

ケイ素の生物学 —9—

京都大学名誉教授

高橋 英一

陸上植物とケイ素

ケイ素の吸収と養水分吸収への影響

ケイ酸の吸収と移行分布

前回述べたように植物のケイ酸吸収には積極型、排除型および中間型の三つのタイプがみられます。しかし根を切除するといずれも培養液のケイ酸濃度を変化させず、水に伴った吸収になります。したがって植物のケイ酸吸収性の違いは根にあることが分かりますが、それは根のどの部分にあるのでしょうか。

養水分の通路には細胞膜に包まれた細胞質部分(シンプラスト)を経由するルートと、細胞質の外側の部分(アポプラスト)を通るルートがあります。ケイ酸は細胞壁は自由に通れますが、細胞膜は極めて通りにくいので専らアポプラストのルートをとると思われま

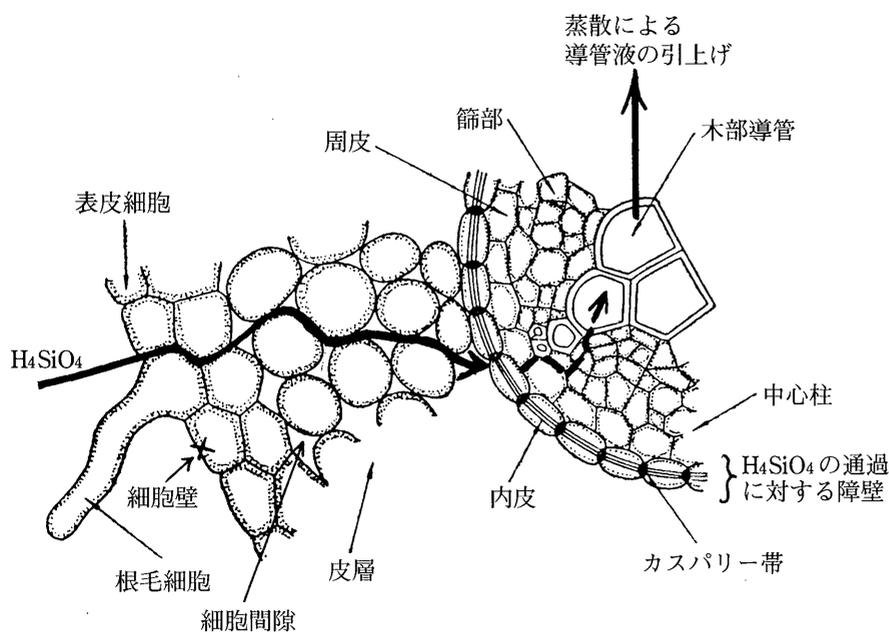
す。根の横断面の構造は図18のようです。ケイ酸は細胞が密に並んでいる表皮層のアポプラスト部分

(細胞壁) を通って根の内部に入りますが、多くの植物にとってはここが先ず障壁になっているようです。表皮層の内側には数層の柔細胞からなる、細胞間隙に富む皮層組織があり、ケイ酸はこの組織の細胞間隙と細胞壁からなるアポプラスト部分(その発達の程度も植物によって異なる) を通って根の中心部へ向かって動いてゆきます。皮層と導管を内蔵している中心柱の境には、上下左右の細胞壁がスベリン化され肥厚したカスパー帯で囲まれた内皮層があり、ここを通過するにはいったん細胞質に入る必要があります。従ってここでケイ酸の移行は妨げられると思われま

すが、実際しばしば内皮層近傍にケイ酸の沈積が観察されています⁴⁰⁾。しかしイネでは導管液のケイ酸濃度は外液にくらべて非常に高く、^{注1)} またイネのケイ酸吸収はNaCN, DNP, 24-Dなどの代謝阻害剤によって著しく阻害されるので、エネルギーを使ってケイ酸を通す特殊な仕組みのあることが予想されますが、詳しいことは分かっていません。

根に入ったケイ酸は細胞壁、細胞間隙、導管からなるアポプラストルートを通って地上部へ運ばれ、その末端部で蒸発による濃縮を受けて沈積します。イネでは表皮細胞やそれが分化して生じた毛、孔辺細胞、機動細胞、シリカ細胞^{注2)} などの異形細胞や初殻などが著しくケイ化を受け

図18 根の横断面とケイ酸の通り路



ます⁴¹⁾。また導管壁にもケイ酸が沈着しますが、それには細胞壁のポリフェノール成分が関与しているといわれています⁴²⁾。

表7 十分量のケイ酸を与えて水耕した作物の SiO₂含有率と 地上部/根部 比

		(平均値)			
試験数	地上部	根部	地上部/根部 比		
		%	%		
イネ	7	11.70	0.98	11.95	
トマト	6	0.47	0.92	0.53	
キュウリ	2	4.02	0.96	4.18	

注 イネ：農林22号2例，フジミノリ2例，アケボノ2例，京都旭1例
 トマト：米寿5例，古谷K号1例
 キュウリ：久留米落合H2例
 培養液のケイ酸濃度は SiO₂ 100ppm

表7は十分量のケイ酸を与えて水耕したイネ，トマト，キュウリの地上部と根部のケイ酸含有率およびその比の15の試験例についての平均値です。これらはいずれも SiO₂100ppm を含む培養液で育てられていますが，根のケイ酸含有率はほぼ等しいのに比して，地上部の含有率には大きな違いがみられます。これはトマトではケイ酸の移行は根で抑えられるのに対して，キュウリではほぼ蒸散流とともに地上部に移行することを示唆しています。何故なら蒸散係数を500とすると，100ppmの SiO₂ は5%に濃縮されることになるからです。イネではさらにこの値を大幅に越えており，導管へのケイ酸の濃縮作用を反映しています。

第6回のケイ藻のところで，ゲルマニウムがケ

表8 地上部の⁶⁸Ge吸収に対する根部の役割⁴³⁾

植 物	地上部 ⁶⁸ Ge 吸収量		A/B
	根付き地上部 A	根切除地上部 B	
	⁶⁸ Ge cpm/mg 新鮮重		
イネ	2330	90	26.0
ツル性インゲン	29.2	23.0	1.3
ヒルガオ	6.6	34.4	0.2
アサガオ	4.4	22.4	0.2

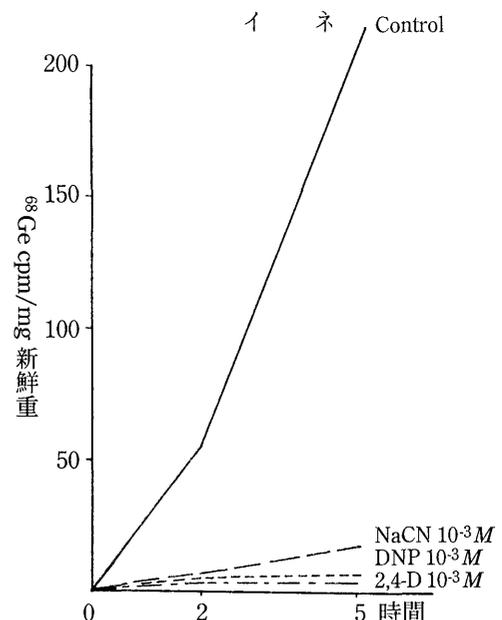
0.1μCiの⁶⁸Geを含む5ppm Ge (ゲルマニウム酸) 溶液に浸し，20時間室温に放置後，地上部の⁶⁸Ge量を測定。

イ素のトレーサーとして利用できることを述べましたが，陸上植物にも利用されている例を次に紹介します。

表8は短時間のゲルマニウム酸の吸収に対する根部の役割の違いを，植物種間で比較した結果です⁴³⁾。ゲルマニウム吸収能の高いイネの地上部への取り込み量は，ケイ酸の場合と同様に根部の切除によって大幅に減少したのに対して，ツル性インゲンでは切除の影響は認められず，ゲルマニウム吸収能の著しく弱いヒルガオ，アサガオでは逆に増加しています。この結果からヒルガオ，アサガオのケイ酸吸収は排除型，ツル性インゲンは中間型に属すると思われます。

図19はゲルマニウム吸収に対する代謝阻害剤の影響をみたものですが，イネではケイ酸の場合と同じく著しい吸収阻害が起こっています⁴³⁾。これ

図19 イネ地上部の⁶⁸Ge吸収に及ぼす代謝阻害剤の影響⁴³⁾



2μCiの⁶⁸Geを含む5ppm Ge (ゲルマニウム酸) 溶液に所定濃度の代謝粗害剤を加えて5時間にわたる吸収量を測定。

に対して根がゲルマニウムを排除したアサガオでは，初期には対照にくらべて吸収はむしろ増加しました。このことから，根におけるケイ酸の選択吸収特性には根の代謝が密接に関係していることがうかがわれます。

図20 ゲルマニウム吸収に及ぼすケイ酸の抑制効果 (Ge 10ppm, SiO₂ 0ppm および100ppm 溶液より)⁴³⁾

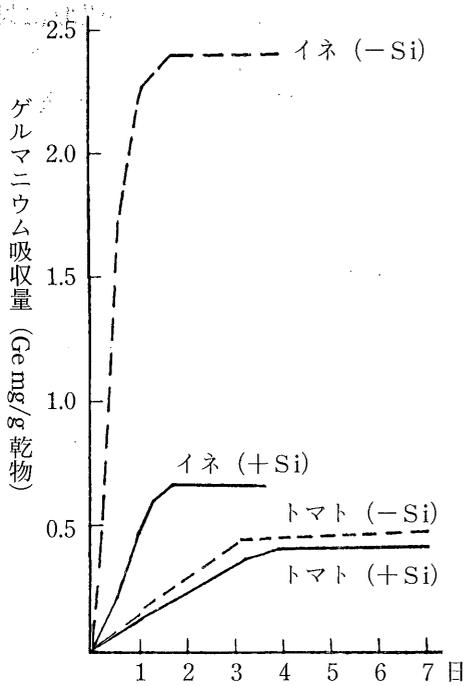
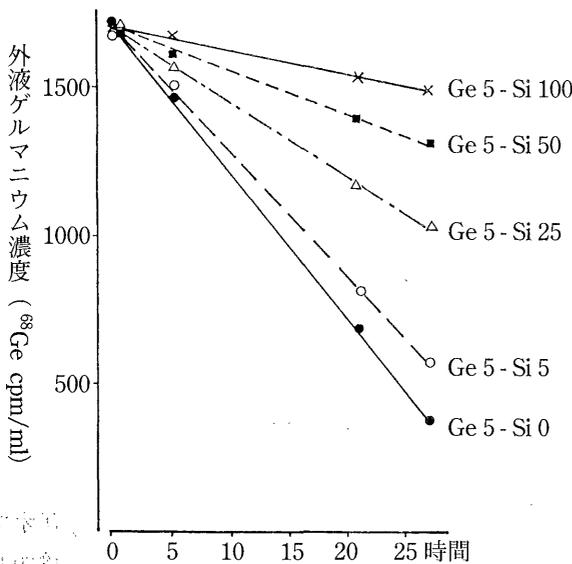


図21 イネのゲルマニウム吸収に伴う外液の⁶⁸Geの減少と共存ケイ酸の影響⁴³⁾



イネのゲルマニウム吸収は図20に示すようにケイ酸の共存によって著しく抑制されますが、トマトにはほとんど影響がみられません。またイネのゲルマニウム吸収はケイ酸の共存濃度に比例して著しく抑制されます(図21)。これはイネにおいては、両者が共通の機構によって吸収されることを示唆しています。

イネ地上部のケイ素含有率が著しく高いのは、直接的には根の特異的なケイ酸吸収能によりますが、蒸散作用も関係します。これはイネの葉身の一部にセロテープを貼って蒸散をとめると、その部分にはケイ素が集積しない(⁶⁸Geをトレーサーにした実験)ことからわかります。根で吸収濃縮されたケイ酸は蒸散流によって地上部に運ばれ、蒸発部位周辺でさらに濃縮されゲル化沈積します。これは一種のシンクとして働き、継続的なケイ酸吸収を可能にしています。

組織に沈積したケイ酸は、植物体に機械的強度を付与します。その結果、倒伏や病害虫に対する抵抗性を増し、また過度の蒸散を防ぐなどの効果を発揮します。一方植物に吸収されたケイ酸は、植物が死んで有機物が分解した後も、組織構造のレプリカとして長く土壤中にとどまることが多いので(プラントオパール、ケイ化木など)、それによって古代の植生を推察するなど、考古学の研究にも利用されています。

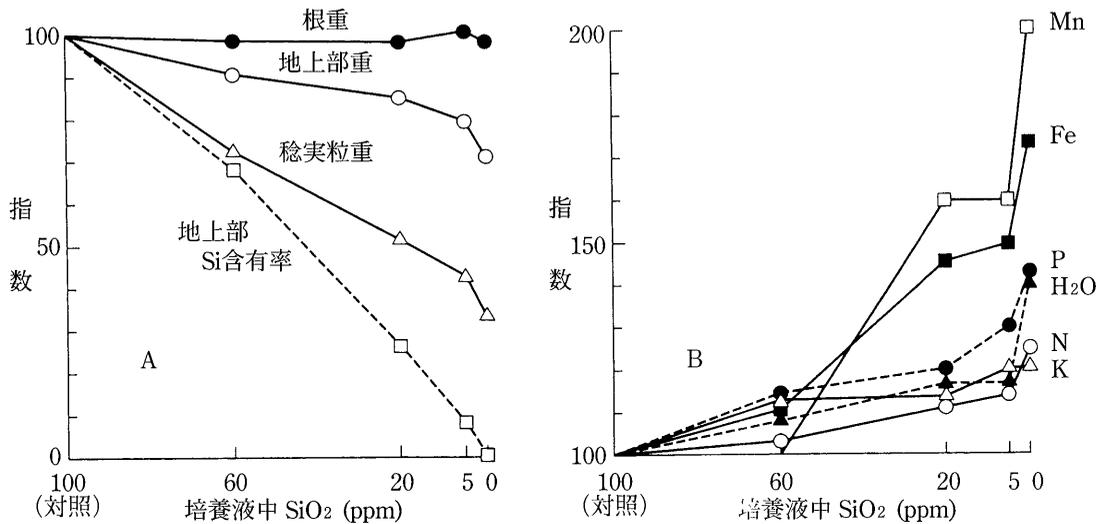
養水分吸収への影響

イネのようにケイ酸を多量に吸収する植物では、ケイ酸供給の多少が養水分吸収に影響する可能性があります。しかし水耕液にはケイ酸濃度の指定がないのが普通であるため、その影響は見過ごされがちでした。

図22はケイ酸供給量を5段階に変えて水稻を水耕したとき、生育と養水分吸収がどのように変化するかを見た結果です⁴⁴⁾。生育に対する影響は根重には殆ど見られませんが、地上部重とくに稔実粒重はケイ酸供給量(地上部 Si 含有率)の低下に伴い減少しました。養水分吸収に対しては、蒸散係数(乾物1グラム当たり1日の吸水量)の上昇が見られます。また鉄、マンガンの地上部含有率は著しく増加し、三要素の中ではリン含有率の増加が相対的に大きくなっていますが、吸収の絶対

図22 A：生育収量と地上部SiO₂含有率

B：Mn, Fe, P, N, K, 地上部含有率および蒸散量 (H₂O)⁴⁴⁾

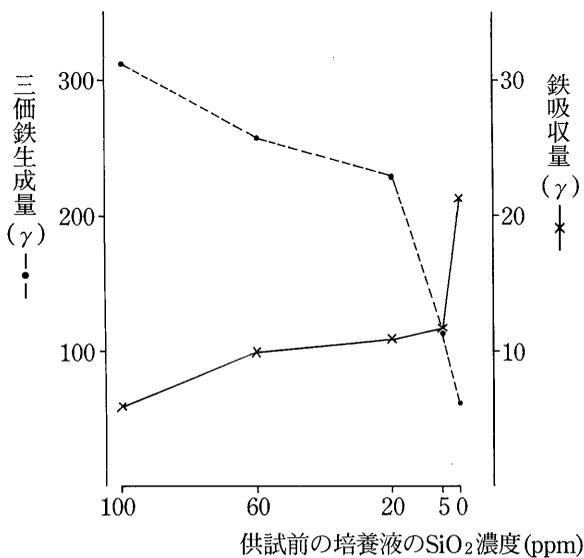


水稻農林22号, 木村氏B液を使用。対照 (SiO₂ 100ppm 供給区) に対する指数で表す。

量も生育量の低下にもかかわらず、鉄、マンガンでは顕著に、リンも若干大きくなっています。

蒸散係数の上昇は、大量に吸収され地上部表皮組織に沈積したケイ酸が、クチクラ蒸散抑制の働きをしていることを示唆しています。鉄、マンガンの吸収量の増加は、根の酸化力の低下が原因の一つとして考えられます。たとえば水耕液からの二価鉄の吸収実験で、前培養のケイ酸供給量が多く、ケイ酸含有率の高かったイネほど溶液中での

図23 ケイ酸供給量をかえた水稻の二価鉄溶液からの鉄の吸収と二価鉄からの三価鉄生成量⁴⁵⁾



2価鉄からの3価鉄生成量は多く、逆に鉄吸収量は少なくなることが認められています (図23参照)。また土耕栽培したイネに、灌がい水として蒸留水を与え続けたとき、幼穂形成期に黒色の還元斑が根圏土壤に現れたのに対して、ケイ酸を含む水 (SiO₂として100ppm) で灌がいた場合、黒色還元斑は現れなかったという結果もあります⁴⁵⁾。

イネのような沼沢植物の根には酸化力があること、発達した通気組織によって地上部から酸素が送られていること、それには光合成によって発生した酸素が含まれていることが知られています。根の酸化力へのケイ酸の関与はイネの特性かも知れませんが、その意義は大きいと思われます。

イネのリン酸とケイ酸の吸収における関係は複雑です。リン酸の吸収は、培養液中の濃度が高くなるにつれてケイ酸欠如による増加が顕著になりますが、リン酸濃度が低い場合はケイ酸の影響は見られません。

例えば培養液中のリン酸濃度を低 (1 ppm P₂O₅), 中 (15ppm P₂O₅), 高 (50ppm P₂O₅) の3段階に変えて、イネ幼植物を一月間水耕した結果は図24, 25のようでした⁴⁶⁾。リン酸濃度が中 (Mp), 高 (Hp) の場合は、ケイ酸 (100ppm SiO₂) の添加によって生育は増加したにもかかわらず、リン酸の吸収量は減少したのに対し、リン酸濃度の低い場合 (Lp) は若干増加しています。

図24 イネ地上部の乾物重に対する培養液中のリン酸濃度とケイ酸施用の影響⁴⁶⁾

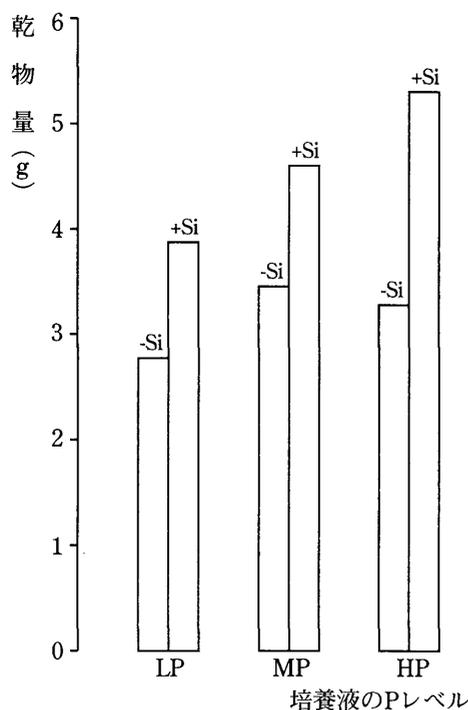
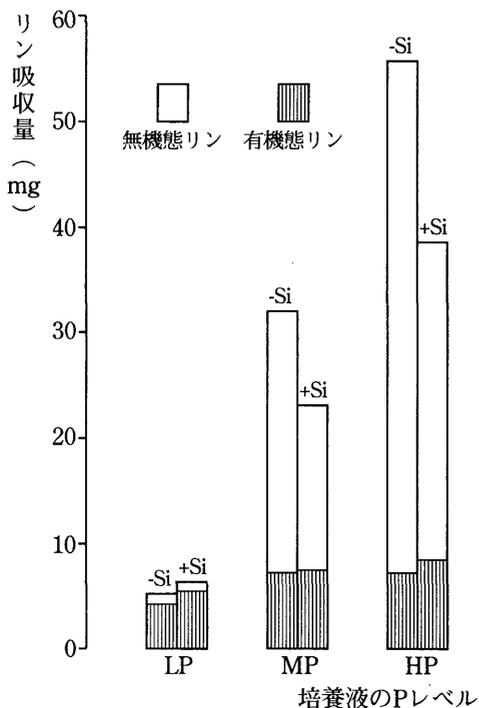


図25 イネ地上部の有機態および無機態リン含量に対する培養液中のリン酸濃度とケイ酸施用の影響⁴⁶⁾



このケイ酸添加によるリン酸吸収量の減少は、無機態リン酸部分に起こっており、有機態リン酸部分は生育量を反映して増加しています。一方ケイ酸の吸収量は培養液中のリン酸濃度の影響をほとんど受けませんでした。またケイ酸の添加は地上部の鉄、マンガン濃度を、いずれのリン酸レベルにおいても減少させました。

ここで紹介したケイ酸の養水分吸収への影響が、イネの生育にどのような効果をもたらすかについては次回に述べます。

注1) 導管液中のケイ酸はその濃度から考えて、ある種の有機化合物とキレートをつくって溶解している可能性がある。その一つにトロポロン誘導体があり、このキレート化合物はpHが6.8~7.0に上昇すると分解してケイ酸を遊離し、過飽和になって重合するという説がある⁴¹⁾。

注2) シリカ細胞は分化の途中で核を失い、細胞質もなくなってゆく。するとこれに並行してケイ酸が細胞内に入り、充填されてゆく⁴¹⁾。

参 考 文 献

40) A.G.Sangster and D.W.Parry : Ultrastructure of silica deposit in higher plant. 文献6) の pp383—407

41) P.B.Kaufman et al : Silica in shoots of higher plants. 文献6) の pp409—449

42) J.A.Raven : The transport and function of silicon in plants. Biol.Rev. 58 179—207 (1983)

43) 高橋英一, 松本英明, 蕭聡明, 三宅靖人 : ゲルマニウム吸収性の植物種間差異について 日土肥誌 47 (6) 217—221 (1976)

44) 奥田東, 高橋英一 : ケイ酸の供給量が水稻の生育ならびに養分吸収におよぼす影響, 日土肥誌 32 (11) 533—537 (1961)

45) 奥田東, 高橋英一 : 水稻の鉄吸収および根の酸化力におよぼすケイ酸施用の影響, 日土肥誌 33 (2) 59—64 (1962)

46) J.F.Ma and E.Takahashi : Effect of silicon on the growth and phosphorus uptake of rice. Plant and Soil 126 115—119 (1990)