

作物養分の動態と 欠乏・過剰障害

Dynamics of crop nutrients, their
deficiency and excess disorder

植物生産土壌学

筒木 潔

<http://timetraveler.html.xdomain.jp>

高等植物と高等動物の必須元素

Essential elements for higher plants and higher animals.

		高等植物 Plants	高等動物 Animals
多量 Macro	1	C, H, O, N, P, S	C, H, O, N, P, S
	2	K, Ca, Mg	K, Ca, Mg
	3		Na, Cl
微量 Micro	1	Fe, Mn, Cu, Zn	Fe, Mn, Cu, Zn
	2	Mo	Mo
	3	B, Cl	I, Co, Se, Cr,その他

必須性の基準

- 基準 1 . . . その元素が欠乏すると生育が異常となり、ライフサイクルをまっとうできない。
- 基準 2 . . . その元素が植物の生育にとって必須な生体物質の構成成分になっているか、生理生化学反応に関与している。

基準 1 の内容

- その元素特有の効果であり、他元素で代替できない（非代替性）
- その効果は間接的なものではない（直接性）
- その効果は特定の植物に限られない（普遍性）

有用元素

- 特定の植物や特定の環境下で植物の生育に有利に働く元素
- Si, Na, Co, Seなど

有用元素

- Si : イネ
- Na: テンサイ、春菊
- Co: マメ科作物
- Se: マメ科レンゲソウ属、キク科の一部など

窒素の役割

- 原形質構成タンパク質、酵素タンパク、生理的に重要な含窒素化合物
- 古い葉から新しい葉への移行
- 好アンモニア性植物と好硝酸性植物
- 過剰→ 収量・品質低下、病害虫の発生

好アンモニア性植物

- イネ・茶
- アンモニア同化能力が優れ、体内にアンモニアが蓄積しない。
- 硝酸還元能力が劣り、十分量のアンモニアを供給できない。有害な亜硝酸が蓄積する
- アンモニアをアミド化合物に変換できる。
(アスパラギン、シトルリン、テアニン)

好硝酸性植物

- タバコ、トマト、アズキ、ジャガイモ、ダイコン、ホウレンソウなどいわゆる畑作物 一般
- アンモニア同化能力に限界
- 根の周りのアンモニア濃度が高いと体内にアンモニアが蓄積しやすく、害を受けやすい。

無機態窒素の吸収に伴う 水耕培養液のpH変化

- 硝酸塩

吸収に伴いpH上昇

→鉄吸収を阻害

- アンモニウム塩

吸収に伴いpH低下

→カルシウム吸収阻害

チッソの欠乏（トマト）

Nitrogen deficiency
in tomato

- 1.葉の全面の黄化
- 2.葉脈の暗紫色化
- 3.生育の著しい抑制



リンの役割

- 核の主成分である核酸、
- 細胞膜の成分であるリン脂質
- 酸化還元補酵素NADP
- エネルギー転換を司るATP などの
構成元素

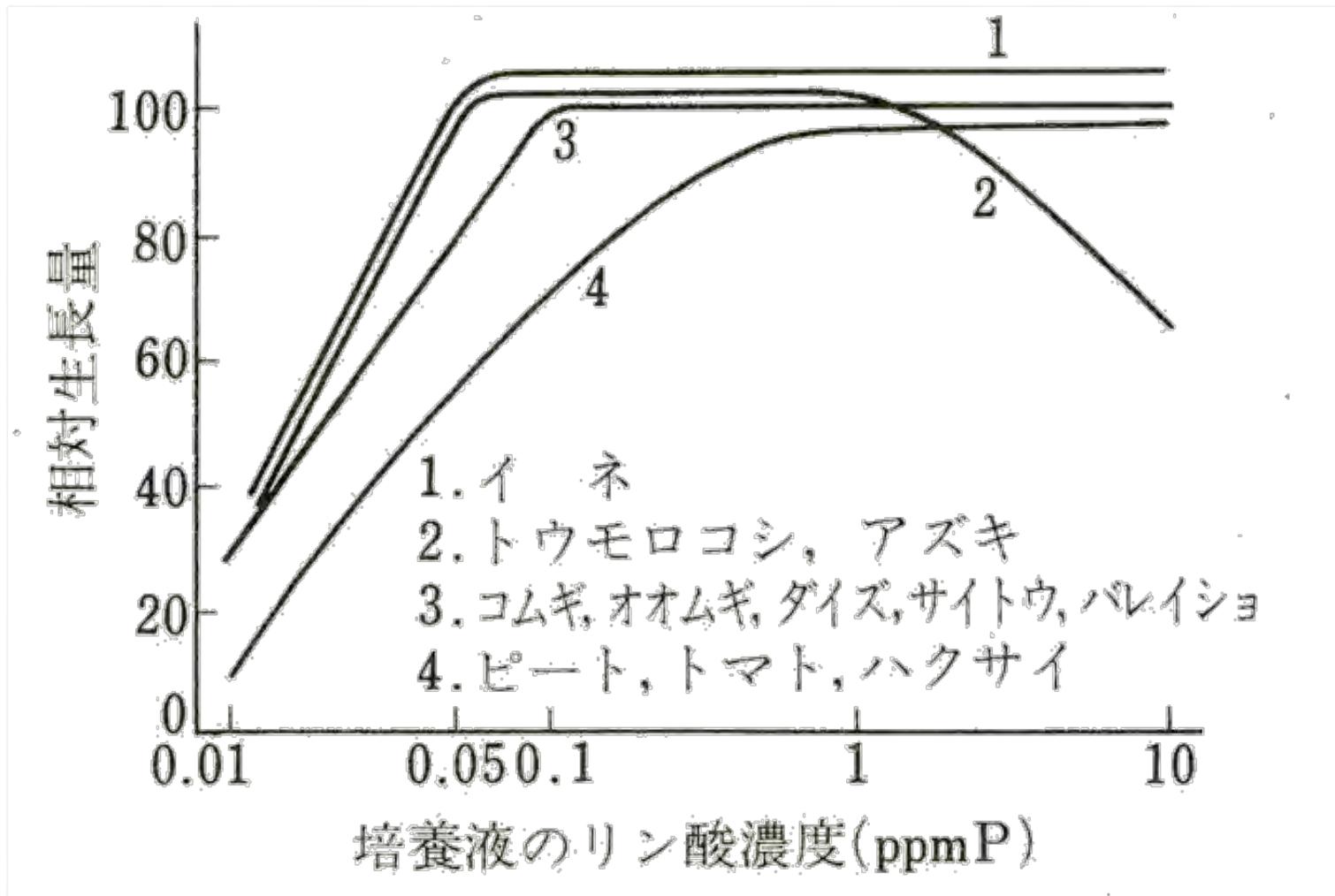
リン酸欠乏（トマト）

Phosphate deficiency

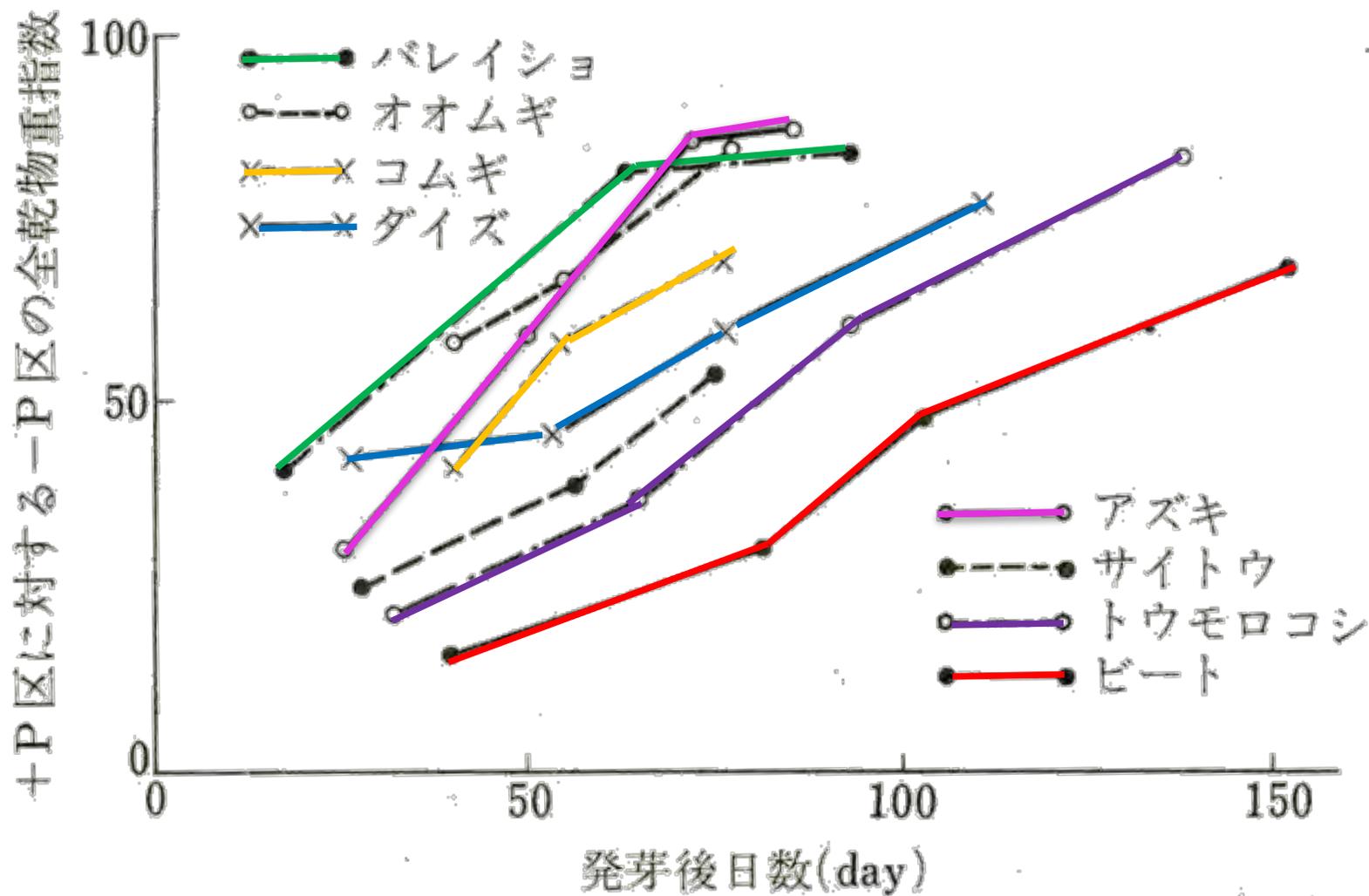


発症の初期には下位葉の葉先から暗紫色～紫紅色を帯びた症状が発現れる。

各種作物の低リン酸濃度適応性



+P区に対する-P区的全乾物指数



リン酸不足の影響は生育後半まで深刻

カリウムの役割

- 原形質構造の維持、pH、浸透圧の調整
- 気孔の開閉
- 炭水化物代謝および窒素代謝への貢献
- 欠乏植物では光合成能の低下により高分子物質の合成が減退する。
- 欠乏により果実中の糖、有機酸、アミノ酸等が低下
- 病害抵抗性への貢献

生物中のカリウム・ナトリウム含有率 (乾燥重量当り)

	カリウム(%)	ナトリウム(%)
被子植物	1.4 %	0.12 %
哺乳動物	0.75 %	0.73 %

欠乏症状	
生育の遅れ	
イネ科植物	下位葉からクロロシス
吸水力の低下	乾燥害を受けやすい

過剰症状	
陽イオン同士の拮抗	
	マグネシウム吸収の低下
	家畜のグラスタニー症

カリウムの欠乏（トマト）

Potassium deficiency in tomato

- 葉の先端や葉縁のみの黄化
- 葉の内側（葉脈以外の部分）の黄化
- 黄化部位の隆起と裏側への湾曲
- 葉柄や茎での壊死斑の発生



カリウム欠乏（トウモロコシ）

Potassium deficiency in corn

- 葉先縁枯れ症状
- 鉄欠乏症状が誘発される
- 葉身基部側の葉脈間より黄白色の条が発生



カルシウムの役割

- 生体膜の構造と機能の維持
- 細胞組織の構造維持（ペクチン酸Ca）
- 植物の種類によって含量や要求性の違いが大きい
- 欠乏症状は先端葉に現れやすい。
- 植物体中で移行しにくいいため。

カルシウム欠乏

- 広葉の作物に出やすい。
- トマトの尻腐れ
- 白菜、キャベツ、タマネギの心腐れ
- リンゴのビターピット
- 豆科植物の根粒生長抑制

カルシウム欠乏による トマトの尻腐れ果

Calcium deficiency in tomato. Injury in fruit.



トマトの根の伸長に対するカルシウム、ホウ素欠如の影響

- トマト幼植物をカルシウムあるいはホウ素を含まない培地に移すと根の伸長はただちに停止する。
- 花粉管の伸長にもカルシウムとホウ素が必要である。
- カルシウムあるいはホウ素は培地から常に供給されていることが必要で、処理以前に吸収された成分は効果がない。

マグネシウムの役割

- 葉緑素の成分
- リン酸化酵素反応に関係
- タンパク合成への関与
- 果実、子実の肥大

マグネシウム欠乏

- 酸性土壌で欠乏しやすい
- 葉緑素ができないので、葉が黄色になるが、葉脈部の緑色は残る。
- 移動しやすいため、下位の葉から黄化が起こる

マグネシウムの欠乏（トマト）

Magnesium deficiency in tomato.

- 葉緑素の生成が抑制
- 葉の黄化や壊死斑が発生
- 下位葉が黄化し、やがて紫紅化



イオウの役割

- 硫酸イオンの形で吸収され、体内でシステイン、メチオニンなどの有機硫黄化合物に還元される。
- 炭酸固定、脱炭酸に関与するビオチン、脂質代謝などに重要なCoA、ビタミンの一種チアミンなどの構成元素

イオウの欠乏

- 尿素、リン酸アンモニウムなどの無硫酸根肥料の多用
- S 含量の低い土壌
- N欠乏によく似た症状
- 下位の葉から現れる。（移動しやすいため）

イオウ欠乏 (西洋アブラナ Canola)

Sulfur deficiency in canola



鉄の欠乏

- 石灰質土壌や石灰の過用で土壌反応が中性ないしアルカリ性になると起こりやすい。
- 鉄黄変
- 網の目状・シマ状から葉全体が黄白化
- 黄化は新葉に生じやすい。（移動しにくいため）

鉄欠乏（トマト）



上位葉の葉柄に近い部分から黄白化症状が現れ、特に成長点とそれに近い新葉では黄白化が著しくなる。

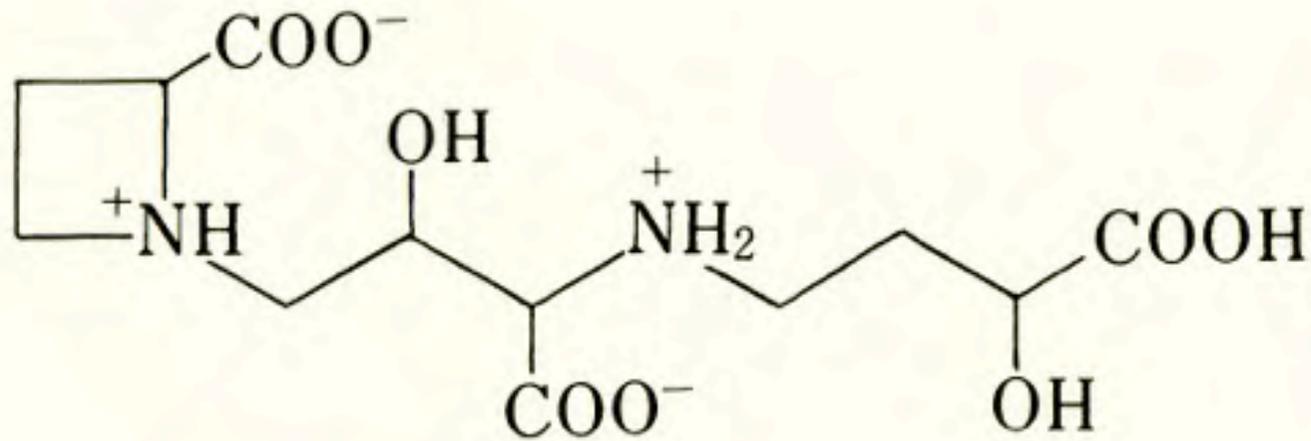
（6葉期

—Fe 6週目）

Iron deficiency in tomato

ムギネ酸 (Mugineic acid)

鉄溶解力の高いキレート物質
イネ科植物の根から積極的に分泌



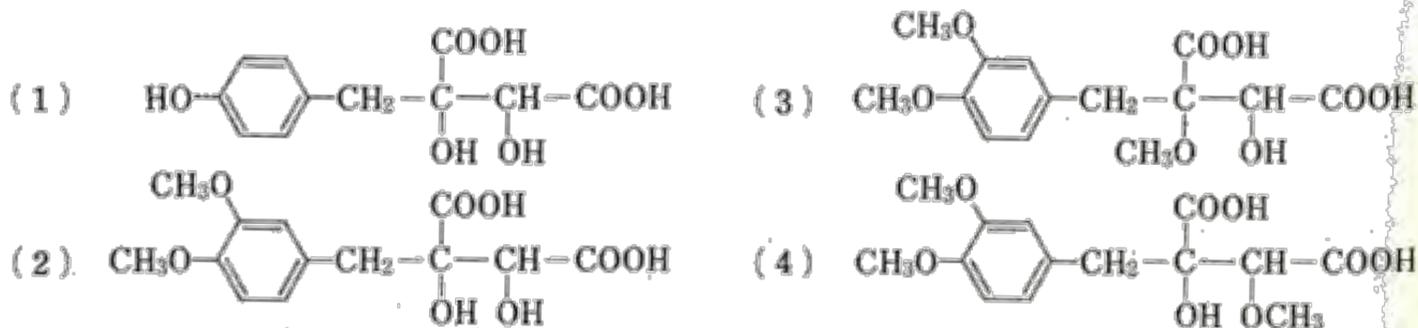
天然の鉄キレーターー ムギネ酸

ピシディン酸誘導体による リン酸鉄からのリン酸放出能

Piscidic acid: pigeon pea [Cajanus cajan] の根が分泌

表 5.4 ピシディン酸とその誘導体の化学構造とリン酸鉄からのリン放出能

化 合 物		P 放 出 能 ($\mu\text{g-P/ml}$)
無処理(水)		1.48
piscidic acid (1)	ピシディン酸	4.37
dimethyl fukiic acid (2)	ジメチルフキ酸	4.44
trimethyl fukiic acid-A (3)	トリメチルフキ酸-A	3.27
trimethyl fukiic acid-B (4)	トリメチルフキ酸-B	3.23



(阿江ら, 1990)

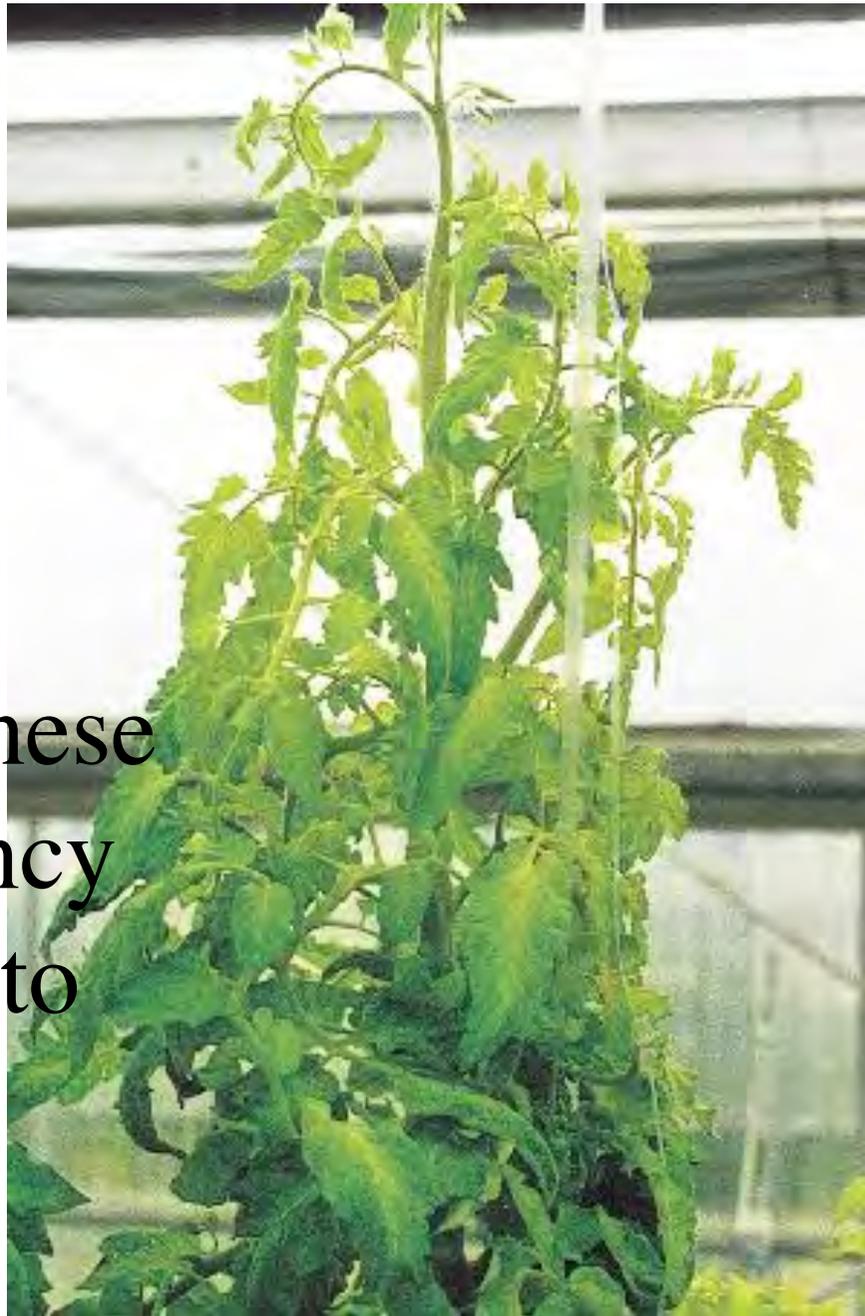
マンガンの欠乏

- pHの高い有機質の土壌で起こりやすい
- 汚れた色調のクロロシス
- 葉脈間の褐色の小斑点
- エンバクの灰斑病
- エンドウ・ソラマメなどの種子子葉部分の褐変
- ビートの黄斑病

マンガンの役割

- 光合成における酸素発生
- 解糖系やクエン酸回路における脱水素、脱炭酸、加水分解反応
- 葉緑体のRNAポリメラーゼ活性化

マンガン欠乏（トマト）



上位葉ほど淡緑化が著しく、鉄欠乏症状に類似する。

（6葉期

－Mn 5週目）

マンガンは比較的移行性の低い要素で、一般的に新しい葉に症状が現れる。

Manganese
deficiency
in tomato

マンガン欠乏（トマト）

欠乏症状が進行すると、中位葉の葉脈間の一部に褐色の枯死斑点が生じる。（4葉期 - Mn 5週目）



亜鉛の役割

- 植物ホルモン オーキシン代謝への関与
- 含亜鉛酵素タンパク：炭酸脱水酵素、Cu-Zn スーパーオキシドジスムターゼ(SOD)、アルコール脱水素酵素
- これらの酵素により光合成に大きく貢献

亜鉛の欠乏

- pHの高い土壌や有機物含量の少ない土壌で起きやすい
- 土壌中のリン酸含量が高いとリン酸亜鉛を作り、亜鉛の可給性が減少する
- 若い葉の生長抑制
- 節間の短縮
- 小さな葉が密生し叢生状（ロゼット状）となる
- 葉の白化

亜鉛欠乏

- 北海道ではタマネギをはじめ十勝地方（褐色火山性土）のトウモロコシ、上川地方（流紋岩質溶結擬灰岩を母材としている褐色森林土）のトウモロコシや小豆に亜鉛欠乏の発生が認められている。

トウモロコシの亜鉛欠乏症

Zinc deficiency in corn



アズキの亜鉛欠乏症

Zinc deficiency in adzuki bean



稲の葉の亜鉛欠乏症

Zinc deficiency in rice leaf



銅の役割

- 葉緑体中に含まれ、電子伝達の橋渡しをする（プラストシアニン Cuタンパク）
- 呼吸系における貢献 末端酸化酵素複合体（チトクローム_{a+a3}）の構成元素
- アスコルビン酸酸化酵素
- ポリフェノール酸化酵素

銅欠乏

- トマト、ヒマワリ、オオムギの不稔
- 開墾泥炭地におけるムギ、野菜、サトウダイコンに発生する開墾病
- 東北・北海道の腐植質火山灰土におけるムギの銅欠乏
- 銅は有機物と錯体を作りやすいため

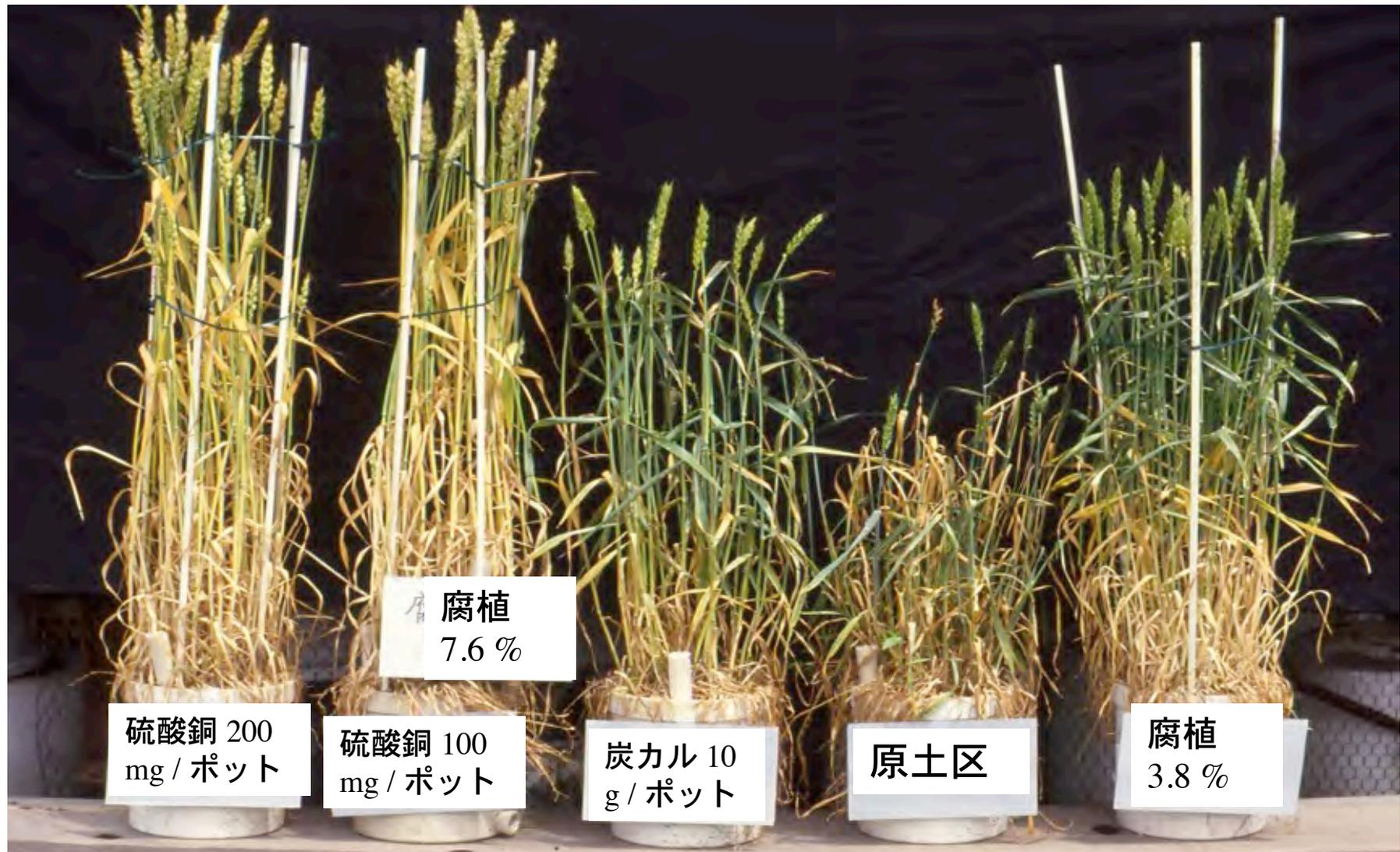
秋播コムギの銅欠乏症発生状況

Copper deficiency in wheat.

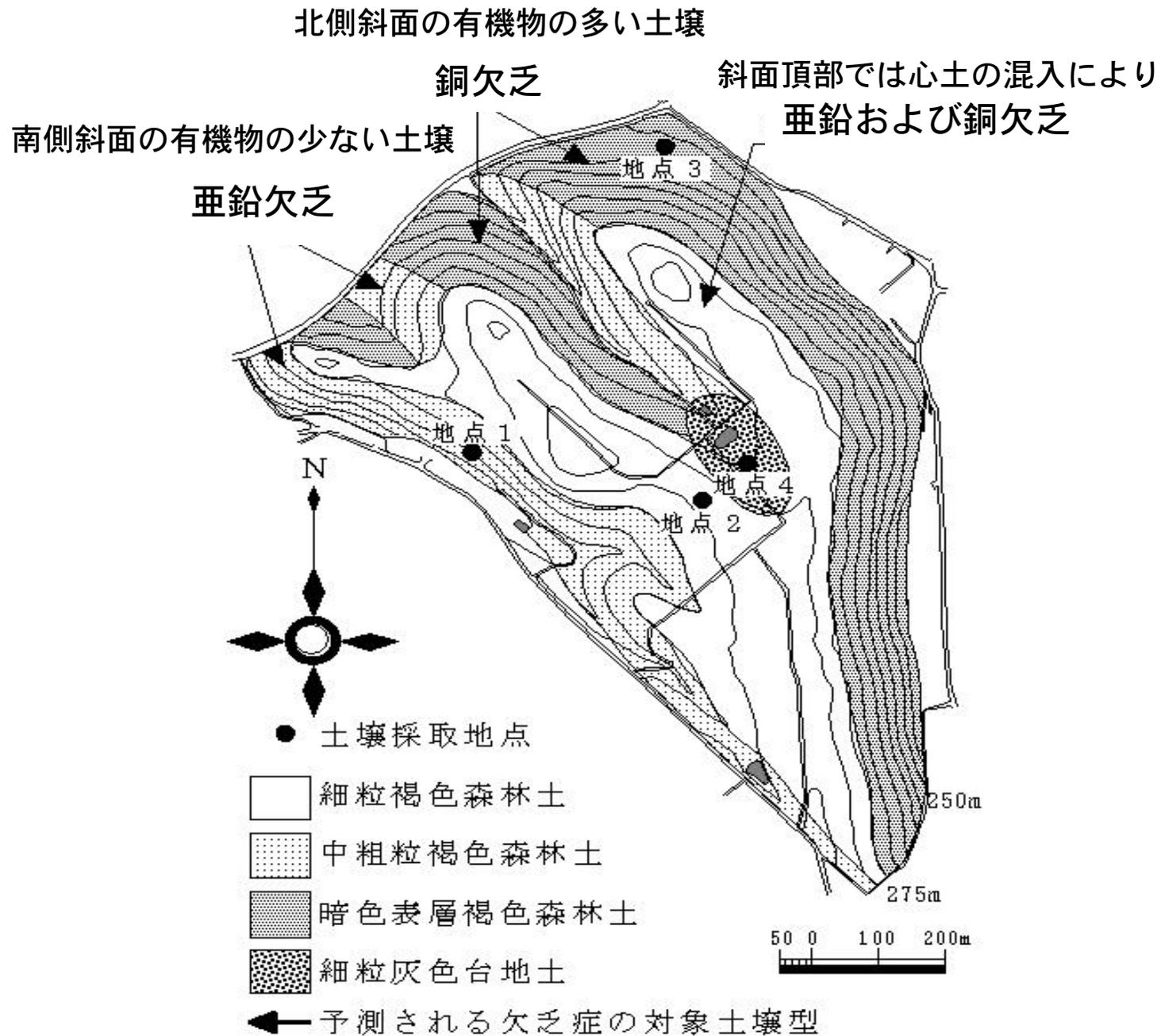


秋播コムギの銅欠乏症

Copper deficiency in wheat.



← 腐植 7.6 % → ← 腐植 3.8 % →



微地形の違いと亜鉛・銅欠乏発生

亜鉛・銅欠乏対策

横井 北海道立農試集報. 86, 57-63(2004)

欠乏症	発生しやすい土壌条件	土壌区分	対策
亜鉛欠乏	有効態亜鉛 1.5 mg kg^{-1} 以下・ 腐植が少ない・高 pH・下層土の混入	中粗粒褐色森林土・細粒褐色森林土・造成台地土	硫酸亜鉛 50 kg ha^{-1} 施用 5年間残効あり
銅欠乏	有効態銅 0.3 mg kg^{-1} 以下・ 腐植が多く厚い・下層土の混入	中粗粒褐色森林土（造成台地土）・ 暗色表層褐色森林土	硫酸銅 $20 - 40 \text{ kg ha}^{-1}$ 施用 5年間残効あり

モリブデンの役割

- ニトロゲナーゼおよび硝酸還元酵素の構成金属
- マメ科および非マメ科植物の根粒には茎葉の10倍以上ものMoが含まれ、欠乏すると窒素欠乏に陥る。
- 硝酸態窒素の利用に大きく貢献している

モリブデン欠乏

- モリブデン酸陰イオンとして吸収
- 酸性土壌で欠乏が出やすい
- 柑橘類の黄斑病
- アブラナ科作物の鞭状葉症
- まめ類の盃状葉症
- 下位葉・中位葉に黄緑色ないし淡橙色の斑点

モリブデン欠乏 (トマト)

Molybdenum deficiency in
tomato.

中下位葉の葉
脈間に不鮮明
な黄化症状が
発生する



ホウ素の欠乏

- pHが高い土壌ほど土壌による固定吸着は強い。
- 再移動しにくく、生長点付近で起きやすい。
- ホウ素欠乏は急速に伸長したり肥大したりする組織、花茎、花粉管、塊根、果実、茎の先端の分裂組織で起きやすい。

植物葉身中の B, Ca, Si 含量

表3.5 同一土壌に栽培された108種の植物葉身の B, Ca, Si 含量と分類学上からみた特徴

	B(ppm)	Ca(%)	Si(%)
双子葉類(66種)	20.1	1.92	0.26
単子葉類(42種)	9.6	1.41	0.84
うち,イネ科(13種)	1.6	0.56	2.11
ユリ科(10種)	10.1	2.30	0.19
その他の科(19種)	14.8	1.53	0.32

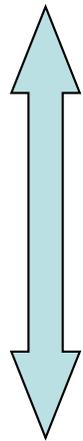
(高橋英一・三宅靖人, 1976)

ホウ素欠乏作物のホウ素含量

表 3.7 ホウ素欠乏症発現作物のホウ素含量

作物	部位	健全土壌の作物のB含量 対乾物 (ppm)	B欠乏土壌の作物のB含量対乾物 (ppm)
ハクサイ	結球部	20.3	10.4
	外葉部	25.0	12.5
ナタネ	茎	8.3	5.0
	子実	8.0	7.8
ビールムギ	種子	3.8	1.2
	茎葉	4.0	2.5
	根	4.2	3.9
イネ	玄米	0.8	—
	粃殻	2.6	—
	茎葉	1.2	—

弱い



強い

(山本満二郎, 1960)

ホウ素欠乏（トマト）

Boron deficiency in tomato.



茎の切断面をみると導管部がコルク化している。

（6葉期　－ B 6週
目）

ホウ素欠乏（トウモロコシ）

Boron deficiency in corn.



- 花粉や花柱（絹糸）の発達が悪くなるため不稔となり、雌穂の先端部や全体の実入りが著しく悪くなる。

塩素欠乏

- 茎の頂端の小葉がしおれ、伸長がとどまる。ネクローシスを呈し、根は太く短くなる。
- ビート、レタス、キャベツなどは比較的感受性が高い。
- 穀類や豆類は鈍感
- アブラヤシ・ココナツなどはClで生長促進

イネに対するケイ酸の効果

- イネの受光態勢の改善、葉身の下垂防止、相互遮へいの軽減、群落内部の光環境改善
- 病虫害に対する抵抗性を高める
- 倒伏抵抗性を高める

ケイ酸の供給がイネの生育に及ぼす影響

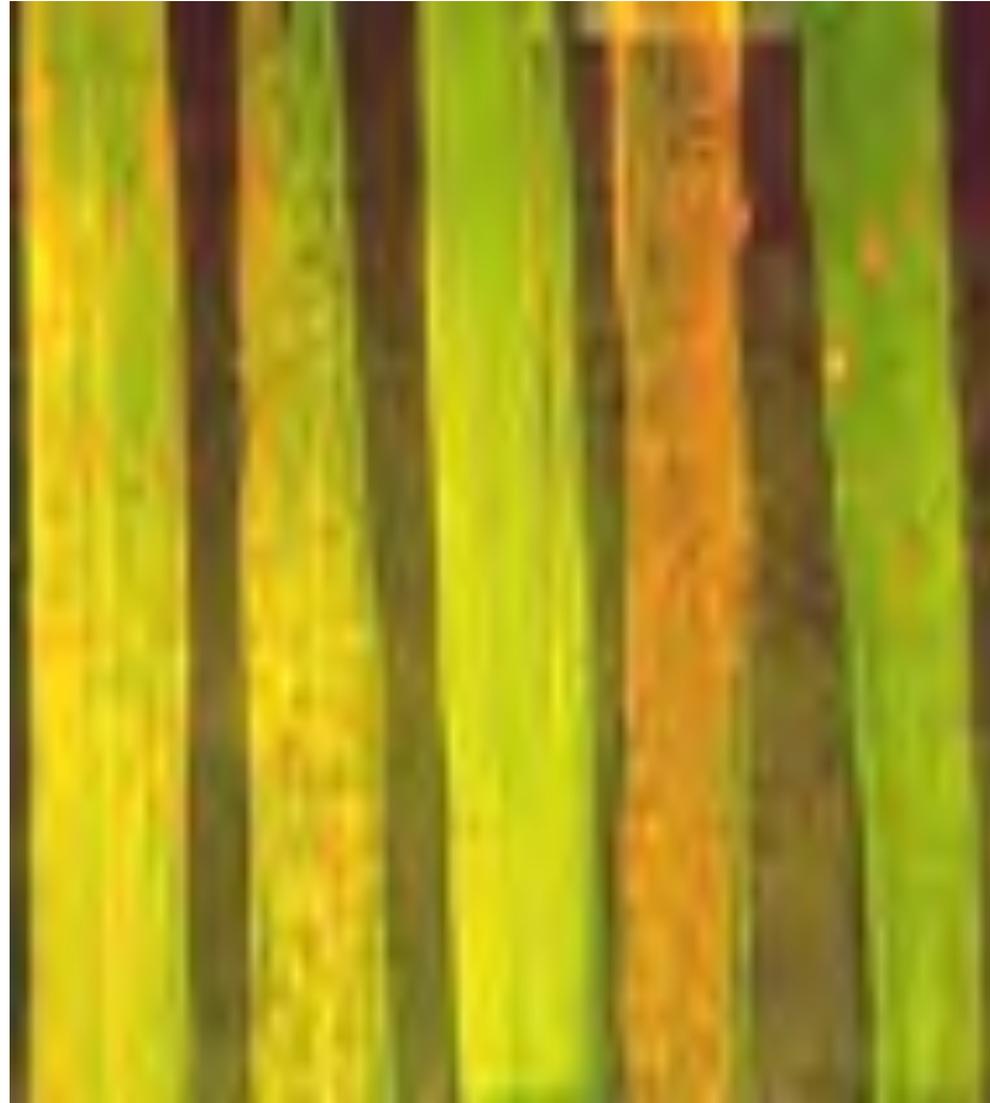
表 3.9 ケイ酸の供給量が水稻(農林 22 号)の生育に及ぼす影響

水耕液中の SiO ₂ 濃度 (ppm)	地上部 乾物重 (g/個体)	精粳収量 (g/個体)	茎葉中の SiO ₂ 濃度 (%)	SiO ₂ 吸収量 (g/個体)
0	17.4(100)	2.9(100)	0.07	0.01
5	19.6(113)	3.7(128)	0.62	0.13
20	21.1(121)	4.5(155)	2.00	0.39
60	22.6(130)	6.3(217)	5.19	0.98
100	24.6(143)	8.6(297)	8.01	1.52

a/5,000ポットで水耕。
(高橋英一, 1961)

イネのケイ酸欠乏

Silicate deficiency in rice (Rice blast).



イモチ病

イモチ病 (Rice blast disease)



ナトリウム

- カリウムの代替作用

オオムギ、イネ、イタリアンライグラス、
トマト、ワタなどで効果あり

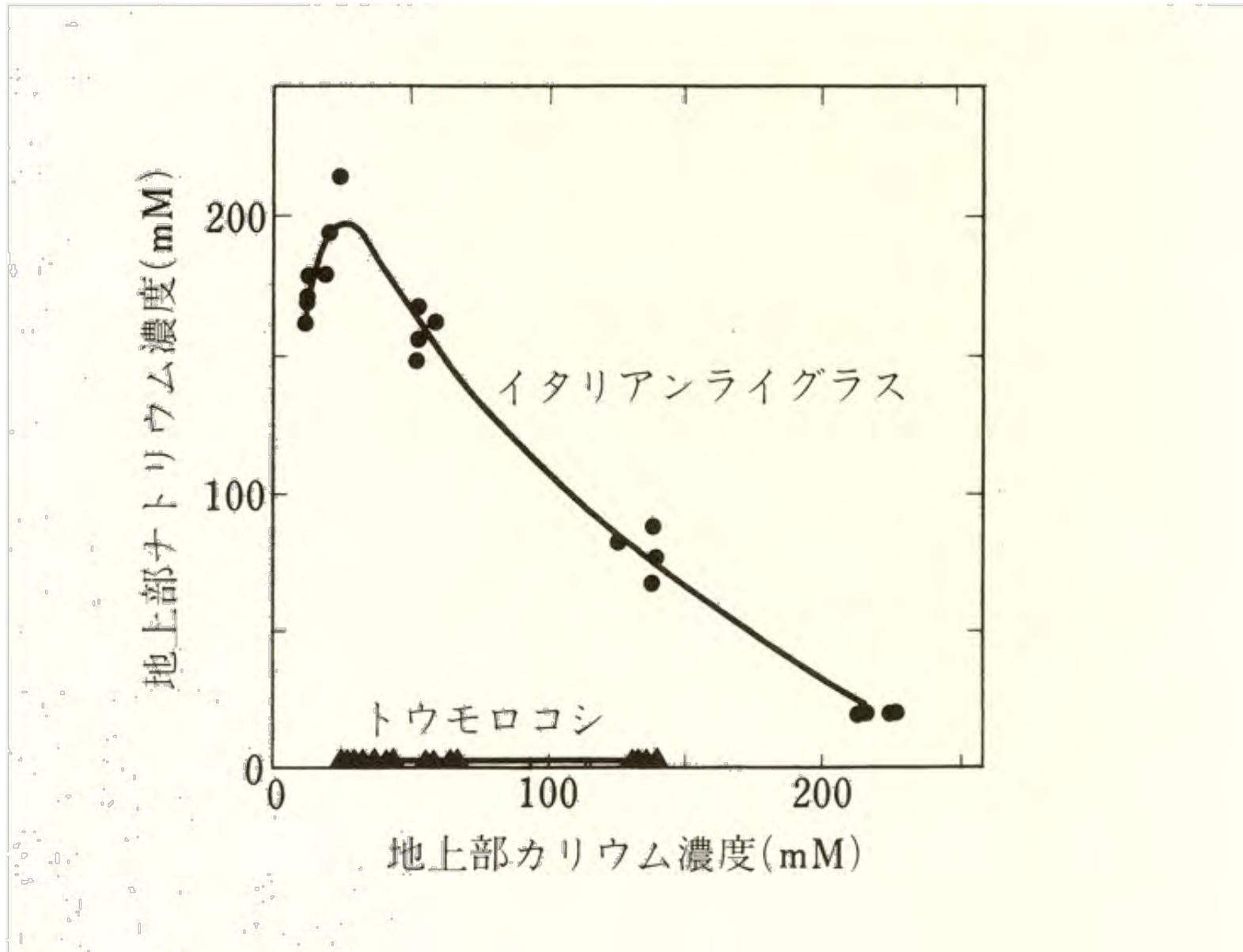
トウモロコシ、ジャガイモ、ダイズなどでは
ナトリウムの施用効果なし

- 生育促進

アカザ科（テンサイ等）で効果大

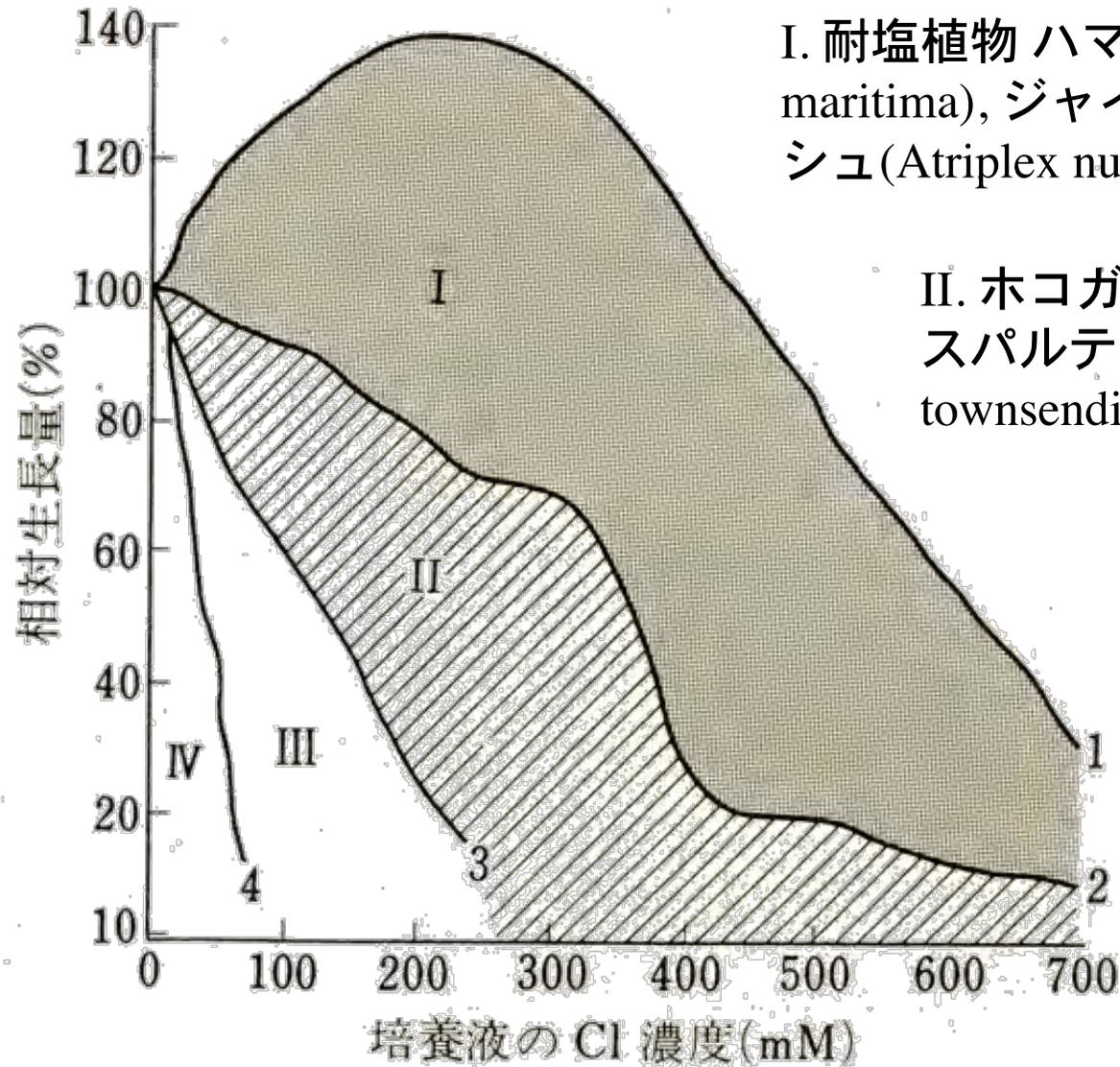
C4植物 ギニアキビ(Panicum maximum)で
必須

植物地上部のNa, K 濃度



各種植物の耐塩性

Salt tolerance of various plants



I. 耐塩植物 ハママツナ(*Suaeda maritima*), ジャイアントソルトブッシュ(*Atriplex nummularia*)

II. ホコガタアカザ(*Atriplex hastata*), スパルティナ属(*Spartina townsendii*), てん菜(sugar beet)

III. 綿(Cotton), 大麦(barley), トマト(tomato), 大豆(soy bean)

IV. アボカド(Avocado), ミカン(mandarin orange)

高塩培地で細胞内に蓄積する有機化合物

化合物	分布
D-ソルビトール	オオバコ科、バラ科
D-マンニトール	アカネ科
D-ピニトール	マメ科、ヒルギ科、ナデシコ科
イノシトール	ナス科（トマト）
グリシンベタイン	アカザ科、ヒユ科、キク科、イネ科
B-アラニンベタイン	イソマツ科、キク科、イネ科

各種重金属濃度と植物生育

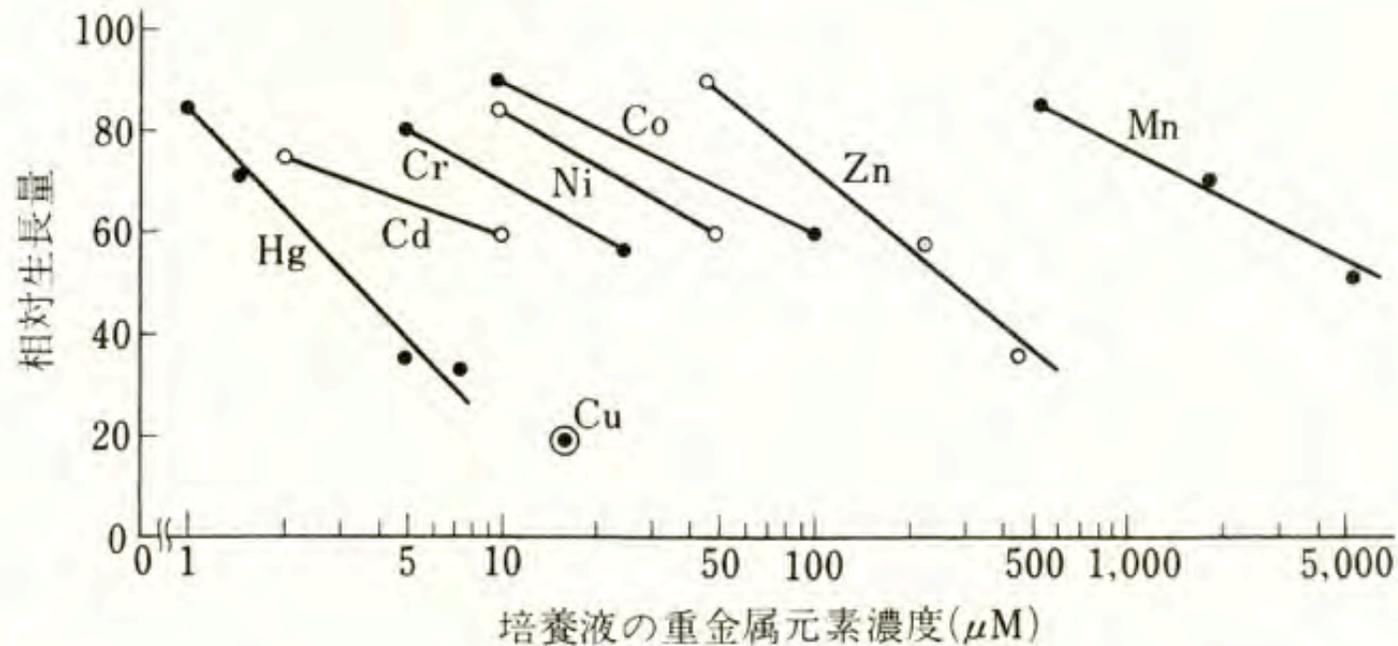


図 5.6 各種重金属元素が作物生育に及ぼす影響の比較 (田中・但野ら, 1975, 1978, 1980)

相対生長量は, Hg, Cd, Cr, Ni, Co では欠如区, Cu では $0.16 \mu\text{M}$ 区, Zn では $4.6 \mu\text{M}$ 区, Mn では $18 \mu\text{M}$ 区を 100 として算出. 16~19 種作物の平均値.

処理期間: Cu, Mn 以外の元素では 18 あるいは 19 日, Cu は 24 日, Mn は 14 日.

各種作物の低微量要素耐性

表 5.7 各種作物の低微量要素耐性

作物種	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Mo
イネ	弱	強	弱～中	強(弱)*	強	強
コムギ	強	弱	中～強	弱	強	強
オオムギ	—	中	中～強	弱～中	強	強
エンバク	—	中	強	弱～中	強	強
トウモロコシ	中	中	弱	中	強	強
ダイズ	弱	弱～中	弱～中	強	中～強	中
インゲン	—	—	弱	強	中	強
エンドウ	—	—	強	強	強	中～強
ピート	弱	弱～中	中	弱～中	弱	弱～中
ハウレンソウ	弱	弱	—	弱	中	弱
ダイコン	—	弱	—	中	弱	中
ハクサイ	—	弱	中	強	強	—
キャベツ	中	中	弱	中～強	弱～中	弱～中
パレイショ	—	—	中	中～強	強	中～強
トマト	弱	中	中	中	弱～中	弱～中
ナス	—	—	強	—	弱	—
キュウリ	—	—	中	中	強	—
レタス	—	—	—	弱～中	弱～中	弱
タマネギ	—	弱	弱～中	弱	中	—
ニンジン	—	中	強	弱	弱～中	中～強

(Anderson, 1956 ; Berger, 1949 ; Gartrell, 1981 ; Gilbert, 1952 ; Johnson ら, 1952 ; Lucas ら, 1972 ; 南ら, 1972 ; 田中ら, 1975 ; 田中ら, 1975 ; 田中ら, 1978 ; Viets ら, 1954 ; 山内, 1976)