

黄色土への 39 年間の堆肥連用がキャベツの収量と 土壌理化学性に及ぼす影響[†]

若澤秀幸¹⁾・神谷径明²⁾・松浦英之³⁾・杉浦秀治⁴⁾・小杉 徹⁵⁾

¹⁾ 静岡県企業局西部事務所, ²⁾ 静岡県西部農林事務所,
³⁾ 静岡県農林技術研究所茶業研究センター,
⁴⁾ 静岡県環境放射線監視センター, ⁵⁾ 静岡県農林技術研究所

Effects of 39 years of Continuous Application of Composts on Cabbage Yield and the Chemical and Physical Properties of Yellow Soil

Hideyuki Wakasawa¹⁾, Michiaki Kamiya²⁾, Hideyuki Matsuura³⁾, Hideharu
Sugiura⁴⁾ and Toru Kksugi⁵⁾

¹⁾ Shizuoka Prefectural Government Enterprise Bureau Seibu Office, ²⁾ Seibu Agriculture
and Forestry Office, ³⁾ Tea Research Center/ Shizuoka Research Institute of Agriculture
and Forestry, ⁴⁾ Environmental Radiation Monitoring Center, ⁵⁾ Shizuoka Research
Institute of Agriculture and Forestry

Abstract

This study aimed to determine the effects of continuous compost application on cabbage yield, and the chemical and physical properties of yellow soil. The experiment was performed on six plots. Of these six plots, one was treated with a three-nutrient mix of chemical fertilizer, one was used as a non-nitrogen plot, two were treated with rice straw compost at concentrations of 20 Mg ha⁻¹ y⁻¹ and 50 Mg ha⁻¹ y⁻¹, respectively, while the others were treated with pig manure compost and bark compost each at a concentration of 50 Mg ha⁻¹ y⁻¹. When the same amounts of chemical fertilizer from the three-nutrient plot was applied to the compost plots, the yield of cabbage increased by an average of 36% and up to 240% of the yield from the three-nutrient plot (21 years after its inception). Meanwhile, the non-nitrogen plot maintained a yield amounting to 12% of the three-nutrient plot. The yield of cabbage from compost plots, which were not treated with chemical fertilizer, decreased with the exception of the pig manure compost plot. Notably, when nitrogen chemical fertilizer was applied to the compost plots, the yield was similar to that of the three-nutrient plots, except for the bark compost plot. Furthermore, 100% of the phosphate fertilizer, 60%–100% of the potassic fertilizer, and 23%–80% of nitrogen chemical fertilizers were reducible.

By continuous application of composts, total carbon reached its peak in 2002 and after which it stopped increasing. Additionally, total nitrogen tended to increase slightly in all plots, except for the pig manure compost plot. Notably, TroughP₂O₅ as well as exchangeable CaO, MgO, and K₂O increased, with TroughP₂O₅ increasing significantly with the application of the pig manure compost.

[†] 本報告の一部は、日本土壌肥料学会中部支部第 93 回例会（2014 年 3 月 11 日 名古屋市）で報告した。

However, exchangeable MgO and K₂O decreased after 2007 (27 years). It was presumed that the cause was related to the decrease in CEC, the termination of the application of ground dolomitic limestone, and the increase in precipitation.

Moreover, the reduction of apparent specific gravity and softening was observed with the continuous application of composts.

From these results, it was considered that using compost together with a chemical fertilizer, appropriately administered with periodic soil diagnosis, was important for continuing environment-friendly and sustainable agriculture.

キーワード：堆肥連用，黄色土，土壤理化学性，キャベツ，カリウム

I 結 言

近年、地球環境への関心が高まる中で農業が周辺環境に及ぼす影響についても懸念されるようになり、環境に配慮した施肥が求められている。土作りのため堆肥施用が推奨されているが、堆肥中の肥料成分を考慮した施肥設計は、まだ完全には定着していない。そのため過剰施肥となり、作物に吸収されなかった肥料成分の土壤蓄積や地下水汚染等の環境汚染が懸念されている。堆肥等有機物の長期連用試験は、全国で実施され多くの知見が集積されている。上沢による全国的解析により¹²⁾、有機物連用の主な効果は、土壤有機物や可給態リン酸、交換性塩基などが増加する土壤化学性の改善、土壤が膨軟化する等の土壤物理性の改善等であることが明らかにされている。しかし研究対象の多くは金森の報告のように⁴⁾、黒ボク土が多く、赤黄色土のような非黒ボク土が少ないのが現状である。

静岡県農林技術研究所では、1980年からキャベツとカンショを用いて、黄色土と黒ボク土畑において稲わら堆肥、豚ふん堆肥、バーク堆肥の3種類の堆肥を連用して、土壤や作物収量に対する影響を調査しており、2020年で連用開始から40年目になる。著者らはすでに1981年から1990年までの10年間のデータを用いて、土壤の理化学性と作物収量に及ぼす影響について報告した^{5,13)}。すなわち、堆肥連用により、土壤中の全炭素、全窒素、電気伝導率(EC)、陽イオン交換容量、交換性塩基、可給態リン酸が増加し、この傾向は黒ボク土より黄色土において顕著であった。堆肥の種類による特徴はバーク堆肥では全炭素が、豚ふん堆肥では可給態リン酸が増加した。堆肥連用により作物収量は大きく増収するが、増収効果が認められる時期は黄色土が黒ボク土より早く、増収程度も黒ボク土より黄色土において大きいことが明らかになっている。本試験では、試験開始後21年間は三要素区と同量

の化学肥料を併用しながら各種堆肥を連用した。21年間の堆肥連用により養分量は改善基準値上限を上回り、土壤養分が蓄積してきたことから、2002年(22年目)以降は化学肥料削減について検討するため、堆肥施用区の化学肥料併用量を年度毎かつ元素毎に調節した。すなわち堆肥施用区では、2002年(22年目)からの3年間は窒素施肥量削減の可能性について検討するため、窒素化学肥料を無施用とした。2007年(27年目)からの3年間は、堆肥由来の肥料成分が収量に及ぼす影響を明らかにするため、化学肥料(窒素、リン酸、カリ)を無施用とした。2010年(30年目)からは窒素、リン酸、カリの削減について検討するため、化学肥料窒素減肥、リン酸無施用、カリは無施用後減肥で試験を継続した。本報告では、試験開始後39年間の黄色土畑におけるキャベツ収量の推移や土壤理化学性の変化について報告する。また試験開始27年目以降、土壤中の交換性カリの顕著な減少が認められたので、その原因について検討した結果についても併せて報告する。

II 材料及び方法

1 堆肥連用試験の概要

(1) ほ場来歴と栽培概要、試験構成

1980年に静岡県農林技術研究所内の黄色土ほ場にカンショを1作栽培してほ場の均一化を図った後、1981年から試験を開始した。供試土壤は細粒黄色土斑紋ありで、粒径組成から、土性はLight Clayであった。冬作にキャベツ、夏作にカンショを栽培した。キャベツの供試品種は2002年まで‘春汐’、2003～2004年‘YR春づくし’、2006年‘永徳甘藍’、2007年‘湖水’、2008年‘春波’、2009年以降は‘YRしぶき2号’であった。カンショは‘高系14号’を栽培した。

1998 年にカンショを中止しキャベツ単作とした。そのため本報告ではキャベツを中心として述べることにしたい。

キャベツは 7 月下旬～9 月上旬は種、8 月下旬～10 月上旬堆肥・基肥施用・定植、11 月下旬～2 月上旬に収穫した。畝間 50cm、株間 40cm で 1 区 14.6m²に 50 株定植した(1m² 当たり栽植株数は 3.4 株)。試験は 2 反復で行った。

試験構成は表 1 に示したとおりで、化学肥料単用の三要素区、無窒素区(窒素を除く施肥量は三要素区と同じ)、稲わら堆肥 20Mg 区及び 50Mg 区(稲わら堆肥を 20Mg ha⁻¹ y⁻¹ 及び 50Mg ha⁻¹ y⁻¹ 施用した区)、豚ふん堆肥 50Mg 区(50Mg ha⁻¹ y⁻¹ 施用)、パーク堆肥 50Mg 区(50Mg ha⁻¹ y⁻¹ 施用)の 6 区を設けた。なお試験区の配置は 39 年間固定されている。堆肥はキャベツ作付前に年 1 回施用した。化学肥料は基肥としてキャベツ定植前に、追肥は定植 1 か月後に施用した。

堆肥と化学肥料施用後の耕起深度は 10～15cm であった。収穫残さはすべてほ場外に持ち出した。

(2) 化学肥料施用量

三要素区は表 1 に示したとおり、窒素 260kgN ha⁻¹、リン酸 230kgP₂O₅ ha⁻¹、カリ 250 kgK₂O ha⁻¹ を全期間通して施用した。無窒素区は窒素を除き、三要素区と同量のリン酸とカリを全期間施用した。

堆肥施用区においては、1981～2001 年(1～21 年目)までは窒素化学肥料を三要素区と同量(260kgN ha⁻¹)上乗せして施用した。2002 年以降は堆肥連用下における化学肥料窒素削減について検討するため、窒素化学肥料は次のように施用した。

2002～2004 年(22～24 年目)は、堆肥施用区の窒素化学肥料を無施肥(100%削減)とし、2005～2006 年(25～26 年目)は、再び窒素化学肥料を 260kgN ha⁻¹ 上乗せ施用した(削減なし)。2007～2009 年(27～29 年目)の堆肥施用区は堆肥のみ施用し、窒素化学肥料は無施肥(100%削減)とした。

2010～2012 年(30～32 年目)の窒素施用量は稲わ

ら堆肥区とパーク堆肥区が 200kg Nha⁻¹(60kgN ha⁻¹(23%削減)、豚ふん堆肥区は 50kgN ha⁻¹(210kgN ha⁻¹(81%)削減)であった。2013～2015 年(33～35 年目)は稲わら堆肥区 200kgN ha⁻¹(60kgN ha⁻¹(23%)削減)、豚ふん堆肥区 50kgN ha⁻¹(210kgN ha⁻¹(81%)削減)、パーク堆肥区 250kgN ha⁻¹(10kgN ha⁻¹(4%)削減)であった。2016～2018 年(36～38 年目)は稲わら堆肥区が 200kgN ha⁻¹(60kgN ha⁻¹(23%)削減)、豚ふん堆肥区 180kgN ha⁻¹(80kgN ha⁻¹(31%)削減)、パーク堆肥区 250kgN ha⁻¹(10kgN ha⁻¹(4%)削減)であった。2019 年(39 年目)はすべての堆肥施用区の窒素化学肥料を三要素区と同量(260kgN ha⁻¹)上乗せして施用した(削減なし)。

堆肥施用区のリン酸は、1981 年から 2006 年(1～26 年目)までは三要素区と同量の 230kgP₂O₅ ha⁻¹ 施用したが(削減なし)、リン酸肥料削減の可能性について検討するため 2007 年(27 年目)以降はリン酸無施用(100%削減)とした。

堆肥施用区のカリは 1981 年から 2006 年(1～26 年目)までは、全区三要素区と同量の 250kg ha⁻¹ を施用した(削減なし)。2007 年からカリ肥料削減の可能性について検討するため、2007～2015 年(27～35 年目)はカリ無施用(100%削減)とした。2016 年(36 年目)は追肥で硫酸カリを用いて 50kgK₂O ha⁻¹(200kgK₂O ha⁻¹(80%)削減)とし、2017 年(37 年目)からは 100kgK₂O ha⁻¹(150kgK₂O ha⁻¹(60%)削減)施用した。なおカンショ作付け中の施肥量は窒素、リン酸、カリ 50 kg ha⁻¹ であった。

苦土石灰は試験開始から 1997 年(17 年目)まで、キャベツ作付時に 1500kg ha⁻¹ y⁻¹、カンショ作付時に 1000kg ha⁻¹ y⁻¹ をすべての区に施用した。1998 年(18 年目)からキャベツ単作としキャベツ作付時に 1500kg ha⁻¹ y⁻¹ 施用したが、土壌中の交換性石灰、苦土とも改善基準値以上で推移し、pH も改善基準値上限の 6.5 以上で推移したことから、2007 年(27 年目)から 2018 年(38 年目)までは苦土石灰の施用を中止した。なおこれに伴い交換性苦土の減少傾向が認めら

表 1 試験構成とキャベツ作における化学肥料成分施用量¹⁾

試験区	窒素(kgN ha ⁻¹)								リン酸(kgP ₂ O ₅ ha ⁻¹)		カリ(kgK ₂ O ha ⁻¹)			
	1981～	2002～	2005～	2007～	2010～	2013～	2016～	2019～	1981～	2007～	1981～	2007～	2016	2007～
	2001	2004	2006	2009	2012	2015	2018		2006	2015	2006	2015		
三要素	260	260	260	260	260	260	260	260	230	230	250	250	250	250
無窒素	0	0	0	0	0	0	0	0	230	230	250	250	250	250
稲わら堆肥20Mg	260	0	260	0	200	200	200	260	230	0	250	0	50	100
稲わら堆肥50Mg	260	0	260	0	200	200	200	260	230	0	250	0	50	100
豚ふん堆肥50Mg	260	0	260	0	50	50	180	260	230	0	250	0	50	100
パーク堆肥50Mg	260	0	260	0	200	250	250	260	230	0	250	0	50	100

¹⁾ 供試肥料

2017年までの三要素区及び1981～2001年及び2005～2006年の堆肥施用区 基肥(定植前): 尿素硫加燐安48号, 追肥(定植1ヵ月後): 燐硝安加里S604
ただし堆肥施用区は、2010年から窒素肥料を被覆尿素(LP40): 尿素=7:3(N比率)

無窒素区: 過リン酸石灰, 硫酸カリ

2007年からリン酸無施肥

2007～2015年カリ無施肥, 2016年から硫酸カリ施用

2006年までは全区に苦土石灰をキャベツ作付け時に1500kg ha⁻¹, カンショ作付け時に1000kg ha⁻¹施用していたが、2007年から2018年まで施用を中止した。

カンショの施肥量: 窒素, リン酸, カリ=50kg ha⁻¹

れたため、2019年は再び1000kg ha⁻¹施用した。

(3) 供試堆肥

バーク堆肥と豚ふん堆肥は地元の農協から購入した。稲わら堆肥は静岡県農林技術研究所内で、静岡県土壌肥料ハンドブック記載の稲わら速成堆肥の作り方⁹⁾に準じて作成した。

(4) 供試堆肥の肥料成分

2007年から2018年(27~38年目)までの供試堆肥の肥料成分及び水分を分析した。全窒素、全炭素は乾式燃焼法により、リン酸は乾式灰化・バナドモリブデン酸比色法、カリは乾式灰化・フレイム原子吸光法により測定した。

(5) キャベツの収量調査

各区20株を収穫し全重と調整重(外葉を数枚除去し販売時の状態にした収量)を調査した。

(6) 栽培後土壌の採取と土壌化学性測定

栽培後土壌の採取は1997年(17作)まではカンショ跡地で、それ以後はキャベツ跡地で次のように実施した。各区6カ所から15cmの深さで穴の斜面に沿って一定の厚さで土壌を採取し、風乾後2mmのふるいで篩別し分析用試料とした。土壌pH、可給態リン酸、交換性塩基、陽イオン交換容量は土壌・養液・作物体・診断マニュアル¹⁰⁾に記載の方法により測定した。全炭素、全窒素は乾式燃焼法により分析した。

2 キャベツ栽培後土壌の交換性カリ減少原因の検討

(1) 静岡県磐田市の年間降水量

気象庁気象観測統計により1978年から2017年の年間降水量を調査した。

(2) 作物体カリ分析及びカリの収支

作物体は各区2株採取し60℃で乾燥後粉碎し分析用試料とした。作物体カリ含量は乾式灰化・フレイム原子吸光法により測定し、2007年から2019年(27~

39年目)までのカリの収支(カリ施用量-カリ吸収量)を求めた。

3. 土壌物理性調査

2008年から2019年(28~39年目)までのキャベツ栽培後土壌を農地管理実態調査の定点調査及び基準点調査における土壌炭素調査実施方法⁸⁾により採取した。すなわち100mL採土管を用いて、第1層(0~15cm)と第2層(15~30cm)の中間の深さで採取し、仮比重を測定した。土壌は2反復の片側で採取し(従って処理区の反復無し)、処理区内では3箇所から採取した。なお本調査による仮比重は礫や作物根を除いた2mm以下の細土画分についての単位容積当たりの重さで、一般に測定される仮比重(根や礫を含んだもの)とは異なる。

2017年(37年目)のキャベツ栽培後、貫入式土壌硬度計(大起理化工業製DIK-5532)を用いて各区15箇所の土壌硬度を深さ0~30cmまで測定した。仮比重測定用土壌の採取と同様、2反復の片側で測定した。

III 結 果

1. 供試堆肥の肥料成分と堆肥由来成分施用量

2007年から2019年(27~39年目)までの供試堆肥の肥料成分を表2に示した。堆肥中の窒素含有率は豚ふん堆肥が最も多く、稲わら堆肥とバーク堆肥は同程度であった。リン酸とカリの含有率は豚ふん堆肥が最も多かった。稲わら堆肥とバーク堆肥では、バーク堆肥が少ない傾向であった。

豚ふん堆肥、バーク堆肥は木質物を原料として使用しているため、全炭素含有率が多かった。若澤らによる静岡県内で2007年に生産された豚ふん堆肥とバーク堆肥の調査結果(静岡県農林技術研究所2008)では、豚ふん堆肥の平均値(n=75)は窒素18.6gN kg⁻¹、リン酸35.8 gP₂O₅ kg⁻¹、カリ19.0 gK₂O kg⁻¹、バーク堆肥(n=11)は窒素8.8gN kg⁻¹、リン酸10.8 gP₂O₅ kg⁻¹、カリ10.1 gK₂O kg⁻¹であった。本試験で供試した両堆肥の含有肥料成分はこれより少なかった。

堆肥由来の肥料成分施用量を表3に示した。窒素と

表2 供試堆肥の肥料成分(現物当たり)

	水分 (g kg ⁻¹)	全窒素 (gN kg ⁻¹)	リン酸 (gP ₂ O ₅ kg ⁻¹)	カリ (gK ₂ O kg ⁻¹)	全炭素 (gC kg ⁻¹)	C/N比	
稲わら堆肥	平均	783	4.76	2.78	4.82	58.5	12.3
	最大	834	5.84	5.60	6.76	68.2	14.7
	最小	722	3.92	1.42	1.62	47.0	10.6
豚ふん堆肥	平均	557	10.88	20.45	10.41	166.6	15.5
	最大	701	13.78	26.75	18.32	205.0	21.6
	最小	421	8.03	12.83	6.07	109.4	11.8
バーク堆肥	平均	657	5.19	1.77	2.19	143.7	28.2
	最大	745	7.76	6.37	4.91	192.2	44.4
	最小	469	3.85	0.78	0.17	97.7	21.2

1) 2007年から2019年までの供試堆肥の肥料成分

[†]静岡県農林技術研究所2008, 平成20年度試験研究成果の概要集農業一般編, 505-506.

炭素施用量は豚ふん堆肥 50Mg 区が最も多く、次いでパーク堆肥 50Mg 区、稲わら堆肥 50Mg 区の順で、稲わら堆肥 20Mg 区が最も少なかった。リン酸とカリの施用量は豚ふん堆肥 50Mg 区が最も多く、稲わら堆肥 50Mg 区、パーク堆肥 50Mg 区の順で、稲わら堆肥 20Mg 区が最も少なかった。

2. キャベツ収量の推移

キャベツの収量（調整重）の推移を図 1（一部欠測あり）に示した。キャベツの収量は全期間を通して無窒素区が最も少なく、三要素区の 12%（平均）の収量で推移した。堆肥施用区に化学肥料を上乗せ施用した場合（化学肥料削減なし、1981～2001 年（1～26 年目））のキャベツの収量は、三要素区より平均で 36%、最大で 240%増収した。堆肥の種類では、豚ふん堆肥区又はパーク堆肥区の収量が最も多く推移し、稲わら堆肥区は 50Mg 区が 20Mg 区より多く推移した。

堆肥施用区の化学肥料を無窒素（窒素のみ 100%削減）とした 2002～2004 年（22～24 年目）の収量は、豚ふん堆肥区を除き堆肥施用区の収量は大きく低下した。

堆肥施用区を化学肥料無施肥（堆肥のみ）とした 2007～2009 年（27～29 年目、窒素・リン酸・カリ

100%削減、) のキャベツの収量は 2002～2004 年同様、豚ふん堆肥区を除き堆肥施用区の収量は三要素区に比べ大きく低下した。堆肥施用区に窒素化学肥料を施用した 2010～2015 年（30～35 年目、窒素 23～81%削減、リン酸・カリ 100%削減）は、パーク堆肥区の収量は他の堆肥施用区に比べやや少なく、低下する傾向であったが、稲わら堆肥区と豚ふん堆肥区は三要素区と同程度の収量で推移した。2016 年（36 年目）から堆肥施用区にカリを追肥で施用した（窒素 23～31%削減、リン酸・100%削減、カリ 60～80%削減）ところ、パーク堆肥区の収量も増加し、低下傾向から脱した。このように堆肥連用により窒素化学肥料だけでなくリン酸、カリの削減も可能であった。

3. 土壤化学性の変化と養分蓄積

キャベツ栽培後土壌の pH、陽イオン交換容量（CEC）、可給態リン酸、交換性塩基、全炭素、全窒素含量の推移を図 2 に示した。

pH は静岡県の改善基準値⁹⁾の上限以上で推移し、2003 年（23 年目）までは上昇傾向であったが、以後横ばい又は低下傾向であった。三要素区は 2013 年（33 年目）以降低下し、2017 年（37 年目）には改善基準値下限を下回った。

表 3 堆肥由来肥料成分施用量

	全窒素 (kgN ha ⁻¹)			リン酸 (kgP ₂ O ₅ ha ⁻¹)			カリ (kgK ₂ O ha ⁻¹)			全炭素 (kgC ha ⁻¹)		
	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小
稲わら堆肥20Mg	95	117	78	56	112	28	96	135	32	1192	1473	940
稲わら堆肥50Mg	238	292	196	139	280	71	241	338	81	2980	3683	2350
豚ふん堆肥50Mg	538	689	401	1013	1338	642	515	916	303	8364	10251	5470
パーク堆肥50Mg	262	388	195	90	319	39	111	245	9	7382	9610	5447

1) 2007年から2019年までの堆肥由来肥料成分施用量 (n=13)

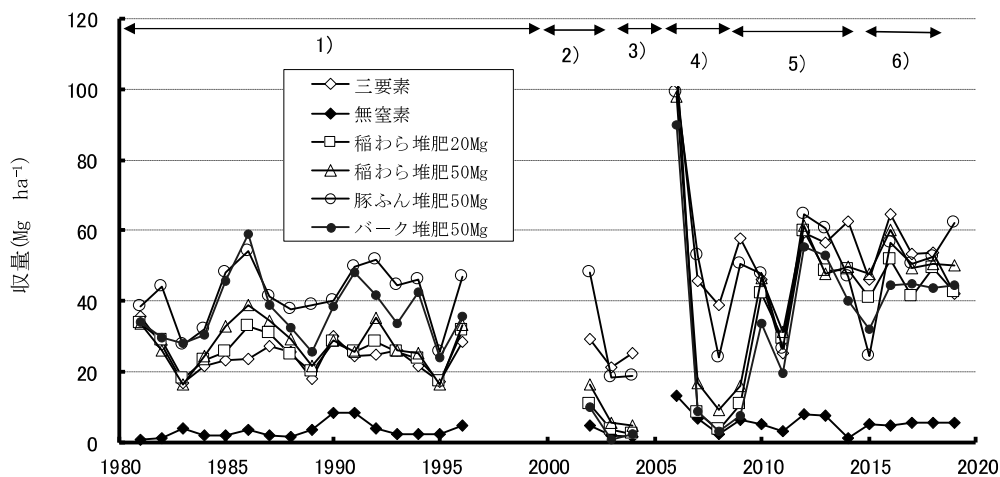


図 1 キャベツ収量（調整重）の推移

- 1) 1981年～2001年：堆肥施用区に化学肥料を三要素区と同量上乗せして施用（化肥削減無し）
- 2) 2002年～2004年：堆肥施用区に窒素化学肥料無施用、リン酸、カリは三要素区と同量施用（N100%削減）
- 3) 2005年～2006年：堆肥施用区に化学肥料を三要素区と同量上乗せして施用（化肥削減無し）
- 4) 2007年～2009年：堆肥のみ施用、化学肥料無施用（N P K 100%削減）
- 5) 2010年～2015年：堆肥施用区に窒素化学肥料のみ施用、リン酸、カリ無施用（N削減、P K 100%削減）
- 6) 2016年～2019年：堆肥施用区に窒素、カリ化学肥料施用、リン酸無施用（N K削減、P 100%削減）

陽イオン交換容量はパーク堆肥区が最も高く推移し、1991年(11年目)までは増加傾向であったが、以後低下し、処理区間の差も小さくなった。2008年(28年目)以降は改善基準値を下回って推移した。

可給態リン酸は豚ふん堆肥区で増加傾向が顕著で、1991年(11年目)以降急激に増加し、畑土壌の改善基準値上限 500 Mg kg^{-1} の6倍を超える 3000 Mg kg^{-1} 以上で推移し、以後横這い傾向であった。可給態リン

酸は1995年(15年目)までは豚ふん堆肥区を除いた試験区間の差は小さかったが、2007年(27年目)以降この差はやや拡大し、パーク堆肥区が最も低く、次いで稲わら堆肥区、三要素区又は無窒素区の順で推移した。可給態リン酸は2013年(33年目)以降のパーク堆肥区を除き、改善基準値上限を超えて推移したが、パーク堆肥区と稲わら堆肥区はわずかに減少傾向であった。

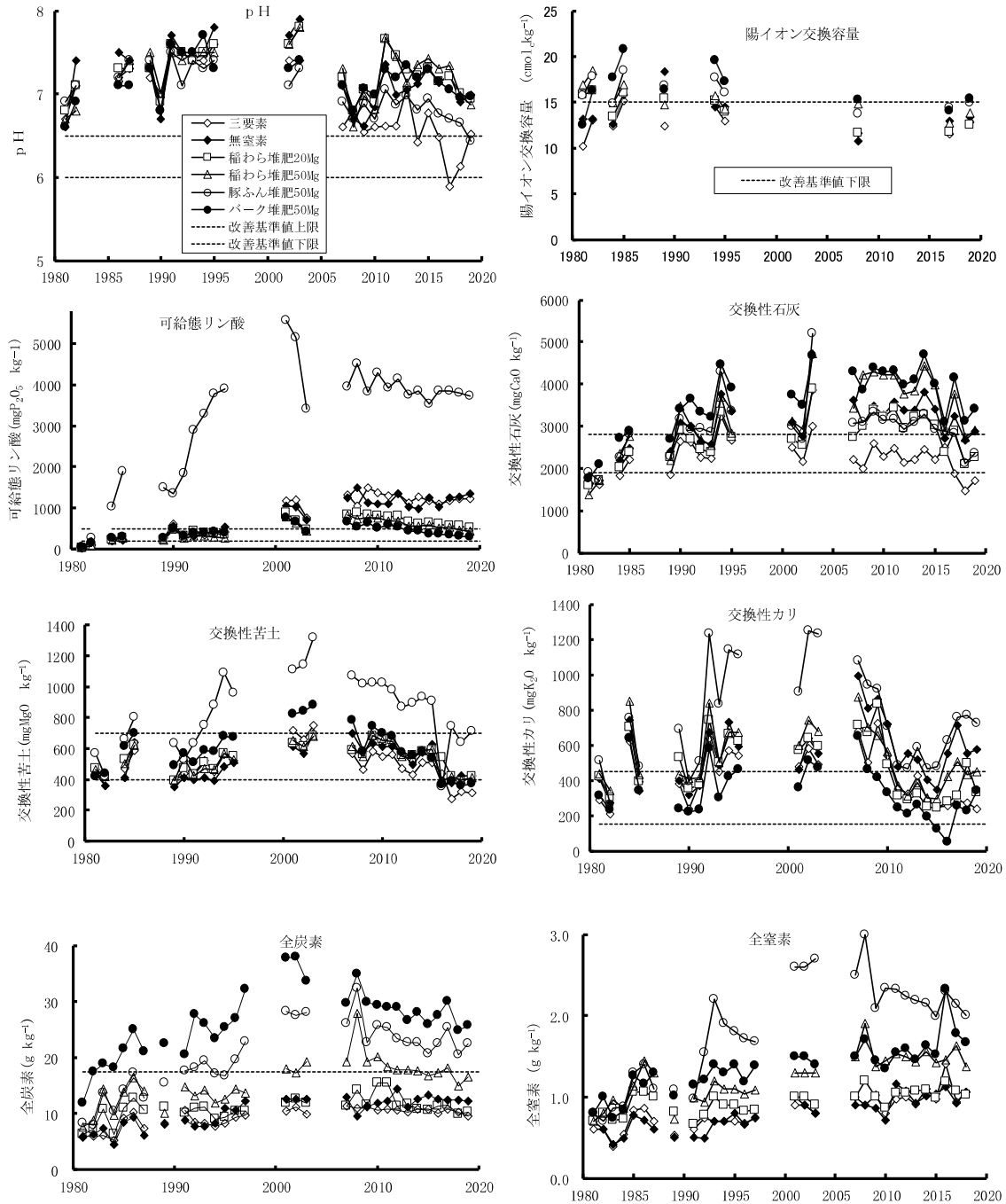


図2 キャベツ栽培後土壌の化学性の推移

- 1) 黄色土普通畑の全炭素の改善基準値は、腐植の基準値を全炭素に換算した(換算係数1.724)。腐植の改善基準値は3%以上は炭素に換算すると1.74%(17.4 g kg^{-1})以上となる。
- 2) 陽イオン交換容量と全炭素の破線は改善基準値下限
- 3) 1997年(第17作)まではカンショ跡地

交換性石灰はパーク堆肥区が最も多く推移し、三要素区が最も低く推移した。2003 年（23 年目）までは増加傾向であったが、以後横ばい又は減少傾向で、2007 年（27 年目）以降は処理区間の差が拡大する傾向であった。三要素区は改善基準値以内で推移し、その他の区は概ね改善基準値上限近くから上限を超えて推移した。

交換性苦土は豚ふん堆肥区が最も多く推移し、1992 年(12 年目)以降畑土壌の改善基準値上限 700Mg kg⁻¹ を上回った。そして 2002 年（22 年目）までは無窒素区が、2007 年（27 年目）以降は三要素区が最も低い傾向であった。交換性苦土は豚ふん堆肥区とパーク堆肥区を除き、概ね改善基準値以内で推移したが、苦土石灰の施用を中止した 2007 年（27 年目）以降、すべての区で減少傾向を示した。

交換性カリは豚ふん堆肥区が最も多い場合が多く、パーク堆肥区が最も低く推移した。交換性カリは 2007 年（27 年目）以降すべての処理区で減少傾向が顕著で、2015 年と 2016 年（35～36 年目）のパーク堆肥区は改善基準値下限 150Mg kg⁻¹ を下回った。2016 年（36 年目）からのカリ肥料施用により、パーク堆肥区を除く堆肥施用区では、交換性カリが増加に転じた。パーク堆肥区はカリ肥料をさらに増施した 2017 年（37 年目）に増加傾向を示した。

全炭素はパーク堆肥区で最も多く、次いで豚ふん堆肥区、稲わら堆肥 50Mg 区の順で推移し、三要素区又は無窒素区が最も低かった。全窒素は豚ふん堆肥区で最も多く、次いでパーク堆肥区の順で推移し、無窒素区が最も少なかった。全炭素は 2002 年（22 年目）以降横ばい又は減少傾向であったが、全窒素は豚ふん堆肥区を除き、微増傾向が続いた。

4. キャベツ栽培後土壌の交換性カリ減少原因の検討

2008 年（28 年目）以降キャベツ栽培後土壌の交換性カリが減少しており、パーク堆肥区ではキャベツの収量低下も認められたので、その原因について検討した。

(1) 静岡県磐田市の年間降水量

1978～2017 年の静岡県磐田市の年間降水量を表 4

に示した。キャベツ栽培期間だけでなく年間降水量としたのは、肥料の流亡は栽培期間中だけに限らないと考えたためである。1978～1987 年と 1988～1997 年の 10 年間の平均年間降水量はほぼ同じであったが、1998～2007 年、2008～2017 年の降水量は増加傾向で、特に交換性カリの減少が始まった 2008～2017 年の降水量は 1997 年までの 20 年間に比べ、140mm 以上増加していた。1 時間の最大降水量、まとまった雨量と言える日雨量 50mm 以上の降雨日数も 1978～1997 年に比べ、2008～2017 年では 10 日以上増加していた。

表 4 静岡県磐田市の降水量¹⁾

年代	年間降水量 (平均) (mm)	最大 1 時間 降水量 (平均) (mm)	50mm d ⁻¹ 以上 降雨日数
1978-1987	1654	36	112
1988-1997	1650	37	106
1998-2007	1685	44	122
2008-2017	1795	48	126

1) 気象庁気象観測統計より

(2) カリ吸収量と収支

交換性カリが減少し始めた 2007 年（27 年目）以降のカリの収支（カリ施用量－カリ吸収量）を表 5 に示した。2007～2019 年（27～39 年目）及び 2007～2015 年（27～35 年目）を合計するとマイナスになったのは稲わら堆肥 20Mg 区だけで、稲わら堆肥 20Mg 区とパーク堆肥区はマイナスを示した年が多かった。三要素区とパーク堆肥区はプラス収支でも、その値は小さかった。

5. 堆肥連用土壌の物理性

2008～2019 年（28～39 年目）のキャベツ栽培後土壌の仮比重を表 6 に示した。第 1 層で三要素区より仮比重が小さかったのは豚ふん堆肥区であった。その他の堆肥施用区はパーク堆肥区、稲わら堆肥 50Mg 区の順で小さかったが、有意差は認められなかった。第 2 層の仮比重は有意差が認められなかったが、豚ふん堆肥区が最も小さい傾向で、その他の堆肥施用区は同程度であった。

貫入式土壌硬度計で測定した土壌硬度を図 3 に示した。深さ 30cm までの土壌硬度は三要素区が最も硬く、すべての堆肥施用区は三要素区より軟らかかった。

表 5 カリの収支 (kgK₂O ha⁻¹)¹⁾

試験区	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	計(2007-2019)	計(2007-2015)
三要素	-15	54	21	31	85	14	15	33	116	24	0	45	76	498	353
無窒素	178	203	176	188	178	181	159	213	210	201	190	197	184	2458	1686
稲わら堆肥20Mg	-10	41	16	-73	-96	-72	-102	-55	-12	12	-29	-2	18	-364	-363
稲わら堆肥50Mg	130	160	149	79	40	85	59	90	128	154	-3	59	104	1234	919
豚ふん堆肥50Mg	111	333	328	237	363	293	622	439	387	391	174	384	236	4297	3112
パーク堆肥50Mg	46	189	15	-65	54	-72	-62	-16	70	-55	-36	56	53	177	158

1) カリの収支＝カリ施用量－吸収量

2) 網掛けは収支がマイナス

表6 キャベツ栽培後土壌の仮比重¹⁾

試験区	第1層 ²⁾	第2層 ³⁾
三要素	1.32 ^a	1.43
無窒素	1.25 ^{ab}	1.36
稲わら堆肥20Mg	1.27 ^a	1.40
稲わら堆肥50Mg	1.21 ^{ab}	1.39
豚ふん堆肥50Mg	1.13 ^b	1.32
バーク堆肥50Mg	1.19 ^{ab}	1.36

- 1) 2008年から2019年までの平均値
- 2) 深さ0~15cmの中間で採取
- 3) 深さ15~30cmの中間で採取
- 4) 異なるアルファベット間は危険率5%以下で有意差あり (Tukey-Kramer法)
- 5) 第2層は有意差なし

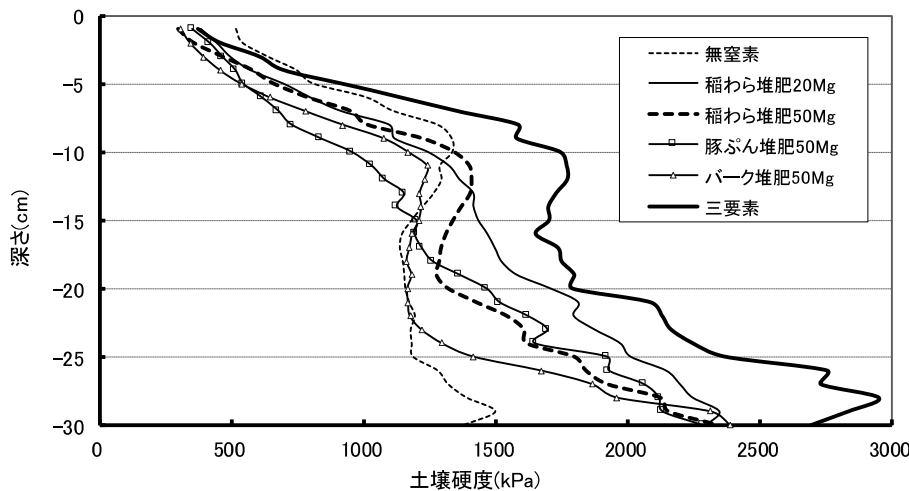


図3 2017年キャベツ栽培後の土壌硬度

深さ15cmまでは概ね豚ふん堆肥区が最も軟らかく、次いでバーク堆肥区で、稲わら堆肥50Mg区と同20Mg区は同程度で、第1層の仮比重と概ね一致していた。15~30cmではバーク堆肥区が最も軟らかく、豚ふん堆肥区と稲わら堆肥50Mg区は同程度で、次いで稲わら堆肥20Mg区の順であった。無窒素区は深さ10cmまでは三要素区に次いで硬かったが、10cm以下では軟らかくなり、15cmでバーク堆肥区と同程度になり、25cm以下では最も軟らかくなった。

緻密度の県改善基準値20mmに相当する土壌硬度は概ね1500kPaに相当する¹⁾ことから、1500kPaを最初に超えた深さを表7に示した。1500kPaに達する深さは三要素区が最も浅く、堆肥施用区は三要素区より深かった。また、堆肥施用区の変動係数は三要素区、無窒素区より小さかった。

表7 土壌硬度1500kPaに達する深さ¹⁾

	三要素	無窒素	稲わら堆肥20Mg	稲わら堆肥50Mg	豚ふん堆肥50Mg	バーク堆肥50Mg
深さ (cm)	10 ^a	20 ^b	16 ^{ab}	18 ^b	20 ^b	22 ^b
変動係数 (%)	50	55	35	44	28	29

- 1) 1500kPaを最初に超えた深さ
- 2) 異なるアルファベット間は危険率5%以下で有意差あり

IV 考察

1. キャベツの収量と化学肥料削減

2006年(26年目)に無窒素区を除き大きく増収したのは、この年供試した‘永徳甘藍’の品種特性であると推定した。

化学肥料を無施肥とし堆肥のみを施用(窒素・リン酸・カリ100%削減)した2007~2009年(27~29年目)のキャベツの収量は、豚ふん堆肥区を除き大きく低下した(図1)。このことは、表2、表3に示したとおり豚ふん堆肥は肥料成分(窒素, リン酸, カリ)が最も多いため、キャベツの生育に必要な養分量が供給

されたが、稲わら堆肥とバーク堆肥は養分含量が少なく、十分な養分が供給されなかったためであると考えられた。

窒素化学肥料のみを追加施用(窒素23~80%削減, リン酸・カリ100%削減)した2010~2012年(30~32年目)及びその後カリ肥料を追加した2013年以降(窒素4~80%削減, リン酸100%削減, カリ60~80%削減)も、バーク堆肥区を除いた堆肥施用区は三要素区と同程度の収量を得ることができた。前原らは⁷⁾、リン酸やカリが蓄積したほ場での促成インゲンマメ栽培において、家畜ふん堆肥に化学肥料で窒素のみを補填し、リン酸とカリは無施用でも収量を維持できたと報告している。山本らも¹⁵⁾、牛ふん堆肥を連用してキャベツを栽培した時、リン酸の減肥が可能であったことを報告している。糟谷らも³⁾、堆肥連用畑ではリン酸とカリの大幅な減肥が可能であったと報告し

ている。

このことは、堆肥連用により土壌養分が蓄積している状態では、窒素だけ追加施用すればリン酸とカリは堆肥から供給される量だけで十分で、リン酸肥料とカリ肥料は大幅に削減可能であることを示している。本試験においてもパーク堆肥区を除き追加施用する化学肥料窒素は23~80%、リン酸は100%、カリは60~100%の削減が可能であった。本試験において、このときの土壌中の可給態リン酸は本県の改善基準値(200~500Mg kg⁻¹)の上限以上、交換性カリは基準値(150~450Mg kg⁻¹)上限以上又は基準値の範囲内で、十分量が蓄積していたため、収量が維持されたと考えられた。なお交換性カリは2008年(28年目)以降減少傾向であったが、パーク堆肥区を除く堆肥施用区は改善基準値の範囲内であった。

2. 土壌養分含量の推移と交換性カリ・苦土の減少

可給態リン酸と交換性石灰は2007年(27年目)以降処理区間の差が拡大する傾向であった(図2)。堆肥施用区は2006年(26年目)まで三要素区と同量の化学肥料(窒素、リン酸、カリ)を上乗せ施用していたが(ただし2002~2004年はPKのみ施用)、2007年以降堆肥は施用するがリン酸は無施用(カリは2016年から施用したが)である。また2007年からは苦土石灰も中止した。このため2016年まではリン酸、石灰は堆肥由来の成分量だけしか供給されなくなり、堆肥由来成分量の違いが現れたため、処理区間の差が拡大したと推定された。

キャベツ栽培後土壌の交換性塩基の内、交換性石灰は2007年(27年目)の苦土石灰施用中止までは増加傾向であったが、その後は横這い傾向であった。交換性苦土と交換性カリは2007年以降減少傾向であった。特に交換性カリはすべての処理区で減少傾向が顕著で、2015年(35年目)と2016年(36年目)のパーク堆肥区は改善基準値下限150Mg kg⁻¹を下回った。交換性石灰が苦土石灰施用中止後も横ばい傾向で減少しなかったのは堆肥から供給されたためと考えられるが、苦土は堆肥からの供給量が少なかったため減少したと考えられた。表3に示したようにカリは2007年(27年目)以降平均で堆肥から96kg ha⁻¹ y⁻¹~515 kg ha⁻¹ y⁻¹、三要素区、無窒素区は250 kg ha⁻¹ y⁻¹供給されたにもかかわらず(表1)、土壌中の交換性カリは2015年まですべての区で減少した(図2)。そこで、この原因について検討した。

3. 交換性カリの減少原因

(1) カリの収支と降水量

2008年(28年目)から2015年(35年目)まで、交換性カリはすべての区で減少傾向を示した。表5にカリの収支を示したとおり、マイナスが続くのは2010年(30年目)からで、豚ふん堆肥区、稲わら堆肥50Mg区と無窒素区の収支は一度もマイナスになっていない。2007-2015年(27~35年目)の収支を合計すると、プラスの値が最も大きいのは豚ふん堆肥区で、次いで無窒素区であった。三要素区、パーク堆肥区はプラス収支でも値が小さく、稲わら堆肥20Mg区はマイナスであった。これは、豚ふん堆肥区は堆肥からのカリ供給量が多いこと、無窒素区はカリ吸収量が少ないため、パーク堆肥区と稲わら堆肥20Mg区は堆肥からのカリ供給量が少なかったためであると考えられた。

次に、降雨の増加によるカリ溶脱の可能性について検討するため、交換性カリの減少が始まる2007年(27年目)以前とそれ以降の降水量を比較した。表4に示したとおり年間平均降水量、カリの溶脱に影響すると考えられる最大1時間降水量と雨量50mL以上の降雨日数とも2008年(28年目)以降が最も多かった。このように、交換性カリが減少しているにもかかわらず、収支がマイナスになったのは稲わら堆肥20Mg区だけでその他の区の収支はプラスであったこと、降水量と降雨強度が増加していたことから、交換性カリ減少は降雨による溶脱も一因であると推定した。

(2) 土壌化学性の変化の影響

試験開始から土壌pHは改善基準値の上限以上で推移しており、2007年(27年目)以降苦土石灰の施用を中止してからも、2008年(28年目)と三要素区を除き、その他の区のpHは6.6から7.7の間で推移しており、大きく低下していない。一般に塩基類が流亡すると土壌が酸性化するが、本試験における交換性カリと苦土の減少は三要素区を除きpHの低下では説明できない。一方、陽イオン交換容量は試験開始から1995年(15年目)までと比べると、2008年(28年目)にはパーク堆肥区を除いた処理区で、2017年(37年目)と2019年(39年目)にはすべての区で改善基準値以下に低下しており、処理区間の差も小さくなった。陽イオン交換容量低下の原因は不明であるが、陽イオン交換容量低下により土壌に保持される苦土とカリの量が減少したこと、苦土石灰の施用中止と降水量の増加が、交換性カリと苦土の減少に関係していると推定された。

交換性塩基の減少はカリにおいて顕著で、次に苦土

で、石灰は横這いかわずかに減少傾向を示すだけであった。このことは土壤に交換吸着されるイオンの優先順位が、水素>カルシウム>マグネシウム>カリウムの順であるためである²⁾と考えられた。

4. 土壤の物理性改善効果

12年間の仮比重の平均値は、第1層では豚ふん堆肥区が三要素区より小さく有意差が認められた。その他の堆肥施用区も50Mg区は三要素区より仮比重が小さい傾向であった。第2層は有意差が認められなかったが、堆肥50Mg施用区は三要素区より小さい傾向であった。仮比重の平均値と土壤硬度を比較すると(表6, 図3), 仮比重が小さい堆肥50Mg施用区が軟らかい傾向であった。

緻密度の改善基準値20mmに相当する土壤硬度1500kPaに達する深さを見ると(表7), 堆肥50Mg施用区は三要素区より有意に深く、三要素区と無窒素区より変動係数も小さかった。これらの結果は、堆肥50Mg施用区は土壤の物理性が確実に改善されたことを示していると考えられた。

バーク堆肥は物理性改善効果が大きく、土壤孔隙量が増加して膨軟になり、この効果は赤黄色土で大きいと言われている¹⁾。また、木質系資材堆肥のバーク堆肥や家畜ふん木質混合堆肥は肥料の効果や化学性改善効果より、物理性改善効果が大きいとされている²⁾。黒柳らは⁹⁾、おがくず入り牛ふん堆肥を10年間連用した結果、土壤の仮比重が低下し、土壤硬度も減少したと報告している。また、バーク堆肥は地力増進法で指定されている土壤改良資材で、主たる効果は土壤の膨軟化とされている⁹⁾。本試験ではバーク堆肥と共に豚ふん堆肥でも仮比重の減少と土壤の膨軟化傾向が認められた。これは本試験で用いた豚ふん堆肥は木質混合堆肥であるためと推定され、本試験において木質混合堆肥の物理性改善効果が実証されたと考える。しかし、15cm以深で無窒素区が軟らかかった理由は不明であり、今後の検討が必要である。

V おわりに

堆肥連用により土壤中の交換性塩基や可給態リン酸等の養分が蓄積すると、リン酸とカリは堆肥中の養分だけで賄えるようになり、堆肥と窒素質肥料だけで作物収量を落とすことなく、リン酸とカリの無施用又は減肥(60~80%削減)が可能となった。本試験では2007年からリン酸は無施用で実施している。土壤中に蓄積したリン酸は減少しにくいだが、最近堆肥の種類によってはわずかながら減少傾向が認められるようになった。苦土とカリの減少についての原因は完全に

は特定されていないが、堆肥を毎年施用していても減少が続き、カリは不足状態に陥った。このことは定期的な土壤診断が必要であることを示している。

蓄積する養分の種類や量は堆肥の種類により異なる。そのため、堆肥中の肥料成分を考慮した施肥を行うとともに、定期的な土壤診断により養分状態を確認する必要がある。さらに堆肥の施用に当たっては、40年にわたる静岡県内農耕地土壤の実態調査結果¹⁴⁾から明らかのように、リン酸、カリが蓄積した土壤では家畜ふん堆肥以外の堆肥が望ましい。

以上の結果から、定期的に土壤診断を行い、堆肥中の肥料成分を考慮した施肥により過剰施肥にならないように堆肥と化学肥料を適切に併用することが環境にやさしい持続可能な農業を継続していく上で重要であると考えられた。

VI 摘要

黄色土への39年間の堆肥連用がキャベツの収量と土壤理化学性に及ぼす影響について調査した。化学肥料単用の三要素区、無窒素区(三要素-窒素)、稲わら堆肥20Mg区及び50Mg区(20Mg及び50Mg ha⁻¹ y⁻¹施用区)、豚ふん堆肥50Mg区、バーク堆肥50Mg区の6区を設けた。試験開始後21年間は三要素区と同量の化学肥料を併用しながら各種堆肥を連用したが、2002年(22年目)以降は化学肥料削減について検討するため、堆肥施用区の化学肥料の併用量を年度毎かつ元素毎に調節した。堆肥施用区に化学肥料を上乗せ施用した場合のキャベツの収量は、三要素区より平均36%、最大240%増収した。無窒素区は全期間を通して三要素区の12%の収量で推移した。そして22年目から堆肥施用区の化学肥料の併用を停止した時のキャベツの収量は、豚ふん堆肥区を除き大きく低下したが、窒素化学肥料のみの施用でバーク堆肥区を除き収量は三要素区と同程度になり、リン酸は100%、カリは60~100%の削減が可能であった。また窒素化学肥料も23~80%削減可能であった。キャベツ栽培後土壤の全炭素は22年目以降横ばい傾向であったが、全窒素は豚ふん堆肥区を除き、微増傾向であった。可給態リン酸や交換性塩基は堆肥連用により増加し、豚ふん堆肥区は可給態リン酸の蓄積が顕著であった。交換性カリと苦土はカリウム肥料と苦土石灰の併用を停止した27年目から減少した。その原因は施用中止だけでなく、近年増加する傾向にある降水量や降雨強度、そして土壤の比較的低い陽イオン保持能が関与していたと推測された。堆肥連用により土壤の仮比重減少と膨軟化が認められ、物理性改善効果が確認された。

以上の結果から、定期的に土壤診断を行い、堆肥中

の肥料成分を考慮した施肥により、過剰施肥にならないように堆肥と化学肥料を適切に併用することが持続可能な農業を継続していくために重要であると考えられた。

謝 辞

今回報告した堆肥連用試験は1981年から開始され、多くの先輩諸氏の努力により継続実施されてきたものである。本試験に携わった先輩諸氏並びに御協力をいただいた同僚、後輩諸氏に深く感謝の意を表します。

本研究の内、土壤仮比重の測定は「2007-2019 農林水産省・農地土壤炭素貯留等基礎調査事業」により実施したものである。

引用文献

- 1) 土壤保全調査事業全国協議会(2003) : 土壤改良と資材, 日本土壤協会, 東京, 114.
- 2) 藤原俊六郎・安西徹郎・小川吉雄・加藤哲郎(2017) : 土壤肥料用語辞典, 農文協, 東京, 62, 97.
- 3) 糟谷真宏・荻野和明ら(2011) : 牛ふん堆肥または豚ふん堆肥を連用する黄色土野菜畑における5年間の養分動態. 愛知農総試研報, 43. 137-149.
- 4) 金森哲夫(2000):国公立試験研究機関における有機物・肥料等の長期連用試験の現状について. 土肥誌, 71, 286-293.
- 5) 河合 徹・若澤秀幸・堀田 柏・神谷径明(1994):堆きゅう肥の連用が黄色土及び黒ボク土畑土壤に及ぼす影響 第2報 土壤緩衝能と重金属含量に及ぼす影響. 静岡農試研報, 38. 99-106.
- 6) 黒柳直彦・藤田 彰・小田原孝治・兼子 明・渡邊敏明(1997):畑地における有機物の長期連用効果・第2報 作物収量と土壤物理性. 福岡農総試研報, 16
<http://farc.pref.fukuoka.jp/farc/kenpo/kenpo-16/16-15.htm>
- 7) 前原隆史・長友誠・清本なぎさ・別府誠二(2003) : 家畜ふん堆肥を用いた促成インゲンマメのリン, カリ無化学肥料栽培応. 土肥誌・74, 515-518.
- 8) 農研機構 農業環境変動研究センター・中央農業研究センター(2018) : 農地土壤炭素貯留等基礎調査事業調査事業・農地管理実態調査の定点調査及び基準点調査における土壤炭素調査実施方法・13.
- 9) 静岡県経済産業部農業局地域農業課(2017):静岡県土壤肥料ハンドブック, 255. 317. 386-388.
- 10) 静岡県農政部農業技術課(1996) : 土壤・養液・作物体・診断マニュアル, 21-22. 35-39.
- 11) らくらく土壤診断の手引き・1 土壤診断のすすめ方.
http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_sehi_kizyun/tottori01.html
- 12) 上沢正志(1991) : 化学肥料・有機物の連用が土壤・作物収量に与える影響の全国的解析. 農業技術, 46. 393-397.
- 13) 若澤秀幸・河合 徹他(2020) : 静岡県内農耕地と土壤の40年間における土壤化学性の実態と変化. 静岡農林研報, 13. 7-19.
- 14) 若澤秀幸・松浦英之他(1994) : 堆きゅう肥の連用が黄色土及び黒ボク土畑土壤に及ぼす影響 第1報 土壤の理化学性の変化とキャベツ, カンシヨの収量. 静岡農試研報, 38. 85-98.
- 15) 山本 拓・辻 正樹・鈴木良地・糟谷真宏・竹内将充(2016) : 牛ふん堆肥連用キャベツ畑における土壤中形態別リン酸の経時変化. 愛知農総試研報, 48, 101-107.