

高塩類堆肥を用いた野菜栽培での土壌溶液組成および陽イオンバランスの経時変化（1）

ミニトマト栽培の場合

誌名	日本土壌肥料学雑誌 = Journal of the science of soil and manure, Japan
ISSN	00290610
著者名	江波戸,宗大 栗原,三枝
発行元	日本土壌肥料学会
巻/号	80巻2号
巻号補足	
掲載ページ	p. 143-151
発行年月	2009年4月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



高塩類堆肥を用いた野菜栽培での 土壌溶液組成および陽イオンバランスの経時変化 (1) ーミニトマト栽培の場合ー

江波戸宗大^{1,2}・栗原三枝³

キーワード 高塩類堆肥, 尻腐れ果, 土壌溶液組成, ミニトマト, AR^{K+Na}

1. はじめに

近年, 家畜ふん堆肥は土壌改良効果だけでなく, 肥料としての役割も重要視され, 施肥設計の計算に組み込まれるようになってきた (原田・山口, 2001; 藤原, 1991). 2004年11月から「家畜排せつ物の管理の適正化及び利用促進に関する法律 (家畜排せつ物法)」 (平成十一年法律第百十二号) が施行され, ふん尿の素堀り貯留や堆肥の野積みが禁止になり, それ以降に生産されている堆肥は降雨によって無機塩類を洗い流すことができなくなった. また, 出来上がった堆肥を牛舎の敷料または堆肥化の水分調整資材として利用を繰り返す戻し堆肥の製造も行われている. その結果, 堆肥中の塩類濃度が高まる傾向にあり (原田・山口, 1997), 堆肥の塩類濃度に配慮した利用がさらに要求されるようになってきている. 資源の有効利用を促すために「食品循環資源の再生利用等の促進に関する法律 (食品リサイクル法)」 (平成十二年法律第百十六号) や「有機農業推進に関する法律 (有機農業推進法)」 (平成十八年法律第百十二号) が相次いで施行され, 多少難のある堆肥でも利用場面を考慮しなければならない状況にある. 良質堆肥の EC (電気伝導度) 値は 5.0 mS cm^{-1} 以下とされている (農林水産省農蚕園芸局長通達, 1994) が, 原田・山口 (1997) の調査によれば, 牛ふん堆肥の 43% はこの目安を越えている. EC 値が 5.0 mS cm^{-1} 以上の堆肥を高塩類堆肥と定義すると, 高塩類堆肥は肥料成分濃度が高く, 従来の施用量では肥料成分が農耕地に過剰に投入される危険性があり, 作物栽培における高塩類堆肥施肥法を検討する必要がある.

堆肥中の肥料成分は生産農家および生産団体によって多様であり, また, 堆肥を施用される側の土壌においてもその肥沃度は様々である. そのため, 高塩類堆肥の適正な施

用法を判断する時には実際に高塩類堆肥を施用した場合に作物栽培における土壌種の影響を考慮する必要がある. 土壌に堆肥を混合した状態が堆肥の肥料効果をより正確に評価できると考え, 土壌に堆肥を散布・混合した後に土壌溶液中の肥料成分を経時的に追跡する手法を試みた.

高塩類堆肥にはカリウム, ナトリウム, 塩化物イオンが多量に含まれており, 一価の陽イオンであるカリウムやナトリウムが多量に施用されると土壌中の陽イオンバランスが大きく崩れ, 作物の生育を阻害することがある (谷口, 1987). したがって, 高塩類堆肥を施用する場合には土壌の EC だけでなくその陽イオンバランスも考慮しなければならない.

土壌のカリウム供給力を評価する AR^K (Activity ratio for K) は, 土壌溶液のカリウムイオンの活量 (a_K) に対するカルシウムイオンとマグネシウムイオンの活量の和 ($a_{Ca} + a_{Mg}$) の平方根の比であり, $a_K / (a_{Ca} + a_{Mg})^{1/2}$ またはその負の対数 $pK - (1/2)p(a_{Ca} + a_{Mg})$ で表示される (Taylor, 1958; 岡島・松中, 1972). Schofield (1947) によって土壌固相と液相の平衡系においてイオン濃度間に ratio law が成立していると提唱されてから熱力学的平衡理論に基づいて導かれたため, 土壌におけるカリウム供給力の検討 (Beckett, 1963; Wildら, 1969) だけでなく, 土壌の陽イオンバランスを表す指標としても使うことができる.

AR^K は平衡状態ならば値は一定 (Taylor, 1958) で, 値が低いほどカリウムが供給されやすいことを表す. AR^K は土壌の水分含量が多少変化しても値が大きく変動しないのが利点とされており (岡島・松中, 1972), 作物栽培を行っている土壌の水分条件では土壌溶液の陽イオンバランスについて経時変化を追跡する分には AR^K の変動は解析に影響を与えない範囲内に収まると考えられている (Khasawneh and Adams, 1967; 岡島・松中, 1972; 小田原・和田, 1992).

農耕地に対してナトリウムを積極的に施肥することは通常ではありえないため農耕地土壌の陽イオンバランスは AR^K で評価できるが, 高塩類堆肥を施用した土壌では多量に含まれるナトリウムの影響も考慮する必要がある. AR^K 式に似た指標でナトリウムに関係するものとしてナトリウム吸着比 (SAR, sodium adsorption ratio) がある (U. S.

¹ 畜産草地研究所那須研究拠点 (329-2793 那須塩原市千本松 768)

² 現在, 畜産草地研究所御代田研究拠点 (389-0201 北佐久郡御代田町塩野 375-716)

³ 福島県農業総合センター畜産研究所 (960-2156 福島市荒井字地蔵原甲 18)

2008年4月3日受付・2009年2月5日受理

日本土壌肥科学雑誌 第80巻 第2号 p.143~151 (2009)

Salinity Laboratory Staff, 1954).

$$\text{SAR} = \text{Na} (\text{mmol L}^{-1}) / (\text{Ca} (\text{mmol L}^{-1}) + \text{Mg} (\text{mmol L}^{-1}))^{1/2}$$

SARは乾燥地での土壌塩類化を防ぐために米国農務省(USDA)によって灌漑水を評価する指標として開発された。灌漑水からナトリウムが土壌に供給されることで土壌中に存在していたカルシウムやマグネシウムがナトリウムに置換される現象が評価できる。SARと AR^{K} の違いは式に用いる単位であり、SARはモル比であるのに対し AR^{K} は活量比である。水溶液中のイオンの活量はDebye-Hückelの近似式からイオンの活動度係数(f)を求めて各イオン濃度に乗じ、イオンの活動度を算出する(岡島・松中, 1972; 岩田ら, 1980)。

$$-\log f = (Z^2 \cdot 0.509 I^{1/2}) / (1 + I^{1/2}) \quad (25^\circ \text{C})$$

Z: イオンの原子価

I: イオン強度 ($I = (1/2) \sum c_k Z_k^2$)

c: 溶液中のイオン濃度

イオン強度は溶液中の各イオン濃度にその原子価の2乗を乗じた総和の1/2で表されるため、 AR^{K} 式のように比の形にするとイオンの活量に関する情報は定数となる。イオンの活動度は混合溶液における実際のイオンの挙動について理想溶液からのずれを補正するものであり、希薄溶液では1に近い。SARは吸着比と定義されているが、SAR式の分子と分母の構造は AR^{K} 式と同じであり、SARを求めるときにも水によって溶質を抽出することから、SARも広い意味で活量比とみることができる。

本研究の対象である高塩類堆肥の施用はナトリウムやカリウムが多量に含まれ、土壌塩類化の要因となりうる。そこで高塩類堆肥施用時の土壌の陽イオンバランスを評価するために AR^{K} にSARの観点を組み込んだ $\text{AR}^{\text{K+Na}}$ を考案した。

$$\text{AR}^{\text{K+Na}} = -\log((a_{\text{K}} + a_{\text{Na}}) / (a_{\text{Ca}} + a_{\text{Mg}})^{1/2})$$

$\text{AR}^{\text{K+Na}}$ 式は分子に一価の陽イオン、分母に二価の陽イオンをとっており、土壌溶液の陽イオンバランスを見ることができる式への拡張になっている。日本の一般的な農耕地土壌にはナトリウムがほとんどふくまれていないことを

考慮すると $\text{AR}^{\text{K+Na}}$ は AR^{K} と同義になる。 AR^{K} と同様の解釈をすると、 $\text{AR}^{\text{K+Na}}$ は値が低いほどKやNaが供給されやすく、CaやMgが供給されにくいことを表す。

本研究では、高塩類堆肥を用いたミニトマト栽培において、土壌溶液組成および $\text{AR}^{\text{K+Na}}$ を用いた陽イオンバランスの経時変化に注目し、ミニトマトの生育反応に対する高塩類堆肥の影響を評価するとともに、高塩類堆肥のカリウムとナトリウムが土壌におよぼす影響を明らかにすることを目的とした。

2. 材料および方法

供試土壌として、褐色低地土(以後、NBLと表記)を研究所内圃場(那須塩原市)Ap層から、また黒ボク土(以後、NAと表記)を那須岳山麓に分布するA層から採取した。この地域では那須岳に由来する黒ボク土が広く分布しており、ダイコンやホウレンソウ等の野菜畑として利用されている。NBLとNAの理化学性は、pHとEC、交換性ナトリウム・カリウムは同程度、NBLの方が炭素含量、C/N比、有効態リン酸、CECが低く、交換性カルシウム・マグネシウムが多く、塩基飽和度が高かった(表1)。両土壌の生土を2mmメッシュの篩を通した後に1/1000a相当(深さ18cm)の育苗箱につめ、化成肥料区(一般高度化成肥料尿素入り複合磷加安777号、 $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ 170-170-170 kg ha^{-1}) 1 Mg ha^{-1} 、普通堆肥 30 Mg ha^{-1} 、高塩類堆肥 30, 60, 90 Mg ha^{-1} 相当を混入した区を設けた。ミニトマト栽培における堆肥施用の目安は20~30 Mg ha^{-1} である(東京都産業労働局農林水産部, 2007; 滋賀県農政水産部, 2007)。

供試した堆肥の種類、成分、含水率、また堆肥 30 Mg ha^{-1} あたりの養分量を表2に示す。供試した高塩類堆肥は実際に畜産農家で製造された戻し堆肥で、高塩類堆肥としてはEC値が非常に高く、ナトリウムとカリウム濃度が特に高い。

土壌溶液採取器(ダイキ理化学工業株式会社製 DIK-300B)は各育苗箱に3連でポーラス部上端が深さ5cmになるように埋設した。この土壌溶液採取器はpF 2.3までの土壌溶液を採取できる。使用した育苗箱は底面に穴が開いており、重力水は排水される。

表1 供試土壌の理化学性

供試土壌	種類	pH ¹⁾	EC ¹⁾	全炭素 ²⁾	全窒素 ²⁾	C/N	有効態リン酸 ³⁾
		土液比1:5	mS cm ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹		P ₂ O ₅ mg kg ⁻¹
NBL	褐色低地土	6.1	0.067	40	3.4	11.9	461
NA	黒ボク土	5.8	0.056	82	4.8	17.3	873
交換性							
供試土壌		Na cmol _c kg ⁻¹	K cmol _c kg ⁻¹	Ca cmol _c kg ⁻¹	Mg cmol _c kg ⁻¹	CEC cmol _c kg ⁻¹	塩基飽和度 kg kg ⁻¹
NBL		0.02	0.86	3.76	2.06	11.9	0.56
NA		0.16	0.56	2.50	0.31	19.0	0.19

¹⁾ 土液比1:5で1時間振とう後に測定

²⁾ CNコーダーを用いて測定

³⁾ Bray No.2法で測定

表2 供試した堆肥の種類、成分、含水率および堆肥 30 Mg ha⁻¹ 投入した場合の成分量

供試堆肥	種類	水溶性				含水率 kg kg ⁻¹
		Na ₂ O g kg ⁻¹ DM	K ₂ O g kg ⁻¹ DM	CaO g kg ⁻¹ DM	MgO g kg ⁻¹ DM	
普通堆肥	牛ふんおがくず堆肥	0.15	20	78	8.3	0.29
高塩類堆肥	牛ふんおがくず堆肥	7.9	70	51	8.1	0.41

供試堆肥	EC mS/cm	N g kg ⁻¹ DM	P ₂ O ₅ g kg ⁻¹ DM	水溶性			
				Na ₂ O g kg ⁻¹ DM	K ₂ O g kg ⁻¹ DM	CaO g kg ⁻¹ DM	MgO g kg ⁻¹ DM
普通堆肥	1.8	13	42	0.13	9	2	1.9
高塩類堆肥	12.4	23	32	7.0	45	3	2.7

30 Mg ha ⁻¹ 投入 した場合の成分量		N kg ha ⁻¹	P ₂ O ₅ kg ha ⁻¹	Na ₂ O kg ha ⁻¹	K ₂ O kg ha ⁻¹	CaO kg ha ⁻¹	MgO kg ha ⁻¹
普通堆肥		280	883	3	418	1,659	176
高塩類堆肥		400	561	140	1,234	893	144

表3 ミニトマト栽培における栽培期間、果実収穫期間および土壌溶液採取期間

ミニトマト栽培				果実収穫		土壌溶液採取	
		期間	日数 (日)	期間	日数 (日)	期間	回数 (回)
実験1	NBL 褐色低地土	2004/4/2~8/2	122	2004/6/12~8/2	52	2004/4/13~6/9	6
	NA 黒ぼく土	2005/5/8~8/11	95	2005/7/15~8/11	28	2005/5/16~8/7	13
実験2	NA 黒ぼく土	2006/4/13~8/13	122	2006/6/23~7/27	35	2006/4/25~8/13	9

ミニトマトはレッドペア (タキイ種苗) を用い、ミニトマト苗2株を育苗箱に移植し、温室で栽培した。具体的な栽培年月日、栽培期間、収穫期間、土壌溶液採取期間を表3に示す。2004年にNBLとNAを用いてミニトマトを栽培したが、NAで尻腐れ果が発生し、その当時は理由が分からず実験失敗と判断したため、土壌溶液の採取期間が短くなっている。2004年にはNBLによる栽培を、2005年にはNAによる栽培をそれぞれ2連で行い、片方に土壌溶液採取装置を埋設し、他方はミニトマト一段目果実収穫後に破壊的に土壌を採取してECを測定した (実験1)。土壌採取はNBLでは移植後72日目に、NAでは移植後70日目に行った。

灌水は、週に一度、土壌溶液を採取する前に24時間程度の時間を空けて、各処理区に1.5 Lの水道水を与えた。土壌水分管理はミニトマトの葉の状態を見て行い、夏場の蒸発散が多い時期は2.0 L程度の水道水を与えた。土壌は乾燥気味で管理していたため、分析に供試する土壌溶液を採取する前に土壌溶液が採取できるか確認を行い、土壌溶液量が少ないもしくは採取できない場合は灌水を行って、24時間程度の時間を空けてから土壌溶液を採取した。

2006年に同じNAを用いて高塩類堆肥0, 10, 20 Mg ha⁻¹相当を混入した区を設け、土壌溶液採取条件は上述の実験と同様に設定し、ミニトマトの栽培処理と非栽培処理を2004年、2005年に栽培したのと同様に生育しているのを確認しながら1連で行った (実験2)。

土壌はミニトマト栽培前後について、交換性塩基、水溶性塩基 (土液比1:5) を炎光法および原子吸光法 (日立偏光ゼーマン原子吸光光度計Z2310) で測定した (土壌標準分析・測定法委員会編, 1986)。土壌溶液の陽イオンは、ナトリウム、カリウム、カルシウム、マグネシウムイオンを炎光法および原子吸光法で、陰イオンは、塩化物、硝酸、亜硝酸、リン酸、硫酸イオンをイオンクロマトグラフィー (ダ

イオネクス ICS-1500) で測定した。

AR^{K+Na}は土壌溶液の陽イオンおよび陰イオン濃度測定値から、前述の式を用いて計算を行った。

ミニトマトは各ポット (2株) あたりの果実数と尻腐れ果の個数を計測した後、新鮮重とBRIX糖度を測定した。果実の尻が黒変していたものを尻腐れ果とした。BRIX糖度は統計解析ソフトウェアR version 2.6.0 (Ihaka and Gentleman, 1996) を用いて正規性、等分散性を検討し、分散分析後にTukey法を用いて多重比較を行った。

3. 結果と考察

1) ミニトマト栽培前後の土壌における塩基量の変化

ミニトマト栽培前後の交換性および水溶性塩基の変化について図1に示した。NBLとNAに共通して、カルシウムとマグネシウムは交換性が、ナトリウムは水溶性が大部分を占めた。カリウムは交換性が多いが、水溶性も交換性に比較して半分以下の割合で存在し、カルシウム・マグネシウムとナトリウムの中間的な構成であった。栽培後の高塩類堆肥区では、施用量が増加するにつれ、全ての塩基で交換性が増加していた。水溶性ナトリウムとカリウムは交換性と同様に施用量の増加とともに増加する傾向にあったが、水溶性カルシウムとマグネシウムはそのような傾向が見られなかった。また、カリウムの総量はナトリウムの総量よりも相対的に多いに関わらず、水溶性はナトリウムの方が多い傾向にあり、ナトリウムはカリウムより土壌溶液に溶出しやすかった。普通堆肥区 (30 Mg ha⁻¹) と高塩類堆肥区 (30 Mg ha⁻¹) を比較すると (表2)、普通堆肥は高塩類堆肥よりナトリウムやカリウム含量が少なく、カルシウムやマグネシウム含量が高いことを反映し、栽培後でもナトリウムとカリウムは低く、カルシウムとマグネシウムは高かった。化成肥料区は必要最小限度だったため、栽培後の塩基量は栽培前を維持もしくはそれを下回っていた。

2) ミニトマト栽培期間における土壌溶液組成の経時変化
土壌溶液中の陽イオンおよび陰イオン濃度を各処理区ごとに図2,3に示した。陰イオンのうち、亜硝酸、リン酸イオンはほとんど検出されず、グラフには表示していない。

NBL, NAともに土壌溶液中のイオン濃度は普通堆肥区では低く、高塩類堆肥では施用量の増加とともに高くなり、塩化物イオン濃度が高い傾向にあった。また、高塩類堆肥区では、土壌溶液中のイオン濃度が高い状態で長期間維持

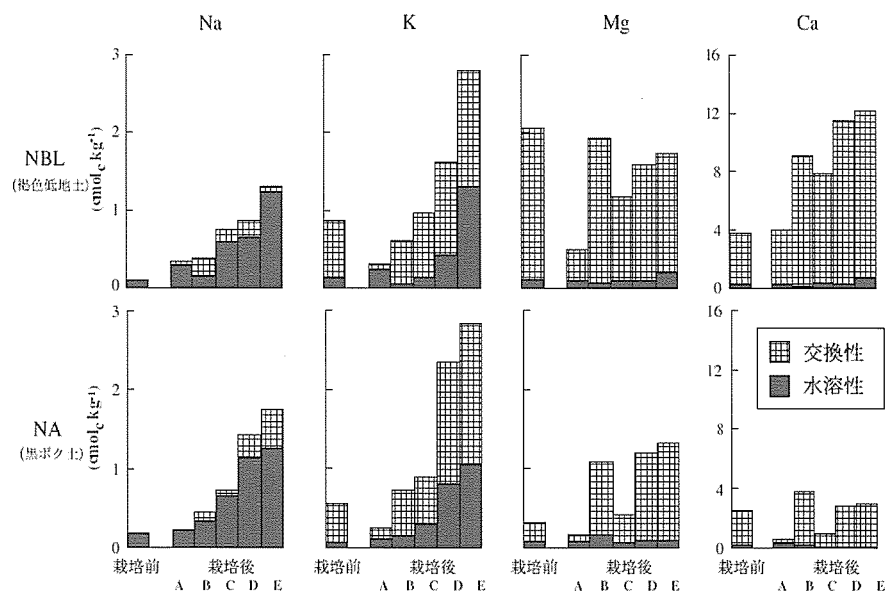


図1 ミニトマト栽培前後のNBL（褐色低地土）およびNA（黒ボク土）の交換性・水溶性塩基含量の変化

A：化成肥料区, B：普通堆肥区 (30 Mg ha^{-1}), C：高塩類堆肥区 (30 Mg ha^{-1}), D：高塩類堆肥区 (60 Mg ha^{-1}), E：高塩類堆肥区 (90 Mg ha^{-1})

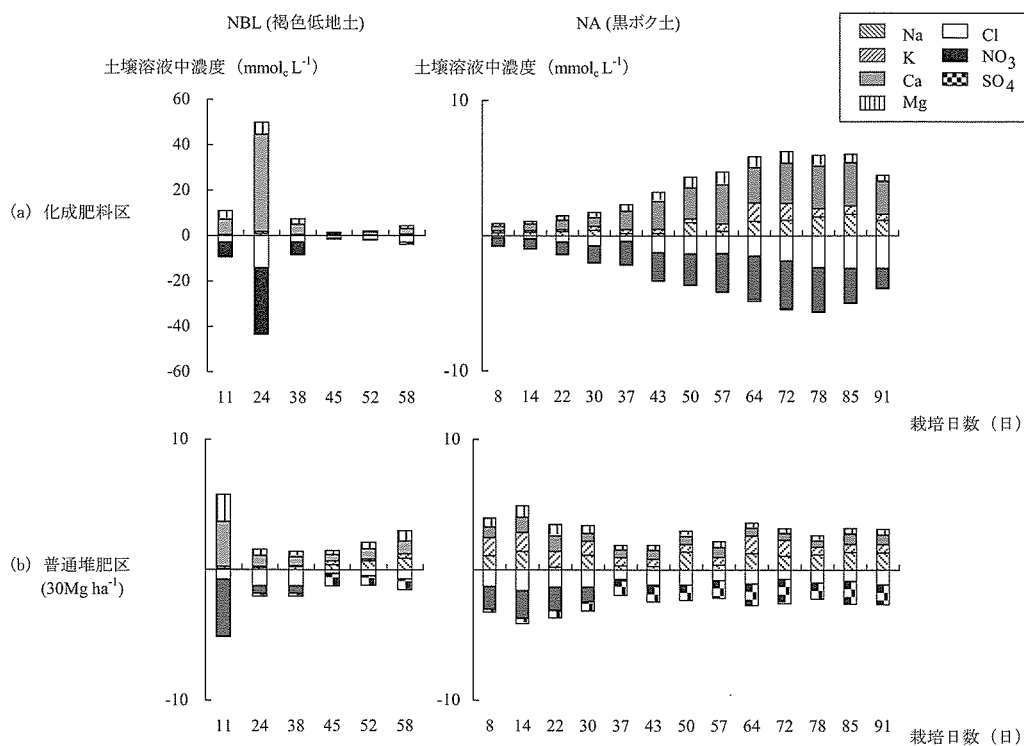


図2 NBL（褐色低地土）およびNA（黒ボク土）について化成肥料区、普通堆肥区における陽イオン・陰イオン濃度の経時変化

(a)：化成肥料区, (b)：普通堆肥区 (30 Mg ha^{-1}) (陽イオンは+, 陰イオンは-で表示)

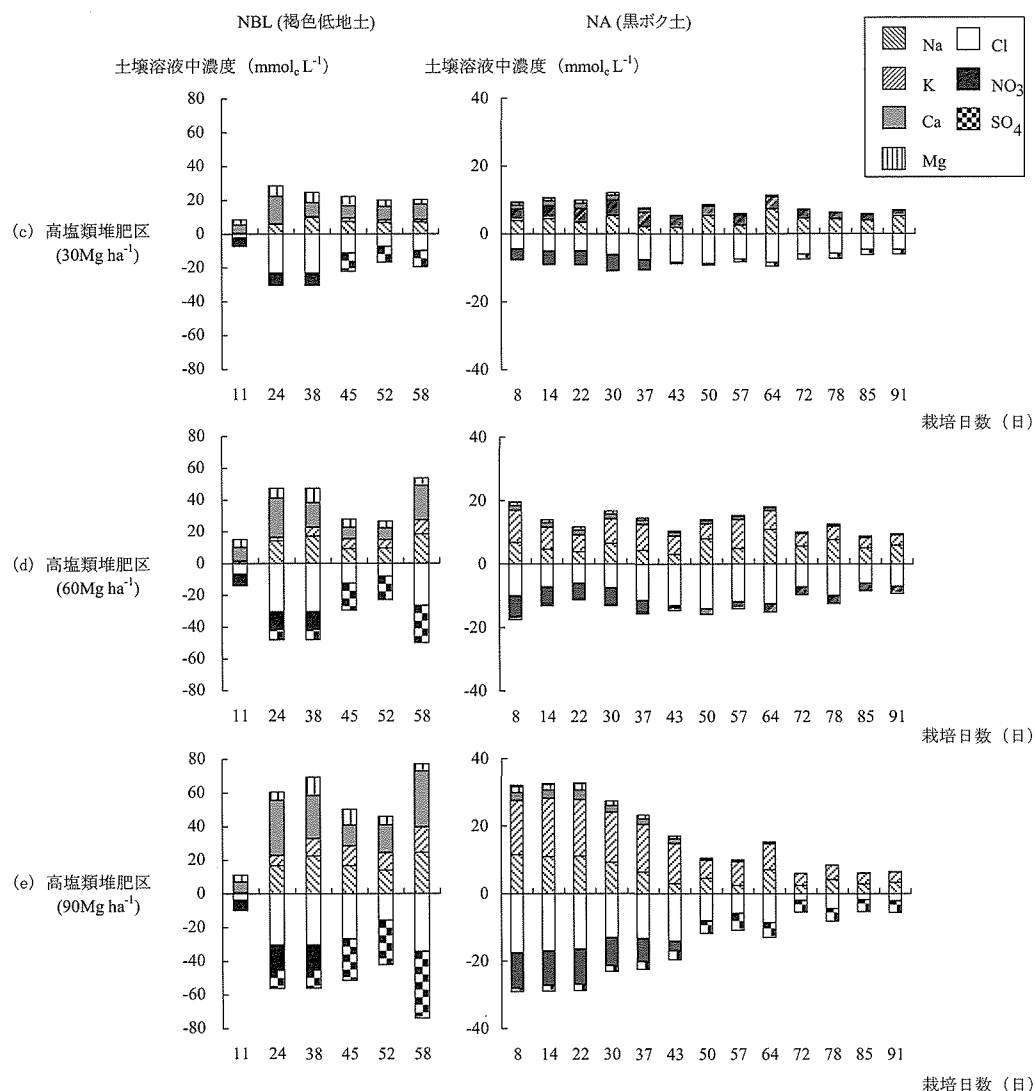


図3 NBL (褐色低地土) および NA (黒ボク土) について高塩類堆肥区における陽イオン・陰イオン濃度の経時変化

(c) : 高塩類堆肥区 (30 Mg ha⁻¹), (d) : 高塩類堆肥区 (60 Mg ha⁻¹), (e) : 高塩類堆肥区 (90 Mg ha⁻¹) (陽イオンは+, 陰イオンは-で表示)

されていた。化成肥料区について、NBLでは施肥直後にカルシウム、塩化物、硝酸イオン濃度が高く、その後すぐに低くなったが、NAでは施肥直後から土壌溶液中のイオン濃度が低かった。NAの化成肥料区と高塩類堆肥区 (90 Mg ha⁻¹) を除く全ての処理区で硝酸イオンは37, 38日あたりでほとんど検出されなくなった。硝酸イオン濃度の減少に伴い、硫酸イオン濃度が増加していた。また、高塩類堆肥施用量が増加すると土壌溶液中の硫酸イオン濃度も増加していた。これらのことから、土壌溶液中の陽イオン総量に釣り合わせるために硫酸イオンが土壌溶液中に溶出してきたと思われる。この現象は亀和田ら (Kamewada and Takahashi, 1996; Kamewada, 1996) の研究でも認められ、硫酸イオンが土壌溶液イオン強度を維持するためのレギュレーターとして作用し、ミニトマト生育後期における重要な陰イオン種となっていた。

3) ミニトマトの収量、尻腐れ果発生割合およびBRIX濃度

今回の栽培条件では、NBLの方がNAよりはるかに収量および収穫個数が多かった (表4)。NAでは、化成肥料区は生育不良のため、果実は収穫できなかった。普通堆肥区でも収穫個数は少なかったが、NAのような化成肥料だけでは栽培しにくい土壌でも堆肥の施用が作物生育に良い効果をもたらすことが確認された。NAでは高塩類堆肥区全てにおいて尻腐れ果が発生したため、収量および個数が伸びなかった。尻腐れ果はCa欠乏症である (Evans and Troxler, 1953; Geraldson, 1985)。図1においてNAの交換性カルシウムは化成肥料区や高塩類堆肥区 (30 Mg ha⁻¹) ではかなり少ないが、他の区では3~4 cmolc kg⁻¹程度は存在しており、植物体に全部吸収されてはいなかった。有機物施用により土壌中の交換性カルシウム量は増加するが (大西ら, 1984)、作物のカルシウム吸収量に増加は認め

られない(大西・佳山, 1980; 伊藤ら, 1982)ことから有機物によるカリウムの富化がカルシウム吸収を拮抗的に阻害しているとの推測がなされており, 高塩類堆肥の施用はその現象をさらに助長したと考えられた. 正常にミニトマトが生育したNBLでの収量, 収穫個数における処理間の比較では, 養分量の少ない普通堆肥区では低かったが, 他の4処理区についてはほぼ同水準であった. その4処理区について果実1個あたり新鮮重とBRIX糖度を比較すると, 高塩類堆肥区では軽く, 糖度が高い傾向にあった. トマト栽培では灌水量を抑えることで水分ストレスをかけて品質の向上を図る手法を用いたりする(武井, 1991)が, 今回のミニトマト栽培では高塩類堆肥区の土壌溶液中のイオン濃度が高くなったことで植物体が水分を吸収しにくくなり, 水分ストレスがかかったと考えられた(Mizrahi and Pasternak, 1985). 高塩類堆肥区について比較すると, 60 Mg ha⁻¹ 処理で一番BRIX糖度が高かった. 土壌溶液中のイオン濃度が高いほどBRIX糖度も上がるのではなく, 品質としてBRIX糖度を上げるには土壌溶液中のイオン濃度および組成の適度な範囲があることが推察された.

4) ミニトマト栽培期間における陽イオンバランスの経時変化

土壌溶液組成の適正值に関する考察には溶液栽培の培養液処方が参考になる(表5). 土壌溶液中の陽イオンについてCa/Mg比およびMg/K比を培養液処方について計算したものと比較した(図4). 培養液処方が分布している辺り

が適正範囲だとすると, NBLではCa/Mg比は適正だが, Mg/K比が高いものが多かった. 一方, NAでは, 化成肥料区では適正範囲よりも真上から右斜め上に分布し, 普通堆肥区はほぼ適正範囲内, 高塩類堆肥区はMg/K比が適正範囲よりも低く分布していた. 今回用いたNBLとNAでは同じ堆肥を施用しても土壌溶液中の陽イオンバランスの傾向が異なっていた. NAの普通堆肥区が陽イオンのバランスが一番良かったが, 表3で示されたようにミニトマト果実の収量が少なく, バランスは良くてもカリウム, カルシウム, マグネシウム合計量が少ないことが反映されていた(図2, 3, 表5).

化成肥料区や普通堆肥区については, 従来用いられてきたCa/Mg比およびMg/K比で陽イオンバランスを評価できたが, 高塩類堆肥区の土壌溶液は前述のようにナトリウムを多量に含んでいるため, Ca/Mg比およびMg/K比だけでは土壌溶液中の陽イオンバランスを適正に評価できているとは言い難い. そこで, AR^{K+Na}を用いて土壌溶液における陽イオンバランスの経時変化を解析した(図5). 0日目のAR^{K+Na}値は化成肥料および堆肥施用前の土壌の値である. NBLではAR^{K+Na}値は全ての処理区でいったん上昇し, 減少した. 高塩類堆肥区は40日目辺りで減少が止まり, 値が一定になる傾向にあった. AR^{K+Na}初期値は両土壌でほぼ等しかったが, NAでは, 化成肥料区および普通堆肥区で始めからやや低下, 高塩類堆肥区では急激に低下し, すぐに値が一定になる傾向にあり, NA全ての区において60日

表4 NBL(褐色低地土)およびNA(黒ボク土)でのミニトマト栽培における各処理ごとのミニトマト収量, BRIX糖度および尻腐れ果の発生状況

供試土壌	処理区	ミニトマト収量 2株/(1/1000aポット)			BRIX糖度 平均値 %	尻腐れ果 個	尻腐れ果 発生個数率 %
		g	個	g/個			
NBL (褐色低地土)	化成肥料区	1,278	94	13.6	6.1 a	0	0
	普通堆肥区 30 Mg ha ⁻¹	229	24	9.6	6.1 a	0	0
	高塩類堆肥区 30 Mg ha ⁻¹	1,194	102	11.7	6.5 b	0	0
	高塩類堆肥区 60 Mg ha ⁻¹	1,001	99	10.1	7.2 c	0	0
	高塩類堆肥区 90 Mg ha ⁻¹	1,223	116	10.5	6.8 d	0	0
NA (黒ボク土)	化成肥料区	—	—	—	—	—	—
	普通堆肥区 30 Mg ha ⁻¹	206	25	8.2	6.2 a	0	0
	高塩類堆肥区 30 Mg ha ⁻¹	408	50	8.2	6.6 a	15	30
	高塩類堆肥区 60 Mg ha ⁻¹	419	67	6.2	6.6 a	37	55
	高塩類堆肥区 90 Mg ha ⁻¹	460	88	5.2	6.8 a	38	43

尻腐れ果発生個数率(%)=(尻腐れ果個数)/(収穫個数)×100

黒ボク土化成肥料区は生育不良のため, 果実の収穫はできず

BRIX糖度平均値の異符号間には有意差あり

表5 培養液処方の組成とCa/Mg, Mg/K, AR^{K+Na}

培養液処方	対象作物	K	Ca	Mg	K+Ca+Mg	Ca/Mg	Mg/K	AR ^{K+Na}
		mmol/L	mmol/L	mmol/L	mmol/L			
園芸試験場標準	各種	8.0	4.0	2.0	14.0	2.0	0.3	0.59
山崎	トマト	8.0	5.0	2.0	15.0	2.5	0.3	0.63
神奈川園試	トマト	6.0	5.0	2.0	13.0	2.5	0.3	0.76
大塚化学B	各種	8.0	3.6	2.0	13.6	1.8	0.3	0.58
片岡チッカリン	トマト	3.9	1.5	0.9	6.3	1.7	0.2	0.75
多木化学(液肥)	トマト	3.2	1.5	1.0	5.6	1.5	0.3	0.83
清和ナス科	トマト, ナス	8.3	2.4	1.5	12.2	1.7	0.2	0.49
全農	トマト, パラ	8.9	5.0	1.7	15.6	3.0	0.2	0.57
平均						2.1	0.2	0.65

目盛りでさらに AR^{K+Na} 値が減少する傾向にあった。この結果とミニトマトの生育と照らし合わせてみると、栽培日数が60日前後の一段目果実の形成開始時期に AR^{K+Na} 値が -0.1 より低い場合に尻腐れ果が発生していた。この値は表5の培養液処方組成から計算した値よりもはるかに低かった。

作物栽培期間に簡便に土壌の塩類濃度を調査する方法として土壌ECの測定が想定されたため、ミニトマト一段目果実収穫前後の AR^{K+Na} 値と採取した土壌のEC値を表6に示す。高塩類堆肥の施用量の増加に伴ってARは減少しECは増加したが、両土壌区とも土壌EC値は作物栽培では問題ない程度であった。また、NBLではNAより土壌EC値が高くて障害が発生しなかったため、土壌EC値から尻腐れ果の発生を予測することは難しいと思われる。ミニトマトの尻腐れ果発生と AR^{K+Na} との因果関係について

はさらなる検討の余地があるが、今回の栽培試験において AR^{K+Na} はミニトマトの尻腐れ症の発生を収穫初期あるいは収穫前に予測するための指標として活用できることが示唆された。

同じNAを用いて無施肥区、高塩類堆肥10, 20 $Mg\ ha^{-1}$ 施用区について実験した結果(実験2)、尻腐れ果は発生せず、果実の形成開始時期には AR^{K+Na} 値が実験1における尻腐れ果発生時よりも高かった(図6)。ミニトマト栽培処理と非栽培処理を比較すると、 AR^{K+Na} の推移は同様の傾向であったが、非栽培処理は栽培処理の推移を右上がりにした形状であった。Yanaiら(1995)は4種の土壌でトウモロコシの栽培処理と非栽培処理について経時的に AR^K を測定した結果、全ての土壌において、トウモロコシ非栽培処理は AR^K が経時的に一定の値を示し、トウモロコシ栽培処理は AR^K が次第に高くなり、植物に養分が吸収される

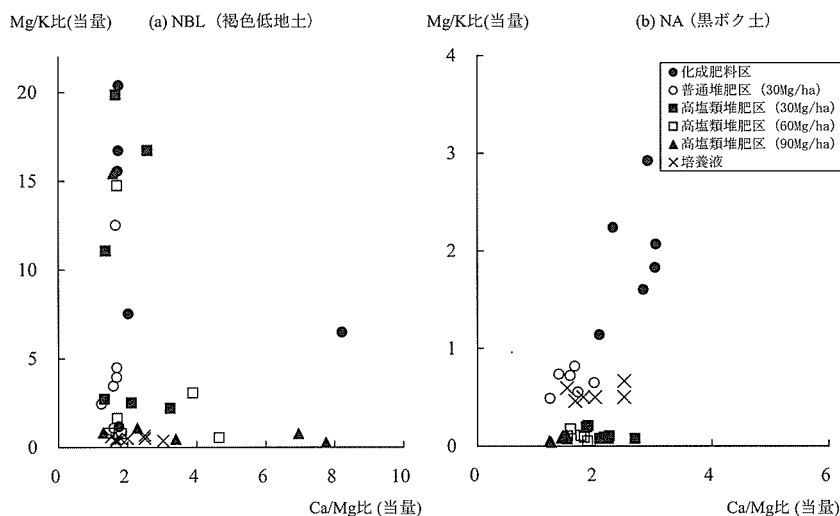


図4 培養液処方と土壌溶液中のK, Ca, Mg濃度より算出したCa/Mg比およびMg/K比 (a) NBL (褐色低地土), (b) NA (黒ボク土)

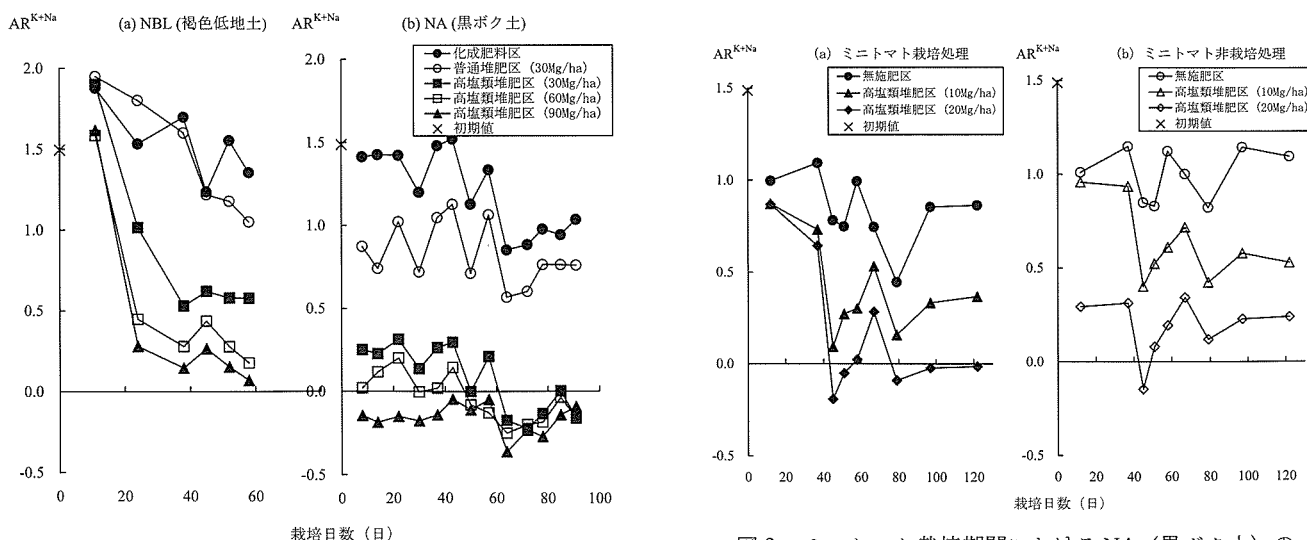


図5 ミニトマト栽培期間における AR^{K+Na} の経時変化 (a) NBL (褐色低地土), (b) NA (黒ボク土) 初期値は堆肥施用前の AR^{K+Na} 値

図6 ミニトマト栽培期間におけるNA (黒ボク土) の AR^{K+Na} の経時変化 (a) ミニトマト栽培処理, (b) ミニトマト非栽培処理 初期値は堆肥施用前の AR^{K+Na} 値

表6 NBL(褐色低地土) およびNA(黒ボク土)でのミニトマト一段目果実収穫後における各処理ごとの土壌ECとその直前に測定した AR^{K+Na}

供試土壌	処理区	土壌EC ^{注)} mS cm ⁻¹	AR^{K+Na}
NBL (褐色低地土)	化成肥料区	0.06	1.35
	普通堆肥区	30 Mg ha ⁻¹	1.05
	高塩類堆肥区	30 Mg ha ⁻¹	0.58
	高塩類堆肥区	60 Mg ha ⁻¹	0.18
	高塩類堆肥区	90 Mg ha ⁻¹	0.07
NA (黒ボク土)	化成肥料区	0.13	0.85
	普通堆肥区	30 Mg ha ⁻¹	0.57
	高塩類堆肥区	30 Mg ha ⁻¹	-0.17
	高塩類堆肥区	60 Mg ha ⁻¹	-0.25
	高塩類堆肥区	90 Mg ha ⁻¹	-0.36

注) ミニトマト一段目果実収穫に合わせて、NBLでは移植後72日目、NAでは移植後70日目の測定データ

ことによって相対的にカリウム供給力が下がることを示した。図5はYanaiら(1995)とは異なる結果であった。ミニトマト栽培処理では AR^{K+Na} の経時変化は変動幅が小さかったが、先に行ったNAでの栽培と同様の傾向が見られた。また、ミニトマト栽培処理の方が非栽培処理と比較して AR^{K+Na} 値が低くなるように推移している理由として、今回用いたNAでは土壌溶液に溶出されてくるカルシウムイオン量が始めの段階から少なかったが、ミニトマトに吸収されることによってさらに減少し、カリウムやナトリウムも植物体に吸収はされるものの、土壌溶液中のナトリウムとカリウムイオン量が相対的に多くなった結果と考えられた。

本研究における土壌溶液の陽イオンバランスの変化やミニトマト尻腐れ果の発生を鑑みると、現在生産されている塩類濃度の高い堆肥は家畜排せつ物法以前の土壌改良資材的要素の高い堆肥とは異なり、塩類濃度だけでなく塩基バランスにも考慮する必要がある。非破壊的に採取できる土壌溶液のイオン濃度を基に算出する AR^{K+Na} はその採取時点での土壌の状態を評価できるため、 AR^{K+Na} を用いることでミニトマト尻腐れ症の発生を果実収穫前あるいは収穫初期に予測することが可能になると考えられた。

4. 要 約

近年、日本では畜産農家によるふん尿の野積みを制限する法律が施行された。その結果、塩分濃度、特にカリウムおよびナトリウム濃度の高い高塩類堆肥が生産されつつある。これらの堆肥は塩分濃度が高いため、野菜栽培における適切な高塩類堆肥施用量を判断するのは難しい。本研究では、土壌溶液の組成および陽イオンバランスの経時変化に注目し、高塩類堆肥を用いたミニトマト栽培を調査した。ミニトマトを化成肥料、普通堆肥、高塩類堆肥を用いて、褐色低地土(NBL)および黒ボク土(NA)でポット栽培すると、普通堆肥区では土壌溶液中の陽イオン濃度は低く推移していた。一方、高塩類堆肥施用量が増加するにつれ、土壌溶液中のイオン濃度は上昇し、ミニトマト栽培期間中、土壌溶液中のイオン濃度が高い状態で維持されていた。NA

への高塩類堆肥施用では、ミニトマト果実に尻腐れ果が発生した。尻腐れ果はCa欠乏によることが知られている。高塩類堆肥施用により土壌溶液中のカリウムやナトリウム濃度が劇的に上昇したことから、1価陽イオンに対するカルシウムイオンの相対的な割合がこの現象を引き起こす鍵になる要因だと考えられた。カリウムとナトリウムの活量比である AR^{K+Na} を新たな指標として導入し、土壌溶液における陽イオン組成を定量的に評価できた。 AR^{K+Na} を用いた解析から、一段目果実の形成開始時期に AR^{K+Na} 値がある水準よりも低い場合に尻腐れ果が発生すると考えられた。高塩類堆肥施用量を20 Mg ha⁻¹以下に減らしたNAにおける実験では、尻腐れ果は発生せず、果実の形成開始時期には AR^{K+Na} 値が尻腐れ果が発生した時よりも高かった。

謝 辞：本研究は農林水産省委託プロジェクト「農林水産バイオリサイクル(畜産エコ)」(平成14~18年度)により実施されたものであり、関係された方々のご協力に深く感謝いたします。また、CNの測定には畜産草地研究所那須研究拠点草地多面的機能研究チーム長 寶示戸雅之氏にご協力頂きました。ここに深く謝意を表します。

文 献

- Beckett, P. 1963. Potassium-calcium exchange equilibria in soils: specific adsorption sites for potassium. *Soil Sci.*, **97**, 376-383.
- 土壌標準分析・測定法委員会編 1986. 土壌標準分析・測定法. p. 70-160. 博友社, 東京.
- Evans, H. J., and Troxler, R. V. 1953. Relation of calcium nutrition to the incidence of blossom-end rot in tomatoes. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **61**, 346-352.
- 藤原俊六郎 1991. 三浦市農業にみる低投入持続型農業. *農業技術*, **46**, 509-513.
- Geraldson, C. M. 1985. Control of blossom-end rot of tomatoes. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **69**, 309-317.
- 原田靖生・山口武則 2001. 家畜排せつ物の環境保全的利用. 安田 環・越野正義共編 環境保全と新しい施肥技術, p. 78-115. 養賢堂, 東京.
- 原田靖生・山口武則 1997. 家畜排せつ物堆肥の品質の実態と問題点. 環境保全と新しい畜産, p. 229-246. (社) 農林水産技術情報協会, 東京.
- Ihaka, R., and Gentleman, R. 1996. R: a language for data analysis and

- graphics. *J. Comp. Graph. Stat.*, 5, 299–314.
- 伊藤祐二郎・塩崎尚郎・橋元秀教 1982. 多腐植質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. 九農試報, 22, 259–320.
- 岩田進午・三輪睿太郎・井上隆弘・陽 捷行 訳 1980. 化学平衡. Bolt, G. H., and Bruggenwert M. G. M. 編 土壌の化学, p. 15–42. 学会出版センター, 東京.
- Kamewada, K., and Takahashi, Y. 1996. Increase in cation adsorption induced by surface complexation of sulfate on Andisol and prediction by 'Four-plane model'. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 42, 785–799.
- Kamewada, K. 1996. Application of 'Four-plane model' to the adsorption of K , NO_3^- , and SO_4^{2-} from a mixed solution of KNO_3 and K_2SO_4 on Andisol. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 42, 801–808.
- Khasawneh, F. E., and Adams, F. 1967. Effect of dilution on calcium and potassium contents of soil solutions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 31, 172–176.
- Mizrahi, Y., and Pasternak, D. 1985. Effect of salinity on quality of various agricultural crops. *Plant and Soil*, 89, 301–307.
- 農林水産省農蚕園芸局長通達 1994. たい肥等特殊肥料に係る品質保全推進基準について. 6農蚕第4849号
- 大西成長・佳山良正 1980. トマトの生育とミネラル分布に及ぼす過剰厩肥の影響. 生物環境調節, 18, 111–117.
- 大西成長・吉田光二・佳山良正 1984. 施設栽培における厩肥連用が土壌の化学性に及ぼす影響. 土肥誌, 55, 311–315.
- 小田原孝治・和田信一郎 1992. 土壌溶液希釈過程における AR^k の不変性の理論解析. 土肥誌, 63, 64–71.
- 岡島秀夫・松中照夫 1972. 土壌のカリウム供給力測定法としての AR^k , PBC^k の評価 (その1) AR^k について. 土肥誌, 43, 409–416.
- Shofield, R. K. 1947. A ratio law governing the equilibrium of cations in the soil solution. *Proc. 11th Int. Congr. Pure Appl. Chem.*, 3, 257–261.
- 滋賀県農政水産部 2007. 環境こだわり農業営農技術指針 第4章 4. (23) ミニトマト (施設長期, 施設半促成, 施設抑制). <http://www.pref.shiga.jp/g/kodawari/kodawari-shishin/423.pdf>
- 相馬 暁 1985. 野菜のタイプと施肥, 農業技術大系 土壌施肥編 第6巻 技術. p. 69–77. (社) 農山漁村文化協会, 東京.
- 武井昭夫 1991. 塩集積土壌と作物の品質, 塩集積土壌と農業. 日本土壌肥料学会編. p. 177–204. 博友社, 東京.
- 谷口健雄 1987. 石灰, 苦土の動態と吸収. 農業技術大系 土壌施肥編 第1巻 土壌と根圏 III. p. 24–29. (社) 農山漁村文化協会, 東京.
- Taylor, A. W. 1958. Some equilibrium solution studies on Rothamsted soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 22, 511–513.
- 東京都産業労働局農林水産部 2007. 持続性の高い農業生産方式の導入指針 トマト・ミニトマト. http://www.sangyo-rodo.metro.tokyo.jp/norin/nogyo/eco/houshiki/44_040_tomato.pdf
- U. S. Salinity Laboratory Staff 1954. Diagnostic and improvement of saline and alkali soil. USDA Handbooks No. 6, p. 485. New York.
- Wild, A., Rowell, D. L., and Ogunfowora, M. A. 1969. The activity ratio as a measure of the intensity factor in potassium supply to plants. *Soil Sci.*, 108, 432–439.
- Yanai, J., Araki, S., and Kyuma, K. 1993. Use of a looped hollow fiber sampler as a device for nondestructive soil solution sampling from the heterogeneous root zone. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 39, 737–743.
- Yanai, J., Araki, S., and Kyuma, K. 1995. Effect of plant growth on the dynamics of the soil solution composition in the root zone of maize in four Japanese soils. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 41, 195–206.
- Wild, A., Rowell, D. L., and Ogunfowora, M. A. 1969. The activity ratio as a measure of the intensity factor in potassium supply to plants. *Soil Sci.*, 108, 432–439.

Time course transition of soil solution composition and its cation balance during vegetable cultivation
using Salt-concentrated compost (1)
— In the case of mini tomato cultivation —

Munehiro EBATO^{1,2} and Mitsue KURIBARA³

¹National Institute of Livestock and Grassland Science, Nasu Research Station,

²Present address: National Institute of Livestock and Grassland Science, Miyota Research Station,

³Livestock Industry Research Center, Fukushima Agricultural Technology Center

Recently, Japan has placed a legal restriction on the stacking of livestock manure in the fields owned by livestock farmers. As a result, compost containing a large amount of sodium and potassium (salt-concentrated compost), has been made from the manure. Due to the high amount of salt, it is difficult to determine the suitable amount of salt-concentrated compost to use for vegetable cultivation in the field. This study aimed to clarify the effects of salt-concentrated compost on mini tomato (*Solanum lycopersicum*) growth and on soil by investigating the time course transition of soil solution composition and its cation balance. Mini tomatoes were cultivated in pots filled with an Andosol and a Brown lowland soil (Fluvisol) applied with chemical fertilizer, normal compost or salt-concentrated compost. The concentration of soil solution transited at a low level after normal compost application. However, the concentration of soil solutions increased in accordance with the amount of salt-concentrated compost applied, and was maintained at a high level during mini tomato cultivation. The application of salt-concentrated compost to the Andosol caused a blossom-end rot disease to the mini-tomato fruits. Blossom-end rot is known as a response to calcium deficiency. Since the application of the salt-concentrated compost drastically increased the concentration of potassium and sodium in the soil solution, it was suggested that the relative ratio of calcium to monovalent cations was a key factor causing the symptom. By introducing a new index for the activity ratio for potassium plus sodium, i.e. AR^{K+Na} , composition of cations in the soil solution could be evaluated quantitatively. Based on the analyses using AR^{K+Na} , it was found that blossom-end rot occurred when AR^{K+Na} value became too low and exceeded some level (-0.1 in the present case) while mini tomato fruit was constituted at the first branch. In the case that the amount of salt-concentrated compost applied to the Andosol was reduced to be 20 Mg ha^{-1} or less, the values of AR^{K+Na} were higher than the value when blossom-end rot had occurred, and the blossom-end rot did not occur.

Key words: AR^{K+Na} , blossom-end rot, mini tomato, salt-concentrated compost, soil solution composition

(Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr., 80, 143–151, 2009)