

水耕培養液中の鉄濃度がそ菜の銅過剰障害に及ぼす影響

誌名	園藝學會雜誌
ISSN	00137626
著者	大沢, 孝也 池田, 英男
巻/号	58巻3号
掲載ページ	p. 673-678
発行年月	1989年12月

水耕培養液中の鉄濃度がそ菜の銅過剰障害に及ぼす影響

大沢孝也・池田英男*

大阪府立大学農学部 591 堺市百舌鳥梅町

The Effect of Iron Concentration in the Nutrient Solution on Copper Toxicities in Vegetable Crops

Takaya OSAWA and Hideo IKEDA

College of Agriculture, University of Osaka Prefecture, Sakai, Osaka 591

Summary

Bean, spinach, lettuce, and radish were grown in solution culture to investigate the effect of Fe concentration in the nutrient solution on Cu toxicities. Hoagland's No. 1 solution was used as the basic nutrient solution. Copper was supplied at levels of 0.02, 0.3, 1, and 3 ppm. At each Cu level Fe was supplied as Fe-EDTA at rates of 1, 3, 10, and 30 ppm. The pH of the nutrient solution was adjusted to 5.

1. At Fe 1 ppm increasing Cu supply resulted in severe growth inhibition, and Cu 1 and 3 ppm induced interveinal chlorosis on upper leaves except for lettuce. At the normal Cu level (0.02 ppm), Fe 1 ppm was sufficient for normal growth and a high level of Fe exceeding 10 ppm was unnecessary or injurious. At Cu 0.3 and 1 ppm, however, increasing Fe supply up to 3 or 10 ppm was effective in alleviating the growth reduction and preventing the occurrence of chlorosis, especially in bean and spinach. At Cu 3 ppm, where each of the crops showed severe dying off of older leaves and brownish discoloration of roots, increasing Fe supply prevented the occurrence of chlorosis but showed little effect in alleviating the growth reduction.

2. The effect of increasing Fe supply at a suitable rate to reduce the Cu toxicity was considered to be due to the suppression of Cu accumulation especially in roots. The occurrence of chlorosis was associated with lowered concentration of 1N HCl soluble Fe in leaves, which suggested the precipitation of Fe in leaves.

緒言

著者らは既報(5)において、水耕法により、Fe 3 ppm 施用の条件下で Cu を 0.02 ppm から最高 10 ppm まで数段階の濃度を与え、14 種類のそ菜の Cu 過剰障害について検討した。その結果によると、Cu 高濃度処理区においてそ菜は著しい生育阻害をきたすとともに、しばしば上位葉に重金属誘導鉄クロロシスを発生することが認められた。同様の症状は Zn や Mn の過剰障害の場合にもみられたが、Fe の適度な増施は生育阻害を軽減し、クロロシスを防止する効果のあることを既に報告した(4, 6)。本報では 4 種類のそ菜を供試して水耕試験を行い、Fe 施用濃度が Cu 過剰障害に及ぼす影響について検討した結果を報告する。

材料及び方法

供試そ菜は第 1 表に示した 4 種類で、Hoagland 第 1 液を用いて養液育苗した。

水耕は既報(4)と同様に、ガラス室内において、直径 42cm で約 15 l 容のプラスチック製タライを用い、木製のふたに小孔をあけて植物体をさしこみ、必要に応じて支柱で保持して行った。1 容器当たり 14 l の培養液を与え、ブローヤを用いて通気した。1 容器当たりの株数は、インゲンマメは 4 株、ホウレンソウ、レタスは 8 株、ハツカダイコンは 16 株で、いずれも 1 区 2 容器とした。

基本培養液には Hoagland 第 1 液を用い、Cu, Fe 以外の微量元素の濃度は B: 0.5, Mn: 0.5, Zn: 0.05, Mo: 0.01 ppm とした。処理は Cu ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ による) 0.02, 0.3, 1, 3 ppm と、Fe (Fe-EDTA による) 1, 3, 10, 30 ppm の組み合わせ(計 16 処理区)とし、Cu 0.02+Fe 3 ppm 区を標準区とした。培養液の

1989年4月7日 受理

そ菜の重金属過剰障害に関する研究 第10報

* 現在：筑波大学農林学系

第1表 供試材料及処理期間.

種類	品 種	処理開始時 展開本葉数	処 理 期 間
インゲンマメ	つるなし丸さや三度豆	2枚	48日
ハウレンソウ	ニュー・アジア	5	27
レ タ ス	グレート・レックス 366	4	28
ハツカダイコン	コメット	2	23

作成や蒸発散による液の減量分の補給には、比紙抗 $10^6 \Omega/\text{cm}$ 以上の脱塩水を用いた。培養液の pH はガラス電極 pH 計を用いて 5.0 に調節した。なお、Cu 高濃度区では培養液作成後に沈澱を生じたが、これは Cu が Fe-EDTA の EDTA と結合することにより、Fe が遊離し $\text{Fe}(\text{OH})_3$ として沈澱したためと思われる(3)。そこで各処理区の培養液中の Cu, Fe 濃度を原子吸光分光分析法で測定したところ、第2表に示すような結果を得た。処理直後においても測定値にやや乱れがあるのは、実際の処理に当たって各水耕容器ごとに 14 l の目盛まで基本培養液を入れ、それに CuSO_4 や Fe-EDTA の原液を添加した際の誤差によるものと思われる。各処理区の Cu 濃度は処理 6 日後でもほとんど変化がなかったが、Fe 濃度は Cu が 1, 3 ppm と過剰に施用された場合の Fe 1, 3 ppm 区ではかなり低下した。

処理期間は第1表に示したようにそ菜の種類によって異なった。培養液の更新は週1回行った。

栽培期間中に随時、外観症状を調査した。またインゲンマメでは開花日を5日ごとのグループに区切り、各グループのさやをその最後の開花日から12日後にまとめて、合計3回収穫し、収量調査ののち熱風乾燥して乾物収量を求めた。いずれのそ菜も水耕打ち切り後収穫した植物体は、生育調査を行ったのち部位別に熱風乾燥し、乾物重を求めた。乾物試料は磁製乳ばちで粉碎してデシケーター中に保存し、分析に供した。分析は乾燥粉末試料 0.5g を、550°C の電気炉中で灰化したのち、1:1 HCl で溶解し、ろ過後 50 ml の定容とした供試液について、Cu, Fe を原子吸光分光分析法により定量した。このほか葉の乾燥粉末試料 0.5 g に 1N HCl 25 ml を加え、30°C で4時間振とう抽出したろ液について Fe を定量した。

結 果

外 観 症 状

第1図中に示したように、レタス以外のそ菜では Cu 濃度が1及び3 ppm と高濃度で、Fe が1 ppm と低濃度の処理区において、著しい生育阻害とともに上位葉に葉脈間クロロシスが発生した。インゲンマメの Cu 1+Fe

第2表 各処理区における培養液中の Cu, Fe 濃度 (ppm).

処 理 Cu · Fe	処理直後		処理 2 日後		処理 6 日後		
	Cu	Fe	Cu	Fe	Cu	Fe	
0.02	1	— ²	1.2	—	1.1	—	1.1
	3	—	3.4	—	3.5	—	3.3
	10	—	11.8	—	11.7	—	12.1
	30	—	32.6	—	31.9	—	33.4
0.3	1	0.3	1.2	0.3	1.1	0.4	1.0
	3	0.3	3.3	0.3	3.3	0.4	3.2
	10	0.3	11.4	0.3	11.8	0.4	11.8
	30	0.3	32.6	0.3	32.5	0.4	33.3
1	1	0.9	1.2	1.0	0.9	0.9	0.6
	3	1.0	3.4	1.0	3.0	1.1	2.8
	10	1.0	12.0	1.0	11.3	1.1	11.5
	30	1.0	31.8	1.0	31.1	1.0	32.1
3	1	3.2	1.3	3.1	0.9	3.0	0.4
	3	3.1	3.6	3.0	2.4	3.0	1.6
	10	3.1	12.0	3.1	10.5	3.2	9.1
	30	3.1	32.2	3.1	30.2	3.1	29.8

培養液は pH 5 に調節した。

² — は低濃度のため測定困難。

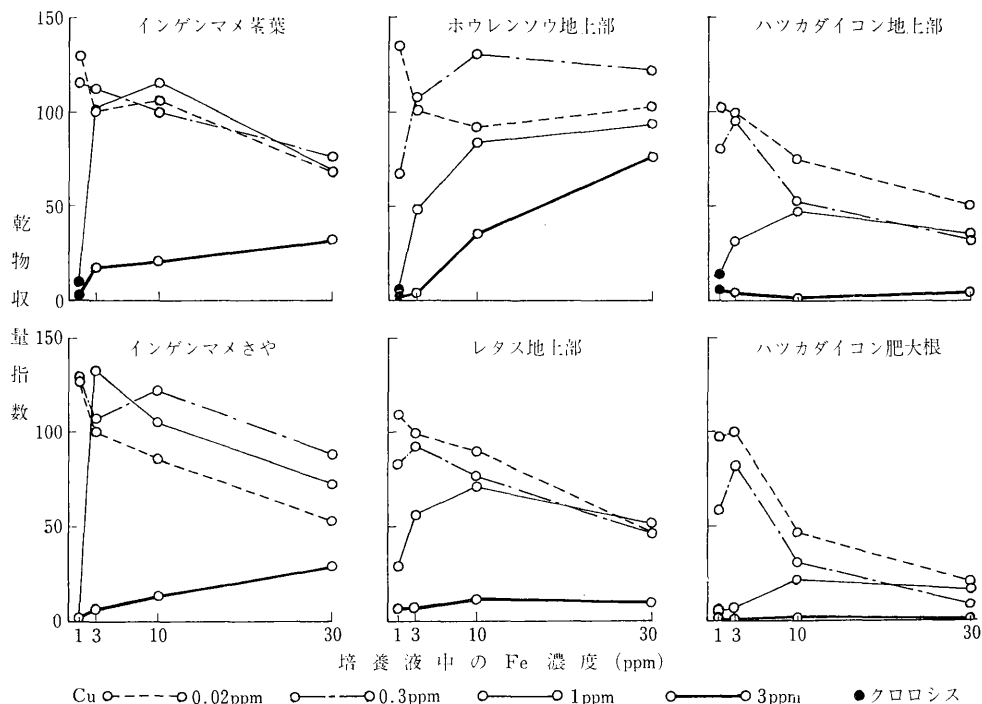
1 ppm 区と同症状は最も激しく、上位葉が完全に黄化した。Cu 3 ppm では各そ菜とも下葉の枯れ上がりや枯死株が多く、根はかっ変して伸長が阻害され、とくに Fe 濃度が 1, 3 ppm と低い場合には根に生氣がなく、新根の発生もほとんど見られなかった。

生 育 ・ 収 量

第1図によって Cu, Fe 処理濃度と各そ菜の生育・収量との関係についてみると次のようである。まず Fe 1 ppm 施用の場合には、Cu 処理濃度の上昇につれて各そ菜とも生育が阻害され収量が低下した。とくに Cu 1, 3 ppm 両区では、前述のように生育が極めて不良で、3種そ菜ではクロロシスが発生した。

次に Cu 各処理濃度における Fe 増施 (1→30 ppm) の影響についてみると、まず Cu が標準濃度の 0.02 ppm の場合には、一般に Fe は 1 ppm で充分であり、10 ppm 以上の高濃度は不必要若しくは有害であった。Fe 30 ppm 区ではハウレンソウ以外のそ菜はかなり著しい生育阻害と収量低下をきたした。

Cu 0.3 ppm の場合には、ハウレンソウにおいて Fe 増施が Cu による生育阻害を軽減する顕著な効果がみられ、Fe 3 ppm 区は Cu 0.02 ppm の同区に匹敵し、Fe 10, 30 ppm 両区はさらに優れた。インゲンマメでは、Cu 0.3 ppm における茎葉重は Cu 0.02 ppm のそれとほぼ同等の推移を示したが、さや収量は Fe 増施により Cu 0.02 ppm の場合を上回った。しかしレタス、ハツカダイコンの Cu 0.3 ppm では、Fe 3 ppm 区でやや生育



第1図 培養液中の Cu, Fe 濃度が各種そ菜の生育並びに上位葉クロロシスの発生に及ぼす影響。
地上部乾物収量指数は Cu 0.02+Fe 3 ppm 区を 100 とする。

改善効果がみられたものの、Fe 10 ppm 以上では減収をきたした。

Cu 1 ppm では、インゲンマメにおいて Fe 増施の効果が顕著で、さや収量は Cu 0.02 ppm の場合を上回った。次いでホウレンソウ、レタス、ハツカダイコンの順に Fe 増施の効果がみられた。

Cu 3 ppm になると Cu 過剰の害が著しく、Fe 増施による生育改善効果はホウレンソウ以外ではあまり認められなかった。

植物体の分析結果

各そ菜について部位別の Cu, Fe 含有率を第3～6表に示した。まず両要素処理濃度の最も低い組み合わせである Cu 0.02+Fe 1 ppm 区についてみると、Cu 含有率は葉、茎、さやより根（ハツカダイコンでは細根）の方が高く、またハツカダイコンの肥大根は葉とほぼ同レベルであった。Fe についてもこれと同様の傾向がみられたが、含有率値は Cu に比べてかなり高かった。

Fe 1 ppm 施用の場合、Cu 処理濃度の上昇につれて各そ菜の部位別 Cu 含有率は増大したが、その程度はとくに根（ハツカダイコンでは細根）中で著しく、Cu 過剰の培地から植物体にとりこまれた Cu は主として根に蓄積することが伺われた。Cu 処理が Fe 含有率に及ぼす

影響はそ菜の種類や部位によって異なった。

次に Cu 各処理濃度における Fe 増施（1→30 ppm）の影響についてみると、Fe 含有率は各そ菜・各部位ともおおむね増加しており、とくに根において著しかった。一方、Cu 含有率は Fe 増施によって低下したが、その程度は Cu 高濃度区ほど著しく、また部位間で比較すると、とくに根において顕著であった。

前述のようにインゲンマメ、ホウレンソウ、ハツカダイコンの Cu 1 及び 3 ppm の Fe 1 ppm 区では、上位葉にいわゆる重金属誘導鉄クロロシスが発生したが、これらの区はいずれも葉中の 1 N HCl 可溶性 Fe 含有率が明らかに低かった。しかし葉中全 Fe 含有率については同様の関係は認められなかった。

考 察

今回の試験結果から、Cu 過剰障害には Fe 施用濃度が重要な関連を有することが認められた。すなわち Cu が標準濃度の 0.02 ppm の場合には、一般に Fe は 1 ppm で充分であり、また 10 ppm をこえるような高濃度は不必要もしくは有害であった。しかし Cu が 0.3 ppm 以上の過剰条件下においては、Fe は 1 ppm では不足であり、とくに Cu 1 及び 3 ppm の Fe 1 ppm 区では各そ菜とも極めて生育不良で、レタス以外では上位葉にいわ

第3表 培養液中の Cu, Fe 濃度がインゲンマメ植物体中の Cu, Fe 含有率(乾物中 ppm)に及ぼす影響.

処 理 Cu・Fe (ppm)	葉		茎		さ や		根		
	Cu	Fe	Cu	Fe	Cu	Fe	Cu	Fe	
0.02	1	14	246 (105) ^z	12	60	11	72	24	1,020
	3	15	211 (105)	16	64	9	64	27	2,720
	10	15	270 (127)	10	81	10	70	19	5,230
	30	11	294 (183)	7	74	9	83	16	5,910
0.3	1	18	186 (91)	15	50	16	53	294	1,900
	3	17	181 (103)	21	81	18	71	137	3,590
	10	16	250 (140)	14	68	17	84	73	6,450
	30	17	286 (215)	15	87	14	88	49	9,460
1	1*	86	139 (55)	54	52	—	—	1,717	3,840
	3	24	200 (115)	27	63	18	55	517	6,010
	10	25	220 (130)	22	82	19	76	225	9,050
	30	18	302 (207)	29	90	16	82	111	8,400
3	1*	129	165 (63)	69	85	—	—	4,620	2,360
	3	52	123 (71)	41	54	32	71	657	1,800
	10	30	190 (129)	32	100	27	101	210	7,300
	30	27	306 (222)	23	105	22	110	170	9,030

^z () は 1N HCl 可溶性 Fe.

* クロロシス発生.

第4表 培養液中の Cu, Fe 濃度がハウレンソウ植物体中の Cu, Fe 含有率(乾物中 ppm)に及ぼす影響.

処 理 Cu・Fe (ppm)	葉		根		
	Cu	Fe	Cu	Fe	
0.02	1	9	100 (99) ^z	29	840
	3	10	112 (111)	27	2,280
	10	11	123 (119)	27	3,250
	30	9	165 (154)	23	3,610
0.3	1	28	95 (91)	129	1,270
	3	19	112 (108)	93	3,020
	10	23	123 (120)	58	3,740
	30	16	157 (155)	45	3,610
1	1*	61	120 (85)	—	—
	3	33	112 (107)	156	1,640
	10	22	100 (98)	109	3,150
	30	23	141 (138)	67	3,350
3	1*	106	96 (64)	—	—
	3	97	85 (84)	—	—
	10	52	109 (107)	231	3,100
	30	36	145 (144)	126	2,340

^z () は 1N HCl 可溶性 Fe.

* クロロシス発生.

第5表 培養液中の Cu, Fe 濃度がレタス植物体中の Cu, Fe 含有率(乾物中 ppm)に及ぼす影響.

処 理 Cu・Fe (ppm)	葉		根		
	Cu	Fe	Cu	Fe	
0.02	1	12	204 (146) ^z	30	1,920
	3	11	161 (146)	27	4,080
	10	10	160 (157)	27	9,370
	30	15	165 (143)	26	6,800
0.3	1	23	283 (257)	241	1,960
	3	16	157 (133)	83	5,030
	10	14	157 (137)	54	8,420
	30	20	149 (139)	45	8,950
1	1	26	83 (78)	939	2,620
	3	23	138 (116)	625	5,030
	10	20	201 (177)	227	12,150
	30	16	138 (131)	152	14,600
3	1	70	90 (73)	—	—
	3	82	105 (94)	—	—
	10	41	110 (101)	—	—
	30	30	204 (139)	—	—

^z () は 1N HCl 可溶性 Fe.

ゆる重金属誘導鉄クロロシスが発生した. これには前述のように, 培養液中で過剰の Cu が Fe-EDTA の EDTA と結合することによって, 遊離した Fe が不溶化し Fe 濃度の低下を来したことも関係すると思われる. そこで Cu 過剰条件下における Fe 増施 (1→30 ppm) の効果についてみると, そ菜の種類によって反応

に差異はあったが, Cu 0.3 及び 1 ppm では Fe を 3 ないし 10 ppm まで高めると, 生育阻害を軽減し, クロロシスの発生を防止する効果が顕著で, 中には Cu 0.02 ppm 区を上回る生育・収量を示す場合もみられた. しかし Cu 3 ppm になると Cu 害が著しく, Fe 増施によりクロロシスの発生は防止できたものの, 生育改善効果

第6表 培養液中の Cu, Fe 濃度がハツカダイコン植物体中の Cu, Fe 含有率(乾物中 ppm)に及ぼす影響.

処 理 Cu・Fe (ppm)	葉		肥大根		細 根	
	Cu	Fe	Cu	Fe	Cu	Fe
0.02	1	13 258 (132) ^z	11 102	44 2,220		
	3	14 195 (125)	9 170	34 3,620		
	10	14 206 (140)	10 150	30 6,500		
	30	15 234 (176)	9 273	30 7,450		
0.3	1	27 240 (136)	22 103	165 4,670		
	3	15 235 (139)	13 88	87 5,460		
	10	13 227 (163)	16 187	62 6,440		
	30	15 268 (205)	13 200	49 8,500		
1	1*	49 150 (98)	75 109	1,407 2,650		
	3	35 148 (131)	57 166	388 9,450		
	10	20 217 (150)	30 186	176 11,200		
	30	16 231 (187)	19 234	97 12,860		
3	1*	113 151 (96)	— —	— —		
	3	112 181 (131)	— —	— —		
	10	— — (—)	— —	— —		
	30	75 367 (300)	— —	— —		

^z () は 1N HCl 可溶性 Fe.

* クロロシス発生.

はあまり認められなかった。なお Cu 害は地上部よりも根において顕著に現われ、Cu 3 ppm では各そ菜とも根がかっ変して伸長が阻害されたが、これはとくに Fe 低濃度区において著しかった。

茅野と北岸(1) は水稻に対する各種重金属の毒性を Cu 型と Mn 型に分けて考察しており、Cu 型の毒性は、元素の電気陰性度値が大きく根内において安定な錯結合を形成するため、根に大部分が蓄積して(移行性が小さい)、根に障害を与えている。今回のそ菜に関する試験でも既報(5)と同様に、Cu 処理濃度の上昇につれて植物体中の Cu 含有率が増大したが、その程度はとくに根において著しかった。このように植物体にとりこまれた過剰の Cu は主として根に蓄積し、根に障害を与えたことは外観症状からも伺われた。そして適度な Fe 増施が Cu 害を軽減する効果があったのは、Fe 増施によって植物体とくに根中の Fe 含有率が高まり、拮抗的に Cu 蓄積が抑制され、根の機能障害が軽減されたことが主要原因をなすものと思われた。

3種類のそ菜における重金属誘導鉄クロロシス発生区では、葉中の 1N HCl 可溶性 Fe 含有率が明らかに低かったが、全 Fe については同様の関係は認められなかった。このことはクロロシス発生区における葉中 Fe の不溶化を示唆するものである。Daniels ら(2) はインゲンマメの Cu 害と Fe 栄養との関係について検討し、過剰の Cu によるクロロシスの発生は、Fe がリン酸鉄

として不溶化することによると推定している。

以上より、水耕栽培における Cu と Fe の濃度及びそのバランスは極めて重要であると考えられる。すなわち供試そ菜に関していえば、Cu 濃度が標準的な 0.02 ppm 程度ならば Fe は Fe-EDTA により 1 ppm 与えれば一応充分であるが、Cu 過剰の場合には Cu が EDTA と結合することに起因する Fe の不溶化の問題もあるので、Fe はより高目の濃度に施用する必要がある。ただし適正な Fe 濃度はそ菜の種類により、また Cu 濃度によって異なるので慎重に検討する必要がある。著者らは過去に本学において、地下水を用いてそ菜の水耕を行った際に、用水に Cu が 3 ppm 程度含まれていたため Cu 過剰障害を起した経験がある。実際の養液栽培では用水中に天然に含まれる Cu を見こして、とくに Cu を施用しないような場合もあるだろうが、何らかの原因で Cu がむしろ過剰に含まれる可能性もあるので、水質及び Fe 施用濃度には充分注意する必要があると考えられる。

摘 要

培養液中の Fe 濃度がそ菜の Cu 過剰障害に及ぼす影響について検討するため、インゲンマメ、ホウレンソウ、レタス、ハツカダイコンを供試して水耕試験を行った。基本培養液には Hoagland 第1液を用い、処理は Cu 0.02, 0.3, 1, 3 ppm と、Fe (Fe-EDTA による) 1, 3, 10, 30 ppm の組み合わせ(計 16 処理区)とした。培養液の pH は 5.0 に調節した。

1. Fe 1 ppm 施用の場合には、Cu 処理濃度の上昇につれて各そ菜とも生育が著しく阻害され、Cu 1 及び 3 ppm 区ではレタスを除くそ菜の上位葉に葉脈間クロロシスが発生した。Cu が標準濃度の 0.02 ppm の場合には、一般に正常な生育にとって Fe は 1 ppm で充分であり、また 10 ppm をこえるような高濃度は不必要もしくは有害であった。しかし Cu 0.3 及び 1 ppm では Fe を 3 ないし 10 ppm まで高めると、生育阻害を軽減し、クロロシスの発生を防止する効果がみられ、とくにインゲンマメ、ホウレンソウにおいて顕著であった。Cu 3 ppm では各そ菜とも下葉の枯れ上がりや根のかっ変が著しく、Fe 増施によってクロロシスの発生は防止できたものの、生育阻害を軽減する効果はあまり認められなかった。

2. 以上のように適度な Fe 増施が Cu 害を軽減する効果は、植物体とくに根中における Cu 蓄積の抑制によるものと考えられた。クロロシス発生区では、葉中の 1N HCl 可溶性 Fe 含有率が明らかに低く、葉中における Fe の不溶化が示唆された。

謝 辞 本研究を行うに当たって助力を与えられた

佐合久美子, 井上英美の両氏に謝意を表する.

引用文献

1. 茅野充男・北岸確三. 1966. 重金属元素の過剰による水稻の被害に関する研究 (第2報). 銅, ニッケル, コバルト, 亜鉛およびマンガンの処理開始時期を変えたときの水稻の生育. 土肥誌. 37: 372-377.
2. DANIELS, R. R., B. E. STRUCKMEYER, and L. A. PETERSON. 1973. Copper toxicity in *Phaseolus vulgaris* L. as influenced by iron nutrition. II. Elemental and electron microprobe analysis. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 98: 31-34.
3. 熊沢喜久雄. 1980. 植物栄養学大要. p. 159-161. 養賢堂. 東京.
4. 大沢孝也. 1973. そ菜の重金属過剰障害に関する研究 (第2報). 水耕培養液中の鉄濃度がそ菜の亜鉛過剰障害に及ぼす影響. 園学雑. 42: 259-263.
5. 大沢孝也・池田英男. 1974. そ菜の重金属過剰障害に関する研究 (第4報). 水耕培養液中の銅濃度がそ菜の生育に及ぼす影響. 園学雑. 43: 267-272.
6. 大沢孝也・池田英男. 1976. そ菜の重金属過剰障害に関する研究 (第5報). 水耕培養液中の鉄濃度がそ菜のマンガン過剰障害に及ぼす影響. 園学雑. 45: 50-58.