

11 コマツナの生理障害 — 亜鉛 —

五十嵐総一¹, 平田絵理香², 添田英雄², 加島信一²

キーワード 植害試験, コマツナ, 硫酸亜鉛, 硝酸亜鉛, 硫酸銅, 硝酸銅, 過剰症状, 黄化症状

1. はじめに

肥料中の有害成分による植物の異常症状の有無を判定する手段として、植物に対する害に関する栽培試験(以下、「植害試験」という)の方法が農林水産省農蚕園芸局長通知¹⁾により定められている。普通肥料の公定規格²⁾では、副産肥料や汚泥肥料等で植害試験の結果、植物に害の認められないことが求められている。植害試験では、原則として供試作物にコマツナを用い、その生育状況から肥料中の植物に有害な成分の有無を判定する。しかし、試験中に発生する異常症状には、有害成分の他にも、病虫害、必須成分の欠乏又は過剰、多量施肥等様々な要因がある。発生した症状が、有害成分によるものか、他の要因によるものかを判別することは難しい。また、窒素、りん酸等植物の必須成分の欠乏又は過剰に起因する症状を生理障害というが、コマツナを対象として生理障害の詳細を記した文献は少ない。

そこで、独立行政法人農林水産消費安全技術センター(FAMIC)では、植害試験中に発生する症状を的確に判定することを目的として、意図的にコマツナの生理障害を発生させて、その症状を観察・記録した資料の作成を行っている。加えて、今後FAMICで作成を予定している植害試験法の詳細な手順及び解説書の基礎データとして蓄積する。今回は植物に対して亜鉛(以下、「Zn」という)の効果を目的に肥料材料として使用される試薬による過剰症状確認試験を実施したので、その結果を報告する。つまり、Zn そのものの過剰症状を特定するのではなく、Zn 材料の過剰施用によるコマツナの異常症状を確認することを目的とした。

なお、Zn 材料の欠乏症状は植害試験条件下では発生する可能性がきわめて低いと考えられること、及びその誘発が困難であると判断したため亜鉛欠乏症状確認試験は省略した。

2. 材料及び方法

1) 亜鉛過剰症状確認試験

(1) 供試土壌

供試土壌は灰色低地土を選定した。灰色低地土はZnを固定する腐植が他の土壌より比較的低含量であると考慮されるため、亜鉛過剰症状確認試験に適している。土壌中のZnや銅(以下、「Cu」という)の溶解・利用度はpHに大きな影響を受けることが一般的に知られており、Znの過剰症状を発現させるには供試土壌のpHを概ねpH 5.0~pH 6.5³⁾ とする必要がある。さらに供試作物のコマツナの最適pHは5.5~6.5⁴⁾であり、供試土壌のpHはこの条件内にある。供試土壌の理化学性を表1に示した。

¹ 独立行政法人農林水産消費安全技術センター福岡センター (現)長崎県北振興局農林部

² 独立行政法人農林水産消費安全技術センター福岡センター

表1 供試土壌の理化学性

土壌の種類	土性	水分 (%)	pH (H ₂ O) ^{a)}	EC ^{b)} (dS/m)	容積重 ^{c)} (g/500 mL)	最大容水量 ^{d)} (%)	S-Zn ^{d)e)} (mg/kg)	S-Cu ^{d)e)} (mg/kg)
灰色低地土	CL	8.5	6.44	0.09	529	59	7	10

a) 土壌1:水5の懸濁液を測定

b) 電気伝導率, 土壌1:水5の懸濁液を測定

c) 風乾土値

d) 乾土値

e) 0.1 mol/L塩酸抽出液を測定

(2) 供試試薬

供試した Zn は硫酸亜鉛七水和物(以下,「硫酸亜鉛」という)及び硝酸亜鉛六水和物(以下,「硝酸亜鉛」という),また,比較対照に Cu を含有する硫酸銅(Ⅱ)五水和物(以下,「硫酸銅」という)及び硝酸銅(Ⅱ)三水和物(以下,「硝酸銅」という)を使用した. 供試試薬について表 2 に示した.

肥料材料として流通肥料に使用実績のあるこれらを選定した.

表2 供試試薬

供試試薬名	化学式	規格
硫酸亜鉛七水和物	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	特級
硝酸亜鉛六水和物	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	特級
硫酸銅(Ⅱ)五水和物	CuSO ₄ ·5H ₂ O	特級
硝酸銅(Ⅱ)三水和物	Cu(NO ₃) ₂ ·3H ₂ O	特級

(3) 供試作物

コマツナ(品種名:夏楽天)

(4) 試験規模

1/10000 a ノイバウエルポットを用い, 1 試験区 2 連とした.

(5) 試験区の構成及び施用量

植物に対する生理障害の過剰症状確認試験では目的の元素による害の他, 供試試薬中のカウンターイオンによる塩類障害が発生する可能性が高いと考えられる⁵⁾. このため, 表 2 に掲げる供試試薬はカウンターイオンが同一のもの(硫酸イオン及び硝酸イオン)を選定した. Zn 及びCuの負荷量は予備調査の結果から, 生育途中の過剰症状が観察されるよう Zn または Cu として 100 mg/pot, 250 mg/pot, 400 mg/pot とした. これは各々乾土当たり 207 mg/kg, 516 mg/kg, 826 mg/kg に相当する負荷濃度となる.

なお, 農用地における Zn の管理基準値は乾土当たり 120 mg/kg⁶⁾以下とされ, Cu では農用地(田に限る)で 125 mg/kg 未満とする必要がある⁷⁾ことから, 当該試験の負荷濃度は Zn 及び Cu による過剰症状を誘発する可能性を有している. 表 3 に試験区の構成及び施用量についてまとめた.

表3 試験区の構成

供試 試薬 ^{a)}	施肥 方法 ^{b)}	負荷量				供試試薬 施用量 (g/pot)	供試試薬 由来窒素量 (mg/pot)	Zn or Cu 負荷濃度 (mg/kg 乾土)
		Zn (mg/pot)	Cu (mg/pot)	硫酸 ^{c)} (mg/pot)	硝酸 ^{c)} (mg/pot)			
硫酸亜鉛	(a)	100	-	147	-	0.44	-	207
		250	-	367	-	1.10	-	516
		400	-	588	-	1.76	-	826
硫酸銅	(a)	-	100	151	-	0.39	-	207
		-	250	378	-	0.98	-	516
		-	400	605	-	1.57	-	826
硝酸亜鉛	(b)	100	-	-	95	0.45	43	207
		250	-	-	237	1.14	107	516
		400	-	-	379	1.82	171	826
硝酸銅	(b)	-	100	-	98	0.38	44	207
		-	250	-	244	0.95	110	516
		-	400	-	390	1.52	176	826
標準区		-	-	-	-	-	-	-

- a) 各試験区には窒素, リン酸, 加里が各100 mg/potとなるよう硫酸, 過石, 塩加を施用
ただし, 供試試薬窒素由来量を勘案して窒素100 mg/potに満たない場合は硫酸を添加,
超える場合は硫酸無添加
- b) 2. 1) (6) 施肥方法に示す(a) 土壌混合法, (b) 水溶液浸透法
- c) ZnもしくはCu以外の化学グループの施用量

(6) 施肥方法

植害試験の方法¹⁾には施肥の方法の項目に「肥料は, 試験容器全体の土壌と均一になるようよく混合して施用する。」と記載されている. しかしながら, 2.1) (2)に掲げる硝酸亜鉛及び硝酸銅は潮解性を有す物質の特徴があるため, 通常の土壌混合が困難であると思われた. このため硫酸亜鉛及び硫酸銅は次に示す(a) 土壌混合法, 硝酸亜鉛及び硝酸銅は(b) 水溶液浸透法の施肥方法とした(図1).

(a) 土壌混合法

- ① ビニール袋に, 供試土壌(風乾土), ZnもしくはCuを含む供試試薬及び肥料(硫酸, 過石, 塩加)を入れる.
- ② ビニール袋を密封して振とう, 十分混合させる.
- ③ 試験容器に土壌水分を最大容水量の60%に設定するのに必要な量の水を入れ, さらに②を入れる.
この全層施肥による方法を土壌混合法とした.

(b) 水溶液浸透法

- ① ビニール袋に, 供試土壌(風乾土)及び肥料(硫酸, 過石, 塩加)を入れる.
- ② ビニール袋を密封して振とう, 十分混合させる.
- ③ 土壌水分を最大容水量の60%に設定するのに必要な量の水にZnもしくはCuを含む供試試薬を溶解させ, 試験容器に入れる.
- ④ ③のZnもしくはCuを含む供試試薬水溶液を入れた試験容器に②を入れる.

この施肥方法を水溶液浸透法とした。

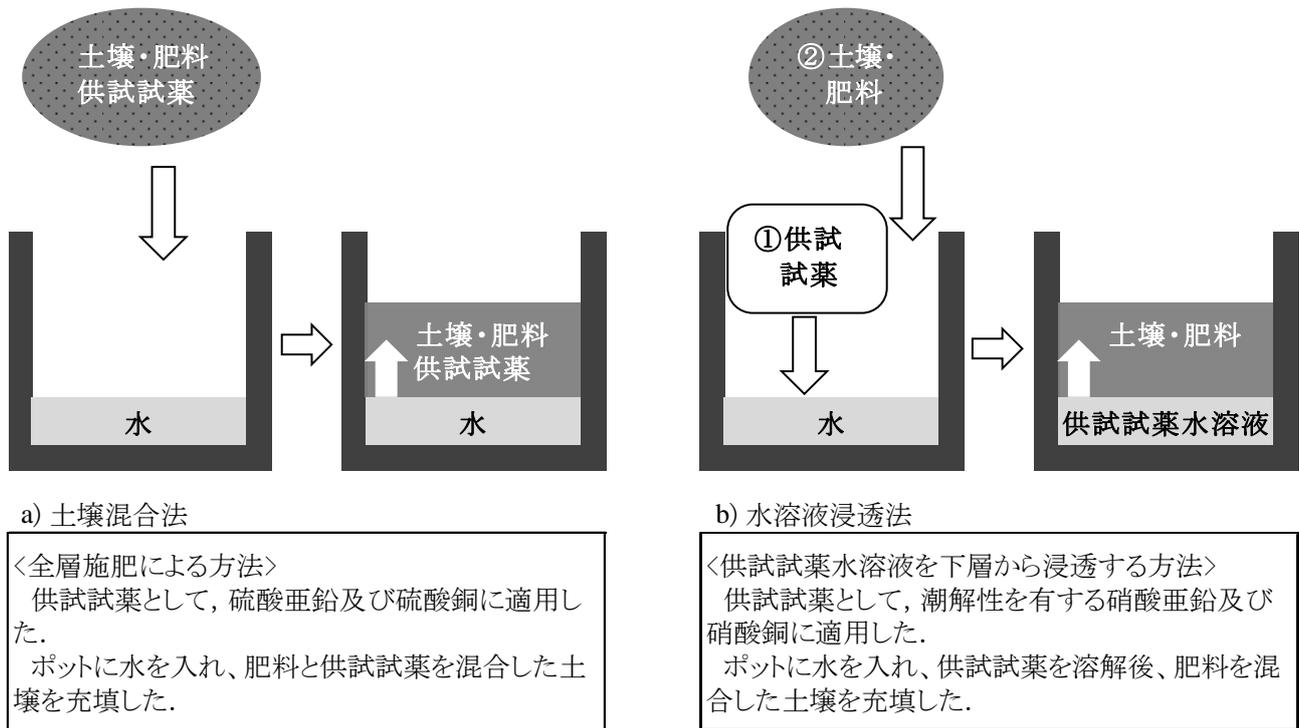


図1 施肥方法

(7) 栽培方法

耕種概要を表4に示した。栽培期間は通常の植害試験の方法に準拠して21日間とした。ノイバウエルポットに、容積重 529 g/500 mL (表1)の供試土壌をポット底から約5 cmまで充填し、供試作物のコマツナを20粒播種した。栽培条件は、人工気象装置(小糸工業製 コイトロン GC-K3AH)内で照度約 25000 lx, 照明時間12時間, 気温昼間 25 °C, 夜間 15 °C, 湿度 70 %の一定とした。灌水は最大容水量の60%を目安に重量で管理し、休日はローラーポンプ式自動給水装置(古江サイエンス製 RP-MRF)による灌水とした。栽培条件を均一にするため、人工気象装置内でのポットの配置は休日を除き、毎日無作為に換えた。

表4 耕種概要

施肥	播種	発芽率確認		収穫
		1回目	2回目	
平成28年9月16日	9月16日	9月19日	9月23日	10月7日

(8) 調査項目

発芽率, 葉長, 収穫物の葉体重量(生体重, 乾物重), 異常症状の確認, 跡地土壌の pH, EC, 作物体の Zn, Cu, 鉄(以下, 「Fe」という)及びりん(以下, 「P」という)含有率について調査した。

(9) 作物体の分析方法

収穫後, 生体重を測定したコマツナを定温乾燥機にて 80 °Cで3日間乾燥した。乾物重を測定し, 高速粉砕器(大阪ケミカル製 ラボミルサー LM-PLUS)で粉砕した。試料に硝酸 5 mL 及び塩酸 15 mL を添加し, 約

170 °Cで王水分解後、酸を揮発させ、塩酸(1+5) 25 mLで溶解、定量フラスコ 50 mLに水で定容し試料溶液とした。試料溶液中の Zn, Cu, Fe 含有率を原子吸光分光光度計 (SOLAAR M5 mk II :Thermo Fisher SCIENRIFIC)で、P 含有率を紫外可視分光光度計 (UVmini-1240:島津製作所)で各成分 2 点併行による分析を実施した。なお、分析供試量は 0.5 g としたが、生育不良のため 0.5 g を確保できない区はその全量を供し、1 点分析とした。

(10) 跡地土壌の分析

後述する 3.2) (3) のことから次の操作を実施した。作物体を収穫後、試験容器内の跡地土壌を 60°Cで約 2 時間乾燥し、試験容器から土壌を取り出した。土壌は高さ約 4 cm の円筒状となり、これを中心約 2 cm のところで切り分け、上層及び下層に分けた。なお、作物体の生育不良によって根張りが弱い区は跡地土壌を試験容器から取り出した際、円筒状が崩れる場合があったため、層の区別の判別が困難な土塊は除外し、確実に区別できる土塊を上層及び下層に分けた。風乾後、2 mm の篩いを通し、各層の Zn 全量、Cu 全量、pH、EC を測定した。

Zn 全量及び Cu 全量は、跡地土壌 0.5 g に硝酸 5 mL 及び過酸化水素水 2 mL を加えマイクロ波分解装置 (Multiwave 3000:Perkin Elmar)で分解したものを定量フラスコ 50 mL に定容し試料溶液とした。測定は ICP 質量分析装置 (ICPM-8500 :島津製作所)により実施した。

土壌 pH 及び EC は風乾土壌 10 g に対して純水 50 mL を加え 1 時間振とう後、pH はガラス電極計 (SevenEasy pH:METTLER TOLEDO)により、EC は電気伝導率計 (CM-11P:東亜電波工業)により測定した。

2) 施肥方法の違いによる検証試験

後述する 3.2) (3) のことから、施肥方法の違いで害症状に相違が生じる可能性が示唆されたため、2.1) 亜鉛過剰症状確認試験に基づいた検証試験を実施した。

(1) 試験区の構成及び施用量

2.1) (6) 施肥方法に示す (a) 土壌混合法、(b) 水溶液浸透法の比較は硝酸塩では潮解性の特徴を有すことから困難であると判断したため、供試試薬に硫酸亜鉛及び硫酸銅を選定した。施用量は 2.1) (5) にある負荷濃度の中間とし、Zn もしくは Cu として 250 mg/pot (516 mg/kg 乾土)とした (表 5)。なお、1 試験区 2 連とした。

表5 検証試験区の構成

供試 試薬 ^{a)}	施肥 方法 ^{b)}	負荷量			供試試薬 施用量 (g/pot)	Zn or Cu 負荷濃度 (mg/kg 乾土)
		Zn (mg/pot)	Cu (mg/pot)	硫酸 ^{c)} (mg/pot)		
硫酸亜鉛	(a)	250	-	367	1.10	516
	(b)	250	-	367	1.10	516
硫酸銅	(a)	-	250	378	0.98	516
	(b)	-	250	378	0.98	516
標準区		-	-	-	-	-

a) 各試験区には窒素, リン酸, 加里が各 100 mg/pot となるよう硫酸, 過石, 塩加を施用

b) 2.1) (6) 施肥方法に示す (a) 土壌混合法, (b) 水溶液浸透法

c) Zn もしくは Cu 以外の化学グループの施用量

(2) 栽培方法

2.1) (7)と同様とした。耕種概要は表 6 のとおりである。

表6 検証試験の耕種概要

施肥	播種	発芽率確認		収穫
		1回目	2回目	
平成28年11月18日	11月18日	11月22日	11月28日	12月9日

(3) 調査項目

発芽率, 葉長, 収穫物の葉体重量(生体重, 乾物重), 異常症状の確認, 跡地土壌の pH, EC, 作物体の Zn, Cu, Fe 及び P 含有率について調査した。

(4) 作物体の分析方法

2.1) (9)と同様とした。

(5) 跡地土壌の分析方法

土壌調製法は 2.1) (10)と同様とした。各層の土壌中 Zn 及び Cu は比較的簡易な 0.1 mol/L 塩酸浸出法による方法⁸⁾で分析した。土壌 10 g に 0.1 mol/L 塩酸を 50 mL 添加し, 約 30 °C で 1 時間振とう後, ろ過し, 試料溶液とした。試料溶液中の Zn, Cu 含有率を原子吸光分光光度計 (SOLAAR M5 mk II :Thermo Fisher SCIENTIFIC) で測定, その結果を S-Zn 及び S-Cu とした。

3. 結果

1) 亜鉛の生理作用

植物必須要素のうち, Zn は微量元素に分類される。植物の Zn 吸収形態は 2 価のイオン (Zn²⁺) であり, 植物体内の酵素の構成元素となる。またその活動を活性化, 植物体内の酸化還元反応を触媒するものとされている⁹⁾。生体内における Zn の活動範囲は広く, 活性酸素を消去するスーパーオキシドディスムターゼ (SOD) や気体の二酸化炭素を可溶性の炭酸水素イオンに変換するカーボニックアンヒドラーゼに Zn が関与しており, DNA ポリメラーゼや RNA ポリメラーゼは Zn を必要とすることから細胞分裂には Zn が不可欠といえる¹⁰⁾。過剰の Zn 吸収は植物の生育を損ない, 拮抗作用による Fe 欠乏を誘発し, 葉の黄化症状(クロロシス)が上位葉を中心に発現することが知られている¹¹⁾。また, 植物体中の Zn 含有率は 20 mg/kg 程度であり, 亜鉛過剰症状は水稻に比べると畑作で発生することが多いとされる¹²⁾。

2) 亜鉛過剰症状確認試験

(1) 作物体の分析結果

亜鉛過剰症状確認試験における作物体の調査・分析結果を表 7 及び表 8 に示した。異常症状の有無は標準区との比較時に外見的異常がある場合, 異常症状ありと判断した(表 7)。

硫酸亜鉛区, 硝酸亜鉛区及び硝酸銅区は発芽率が 95 % ~ 100 % と良好であったのに対し, 硫酸銅 250 mg/pot (Cu 516 mg/kg 乾土) 区及び 400 mg/pot (Cu 826 mg/kg 乾土) 区では 15 % ~ 75 % と劣っていた。この他,

硫酸銅区は生育不良が明確であり、葉長及び生体重指数は他供試試薬区と比較して低値だった。

作物体の元素分析結果において、硫酸亜鉛区及び硝酸亜鉛施用区では作物体中の Zn 濃度が 936 mg/kg ~3602 mg/kg の範囲で定量され、作物体の顕著な Zn 吸収が見られた。Cu 材料では硫酸銅区で Cu 濃度が 69 mg/kg ~217 mg/kg の範囲だったことに対し、硝酸銅区は 15 mg/kg ~40 mg/kg の範囲だったことから異なる傾向が見られた。また、Cu は通常作物体中に乾物当たり 10 mg/kg 程度含有するものと考えられる¹³⁾が、本試験では標準区で 75 mg/kg と高い濃度が検出された。

作物体中の Fe 含有率は Zn もしくは Cu の負荷量に伴って硫酸銅区及び硝酸亜鉛区で高濃度になる傾向が見られたが、硫酸亜鉛区及び硝酸銅区ではその傾向は見られなかった。作物体中の P 含有率は硫酸銅区以外の区で Zn もしくは Cu の負荷量に伴って低濃度となる傾向が見られた。

表7 栽培調査結果

供試 試薬	施肥 方法 ^{a)}	負荷量		ポット No.	発芽率 ^{b)}		葉長 (cm)	生体重 (g/pot)	乾物重 (g/pot)	生体重 指数 ^{c)}	乾物重 指数 ^{c)}	異常 症状
		Zn (mg/pot)	Cu (mg/pot)		1回目 (%)	2回目 (%)						
硫酸 亜鉛	(a)	100	-	1	45	100	9.4	26	2.0	87	80	なし
				2	45	100	9.6	24	1.8	80	72	
				平均	45	100	10	25	1.9	83	76	
	250	-	1	20	100	1.9	1.2	0.29	4	12	有	
			2	15	100	2.0	2.1	0.27	7	11		
			平均	18	100	2.0	1.7	0.28	6	11		
	400	-	1	10	100	1.2	1.3	0.21	4	8	有	
			2	10	95	1.3	1.0	0.22	3	9		
			平均	10	98	1.3	1.2	0.21	4	9		
硫酸 銅	(a)	-	100	1	5	100	8.5	20	1.8	67	75	有
				2	5	80	7.7	18	1.7	60	71	
				平均	5	90	8.1	19	1.8	63	73	
	-	250	1	0	75	2.3	2.2	0.24	7	10	有	
			2	0	50	2.3	0.9	0.12	3	5		
			平均	0	63	2.3	1.5	0.18	5	7		
	-	400	1	0	35	0.8	0.23	0.041	0.8	2	有	
			2	0	15	0.5	0.12	0.031	0.4	1		
			平均	0	25	0.7	0.18	0.036	1	1		
硝酸 亜鉛	(b)	100	-	1	30	95	9.8	31	2.6	103	107	なし
				2	20	100	9.0	32	2.6	107	107	
				平均	25	98	9.4	32	2.6	105	107	
	250	-	1	20	100	7.6	21	1.7	70	71	有	
			2	25	100	7.9	22	1.9	73	77		
			平均	23	100	7.8	22	1.8	72	74		
	400	-	1	5	100	7.2	18	1.4	60	59	有	
			2	0	100	7.5	16	1.3	53	54		
			平均	3	100	7.4	17	1.4	57	56		
硝酸 銅	(b)	-	100	1	40	100	9.7	31	2.8	103	116	なし
				2	25	100	9.6	32	2.9	107	118	
				平均	33	100	9.7	32	2.8	105	117	
	-	250	1	10	100	8.6	30	2.5	100	104	なし	
			2	0	100	9.9	32	2.6	107	108		
			平均	5	100	9.3	31	2.6	103	106		
	-	400	1	25	100	9.7	36	2.6	120	106	なし	
			2	15	100	10.7	33	2.4	110	101		
			平均	20	100	10.2	35	2.5	115	103		
標準 区	-	-	1	25	100	9.4	29	2.2	97	90	なし	
			2	30	100	8.8	31	2.7	103	110		
			平均	28	100	9.1	30	2.4	100	100		

a) 2. 1) (6) 施肥方法に示す(a) 土壌混合法, (b) 水溶液浸透法

b) 発芽率は(発芽した個体 / は種数 20 粒)×100 によって算出

c) 標準区2連の平均値をを100として算出

表8 作物体分析結果

供試 試薬	施肥 方法 ^{a)}	負荷量		ポットNo.	乾物重 (g/pot)	作物体の元素濃度 ^{b)}			
		Zn (mg/pot)	Cu (mg/pot)			Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe (mg/kg)	P (%)
硫酸亜鉛	(a)	100	-	1	2.0	1143	43	132	0.53
				2	1.8	1353	36	171	0.57
				平均	1.9	1248	40	152	0.55
		250	-	1*	0.29	3149	29	96	0.28
				2*	0.27	3197	32	140	0.28
				平均	0.28	3173	31	118	0.28
		400	-	1*	0.21	3834	29	787	0.25
				2*	0.22	3370	53	213	0.22
				平均	0.21	3602	41	500	0.24
硫酸銅	(a)	-	100	1	1.8	62	175	144	0.55
				2	1.7	108	24	167	0.52
				平均	1.8	85	100	156	0.54
		-	250	1*	0.24	51	70	221	0.23
				2*	0.12	69	68	214	0.29
				平均	0.18	60	69	218	0.26
		-	400	1*	0.041	40	395	596	0.44
				2*	0.031	N.D.	39	903	0.68
				平均	0.036	40	217	750	0.56
硝酸亜鉛	(b)	100	-	1	2.6	924	27	129	0.51
				2	2.6	948	57	104	0.49
				平均	2.6	936	42	117	0.50
		250	-	1	1.7	2262	30	117	0.45
				2	1.9	1997	62	181	0.45
				平均	1.8	2129	46	149	0.45
		400	-	1	1.4	2120	105	174	0.37
				2	1.3	1844	116	189	0.35
				平均	1.4	1982	110	181	0.36
硝酸銅	(b)	-	100	1	2.8	58	50	103	0.42
				2	2.9	48	29	78	0.43
				平均	2.8	53	40	90	0.42
		-	250	1	2.5	31	16	127	0.30
				2	2.6	34	15	103	0.30
				平均	2.6	32	15	115	0.30
		-	400	1	2.6	34	18	83	0.28
				2	2.4	34	16	94	0.27
				平均	2.5	34	17	89	0.27
標準区	-	-	1	2.2	59	84	195	0.60	
			2	2.7	53	67	171	0.55	
			平均	2.4	56	75	183	0.58	

a) 2. 1) (6) 施肥方法に示す(a) 土壌混合法, (b) 水溶液浸透法

b) 乾物値 $n=2$ (*を付した区は生育不良のため $n=1$)

(2) 跡地土壌の分析結果

跡地土壌分析結果を表9とした。土壌中のZn全量及びCu全量は土壌混合法の場合と比較すると、水溶液浸透法の場合では、下層で高濃度になる傾向が見られた。

pHは100 mg/pot (Zn 207 mg/kg 乾土)を除いた硫酸亜鉛区及び硝酸亜鉛区各区で下層の方が高く、硫酸銅区及び硝酸銅区では上層の方が高い結果が得られた。

ECは100 mg/pot (Zn 207 mg/kg 乾土)を除いた硫酸亜鉛区, 100 mg/pot (Cu 207 mg/kg 乾土)を除いた硫酸銅区及び硝酸銅区で上層の方が高いが, 硝酸亜鉛区においては下層の方が高い傾向であった。

表9 跡地土壌分析結果

供試 試薬	施肥 方法 ^{a)}	負荷量		ポット No.	Zn全量 ^{b)}		Cu全量 ^{b)}		pH (H ₂ O) ^{c)}		EC ^{d)}	
		Zn (mg/pot)	Cu (mg/pot)		上層 (mg/kg)	下層 (mg/kg)	上層 (mg/kg)	下層 (mg/kg)	上層	下層	上層 (dS/m)	下層 (dS/m)
硫酸 亜鉛	(a)	100	-	1	313	303	67	67	5.88	5.63	0.13	0.57
				2	285	283	68	68	5.83	5.63	0.24	0.58
				平均	299	293	67	68	5.86	5.63	0.19	0.57
		250	-	1	627	550	68	67	5.48	5.64	0.90	0.62
				2	623	626	68	71	5.63	5.72	0.96	0.76
				平均	625	588	68	69	5.56	5.68	0.93	0.69
		400	-	1	923	871	68	67	5.59	5.64	0.99	0.80
				2	943	707	67	58	5.53	5.62	1.30	0.71
				平均	933	789	67	62	5.56	5.63	1.15	0.75
硫酸 銅	(a)	-	100	1	193	181	283	274	5.74	5.72	0.07	0.43
				2	130	111	284	280	5.65	5.68	0.11	0.38
				平均	161	146	283	277	5.70	5.70	0.09	0.41
		-	250	1	216	131	643	545	5.54	5.65	0.20	0.38
				2	131	131	591	511	5.63	5.78	0.26	0.38
				平均	173	131	617	528	5.59	5.72	0.23	0.38
		-	400	1	132	197	968	871	5.39	5.50	0.24	0.75
				2	132	163	934	843	5.34	5.44	0.70	0.49
				平均	132	180	951	857	5.37	5.47	0.47	0.62
硝酸 亜鉛	(b)	100	-	1	159	388	67	66	6.10	5.98	0.46	0.61
				2	161	459	72	68	6.21	5.81	0.58	0.55
				平均	160	424	70	67	6.16	5.90	0.52	0.58
		250	-	1	336	803	65	66	6.25	5.92	0.89	0.68
				2	320	944	68	65	6.28	6.03	1.16	0.54
				平均	328	873	66	65	6.27	5.98	1.02	0.61
		400	-	1	488	1198	66	65	6.12	5.72	1.21	0.73
				2	574	1229	67	66	5.97	5.75	1.22	0.80
				平均	531	1213	67	66	6.05	5.74	1.21	0.77
硝酸 銅	(b)	-	100	1	119	113	123	380	6.03	5.88	0.14	0.44
				2	143	199	200	351	6.06	5.92	0.18	0.39
				平均	131	156	162	366	6.05	5.90	0.16	0.41
		-	250	1	165	135	184	1053	6.54	5.83	0.19	0.25
				2	193	177	172	1095	6.48	5.86	0.24	0.20
				平均	179	156	178	1074	6.51	5.85	0.22	0.22
		-	400	1	110	154	205	1373	6.63	5.74	0.32	0.27
				2	109	106	196	1384	6.62	5.56	0.36	0.32
				平均	110	130	200	1379	6.63	5.65	0.34	0.29
標準 区				1	99	92	67	65	5.68	5.56	0.13	0.67
				2	96	98	66	69	5.80	5.50	0.12	0.57
				平均	98	95	67	67	5.74	5.53	0.13	0.62

a) 2. 1) (6) 施肥方法に示す(a) 土壌混合法, (b) 水溶液浸透法

b) 乾物値 $n=1$

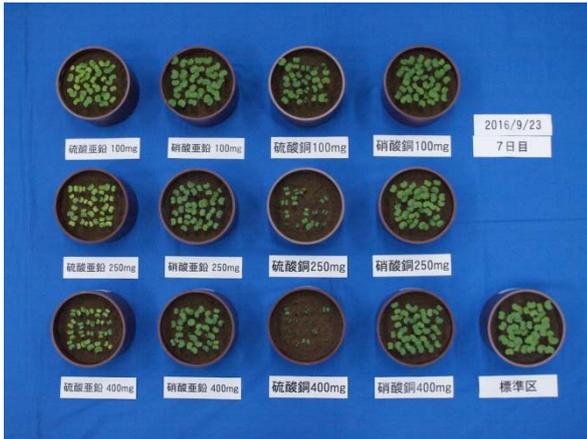
c) pH (H₂O)は土壌1:水5の懸濁液を測定

d) EC (電気伝導率)は土壌1:水5の懸濁液を測定

(3) 異常症状の確認

播種 7 日後に硫酸銅区の著しい発芽障害が確認され(写真 1), 特に 250 mg/pot 区及び 400 mg/pot 区で症

状が顕著であった。既報¹³⁾では、硫酸銅をCuとして1600 mg/pot添加した区の発芽率は90%と良好であったが、今回はこの6分の1程度の施用量にも係わらず、発芽率は50%~75%と低かった。原因究明した結果、土壌と肥料を混合する際の施肥方法の違いで害症状に相違が生じる可能性が推察された。すなわち、既報は2.1(6)に示す水溶液浸透法としたが、今回は硫酸亜鉛区及び硫酸銅区は土壌混合法としたことで発芽率に差異が生じものと考えられた。このことから、2.2)に掲げる検証試験を実施し、施肥方法の違いによるZnの害症状の確認を行った。この際、比較対照にCuの害症状も確認することとした。また、土層のZn及びCuの分布を確認するため、層別の分析が必要であると判断した。



(写真 1)

播種 7 日後の様子。硫酸銅区で発芽障害が確認された。配置された施用区は次のとおり。

右下:標準区

左側第 1 列:硫酸亜鉛区, 左側第 2 列:硝酸亜鉛区

左側第 3 列:硫酸銅区, 左側第 4 列:硝酸銅区

上段:100 mg/pot (207 mg/kg 乾土)

中段:250 mg/pot (516 mg/kg 乾土)

下段:400 mg/pot (826 mg/kg 乾土)



(写真 2)

播種 14 日後の様子。硫酸亜鉛区及び硫酸銅区で生育不良が確認され、供試試薬施用量が 250 mg/pot 及び 400 mg/pot で症状が顕著だった。



(写真 3)

播種 21 日後の様子。播種 14 日後に確認された生育不良は栽培最終日まで回復しなかった。

(3.1) 硫酸亜鉛による過剰症状

硫酸亜鉛による過剰症状として、(1)生育不良、(2)子葉の黄化症状、(3)子葉の下垂、(4)本葉の黄化症状、(5)子葉裏の赤紫色化、(6)本葉葉縁の黄化症状の症状が確認された。播種 7 日後頃には硫酸亜鉛を Zn とした施用量 250 mg/pot 区及び 400 mg/pot 区で生育不良が明確であった(写真 1,4)。その後、生育が回復することにはなかった(写真 2,3)。また、播種 7 日後頃に子葉の黄化症状が観察され(写真 4,5)、特徴的な下垂が見られた(写真 6)。生育中期(概ね播種 12 日後)以降になると本葉が黄化症状を呈し(写真 7)、本葉第二葉の葉縁に沿った黄化症状が見られた(写真 8)。収穫後の個体を観察すると、子葉裏の赤紫色化が見られた(写真 9)。植害試験の条件下において硫酸亜鉛による過剰症状は子葉を中心に特徴的な症状が発現することがわかった。



(写真 4)

播種 10 日後の様子。硫酸亜鉛の Zn としての添加量は次のとおりである。

上段：標準区

下段左：100 mg/pot 区 (Zn 207 mg/kg 乾土)

下段中：250 mg/pot 区 (Zn 516 mg/kg 乾土)

下段右：400 mg/pot 区 (Zn 826 mg/kg 乾土)



(写真 5)

播種 10 日後の様子。

左：400 mg/pot (Zn 826 mg/kg 乾土)

右：標準区

標準区と比較すると子葉の黄化症状が確認できる。



(写真 6)

400 mg/pot (Zn 826 mg/kg 乾土) の播種 10 日後の様子。標準区には見られない特徴的な子葉の下垂が見られた。



(写真 7)

400 mg/pot (Zn 826 mg/kg 乾土) の播種 20 日後の様子。本葉第一葉に黄化症状が発現している。

また、本葉第一葉が成長せず、枯死に近い個体も見られる。



(写真 8)

播種 20 日後の 100 mg/pot (Zn 207 mg/kg 乾土) の様子である。本葉第二葉の葉縁に薄い黄化症状が見られた。



(写真 9)

左が 400 mg/pot (Zn 826 mg/kg 乾土), 右が 250 mg/pot (Zn 516 mg/kg 乾土) の個体である。

左の個体の子葉裏葉縁部の赤紫色化が見られた。

(3.2) 硝酸亜鉛による過剰症状

硝酸亜鉛による過剰害症状として、(1)生育不良、(2)子葉の黄化症状、(3)子葉葉縁の黄化症状、(4)本葉の黄化症状が確認された。播種 10 日後頃になると、硝酸亜鉛を Zn として 250 mg/pot, 400 mg/pot 添加した区で生育不良が見られ(写真 10,11)、個体の一部に生育が停滞し子葉が黄化症状したものが確認された(写真 12)。この症状は硫酸亜鉛による過剰症状に類似していた(写真 5)。播種 19 日後に硝酸亜鉛を Zn として 400 mg/pot 添加した区で子葉葉縁の黄化症状が見られた(写真 13)。生育後期の播種 20 日後頃になると、本葉の黄化症状が発現した(写真 14)。なお、跡地土壌の根域を観察すると、硝酸銅は土層の上層に根域が制限されていたことに対し、硝酸亜鉛区では根域制限は見られず、下層にまで根域が拡大していた(写真 15)。硝酸亜鉛による過剰症状は作物体の生育不良及び葉の黄化症状に特徴があることがわかった。



(写真 10)

播種 10 日後の様子. 試験区の配置は次のとおりである.

上段:硝酸亜鉛区, 下段:硝酸銅区

右下:標準区

左列:100 mg/pot 区(207 mg/kg 乾土)

中列:250 mg/pot 区(516 mg/kg 乾土)

右列:400 mg/pot 区(826 mg/kg 乾土)

硝酸銅区と比較すると硝酸亜鉛区の生育不良が判る.



(写真 11)

播種 21 日後の様子. 硝酸亜鉛の添加量に伴って生育不良となっている. 試験区の配置は次のとおりである.

上段:標準区

下段左:100 mg/pot 区(Zn 207 mg/kg 乾土)

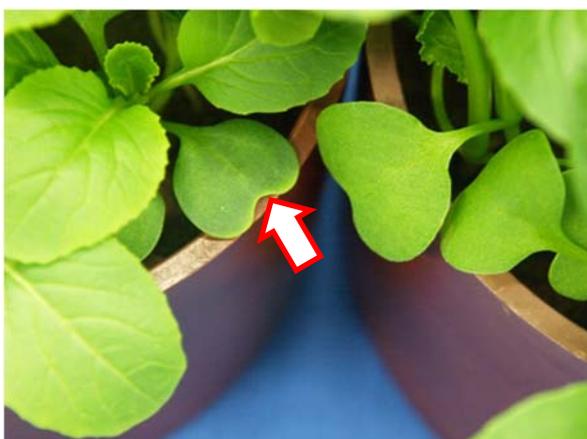
下段中:250 mg/pot 区(Zn 516 mg/kg 乾土)

下段右:400 mg/pot 区(Zn 826 mg/kg 乾土)



(写真 12)

播種 10 日後の様子. 400 mg/pot 区(Zn 826 mg/kg 乾土)の一部個体で, 生育が停滞し子葉の黄化症状が見られた. 硫酸亜鉛の過剰症状で見られた特徴的な下垂を呈していた.



(写真 13)

播種 19 日後の様子.

左:400 mg/pot 添加区(Zn 826 mg/kg 乾土)

右:標準区

硝酸亜鉛区の子葉が標準区と比較すると葉縁が黄化症状を呈していることがわかる.



(写真 14)

播種 20 日後の様子.

左:250 mg/pot 添加区 (Zn 516 mg/kg 乾土)

右:標準区

硝酸亜鉛区の本葉が標準区と比較すると黄化症状を呈していることがわかる. 上位葉で症状が顕著だった.



(写真 15)

跡地土壌の観察の様子. 配置した試験区は次のとおりである.

左:硝酸亜鉛 100 mg/pot 区 (Zn 207 mg/kg 乾土)

中:硝酸銅 100 mg/pot 区 (Cu 207 mg/kg 乾土)

右:標準区

なお, 写真の土層上面が試験容器内土壌時の下層に該当する. 硝酸亜鉛区は下層にまで根域が拡大していた.

(3.3) 硫酸銅による過剰症状

硫酸銅による過剰症状は, (1) 発芽障害, (2) 本葉の黄化症状, (3) 本葉裏の赤紫色化が確認された. 発芽障害は播種後, 生育初期の播種 4 日後頃にかけて顕著に現れた(写真 16,17). その後, 硫酸銅を Cu として 250 mg/pot 施用区に本葉第一葉の黄化症状が発現した(写真 18). なお, 硫酸亜鉛及び硝酸亜鉛で特徴的であった子葉の黄化症状(写真 5,12)は見られなかった. 生育後期(概ね播種 17 日後以降)になると生育が停滞する個体も見られたが, 成長を続ける個体は本葉第二, 三葉にかけて黄化症状が見られた(写真 19). その際, 黄化症状は葉柄部分から葉先にかけて進行していた. 収穫後の葉裏を確認すると, 一部に赤紫色化が観察され(写真 20), この症状は硫酸亜鉛の過剰症状(写真 9)と類似していた. 硫酸銅による過剰症状は著しい発芽障害と本葉の黄化症状に特徴があることがわかった. Zn 材料の過剰症状とは異なり, 子葉黄化症状の特徴は見られなかった.



(写真 16)

硫酸銅を Cu として 400 mg/pot (Cu 826 mg/kg 乾土) 播種 4 日後の様子。

子葉が展開する前に枯死する個体がいくつか見られた。



(写真 17)

播種後 10 日目の様子. 硫酸銅の添加量に伴って発芽障害が顕著となることがわかる. 硫酸銅を Cu としたときの施用量は次のとおりである.

上段 : 標準区

下段左 : 100 mg/pot 区 (Cu 207 mg/kg 乾土)

下段中 : 250 mg/pot 区 (Cu 516 mg/kg 乾土)

下段右 : 400 mg/pot 区 (Cu 826 mg/kg 乾土)



(写真 18)

250 mg/pot (Cu 516 mg/kg 乾土) 播種 11 日後の様子. 本葉第一葉に黄化症状が確認された。

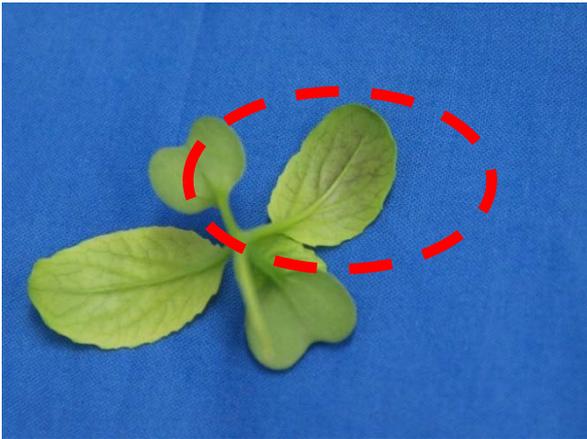


(写真 19)

播種 17 日後の様子.

黄化症状は本葉第一葉から呈していき, 本葉第二葉, 第三葉へと進行している.

なお, 症状は葉柄部から葉の先端にかけて進行していることが確認された.



(写真 20)

250 mg/pot (Cu 516 mg/kg 乾土) 播種 21 日後, 収穫した個体の様子.

葉裏の葉脈に沿って赤紫色化していることがわかる.

(3.4) 硝酸銅による過剰症状

硝酸銅による過剰症状は特段確認されなかった(写真 21). しかしながら, 跡地土壌を観察すると, 特徴的な根域制限が見られた. すなわち, コマツナの根は試験容器内土層の上層に集中しており, 下層には根張りがほとんど見られなかった(写真 22,23).



(写真 21)

播種 21 日後の様子である.

硝酸銅による作物体への害症状は確認されなかった. 硝酸銅を Cu としたときの施用量は次のとおりである.

上段: 標準区

下段左: 100 mg/pot 区 (Cu 207 mg/kg 乾土)

下段中: 250 mg/pot 区 (Cu 516 mg/kg 乾土)

下段右: 400 mg/pot 区 (Cu 826 mg/kg 乾土)



(写真 22)

収穫後, 跡地土壌の根域を観察すると, 100 mg/pot (Cu 207 mg/kg 乾土) で土壌下層に根張りがほとんど見られなかった.

なお, 写真にある土層上部の面が試験容器内では土壌下層面となる.



(写真 23)

100 mg/pot (Cu 207 mg/kg 乾土) の跡地土壌. コマツナの根張りが上層に集中している.

なお, 写真にある土層上部の面が試験容器内では土壌下層面となる.

3) 施肥方法の違いによる検証試験

(1) 作物体の分析結果

施肥方法の違いによる検証試験における作物体の調査・分析結果を表 10 及び表 11 に示した.

硫酸亜鉛区及び硫酸銅区どちらも水溶液浸透法の場合に比べて土壌混合法で明確な生育不良が確認され, 3.2) (1) で得た結果と同じ傾向が見られた. 硫酸亜鉛区で水溶液浸透法の場合は異常症状が確認された一方で, 硫酸銅区の水溶液浸透法では異常症状が確認されない結果となった. このことから, 土壌混合法における作物に対する影響は硫酸銅の方が硫酸亜鉛よりも大きく, 水溶液浸透法の場合は硫酸亜鉛の方が硫酸銅よりも大きいことがわかった.

作物体分析結果(表 11)から硫酸亜鉛区では作物体中の Zn 濃度が土壌混合法で 3090 mg/kg であるのに対し, 水溶液浸透法では 1630 mg/kg と大きな差異が生じた. 硫酸銅区でも同様に土壌混合法で作物体中の Cu 濃度は 45 mg/kg であるのに対し, 水溶液浸透法では 12 mg/kg と差異が生じていた. また, 作物体中の Fe 濃度は硫酸亜鉛区の土壌混合法のみ標準区より低い値となった. 作物体中の P は水溶液浸透法の場合, 土壌混合法より高濃度となる傾向が見られた.

表10 検証試験調査結果

供試 試薬	施肥 方法 ^{a)}	負荷量		ポット No.	発芽率 ^{b)}		葉長 (cm)	生体重 (g/pot)	乾物重 (g/pot)	生体重 指数 ^{c)}	乾物重 指数 ^{c)}	異常 症状
		Zn (mg/pot)	Cu (mg/pot)		1回目 (%)	2回目 (%)						
硫酸 亜鉛	(a)	250	-	1	95	100	2.3	2.1	0.33	7	10	有
				2	95	100	3.2	3.3	0.48	11	14	
				平均	95	100	2.8	2.7	0.41	9	12	
硫酸 銅	(b)	250	-	1	100	100	8.1	25	2.52	84	74	有
				2	100	100	8.5	25	2.30	83	68	
				平均	100	100	8.3	25	2.41	83	71	
硫酸 銅	(a)	-	250	1	55	65	1.8	1.1	0.13	4	4	有
				2	30	60	2.7	1.8	0.34	6	10	
				平均	43	63	2.3	1.4	0.24	5	7	
標準 区	-	-	-	1	100	100	7.7	26	3.28	86	96	なし
				2	100	100	7.7	25	2.99	84	88	
				平均	100	100	7.7	25	3.13	85	92	
標準 区	-	-	-	1	100	100	9.2	30	3.37	100	99	なし
				2	95	100	8.9	30	3.44	100	101	
				平均	98	100	9.0	30	3.40	100	100	

a) 2. 1) (6) 施肥方法に示す(a) 土壌混合法, (b) 水溶液浸透法

b) 発芽率は(発芽した個体 / は種数 20 粒)×100 によって算出

c) 標準区2連の平均値を100として算出

表11 検証試験作物体分析結果

供試 試薬	施肥 方法 ^{a)}	負荷量		ポット No.	乾物重 (g/pot)	作物体の元素濃度 ^{b)}			
		Zn (mg/pot)	Cu (mg/pot)			Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe (mg/kg)	P (%)
硫酸 亜鉛	(a)	250	-	1*	0.33	3252	16	81	0.27
				2*	0.48	2929	17	52	0.26
				平均	0.41	3090	17	66	0.26
硫酸 銅	(b)	250	-	1	2.52	1577	9	137	0.43
				2	2.30	1684	10	151	0.49
				平均	2.41	1630	10	144	0.46
硫酸 銅	(a)	-	250	1*	0.13	63	46	81	0.21
				2*	0.34	29	43	164	0.18
				平均	0.24	46	45	122	0.20
標準 区	-	-	-	1	3.28	51	12	99	0.34
				2	2.99	40	12	110	0.35
				平均	3.13	45	12	104	0.34
標準 区	-	-	-	1	3.37	40	13	128	0.33
				2	3.44	29	8	77	0.28
				平均	3.40	35	10	103	0.30

a) 2. 1) (6) 施肥方法に示す(a) 土壌混合法, (b) 水溶液浸透法

b) 乾物値 n=2 (*を付した区は生育不良のためn=1)

(2) 跡地土壌の分析結果

施肥方法の違いによる検証試験における跡地土壌の分析結果を表 12 に示した。

水溶液浸透法による場合, 3.2) (2)の結果と同様に 0.1 mol/L 塩酸抽出による S-Zn 及び S-Cu は跡地土壌の下層が上層よりも高濃度の結果が得られた。土壌混合法における pH は下層の方が高い傾向があり, EC は逆に上層の方が高い傾向が見られた。水溶液浸透法の場合, pH は上層の方が高い傾向があり, EC は下層の方が高い傾向が見られ, 土壌混合法の場合と逆の傾向にあった。

表12 検証試験跡地土壌分析結果

供試 試薬	施肥 方法 ^{a)}	負荷量		ポット No.	S-Zn ^{b,c)}		S-Cu ^{b,c)}		pH(H ₂ O) ^{d)}		EC ^{e)}	
		Zn (mg/pot)	Cu (mg/pot)		上層 (mg/kg)	下層 (mg/kg)	上層 (mg/kg)	下層 (mg/kg)	上層	下層	上層 (dS/m)	下層 (dS/m)
硫酸 亜鉛	(a)	250	-	1	459	449	9	9	5.47	5.67	0.96	0.77
				2	464	440	9	9	5.78	5.82	0.92	0.71
				平均	462	444	9	9	5.63	5.75	0.94	0.74
	(b)	250	-	1	229	619	10	9	5.61	5.16	0.36	0.82
				2	172	635	10	9	5.57	5.37	0.35	0.79
				平均	201	627	10	9	5.59	5.27	0.35	0.81
硫酸 銅	(a)	-	250	1	7	8	524	429	5.34	5.55	1.13	0.58
				2	6	6	504	438	5.46	5.54	1.00	0.61
				平均	7	7	514	433	5.40	5.55	1.06	0.60
	(b)	-	250	1	6	6	154	647	5.33	5.12	0.50	0.82
				2	6	6	31	848	5.21	5.10	0.62	0.73
				平均	6	6	92	748	5.27	5.11	0.56	0.78
標準 区	-	-	1	6	6	9	8	5.61	5.55	0.06	0.55	
			2	6	6	9	8	6.00	5.47	0.06	0.52	
			平均	6	6	9	8	5.81	5.51	0.06	0.54	

a) 2. 1) (6) 施肥方法に示す(a) 土壌混合法, (b) 水溶液浸透法

b) 0.1規定塩酸抽出液を測定

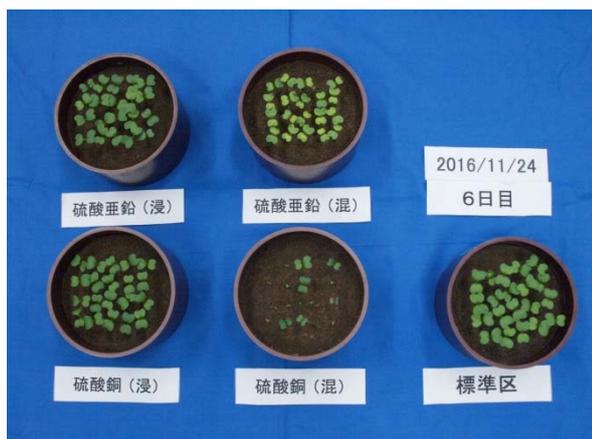
c) 乾物値 $n=1$

d) pH(H₂O)は土壌1:水5の懸濁液を測定

e) EC(電気伝導率)は土壌1:水5の懸濁液を測定

(3) 異常症状の確認

施肥方法の違いによる害症状を確認するため試験を実施したところ, (1)発芽率, (2)異常症状, (3)生育具合に明確な相違が確認された(写真 24~26)。つまり, 2.1) (6)に示す土壌混合法は水溶液浸透法と比較して, 作物体に与える影響が大きいことから異常症状の発現に差異を生じていることがわかった。



(写真 24)

播種 6 日後の様子. 配置した試験区は次のとおり.

右下: 標準区

上段: 硫酸亜鉛 250 mg/pot (Zn 516 mg/kg)

下段: 硫酸銅 250 mg/pot (Cu 516 mg/kg)

左第一列: 施肥方法 2.1) (6) に示す水溶液浸透法

・・・「左写真のラベルに(浸)」と表示

左第二列: 施肥方法 2.1) (6) に示す土壌混合法

・・・「左写真のラベルに(混)」と表示



(写真 25)

播種 14 日後の様子.

硫酸銅区の土壌混合法は発芽した個体に一部のみ生育が進行した. その生育スピードは硫酸亜鉛区の土壌混合法のものと比較すると早かった.



(写真 26)

播種 21 日後の様子. 硫酸亜鉛区及び硫酸銅区の水溶液浸透法は生育が標準区よりやや劣る程度であるように見えた.

(3.1) 硫酸亜鉛による過剰症状

3.2) (3) (3.1) に土壌混合法による硫酸亜鉛の過剰害症状を示したのでここでは水溶液浸透法による結果を記す. 硫酸亜鉛を Zn として 250 mg/pot (516 mg/kg 乾土) 施用した区では, (1) 生育不良, (2) 本葉の黄化症状, (3) 子葉葉縁の黄化症状, (4) 本葉葉縁の黄化症状が確認された. 初期生育は標準区と同等程度であったが (写真 23), 生育中期 (概ね播種 14 日後頃) になると生育が標準区 > 水溶液浸透法のもの > 土壌混合法のものとなり, 収穫日までにその差は改善されなかった (写真 25, 26). 生育中期から後期にかけて本葉の黄化症状が発現し, 本葉の一部が湾曲する症状が観察された (写真 27). また, 生育後期に子葉葉縁に黄化症状が見られ (写真 28), この症状は施肥方法が同じ硫酸銅区では観察されなかった. 本葉の葉縁にも黄化症状が見られ, 一部が白化しているように見えた (写真 29).



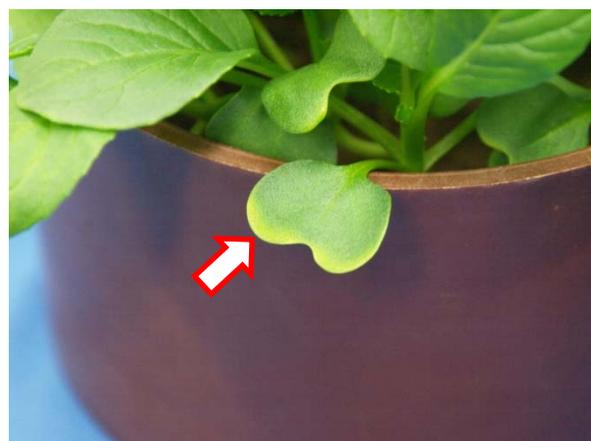
(写真 27)

播種 17 日後の様子.

左: 250 mg/pot (Zn 516 mg/kg 乾土)

右: 標準区

標準区と比較すると本葉が黄化症状を呈していることがわかる. また, 本葉の一部が湾曲しているように見える.



(写真 28)

播種 21 日後の様子. 子葉葉縁の特に先端部分に沿って黄化症状が見られた.



(写真 29)

播種 17 日後の様子. 本葉第二葉の葉縁に薄い黄化症状が観察され, 一部は白化しているように見える.

(3.2) 硫酸銅による過剰症状

2.1 (6) に示す水溶液浸透法で硫酸銅を Cu として 250 mg/pot (516 mg/kg 乾土) 施用した場合, 標準区に比べてやや生育が劣っていた (写真 26) が, 特段の害症状は確認されなかった (写真 30).

一方, 土壌混合法による区では (写真 20) と同様の本葉葉裏の赤紫色化が確認され, 土壌混合法による硫酸亜鉛区ではこの症状は確認されなかった (写真 31).



(写真 30)

播種 21 日後の様子。
 コマツナを収穫後、標準区の個体と比較したが、特段の害症状は見られなかった。

右:標準区

左:250 mg/pot (Cu 516 mg/kg 乾土)



(写真 31)

収穫後の個体の比較。

右:硫酸銅 250 mg/pot (Cu 516 mg/kg 乾土)

左:硫酸亜鉛 250 mg/pot (Zn 516 mg/kg 乾土)

どちらもとも土壤混合法によるものである。

4. 考察

1) 亜鉛過剰症状確認試験

(1) 作物体の調査・分析結果

(1-1) 生育と異常症状

表7に掲げた各区の乾物重と発芽率の関係を図示した(図2)。この結果、硫酸銅区における著しい生育不良と発芽率の低さが明確であり、特に250 mg/pot区、400 mg/pot区で顕著だった。硫酸亜鉛区の発芽率は100%と良好であったが、硫酸銅区と同様に250 mg/pot区、400 mg/pot区に著しい生育不良が見られた。一方、硝酸亜鉛区はこれと同じ傾向が見られたが、生育不良の程度は軽く、硝酸銅区は標準区と比較して同等以上の生育が見られた。硫酸亜鉛区及び硫酸銅区と硝酸亜鉛区及び硝酸銅区で過剰症状に差異が生じた理由は施肥方法の違いによる影響が大きいと推察された。つまり、土壤混合法の場合は水溶液浸透法に比べて播種後、種子周辺に存在するZnもしくはCu濃度が高くなることが予想された。植物の金属元素含量に関するデータ集録¹⁾によると、Cuの害作用は生育初期に著しいとされており、初期生育における作物体へのCuの影響が大きいものと思われる。本試験結果から土壤混合法の場合、ZnにおいてもCuと同様に初期生育に害作用を及ぼすものと考えられた。その際、250 mg/pot(516 mg/kg)以上で生育不良が顕著に現れることが推察される。なお、供試土壌は異なるが硫酸亜鉛を乾土当たり150 mg/kg及び300 mg/kg 負荷させた土壌でコマツナ栽培した報告¹⁴⁾によると、150 mg/kg 負荷区で黄化症状は発現しないが収量は低下し、300 mg/kg 負荷区では黄化症状が発現したうえ収量がZn無添加区の35%に低下したとある。このことから、コマツナに対する硫酸亜鉛の過剰症状は乾土当たり300 mg/kg以上の施用量で著しい異常症状が発現すると推定される。

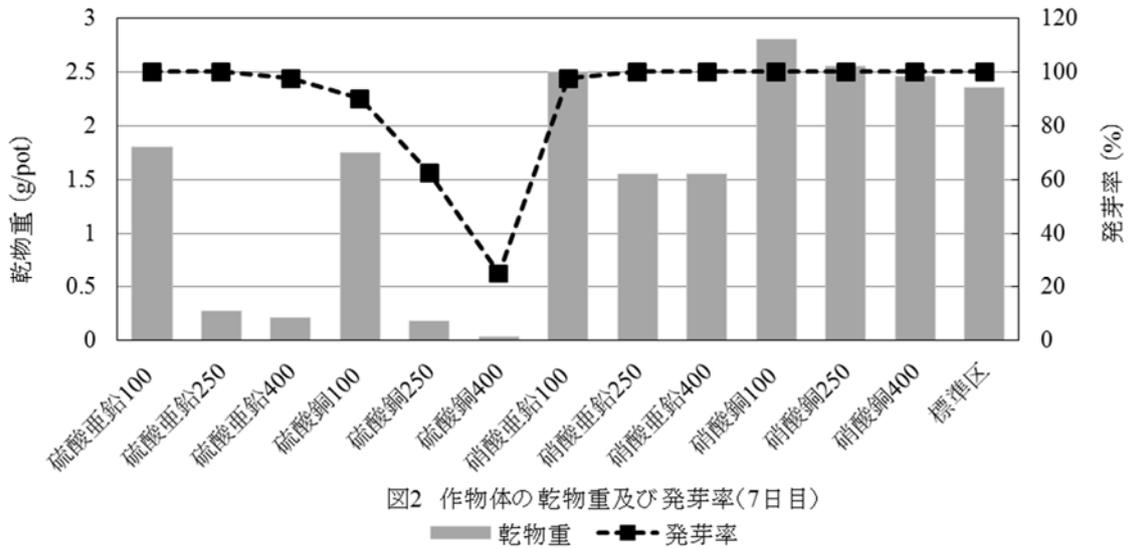


図2 作物体の乾物重及び発芽率(7日目)

■ 乾物重 -■- 発芽率

(1-2) Zn 及び Cu の吸収

本試験ではサンプル数が少ないが、硫酸亜鉛区及び硝酸亜鉛区の作物体の Zn 濃度は、Zn 負荷量に伴い、高くなる傾向が示唆された(図 3)。一方、硫酸銅区及び硝酸銅区では Cu 負荷量に伴って作物体中の Cu が必ずしも高まることは無かった(図 4)。このことから、コマツナは Cu に比べて Zn を積極的に吸収する可能性が考えられる。

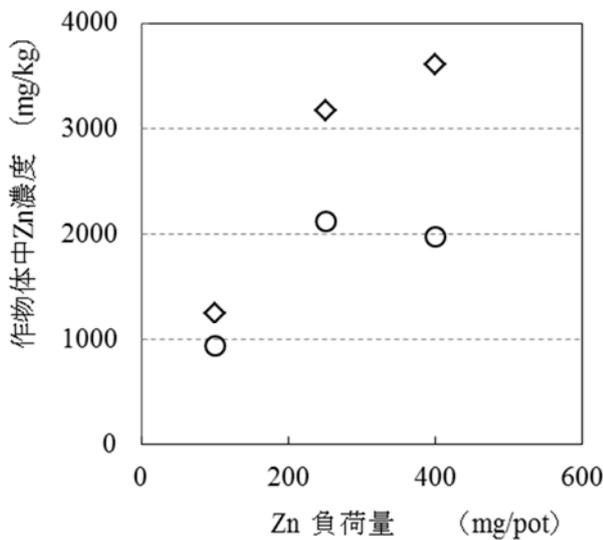


図3 亜鉛材料による作物体Zn濃度

◇ 硫酸亜鉛 ○ 硝酸亜鉛

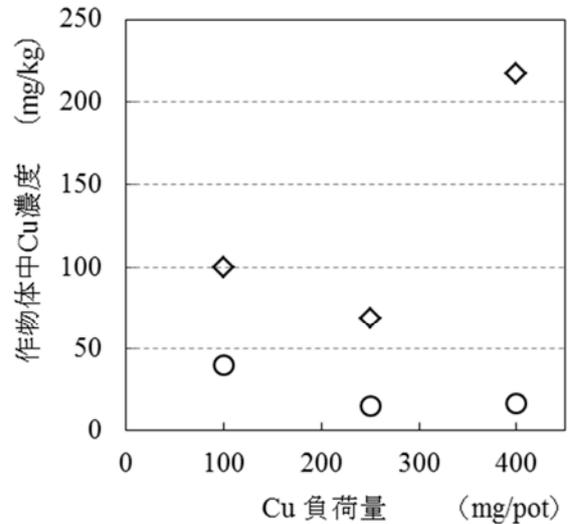


図4 銅材料による作物体Cu濃度

◇ 硫酸銅 ○ 硝酸銅

(1-3) 作物体中 Zn 及び Cu の P との関係

Zn は P と拮抗作用があると思われる⁹⁾ため、硫酸亜鉛区、硝酸亜鉛区、標準区における Zn と P の関係を調べたところ、負の相関が得られた(図 5)が、硫酸銅区、硝酸銅区、標準区における Cu と P に同様の関係性は見られなかった(図 6)。硫酸銅区では著しい生育不良が見られたこと、硝酸銅区では根域制限によって Cu の吸収を軽減したと思われることから、作物体における Cu と P の拮抗作用を明確にするには負荷濃度を変更するなど別試験で追究する必要があると思われる。

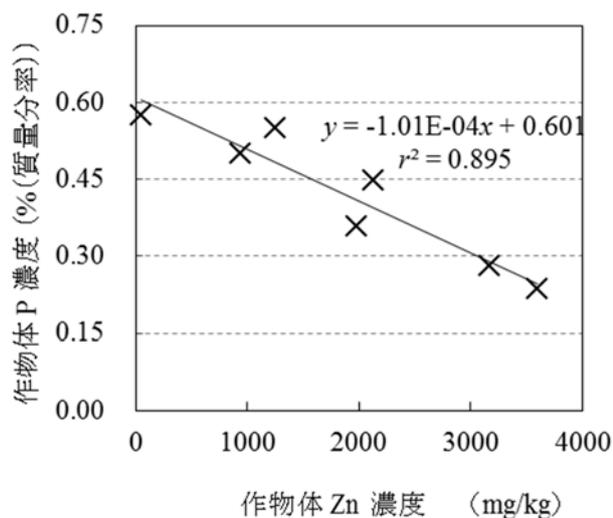


図5 作物体 Zn及びP濃度の関係

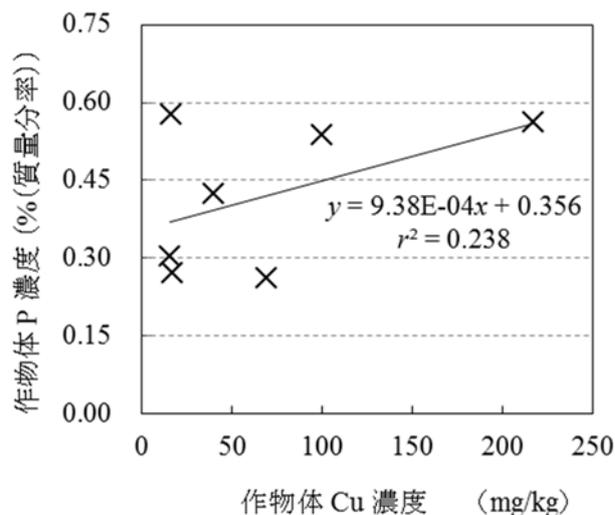


図6 作物体 Cu及びP濃度の関係

(1-4) 作物体中 Cu 及び Fe との関係

既報¹³⁾では硫酸銅, 硝酸銅, EDTA 銅の過剰施用によるコマツナの異常症状を確認し, これらの負荷量の増加に伴い作物体中の Cu 濃度だけではなく Fe 濃度が増加することを示した. 通常, Cu と Fe は拮抗作用があるとされるが, 植害試験の条件下では Cu 材料の負荷量増加に伴う硫酸根等の影響により, 土壌粒子に吸着されていた Fe が交換的に脱着され, 作物体に吸収された可能性が示唆された.

本試験においても表 8 に掲げた各ポットの作物体中 Cu 濃度及び Fe 濃度の関係を図示した(図 7).

この結果, 既報¹³⁾と同様に作物体中の Cu 濃度及び Fe 濃度は, 一部を除いてほぼ比例する関係があることがわかった. 硝酸銅区以外は Zn や Cu の負荷量増加に伴い, 作物体中 Fe 濃度が増え, これとともに Cu 濃度も増えていた. さらに標準区は Fe 濃度や Cu 濃度が比較的高濃度検出されたことに加え, Fe 濃度に相応する作物体中 Cu 濃度を示していた. 標準区は Zn や Cu を負荷していないことから作物体中の Fe 濃度や Cu 濃度が比較的高濃度検出された原因について調査を実施したが, 原因特定には至らなかった. 肥料として標準区に施用した硫安の NH_4^+ や塩加の K^+ が作用している可能性や供試土壌の特質が影響している可能性が考えられるが, 詳細な究明には別調査が必要であると判断された. 植害試験条件下で Fe と Cu が拮抗作用を示さず, 逆に吸収促進に働く原因や施肥成分による作物体中 Fe 濃度が高まるか否か確認することが必要だと考えられる.

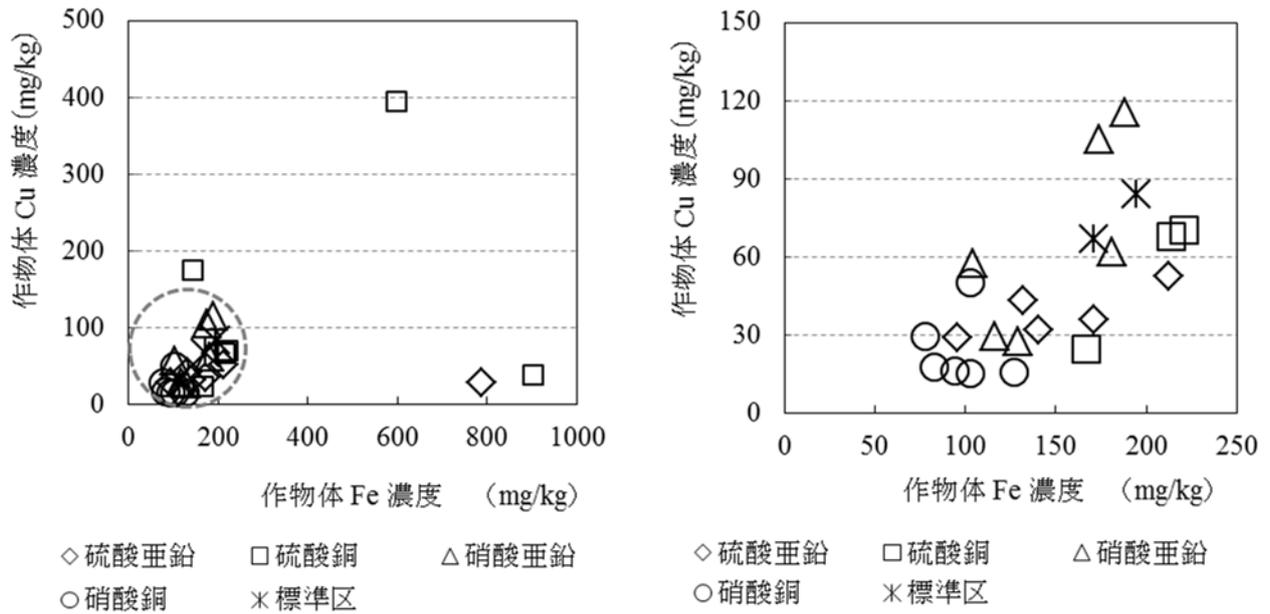


図7 作物体中 Fe 濃度と Cu 濃度との関係
(右図は左図の灰色破線で囲んだ部分を拡大したもの)

(2) 跡地土壌の分析結果

跡地土壌分析結果は表 9 に示した. 2.1) (6) に示す水溶液浸透法とした硝酸亜鉛区及び硝酸銅区は負荷した Zn 及び Cu は上層と比較すると, 下層に高濃度存在していることがわかった. 一方, 土壌混合法とした硫酸亜鉛区及び硫酸銅区ではこのような傾向は見られなく, 施肥方法の違いで土壌中の Zn 及び Cu の分布に大きな差異が生じると考えられた. 土壌の重金属保持力は通常 Zn よりも Cu の方が強いとされ, Cu の土壌中における移動性及び栽培作物への移行性は Zn に比べて低いものと考えられる¹⁵⁾ため, 本試験における水溶液浸透法とした硝酸亜鉛区及び硝酸銅区の跡地土壌下層における Zn 及び Cu 濃度は Cu の方が Zn よりも高濃度になる傾向になったと考えられる(図 8, 図 9).

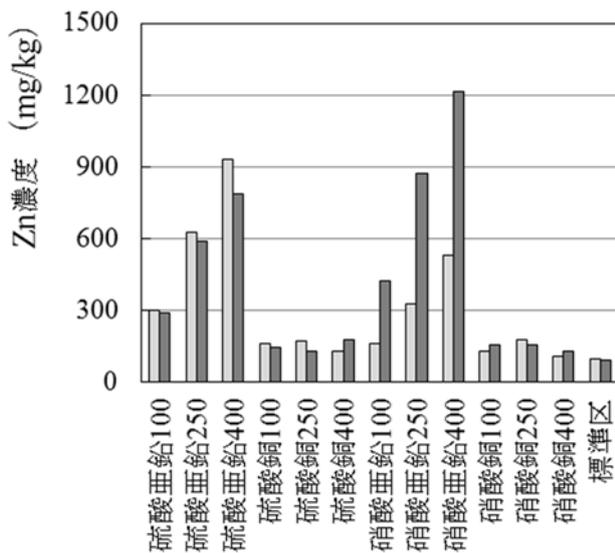


図8 層別の Zn 濃度
□ 上層 ■ 下層

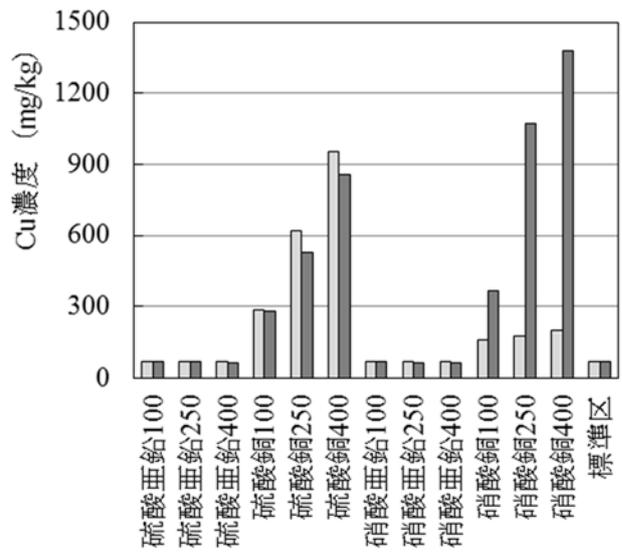


図9 層別の Cu 濃度
□ 上層 ■ 下層

(3) 異常症状の観察

(3-1) カウンターイオンによる影響

Zn 材料及び Cu 材料の過剰施用により生じる異常症状は負荷した Zn や Cu の影響だけでなく、供試試薬に付随するカウンターイオンによる害も想定される。今回の試験で生育不良が顕著だった硫酸亜鉛区及び硫酸銅区は供試試薬由来の硫酸(SO_4^{2-})を含んでおり、その負荷量は表 5 のとおりである。コマツナを供試作物として硫酸加里を過剰施用した加里の生理障害確認試験⁵⁾では硫酸加里を K_2O として 100 mg/pot~2800 mg/pot 施用しており、100 mg/pot~1200 mg/pot の施用量であれば生育は良好で異常症状は確認されなかったと報告している。このことから、 K_2O として 1200 mg/pot の硫酸加里施用(硫酸加里として 2.265 g/pot)に付随する硫酸(SO_4^{2-})は 1248 mg/pot と算出され、1248 mg/pot 以下の硫酸(SO_4^{2-})であれば異常症状は生じないものと推定される。

本試験で設定した硫酸亜鉛及び硫酸銅の施用量に付随する硫酸は 605 mg/pot 以下であることから(表 3)、害症状の原因が硫酸(SO_4^{2-})による可能性は低いと思われる。硫酸亜鉛区及び硫酸銅区で生じた異常症状は負荷された Zn 及び Cu による直接的な要因や拮抗作用による養分バランスの乱れが Zn 及び Cu 材料の過剰症状を発現させた原因になったと考えられる。

なお、硫酸亜鉛区と硫酸銅区の生育を比較すると(写真 3)、硫酸亜鉛区の生育は Zn 負荷量に伴い不良となるが、硫酸銅区ではむしろ Cu 負荷量に伴って生育が良好だった。つまり、硫酸亜鉛区では高濃度の Zn を吸収し、生育不良になった一方、硫酸銅区は Cu を標準区より高濃度吸収することがなく、カウンターイオンの硝酸(NO_3^-)は硝酸態窒素として栄養に供されたものと思われる。さらにコマツナは好硝酸性植物に分類される¹⁶⁾ことを考慮すると当該試験による硝酸(NO_3^-)の過剰症状が発現した可能性は低いと考えられる。

(3-2) 拮抗作用による影響

一般的な作物に対する Zn 及び Cu の過剰症状は拮抗作用による Fe 欠乏症状、特に上位葉の黄化症状(クロロシス)が挙げられる¹¹⁾。本試験では硫酸亜鉛区及び硫酸銅区にこの症状が発現した(写真 7,19)。しかしながら、上位葉の黄化症状が発現した作物体中の Fe 濃度はむしろ標準区より高く、Zn 及び Cu を過剰施用したことによって生じる Fe 欠乏症状以外の要因が存在する可能性が示唆された。

コマツナに対するりん酸の生理障害確認試験¹⁷⁾によると、りん酸欠乏症状として葉裏の赤紫色化が確認されている(写真 32)。この症状は作物体中のりん酸が欠乏し、炭水化物がエネルギー源として利用されなくなり、糖分とアントシアニンが結合して色素であるアントシアニンを生成したことにより生じるものとされている。本試験の硫酸亜鉛 400 mg/pot 区及び硫酸銅 250 mg/pot 区で見られた葉裏の赤紫色化はこの症状と類似していた。

Zn もしくは Cu の拮抗作用による P の欠乏症状が疑われたが、葉の表皮細胞におけるアントシアニンの合成にはりん酸欠乏以外にも、無機養分の欠乏、過剰、アンバランス、温度ストレス、病害等の複数の要因が関与するとされ、これらの光合成抑制作用によってアントシアニン合成が促進される¹⁸⁾。このことから直接的な要因の特定は困難であるが、本試験における硫酸亜鉛区及び硫酸銅区の葉裏の赤紫色化は、Zn もしくは Cu の過剰施用による何らかの光合成抑制作用が働いたことでアントシアニンが生成されたものだと考えられる。

(3-3) 跡地土壌の観察

跡地土壌の観察で見られた硫酸銅区の根域制限(写真 23)は、まず水溶液浸透法としたため下層に高濃度の Cu が存在したこと、次に初期生育は良好に進んだが、生育が進むにつれ根が下層付近にさしかかると高濃度の Cu を根が察知し、比較的 Cu が低濃度である上層に根を拡大せざるを得ない状況であったと予想されること、以上のことが下層に根域が見られず、上層に集中した原因と推察される。



(写真 32)

切り取って葉裏を観察したところ、葉脈を中心としてアントシアニンによる赤紫色への変色がみられた。

コマツナの生理障害ーりん酸¹⁷⁾から抜粋

2) 施肥方法の違いによる検証試験

(1) 作物体の分析結果

(1-1) Zn 及び Cu の影響

作物体の分析結果によると硫酸亜鉛区では作物体中の Zn 濃度が水溶液浸透法と比較すると土壌混合法の場合、およそ倍の Zn 濃度が検出された。このことから施肥方法の違いによって、作物体中の Zn 濃度が大きく異なることがわかった。これは土壌混合法の場合、水溶液浸透法よりも上層に高濃度の Zn が分布すると考えられる(図 10)ことから、生育初期の作物体へ対する影響に差異が生じたことが原因と思われる。さらに土壌混合法の方が水溶液浸透法よりも作物体中の Zn が高濃度であったこと(図 11)、及び生育不良のため生育中期頃から生育が停滞していたことを考慮すると生育初期に高濃度の Zn を吸収したものと推察される。作物体中の Zn もしくは Cu 濃度と乾物重の関係から、施肥方法の違いによる生育不良の傾向に差異が現れることも明らかとなった(図 12)。硫酸銅区でも施肥方法の違いで同様の傾向(図 10,図 11)があったことから、土壌混合法とした場合、生育初期に高濃度の Cu を吸収したものと考えられる。

したがって、土壌混合法は水溶液浸透法と比較して土壌上層の可溶性金属濃度を上昇させ、これが作物体中の Zn 及び Cu 濃度の上昇を促し、作物体の生育不良を誘発したものと考えられる。

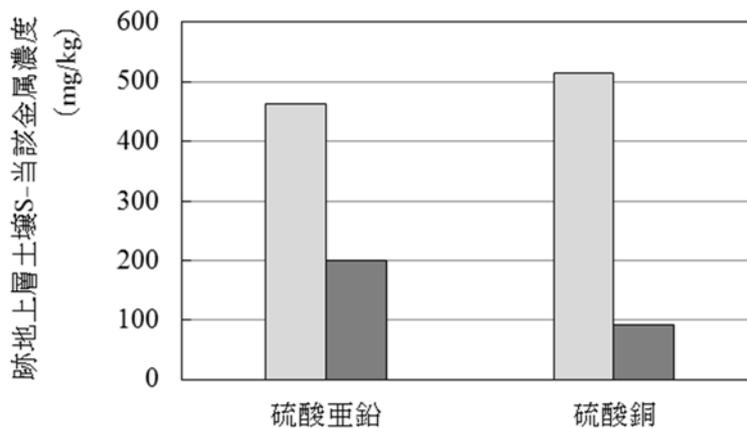


図10 施肥方法の違いによる跡地上層土壌中の可溶性金属の差異

□(a)土壌混合法 ■(b)水溶液浸透法

※ 表12に示す 上層の平均値を使用

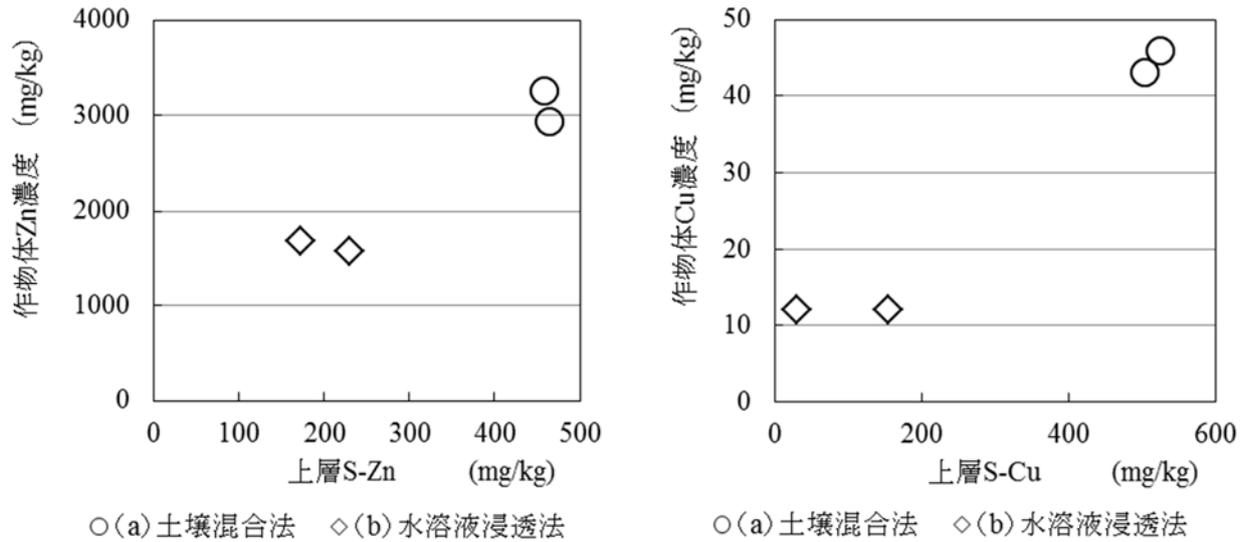


図 11 跡地上層土壌中の可溶性金属濃度と作物体中濃度との関係
(表 11 及び表 12 に示した各ポットの値を使用)

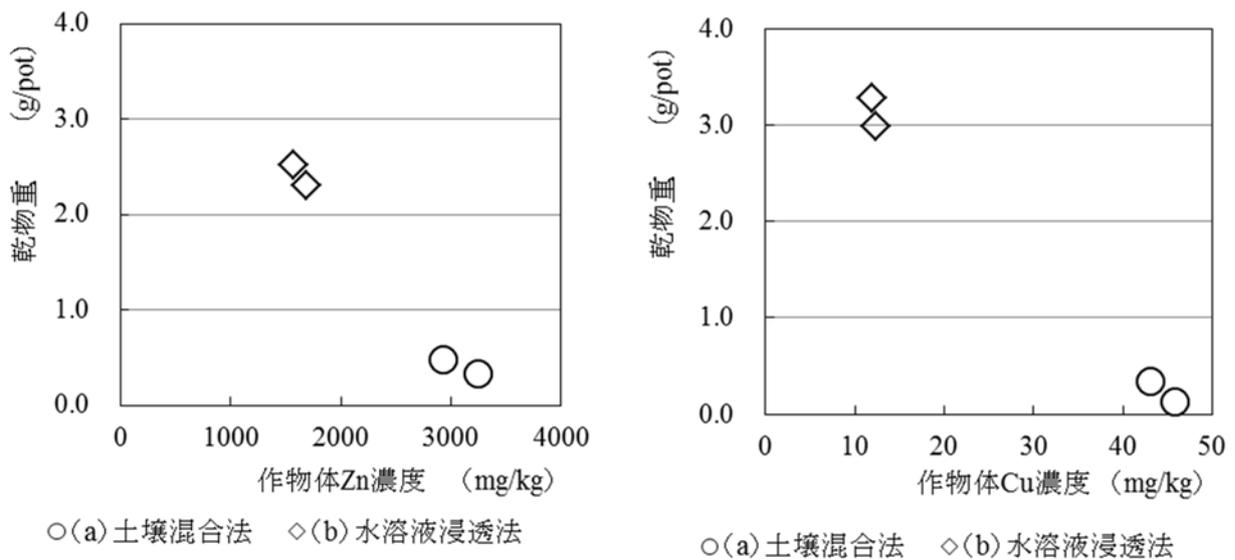


図 12 作物体中当該金属濃度と乾物重との関係
(表 11 及び表 12 に示した各ポットの値を使用)

(1-2) 根域への影響

硫酸亜鉛区で水溶液浸透法とした場合、作物体中の Zn は標準区と比較すると約 45 倍の濃度差が見られた。一方、硫酸銅区で同様の施肥方法とした場合、標準区との差はほとんど見られなく、4.1 (3) に示したとおり、高濃度の Cu が分布する下層に根域を拡大しなかったことが硫酸亜鉛区と硫酸銅区における作物体中の Zn もしくは Cu 濃度の傾向に差が生じた原因と考えられる。換言すると、下層に高濃度の Zn が存在した状況下でもコマツナの根は上層に留まることなく下層に根域を拡大し(写真 14)、土壌中の Zn を積極的に吸収したものと思われる。

(1-3) 拮抗作用による影響

硫酸亜鉛区の土壌混合法の場合、作物体中の Fe 濃度が標準区より低かったが、水溶液浸透法の場合は標準区より高濃度であったことから Fe 欠乏症状による症状とは断定できなかった。

生育不良となった土壌混合法による硫酸亜鉛区及び硫酸銅区では標準区と比較して作物体中の P が低くなる拮抗作用の傾向が見られた。一方、水溶液浸透法による硫酸亜鉛区は Zn を高濃度吸収したが、標準区以上の P 濃度が検出されているうえ、りん酸欠乏症状の異常症状も確認されなかった。このことから植害試験条件下では必ずしも Zn と P が拮抗作用にはならないことが本試験結果から考えられた。

(2) 跡地土壌の分析結果

(2-1) 0.1 mol/L 塩酸抽出による Zn 及び Cu

0.1 mol/L 塩酸抽出による Zn 及び Cu (S-Zn 及び S-Cu) は土壌混合法に比べて水溶液浸透法の場合、下層に高濃度存在し(表 11), 4.1 (2)に示した Zn 全量及び Cu 全量と同じ傾向にあった。さらに、水溶液浸透法の場合、硫酸亜鉛区よりも硫酸銅区の方が、上層と比較して下層で高濃度となる傾向が強く(図 13, 図 14), 硫酸亜鉛区の S-Zn 濃度は上層が 201 mg/kg, 下層が 627 mg/kg であり、硫酸銅区の S-Cu 濃度は上層が 92 mg/kg, 下層が 748 mg/kg の分析結果が得られた。すなわち、水溶液浸透法において硫酸亜鉛区の上層中 Zn 濃度は下層の 1/3 程度であるが、硫酸銅区の場合は、上層中 Cu 濃度は下層の 1/8 程度しか分布していないことがわかった。栽培期間中の灌水による影響を考慮すべきであるが、土壌中の Cu は Zn に比較して上方移動が困難であることが推察された。これは土壌中の Zn は Cu よりもイオン化傾向が高いことに加え、土壌の重金属保持力は Cu の方が高いと考えられる¹⁹⁾ことから、Zn と Cu における土壌中の濃度分布に差異が生じたと思われる。このため、本試験の水溶液浸透法における作物体中の Zn 濃度が Cu 濃度よりも Zn 負荷量に伴い顕著に高まったと推察される。

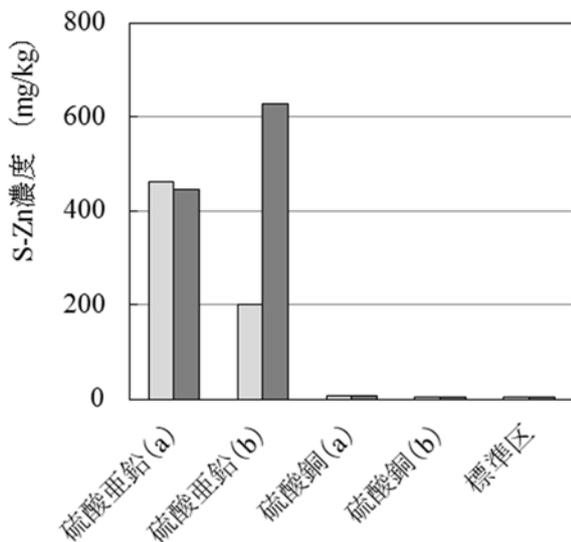


図13 層別のS-Zn濃度
□ 上層 ■ 下層

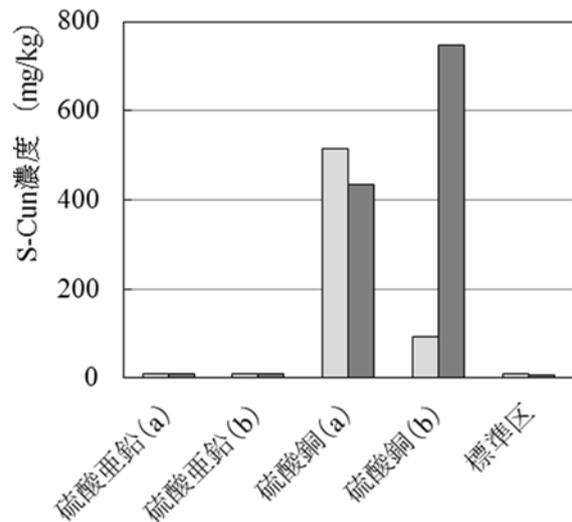


図14 層別のS-Cu濃度
□ 上層 ■ 下層

(2-2) 硫酸根の分布

pH は土壌混合法の場合、上層より下層が高い傾向にある一方、水溶液浸透法では逆に下層より上層が高い結果となった。EC は土壌混合法の場合、下層より上層が高く、水溶液浸透法では逆に上層より下層が高くなる

結果が得られた。土壌中で供試試葉の硫酸亜鉛及び硫酸銅は解離し、硫酸根(SO_4^{2-})を生じると考えられる。土壌はマイナスに帯電しているため、陰イオンは陽イオンと比較すると土壌中で移動しやすいものと思われ、栽培期間中の灌水によって下層へ移動することが想定された。水溶液浸透法では硫酸根(SO_4^{2-})が下層に蓄積されたと予想されることから、pH が上層よりも低く、EC が高くなったと思われる。

一方、土壌混合法の場合は土壌下層よりもむしろ上層の方で pH が低くなり、EC が高くなる測定結果が得られた。このことから下層以上に上層に硫酸根(SO_4^{2-})が存在するものと考えられた。すなわち、栽培期間中の灌水による硫酸根の下層移動が想定されていたが否定された結果となった。土壌中の腐植物質が正電荷を持つともいわれており²⁰⁾、供試土壌中の腐植物質等が施肥時にはすでに硫酸根を保持している可能性が示唆される。つまり、施用方法の違いで硫酸根の分布にも相違が生じるものと予想される。

(3) 異常症状の確認

土壌混合法とした硫酸亜鉛区及び硫酸銅区を比較すると、発芽率は硫酸亜鉛で 100 %と良好であったのに対し硫酸銅では 63 %と低く、乾物重の比較でも硫酸銅区が劣っていた。このことから、コマツナに対する重金属の害は Cu の方が Zn よりも強い傾向であると考えられる。さらに、発芽障害が特徴的だった硫酸銅に対して硫酸亜鉛はその特徴がないが、子葉を中心に黄化症状が発現する特徴が見られ、同濃度の負荷量であれば双方による過剰害症状は判別が可能であると考えられる。

また、重金属塩化物の添加による土壌微生物活性の抑制効果に関する調査によると、Cu、Zn 及び Mn の順に土壌微生物の抑制効果が大きく、作物の生育に及ぼす影響力と同じ傾向であるとされているが²¹⁾、本試験のコマツナについても Cu の方が Zn よりも生育が悪い結果であった。生育不良には土壌微生物活性の影響も要因に挙げられる。ただし、植害試験の条件下ではコマツナの生育上、施用した Zn 及び Cu 間で根域拡大に相違が生じることから、水溶液浸透法の場合は Zn の方が生育が悪い結果であった。

以上のことから、施肥方法の違いでコマツナの生育や発現する異常症状が大きく異なることが判明した。さらに、土壌への親和性によりその影響の発現程度まで異なるものと予測されたことから、植害試験の方法に施肥方法の指定が必要であるとともに、供試肥料の植物に対する害を正確に判定するためには現場圃場等における供試肥料の実際の施肥方法を十分考慮した施肥方法の選定が重要であると考えられた。

5. まとめ

植害試験におけるコマツナの異常症状の正確な判定に役立つ基礎資料を作成するため、供試試葉として流通肥料に使用実績のある硫酸亜鉛及び硝酸亜鉛を選定し、Zn の効果を目的に使用される肥料材料のコマツナに対する過剰症状確認試験を実施した。Zn 材料に加えて既に過剰症状を確認した Cu 材料を対照にし、硫酸銅区及び硝酸銅区を設定した。供試土壌は灰色低地土とし、供試試葉の硫酸亜鉛、硝酸亜鉛、硫酸銅、硝酸銅を段階的に施用、人工気象装置内で 21 日間栽培した。結果、供試試葉の施肥方法の違いで過剰害症状に相違が生じる可能性が推察された。このため、全層施肥による方法を土壌混合法、供試試葉水溶液を土壌下層から上層に向けて浸透させる方法を水溶液浸透法とし、硫酸亜鉛及び硫酸銅を用いて検証試験を実施したところ、施肥方法の違いで害症状に相違が生じることが判明した。植害試験における害症状を正確に判定するためには、供試肥料が実際の圃場でどのような施肥方法とされるか十分考慮し、植害試験上の施肥方法を選定する必要があるとともに、植害試験の方法に施肥方法の指定が必要であると考えられた。

Zn 材料及び Cu 材料による過剰害症状は次のとおりであった。いずれも 250 mg/pot(516 mg/kg 乾土)以上の施用量で症状が顕著となった。

土壌混合法による硫酸亜鉛区では(1)生育不良, (2)子葉の黄化症状, (3)子葉の下垂, (4)本葉の黄化症状, (5)子葉裏の赤紫色化, (6)本葉葉縁の黄化症状の症状が施用量 100 mg/pot (207 mg/kg 乾土), 250 mg/pot (Zn 516 mg/kg 乾土) 及び 400 mg/pot (Zn 826 mg/kg 乾土) で発現し, 水溶液浸透法による場合は(1)生育不良, (2)本葉の黄化症状, (3)子葉葉縁の黄化症状, (4)本葉葉縁の黄化症状の症状が発現することを施用量 250 mg/pot (Zn 516 mg/kg 乾土) で確認した。

水溶液浸透法による硝酸亜鉛区では(1)生育不良, (2)子葉の黄化症状, (3)子葉葉縁の黄化症状, (4)本葉の黄化症状が施用量 250 mg/pot (Zn 516 mg/kg 乾土) 及び 400 mg/pot (Zn 826 mg/kg 乾土) で確認された。

土壌混合法による硫酸銅区は(1)発芽障害, (2)本葉の黄化症状, (3)本葉裏の赤紫色化が施用量 250 mg/pot (Cu 516 mg/kg 乾土) 及び 400 mg/pot (Cu 826 mg/kg 乾土) で発現した。水溶液浸透法による硫酸銅区では, 特段異常症状は確認されず, この原因は跡地土壌の観察において根域制限が見られたこと, 上層に比べて下層に Cu が高濃度検出されたことから, コマツナの根が上層に留まり, Cu による害を軽減できたためと考えられた。

謝 辞

本試験の実施にあたり, 日本大学生物資源科学部生命化学科野口章教授に多大な御指導を賜りました。ここに衷心から感謝の意を表します。

文 献

- 1) 農林水産省農蚕園芸局長通知:肥料取締法の一部改正に伴う今後の肥料取締りについて, 別添 1, 植物に対する害に関する栽培試験, 昭和 59 年 4 月 18 日, 59 農蚕第 1943 号 (1984)
- 2) 農林水産省告示:肥料取締法に基づき普通肥料の公定規格を定める等の件, 昭和 61 年 2 月 22 日, 農林水産省告示第 284 号, 最終改正平成 28 年 12 月 19 日, 農林水産省告示第 2535 号 (2016)
- 3) HENRY D. FOTH: 土壌肥料学の基礎 江川友治監訳, p.189~191, 養賢堂, 東京 (1986)
- 4) 農林水産省: 都道府県施肥基準等
<http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyohozen_type/h_sehi_kizyun/pdf/siry03.pdf>
- 5) 藤田卓: コマツナの生理障害—加里—, 肥料研究報告, 8, 182~200 (2015)
- 6) 環境庁水質保全局長通知: 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基準について, 昭和 59 年 11 月 8 日, 環水土 149 号
- 7) 総理府: 農用地の土壌の汚染防止等に関する法律施行令, 昭和 46 年 6 月 24 日, 総理府政令第 204 号「第二条第一項第三号」
- 8) 財団法人日本土壌協会: 土壌機能モニタリング調査のための土壌, 水質及び植物体分析法, 東京 (2001)
- 9) ポケット肥料要覧 2013/2014, p.94~95 農林統計協会 (2015)
- 10) 渡辺和彦, 後藤逸男, 小川吉雄, 六本木和夫: 環境・資源・健康を考えた土と施肥の新知識, p.211~222, 社団法人 農山漁村文化協会, 東京 (2012)
- 11) 独立行政法人農業環境技術研究所: 植物の金属元素含量に関するデータ集録, p.167~168, 昭和 52 年 2 月 農林水産技術会議事務局 <<http://www.niaes.affrc.go.jp/techdoc/hvymetal/14cumzn.pdf>>
- 12) 藤原俊六郎, 安西徹郎, 小川吉雄, 加藤哲郎: 新版 土壌肥料用語辞典 第 2 版, p.106, p.121, 社団法人

農山漁村文化協会, 東京 (2010)

- 13) 五十嵐総一, 八木啓二, 添田英雄, 有隅孝子, 加島信一: コマツナの生理障害－銅－, 肥料研究報告, **9**, 170~184 (2016)
- 14) 伊藤淳次, 田村明長, 山根忠昭: し尿処理汚泥の連用が作物および土壌に及ぼす影響, 島根農試報告, **25**, 83~100 (1991)
- 15) 萩山慎一, 坂本一憲, 鈴木弘行, 牛尾進吾, 安西徹郎, 犬伏和之: 家畜ふんコンポストを施用した各種畑土壌におけるコマツナによる亜鉛と銅の吸収, 日本土壌肥料学雑誌, **76** (3), 293~297 (2005)
- 16) 池田英男: 養液栽培の新技术－その現状と展望－, 作物の栄養特性からみた培養液管理, 養賢堂, 東京 (1998)
- 17) 藤田卓: コマツナの生理障害－りん酸－, 肥料研究報告, **6**, 117~129 (2013)
- 18) 一般社団法人 日本植物生理学会, みんなのひろば 植物 Q&A, (2009)
< https://jspp.org/hiroba/q_and_a/detail.html?id=1903&key=1903&target=number >
- 19) King, D.L.: Retention of metals by several soils of the southeastern United States. Environ. Qual., **17**, 239~246 (1988)
- 20) 藤原俊六郎, 安西徹郎, 小川吉雄, 加藤哲郎: 新版 土壌肥料用語辞典 第 2 版, p.63, 社団法人 農山漁村文化協会, 東京 (2010)
- 21) 駒井豊, 山田研一, 山口益郎: 多量に添加した重金属塩が土壌の二酸化炭素発生・無機態窒素の有機化・ウレアーゼ活性におよぼす影響, 日本土壌肥料学雑誌, **52** (4), 305~310 (1981)

Physiological disorder of Komatsuna - Zinc -

Souichi IGARASHI¹, Erika HIRATA², Hideo SOETA², Shinichi KASHIMA²

¹ Food and Agricultural Materials Inspection Center, Fukuoka Regional Center

(Now) Nagasaki Prefecture Kenhoku Development Bureau Agriculture & Forestry Department

² Food and Agricultural Materials Inspection Center, Fukuoka Regional Center

This study was intended to accurately judge the symptoms that occur in the vegetation test on the harm against plants. The physiological disorder confirmation test, in which it was occurred the material containing zinc excessive symptoms about Komatsuna (*Brassica rapa var. perviridis*) intentionally, was undertaken. Not only two of the reagents containing zinc were chosen under this study, but also two of the reagents containing cooper were chosen as a reference. Which these were zinc sulfate, zinc nitrate, cooper sulfate and cooper nitrate, and are used generally to raise fertilizer quality for aiming at the purpose of zinc's and copper's physiological effects against plants. As a result, it was found excessive symptoms about Komatsuna depends on the difference of the fertilization methods. We verified two methods which the reagents containing zinc or cooper mix with the soil total volume in the plastic bag (as the method named all layer fertilization), and the aqueous solutions dissolved each reagents penetrates from under soil layer to upper soil layer in test container (as the method named penetrating aqueous solutions fertilization) . Excessive symptoms about Komatsuna occurred extremely by all layer fertilization compared to penetrating aqueous solutions fertilization. It is necessary to specify the designation of the fertilization method to the official regulation of vegetation test on the harm against plants. As excessive symptoms confirmation examination using zinc sulfate by all layer fertilization, it was observed (1) the poor growth of leaves, (2) cotyledon changed yellow color, (3) cotyledon sagging, (4) upper leaves changed yellow color, (5) the backside of cotyledon changed in purple-red color, (6) edge of upper leaves changed yellow color lightly. In the case of penetrating aqueous solutions fertilization, (1) the poor growth of leaves, (2) upper leaves changed yellow color, (3) edges of cotyledon changed yellow color lightly, (4) upper leaves changed yellow color were observed. The case using zinc nitrate by penetrating aqueous solutions fertilization, it was observed (1) the poor growth of leaves, (2) cotyledon changed yellow color, (3) edges of cotyledon changed yellow color lightly, (4) upper leaves changed yellow color. The case using copper sulfate by all layer fertilization, it was observed (1) germination failure, (2) upper leaves changed yellow color, (3) the backside of upper leaves changed in purple-red color. In the case of penetrating aqueous solutions fertilization, it was not observed any symptoms. The case using copper nitrate by penetrating aqueous solutions fertilization, it was not observed any symptoms.

Key words vegetation test on the harm against plants, komatsuna, zinc sulfate, zinc nitrate, copper sulfate, copper nitrate, excessive symptoms, yellowing of leaves

(Research Report of Fertilizer, **10**, 208~241, 2017)