

土壌作物栄養学 13

作物養分の動態と 欠乏・過剰障害

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要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

窒素吸収 N absorption

- 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

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。

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



リンの吸収

- 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

若い葉中のPの主要な存在形態

	μgP/g 新鮮重
無機リン	310
RNA	62
DNA	4.7
リン脂質	47
リン酸エステル*	31

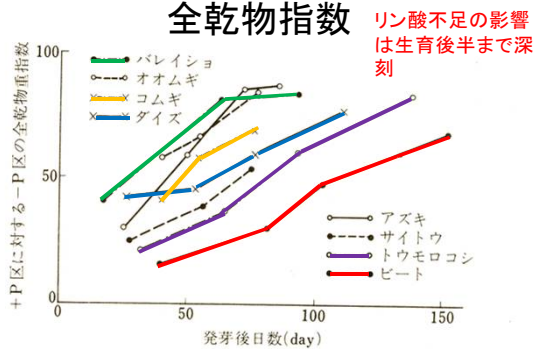
* 糖リン酸、ATP、ADP など

リン酸欠乏(トマト)



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。

+P区に対する-P区の 全乾物指数



カリウムの吸収

- 原形質構造の維持、pH、浸透圧の調整
- 炭水化物代謝および窒素代謝への貢献
- 欠乏植物では高分子物質の合成が減退する。

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



カルシウムの吸収

- 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。

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(メロン)

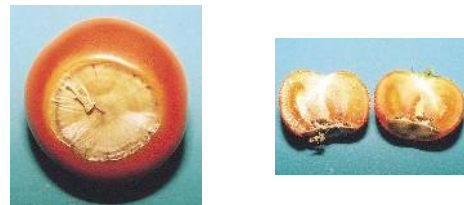
Calcium deficiency in melon



写真10 カルシウム欠乏と思われる症状
(葉脈間の黄化、褐変症状)

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.



マグネシウムの吸収

- 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

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。
- 移動しやすいので、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



イオウの吸収

- 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)

鉄欠乏 (トウモロコシ)

Iron deficiency in corn



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
-Fe6週目)

Iron deficiency in tomato

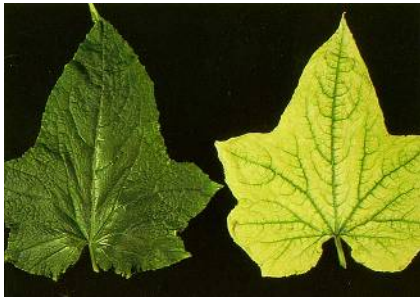
小麦畑の鉄欠乏



Iron deficiency in wheat

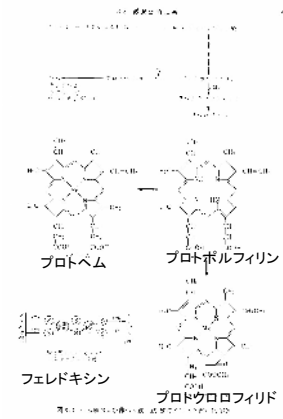
Iron deficiency

- Oak tree on a strongly alkaline soil



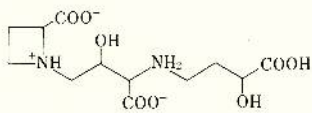
ヘム鉄 および 非ヘム鉄

光合成や呼吸に関与する含鉄酵素



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・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

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酸放出能

化合物	P 放出能 ($\mu\text{g P/m l}$)
無処理(水)	1.48
piscidic acid (1)	4.37
dimethyl fukiic acid (2)	4.44
trimethyl fukiic acid-A (3)	3.27
trimethyl fukiic acid-B (4)	3.23

(1) <chem>OC(=O)C(O)C(O)C(O)C(=O)O</chem>	(3) <chem>OC(=O)C(O)C(O)C(O)C(=O)OC</chem>
(2) <chem>OC(=O)C(O)C(O)C(O)C(=O)OC</chem>	(4) <chem>OC(=O)C(O)C(O)C(O)C(=O)OC</chem>

(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

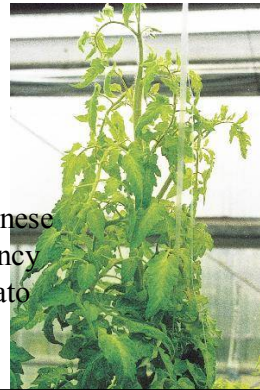
- 光合成における酸素発生
- 解糖系やクエン酸回路における脱水素、脱炭酸、加水分解反応
- 葉緑体のRNAポリメラーゼ活性化

マンガン欠乏(スイカ)



Manganese deficiency in water melon

マンガン欠乏(トマト)



Manganese deficiency in tomato

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
- Mn5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。

マンガン欠乏(トマト)

Manganese deficiency in tomato



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現象が生じる。
(4葉期 - Mn5週目)

Mn and Fe deficiency



Interveinal chlorosis, a symptom of manganese deficiency in red maple. アメリカハナノキのMn欠乏症状



Interveinal chlorosis typical of iron deficiency in river birch. カバノキ属の鉄欠乏

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。

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

亜鉛欠乏(トマト)

Zinc deficiency in tomato



下位葉上部では葉先の葉緑部から黄化症状が現れ、速やかに褐色の壊死斑へと変化する。(6葉期 - Zn6週目)

トウモロコシの亜鉛欠乏症

Zinc deficiency in corn

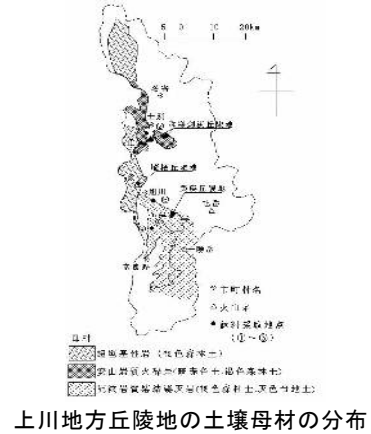


アズキの亜鉛欠乏症2

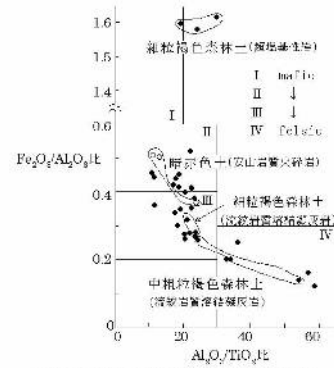
Zinc deficiency in adzuki bean



Zinc deficiency in rice leaf

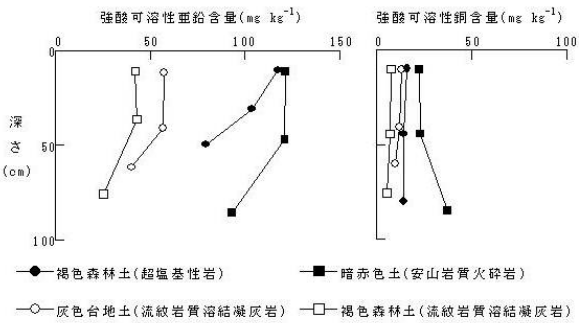


暗赤色土の土壌断面



土壌母材の岩質区分

Acid soluble zinc mg kg⁻¹ Acid soluble copper mg kg⁻¹

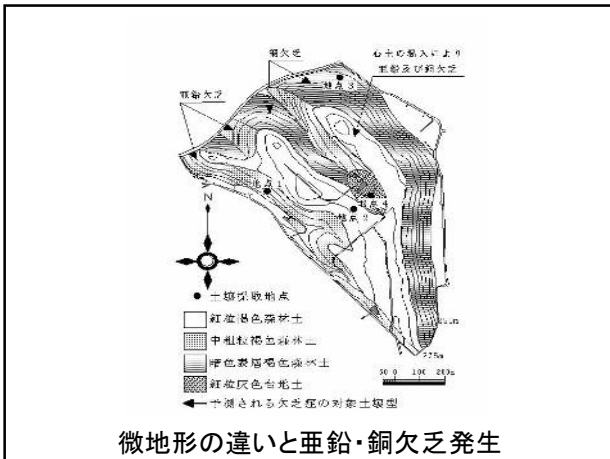


丘陵地土壌の強酸可溶性亜鉛・銅含量

土壌型別の有効態亜鉛・銅含量

土壌型	有効態亜鉛 (mg kg ⁻¹)	有効態銅 (mg kg ⁻¹)
中粗粒褐色森林土 (n=18)	1.33(0.80~2.00; 0.64)	1.18(0.26~2.46; 0.82)
細粒褐色森林土 (n=21)	1.33(0.60~2.90; 0.58)	1.43(0.30~4.60; 1.02)
灰色谷地土 (n=24)	2.16(1.00~3.98; 0.98)	1.72(0.76~3.90; 0.87)
暗赤色土 (n=28)	2.88(1.15~6.50; 1.02)	2.81(1.35~4.25; 0.95)

注1) 〓は欠乏限界値以下を示す。欠乏限界値はZn:1.5mg kg⁻¹, Cu:0.35mg kg⁻¹以下とした。
注2) 数値は平均値で、()内は(最小値~最大値; 標準偏差)を示す。

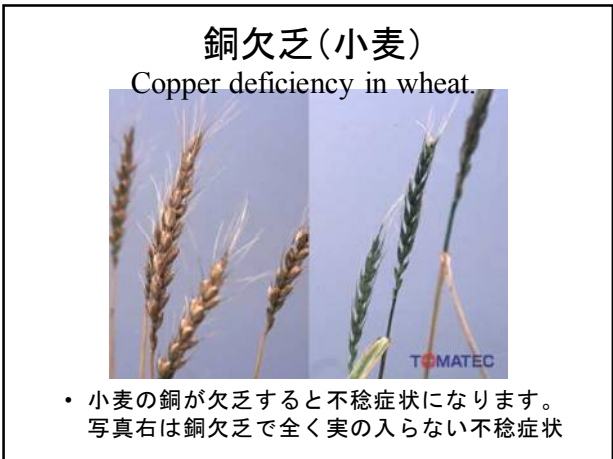


銅欠乏

- 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

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 μ 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



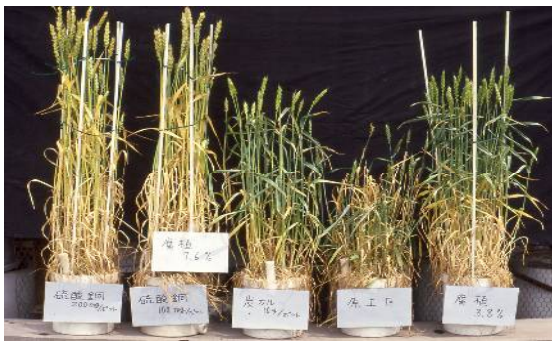
北斜面下部での秋播コムギ銅欠乏
Copper deficiency in wheat.



丘腹斜面上部の秋播コムギ



秋播コムギの銅欠乏症
Copper deficiency in wheat.



アズキに対する硫酸亜鉛施用効果

表3-3-4 褐色森林土におけるアズキの亜鉛欠乏に対する資材施用効果

土 壌	処 理	有効態亜鉛含量 (mg kg ⁻¹)		
		莖葉重 (Mg ha ⁻¹)	子実重 (Mg ha ⁻¹)	
中粗粒褐色森林土 (腐植含量 1.0g kg ⁻¹)	原土	1.85	1.26(100)	1.16
	硫酸亜鉛 50kg ha ⁻¹	1.75	1.42(113)	2.17
中粗粒褐色森林土 (腐植含量 1.9g kg ⁻¹)	原土	2.27	2.38(100)	1.10
	硫酸亜鉛 50kg ha ⁻¹	2.77	3.18(134)	3.70

秋播コムギに対する硫酸銅施用効果

表3-3-5 褐色森林土における秋播コムギの銅欠乏に対する資材施用効果

土 壌	処 理	有効態銅含量 (mg kg ⁻¹)			
		莖葉重 (Mg ha ⁻¹)	糖重 (Mg ha ⁻¹)	子実重 (Mg ha ⁻¹)	
暗色表層褐色森林土 (腐植含量 7.6g kg ⁻¹)	原土	3.60	3.50	0.00(不検)	0.25
	硫酸銅 100kg ha ⁻¹	17.70	17.90	13.80	0.65
暗色表層褐色森林土 (腐植含量 10.0g kg ⁻¹)	原土	4.70	0.05	0.00(不検)	0.25
	硫酸銅 100kg ha ⁻¹	17.50	18.55	14.25	0.65
中粗粒褐色森林土 (腐植含量 3.8g kg ⁻¹)	原土(造成土)	14.95	1.95	0.00(不検)	0.25
	硫酸銅 100kg ha ⁻¹	20.35	20.90	16.35	2.50

※本試験はポット試験(1/5,000a)による。

亜鉛・銅欠乏対策

表3-3-3 栗林丘陵における栗樹および甜柿の亜鉛・銅欠乏土壌区分と対策

欠乏症	発生しやすい発生条件	土壌区分	対 策
亜鉛欠乏	腐植含量 1.5g kg ⁻¹ 以下 濃度が少ない・肥料・下層土の混入	中粗粒褐色森林土・暗色褐色森林土・造成土	硫酸亜鉛 20kg ha ⁻¹ 施用 (秋・春同時施用可)
銅欠乏	腐植含量 0.2g kg ⁻¹ 以下 濃度が少なく・肥料・下層土の混入	中粗粒褐色森林土(造成土) 暗色褐色森林土	硫酸銅 20~40kg ha ⁻¹ 施用 (秋・春同時施用可)

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 (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)

ホウ素欠乏に起因する障害

表 3.6 ホウ素欠乏に起因する障害のタイプ別分類

- ① 不稔あるいは果実のできないもの……ムギ、ナタネの不稔、ブドウのエビ症
- ② 茎・葉柄のひび割れ……セルリー、ミツバの茎割れ、ハクサイの心腐れ、チューリップの首折れ、クワの胴割れ病
- ③ 肥大根内部の壊死……ダイコン、カブラの褐色心腐れ、赤しん、す入り、サトウダイコンの心材腐朽
- ④ 果実の果皮や内部の壊死……トマトの尻腐れ、キュウリの裂果、リンゴの縮果病、ミカンの硬果病(イジミカン、ヤニミカン)、ブドウのアン入り
- ⑤ 生長点の壊死……トマト、ニンジン、サトウダイコン、イモ類など多数、側芽は伸長するもの、その先端が枯死するため、植物体は草丈が低く、側枝の張った叢生(ロゼット)とよばれる特徴のある外観を呈する。
- ⑥ チューリップの色ぬけ(赤色系品種)

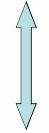
ホウ素欠乏作物のホウ素含量

表 3.7 ホウ素欠乏症発現段階のホウ素含量

作物	部位	同地上部の B 欠乏作物の B 含量の割合 (%)	
		健全な作物 (ppm)	B 欠乏作物 (ppm)
トウモロコシ	葉	20.4	10.4
	根	25.0	12.5
大豆	葉	8.3	5.0
	根	8.0	4.8
小麦	葉	3.8	1.2
	根	4.0	2.5
イネ	葉	4.2	3.9
	根	0.8	0.8
サトウキビ	葉	2.6	2.6
	根	1.2	1.2

出典: 本邦, 1980

弱い



強い

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 - B6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。

ホウ素欠乏(大麦)

Boron deficiency in barley.

- 出穂が揃わず、穂幅が狭く淡い黄色の貧弱な遅れ穂が目立つ



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稲(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)	精米収量 (g/個体)	葉葉中の 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

α/5,000ポットで水耕。
(高橋英一, 1961)

イネにおけるケイ酸の役割

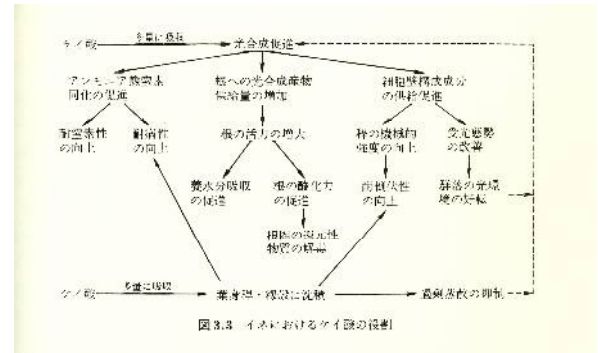


図 3.3 イネにおけるケイ酸の役割

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

植物地上部のNa, K 濃度

