

解 説

Agrochemistry and Biology Series

元素からみた生物の世界

高 橋 英 一

近畿大学農学部植物栄養学研究室

(平成4年8月20日受理)

How Organisms Have Used Chemical Elements for Their Growth

Eiichi TAKAHASHI

*Laboratory of Plant Nutrition, Faculty of Agriculture, Kinki University,
Nakamachi, Nara 631, Japan*

元素組成から何がわかるか

アルファベットの発明した人間は、わずか 26 文字で莫大な数の言葉をつくりだし (OED には 414,825 語が収録されている), それを使ってこの世のあらゆる事象を記述してきた。同様に化学者はこの地球上に現存する元素のすべてを知るにいたり, 90 足らずの元素記号によって自然界のあらゆる存在をあらわすことができるようになった。これら (生物と無生物) の特徴を手取り早く比較するには, その中に含まれている元素の種類と量すなわち元素組成が明らかになると便利であるが, 最近の分析技術の進歩はそれを可能にしつつある。ここでは文献ならびに筆者らが行なった分析の結果をもとに, 若干の話題を提供したい。

自然界は無生物とその中で暮らす生物, すなわち大気, 水, 岩石, 動物, 植物, 微生物から構成されているが, これらに含まれている元素の大部分はマグマの固化した火成岩から供給される。火成岩は地表で風化作用を受けて 2 次的に種々の岩石に変じ, これらの岩石を母材として土壌が生成する。表 1 にみられるように火成岩と土壌の元素組成の最も大きな違いは C と N の含量であるが, この二つの元素は生物の光合成と窒素固定の作用によって大気中の炭酸ガスと窒素ガスからもたらされたものである。したがって土壌は単なる岩石の風化物ではなく, 生物の働きによってつくられたものであり, 生物活動の舞台となっている。

代表的な陸上植物である被子植物の C と N の含量は土壌よりさらに著しく高くなっているが, 土壌の 3 大成分である Si, Al, Fe の含量は著しく低い。被子植物にくらべるとその捕食者である哺乳動物は N, P, Ca,

Na が高く, K, Mg, O が低いという特徴がみられる。これは哺乳動物は食物から P と Ca を集めて骨格成分のアパタイトをつくるためであり, Na 塩を主成分とする体液を循環させていることの反映である。また炭酸同化のできない動物の細胞は細胞膜のみで, 植物の細胞のようにセルロースからなる厚い細胞壁をもたず, かわりに細胞と細胞の間はコラーゲタンパクで埋められている。そのため相対的にタンパク質の含量が高くなり, それが高い N 含量と低い O 含量となってあらわれている (タンパク質の O 含量はセルロースの約半分である)。K と Mg における差は, 陸上植物は塩生植物を除き Na にくらべて K を著しく吸収する性質があり, また葉緑体をもっているためである。

生物は単細胞生物から多細胞生物へ進化してゆくにつれ, 特殊な組織器官を分化させて複雑な機能をもつようになったが, 個体としての元素組成の特徴もその過程で生じたと思われる。単細胞生物のバクテリアと哺乳動物細胞の元素組成はよく似ているが (表 1), このことは基本的な代謝の営まれる細胞の実質 (細胞質) の組成は, 生物の種をこえて共通していることを示唆している。

動物と植物における必須元素のちがい

表 2 に現在までにみとめられている維管束植物と哺乳動物の必須元素を示した。両者の微量必須元素の数は, 1954 年の時点では同数の 7 元素であったが, それ以後に追加された元素は植物にはないのに対して動物では 9 元素の多きにのぼっている。この両者における必須元素要求性のちがいは何を示しているのだろうか。

たとえば Na は古くから動物の多量必須元素であることが知られているが, 植物においては必須元素になって

表 1 岩石、土壌、植物、動物の元素組成の比較

	火成岩 (%)	土 壤 (%)	土 壤 火成岩	被子植物 (%)	哺乳動物 (%)	哺乳動物 被子植物	バクテリア (%)	哺乳動物 細胞 (%)
C	0.02	2.00	100	45.40	48.40	0.94	53.80	52
H	0.14	0.15	1	5.50	6.60	1.20	7.40	9
O	46.40	49.00	1.06	41.00	18.60	0.45	23.00	22
N	0.002	0.10	50	3.00	8.70	2.90	9.60	12
P	0.11	0.07	0.64	0.23	4.30	18.70	3.00	1
S	0.03	0.07	2.33	0.34	0.54	1.59	0.53	1
K	2.09	1.40	0.67	1.40	0.54	0.39	(残 2.67)	(残 3)
Na	2.36	0.63	0.27	0.12	0.38	3.17		
Ca	4.15	1.37	0.33	1.80	8.50	4.72		
Mg	2.33	0.50	0.21	0.32	0.10	0.31		
Cl	0.01	0.01	1	0.20	0.32	1.60		
Si	28.15	33.00	1.17	0.20	0.01	0.05		
Al	8.23	7.10	0.86	0.05	0.001	0.02		
Fe	5.63	3.80	0.67	0.01	0.01	1		

H. J. M. Bowen: "Trace Element in Biochemistry," Academic Press, p. 16, 39, 68, 1966

表 2 植物、動物の必須元素と発見年代

維管束植物		哺 乳 動 物	
C	C	Na	-19世紀 まで
H	H	Cl	
O	O		
N	N		-19世紀 まで
P	P		
K	K		
Ca	Ca		
Mg	Mg		
S	S		
Fe	1844	Fe	17世紀
Mn	1922	I	1850
B	1923	Cu	1928
Zn	1928	Mn	1931
Cu	1931	Zn	1934
Mo	1939	Co	1935
Cl	1954	Mo	1953
		Se	1957
		Cr	1959
		Sn	1970
		V	1971
		F	1971
		Si	1972
		Ni	1974
		As	1975
		Cd	1985

いない。逆に動物ではこれだけ多数の微量必須元素が追加されたのに、B はまだ入っていない。また Si は古くからイネ科植物における役割について研究されいろいろな効果がみとめられているが、植物の必須元素にはなっていない(ただしケイ藻に対しては必須性がみとめられている)。ところが動物では最近微量必須元素に加えられた。さらに Cl や Mo のように同じく必須元素になっても、必須性の内容が動物と植物で異なる場合もある。

このように必須元素を一つ一つ点検して、動物と植物におけるちがいの意味や、元素がある生物において必須性を獲得するにいたった過程を考えてみるのは興味深いことであろう。ここでは必須元素の中、Na, Si, B について考察を試みたい。

ナ ト リ ウ ム

体重 70 kg の人の体には約 85 g の Na が含まれており、それは細胞外液(血漿と組織間液)と骨格にそれぞれ 45%, 残りは細胞中に存在しているといわれる。つまり体の中の Na の大部分は細胞の外にあるが、これと対照的なのは K で大部分が細胞内に分布している。それは細胞膜に Na/K ポンプがあり、細胞内の Na を汲みだし K を汲み入れるからである。これは植物でも同じで、表 3 にみられるように海藻でも海水にくらべて K は著しく濃縮されているが、Na の含量は相対的に抑えられている。

クロード・ベルナルは細胞外液の存在を内部環境と

表 3 海藻、牧草の Na, K 含量の一例

	海水	ダルス (紅藻類)	コンブ (褐藻類)	牧草
Na (%)	1.05	2.07	1.35~2.88	0.13
K (%)	0.04	7.91	5.25~8.15	1.99
Na/K	26	0.26	0.26~0.35	0.07

西澤一俊: 海藻学入門, 講談社, 東京, p. 160, 1989

呼び、体の外の外部環境と対応させてその重要性を強調したが、Naは細胞をとりかこむ内部環境にあって恒常性を維持するためpHや浸透圧の調節に、また細胞膜通過を介して刺激の伝達やアミノ酸、糖の取込みに重要な役割を演じている。

海棲の単細胞生物は養分の吸収と排泄を直接まわりの海水に対して行なっているが、細胞外液の組成が海水に似ているところから（細胞外液のNa/Kモル比は36、海水のそれは47である）、陸棲の多細胞動物の体を構成している個々の細胞も海棲の単細胞動物（原生動物）に似た環境におかれているといえる。すなわち細胞外液の流れは個々の細胞に酸素や養分を運び、炭酸ガスや老廃物をとりのぞく働きをしている。これが循環系で血管系とリンパ管系とポンプの役割をする心臓からなり、これにガス交換をする肺臓、溶質の濾過を行なう腎臓、養水分の消化吸収をする胃と腸、吸収した養分の処理や貯蔵を行なう肝臓がつけ加わったのがわれわれの体の栄養器官系である。

これに対して植物には循環系の分化もなければ動物の細胞外液に相当するものもない。陸上植物の細胞は動物の細胞のように“海の衣”をまといおらず、ここに塩生植物は除き一般の植物のNa含量が動物にくらべて低く、また動物のような要求性をNaに対してもたない原因がある。しかし細胞の中味（細胞質）は、おそらく最初に細胞が形成されたとき以来、動物も植物も高K低Naの組成を維持してきたと思われる。このようにみてゆくと、個体としての生物のNaに対する挙動のちがいは、高度好塩細菌など特殊な生物は別として、細胞質の外の部分にあると考えられる。

一般の植物は1価のアルカリカチオンであるKとNaのうちKを選択的に吸収し、その含量は動物にくらべて著しく高いという特徴がある。それで19世紀中頃ドイツでカリ鉱床が発見されるまでの長い間、人類は植物を焼いて生じる灰を容器に集め、水で抽出乾固してカリ塩を得ていた。カリがポタッシュ（pot-ash）とも呼ばれているゆえんである。カリは肥料だけでなく、火薬の原料としてかかせない硝石（ KNO_3 ）をつくるのに必要であったので、それを得るためにヨーロッパやアメリカの森林は荒廃するにいたった。

植物が動物の要求に応じうるだけのNaを含んでいないことの影響は大きい。草食動物は塩気のあるところを探しもとめるし、人類にとって塩は重要な交易品でありそれは“塩の道”“敵に塩を送る”“サラリー”などの言葉として残っている。多くの陸上植物は土壌溶液のNa濃度が0.1%くらいになると生育が阻害される。こ

の濃度は海水の10分の1にすぎないけれども、陸上では蒸散作用によって体内で濃縮がおこるため阻害をひきおこすのである。植物が光合成によって乾物1g相当の生長をする間に、300~800gの水が体の中を通過する。これを蒸散係数というが仮りに500とすると、ジュースをストローで吸うように植物が塩水をそのまま吸収すれば体内で500倍、0.1%のNaは50%に濃縮されることになる。植物は大なり小なりNa排除能をもっているが、もし十分強くなければ0.1%程度でも阻害をうけることは容易に理解できよう。

しかし陸上植物の中には海水に近いNa濃度のところでも生育するものがある。表4に一例を示したが、これらの中ヨシは広塩性植物（euryhaline plant）、他は塩生植物（halophyte）と呼ばれるものである。ヨシは元来は淡水性であるが、塩分濃度の相当高いところでも生育は可能である。それはヨシはNa排除能が強く、K吸収力が高いからで、表にみられるように土壌溶液の濃度が海水より高いところでも、ヨシのNa含量は低くK含量は高く保たれている。これに対して塩生植物のNa含量は著しく高く、K含量は低めである。このような植物を集めて焼けば、灰からソーダをとることができる。Sodaの語源はアラビア語のSuwādという植物に由来しており、それは塩生植物のマツナ属 *Suaeda* の学名になっている。ちなみに表4のハママツナの学名は *Suaeda maritima* である。

これらの塩生植物は吸収したNaを細胞容積の大部分

表4 塩生、広塩性植物のNa、K含量と生育地の塩類濃度

	Na (%)	K (%)	Na/K
琵琶湖西岸(柳ヶ崎)			
土壌溶液	0.001	0.01	0.1
ヨシ	0.01	1.77	0.006
千種川河口(赤穂)			
土壌溶液	0.75	0.05	15.0
ヨシ	0.34	2.93	0.12
ホソバノハマアカザ	8.35	2.52	3.3
ハママツナ	10.3	1.23	8.4
錦海塩田跡地(牛窓)			
土壌溶液	1.55	0.08	19.4
ヨシ	0.19	2.53	0.08
ウシオツメクサ	5.65	1.47	3.8
アツケンソウ	17.6	1.01	17.4

参考図書 2), p. 99

を占める大きな液胞の中に集積し、細胞質から隔離するとともに浸透圧を発生して、外界の塩類濃度の高い溶液から水分を吸収することを可能にし、高い膨圧を維持するのに役立っている(そのために葉は多肉化する)。このようなことが可能なのは、液胞膜に Na を細胞質から液胞中へ汲みだすポンプがあるからである。

塩類を集積する塩生植物は耐塩性が強いだけでなく、塩類濃度がある程度高いときのほうが生育がよい。たとえばホソバノハマアカザの生育は 50 mM (海水の 10 分の 1、一般の植物が生育阻害をうける濃度) のナトリウム塩のとき最高になる。カリウム塩でも同程度の効果があるので、ホソバノハマアカザは 1 価カチオンの要求量が高く、海水の影響をうけているところではそれに Na を利用している。しかし海水の 2 分の 1 程度の高濃度になると、ナトリウム塩では生育可能だがカリウム塩の場合は枯死してしまう。ホソバノハマアカザは自生地の高 Na 条件にはよく適応しており、生育をそこなうほど Na を吸収しないように自己調節できるが、高 K 条件には適応できていないためにこのようなことがおこるのである。

このほかマングローブと総称されている樹種にも耐塩性の強いものがあるが、これらの中には葉に塩腺をもち積極的かつ選択的に Na を排泄し、一定以上に濃度が高まらないようにしているものがある。面白いことに動物にもこれと似た器官をもつものがある。海棲の爬虫類や海鳥には、食物とともに飲みこんだ海水中の NaCl を海水より濃い溶液で排出する塩腺が、眼窩(ウミガメ、イグアナ)や鼻腔(海鳥)に開口している。

海に誕生した生物は、Na に対しては常に細胞の外(液胞内も細胞の外である)に隔離しながら利用するという仕方では進化してきたことがうかがわれる。なお最近 C₄ 型植物の中に少量の Na が必須らしい状況証拠が得られているが、そのしくみの詳細はまだ明らかになっていない。

ケ イ 素

Si は自然界では P と同じように O とむすびついて、ケイ酸(SiO₂)またはその塩として存在する。Si と O はそれぞれクラーク数第 2 位と第 1 位の元素であり、この二つの連合であるケイ酸は地殻の半ば以上を占めている。しかし溶解度は低いため、溶存ケイ酸の濃度は数 ppm ないし数十 ppm の範囲である。ところで生物は体を保護するための硬組織をもっているが、生物のあるものはその材料にケイ酸を使っている。硬組織の素材にはセルロース、リグニンやキチン、コラーゲンなどの有機系のものと、ケイ酸、炭酸カルシウム、リン酸カルシ

ウムなどの無機系のものがあるが、そのいずれをえらぶかによって生物の特徴がみとめられる。植物の硬組織(細胞壁、木化細胞)は主としてセルロース、リグニンからなり、カルシウムやケイ酸はその補強的役割をしているにすぎないが、動物では無機系のものの占める割合が大きい。

表 5 に動物の硬組織の元素組成を示したが、原生動物、海綿動物ではケイ酸型と炭酸カルシウム型が共存しているが、腔腸動物以上になると炭酸カルシウム型のもののみとなり、さらに哺乳動物ではリン酸カルシウム型になっている。動物はこのほかに有機質も硬組織の素材にしており、海綿動物の中の沐浴海綿は硬タンパク質のマトリックスの海綿質のみからなっている。このように動物の硬組織形成に参与する有機質のマトリックス生成、ケイ質化、石灰化の三つのプロセスには生物進化との関係がうかがわれるが、さらに興味深いことに、同じ動物の一生の間にこれらのプロセスがつぎつぎにおこるものがあることが知られている。すなわち *Sclerospongiae* 属のある海綿では、はじめケイ酸質の骨格ができ、

表 5 生物の硬組織の Si, Ca 含量⁵⁾

	Si (ppm)	Ca (ppm)	Si/Ca
原生動物			
ケイ酸型(有孔虫)	410,000	17,000	24.1
炭酸カルシウム型 (有孔虫)	12,000	355,000	0.03
海綿動物			
ケイ酸型(ガラス海綿)	430,000	17,000	25.7
炭酸カルシウム型 (石灰海綿)	..	341,000	..
腔腸動物			
炭酸カルシウム型 (サンゴ虫)	1,000	365,000	0.003
棘皮動物			
炭酸カルシウム型(ウニ)	4,000	352,000	0.01
軟体動物			
炭酸カルシウム型(貝)	800	395,000	0.002
哺乳動物			
リン酸カルシウム型 (ヒト)	100	257,000	0.0004
	[P 118,000 F 1,500 N 45,000]		
藻類			
ケイ酸型(ケイ藻) ^{a)}	200,000	8,000	25.0
炭酸カルシウム型(紅藻)	1,000	300,000	0.003

^{a)} 全生物体の分析値。

参考図書 3), p. 153

ついでこれが部分的に有機質のマトリックスに包まれ、最後に石灰質の骨格の中に埋まるという。さらにケイ酸は 1970 年代になってヒヨコの成長や骨格形成に微量必要であることが証明され、哺乳動物の必須元素の表に加えられたが、その研究でケイ酸は骨形成の初期の段階で重要な役割をもっていることが明らかにされた。

植物の場合もケイ酸型とカルシウム型の二つの系統の存在がみとめられる。藻類では、石灰藻とも呼ばれる紅藻は炭酸カルシウムを集積し、一方ケイ藻はケイ酸を集積する (表 5)。ケイ藻においてはケイ酸は乾物の 40% 以上を占めており、細胞壁の外側に独特の紋様をもった殻を形成するが、無ケイ酸培地でケイ藻を培養すると分裂増殖が停止することから必須元素になっている。陸上植物にも表 6 にみられるように Si 含量の高いものがあり、それらはまた Ca と B 含量が低い傾向がみられる。この三つの特徴を指標にして、約 600 種の植物の分析結果からケイ酸型の分布をみたところ、ケイ酸植物は陸上植物の系統樹の上で科または亜科レベルでまとまって存在していた。

植物のケイ酸含量の種間差異の原因は植物のケイ酸吸収力にある。植物を水耕し、水耕液の養分濃度の変化をしらべると養分の吸収速度がわかる。植物は多量の水を吸収蒸散しているが、ある養分の吸収が水よりおそいときは時間の経過とともに水耕液中の濃度は高くなり、同

じ速さのときは濃度はかわらず、水より速いときは濃度は低下する。この方法で植物のケイ酸吸収性を比較すると三つの型、すなわち能動型、受動型、排除型のあることがわかった。能動型 (イネ、トクサなど) は典型的なケイ酸集積植物であり、ケイ酸の吸収は好気呼吸にリンクして行なわれる。受動型 (キウリなど) では水耕液のケイ酸濃度が高いときケイ酸含量はかなり高くなるが、Ca 含量はそれよりも高い。排除型は根のまわりでケイ酸が濾され、地上部のケイ酸含量は低い。植物のケイ酸含量の著しいちがいの原因が根部にあることは、根を切除するとケイ酸吸収性はすべて受動型になることからわかる。

Si の同族元素に Ge があるが、植物はゲルマニウム酸 (H_4GeO_4) の吸収に際してケイ酸 (H_4SiO_4) の場合と同じ挙動をし、両者を区別できない。これは植物の選択吸収のしくみを考える上で興味深い現象である。

典型的なケイ酸植物であるイネは十分にケイ酸を吸収できるときは 15~20% の高含量を示すが、このイネを無ケイ酸で水耕栽培すると生育および穀実収量は著しく低下する。その原因は蒸散量の増加や葉身下垂の現象から葉身内に水分ストレスが生じ、 CO_2 の同化が抑制されることにあるのではないと思われる。野外の圃場においても、土壌の可給態ケイ酸レベルが低いところでは葉身が弯曲気味の草型となり、相互遮へいを助長して群落の光合成効率を低下させることが指摘されている。さらに野外ではケイ酸含量の低いイネは病虫害や倒伏の被害をうけやすく、これは窒素を多用するほど助長されることが知られている。日本には可給態ケイ酸の低い水田がかなり分布しており、また単収を上げるために密植多肥栽培が行なわれていることもあって、ケイ酸塩の効果がみられる場合が多い。そのため日本ではケイ酸肥料という世界に例をみない肥料がはじめてつくられた。

ケイ酸は作物だけでなく野生植物にも有効な場合がある。サバンナはイネ科植物が密生する草原であるが、これらの植物はケイ酸を吸収集積することによって乾燥に耐え、捕食者から身を守るのに役立っているといわれる。植物に吸収された水溶性ケイ酸は濃縮されると自然にゲル化し、表皮組織の細胞壁に沈積する。このような性質があるため、ケイ酸は Na のように過剰障害をおこすことはなく、植物は体の外側を沈積したケイ酸でカバーして、水分の損失やカビなどの侵入を防ぐのに利用できる。

ケイ酸とのかかわり方は動物も植物も本質的には同じである。いずれもとり入れたケイ酸を力学的素材として利用し、そのぶん有機炭素を節約している。

表 6 同一土壌に栽培された 175 種類の植物地上部の Si, Ca, B, K 含量³⁾

		Si (種の数)	Ca (%)	B (ppm)	K (%)	Si/Ca モル比
全供試植物平均(175)						
ケイ酸植物						
単子葉類	(22)	1.87	0.65	3.0	2.39	4.46
双子葉類	(8)	0.86	1.76	9.5	2.34	0.77
羊歯植物	(10)	1.88	1.13	8.5	2.17	5.25
蘚苔植物	(2)	3.46	1.06	7.6	0.93	4.73
平均	(42)	1.76	1.00	6.0	2.26	3.96
非ケイ酸植物						
単子葉類	(40)	0.18	1.78	13.7	3.18	0.20
双子葉類	(77)	0.23	1.87	27.7	2.57	0.22
裸子植物	(12)	0.13	1.20	26.7	1.15	0.24
羊歯植物	(4)	0.17	0.92	28.9	1.64	0.29
平均	(133)	0.20	1.75	23.7	2.60	0.22
ケイ酸植物/非ケイ酸植物		8.8	0.57	0.25	0.87	18.0

参考図書 3), p. 166

ホ ウ 素

Bは先に述べたように動物に対しては必須性が認められていない。しかし植物でも必須性が確認されているのは羊歯植物以上すなわち維管束植物であり、藻類や蘚苔類に対しては明らかではない。BはSiと同じくOと結びついてホウ酸 (H_3BO_3) またはその塩として存在するが、このホウ酸はシスの水酸基をもつ有機化合物と結合するという特性をもっている。生体内にはこのような化合物は少なくないので、体内にとりこまれたホウ酸がいろいろな生理作用を呈するであろうことは想像にたたくない。現在動物に関するホウ酸の知見は毒作用のみであるが (ホウ酸入り煎餅などの食品中毒、病院でのホウ酸水の生理的食塩水との誤用など)、ホウ酸のこのような作用は洗眼薬や不易糊 (ホウ酸入りデンプン糊) やゴキブリ退治 (ホウ酸団子) などに利用されている。

作物においても必須性 (欠乏) と毒性 (過剰) の二つの問題がある。植物のB含量は、表7にみられるように種類によって大きく異なるが、これは植物のB要求性、B耐性の差異とも関係している。このB含量の差異は膜壁の性質に原因しているらしいことが、表の植物

根のB吸着容量の大小から推察される。

野外における作物のB欠乏症にはいろいろなものが知られている。ビートの heart rot, ダイコン、カブラの brown heart, ピーナッツの hollow heart, リンゴの internal cork, セルリー, ミツバの cracking, チューリップの首折れ, ナタネの不稔等多岐にわたっている。そのためホウ素施肥 (ホウ砂溶液の葉面散布, ホウ酸塩を添加熔成したリン酸肥料の施用など) が行なわれる。

B欠乏症の特徴は生長点の細胞や花粉管の破裂, 肥大根内部の組織細胞の壊死, 表皮細胞組織のひびわれなどにみられるように, 細胞膜壁部分の障害となって現われることである。このようにB欠乏の症状は顕著であるが, Bの生理作用は必須元素の中でもっともわかっていない。ホウ酸イオンはフェノール類と複合体をつくる能力があることから, 維管束植物のフェノール代謝への関与に注目し, これによってB欠乏の諸現象を統一的に説明しようという試みもあるが, 仮説の域を脱していない。

Bの生理作用の研究の進展をはばんでいる原因の一つに, その微量定量のむづかしいことがある。Bには利用可能な放射性同位元素がなく, 放射化分析もできない。Bは熱中性子吸収能が大きい特性があるためであるが, この性質は原子炉の運転制御棒やガンの放射線治療に利用されている。このようにBは独特の化学性, 生物性をもっており, もっと興味をもたれてよい元素である。

お わ り に

生物との関係が深いいわゆる“生元素”には, C, H, O, N, P, K などのように細胞の内部にあって機能し, その必要はすべての生物に共通している元素と, ここでとりあげた元素のように, 細胞の周縁で特殊な役割を果たしている元素がある。そしてこの後者に属する元素の“生物性”をしらべることは, 生物の進化, 多様化を考える上に有益であると思われるのである。

参 考 文 献

- 1) 高橋英一: 動物と植物はどこがちがうか, 研成社, 東京, 1989
- 2) 高橋英一: 生命にとって塩とは何か, 農文協, 東京, 1987
- 3) 高橋英一: ケイ酸植物と石灰植物, 農文協, 東京, 1987
- 4) 高橋英一: ホウ素と生物—比較栄養論, [16] [17] [18], 農業および園芸 **60**, 1317, 1443, 1555 (1985)

表7 作物のホウ素含量, 要求性, 吸着容量

作物の種類	分類上の位置	B 含量 地上部 乾物 ^{a)} (ppm)	B 要求 性 ^{a)}	B 吸着 容量 ^{b)} ($\mu\text{g/g}$ 乾根)
オオムギ	単子葉類	イネ科 2.3	小	3
ライムギ		" 3.1		4
コムギ		" 3.3		5
トウモロコシ		" 5.0		4
ハウレンソウ	双子葉類	アカザ科 10.4	中	11
キクチシャ		キク科 13.1		
エンドウ		マメ科 21.7		
ニンジン		セリ科 25.0		
タバコ		ナス科 25.0		
キャベツ	双子葉類	アブラナ科 37.1	大	19
カブラ		" 49.2		
クロカラシナ		" 53.3		
ハツカダイコン		" 64.5		
サトウダイコン		アカザ科 75.6		
ヒマワリ		キク科 80.0		
ケシ		ケシ科 94.7		

^{a)} K. C. Berger: *Adv. Agron.* **1**, 355 (1949)

^{b)} H. Tanaka: *Plant Soil* **27**, 300 (1967)