

5 ミネラル管理の重要性、作物と人の健康

東京農業大学客員教授 渡辺和彦

- I 骨粗しょう症対策に農産物ミネラル、ホウ素とケイ素
健康な人体の源は何と！ 作物を育てる肥料、土壌改良資材であった
- II 作物はなぜ糖尿病にならないか
カリウムとマグネシウム不足ラットの雄は雌より先に死亡
- III 日本人はマグネシウム不足
植物におけるマグネシウムの活性酸素抑制効果
- IV 亜鉛・高年齢者に多い食欲不振、皮膚障害に劇的な効果
寿命宣言された高齢者がお元気になられた事例から

I 骨粗しょう症対策に農産物ミネラル、ホウ素とケイ素

健康な人体の源は何と！ 作物を育てる肥料、土壌改良資材であった

はじめに

ヒトの健康とミネラルについて、とりまとめる機会があった^{1, 2)}。そのため、地球上の

表1 人体の元素濃度と生物界における必須性

分類	元素名	体重1kg当たりの体内濃度	必須性			分類	元素名	体重1kg当たりの体内濃度	必須性		
			動物	ヒト	植物				動物	ヒト	植物
多量元素	O	650 g/kg	○	○	○	超微量元素	Al	857.0 μg/kg			△
	C	180	○	○	○		Cd	714.0			
	H	100	○	○	○		Sn	286.0	○		
	N	30	○	○	○		Ba	243.0			
	Ca	15 (以上で	○	◎	○		Hg	186.0			
	P	10 98.5%)	○	◎	○		Se	171.0	○	◎	△
少量元素	S	2.5	○	○	○		I	157.0	○	◎	△
	K	2.0	○	◎	○		Mo	143.0	○	◎	○
	Na	1.5	○	◎	△		Ni	143.0	○	○	○
	Cl	1.5 (以上で	○	○	○		B	143.0	○	○	○
	Mg	0.5 99.3%)	○	◎	○		Cr	28.5	○	◎	
							As	28.5	○		
微量元素	Fe	87.50 mg/kg	○	◎	○		Co	21.4	○	○	△
	F	42.80	○	○		V	2.9	○		△	
	Si	28.50	○	○	△						
	Zn	28.50	○	◎	○						
	Sr	4.57	○								
	Rb	4.57	○								
	Br	2.86	○								
	Pb	1.71	○								
	Mn	1.43	○	◎	○						
	Cu	1.14	○	◎	○						

桜井弘(2006)³⁾に植物欄と◎を追加記載
◎:日本人の食事摂取基準に必要量等が定められている元素
△:植物種により有用性が認められている元素

ミネラルについて総括的に概観すべく、資料を整理していると当たり前のことと、同時に意外なことに気がついた。当たり前のことの1つは、私たちが施用する肥料、ミネラルは、土壌に

不足するから施用しているのである。当たり前だが、それらがヒトの健康に大切なミネラルであることが、後に紹介する資料からも読み取られた。まさに肥料が作物だけでなく、ヒトの健康に役立っていた。

他の一つは、ヒトが魚や肉類でなく、穀物や野菜、果物などの農作物から摂取するミネラルで最も多いのは**ホウ素**と**ケイ素**である。すなわち私たちが生産する農産物は、両元素を通じてヒトの健康に大きく貢献している。その働きを調べていて驚いた。ホウ素とケイ素とも多様な作用があるが、両者の共通点の1つはヒトの骨を丈夫にすることである。日本人や中国人は西洋人ほど乳製品を摂取していない。カルシウムの摂取量が少ないにもかかわらず、骨粗しょう症は少ない。草食動物である象や牛は、丈夫な骨を持っている。骨を造るのは、野菜や穀物に含まれるカルシウムやリン、マグネシウムのみならずホウ素やケイ素も重要な働きをしていたのである。

本稿では最初に以上の2点に焦点を絞って解説する。

1 ヒトの健康からみた農産物ミネラルの特徴

人体の元素濃度と生物界で認知されている必須元素

人体に含まれる元素含有率を高い順に並べ、その右に生物界で認知されている必須元素を表1に示した^{3, 4, 5)}。動物で必須と認められている元素でもヒトでは必須と未だ認められていない元素も多い。ホウ素がその一例で、動物での必須性が明らかになったのは1998年のアフリカツメガエルによる実験などで、比較的最近である^{5, 6)}。2002年に藤原徹らが

表2 土壌に多く含まれる元素と作物体中元素含有率の比較

Bowen¹⁰⁾とEpstein⁴⁾より作成

元素	土壌(乾) 中央値	植物体(乾物)ppm			植物体 最大/充足量	土壌/植物 ・充足量
		最小	充足量	最大		
Si	333000	1000	1000	100000	100*	333
Al	71000	0.1	—	500	—	—
Fe	38000	20	100	600	6	380
K	14000	8000	10000	80000	8	1.4
Ca	13700	1000	5000	60000	12	2.7
Na	6300	10	10	80000	8000*	630
Mg	5000	500	2000	10000	5	2.5
N	1000	5000	15000	60000	4	0.07
Mn	850	10	50	600	12	17
S	700	1000	1000	15000	15	0.7
P	650	1500	2000	5000	2.5	0.3
Cl	100	10	100	80000	800*	1.0
Zn	50	10	20	250	12.5	2.5
Ni	40	0.05	0.05	5	100*	800
Cu	20	2	6	50	8.3	3.3
B	10	0.2	20	800	40	0.5
Co	8	0.05	0.1	10	100*	80
Mo	2	0.1	0.1	10	100**	20

注:*印は、種間差が特に大きい。**印は、Moの特徴で過剰障害が出にくい。

右端のゴシックは、土壌元素含有率に対して作物体含有率の特に大きい換言すると、施肥の必要な元素。

高等生物界で初めてホウ素トランスポーターの遺伝子を同定する⁷⁾と、2004年には同種の遺伝子がヒトでも存在することが明らかになっている⁸⁾。後述するが、ホウ素がヒトの健康に多くの効果があることは、Nielsenら(1991)⁹⁾が早くから指摘しており、海外では多くの研究者がヒトへの健康効果を明らかにしている。したがって、ホウ素がヒトの必須元素として認知されるのは時間の問題であり、WHO(世界保健機関)は大人のホウ素摂取量の安全な範囲

を、1日当たり1~13mgとしている⁵⁾。

土壌と作物体中の元素含有率の比較

日本国内だけでなく、世界各地の土壌や作物体の元素含有率を調査した報告書は多い。

表2ではBowenら^{10, 11)}の土壌データの中央値を多い順に並べ、その横にEpsteinら⁴⁾の作物データを示した。なお、表を見やすくするため、作物体分析値⁴⁾の示されていない元素は省略している。

表2の右端に土壌/植物の比を示した。小さい順に窒素：0.07、リン：0.3、ホウ素：0.5、硫黄：0.7、塩素：0.1、カリウム：1.4となる。これらは、作物体含有率に対して、土壌中含有率の少ない元素である。すなわち、肥料として施用に必要な元素を示している。窒素、リン、カリウムは当然として、ホウ素、硫黄、塩素も作物栽培上注意しておかなければならない元素であることが分かる。硫黄は、硫酸アンモニウム、硫酸カリウムの構成成分として、また過リン酸石灰にも製造工程中の副産物として多量含まれている。塩素は、塩化アンモニウム、塩化カリウムの構成成分として含まれている。

農作物の栽培には三要素肥料だけでなく、土づくりとしての有機物施用が必要だが、有機物はホウ素を含む。またダイコンなどホウ素要求性の高い農産物の栽培には、農家はホウ素入り肥料を施用している。また、昔のチリ硝石や過リン酸石灰、カリウム肥料などにはホウ素が混在していた¹²⁾。

さらに詳しく見ると、亜鉛：2.5、マグネシウム：2.5、カルシウム：2.7、銅：3.3などが作物にとっては土壌から供給されにくい元素であることが分かる。

なお、表2に作物体の最大含有率と、充足量の比を示した。その比が100以上の元素は、作物種間差が大きいことを示す。これら元素は、たとえば、ケイ素やモリブデン、コバルトを考えると理解しやすいが、ヒトが農産物からこれら元素を摂取する際には作物種が重要であることを示している。ケイ素はイネ科植物に多く、モリブデンやコバルトは空中窒素固定に必要なためマメ科作物に多い。さらにモリブデンはこれら元素の内でも特異的で、作物体に過剰障害の出にくい元素で、土壌にモリブデンがあれば、作物体はいくらでも吸収する。そのため、島根県の鉢山周辺や兵庫県工場周辺などで牛にモリブデン過剰障害の例がある。ヒトの健康を考える際には、過剰施用や過剰摂取に注意の必要な元素の1つである^{1, 13)}。

表3 ヒトと植物体の元素濃度比

元素	ヒト(生体)	植物体(乾物)	植物/ヒト 比
	ppm		
N	30000	15000	0.50
Ca	15000	5000	0.33
P	10000	2000	0.20
S	2500	1000	0.40
K	2000	10000	5.00
Na	1500	10	0.01
Cl	1500	100	0.07
Mg	500	2000	4.00
Fe	87.5	100	1.14
F	42.8	—	—
Si	28.5	1000	35.09
Zn	28.5	20	0.70
Mn	1.43	50	34.97
Cu	1.14	6	5.26
Se	0.171	—	—
I	0.157	—	—
Mo	0.143	0.1	0.70
Ni	0.143	0.05	0.35
B	0.143	20	139.86
Cr	0.0285	—	—
Co	0.0214	0.1	4.67

ヒトと作物体の元素濃度比

表1と表2から作成したのが表3である。表3の右端に示す作物体/ヒトの比をみると、農産物を食するヒトは、農産物からホウ素、ケイ素そしてマンガンを多く摂取していることが明らかである。そこで本稿では特にケイ素、ホウ素について後に詳しく説明する。

日本人の食事摂取基準と実際の摂取量

ミネラルについての日本人の食事摂取基準(2005年版)と2008年5月に公表された平成18年度の摂取量調査結果の一部を表4に示す。ヒトの健康にミネラルが重要な働きをしていることは知っていても、各種ミネラルについて摂取推奨量等がきめ細かく定められていることを知らない方も多い。農業分野では公害による有害物としか

考えられていないクロムやセレンも、基準に定められているほどヒトの健康には重要な元素である。クロムは耐糖能障害の改善（糖尿病の予防）、セレンは活性酸素障害防御因子（発癌の予防）として働いているためである³⁾。

表4 ミネラルについての日本人の食事摂取基準(2005年版)と実際の摂取量(mg/日)

ミネラル	食事摂取基準(2005年版) 30~49歳(男性)の例					実際の摂取量	
	推定平均必要量	推奨量	目安量	目標量	上限量	30~39歳の摂取量	推奨量、目標量との比
K mg/日			2,000	2,900 (3,500)		2268	0.78 (0.65)
Na	600[1.5]			[10未満]		[11.6]	1.16
P			1,050		3,500	1052	1.00
Ca			650	600	2,300	485	0.81
Mg	310	370				252	0.68
Zn	8	9			30	9.3	1.03
Fe	6.5	7.5			55	8.0	1.07
Mn			4.0		11	—	
Cu	0.6	0.8			10	1.26	1.58
I μg/日	95	150			3,000	—	
Cr	35	40				—	
Se	30	35			450	—	
Mo	20	25			320	—	

実際の摂取量は平成18年分(2008年5月厚生労働省発表より抜粋)。—は未発表。
()は高血圧予防のための望ましい摂取量
[]内は食塩相当量、g/日

注：望ましい摂取量は、個人によって異なり、また個人内においても変動する。そのため、栄養学のみならず確率論的な考え方と、摂取量の範囲を示し、その範囲内では生活習慣病のリスクが低いとする考え方を導入している。

推定平均必要量：当該性・年齢階級に属する人々の50%が必要量を満たすと推定される1日の摂取量。

推奨量：ある性・年齢階級に属する人々のほとんど(97~98%)が必要量を満たすと推定される1日の摂取量。

目安量：前記二つを算出する十分な科学的根拠が得られない場合に、ある性・年齢階級に属する人々が、良質な栄養状態を維持するのに十分な量。

目標量：生活習慣病の一次予防のために当面の目標とすべき摂取量(または、その範囲)。

上限量：ある性・年齢階級に属するほとんどすべての人々が、過剰摂取による健康障害を起こすことのない最大の量。

実際の摂取量を公表されている元素は表4に示すように数少ないが、現代の日本人は、**カルシウム**だけでなく、**カリウム**や**マグネシウム**不足である。これらはいずれも肥料あるいは土壌改良資材として施用されるミネラルでもある。カリウムは高血圧予防に、マグネシウムはメタボリックシンドローム予防^{14, 15)}に必要である。これら3元素とも現代の日本人の食生活で不足気味であることは、農作物の施

肥適量を考える際の参考になる。

表5 食品のミネラル含有率

食品名	水分	mg/100g*										水分	μg/100g**								
		Na	K	Ca	Mg	P	Fe	Zn	Cu	Mn	Al		As	B	Cr	Mo	Ni	Se	Si		
玄米	15.5	1	230	9	110	290	2.1	1.8	0.27	2.05	16.4	110	4	140	19	120	14	9	4700		
精白米	15.5	1	88	5	23	94	0.8	1.4	0.22	0.80	11.6	110	1	34	9	66	27	4	450		
だいず	12.5	1	1900	240	220	580	9.4	3.2	0.98	1.90	12.1	580	28	1500	26	200	590	6	1100		
ほうれんそう	92.4	16	690	49	69	47	2.0	0.7	0.11	0.32	92.7	970	5	160	11	8	0	0	670		
りんご	84.9	Tr	110	3	3	10	Tr	Tr	0.04	0.03	86.1	21	>	160	3	0	0	0	32		
わかめ	89.0	610	730	100	110	36	0.7	0.3	0.02	0.05	92.2	2300	360	200	10	0/	0	4	1900		
きはだまぐろ	74.0	43	450	5	37	290	2.0	0.5	0.06	0.01	74.3	79	130	0	13	0	0	81	170		
ぶたロース	60.4	42	310	4	22	180	0.3	1.6	0.05	0.01	53.0	160	40	0	36	0	0	37	310		
推奨量・目標量			2900	600	370	1050	7.5	9.0	0.80	4.00					40	25			35		

*: 文部科学省「五訂食品成分表」(2006)

** : 鈴木泰夫著「食品の微量元素含量表」(1993) > 表示限界以下 0/ 定量限界以下検出限界以上

各種食品のミネラル含有率

各種食品のミネラル含有率の代表例を表5に示す^{16, 17)}。この表からも明らかのように農産物の**ホウ素**、**ケイ素**、**マンガン**含有率は、魚(キハダマグロ)や肉類(ぶたロース)よりはるかに高い。一方、農産物の**セレン**含有率は低い。すなわち日本の農産物からセレン供給は期待できにくいことがわかる。こうして表5をじっくりとみていると、農産物は、動物の必須元素である**ニッケル**、**モリブデン**のみならず、**銅**、**亜鉛**、**鉄**などの含有率も意外と高いこ

とがわかる。すなわち農産物はセレンとヨウ素（表5には示していない）を除く微量元素の重要な供給源である¹⁾。

草食動物、ウシに現れる微量元素欠乏、過剰症

表6 ウシに表れる微量元素欠乏症状

元素	欠 乏 症 状
Co*	食欲不振、体重減少、貧血
Cu**	食欲不振、成長阻害、被毛粗、貧血、下痢、毛の褪色、歩行困難、心筋萎縮による心臓麻痺、骨の異常、繁殖障害、運動失調
Fe	貧血
I	甲状腺肥大、死産、無毛仔分娩
Mn	骨異常、成長阻害、繁殖障害
Se***	白筋症、心臓麻痺、歩行困難、後産停滞、発育低下、下痢
Zn	皮膚の角化不全、口および鼻周辺部の炎症、脱毛、飛節部肥大、食欲減退、成長阻害

注) *わが国でも古くから発生。**わが国ではMoとSの過剰が関係した複合性銅欠乏症。***わが国では潜在的欠乏で白筋症の発生例はない。

にはならないことを示唆している。

一方、コバルト、銅、鉄、ヨウ素、マンガン、セレン、亜鉛などの不足が草食動物であるウシに日本あるいは世界のどこかで発生している。表現を換えると、地域の農作物だけを摂取

表7 ウシにおける微量元素の中毒症状

元素	毒性の表れる限界 (飼料乾物kg中mg)	外見的な症状
Cu	100	食欲減退、下痢、血尿、黄疸
F	40~100	食欲減退、体重減少、跛行
Mo*	10	元気喪失、食欲減退、体重減少、下痢
Se	2	呼吸困難、下痢、体重減少、失明、麻痺、毛や蹄の脱落
Cd	0.5	体重減少、食欲不振、貧血
Hg	2	下痢、運動失調、失明、麻痺
Pb	30	貧血、下痢、便秘、興奮、ふるえ、運動失調

注) *わが国では島根県のMo鉱山の下流と、兵庫県Moを扱う工場周辺で発生例がある。

フラミンガム研究は、1940年代からスタートした長期間の地域コホート研究で、同一地域に住む人を対象に、食生活や血圧、血清脂質等を調べた上で、長期間にわたり健康状態の変化を追跡調査している。高血圧、肥満、喫煙は、心臓病での死亡リスクが高いことを明らかにしたことで有名である。当初の「フラミンガム研究」に参加した人々の子供を対象にした「フラミンガム子孫研究」も1970年代より始まっている。今回の成果は「フラミンガム子孫研究」によるもので、米ハーバード大学、英セント・トーマス病院など英米5機関の共同による2847人を対象にした調査研究の結果、ケイ素摂取量と骨密度に関連性が認められた(図1)。

共同研究グループは、フラミンガム子孫研究の参加者2847人(男性1251人、女性1596

魚介類や肉を食べない草食動物であるウシに現れる微量元素の欠乏、中毒症状の例を表6、表7に示す¹⁸⁾。草食動物の微量元素の欠乏、過剰の発生状況を知ることは農産物のミネラル含有率のヒトの健康への影響を考える際の参考になる。表6や表7にホウ素やケイ素の欠乏障害や、中毒症状(過剰障害)は示されていない。このことは非常に重要で農作物(草)を食べ過ぎてもホウ素やケイ素中毒

していると、これらミネラル不足がヒトでも発生することがあり得ることを示唆している¹⁾。なお、銅の欠乏障害は脚注にも記載しているがモリブデン過剰障害が関係した銅欠乏障害で、単純な銅欠乏ではない。

2 ケイ素とホウ素の人体での作用

ケイ素はカルシウム以上に骨密度の上昇に重要

骨を丈夫にするためにはカルシウム以上にケイ素が重要であるとの報告が、「フラミンガム子孫研究」より2004年になされた¹⁹⁾。

人、年齢 30 ~ 87 歳) をグループに分け、背骨と大腿骨けい部などの骨密度 (BMD) を測り食事摂取などによるケイ素摂取量と BMD との関連性を研究した。その結果、男性や閉経前の女性ではケイ素摂取量が多いほど大腿骨頸部の BMD が高い。最もケイ素摂取量が多いグループ (1 日 40mg 以上) は最も少ないグループ (1 日 14mg 未満) と比較して BMD が 10 % 近く高いことが判明した。研究結果から男性と閉経前の女性については食事から

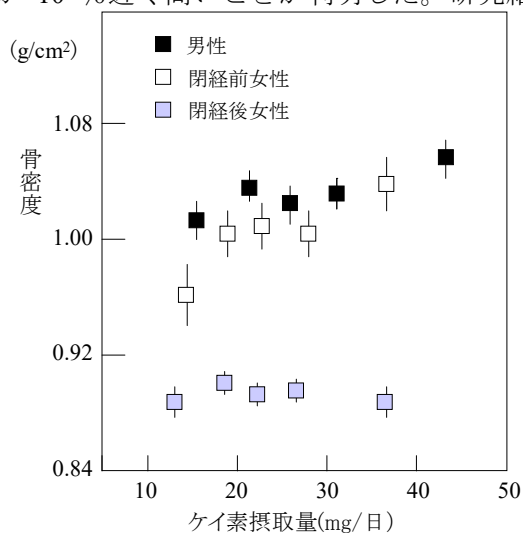


図1 ケイ素摂取量の骨密度(骨盤・大腿骨部)への影響 (Jugdaohsingh *et al.* 2004 より作図)

注) 被験者は、30~87歳の男性1251名、女性1596名。ケイ素摂取量は1991~1999年、骨密度は1996~2001年の調査による。

のケイ素摂取量が多いほど骨密度が高まる関連性が指摘された。図1がそのデータの一部である。

当初、このニュースを知った筆者は図1の引用をためらった。閉経後の女性にケイ素摂取の効果がないことをこの図は明確に示している。骨粗しょう症を本当に予防したい多くの高齢の女性に図1は希望を与えない。しかし、骨密度増加を年齢の若い内にしておこうとの考えもある。そうした方々へは非常に参考になる。また、図1は、骨密度増加には性ホルモンが関与していることを如実に示している。

しかもケイ素源としてビールの効果が著しいとのことであった^{19, 20)}。コムギのケイ素が醸造過程で可溶性のケイ素になりビール中に多く含まれるためである。確かにそれも事実だろうがどこか欠落している。ビール

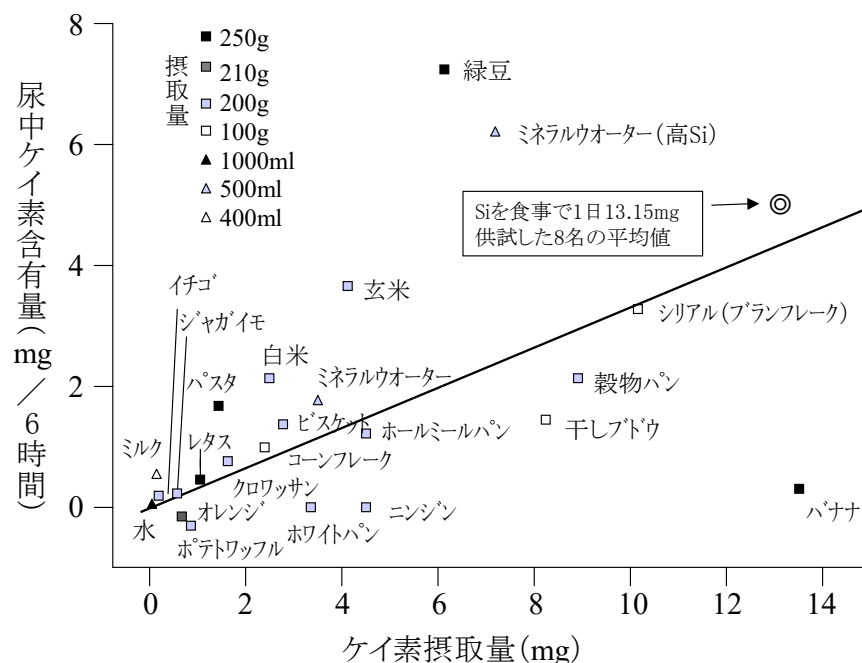


図2 ケイ素摂取量と尿中ケイ素含有量 (Jugdaohsingh *et al.* 2002より作図)

注: 摂取量に対して尿中ケイ素量が多いほど、その食品のケイ素可溶性率は高い。尿中ケイ素量を吸収量の指標として利用している。血清中ケイ素は、経口摂取2時間後にピークになり、腎臓を経由し、6時間内には尿より、大部分が排出されるため。

を飲まないヒトは骨粗しょう症の不安から救われない。穀物にはケイ素が多く含まれるがその可溶性率も知りたかった。同じ著者の過去の文献をみるとやはり研究されていた²¹⁾。それが図2である。それによると、ケイ素を高濃度含むミネラルウォーターや緑豆のケイ素可溶性率は

高い。調理された玄米のケイ素可溶化率も高い。一方、ケイ素含有率の高いバナナのケイ素可溶化率は低い。理由は不明である。全体として食事摂取ケイ素の約 40 %が可溶化して尿中に排出されている。

図 2 のデータの縦軸が尿中ケイ素濃度になっていて、それを食物のケイ素可溶化率の指

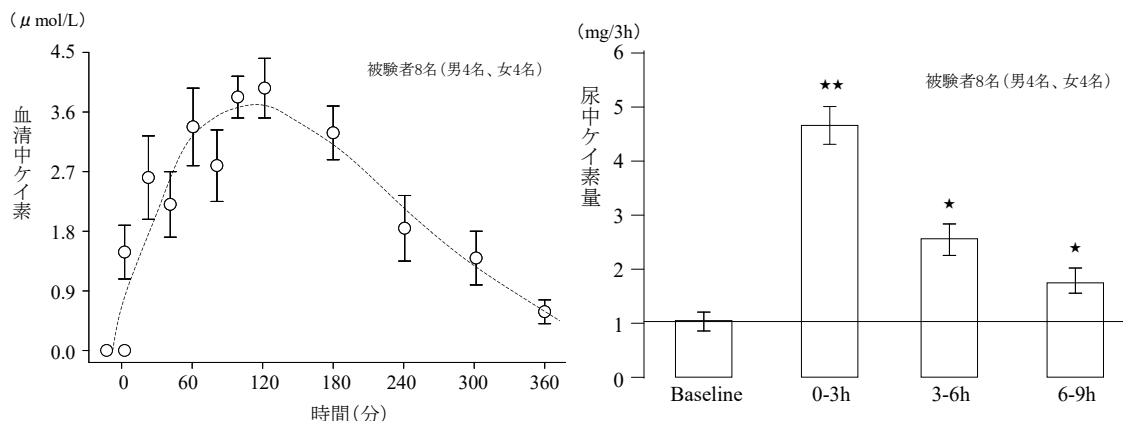


図3 13.15mgのケイ素を含む食事摂取後の血清中ケイ素濃度 (Jugdaohsingh et al. 2002) 図4 13.15mgのケイ素を含む食事摂取後の尿中ケイ素量 (Jugdaohsingh et al. 2002よりmolをmgに変更し引用)

標としている。その根拠を補足説明する。農産物中のケイ素はオルトケイ酸 $[\text{Si}(\text{OH})_4]$ の形態で根より吸収されるが、生体内で多量吸収されたオルトケイ酸は重合沈積して存在する。化学的には非晶質の含水ケイ酸 $(\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$ である²²⁾。大部分は糞便中に含まれて排泄されると考えられていた。しかし、ラットを用いた実験²³⁾によると、胃液中の塩酸と反応し、モノマーからポリマーまでの種々の反応物質を生じる。ここでモノマーを生じる割合が高ければ高いほど吸収されやすい。腸で吸収されるケイ酸量は胃で生成したオルトケイ酸の濃度に比例する。胃腸消化系で可溶性になったケイ酸陰イオン $[\text{オルトケイ酸 } \text{Si}(\text{OH})_4 \rightleftharpoons \text{Si}(\text{OH})_3\text{O}^-]$ が血清中に移行する。血清中のケイ素濃度は2時間後にはピークになり(図3)、その後腎臓を経由し尿へと排出される。3時間以内に尿からの排出量の65%近くが、6時間以内に90%近くが排出される(図4)。血液中に存在するケイ素はオルトケイ酸として存在し、タンパク質等の高分子化合物とは結合していない。血清中濃度は血中濃度の約1/2である。そして、ケイ素の血中濃度と尿中排出量の間には相関性が認められている²⁰⁾。したがって、尿中ケイ素濃度は体内に吸収される濃度の指標になると考えられている。

ケイ素はムコ多糖類に多く存在し、コラーゲン合成を促進

ケイ素は、体内では、皮膚に最も多く、爪・毛・髪・そして骨に多く存在している。古くから知られているように骨の成長維持にはケイ素が必要だが、皮膚、胸腺なども加齢とともにケイ素含有量が低下し、ヒトの動脈のケイ素含有量も加齢に伴って漸減し、特に「アテローム型の動脈硬化症」では激減すると報告されている。(注：アテローム型梗塞は比較的太い血管が細くなって詰まる。これに対してラクナ型梗塞は脳の深い部分にある細い動脈の血流が悪くなって生じる。)

コラーゲンなどの膠原繊維間にマトリックスとして存在するムコ多糖類にケイ素が多く結合している。胎児の成長、傷の治癒、動脈硬化症や骨肉節炎の治療、あらゆる老化性の退行性疾患にもケイ素は関与している。ケイ素が特に大切なのはムコ多糖類と結び付い

ていることである。加齢とともに皮膚中のケイ素含有率は減ることが知られているが、どの老化現象にも、ムコ多糖類の著しい減少が伴っている。ケイ素はコラーゲン、ムコ多糖類の炭素骨格に酸素を介して結合している^{5, 24)}。

ケイ素の不足は、動脈硬化の促進、爪の割れ、皮膚のたるみ、脱毛など色々な老化症状にも関係する。一般にホルモンの活動が低下すると、ケイ素の吸収率も代謝回転も衰えていくようである。

ここでは、コラーゲン合成に関する 2003 年の研究論文の 1 つ²⁵⁾を紹介する。ヒトの骨芽細胞様の培養細胞を用いた実験で、血液中とほぼ同程度の濃度である 10 ~ 20 μ mol/L 濃度のオルトケイ酸存在下でコラーゲンタイプ 1 の m RNA の発現やプロリン水酸化酵素活性が増加することが確認された。すなわちケイ素はコラーゲンの生成と骨芽細胞の分化を促進する作用がある。

コラーゲンとは、真皮、靭帯（じんたい：骨と骨を繋ぐ結合組織の束）、腱（骨格筋が骨に付着する部分の筋肉）骨、軟骨などを構成するタンパク質で動物の細胞外基質の主成分で、ヒトでは全タンパク質のほぼ 30 % を占める。

コラーゲタンパク質のペプチドを構成するアミノ酸は、グリシンーアミノ酸 X ーアミノ酸 Y と、グリシンが 3 残基ごとに繰り返す一次構造をもつ。タイプ 1 のコラーゲンは最も大量に存在するコラーゲンで、この X がプロリン、Y がヒドロキシプロリンが多く存在し、分子量は 10 万程度である。このペプチド鎖が 3 本集まり、縄をなうようにお互いに巻きついて、らせん構造を形成する。これがさらに少しずつづれてたくさん集まり、より太く長い繊維を作る場合があり、コラーゲン細線維と呼ばれる。骨や軟骨中、皮膚の真皮や腱などにもこのコラーゲン細線維がびっしりと詰まっている。なお、このヒドロキシプロリンを生成するのに前記のプロリン水酸化酵素が必要である。ビタミン C が補酵素として必要なため、ビタミン C が不足すると正常なコラーゲン合成ができなくなる²⁶⁾。

余談になるが、ビタミン C 不足はコラーゲン合成ができず壊血病の原因となり、キャプテン・クックの南太平洋探検(1768 ~ 1771 年)以前の長期航海では多くの船員が死亡したことで有名である。植物は細胞間接着にコラーゲンを用いず、セルロースを用いている。コラーゲンは動物と一部の原生生物に限られているが、植物におけるセルロースの役割と考えると理解しやすい。そのコラーゲン合成にケイ素が関与していることは非常に興味深い。

ホウ素が閉経後女性の血清中性ホルモン濃度を高く維持し、尿からのカルシウム排出量を低下

ケイ素が骨密度の増加に役立っていることを紹介したが、閉経後の女性には無力であった。しかし、文献を検索していると、閉経後の女性への朗報を見つけることが出来た。助け船を出してくれたのは、果物や野菜に豊富に含まれているホウ素であった。

ホウ素が健康な骨と関節を維持するのに重要な役割をはたすことは、米国農務省のノースダコタ州にあるグランドフォークス人類栄養学研究センターの Nielsen らによって 1987 年にすでに報告されていた(表 8)²⁷⁾。彼らは閉経後の 48 歳から 82 歳の女性 13 人を対象とした 167 日間の食事摂取研究を行い、ホウ素を 0.25mg/日と少ない食事をとったときと、その後 1 日 3mg のホウ素をサプリメントで投与したときのカルシウムとマグネシウムの尿中排泄量を比較したところ、ホウ素摂取は、有意にカルシウムの尿からの排出を抑

える。また、骨粗鬆症を含む更年期障害の症状を緩和することで知られているエストロゲンと呼ばれる女性ホルモンを血中に多く存在させる働きがあることを確認している。

実験、調査手法の細かい内容は表8の下に書いた。ヒトでの実験で大変な労力と費用がかかっている。供試したホウ素は、4 ホウ酸ナトリウム・10 水和物 ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) のためまさにホウ素の作用である。

ホウ素が骨粗しょう症の予防に役立つ以外に、脳の神経伝達系も活発にするとこのこれまで信頼できる研究データがある²⁸⁾。前記と同じ米国農務省の研究であるが50～78歳の閉経後の女性13人での実験や、44～69歳の男性5人それに閉経後の女性でエストロゲン摂取している5名とエストロゲン摂取をしていない5名の実験などである。一日3.25mg

表8 ホウ素投与が、尿中ミネラル、血清ホルモン値に及ぼす影響

Nielsen et al. (1987)²⁷⁾

ホウ素 投与量と その他 処理	低ホウ素					高ホウ素	
	平衡値		Al+	Mg+	Al+Mg+		Al+Mg+
尿中 Ca g/日	0.126	0.124 A	0.109 AB	0.125 A	0.127 A	0.090 B	0.081 B
尿中 Mg g/日	0.110	0.089 A	0.094 A	0.079 AB	0.095 A	0.074 AB	0.054 B
尿中 P g/日	0.61	0.66 AB	0.61 AB	0.70 A	0.52 B	0.59 AB	0.61 AB
血清 17β-エストラジオール pg/ml	23.9	11.9 A	15.0 A	26.9 AB	12.7 A	35.9 B	37.5 B
血清 テストステロン pg/ml	0.60	0.34 A	0.31 A	0.33 A	0.30 A	0.71 B	0.64 B

注:被試験者は、48～82歳の閉経後の女性13名で、試験期間中の167日間は、管理された代謝ユニット内で生活。13名の内一名はエストロゲンを服用しているため、血清ホルモン値の算入からは除外。低ホウ素食事は野菜、果物摂取量を極わずかにした牛肉、豚肉、米、パン、ミルクを含む通常の食事で、ホウ素(B)摂取量:0.25mg/日、ホウ素以外の不足するミネラル(K, Ca, Cu, Fe)、ビタミンD、葉酸は各々サプリメントで補充している。試験期間は最初の低ホウ素食事馴化期間23日後、24日間試験サイクル(計6回)で、最初の4サイクルでは、ホウ素摂取量は低いまま、Al:1000mg/日あるいはMg:200mg/日の摂取試験を実施している。Alは制酸剤の水酸化アルミニウムで、食事からのCaを不溶性にし、便中のCaを増やすとの報告があったため、MgはCa代謝への好影響がすでに報告されているため、その効果確認のため、グルコン酸マグネシウムで試験している。その後2回の試験サイクル(48日間)では、高ホウ素処理の影響を観察している。追加したホウ素3mgは、 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7/10\text{H}_2\text{O}$ (4ホウ酸ナトリウム・10水和物)で、1日のB摂取量は、3.25mgになる。

尿中ミネラルは、各試験サイクル7～8日の平均値。血清ホルモンは各試験サイクル23日目の平均値。表中ABは、同一文字は有意差($P>0.05$)が認められなかったことを示す。

17β-エストラジオール:女性ホルモン、エストロゲン的一种。テストステロン:男性ホルモン、アンドロゲン的一种。これらのホルモンは、骨からのカルシウムの放出を抑えている。男性ホルモンは加齢により急激に減ることはないが、女性ホルモンは閉経によって、最盛期の1/10まで低下し、それに伴い「カルシトニン」の分泌も減り、骨からのカルシウムが減少しやすくなる。

のホウ素摂取者は0.25mgの低ホウ素摂取者に比較して、数字や色の記憶力、反応力が高いというデータがある。ホウ素が神経細胞・ニューロン活性を活発にしている。

まとめ

以上は、「農産物ミネラルとヒトの健康」の視点でとりまとめた。土壌、人体、農産物の元素含有率を比較していると、農産物のヒトへのミネラル供給ではホウ素とケイ素を無視することができない。これらはいずれも人体の骨形成に関与していた。

両元素はいずれも動物での必須性が明らかになったのは遅い。ケイ素は1972年で、ホウ素は1998年である。日本の図書にはホウ素はまだ人間の必須元素として記載されてい

ない。しかし、両元素とも骨形成以外にも、多くの作用があった。

ケイ素はコラーゲンを作っていた。コラーゲンは植物ではセルロースに相当する。多細胞生物である動物は、細胞（器官）間接合にコラーゲンが主たる役目をしている。ホウ素は、記憶や敏捷性などに関与する神経細胞、ニューロンに非常に重要な役割もしていた。

すなわち、私たちの使用する肥料、土壌改良資材は、作物だけでなくヒトの健康にも役立っているのである。

引用文献

- 1) 渡辺和彦：土壌中ミネラルと農産物、糸川嘉則編、ミネラルの科学と最新応用技術、pp.194～211、シーエムシー出版（2008）
- 2) 渡辺和彦：ミネラル管理の重要性・作物と人の健康、「食と健康・予防医療を考えるーミネラルと油脂栄養の重要性」、土肥学会愛知大会公開シンポジウム（2008）
- 3) 桜井弘：生命元素事典、オーム社（2006）
- 4) Epstein E. and A.J. Bloom：Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives. 2nd Ed, Sinauer（2005）
- 5) 渡辺和彦著、作物の栄養生理最前線ーミネラルの働きと作物、人間の健康、農文協（2006）
- 6) Fort DJ, Propst TL, Stover EL, Strong PL, Murray FJ. : Adverse Effects of Insufficient Boron in *Xenopus*. *Biol. Trace Elem. Res.*, **66**, 237～259（1998）
- 7) Takano J., K. Noguchi, M. Yasumori, M. Kobayashi, Z. Gajdos, K. Miwa, H. Hayashi, T. Yoneyama and T. Fujiwara : Arabidopsis boron transporter for xylem loading. *Nature*, **420**, 337～340（2002）
- 8) Park M, Q. Li, N. Shcheynikov, W. Zeng and S. Muallem : NaBC1 is a ubiquitous electrogenic Na⁺-coupled borate transporter essential for cellular boron homeostasis and cell growth and proliferation. *Molecular Cell*, **5**, 331～341（2004）
- 9) Nielson FH., The saga of boron in food: from a banished food preservative to a beneficial nutrient for humans. *Curr. Top Plant Biochem. Physio.*, **10**, 274～286（1991）
- 10) Bowen HJM., Trace Elements in Biochemistry, Academic Press（1966）
- 11) Sumner ME. Ed., Handbook of Soil Science, CRC Press（2000）
- 12) (財)日本土壌協会、肥料中の有害物質の挙動に関する文献及び肥料の安全性に関する国際的な制度の調査報告書、内閣府食品安全委員会事務局平成17年度食品安全確保総合調査報告書（2006）
- 13) 渡辺和彦：最近目立つ野菜のミネラル不足はこう補う（その10）作物のモリブデン必要量は少ないが、多量施用で青い花の作出も可能。ヒトには悪酔い防止に効果、ひろがる農業116、8～12（2006）
- 14) He K., Kiang Liu, ML. Daviglus, SJ. Morris, CM. Loria, LV. Horn, DR. Jacobs, and P. J. Savage : Magnesium Intake and Incidence of Metabolic Syndrome Among Young Adults. *Circulation*, **113**, 1675～1682（2006）
- 15) 渡辺和彦：日本人はマグネシウム不足＝人の健康から肥料を考える＝、季刊肥料、105

号、101～109 (2006)

- 16) 文部科学省資源調査分科会報告, 五訂増補日本食品標準成分表 (2005)
- 17) 鈴木泰夫, 食品の微量元素含量表, 第一出版 (1993)
- 18) 川島良治, 家畜における微量元素, 木村修一ら編「微量元素と生体」, 秀潤社 (1987)
- 19) Jugdaohsingh R, KL. Tucker, N. Qiao, LA. Cupples and DP. Kiel : Dietary Silicon Intake Is Positively Associated With Bone Mineral Density in Men and Premenopausal Women of the Framingham Offspring Cohort. *J. Bone Miner. Res.*, 19, 297～307 (2004)
- 20) Bellia JP, Birchall JD, Roberts NB. : Beer: a dietary source of silicon. *The Lancet.* 343, 235 (1994)
- 21) Sripanyakorn S., R. Jugdaohsingh, H. Elliott, C. Walker, P. Mehta, S. Shoukru, RPH. Thompson and JJ. Powell : The Silicon Content of Beer and its Bioavailability in Healthy Volunteers, *British Journal of Nutrition*, 91, 403～409 (2004)
- 21) Jugdaohsingh R., S. HC. Anderson, K. L Tucker, H. Elliott, D. P Kiel, R. PH Thompson, and J. J Powell : Dietary Silicon Intake and Absorption. *Am J Clin Nutr.*, 75, 887～93 (2002)
- 22) 高橋英一著 : 作物にとってケイ酸とは何か、農文協 (2007)
- 23) Yokoi H, Enomoto S. Effect of Degree of Polymerization of Silicic Acid on the Gastrointestinal Absorption of Silicate in Rats. *Chem. Pharm. Bull.* 27, 1733～1739 (1979)
- 24) 千葉百子、鈴木和夫編 : 健康と元素—その基礎知識, 南山堂 (1996)
- 25) Reffitt DM, N. Ogston, R. Jugdaohsingh, HF. Cheung, BA. Evans, RP. Thompson, JJ. Powell and GN. Hampson. : Orthosilicic Acid Simulates Collagen Type 1 Synthesis and Osteoblastic Differentiation in Human Osteoblast-like Cells in vitro. *Bone.* 32, 127～135 (2003)
- 26) コラーゲン : フリー百科事典ウィキペディア
- 27) Nielsen FH., CD. Hunt, LM. Mullen, and JR. Hunt : Effect of dietary boron on mineral, estrogen, and testosterone metabolism in postmenopausal women, *FASEB J.* 1, 394～397 (1987)
- 28) J. G. Penland : Dietary Boron, Brain Function, and Cognitive Performance, *Environ.. Health Perspect.* 102, 65～72 (1994)
- 29) 渡辺和彦 : 骨粗しょう症対策に農産物ミネラル、ホウ素とケイ素—健康な人体の源は何と! 作物を育てる肥料、土壌改良資材であった、季刊肥料、110号、17～27 (2008)

本稿は季刊肥料、引用文献 29) への投稿原稿でもある。