシウム吸収抑制メカニズムはセシウムイオンの吸着材としてより、土壤中で肥料として施されたカリウムイオンとアンモニウムイオンを特異的に吸着して、それらの溶脱を抑制することに起因した。ゼオライトによるアンモニウムイオンとセシウムイオンの吸着に伴い土壤溶液中の両イオン濃度が低下するため、土壤コロイド表面に交換吸着されているセシウムイオンの解離を抑制する。さらにはゼオライト構造内に吸着されたカリウムイオンとアンモニウムイオンが効率よく作物に吸収されるため拮抗的にセシウムイオンの吸収が抑制されることによると考えられる。また、ゼオライトは低カリ条件下でのアンモニウムイオン捕捉効果が高いため、放射性セシウム吸収が起りやすい条件下で、効果的に威力を発揮すると考えられる。

今回のような非常時においても、土壤診断に基づいた土作りが基本であることが分かった。今後原発事故の影響が残る地域での営農再開のための対策としては、土壤中のカリ保持を基本とするが、ゼオライトを 1t/10a 程度施用した上でカリを施用するのが効果的である。また、カリ肥料源としては家畜ふん堆肥の活用が有効であった。ただし、堆肥の過剰施用は地下水の硝酸性窒素汚染などの環境負荷をもたらす恐れもあるので、肥料成分量の分析を行った上で施用量を決定する。土壤中の放射性セシウム吸収を抑制するに必要なカリ施用量は、水稻では施肥後におけるカリ飽和度を 2%程度以上、大豆では 5%程度以

上とする。なお水田では、収穫後の稲わらを鋤き込むことで、
土壌交換性カリの保持に大きく貢献する。天然ゼオライト、稲
わら、堆肥など国内産農業資源を活用して、作物の放射性セシ
ウム吸収抑制対策を行う意義は大きい。

SUMMARY

Exploitation of countermeasures technique for controlling the absorption of radiocesium into crops by the application of domestic agricultural resources

Tomoko NINAKI

1. INTRODUCTION

Agricultural fields in Fukushima had 145,000ha, of which 70% were occupied by paddy fields, and was ranked fourth in the domestic production of rice. Due to the accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station which occurred on March 11, 2011, radionuclides spread widely, causing Fukushima's agriculture to face an unprecedented crisis. As for the scattered main radionuclides, ^{137}Cs , with a 30 year half-life, was the main constituent of the farmland pollution nuclides which included ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs . Long-term countermeasures are required by the farmland since the Cs^+ is absorbed by clay minerals and remains in the soil's outer layer for a long time.

The authors started several studies in order to establish radiocesium absorption restraint measures for farm products, mainly paddy-rice, within in a planting limit area of Minamisoma and Date in Fukushima as part of the Tokyo University of Agriculture East Japan support project that started in April, 2011. Zeolite attracted attention to be part of the measures for reducing the uptake of radiocesium.

The natural zeolite has selective exchange adsorption characteristics for potassium and an ammonium ion (Goto 1980). Because cesium belongs to the alkali metals, it has a smaller hydration ion system than potassium, and is therefore easily adsorbed (Nishimura 1973). In Fukushima's Daiichi Nuclear Power Station, zeolite has been used for the disposal of polluted water with radiocesium using the property from the early period of the accident outbreak. In the Chernobyl disaster, it was used in for restoring the farmland polluted with radiocesium. In this background, zeolite was expected to be the adsorbent measure against radiocesium. The uptake of radiocesium into plants will be reduced by applying it to radiation-contaminated fields around Fukushima. In the spring of 2012, zeolite was applied as a reduction-measures material in rice fields of Fukushima. However, the exact mechanism of this reduction effect was not yet clarified. And then, the Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries and Fukushima prefecture published "Factors in the production of rice with a high radiocesium concentration rice and their countermeasures (2013)", 1% potassium contained in the zeolite is effective at reducing the soil-to-plant transfer of radiocesium. The radioactivity absorption restraint measures fertilize the potassium manure to secure potassium contents in the soil. Therefore zeolite had not been recorded in the reconstruction budget, with the exception of some areas, since 2013.

On the other hand, the authors thought about the radioactivity absorption suppressant effect of the zeolite caused by the characteristic, and they have carried out continued application examinations of zeolite

and potassium as radiocesium absorption restraint measures in paddy-rice and soybeans. Laboratory testing and pot experiments were performed to discuss the influence that the application of zeolite did to the radiocesium absorption of the crops.

It was proved that combination of zeolite and potassium, with compost being effective as an alternative material for potassium. The environmental loads, such as nitrate outflow into the groundwater due to the soil nourishment surplus is of concern in cases of the excessive application of compost on farmland. So examinations about the technique to analyze a manure ingredient quickly for utilization in compost as manure resources.

2. Radiocesium absorption restraint measures examination of the paddy-rice

2-1. Examination of paddy-rice planting in Minamisoma

In Minamisoma city, April, 2012, a continuous use examination lasting 3 years was conducted regarding the application effects of the potassium and zeolite in paddy-fields at the 20.8 km mark from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. Radiocesium strength tended to be decreased by the application of zeolite in the standard potassium application, though the effect of the zeolite was not accepted in the application of potassium in large quantities. Regarding the unpolished rice yield, increased receipts by potassium manure and application of the zeolite. Afterwards, Authors turned over the rice straw produced in a crowded rice field, and after cultivating the

paddy-rice with custom application quantities of potassium without any additional application of zeolite confirmed a continuation effect of the zeolite as well as the increased yield of the unpolished rice.

The soil's exchangeable potassium was held highly in zeolite application, and the effect continued until the third year. In addition, exchangeable potassium was maintained higher in the soil in 2013 than in 2012 of the rice straw. It was believed that turned it over, and was crowded, and that there was an effect. Potassium included in the rice straw was 14 - 20kg/10a. This amount of potassium was confirmed to be effective at holding high soil potassium exchangeability.

Thus, radioactivity absorption restraint measures were possible only in base manure after the first year. 1t/10a of zeolite should be applied and to perform a reduction to the soil of the rice straw.

2-2. Paddy-rice planting examination in Date

Date in Fukushima, 2011, was appointed as the planting self-restraint area because more than 500Bq/kg, the government standard, was detected in unpolished rice. In three of rice fields, planting examinations carried out about the effectiveness of each measure's materials.

A field inspected a continuation effect of the zeolite. As a result, the radiocesium of the unpolished rice was lower than 5Bq/kg together in all fields for 2012 and 2013. In addition, high yields of unpolished rice continued in zeolite application for two years. The quantity of exchangeable potassium in the post-harvest soil with the zeolite

application maintained by the custom application of potassium was more than large quantity potassium application without zeolite in 2013. In B field, the application effects of potassium silicate and potassium chloride were examined. For the paddy-rice, it was shown that a higher radiocesium absorption suppressant effect of the quick-acting fertilizers, such as potassium chloride, worked early in growth compared to slow-release manure, such as potassium silicate, which worked late in growth.

In the cultivation examination of the dry field farming carried out in a radioactively contaminated site by Chernobyl disaster, the radioactivity absorption reduction effect to the crops by the application of the lime material was reported (Nisbet et al. 1993). In the C field, the effect of converter slag on acid improvement was examined. The rice-paddy fields where 1t/10a of converter slag was applied in 2012 showed a pH of 7.5 while a pH of 6.0 was found in the neighboring fields without converter slag. The radiocesium absorption of the unpolished rice was reduced by acid improvement with converter slag application, and the unpolished rice yields increased. The promotion of mineralization from the organic state nitrogen from the soil was confirmed by an alkali effect with the slag application.

It is revealed that the absorption of cesium is controlled in paddy-rice cultivation antagonistically by potassium application. On the other hand, Tensho (1961) reported that radiocesium absorption was promoted by the application of the ammonia. When ammonium ions which have a strong exchange invasion power, more than potassium,

are absorbed into the soil by releasing them with a soil colloid into the radiocesium, they then become easily to be absorbed into plants (Tsukada et al. 2012 and Nakao et al. 2012). However, the radiocesium absorption to a rice body tended to be rather reduced, though the absorbency of nitrogen was improved by the application of the zeolite in paddy-rice in our examination. In addition, it was suggested that the nitrogen absorbency of the paddy-rice improved, but the radiocesium of the paddy-rice decreased.

2-3. Pot cultivation examination for inspection of a radiocesium absorption restraint mechanism by zeolite in paddy-rice

On the basis of the results of these local examinations, I studied paddy-rice pot cultivation examination to elucidate the radioactivity absorption restraint mechanism of the zeolite.

In the examination that let water have eluviation with consideration taken for the inflow of water as in the rice field, an ammonium ion was identified as a specific adsorbed thing by zeolite as with the potassium ion, and it was known that the ammonium ion capture effect under conditions of low potassium is particularly high. In addition, it was thought that the behavior of nitrogen in the reduction condition soil included a common point about an effect of zeolite application and the acid improvement. Therefore I carried out a pot cultivation examination in which I paid attention to the behavior of the ammonium ion. As a result, radiocesium increased by the large quantity of nitrogen application, but decreased by zeolite application. On the other hand, I

confirmed radiocesium reduction by the acid improvement, but the effect varied according to the kind of soil, and it was thought that the quantity of nitrogen that mineralized from the soil was different.

The adsorption power for the soil colloid is known to be $Cs^+ > NH_4^+ > K^+$, exchangeable cesium is released into the soil solution with the application of a large quantity of ammonium ions at once and is then absorbed into paddy-rice. Zeolite prevented the excessive increase of the ammonium ion of soil solution by preventing it from absorbing the ammonium ion, and it was thought that the reduced radiocesium absorption to paddy-rice due to the controlling of the exchangeable cesium dissociation from soil colloid. On the other hand, the exchangeable cesium dissociation from the soil colloid was restrained, it was thought that the acid improvement producing mineralization of nitrogen, which is slowly released into the soil without increasing the soil solution by an ammonium ion being absorbed to paddy-rice effectively.

3. Radiocesium absorption restraint measures of dry field farming

3-1. Planting examination of the soybean in Date

In Date of Fukushima, the crop rotation of paddy-rice and the soybean has been cultivated conventionally. Soybean is predicted to have a high absorbency of cesium because the quantity of potassium it requires is high compared with paddy-rice. The radiocesium absorption restraint measure examinations for the soybean were studied in two fields in Date.

Radioactivity was detected at 350Bq/kg and 69Bq/k in soybean fields A and B, respectively. Examination of the product was accomplished regarding zeolite and a potassium application effect in the farm. In addition, the quantity of potassium application was reduced according to the potassium quantity shared in zeolite; 50kg/10a. As a result, the radiocesium reduction effect from the application of zeolite and potassium was confirmed at both fields. In addition, the exchangeable potassium quantity in the soil after the soybean crop remained a high when applied together with zeolite. Cross correlation was detected between radiocesium in soybean and potassium saturation percentage, though relation between radiocesium in soybean and exchangeable potassium of crop ruins are different in fields A and B. It was shown that potassium application should be performed at or higher than 5% of potassium saturation to decrease radioactivity to less than 10Bq/kg.

3-2. The influence of compost application to the cesium absorption of vegetables

3-2-1. Green peas planting examination in Date

Examination of green peas showed that the radioactivity in a grain should decrease to less than 10Bq/kg at a more than a 5% of potassium saturation, though this was not confirmed only through zeolite application (1t/10a). An equal radiocesium absorption suppressant effect was confirmed in potassium chloride and compost. It was shown that potassium in compost is also effective as a radiocesium absorption restraint material.

3-2-2. Influence of the application of radioactively contaminated compost on the radiocesium absorption of vegetables-an example of Gunma

Contaminated compost (500 - 2200Bq/kg), which exceeded the government standard on radioactivity of 400Bq/kg was detected. The radiocesium levels of the harvested vegetables were lower than the detection limit when farming cultivated vegetable using it. Therefore, the use of radioactively contaminated compost that exceeds the government standard can be allowed if the potassium saturation is high enough. Thus, the government standard of the compost need to be reexamined, and the compost can be used positively as a potassium resource.

4. The environmental risk that the application of a large quantity of compost brings

Compost becomes the supply source of the manure, however, it also becomes factor in the environmental load. As a result of fact-finding for long-term organic farming farmland in Tokyo, it was good for soil nourishment balance in the item with an improvement target value through methods which increase the fertility of soil. However, gross quantity analysis suggested that each nutrient accumulated abundantly in an organic state. Nutrients and heavy metals accumulated into a large quantity due to the application of long-term composting. It was relayed that the accumulated nitrogen mineralized it abundantly in the summer, causing groundwater contamination.

Thus, the large quantity of organic matter application caused a surplus in soil nutrients and was confirmed to cause nitric acid pollution of the groundwater.

5. Development of rapid analysis for the compost to be utilized as a manure resources

The appropriate application of compost is expected to prevent excessive fertilization. To utilize the compost effectively, it is necessary to measure the manure ingredient contents of the compost quickly. Therefore a method for the rapid analysis of compost was developed.

5-1. Rapid analysis of quickly available fertilizer nutrients in composts by an automated discrete chemical analyzer

As a quick-acting fertilizer ingredient sampling method for compost, examination to assay is performed using a 0.5M/L hydrochloric acid sampling method (Tanahashi et.al 2005) by an automatic chemical analyzer device based on the discrete method. A single device was set up to rapidly analyze a large quantity of material for 6 ingredients; ammonia, nitric acid, phosphoric acid, potassium, lime and magnesia.

5-2. Rapid analysis of quickly available fertilizer nutrients in composts using litmus paper

A rapid analysis method using litmus paper examination was performed for compost in a field. I examined the ratio and shaking time which a 2% extraction with citric acid solution for the available manure in compost.

The measurement used Aquacheck-A, Midorikun-N, Midorikun-PK which exist in litmus paper. This enabled the quick analysis of compost for four primary nutrients by litmus paper; ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, phosphoric acid and potassium.

6. CONCLUSION

This study revealed that the combination of zeolite and potassium is an effective countermeasure for reducing radioactivity. Zeolite, specifically adsorbed of ammonium and potassium, was applied in soil which reduced the uptake of radioactivity, rather than adsorbed materials of the cesium. It is believed that potassium and ammonium retained within zeolite structure absorbed into the crops efficiently, and so cesium absorption should be controlled antagonistically

Untouched farmland still remains within a 20km range of and on the outskirts by Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. It is recommended for the future that the application of potassium together with zeolite (1t/10a) should be used as a countermeasure for the resumption of farming in affected areas. The application of the compost was effective substitute for the potassium from manure. However excessive application of the compost might bring environmental loads, such as nitrogen pollution of the groundwater. It is recommended that the decided application of compost quantity should follow analysis because the components of the compost are unclear. Potassium application should be decided based on potassium saturation percentage, 2% for rice and 5% for soybean, it was radiocesium

absorption restraint measures. Soil exchangeable potassium was maintained using turned over post-harvest rice straw in the fields and was crowded with custom application.

There is a large quantity of natural buried zeolite which is said to be inexhaustible around the Tohoku district in Japan. There are very significant countermeasures for radiocesium absorption restraint which should be utilized as domestic agriculture resources for farm products, such as natural zeolite, rice straw and compost.

謝辞

本研究を行うにあたって、多くの方々のご指導およびご援助をいただきました。

指導教授である東京農業大学 応用生物科学部 生物応用化学科の後藤逸男教授をはじめ副査を努めていただきました東京農業大学 応用生物科学部 生物応用化学科の前田良之教授、東京農業大学 国際食料情報学部 国際農業開発学科の高橋久光教授、東京農業大学 国際食料情報学部 国際バイオビジネス学科 門間敏幸教授には、本論文の取りまとめにあたって、懇切なご指導を賜りました。東京農工大学農学部附属フィールドサイエンスセンターの松村昭治先生には論文の進行にあたり、貴重なご助言、ご指導をいただきました。

また、本研究については福島県、南相馬市、伊達市、相馬市、JA 伊達みらい、JA そうまの皆様にも多大なるご協力をいただきました。

さらに、農業生産者である小林久夫さん、佐々木宏さん、佐藤紀夫さんにつきましては、東日本大震災に伴い甚大な被害に遭われたにもかかわらず、積極的にご協力いただいたことに、感謝とともに敬意を称します。

そして、大平農園の皆様、田中三郎さんには長期間にわたり調査にご協力いただきました。

最後に、本論文の完成にあたって東京農業大学 応用生物科学部 生物応用化学科 生産環境化学研究室の稲垣開生さんをはじめ、大島宏行先生、横溝ミサ子さん、歴代の有機農業班、震災班の学部生、院生の皆様にも多大なご尽力、ご協力をいただきました。

以上の方々の他にも、本研究を実施する上で多数の方々のご協力をいただきました。

また、多くの方々に本研究およびそれ以外の様々なご助言をいただきました。

関係各位の皆様にも、ここに感謝の意を表します。