研究論文

マサ土の塩類集積時における電気伝導度測定法と トマト生育との関係

富井春幸^{*,**}・上野秀人^{*}・当真 要^{*}

^{*}愛媛大学連合農学研究科, ^{**}EM 研究機構

Relationships between Methods of Electron Conductivity for Masa Soil and Effects on Tomato Growth
under Saline Condition

Haruyuki TOMII^{*,**}, Hideto UENO^{*} and Yo TOMA^{*}

^{*}United Graduate School of Agricultural Sciences, Ehime University

^{**}EM Research Organization

土壌中の塩分は作物生産に深刻な影響を与える主要な環境要因の1つであり、土壌特性は植物の塩ストレスに影響をおよぼす。土壌中の塩分は、測定容易さから土壌水懸濁液(1:5)の電気伝導度(EC)を測定することが一般的であるが、土壌飽和抽出液を用いて測定するECeも一部用いられている。本研究においてECe改良測定法を開発し、腐植含量とCECが低いマサ土(花崗岩母材)にNaClを添加して、ECとECeの比較や関係性を調べたところ、ECeはわずかな塩分でも増加し、その値はEC(1:5)値の19倍を示した。さらに、4段階濃度のNaClを添加したマサ土でトマトを栽培すると、塩濃度とともにトマト地上部のNa濃度が増加し、K/Na比とCa/Na比が低下した。EC(1:5)が0.6 dS/m(ECe=10.8 dS/m)で明らかな塩害症状が確認され、0.8 dS/m(ECe=20.0 dS/m)では完全に枯死したことから、マサ土ではトマトの塩害が生じやすいことが明らかになった。トマト地上部上部のNa濃度は地上部下部や根より高く、この条件では最初に塩害の影響を受けやすいと考えられた。以上のことから、マサ土では土壌飽和抽出液を用いて測定するECeの方が、鋭敏に塩濃度を検出でき、作物の塩ストレス予測に有効であることが明らかになった。

キーワード: ECe, 塩害, 電気伝導度, トマト, マサ土

1. 緒言

トマト(*Solanum lycopersicum*)は、世界的に最も重要な作物の一つであり、2016年には世界で230万トンを超える量が生産されている(Foolad 2004)。近年、生産量の多い国は中国やインド、米国、トルコ、エジプトなどであるが、これらの国々は土壌の塩類集積が問題となっている(Ghassemi et al. 1995)。国内では最も生産量が多

い熊本県において海岸線に近い主要産地で高潮などによる塩害が発生している(森田2006)。

塩分は作物生産を制限する最も深刻な環境要因の一つであり、植物の塩ストレスへの反応を理解することは、塩類土壌で安定的に作物を生産するために非常に重要である(Chaves et al. 2009)。土壌の塩類集積によって引き起こされる浸透圧ストレスやイオンストレスの増加は、植物全体および細胞レベルで生理的な影響を及ぼすことが知られている(Zhu 2001)。まず、高濃度の塩分を含む土壌では、水ポテンシャルが低下するために植物による水吸収が阻害される。さらに、根から吸収された大量の塩類は、細胞に蓄積し、細胞の機能や分裂に必要な無機成分の吸収を阻害する。過剰な塩類は、蛋白質を不活性化させ、細胞膜の変

2019年8月23日受付

2019年12月7日受理

Corresponding author

上野秀人 Hideto UENO

〒790-8566 愛媛県松山市樽味3-5-7

3-5-7 Tarumi, Matsuyama, Ehime 790-8566, Japan

E-mail: uenoh@agr.ehime-u.ac.jp

性に起因する様々な代謝を阻害し、光合成に影響を及ぼす (Zhu 2003, Niu et al. 1995)。

花崗岩質土壌 (マサ土) は、風化した花崗岩に由来する土壌で、西日本に広く分布し、一般に多くが砂壤土で保水性や腐植含量が低く、陽イオン交換容量 (CEC) が極めて小さいことを特徴とする (藤原ら 2010)。砂質土壌は EC が上昇しやすく (橋田 1965)、ハウス栽培で塩害が生じやすい。阿部ら (2015) は土壌に海水を施用したイチゴの栽培試験を行い、埴土よりも砂質土においてより低濃度で重篤な症状があらわれたことを報告している。

土壌における塩類集積の指標として、一般的に電気伝導度 (EC) が用いられ、日本国内では土壌と蒸留水を 1 : 5 で懸濁した土壌懸濁水の EC が用いられることが多い。他の塩類集積の指標である飽和抽出物電気伝導率 (ECe) は塩分に対する植物の反応を最も反映する (Rhoades et al. 1989) と考えられており、海外では塩害土壌の研究によく用いられている。しかし、土壌飽和抽出液を得るためには多量の土壌試料を必要とするなど測定が容易ではないため、NaCl 添加土壌における EC (1 : 5) と ECe の関係が様々な土性や特定地域の土壌を用いて研究されている。一方、国内において、花崗岩質土壌 (マサ土) の NaCl 添加土壌における EC (1 : 5) と ECe および作物生育との関係を示した研究は学術誌でほとんど見られなかった。

トマトの塩分に対する感受性は中程度であり、塩害が生じない閾値は ECe で 2.5 dS/m 以下とされる (Maas and Hoffman 1977)。マサ土に NaCl を添加して栽培試験を行ったところ国内の基準内であっても塩害でトマトの生育が抑制されることが観察され、マサ土については塩害と EC 値についてより具体的に把握する必要があると考えられた。

台風に伴う高潮や海水の遡上による塩害は毎年発生しており、今後は温暖化による海面水位の上昇や台風勢力の強化も相まって、さらなる被害の拡大が懸念される。西日本ではマサ土によるトマト栽培が広く行われており、本土壌における ECe とトマト塩害の関係を明らかにすることは、安定生産を行う上で非常に重要である。

本研究では、代表的な花崗岩質土壌であるマサ土を用いてトマトの塩害に対する影響を解析し、2 種類の土壌の電気伝導度測定法である EC と ECe との関連について知見を得るとともに、マサ土で栽培されるトマトの塩害回避に資すること

を目的とした。

2. 材料および方法

1) 供試土壌および土壌分析

本研究では愛媛県で採取されたマサ土 (花崗岩質土壌、褐色森林土) を用いた。

土壌中の無機態窒素は、土壌の KCl (2 M) 抽出液を濾過後、濾液中のアンモニウム態窒素含量をインドフェノール青比色定量法、硝酸態窒素含量を塩化バナジウムを用いた比色定量法にて分析した。交換性陽イオンは、1 M 酢酸アンモニウム (pH 7.0) 抽出液を原子吸光光度計 (Z-2310 ; Hitachi High-Tech Science Corporation, Japan) で分析した。1 M 酢酸アンモニウム抽出後の土壌試料を 80% エタノール (pH 7.0) で洗浄した後、土壌に吸着したアンモニウム態窒素を KCl (10%) 水溶液で抽出し、インドフェノール青比色法で分析して陽イオン交換容量 (CEC) とした。土壌の全炭素含量および全窒素含量は NC アナライザー (Sumigraph NC-220F, Sumika Chemical Analysis Service, Ltd., Japan) で分析した。土壌 pH (1 : 2.5) は pH-22B メーター (LAQUAtwin, HORIBA, Japan) で測定した。EC (1 : 5) は土壌環境分析法 (日本土壌肥科学会 1997) に従い、土壌と水を 1 : 5 になるように混合して 1 時間振とうした後、コンパクト EC メーター (LAQUAtwin EC-33B, HORIBA) で測定した。

ECe は Rhoades ら (1999) に従い、飽和土壌ペーストから抽出した土壌飽和抽出液の EC を測定した。すなわちマサ土の風乾土 20 g を 50 ml チューブに入れ、蒸留水を添加しながらスパチュラで攪拌し振動を加えて土壌ペーストを調製した。土壌表面にわずかな水分と光沢がある状態を 8 時間維持した後、吸引ろ過にて土壌飽和抽出液を得た。土壌飽和抽出液の EC の測定には少量 (0.12 ml) のサンプルで測定可能なコンパクト EC メーター (33B, HORIBA) を用いた。なお、EC メーターの校正は 3 点 (1.41, 12.9, 111.8 dS/m) で行った。抽出液の Na イオン濃度はナトリウムイオンメーター (Na-11, HORIBA) を用いて測定した。

2) 塩化ナトリウム (NaCl) を添加したマサ土の EC (1 : 5) と ECe の測定

風乾したマサ土 5 g を 50 ml チューブに入れ、4 段階に濃度を調整した NaCl 水溶液を加えて再

度風乾し、乾土 1 kg あたり 0.77 g, 1.66 g, 2.25 g, 2.84 g の NaCl を含む土壌を調製した。

EC (1:5) は、乾土および NaCl 添加乾土に蒸留水 25 ml を加えて測定した。この結果から、マサ土 1 kg への NaCl の添加量と EC (1:5) の近似式 (図 1) を求め、トマトの栽培試験における土壌への NaCl 添加量を決定した。ECe は、マサ土 20 g を 50 ml チューブに入れ、同様に 4 段階の濃度の異なる NaCl 水溶液を加えて再度風乾した後、上述の通り、土壌ペーストを作成し、8 時間後に土壌飽和抽出液の ECe および Na イオン濃度を測定した。Na イオン濃度と土壌ペーストに含まれる全水分量 (風乾土中の水分および添加した水分) から回収される NaCl 重量を計算し、NaCl 回収率を推定した。

3) ポット栽培実験によるトマトの塩害影響評価

マサ土への NaCl の施用がトマトの生育に及ぼす影響を調べるための栽培試験を、2017 年 7 月から 9 月にかけて愛媛大学農学部 (愛媛県松山市) において行った。トマト (*Solanum lycopersicum*) 品種 “サターン” (タキイ種苗) を育苗土に播種して 26 日間育苗し、850 g (風乾重量) のマサ土および高度化成肥料とようりん (施肥総量：

N=0.12 g, P₂O₅=0.18 g, K₂O=0.12 g) を施肥した直径 12 cm のポリポットに移植した。灌水は鉢底から水が流れ出ないように行い、土壌 EC (1:5) が 0.3, 0.6, 0.8 dS/m になるよう、移植後 16 日目に NaCl 水溶液を各ポットに施用した。各処理区における NaCl 添加量は 1 ポットあたり、0.62 g (0.3 dS/m), 1.33 g (0.6 dS/m), 1.80 g (0.8 dS/m) であった。NaCl 施用後 14 日目に植物体を採取した。栽培は各処理区 3 反復で実施した。

4) 植物体の採取と分析

トマトの植物体は地上部と根に分けて採取し、地上部は第 5 葉と第 6 葉の間で上部と下部に切り分けた。その際、塩害を生じた株では黄色葉、落葉、枯死株を含めた。草高や新鮮重量を測定した後、部位ごとに 75℃ で乾燥させて乾物重を測定した。各部位の全量を高速振動試料粉碎機 (TI-200, (株) シー・エム・ティ) を用いて微粉碎し、得られた粉末試料の一部を試験管に分取し濃硫酸を加え、180℃ のヒートブロック中で過酸化水素を添加しながら湿式分解した。その後、蒸留水で 100 ml に定容し、原子吸光分析法により植物体中の無機成分を分析した。

5) 統計処理

Bartlett.test あるいは levene.test を用いて等分散性検定を行った後、Tukey の HSD 検定による多重比較検定を行い、有意水準 5% で処理区間の有意差を検討した。分析には統計処理ソフト R (3.4.2) を用いて行った。

3. 結果

1) マサ土の化学的特性および NaCl 濃度と EC (1:5)、ECe の関係

本研究に供試したマサ土の土性は砂土であり、C/N 比や EC、CEC がきわめて低い典型的な花崗岩質土壌であった (表 1)。

図1 マサ土への NaCl 施用量と EC (1:5) の関係

表 1 栽培試験に供試したマサ土の理化学的特性

pH	EC (1:5) (dS/m)	無機態窒素 (mg/kg)		C/N	交換性陽イオン (mg/kg)				CEC (cmol/kg)
		NH ₄ -N	NO ₃ -N		K	Mg	Ca	Na	
7.4	0.012	1.67	ND	0.19	106	133	1570	50	3.8

ND：検出せず。

マサ土へのNaCl添加量とEC (1:5) の関係を図1に示す。乾土1 kgに対して、0.77 g, 1.66 g, 2.25 g, 2.84 gのNaClを添加したときのEC (1:5) はそれぞれ0.33, 0.65, 0.85, 1.04 dS/mであり、高い決定係数が得られた。また回帰式の傾きから、供試マサ土の乾土1 kgに1 gのNaClを添加するとEC (1:5) が0.359 dS/m増加することが明らかになった。

NaClを添加したマサ土におけるEC (1:5) とECeとの関係を図2に示す。EC (1:5) における0.33, 0.65, 0.85, 1.04 dS/mは、ECeでは5.6, 11.7, 15.7, 19.3 dS/mに相当し、EC (1:5) とECeには非常に高い相関関係が見られた。また回帰式から、ECeはEC (1:5) の19.3倍に相当することが明らかとなった。

土壌飽和抽出液のNaイオン濃度と土壌ペーストに含まれる水分量から、添加したNaClの溶出量と溶出率を求め、土壌に吸着されたNaCl量を推定した(表2)。溶出したNaCl量は、EC (1:5) とECeが増加するほど多くなり、吸着NaCl量は、NaCl添加量が1.7 g/kgのときに一定になっ

図2 NaClを施用したマサ土のEC (1:5) とECeの関係

た。このことから、供試マサ土1 kgには0.68 gのNaClが吸着・保持され、その量を超えるNaClは、土壌飽和抽出液中に溶出したと考えられる。

2) 各種濃度のNaCl処理がトマト生育に及ぼす影響

トマト栽培において4段階濃度のNaCl溶液を添加したときの草高の変化を図3に示した。0.8 dS/m区のすべての株はNaCl施用後14日までに枯死し、他の処理区に比べて草高が有意に低下したことから、0.8 dS/mという低濃度において、塩害の影響を大きく受けることが示された。0.3 dS/m区の草高平均値は無処理区の90%であり、0.6 dS/m区は82%であった(図3)。

0.6 dS/m区では、塩害の顕著な症状として葉の肥大や黄色化、落葉が見られた。対照的に、0.3 dS/m区では生育が抑制される傾向はあったが、

図3 NaCl処理がトマトの草高の推移におよぼす影響
異なるアルファベット間に有意差あり (Tukey's test, $p < 0.05$; mean $\pm$ SE).
凡例の処理区の数値はEC (1:5)を示す。0.8 dS/mにおける枯死株は草高を0 cmとした。

表2 マサ土に添加したNaClの電気伝導度測定液への溶出量と溶出率および土壌吸着量

NaCl 添加量 (g/kg)	EC (1:5) (dS/m)	ECe (dS/m)	溶出 NaCl (g/kg)	溶出率 (%)	吸着 NaCl (g/kg)
0 (無処理区)	0.0	0.1	0.01	0	0
0.8	0.3	5.5	0.36	46	0.41
1.7	0.6	10.8	0.98	59	0.68
2.8	1.0	20.0	2.15	76	0.68

図4 各処理区におけるトマトの地上部と根の乾物重異なるアルファベット間に有意差あり (Tukey's test, $p < 0.05$; mean $\pm$ SE). 処理区の数値は EC (1:5) の値 (dS/m) を示す。

外観に明らかな異常は見られなかった。

各処理区における地上部および根の乾燥重量を図4に示す。枯死した 0.8 dS/m 区は、無処理区をはじめとした他の処理区に比べ有意に低下した。特に根乾物重の減少は顕著であった。

3) 各種濃度の NaCl 処理がトマトの無機成分含有量に与える影響

トマト各部位における 1 株あたりの無機成分含有量を図5に示す。無機成分は根よりも地上部(茎葉)で多く蓄積され、NaCl 濃度が高くなるほど濃度は高く、特に 0.8 dS/m 区の枯死株の地上部では Na 含有量が最も高かった ($p < 0.05$)。地上部下部の K 濃度は、NaCl の増加に応じて低下し、逆に上部では、やや増加する傾向がみられた。

葉に生じた塩害の症状は、地上部下部が顕著であったが、Na 含有量は地上部上部で高かった。

地上部と根の乾物重量に対する無機成分の濃

図5 各処理区の植物体における部位ごとの K, Mg, Ca および Na 含量
※ 0.8 dS/m 区の植物体は葉数が少なく分割できなかった。
処理区の数値は EC (1:5) を示す。有意差は Na についてのみ表示する。
異なるアルファベット間に有意差あり (Tukey's test, $p < 0.05$; mean $\pm$ SE)。

表3 各NaCl処理区におけるトマト各部位の無機成分濃度およびK/NaとCa/Na比

植物体の部位	処理区	無機成分濃度 (% DW)				K/Na	Ca/Na
		K	Mg	Ca	Na		
地上部	無処理区	5.6 ^a	1.4 ^{ab}	2.7	0.6 ^c	9.8 ^a	4.7 ^a
	0.3 dS/m	6.0 ^a	1.5 ^a	4.1	1.8 ^c	3.4 ^b	2.3 ^{ab}
	0.6 dS/m	5.5 ^a	1.1 ^b	3.7	5.2 ^b	1.1 ^c	0.72 ^b
	0.8 dS/m	2.7 ^b	0.8 ^c	2.9	7.2 ^a	0.38 ^c	0.41 ^b
根	無処理区	1.6	1.1 ^a	0.9	1.2	1.3 ^a	0.72
	0.3 dS/m	1.3	0.8 ^{ab}	0.4	1.6	0.81 ^{ab}	0.24
	0.6 dS/m	2.1	0.8 ^{ab}	0.5	2.2	1.0 ^b	0.21
	0.8 dS/m	1.3	0.7 ^b	0.5	2.3	0.59 ^b	0.24

数値は3反復の平均値。

同列の異なるアルファベット間に有意差あり (Tukey's test, $p < 0.05$)。

度 (%), および K/Na 比と Ca/Na 比を表3に示す。地上部では, NaCl が増加するとともに顕著に Na が蓄積し, K/Na 比と Ca/Na 比が低下した。0.3 dS/m では Na とともに K や Ca の地上部への転流が促進される傾向がみられ, さらに Ca は 0.6 dS/m においても無処理区より高い濃度で検出された。しかし, 根においては 0.3 dS/m 区ですでに低くなり, 吸収が阻害される傾向が見られた。

4. 考察

土壌電気伝導度として広く用いられている EC は, 土と蒸留水を 1:1 や 1:5 の割合で混合した土壌水懸濁液を測定している。一方, 土壌飽和抽出法による電気伝導度 (ECe) は植物の生育に対する塩分の影響を反映する一般的な方法として推奨されている (Rhoades et al. 1989)。

ECe は 200~400 g の風乾土を調整した土壌ペーストから土壌飽和抽出液を作成し, EC メーターで電気伝導度を測定する (Rhoades ら 1999)。本研究では 20 g の風乾土で土壌ペーストを作成し, コンパクト EC メーターを用いて測定を試みた。風乾土 20 g でペーストを調製する際には土壌表面が光沢をもつ最小限の水量に調整することで 1 ml 程度の抽出液が得られ, 定法の 200 g で測定した場合と比べてほぼ同じかやや高い ECe 値が得られた。20 g で土壌ペーストを調製することで風乾や篩別の前処理を省力化でき, 黒ボク土や粘土質土壌など遠心分離で抽出できる土壌の場合には 50 ml チューブでそのまま処理が可能である。マサ土は抽出のために吸引濾過を行う必要があっ

たが, 定法より早く処理することができた。

土壌飽和抽出法は土壌水懸濁法よりも操作が複雑で時間がかかることから, 土壌飽和抽出法と土壌水懸濁法との関係について研究が行われている。Sonmez ら (2008) はトルコの砂土や壤土, 粘土土壌に対して人工的に NaCl を添加した後, 土壌飽和抽出, 1:1, 1:2.5, 1:5 で調整した土壌懸濁液の EC を比較した。EC (1:5) の値に対して土壌飽和抽出法による ECe は, 砂土で約 8.2 倍, 壤土で 7.6 倍, 粘土土壌で 7.4 倍高い値であった。Slavich and Petterson (1993) も同様に, 様々な土性における ECe と EC (1:5) の関係を調べたところ, EC (1:5) から ECe への変換係数は砂土や壤質砂土で 22.7, 砂壤土で 13.8, 壤土やシルト質壤土で 9.5, 埴壤土や砂質埴土, シルト質埴土で 8.6, 重埴土で 5.8 であった。

本研究では, マサ土 (花崗岩質土壌) に塩分 (NaCl) を段階的に施用したときの EC (1:5) と ECe を比較するとともに, トマトの生育に及ぼす影響を調べた。

供試土壌のマサ土は愛媛県で産出された原土で, 極めて低い EC (1:5) や CEC, C/N 比が特徴であった (表1)。マサ土は一般的に, 作物を栽培するには腐植や粘土含量, CEC, 肥沃度が低いといわれており, 供試土壌はマサ土として典型的であった。

本土壌に NaCl を添加したときの EC (1:5) と ECe の関係 (図2) から得られた近似式の傾きから, マサ土の ECe の値は EC (1:5) のおよそ 19.3 倍であり, Slavich and Petterson (1993)

が報告する砂土の変換係数と比較的近い値であった。トマトは塩分に対して中程度の感受性があり、ECe が 4.2–9.5 dS/m で生育や収量が 50 % 低下し、16 dS/m 以上では全く収量が得られないことが推測されている (Blaylock 1994)。また、Singh ら (2012) は多品種のトマトを塩条件下で栽培した結果、ほとんど減収しないのは ECe が 2.5–3.0 dS/m までであり、それ以上では ECe が 1 dS/m 増加するごとに収穫量がおおよそ 9–10 % 減少し、6 dS/m で 50 % 減少することを報告した。

本研究においてトマトの生育は、EC (1 : 5) で調整した 0.3 dS/m 区で生育が抑制され、0.6 dS/m 区で明らかな塩害の症状が見られ、0.8 dS/m 区ではすべての株で枯死した (図 3)。このときの ECe はそれぞれ 5.0, 10.8, 14.7 dS/m と推定され、トマトにあらわれた塩害の症状は Blaylock (1994) の報告に近いものと考えられた。

マサ土に添加した NaCl は土壌 1 kg あたり 0.68 g が土壌に保持され、それ以上の NaCl は土壌飽和抽出液に溶出し、溶出 NaCl は NaCl の添加量に応じて増加した (表 2)。トマトの地上部に蓄積した Na (表 3) は、土壌飽和抽出液中の NaCl 量に応じて増加した。ECe は土壌飽和抽出液の EC であることから、作物への影響を直接的に表すことができると考えられる。

0.3 dS/m 区では生育に対して顕著な阻害は見られなかったが、地上部の K/Na 比は無処理区に対して有意に低い値 (3.4) を示し、0.6 dS/m 区では 1.1, 0.8 dS/m 区では 0.38 とさらに低い値であった。K は Na が代替して機能できない 50 種類以上の酵素の活性に関与しており (Robinson et al. 1983)、高濃度の Na、または十分に低い K/Na 比は細胞質内のさまざまな酵素の働きを阻害する (Rivero et al. 2014)。本研究で行った栽培実験では、K/Na 比が 1 程度に低下すると顕著な塩害が生じた。

Dumbroff and Cooper (1974) は、トマトを定植して NaCl 処理をするまでに十分な期間があり、株が成熟していれば、より高濃度の塩分条件下で生育できることを報告している。これに関して、本研究では NaCl 施用時期が早かった可能性がある。また、栽培試験を夏期に実施したため、高い湿度や気温が環境ストレスとなり塩害の症状がより強く発現したことも考えられた。そのような生育ステージや気象条件においても、トマトの生育

は ECe をもとにした生育の指標におおよそ近い結果となり、塩害土壌において ECe を正しく把握することの重要性が確認された。

本研究では今後激しくなることが予想される台風や高潮などによる塩害に対し、国内で脆弱な土壌と考えられるマサ土について ECe と EC (1 : 5) およびトマトの生育の関係について調べた。マサ土の EC の値はとても低く、また NaCl を施用した際の EC (1 : 5) と ECe には高い直線性があることから、土壌 1 kg あたり 2–3 g の NaCl を添加したときの変換係数を把握しておくことは、特定地域のマサ土の塩害被害を予測する際の参考になると考えられる。ECe の測定は風乾土 20 g で土壌ペーストを調整し、コンパクト EC メーターを用いることで、従来に比べて省力化することができた。国内の砂質土における EC (1 : 5) の基準値は植付け時で 0.1–0.4 dS/m とされているが、マサ土原土の塩の許容量はおおよそ 0.2 dS/m であった。NaCl 施用土壌を用いた栽培試験では、ECe による生育指標に近い塩害が見られ、マサ土では塩分の影響が鋭敏にトマトの生育へ現れることから注意が必要であることが明らかとなった。土壌と塩類の関係について十分理解するためには、今後、マサ土以外の物理化学的特性の異なる土壌を用いて研究を行い、知見を蓄積する必要がある。

謝辞

本研究で成分分析や栽培試験の支援をいただいた、愛媛大学農学部土壌肥科学教育分野の猪里雄也氏、開賢一氏、白石航氏、永瀧泰氏、ロザリナ・タメレ氏に感謝の意を表します。また、分析の一部を実施するための施設の利用について、沖縄健康バイオテクノロジー研究開発センターに感謝致します。

引用文献

- 阿部倫則・村主栄一 (2015) : 津波被災農地の除塩対策 : 5. 宮城県における作物収量に影響を及ぼさない許容 EC レベル (進歩総説 : 津波被災農地土壌の実態調査と除塩対策), 日本土壌肥科学雑誌 86 (5) : 430–431.
- Blaylock A D (1994) : Soil salinity, salt tolerance, and growth potential of horticultural and landscape plants. University of Wyoming,

- Cooperative Extension Service, Department of Plant, Soil, and Insect Sciences, College of Agriculture.
- Chaves M M, Flexas J, Pinheiro C (2009) : Photosynthesis under drought and salt stress : regulation mechanisms from whole plant to cell. *Ann Bot.* 103(4) : 551-560.
- Dumbroff E B, Cooper A W (1974) : Effects of Salt Stress Applied in Balanced Nutrient Solutions at Several Stages during Growth of Tomato. *Botanical Gazette* 135(3) : 219-224.
- Foolad M R (2004) : Recent advances in genetics of salt tolerance in tomato. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 76(2) : 101-119.
- 藤原俊六郎・安西徹郎 (2010) : 新版 土壤肥料用語辞典第2版, 社団法人農山漁村文化協会, 東京, pp.4.
- 橋田茂和 (1965) : ビニールハウス栽培の土壤肥料学的問題点, *日本土壤肥科学雑誌* 36(9) : 274-283.
- Ghassemi F, Jakeman A J, Nix H A (1995) : Salinisation of land and water resources : human causes, extent, management and case studies. CAB international.
- Maas E V, Hoffman G J (1977) : Crop salt tolerance-current assessment. *Journal of the irrigation and drainage division* 103(2) : 115-134.
- 森田敏雅 (2006) : トマト産地における生産の動向と生産者の技術開発へのニーズ, *野菜茶業研究集報* 3 : 85-90.
- 日本土壤肥科学会 (1997) : 4. 電気伝導率 (EC) (1:5 水浸出法), *土壤環境分析法* : 202-204.
- Niu X, Bressan R A, Hasegawa P M, Pardo J M (1995) : Ion homeostasis in NaCl stress environment. *Plant Physiol.* 109 (3) : 735.
- Rhoades J D, Manteghi N A, Shouse P J, Alves W J (1989) : Estimating soil salinity from saturated soil-paste electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal* 53(2) : 428-433.
- Rhoades J D, Fernando C (1999) : SOIL EXTRACT SALINITY, Soil salinity assessment : Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. *Food & Agriculture Org.* 57 : 11-14.
- Rivero R M, Mestre T C, Mittler R, Rubio F, Garcia-Sanchez F, Martinez V (2014) : The combined effect of salinity and heat reveals a specific physiological, biochemical and molecular response in tomato plants. *Plant Cell Environ.* 37 (5) : 1059-1073.
- Robinson S P, Downton W J S, Millhouse J A (1983) : Photosynthesis and ion content of leaves and isolated chloroplasts of salt-stressed spinach. *Plant Physiol.* 73 (2) : 238-242.
- Singh J, Sastry E D, Singh V (2012) : Effect of salinity on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) during seed germination stage. *Physiology and Molecular Biology of Plants* 18 (1) : 45-50.
- Slavich P G, Petterson G H (1993) : Estimating the electrical conductivity of saturated paste extracts from 1 : 5 soil, water suspensions and texture. *Soil Research* 31 (1) : 73-81.
- Sonmez S, Buyuktas D, Okturen F, Citak S (2008) : Assessment of different soil to water ratios (1 : 1, 1 : 2.5, 1 : 5) in soil salinity studies. *Geoderma* 144 (1-2) : 361-369.
- Zhu J K (2001) : Plant salt tolerance. *Trends Plant Sci.* 6 (2) : 66-71.
- Zhu J K (2003) : Regulation of ion homeostasis under salt stress. *Current opinion in plant biology* 6 (5) : 441-445.

Abstract

Soil Salinity is one of the main environmental factors that have a serious impact on crop production, and soil properties affect plant salt stress. As for the salinity in soil, it is common to measure soil electrical conductivity (EC) with a soil water suspension (1 : 5) because of its ease of measurement, on the while, another index, ECe is also measured using a saturated soil extract. In this study, NaCl was added to Masa soil (granite base material) with low humus content and CEC, and the comparison and relationship between EC and ECe were examined by a newly developed method. ECe increased even with a slight salinity, and the value was 19 times higher than EC (1 : 5). In addition, when tomato was cultivated in Masa soil with four levels of NaCl, the Na concentration in the above-ground part of the tomato increased with the salt concentration, and

the K/Na ratio and Ca/Na ratio decreased. Apparent salt damage symptoms were observed at EC 0.6 dS/m ($EC_e=10.8$ dS/m), and complete mortality at 0.8 dS/m ($EC_e=20.0$ dS/m), indicating that tomato salt damage is possible to occur in Masa soil. The Na concentration in the upper part of the plant top was higher than that in the lower part and the root. From the above, it appeared that EC_e measured with

saturated soil extract could detect salt concentration more sensitively and is more effective in predicting salt stress of tomato in Masa soil.

Key Words

EC_e , electron conductivity, Masa soil, tomato, salt damage