

## ケ イ 素 の 生 物 学 —10—

京都大学名誉教授

高 橋 英 一

陸上植物とケイ素  
有用元素としてのケイ素

## 有用元素と植物の栄養特性

炭酸同化、窒素同化、ミネラル同化は植物栄養の三本柱です。これらにはすべての植物に共通した基本的な部分の他に、特定の植物にみられる特異的な部分がありますが、それは植物が進化の過程で、多様な環境に適応した結果獲得したもので、植物の栄養特性になっています。ミネラル同化では必須元素が前者であるのに対して、有用元素は後者に相当します。

有用元素は必須とはいえませんが、ある種の植物の生育を促進したり、ある種の環境下では生育に必要なとなる元素のことで、有用元素の種類は必須元素のように確定していませんが、コバルト、セレン、アルミニウム、ナトリウム、ケイ素などがあり、なかでもケイ素は代表的な有用元素です。

## ケイ素の有用性が認められる植物

前に述べたように、植物にはケイ素含有率が著しく高いものがあります。イネ科植物や羊歯植物のあるもの（ヒカゲノカズラやトクサ）は有名で、ケイ酸植物とよばれていますが、ケイ素の効果はこのような植物に現れやすい傾向があります。またキウリなどのようにケイ酸植物には入らないけれども、ケイ素含有率がかなり高くなる植物にも効果のみられることがあります。つまり植物のケイ素吸収能力が関係します。そしてこれに、次に述べるような生育環境が関わります。

## 環境ストレスとケイ素の有用性

自然環境下では植物はいろいろなストレスにさらされますが、ケイ素の有用性はしばしばそのようなときに認められます。

## 生物的ストレス：

ケイ素がイネのイモチ病やゴマハガレ病、ムギのウドンコ病などの病原性菌類による被害、ニカ

(メイ虫やウンカなどの害虫による食害を軽減する効果のあることはよく知られています。また近年、中間型のケイ素吸収性を示すキウリやメロンのウドンコ病予防にもケイ素が有効であることが認められ、養液栽培の盛んなオランダではこれらの作物の培養液にケイ酸カリが処方されています。

## 気象ストレス：

ケイ素は台風や冷害（低温と日照不足）によるイネの被害をしばしば軽減します。風害は倒伏や不稔をひきおこしますが、ケイ素は稈の挫折抵抗を増し、風による葉面からの過蒸散や糊の擦傷を軽減し、被害を少なくします。また低温下ではケイ素の吸収が低下するので、冷害年では日照不足とあいまって、体内のケイ素濃度が窒素濃度に比べて低くなりイモチ病が発生しやすくなりますが、このようなときケイ酸肥料の効果が大きいことが知られています。

## 養分ストレス：

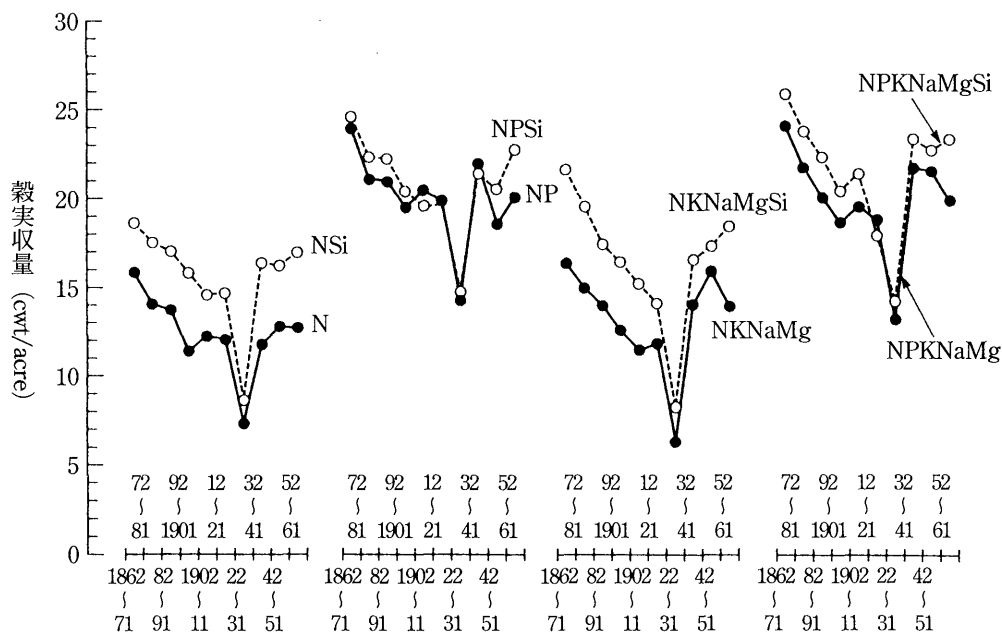
リン不足下における効果： ケイ素とリンの相互関係は古くから注目されており、ケイ素にはリンの「部分的代替効果」があるともいわれていました。たとえば図26は、ローザムステッド試験場で行われたオオムギに対するケイ酸ナトリウム連用の結果を、筆者がとりまとめたものですが、ケイ素施用の効果はリン無施用の場合に大きいことが分かります。このケイ素の効果については土壌リンの吸収促進と、吸収したリンの体内での転流（利用効率）促進の二つが考えられます。

筆者らの行った実験では、土壌に吸着されているリン酸を脱着したり、土壌のリン酸吸収力を弱める効果は分子状ケイ酸 ( $H_4SiO_4$ ) には殆どなく<sup>47)</sup>、またケイ酸ナトリウムと炭酸ナトリウムの比較から、イオン状ケイ酸にも特になんか認め

図26 Hoosfieldオオムギ長期連作試験におけるケイ酸の効果 (1862~1961)

cwt/acreは125kg/haに相当。著者作図

連作による収量低下が著しくなったため、1935年以降は1年休閑4年連作の5年サイクルの休閑法が取り入れられ収量は回復した。



られており<sup>48)</sup>,前者の可能性は少ないと思われます。

表9は培養液のリンを標準濃度より低下させていったときのケイ酸施用効果をみたものですが、ケイ酸の供給は根部に対する地上部の乾物重の割合を高め、穀実生産効率(精糶重)を著しく増加させています。一方リンの吸収分布は、総吸収量にあまり差はないが、穂への分配率はケイ酸施用によって著しく高くなっています。この結果から、

表9 リン酸不足条件でのイネの生育、収量に対するケイ酸施用の影響

リン酸施用レベル	P	1/4 P	1/8 P	1/16 P	
地上部重 g	-Si	80.3	68.6	46.9	29.6
	+Si	79.1	70.8	53.1	35.0
根部重 g	-Si	9.3	9.9	9.1	7.9
	+Si	9.4	7.8	6.8	5.5
精糶重 g	-Si	20.8	18.7	15.1	9.1
	+Si	21.7	22.4	23.4	12.9
P吸収量 mg	-Si	176.2	53.9	29.0	18.4
	+Si	161.5	53.1	32.9	20.0
吸収Pの穂への分配率 %	-Si	31	46	37	35
	+Si	29	56	54	50

P: 5.7ppm (長岡和哉 近畿大学卒業論文1998)

土壌の可吸態リンの少ないときのケイ酸施用の効果は、主として吸収したリンの転流促進にあると思われます。イネ地上部の鉄、マンガン濃度はケイ酸吸収によって低下しており、これらに対するリンの割合が高いことがリンの利用効率を増進させたものと思われます。

マンガン過剰下における効果 ケイ素がマンガン過剰害を軽減する効果のあることは、水耕でイネ<sup>49)</sup>, オオムギ<sup>50)</sup>, インゲンマメ<sup>51)</sup>などに認められています。このケイ素の効果には二つのタイプがあり、一つは地上部のマンガン濃度の上昇を抑えるもの、いま一つはマンガン濃度に差はないが障害を軽減するものです。前者の例としてイネがあり、多量に吸収されたケイ酸が根の酸化力を高め、鉄とともにマンガンの吸収移行を抑えるものです。後者に関してはインゲンマメで、ケイ酸が葉中のマンガンの分布に影響する(局所集積を防ぐ)ことがラジオオートグラフで認められており、これがマンガン過剰害の軽減に寄与していると考えられています。

農業現場におけるこのようなケイ素の効果は、ブルームレスキウリの普及によって発現したマン

ガン過剰害がきっかけになって見いだされました。キウリは病害などの回避のために接ぎ木栽培が行われます。在来キウリには果実の表面に白い粉（ブルーム）をふくむものが多かったが、ある種のカボチャを台木にするとこの粉がふかず、ブルームレスとなり外観がよいので市場に出回るようになりました。このブルームの成分は主にシリカで、ブルームレス台木のカボチャの根はケイ酸吸収性が乏しいという特性を持っています。ところがブルームレスキウリはマンガン過剰害を受けやすいことが分かりました。

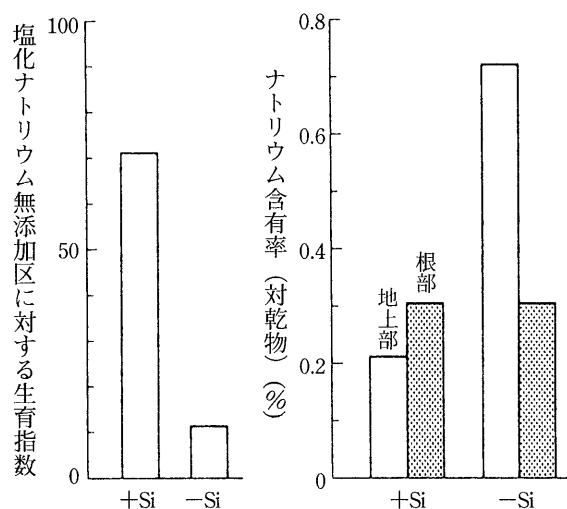
例えば高知県では1989年にブルームレス台木による栽培がはじまりましたが、翌1990年にはほぼ全面的にブルームレスキウリに切り替わりました。しかしそれと同時に各地で従来品種の時には起こらなかったマンガン過剰害が発生しました<sup>52)</sup>。

高知大学の岩崎貢三氏らがブルームレス台木のスーパー雲竜と従来のブルームを生じる新土佐を供試して、マンガン過剰障害に対するケイ酸施用の影響を比較したところ、新土佐ではケイ酸施用によってマンガン過剰は顕著に軽減されたが、スーパー雲竜にはほとんど効果はありませんでした。この違いは両品種のケイ素吸収性と密接な関係があり、新土佐はケイ酸施用濃度に伴い葉のケイ素濃度が高まったのに対し、スーパー雲竜では地上部への移行が抑えられ、葉のケイ素濃度は新土佐にくらべて著しく低くなっていました。

この場合ケイ酸の施用は、マンガンの吸収にも葉中での分布にも特に影響を及ぼしませんでした。走査電顕を用いて葉の中のマンガンとケイ素の分布を調べたところ、過剰に吸収されたマンガンもケイ素もともに葉面の毛茸とその周辺に集積していました。そしてケイ素がないとその部分は褐変するが、ケイ素がある場合は軽減されました。これはケイ酸がマンガンと結合してその害を抑えたものと思われる。

**塩類過剰下における効果** イネによって多量に吸収され葉面に沈積したケイ酸は、クチクラ蒸散を抑える働きをしています。これは根圏の塩類濃度が高いときは、地上部へ塩類が上昇集積するのを抑えて塩害を軽減する可能性があります。

図27 イネの塩類過剰害軽減に対するケイ素の効果 (吉川勇人 近畿大学卒業論文1998)



それを示唆する研究もあります<sup>53)</sup>。例えば、図27は培養液に塩化ナトリウム(100mM、海水の五分の一相当濃度)を加えて、イネを三週間塩ストレス下においたときのケイ酸(培養液中100ppmSiO<sub>2</sub>)の効果ですが、塩害は著しく軽減されています。これは地上部のナトリウム濃度の低下によるものであり、それは根に入ったナトリウムの地上部への移行が抑えられたためであることが、植物体中のナトリウムの分布模様から分かります。

**光合成に対する効果**

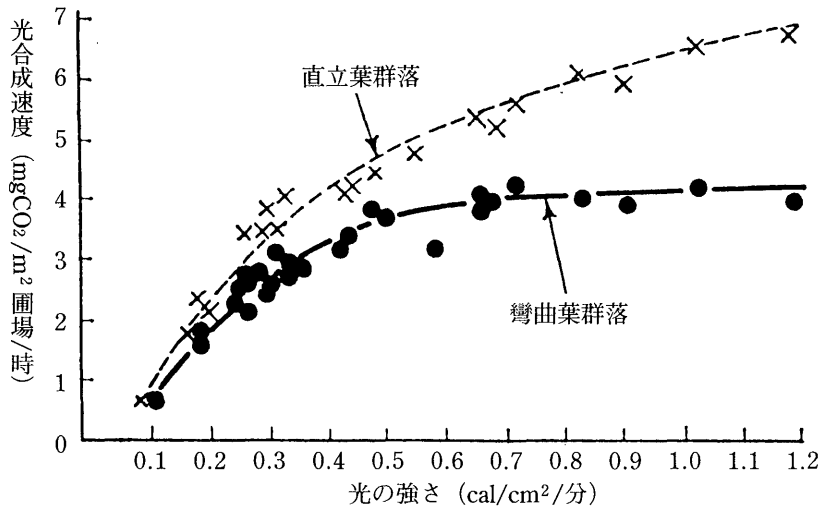
イネに対するケイ酸の効果の水耕で検討しているとき、環境ストレス(病虫害や不適切な培養液組成などの)が一見全くないのに、ケイ酸を与えなかったイネの初期生育(草丈や新鮮重)が明らかに劣り、また葉身の下垂が見られたりすることがあります。これはケイ酸を与えられないとイネの光合成能が低下することを示唆しています。光合成には葉の受光量と炭酸ガスの取り込み量が影響しますが、ケイ酸には両者を高める効果があります。

表10 イネの葉身開度\*に及ぼす窒素およびケイ素施用の影響 (Yoshida et al 1969) <sup>55)</sup>

窒素施用濃度 ppm	ケイ素施用濃度 (SiO <sub>2</sub> ppm)		
	0	40	200
5	23°	16°	11°
20	53°	40°	19°
200	77°	69°	22°

\*イネ (IR8) 出穂期の稈と葉身先端の角度

図28 水稻の光—群落光合成曲線の草型による差異 同一葉面積指数 (LAI = 7.1) における比較 (田中孝幸ら, 1969) <sup>54)</sup>



イネの受光態勢は葉身がより直立型になるほど良好になります (図28) <sup>54)</sup>。表10に見られるようにケイ酸の施用は葉身の開度を小さく、すなわちより直立型にしており、またその効果は窒素施用量が多いほど大きくなっています<sup>55)</sup>。これはケイ酸の施用効果が窒素多施時に大きいという現象にも符合しています。

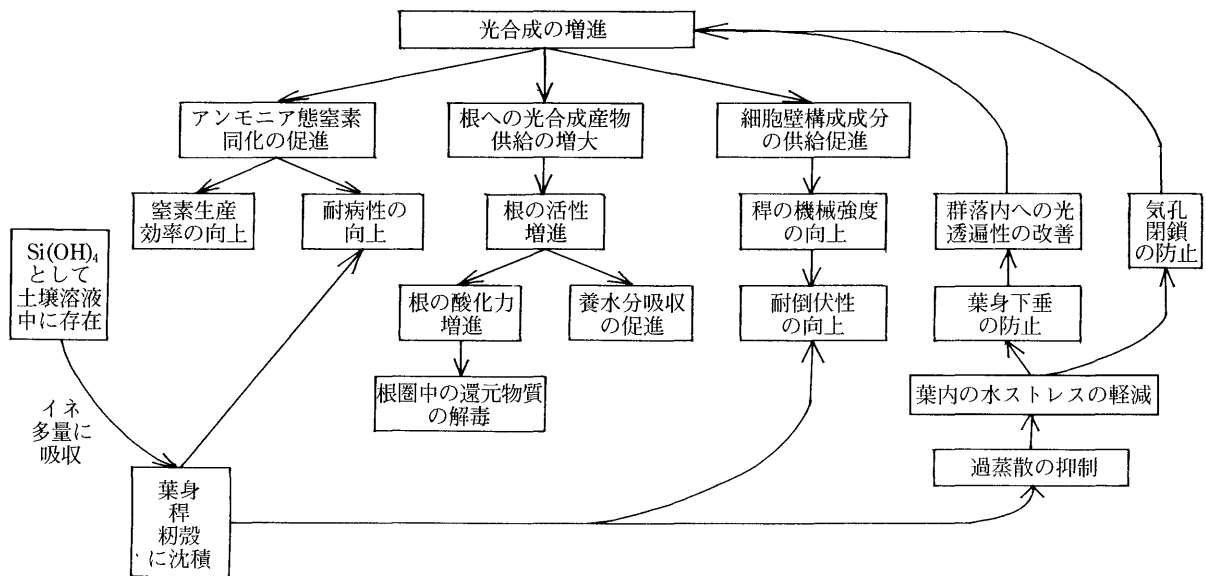
炭酸ガスの取り込みには気孔開度が影響しますが、植物体内に水ストレス

が生じると気孔開度が低下し、炭酸ガスの取り込みを減少させます。ケイ酸はクチクラ蒸散を抑えるので、水ストレスを軽減し、炭酸ガスの取り込みに有利に作用する可能性があります。表11はそれを示す実験結果の一例です。人口気象室で湿度を変えて、イネの生長速度に対するケイ酸 (SiO<sub>2</sub> として100ppm) 施用の効果を調べたところ、相対湿度が低いほど大きくなり、「真の気孔コンダクタンス」を比較するとケイ酸を施用し

表11 ケイ酸添加, 欠除で4週間栽培したイネの光合成活性 <sup>56)</sup>

	光合成速度 mgCO <sub>2</sub> /dm <sup>2</sup> /h	昼間蒸散速度 mgH <sub>2</sub> O/dm <sup>2</sup> /h	夜間蒸散速度 mgH <sub>2</sub> O/dm <sup>2</sup> /h	真の気孔コンダクタンス cm/s
ケイ酸欠除	5.86	6640	2590	0.97
ケイ酸添加	8.23	5770	1440	1.32

図29 イネにおけるケイ素の役割<sup>57)</sup>



これらはイネの炭酸同化すなわち生長を高めるのに貢献しますが、このような効果はある程度通常の環境下でも期待できます。図29にイネに対するケイ素の有用性発現の過程をまとめてみましたが<sup>57)</sup>、これらは結局、多量に吸収沈着したシリカの機械的作用に基づいています。ここにケイ素の栄養生理的特徴があります。

#### 参 考 文 献

- 47) J.Ma and E.Takahashi : The effect of silicic acid on rice in a P-deficient soil. *Plant and Soil* **126**, 121—125 (1990)
- 48) J.Ma and E.Takahashi : Effect of silicate on phosphate availability for rice in a P-deficient soil. *Plant and Soil* **133**, 151—155 (1991)
- 49) 奥田東, 高橋英一 : 水稻および大麦の鉄, マンガン, 銅, アルミニウム, コバルトならびにヒ素の過剰障害に対するケイ酸の影響 *日土肥誌* **33** (1) 1—8 (1962)
- 50) D.E.Williams and J.Vlamiš : The effect of silicon on yield and manganese-54 uptake and distribution in the leaves of barley plants grown in culture solutions. *Plant Physiol.* **32**, 404—409 (1957)
- 51) W, J.Horst and H.Marschner : Effect of silicon on manganese tolerance of beanplants *Plant and Soil* **50** 287—303 (1978)
- 52) 山中律, 坂田美佳 : ブルームレス台キウリにおけるケイ酸の吸収特異性とマンガン過剰症 *日土肥誌* **64** (3) 319—324 (1993)
- 53) T.Matoh, P.Kairusmee and E.Takahashi : Salt - induced damage to rice plants and alleviation effect of silicate, *Soil Sci. Plant Nutr.* **32**, 295—304 (1986)
- 54) 伊藤浩司 : 圃場条件下における光—光合成関係 作物の光合成と物質生産 190—192頁 養賢堂 (1971)
- 55) S.Yoshida et al : Effects of silicon and nitrogen supply on some leaf characteristics of the rice plant. *Plant and Soil* **31** 48—56 (1969)
- 56) 間藤徹, 村田伸治, 高橋英一 : イネへのケイ酸施用が有用である理由 *日土肥誌* **62** (3) 248—251 (1991)
- 57) 文献 (4) のp155